

7. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 6.-7. rujna 2021., Zagreb : zbornik radova

Lulić, Luka; Stepinac, Mislav; Čudina, Ivan; Skejić, Davor; Tešić, Ksenija; Baričević, Ana; Serdar, Marijana; Kovačević, Martina; Potočki, Kristina; Kralj, Anton; ...

Edited book / Urednička knjiga

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

Publication year / Godina izdavanja: **2021**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:870778>

<https://doi.org/https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2021>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-07**

Repository / Repozitorij:

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



7. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

6.– 7. rujna 2021., 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., 2021.

Naklada

150 kom.

ISBN

ISBN: 978-953-8168-50-5

DOI

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2021>

Zagreb, rujan 2021.

CIP zapis

je dostupan u računalnome katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 001110218.

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

7. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

6.-7. rujna 2021., 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
Prof.dr.sc.	Davor Skejić	Zavod za konstrukcije
Izv.prof.dr.sc.	Dora Pokaz	Zavod za matematiku
Prof.dr.sc.	Ivana Banjad Pečur	Zavod za materijale
Izv.prof.dr.sc.	Mladen Vukomanović	Zavod za organizaciju, tehnologiju i menadžment
Doc.dr.sc.	Ivo Haladin	Zavod za prometnice
Izv.prof.dr.sc.	Ana Skender	Zavod za tehničku mehaniku
Izv.prof.dr.sc.	Silvio Bašić	Samostalna Katedra za zgradarstvo

Predgovor

Simpozij doktorskog studija koji se na Građevinskom fakultetu održava već sedmu godinu za redom, osmišljen je još 2015. godine s ciljem razvijanja istraživačkog rada, usvajanja znanstvene metodologije i kritičkog mišljenja doktoranada. Na ovogodišnjem simpoziju doktorandi su u svojim radovima prikazali mnoštvo zanimljivih istraživanja iz različitih istraživačkih grana. Većina radova izrađena je u okviru znanstveno-istraživačkih projekata Hrvatske zaklade za znanost, Europskog fonda za regionalni razvoj i drugih istraživačkih projekata koji se provode na Građevinskom fakultetu. Doktorandi u svojim radovima prikazuju pregled stanja područja i preliminarna istraživanja koja se odnose na razvoj inovativnih materijala, metoda, tehnologija, sustava i načina projektiranja u građevinarstvu, a uzimajući u obzir utjecaj klimatskih promjena na ljude i okoliš, potrebu za većom trajnosti i sigurnosti građevina uz istovremeno optimiziranje korištenih resursa. Pojedini će doktorandi prvi puta izlagati svoje znanstvene radove pred svojim kolegama, mentorima i drugim nastavnicima te će na taj način steći vrijedno iskustvo i dobiti povratne informacije o napretku svoga istraživanja. Na dosadašnjih šest simpozija održano je gotovo 100 izlaganja doktoranada, a ako se tome pridodaju i pozvana predavanja te predavanja o iskustvima s dodatnog obrazovanja i usavršavanja zaposlenika, razumljiva je vrijednost ovoga simpozija za znanstvenu zajednicu Građevinskoga fakulteta, ali i društva u cjelini. Istraživanja koja se provode u okviru doktorskih radova na poslijediplomskom doktorskome studiju Građevinarstvo, gotovo uvijek su razvojna i primijenjena, a često se provode i u suradnji s građevinskim tvrtkama. Posljedica je to i velikog angažmana mentora pri realizaciji nacionalnih i međunarodnih projekata te uske suradnje s građevinskim tvrtkama što rezultira novim idejama i poboljšanjima postojećih procesa u građevinarstvu. Ovim simpozijem, doprinosi se još boljoj suradnji s gospodarstvom s ciljem da se zajedničkim resursima dođe do razvoja inovativnih materijala, sustava i tehnologija primjenjivih u praksi.

Doktorandi na svojem putu do stjecanja doktorske diplome nailaze na mnogobrojne izazove i pred njima su od trenutka upisa na poslijediplomski doktorski studij stotine pa i tisuće sati mukotrpnoga rada, počevši od analize postojećeg stanja u području istraživanja, prepoznavanja mogućeg izvornog znanstvenog doprinosa doktorskoga rada, osmišljavanja i provođenja zahtjevnih eksperimentalnih istraživanja ili modeliranja te sinteze samoga rada, odnosno donošenja zaključaka. U svemu tome neizmjernu pomoć i podršku doktorandima pružaju mentori, ali i drugi nastavnici, asistenti i laboranti te suradnici iz industrije koji često omogućavaju praktično provođenje istraživanja i savjetuju doktorande oko pojedinih specifičnih detalja. Stoga, vjerujemo da će sudjelovanje doktoranada na ovom simpoziju omogućiti doktorandima potvrdu njihovog smjera istraživanja ili dobivanje novih smjernica kako bi na

svom putu do završetka doktorskog studija nailazili na što manje prepreka i kako bi ostali ustrajni u svome naumu da u roku završe doktorski studij i da stečene kompetencije i vještine primijene u nastavku karijere bilo u znanstvenoj zajednici, bilo u gospodarstvu.

Organizacijski odbor simpozija koji čine članovi Odbora za znanost Građevinskoga fakulteta zahvaljuje autorima radova i recenzentima koji su omogućili održavanje 7. Simpozija doktorskog studija Građevinarstva. Svim sudionicima simpozija, a osobito doktorandima i njihovim mentorima želimo uspješna izlaganja, zanimljive diskusije i razmjene iskustava koje će doprinijeti novim saznanjima, novim idejama, suradnjama i mogućnostima poboljšanja te uspješnom završetku doktorskog studija.

Zagreb, 18. kolovoza 2021.

Urednica



Prof.dr.sc. **Nina Štirmer**

Sadržaj

Predgovor	5
Ispitivanje ziđa plosnatim prešama Luka Lulić, doc.dr.sc. Mislav Stepinac	9
Flexural buckling of aluminium columns - Research review Ivan Čudina, Prof. Davor Skejić	21
Influence of corrosion-induced damage in reinforced concrete on GPR signal parameters Ksenija Tešić, Asst. Prof. Ana Baričević, Asst. Prof. Marijana Serdar	35
Mogući pristup analizi procesa podlokavanja oko stupova mostova nastalih pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara Martina Kovačević, doc.dr.sc. Kristina Potočki	45
Behaviour of thin-walled cold-formed steel structures in fire Anton Kralj, Prof. Davor Skejić	59
Keramici slični anorganski polimerni materijali: uporaba boksitnog ostatka Marko Rukavina, doc.dr.sc. Marijana Serdar	73
Analiza mogućnosti primjene daljinskih istraživanja u popunjavanju nedostajućih podataka u operativnom sustavu hidroloških prognoza Mirza Sarač, izv.prof.dr.sc. Damir Bekić, doc.dr.sc. Mateo Gašparović	81
Metodologija procjene karakteristika odbačene kaverne nastale uz riprap zaštitu od podlokavanja Robert Fliszar, doc.dr.sc. Gordon Gilja	95
Review of thermal performance of LSF walls used for nZEB: Influence of components Tomislav Ščapec, doc.dr.sc. Marija Jelčić Rukavina	107
Mogućnosti upotrebe otpadnih vlakana u cementnim kompozitima visokih uporabnih svojstava Katarina Didulica, doc.dr.sc. Ana Baričević	123
Izložnost tipskih zgrada u Zagrebu izgrađenih u drugoj polovini 20. stoljeća Tea Žagar, izv.prof.dr.sc. Mario Uroš, izv.prof.dr.sc. Josip Atalić	135
Synergy of red mud, calcined clay and limestone in cementitious binders Ivana Vladić Kancir, Asst. Prof. Marijana Serdar	151

Strength development of calcium aluminate cement with slag Alma-Dina Bašić, Martina Grubor, PhD, Asst. Prof. Marijana Serdar, Ingrid Mikanovic, Msc, Günther Walenta, PhD	161
Assessing chemical reactivity of blast furnace slag as supplementary cementitious material Josipa Skočibušić Pejić, Martina Grubor, PhD, Asst. Prof. Marijana Serdar, Markus Schmid, PhD, Günther Walenta, PhD	171
Bond coefficients of beams reinforced with FRP and strengthened with FRC fibres Besart Avdyli, Prof. Tomislav Kisicek, Prof. Naser Kabashi	181
Mogućnosti primjene seizmičkih metoda u plićem podmorju Božo Padovan, doc.dr.sc. Lovorka Librić	193
Metode proračuna za određivanje prividne energije aktivacije Petra Štefanec, izv.prof.dr.sc. Ivan Gabrijel	203
Utjecaj otvora na krutost naknadno prednapetih ploča Krešimir Tarnik, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček	211
Usavršavanja	223
Pozvana predavanja	229
Sažeci obranjenih doktorskih radova: rujan 2020. - srpanj 2021	233

Ispitivanje ziđa plosnatim prešama

Luka Lulić¹, doc.dr.sc. Mislav Stepinac²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, luka.lulic@grad.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mislav.stepinac@grad.unizg.hr

Sažetak

Procjena stanja postojećih građevinskih konstrukcija od velikog je sigurnosnog i ekonomskog značenja za gospodarenje građevinskim fondom. Brojnost, starost i potresna ranjivost zidanih konstrukcija posebno naglašavaju potrebu za kvalitetnim uvidom u trenutačno stanje konstrukcija. Bitan korak pri procjeni stanja su svakako istražni radovi. Uz mnogobrojne metode za ispitivanje zidanih konstrukcija jedna od korisnijih ispitnih metoda koristi plosnate preše. Takozvana flat-jack metoda polurazorna je metoda ispitivanja zidanih konstrukcija koja omogućuje uvid u nekoliko ključnih karakteristika materijala. Stoga, u nastavku rada detaljno je obrađen postupak pripreme i provedbe tri razine ispitivanja zidanih građevina plosnatim prešama.

Ključne riječi: plosnate preše, ziđe, terenska ispitivanja, postojeće građevine, potres

In-situ testing of masonry with flat-jacks

Abstract

Assessment of existing structures is of great safety and economic importance for building stock management. The number of masonry structures, their age and seismic vulnerability further emphasizes the need for quality insight into the current state of structures. An important step in the assessment of existing structures is certainly in-situ testing. One of the most useful tests is the flat-jack method. It is a semi-destructive method of testing masonry that provides insight into several key characteristics of the material. Therefore, this paper describes in detail the process of preparation and implementation of three levels of testing of masonry buildings with flat-jacks.

Key words: flat-jacks, masonry, in-situ testing, existing structures, earthquake

1 Uvod

Hrvatska je jedna od seizmički najugroženijih država Europe [1]. Dubrovnik i okolica imaju najveći potresni hazard, odnosno najveću vjerojatnost seizmičkog događaja određenog intenziteta, a zagrebačko područje karakterizira najveći potresni rizik (kombinacija potresnog hazarda, izloženosti i ranjivosti) u Hrvatskoj. Nedavni potresi u Zagrebu, Petrinji i Dalmaciji probudili su svijest o potresima u stručnoj, ali i općoj populaciji. Dugi period seizmičke neaktivnosti ostavio je trag koji je rezultirao neadekvatnim održavanjem, nestručnim adaptacijama kao i energetskim obnovama fasada postojećih konstrukcija bez razmišljanja o nužnim konstrukcijskim pojačanjima. Značajni dio hrvatskoga građevinskog fonda građen je tradicionalnim materijalima kao što su opeka (nosivi i pregradni zidovi) i drvo (međukatne konstrukcije i krovništa). Znatni dio takvih konstrukcija blizu je ili je već prešao planirani životni vijek uporabe. Također, veliki dio građevina izgrađen je prije protupotresnih propisa ili u vrijeme prvih propisa koji su simbolični u odnosu na današnje potresne zahtjeve. Postojeće zidane konstrukcije najčešće su nearmirane te su zbog velike krutosti, male duktilnosti kao i male potresne otpornosti iznimno ranjive i podložne značajnim oštećenjima pri izlaganju potresnom djelovanju. Posljedice i potvrda navedenog vidljivi su nakon razornih potresa u Zagrebu [2] i Petrinji (slika 1.). Kako bi se saznalo trenutačno stanje postojećih građevina, procijenio preostali kapacitet potresne otpornosti te odlučilo o opsežnosti sanacije i pojačanja konstrukcija, važno je detaljno i pouzdano znanje o karakteristikama građevina. Primjenjuju se razne metode pri ocjenjivanju postojećeg stanja građevina koje podrazumijevaju vizualne metode [3], terenska i laboratorijska ispitivanja [4], moderne tehnologije [5] te mnoge druge metode [6]. Norme i stručna literatura također daju preporuke materijalnih karakteristika za validaciju dobivenih podataka ili za njihovu uporabu pri odsutnosti podataka zbog nedostatnih istražnih radova [7]. Spomenutom problematikom bavi se znanstveni projekt ARES u sklopu kojeg su rađena ispitivanja s nekima od nabrojanih metoda. U nastavku rada detaljno je obrađena metoda s plosnatim prešama.



Slika 1. Zidane građevine oštećene u potresu

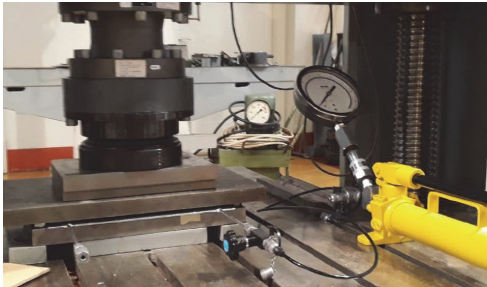
2 Plosnate preše

Krajem 20. stoljeća počinje uporaba plosnatih preša (flat-jackova) u građevinarstvu. Prije toga korištene su pretežito za geotehnička ispitivanja pri određivanju stanja naprezanja u stijenama. S godinama se sustav razvijao pa danas postoje različiti oblici plosnatih preša koje se izrađuju od čelika ili aluminijski. Za punu opremu potrebna su značajna ulaganja, a sama ispitivanja su vremenski zahtjevna. Unatoč tome, preciznost i vrijednost dobivenih podataka opravdavaju uloženo vrijeme i trud. Metoda se ubraja u polurazorne istražne radove te je pronašla najrašireniju uporabu u zidanim konstrukcijama. Metodologija samog ispitivanja razvijena je u obliku američkih [8–10] i europskih [11, 12] inačica normi. Ispitivanje se obavlja na gradilištu te se razlikuju tri metode ispitivanja kojima se dobiju vrijedni podaci o promatranoj konstrukciji.

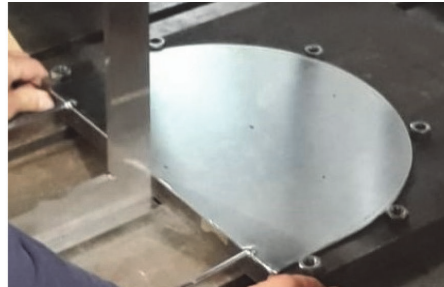
2.1 Kalibracija

Cijela metoda temelji se na prijenosu naprezanja s plosnate preše na zidu. Uvjet za prijenos naprezanja je kontakt između preše i zida koji se ostvaruje povećanjem volumena preše. Promjena volumena preše uzrokuje deformaciju čelične konstrukcije same preše. Na spomenutu deformaciju “troši” se dio hidrauličnog pritiska u preši. Stoga, ostvareni pritisak u plosnatoj preši ne prenosi se u cijelosti na zidu. Navedeni gubitak pritiska uzima se u obzir korekcijskim faktorom K_m koji se određuje postupkom kalibracije (slika 2.). Kalibracija se provodi u laboratoriju na preši minimalne nosivosti 10 tona (100 kN) [8]. Plosnata preša stavlja se između dvije čelične ploče dovoljno velike debljine (50 mm) [8, 11], odnosno dovoljno velike krutosti kako se ploče ne bi deformirale prilikom prijenosa opterećenja te time utjecale na točnost rezultata. Rub plosnate preše poravnava se s rubom čeličnih ploča da se ventili plosna-

te preše ne oštete. Između čeličnih ploča postavljaju se čelični distanceri debljine malo veće od debljine plosnate preše da se izbjegne oslanjanje čelične ploče na plosnatu prešu te time utječe na točnost rezultata (slika 3.).



Slika 2. Postupak kalibracije



Slika 3. Postavljanje distancera

Čelične ploče u potpunosti moraju prekriti plosnatu prešu i unos sile iz preše trebao bi biti točno u težištu plosnate preše (+/- 6 mm). Prešom se pritisnu dvije čelične ploče silom od 3 do 6 kN, ovisno o veličini plosnate preše, kako bi se ostvario stabilan kontakt s distancerima [8, 11]. Na plosnatu prešu ne prenosi se ta sila jer je njena debljina manja od debljine distancera. Tijekom nastavka kalibracije pomak klipa preše drži se konstantnim i mjeri se sila kojom plosnata preša pritišće čeličnu ploču odnosno prešu. Plosnata preša puni se uljem pomoću hidraulične ručne pumpe koja na sebi ima analogni tlakomjer te se na taj način stvara pritisak u plosnatoj preši. S porastom pritiska plosnata preša se deformira te joj se povećava volumen odnosno debljina. Debljina se povećava sve dok se ne ostvari kontakt sa čeličnom pločom. U tom trenutku pritisak se prenosi na veliku prešu i može se pratiti promjena tog pritiska u obliku sile na preši. Sada je poznat iznos pritiska u plosnatoj preši (tlakomjer na pumpi) i njena bruto površina. S druge strane poznat je iznos sile u velikoj preši koja je posljedica pritiska u plosnatoj preši. Ono što se traži jest efektivna površina plosnate preše odnosno konstanta plosnate preše koja pomnožena s bruto površinom daje traženu efektivnu površinu. Dakle, $K_m = A_e / A_b$ i uvijek vrijedi $K_m < 1,0$ jer uvijek postoji određeni gubitak pri deformaciji plosnate preše. Odnos pritiska u plosnatoj preši i prenesene sile na prešu prikazan je izrazima (1) i (2):

$$p_{pp} = \frac{N_p}{A_b \cdot K_m} = \frac{N_p}{A_b \cdot \frac{A_e}{A_b}} = \frac{N_p}{A_e} \quad (1)$$

$$A_e = \frac{N_p}{p_{pp}} \quad (2)$$

gdje je:

p_{pp} – pritisak u plosnatoj preši

N_p – sila u preši

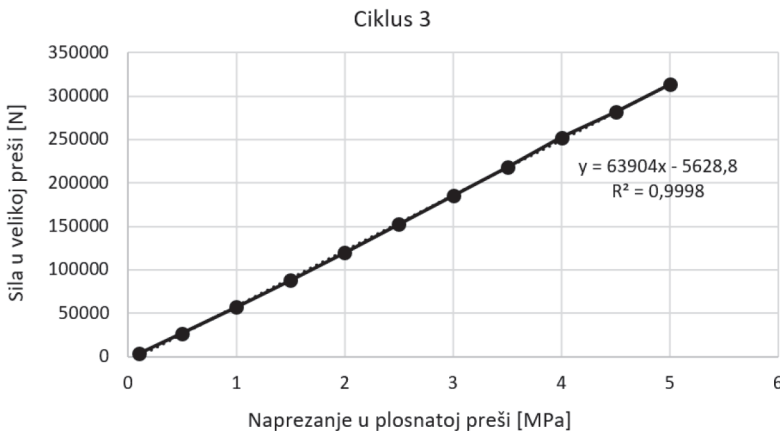
A_b – bruto površina plosnate preše

K_m – konstanta plosnate preše

A_e – efektivna površina plosnate preše

Postupak opterećenja (preko hidraulične pumpe) i rasterećenja prilikom kalibracije izvodi se tri puta za svaku plosnatu prešu te se za ispitivanje koristi srednja vrijednost dobivene konstante K_m . Za vrijeme kalibracije ne smije se dosegnuti vršna vrijednost dopuštenog pritiska u plosnatoj preši koju definira proizvođač, a prema [11] ta vrijednost pritiska iznosi 70 bara. Također, pritisak je potrebno podizati postupno te bi bilo u skladu s normama [8, 11] provoditi kalibraciju u deset koraka s prirastom pritiska u plosnatoj preši od 0,5 bar-a pri svakom koraku. Na svakom koraku bilježi se sila u velikoj preši i pritisak u plosnatoj preši te ih se grafički prikazuje radi daljnje obrade i bolje vizualizacije. U nastavku (slika 4.) prikazan je dijagram dobiven pri kalibraciji poluovalne plosnate preše dimenzija 350 x 260 x 4,5 mm.

Na horizontalnoj osi je pritisak u plosnatoj preši, a na vertikalnoj osi je sila u preši. Povezivanjem točaka dobije se pravac čiji nagib definira vrijednost efektivne površine plosnate preše. Omjer dobivene efektivne površine i bruto površine daje konstantu plosnate preše K_m . Proces kalibracije potrebno je ponoviti nakon pet ispitivanja.



Slika 4. Dijagram dobiven kalibracijom

2.2 Stanje naprezanja

Podatak o trenutačnom tlačnom naprezanju u zidu od velike je važnosti zato što posmična otpornost zida ovisi o njoj. Obično se stanje naprezanja procjenjuje analitički analizom opterećenja ili preko numeričkog modela pomoću računalnog programa. Kvalitetno odrađeno ispitivanje plosnatim prešama trebalo bi povećati razinu pouzdanosti rezultata. Za početak potrebno je odrediti lokaciju odnosno zid unutar građevine koji je reprezentativan, pristupačan i bez vertikalnih otvora ili instalacija. Sama ispitivanja po etažama bilo bi dobro vertikalno poravnati kako bi se dobio uvid u promjenu naprezanja po visini. Zato je prethodno potrebno pronaći zid koji je kontinuiran po visini. Zatim se pristupa skidanju završnih slojeva zida. Nakon uklanjanja žbuke određuje se mjesto za jednu plosnatu prešu i mjerne točke. Kako bi se preša mogla ugraditi, potrebno je napraviti otvor u zidu. Otvor bi trebao biti što sličniji obliku plosnate preše te je za poluovalni oblik najprikladnija ekscentrična prstenasta pila. U pravilnom zidu rez bi trebao biti u horizontalnoj sljubnici, a kod nepravilnog kamenog zida rez prolazi kroz mort i kroz kamen. Rez mora biti udaljen od otvora ili ruba zida za minimalno 1,5 duljinu preše te smije biti najviše 12 mm veći od duljine preše. Debljina otvora treba biti minimalno veća od debljine preše. Po potrebi se mogu koristiti tanke čelične ploče u obliku preše kako bi se što bolje ispunio otvor i kako bi se zaštitila preša. Nakon izrade otvora potrebno je izmjeriti površinu otvora kako bi se uzeo u obzir utjecaj veličine otvora na rezultate. Mjerne točke lijepe se u paru u tri ili četiri vertikalne ravnine okomito na otvor te moraju biti horizontalno odmaknute od ruba otvora za 1/8 duljine preše [8, 11]. Parovi točaka lijepe se dvokomponentnim ljepilom na opeku (nikako na mort) na vertikalnom razmaku 0,3 – 1,0 duljine preše, iznad i ispod otvora. Slike 4.a i 4.b prikazuju pripremljeno mjesto ispitivanja. Prije izrade otvora izmjeri se udaljenost mjernih točaka koristeći prijenosni komparator rezolucije tisućinke milimetra. Nakon reza mjerenje se ponavlja. Razlika mjerenja iznos je progiba dijela zida zbog relaksacije naprezanja. Cilj metode je smanjiti progib unošenjem tlačnog naprezanja u zidu preko plosnate preše. Pritisak na kojem se progib vratio na nulu jednak je tlačnom naprezanju u zidu. Pritisak očitani u preši potrebno je reducirati s konstantom plosnate preše i s omjerom bruto površine preše i površine otvora kako bi se uzeli u obzir prije spomenuti utjecaji. Tlačno naprezanje u zidu prema [8] određuje se izrazom (3):

$$\sigma_{astm} = K_m \cdot K_a \cdot p \quad (3)$$

gdje je:

K_m – konstanta plosnate preše

K_a – omjer bruto površine plosnate preše i površine otvora

p – pritisak u plosnatoj preši

Nakon ugradnje preše i prije početka ispitivanja potrebno je dignuti pritisak u preši na otprilike polovicu očekivanog ukupnog pritiska i zatim vratiti pritisak na nulu kako bi se preša što bolje smjestila u otvoru [8, 11]. Samo ispitivanje provodi se u minimalno osam koraka s koracima od najmanje 0,5 bara [11]. U svakom koraku očitava se razmak mjernih točaka nakon stabilizacije pritiska na tlakomjeru (0,5 – 1 min nakon povećanja pritiska). Razmak se mjeri na svim parovima mjernih točaka te se sve mjeri tri puta od kojih se uzima srednja vrijednost. Ispitivanje je završeno kada se ostvari razmak koji je bio prije rezanja otvora. U tom trenutku očitava se pritisak u preši, korigira se spomenutim faktorima te se pretvori u tlačno naprezanje u zidu. Prema [11] tlačno naprezanje u zidu određuje se izrazom (4):

$$\sigma_{\text{rilem}} = K_e \cdot p \cdot \frac{A_o}{A_e} \quad (4)$$

gdje je:

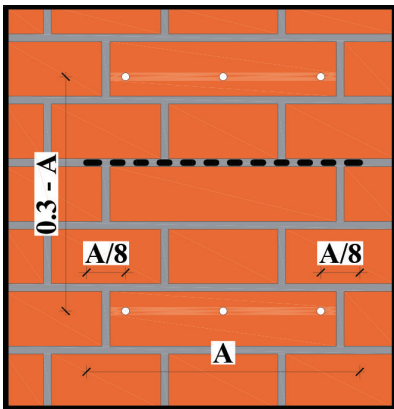
K_e – koeficijent tipologije ziđa (0,83 za uobičajene europske zidne elemente)

p – pritisak u plosnatoj preši

A_o – površina otvora

A_e – efektivna površine plosnate preše

U nastavku je prikazana skica s dimenzijama ispitnog mjesta te ispitno mjesto sa studije slučaja (slika 5.).



Slika 5. a) Skica ispitnog mjesta, b) Ispitno mjesto sa studije slučaja

2.3 Modul elastičnosti

Nakon određivanja tlačnog naprezanja u židu slijedi postupak određivanja modula elastičnosti. Potrebne su dvije preše gdje se otvor za drugu prešu radi iznad već ugrađene preše na udaljenosti 1 – 1,5 duljine preše. Također, između preša mora biti barem pet redova opeke [12]. Sve to za izradu prvoga otvora vrijedi i za drugi otvor koji bi trebao biti isti jer se koriste iste preše. Broj mjernih točaka ostaje isti, ali njihov položaj je sada između preša. Njihova vertikalna udaljenost treba biti barem 20 cm [9], odnosno 75-90 % udaljenosti ugrađenih preša [12]. Rubne mjerne točke opet je potrebno uvući za 1/8 duljine preše. S obzirom na to da se pri određivanju modula elastičnosti sva mjerenja izvode nakon rezanja, mogu se koristiti i LVDT-ovi (linearni varijabilni diferencijalni transformator) umjesto prijenosnih komparatora. LVDT-ovi odnosno induktivni senzori imaju znatno veću pouzdanost pri mjerenju. Također, ubrzavaju i olakšavaju mjerenje te omogućuju kontinuirani zapis pomaka kao i automatski grafički prikaz promjene u vremenu. Prije početka mjerenja potrebno je povećati pritisak u preši na otprilike polovicu očekivane čvrstoće žida kako bi se preše što bolje smjestile u otvore. Za vrijeme ispitivanja prati se odnos tlačnog naprezanja u židu i deformacije dijela žida između preša. Iz njihovog omjera dobije se modul elastičnosti. Kada spomenuti omjer počne naglo padati, potrebno je stati s ispitivanjem kako bi se izbjeglo oštećenje žida zbog prekomjernog tlačnog naprezanja. Za kontrolu oštećenja koristi se tangenti modul u svakom koraku i on se računa prema izrazu (5):

$$E_t = \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m} \quad (5)$$

gdje je:

$d\sigma_m$ – prirast naprezanja u pojedinom koraku

$d\varepsilon_m$ – prirast relativne deformacije u pojedinom koraku

Krajnji rezultat je sekantni modul elastičnosti koji se računa prema izrazu (6):

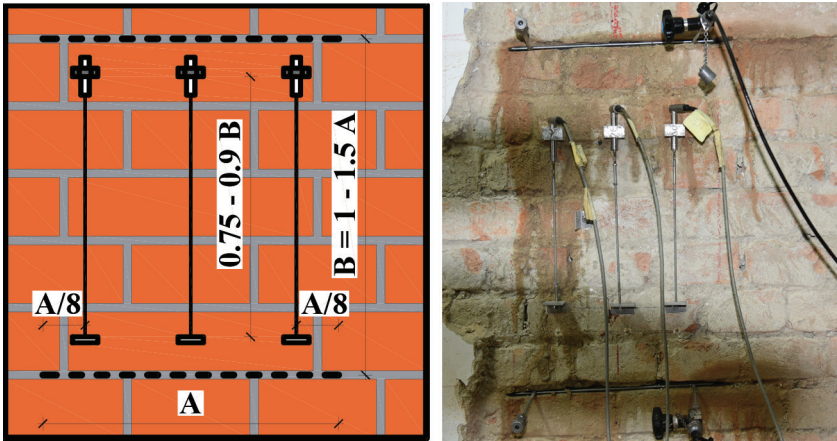
$$E_s = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} \quad (6)$$

gdje je:

σ_m – ukupno naprezanje

ε_m – ukupna relativna deformacija

U nastavku je prikazana skica s dimenzijama ispitnog mjesta te ispitno mjesto sa studije slučaja (slika 6.).



Slika 6. a) Skica ispitnog mjesta, b) Ispitno mjesto sa studije slučaja

2.4 Posmična čvrstoća

Treći i zadnji postupak je određivanje posmične čvrstoće zida. Za početak je potrebno ukloniti vertikalno postavljena mjerna mjesta odnosno LVDT-ove. Obje preše ostaju u zidu (na razmaku od barem pet redova opeke [10]), a za dodatnu treću običnu prešu napravi se otvor ispred opeke koja će se horizontalno gurati. Obavezno se gura uzdužna opeka te joj je potrebno odrediti duljinu i širinu kako bi se odredila posmična površina. Iza opeke se također napravi mali otvor u vertikalnoj sljubnici kako bi opeka imala prostora za pomak. Zatim se postavi horizontalni LVDT između opeke koja se gura i opeke koja je stacionarna. Kako bi se spriječio unos naprezanja u mort, između horizontalne preše i opeke treba postaviti podložne pločice. Visina pločice mora biti malo manja od visine opeke (npr. 6,5 cm za opeku visine 7 cm) te joj debljina treba biti barem 1/8 visine (npr. 0,8 cm za pločicu visine 6,5 cm) radi jednolikog prijenosa naprezanja [10]. Horizontalna preša također mora biti kalibrirana kako bi se iz pritiska u preši mogla izračunati sila. Druga opcija je korištenje uređaja za mjerenje sile (doze) koji se stavlja iza horizontalne preše da kontinuirano mjeri promjenu sile u vremenu. Posmično naprezanje u svakom trenutku može se odrediti izrazom (7):

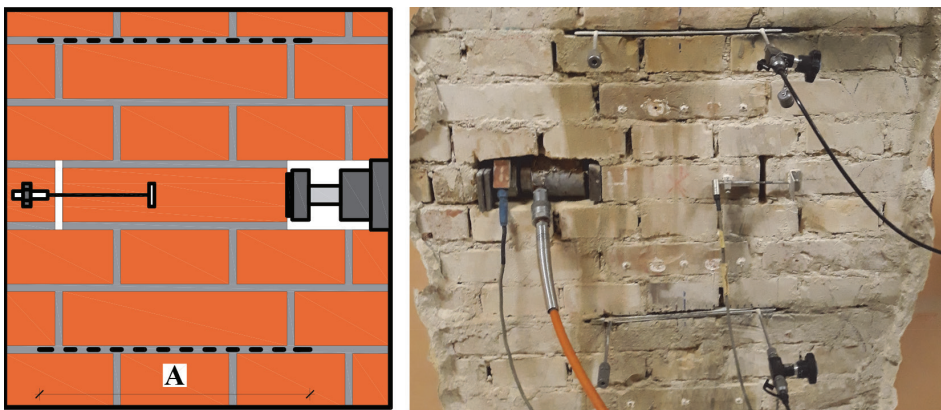
$$\tau = \frac{F_h}{A} \quad (7)$$

gdje je:

F_h – horizontalna sila

A – ukupna posmična površina (gornja + donja).

Ispitivanje počinje unosom vertikalnog naprezanja od 0,7 bara u plosnatim prešama. Uz konstantan vertikalni pritisak polako se povećava pritisak u horizontalnoj preši do otkazivanja. Otkazivanje nastupa kada se pri konstantnoj horizontalnoj sili pomak povećava. Nakon otkazivanja vertikalni pritisak se poveća te se ponovno polako povećava pritisak u horizontalnoj preši. Nakon nekoliko ponavljanja poznato je dovoljno podataka za izradu grafa u obliku pravca koji opisuje odnos vertikalnog naprezanja i posmične čvrstoće. S porastom vertikalnog naprezanja raste i posmična čvrstoća, a koeficijent nagiba dobivenog pravca predstavlja vrijednost koeficijenta trenja μ . Vrijednost posmičnog naprezanja kada je iznos vertikalnog naprezanja nula predstavlja početnu posmičnu čvrstoću f_{vo} . U nastavku je prikazana skica s dimenzijama ispitnog mjesta te ispitno mjesto sa studije slučaja (slika 7.).



Slika 7. a) Skica ispitnog mjesta, b) Ispitno mjesto sa studije slučaja

3 Zaključak

Značajni dio hrvatskoga i europskoga građevinskog fonda izgrađen je od opeke. Mnoge takve građevine pri kraju su projektiranog perioda uporabe. Stoga, mnoga sigurnosna i ekonomska pitanja naglašavaju važnost gospodarenja spomenutim građevinama. Nedavne seizmičke aktivnosti dodatno aktualiziraju problematiku. Za određivanje isplativosti novogradnje, odnosno sanacije i pojačanja postojeće gradnje kao i određivanje potrebne razine pojačanja, a kako bi se dosegla dostatna potresna otpornost, potrebna je kvalitetna ocjena postojećeg stanja građevinske konstrukcije. U procesu ocjenjivanja stanja značajan utjecaj imaju istražni radovi. S ciljem naglašavanja važnosti istražnih radova, posebno u razdoblju poslijepotresne obnove, u radu je prikazana metoda "in situ" ispitivanja materijalnih karakteristika postojećih zidanih građevina. Ispitivanje se provodi plosnatim prešama te se ubraja u polurazorne metode. Rezultati ispitivanja su stanje naprezanja u zidu, modul elas-

tičnosti ziđa te posmična čvrstoća ziđa. Ispitivanje posmične čvrstoće s plosnatim prešama pouzdanije je od ispitivanja posmične čvrstoće s procijenjenom vrijednosti vertikalnog naprezanja u ziđu. Ispitivanje s plosnatim prešama je dugotrajno i zahtijeva raznovrsnu opremu, ali omogućuje dobar uvid u postojeće stanje konstrukcije osiguravajući korisne parametre potrebne za modeliranje i proračun. Odstupanja mogu biti čak do 20 %, ali s iskustvom i preciznošću postotak odstupanja može se spustiti ispod 10 %.

Zahvala

Autori zahvaljuju Hrvatskoj zakladi za znanost na financijskoj potpori istraživanja kroz projekt ARES: Procjena stanja i obnova postojećih građevina – Razvoj suvremenih metoda za zidane i drvene konstrukcije (UIP-2019-04-3749).

Literatura

- [1] Atalić, J., Novak, M.Š., Uroš, M.: Seismic risk for Croatia: Overview of research activities and present assessments with guidelines for the future, *Gradjevinar*, 71 (2019) 10, pp. 923–947.
- [2] Stepinac, M. *et al.*: Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56 (2021), p. 102140.
- [3] Borri, A., Corradi, M., Castori, G., De Maria, A.: A method for the analysis and classification of historic masonry, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (2015) 9, pp. 2647–2665.
- [4] Krolo, J., Damjanović, D., Duvnjak, I., Frančić Smrkić, M., Bartolac, M., Koščak, J.: Methods for determining mechanical properties of walls, *Gradjevinar*, 73 (2021) 2, pp. 127–140.
- [5] Stepinac, M., Gašparović, M.: A Review of Emerging Technologies for an Assessment of Safety and Seismic Vulnerability and Damage Detection of Existing Masonry Structures, *Applied Sciences*, 10 (2020) 15.
- [6] Stepinac, M., Kisicek, T., Renić, T., Hafner, I., Bedon, C.: Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads-the ARES project, *Applied Sciences (Switzerland)*, 10 (2020) 5.
- [7] Ghiassi, B., Vermelfoort, A.T., Lourenço, P.B.: Chapter 7 - Masonry mechanical properties, in *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, (2019), B. Ghiassi and G. B. T.-N. M. of M. and H. S. Milani, Eds. Woodhead Publishing, 2019, pp. 239–261.

- [8] ASTM C1196 - 09: Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements. .
- [9] ASTM C1197 - 14a: Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method. .
- [10] ASTM C1531 - 16: Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index, *Changes*, 04 (2003). pp. 1–7, 2003.
- [11] RILEM Technical Committee: RILEM Recommendation MDT. D. 4: In-situ stress tests based on the flat jack, *Materials and Structures*, 37 (2004) 7. pp. 491–496, 2004.
- [12] RILEM Recommendation MDT. D. 5: In-situ stress - strain behaviour tests based on the flat jack, 37 (2005) September 2004. pp. 497–501, 2005.

Flexural buckling of aluminium columns - Research review

Ivan Čudina¹, Prof. Davor Skejić²

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department for Structures, ivan.cudina@grad.unizg.hr

² University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department for Structures, davor.skejic@grad.unizg.hr

Abstract

The use of aluminium lags behind other materials partially due to a lack of design standards in the past. That problem was solved with the development of new standards for the design of aluminium structures. The aluminium column design procedure implies flexural buckling verification, and Eurocode 9 provides design procedures for extruded and welded columns. Due to a lack of recent studies, the design procedure for longitudinally welded columns was based on experimental research conducted more than 40 years ago. An experimental study and detailed numerical analysis of longitudinally welded aluminium columns is required to assess the accuracy of the current design procedure.

Key words: aluminium, flexural buckling, welded columns, longitudinal weld, design

Izvijanje uz savijanje aluminijskih stupova – pregled dosadašnjih istraživanja

Sažetak

Aluminij po svojoj primjeni zaostaje za drugim materijalima jednostavno zato što u prošlosti nisu postojale norme za projektiranje. Taj problem riješen je s razvojem novih normi za projektiranje aluminijskih konstrukcija. Postupak projektiranja aluminijskih stupova podrazumijeva provjeru stabilnosti na izvijanje uz savijanje, a u tom smislu se u Eurokodu 9 prikazuju postupci za projektiranje ekstrudiranih i zavarenih stupova. Zbog nedostatka novijih studija, postupak projektiranja uzdužno zavarenih stupova temeljio se na eksperimentalnim istraživanjima koja su provedena prije više od četiri desetljeća. Potrebna je eksperimentalna studija i detaljna numerička analiza uzdužno zavarenih aluminijskih stupova kako bi se ocijenila vjerodostojnost sadašnjeg postupka projektiranja.

Cljučne riječi: aluminij, izvijanje uz savijanje, zavareni stupovi, uzdužni zavar, projektiranje

1 Introduction

Although aluminium is the third most abundant element in the Earth's crust after oxygen and silicon, it was not discovered in its elemental state until 1825 [1]. Shortly thereafter, mass production of aluminium began following invention of the Hall–Héroult process in 1886 [2]. Since aluminium in its elemental state is not suitable for application in civil engineering, it is used in the form of alloys [2]. Based on the primary alloying element, aluminium alloys are divided into eight different series [1] and may have different types of treatment (temper). Main advantages of aluminium as a structural material are the lightness, corrosion resistance, and functionality of the structural form [3, 4]. Moreover, due to formation of a thin oxide layer on the surface, aluminium is corrosion resistant and suitable for use in aggressive environments [1, 3]. Unlike steel products, which are mainly produced by rolling, aluminium products are mainly extruded, which allows an unlimited choice of cross-sectional shapes that cannot be achieved with more conventional structural materials [5], Figure 1. In cases where extruded members are inadequate, aluminium sections of larger dimensions can be formed by welding.

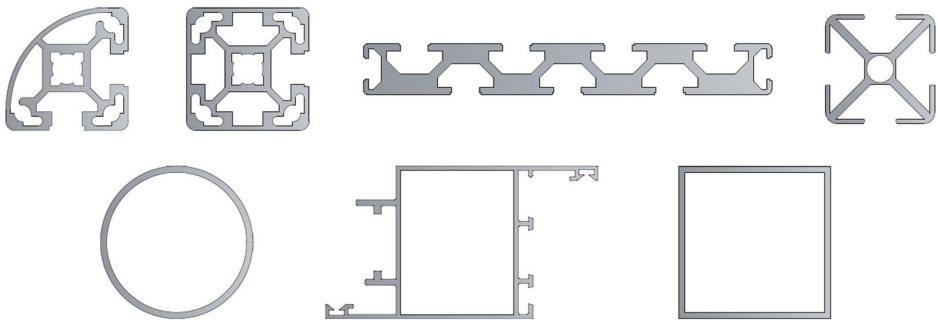


Figure 1. Extruded aluminium cross-sectional shapes

Another advantage of aluminium as a structural material is that the melting process does not affect its properties, i.e., it can be recycled indefinitely [6]. Moreover, the production of recycled aluminium (secondary production) consumes 20 times less energy than the production of new aluminium (primary production), which earns it the title of “green metal” [5, 6]. However, it should be noted that the primary production of aluminium consumes a considerable amount of electrical energy, which makes it relatively expensive [6]. Even with the advances in the production process of aluminium alloys, which have reduced the energy demand by more than 75 % since 1995 [5], aluminium is still more expensive than steel as a structural material. The first use of aluminium as a construction element was recorded in 1898, when aluminium plates were used to cover the dome of the St. Jacob's Church in Rome, and

they have remained undamaged to this day [2]. Since then, the use of aluminium in construction industry has been gradually increasing and currently occupies around 25 % of the total aluminium production worldwide [5]. Some examples of structural aluminium application in façade systems are shown in Figure 2. For several reasons, such as the high price of primary aluminium production, the use of aluminium in construction today lags significantly behind conventional materials such as steel and reinforced concrete. Another reason is the insufficient or even non-existent standards and recommendations for the design of aluminium structures in the past [1]. Although aluminium alloys and structural steel share many common properties, the design methods developed for steel cannot be applied to aluminium members [6]. Therefore, design manuals for aluminium were developed relatively late. The Aluminum Association (AA) published the first international manual *Specification for Aluminum Structures* in 1967.

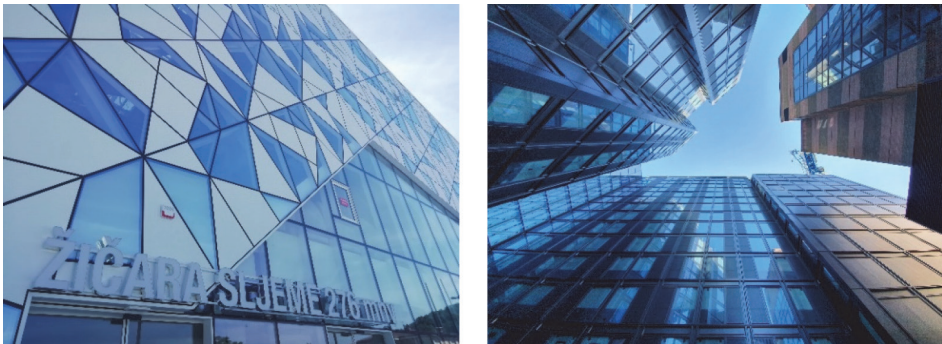


Figure 2. Structural application of aluminium façade systems: a) Cable car Sljeme in Zagreb; b) Urbanest building in London

The development of European standards for the design of aluminium structures began in 1978 with the first edition of the ECCS committee recommendations [1]. However, the normative background established then did not offer the same level of elaboration in the design approach as that provided to standards for more commonly used materials [6]. Hence, the usage of aluminium as a structural material was still inhibited with an inadequate normative background. Structural behaviour of both extruded and welded aluminium members has been widely researched over the last few decades [7] and the conclusions reached provided a solid foundation for modern standardization [1]. Since then, the development of standards has progressed significantly and limitations caused by the insufficiency and absence of standards, have been surpassed. The version of Eurocode 9 published in 2007 is presently used for the design of aluminium structures in Europe. Still, the development of standards for the design of structures is an ever ongoing process, and Eurocodes are no exception. The new generation of Eurocodes is currently in the

final phase of development, and all standards, including EN 1999-1-1 [8], have been subjected to critical review and alterations [9]. Inconsistencies in the stability verification procedure were found in [8], primarily for longitudinally welded columns. Non-welded members have also been subjected to critical review and revision [9]. Accordingly, prEN 1999-1-1 [10] brings significant changes in the stability verification procedure for both welded and non-welded aluminium members under compression. This paper brings an insight into the experimental and numerical background of modifications made in the stability verification procedure for aluminium members under compression. Furthermore, this paper points out inadequacies in the stability verification procedure for the longitudinally welded members in [10], namely the limited experimental background on which it was based.

2 Stability of aluminium members under compression

2.1 General

Due to low modulus of elasticity and material non-linearity, aluminium alloys are susceptible to stability loss, especially if members with slender cross-sections are considered [11]. The buckling resistance of aluminium members depends on the initial bow (geometrical imperfection), stress-strain relationship, and residual stresses (structural imperfection) [12]. When referring to the buckling of aluminium members, one must consider extruded and welded members separately. Extruded aluminium sections show small to negligible residual stresses, but the stress-strain relationship is distinctly non-linear [13]. In addition, as the extrusion process allows for greater functionality of structural shape, aluminium sections are very often produced for a specific purpose resulting in the complexity of cross-sectional shapes [2]. Extruded members are subjected to various buckling interactions that are identified in cold-formed steel members as well. On the other hand, welding causes significant reduction of mechanical properties in aluminium [2] as well as introduction of residual stresses in cross-sections of members. The size and position of the heat-affected zone (HAZ) affect the buckling resistance of longitudinally welded columns [12]. Hence, a realistic determination of buckling resistance of both longitudinally welded and extruded members can be regarded as a complex endeavour. The first and crucial step in stability verification of aluminium and steel columns is the selection of the buckling curve. The most important factor affecting buckling resistance of steel columns are residual stresses, which mainly depend on the cross-sectional shape [13]. Accordingly, the selection of the buckling curve in EC3 [14] is determined by the cross-sectional shape of the member. The residual stresses of extruded aluminium members are extremely small, but the stress-strain relationship is distinctly non-linear [13]. Therefore, EC9 [8] defines the choice of

buckling curve for aluminium compression members depending on the choice of aluminium alloy and temper. Currently, EC9 [8] defines the buckling curves A and B for members subjected to flexural buckling.

2.2 Flexural buckling of extruded aluminium columns

The behaviour of extruded aluminium columns under compression has been well studied over the years, both experimentally and numerically. One of the earliest studies on the stability of aluminium columns was performed by Osgood and Holt and published in 1938 as NACA Report No. 656 [15]. Since then, numerous authors have conducted and published research on the stability of aluminium columns under compression. It can therefore be stated that the current standards for the buckling design of extruded aluminium columns are based on an extensive experimental and numerical basis, including the current version of the European standard for the design of aluminium structures, Eurocode 9. Since its publication in 2007, further research on aluminium columns has been carried out and new knowledge has been gained.

Zhu and Young [16-18] conducted a series of laboratory tests on extruded aluminium columns of circular, rectangular, and square hollow section. In total, 70 fixed-ended aluminium columns with lengths between 300 - 3000 mm, both unwelded and with transverse welds, were tested. Also, the authors conducted parametric nonlinear numerical analysis, including 248 models, and the results showed good correspondence with laboratory tests. The results of laboratory tests and numerical analyses were compared to Australian/New Zealand, American, and European standards for the design of aluminium columns. It was concluded that extruded hollow columns with transverse welds reached between 54 - 77 % of buckling resistance compared to equivalent unwelded columns [16-18]. Furthermore, the authors stated that the standards considered were on the conservative side when predicting buckling resistance of aluminium columns. However, Australian/New Zealand and American standards, but not European ones, were nonconservative in a few cases for hollow aluminium columns with transverse welds. Finally, a new design method based on the direct strength method was proposed for extruded hollow aluminium columns under compression. The current direct strength method compared well with experimental and numerical results alike, and is suitable for the design of extruded rectangular, square, and circular hollow sections without welds. The authors stated that with slight modifications the current direct strength method achieved a reliability index closer to the target value compared with the current method.

Adeoti et al. [19] proposed a buckling curve for flexural buckling of extruded aluminium columns based on laboratory testing and nonlinear numerical analyses. In total, 30 pin-ended extruded aluminium column samples made of AW 6082-T6 alloy were tested under compression, 15 with hollow rectangular cross-section, and

15 with H cross-section. Numerical models were calibrated on the laboratory test results, and numerical parametric analysis was conducted. The proposed buckling curve was compared to buckling curves given in the American, European, and Chinese design codes for aluminium and steel structures. It was concluded that the buckling curve proposed in the research coincides well with buckling curves given in European and Chinese codes. However, the proposed curve gives slightly higher buckling resistances compared to those given in the design codes [19].

Wang et al. [20] conducted a series of laboratory tests on circular tube columns made of aluminium alloy AW 6082-T6. The first series of tests included nine fixed-ended stub columns subjected to axial force to obtain stress-strain curves. The second series of tests included 15 pin-ended circular tube columns with various slenderness ratios, subjected to axial force to obtain buckling strengths and failure modes. Geometrical imperfections of all 15 columns were also measured. Experimental buckling strengths were compared with the buckling strengths obtained according to several aluminium design codes. The authors stated that the American Aluminium Design Manual [21] gives conservative results for circular tube columns, especially for columns with low slenderness [20]. The Australian/New Zealand Standard 1664 [22] gave conservative results for columns with low slenderness but was unsafe for columns with high slenderness [20]. Finally, the Eurocode 9 [8] gave generally conservative results for circular tube columns, regardless of slenderness ratio [20]. Wang et al. [23] investigated resistance of the extruded aluminium I section columns with fixed-pinned end conditions subjected to compression. Laboratory tests included 11 aluminium columns made of AW 6061-T6 and AW 6063-T5 alloys as well as coupon tests to determine mechanical properties. Local and global geometrical imperfections were also measured. The numerical model was developed and calibrated on the laboratory test results to conduct nonlinear parametric analysis. Finally, the obtained buckling resistances were used to assess European, Chinese, American, and Australian/New Zealand design codes. The research showed that 9 out of 11 laboratory samples failed by the interaction of local and global failure modes [23]. Also, the authors stated that the buckling resistances obtained based on the observed standards were conservative, especially for the alloys with larger strain hardening capacity. European and Chinese design standards for aluminium structures underestimate the post-buckling capacity of extruded aluminium columns by 30 % [23]. On the other hand, Australian/New Zealand design standards revealed better correspondence. It was also observed that the buckling length factor for fixed-pinned end conditions was between 0,732 - 0,850, which is higher than the theoretical value of 0,7 [23].

Wang et al. [24] also investigated buckling resistance of aluminium alloy column members of large cross-section. The experimental investigation involved 7 aluminium members subjected to axial compression, four with I section and seven with

rectangular hollow section. All columns failed in flexural buckling mode. Parametric nonlinear numerical analysis including 180 specimens was also conducted to evaluate reliability levels of the current design standards. It was concluded that stability resistances obtained by Eurocode 9 [8] and Chinese code GB 50429 [25] are conservative. On the other hand, American Aluminium Design Manual [21] slightly overestimated the stability resistance of aluminium alloy column members [24]. Based on the design method given in Eurocode 9 [8], the authors proposed a new design method that predicts relatively well the buckling resistance of aluminium columns, regardless of the cross-sectional dimensions.

Table 1. Overview of experimental research related to stability of extruded aluminium columns

Paper	Cross-sectional shape	Alloy and temper	Number of samples		Additional notes
Zhu, J. (2006) [16] Zhu and Young (2006) [17] Zhu and Young (2006) [18]	Circular hollow Rectangular hollow Square hollow	AW 6063-T5 AW 6061-T6	70	29 circular	Initial geometrical imperfections were also measured. Non-welded and welded mechanical properties measured (assessment of welding induced properties reduction). Modified direct strength method proposed for aluminium columns with transverse welds.
				41 rectangular and square	
Adeoti et al. (2015) [19]	Rectangular hollow H section	AW 6082-T6	30	15 rectangular	Mechanical properties measured with tensile coupon tests. Geometrical imperfection measured ($L/7500$ taken in numerical analysis; L – length of the specimen).
				15 H section	
Wang et al. (2015) [20]	Circular hollow	AW6082-T6	15		The obtained stress–strain relationships showed good correspondence with the Ramberg–Osgood expression.
Wang et al. (2017) [23]	I section	AW 6061-T6 AW 6063-T5	11		Strengths predicted by considered design codes were less conservative for 6061-T6 alloy specimens compared to 6063-T5 alloy specimens, due to a more pronounced strain hardening capacity of the latter.
Wang et al. (2018) [24]	Rectangular hollow I section	AW 6061-T6	7	4 I section	The accuracy of the considered design codes does not change with the variation of cross-sectional dimensions, which indicated that current design codes are applicable for large-section columns.
				3 rectangular	

The development of the new generation of Eurocodes is currently in its final phase. All the standards, including EN 1999-1-1 [8], were subjected to critical review and modifications aiming to provide more uniform reliability of structures. Based on the above studies [16-24], the design procedure for stability verification of both welded and non-welded aluminium columns, was revised [9]. The introduction of a new buckling class C and alterations in the allocation of existing alloys and tempers to buckling classes can be considered as the most significant changes [9]. The allocation is now based on the exponent n_p which is the n value in the Ramberg-Osgood expression for the plastic analysis [8, 9]. Also, minor improvements have been made to buckling curves A and B [9].

2.3 Flexural buckling of longitudinally welded aluminium columns

Unlike extruded columns, the stability of longitudinally welded aluminium columns has not been thoroughly studied. The earliest report on longitudinally welded aluminium columns was published by Hill, Brungraber, and Clark in 1962 [26]. However, the studies presented concerned mainly straight aluminium columns made of narrow rectangular plates, and some of the stated conclusions were questionable [27]. No further studies were conducted until the ECCS committee T2 carried out extensive research on longitudinally welded AW 6082-T6 alloy columns [27]. Members with three different types of cross-sections were tested, Figure 3, and the results were published by Frey [28] in 1977, and by Faella and Mazzolani [29] in 1978 [7]. Furthermore, Gatto, Mazzolani, and Morri [16-18] measured residual stresses for a range of welded structural shapes [7], Figure 3. The above research gave a foundation for the development of the stability verification procedure for longitudinally welded aluminium columns, which was published in the first edition of the ECCS Recommendations for the design of aluminium structures [30] in 1978. The stability verification procedure for longitudinally welded members given in the current version of EC9 [8] is more advanced compared to the procedure given in [30], but is mostly based on the same experimental research. Since EC9 was published in 2007, almost no experimental research has been conducted on the stability of longitudinally welded aluminium columns under compression. Experimental research on longitudinally welded columns was recently conducted by Wu and Zhang [31]. The stated authors presented experimental research on 20 longitudinally welded AW 6061-T6 aluminium alloy I-section columns under axial compression. Column specimens of various lengths were tested, and the results were compared with design strengths calculated according to the Eurocode and the China Code for aluminium structures. The tensile coupon test and hardness test were also performed to determine the width of the heat affected zone and reduced strength zone (RSZ). It was concluded that with slight modifications in the procedure, the China Code and the European Code were in good agreement with experimental results for type T section, but conservative for type P.

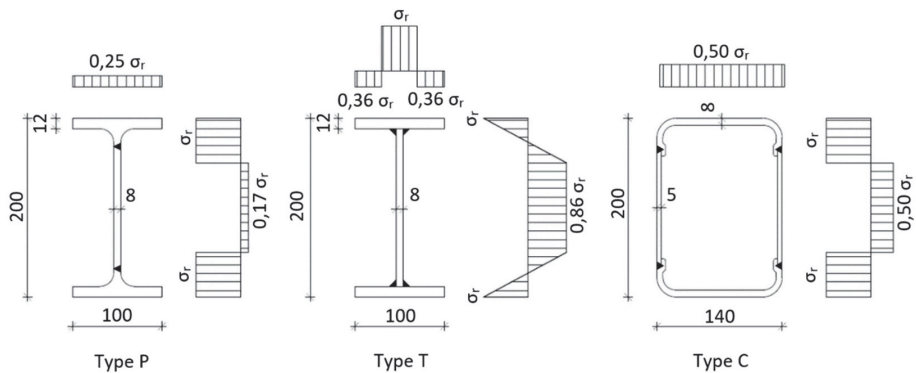


Figure 3. Cross-section shapes of longitudinally welded aluminium specimens with the corresponding residual stress distribution models (σ_r denotes the maximum residual stress value related to mechanical properties of the alloy) [7]



Figure 4. Longitudinally welded aluminium specimens: a) Type T cross-section; b) Type P cross-section [31]

The design procedure for longitudinally welded aluminium members was revised and improved in the scope of the current revision of Eurocodes [9]. Three separate buckling classes (curves) for longitudinally welded elements were introduced with regard to extruded columns. The authors stated that, for alloys and tempers assigned to buckling classes A and B, the effect of the strength reduction in HAZ is more pronounced compared to residual stresses. In the case of buckling class C, the column buckling behaviour is influenced both by residual stresses and cross-section type. Due to the lack of recent experimental background on longitudinally welded columns, Misiek et al. [12] performed revision of the procedure on the numerical basis only. Furthermore, numerical models were developed and calibrated based on experimental research conducted on longitudinally welded columns by the ECCS committee more than 40 years ago. Research results presented by Wu and Zhang [31] were not considered in the revision process. The production process of aluminium and the welding methods have changed over the years.

By taking into account all above mentioned considerations, the question arises on how reliable are the new design methods for longitudinally welded columns.

Table 2. Overview of experimental research related to stability of longitudinally welded aluminium columns

Paper	Cross-sectional shape	Alloy and temperature	Number of samples	Additional notes	
Brungraber and Clark (1962) [26]	Solid rectangular section	AW 5154-H34 AW 5456-H321 AW 6061-T6	No data available	Samples made of longitudinally welded rectangular plates.	
Frey (1977) [28]	Type P Type T Type C	AW 6082-T6	32	Box sections (type C) experienced progressive instability in the out-of-straightness direction. Double T columns (type P and T) experienced sudden buckling more often than progressive buckling due to small initial out-of-straightness.	
Faella and Mazzolani (1978) [29]					11 Type P
					11 Type T
			10 Type C		
Wu and Zhang (2011) [31]	I section	AW 6061-T6	20	Specimens failed mostly by flexural buckling. European Code gave more conservative results compared to China Code.	

3 Conclusions

Aluminium as a construction material has been in use for more than a century now. Although it cannot compete with steel in terms of price and mechanical properties, aluminium can be a better solution in many situations because of its lower specific weight and corrosion resistance. The use of aluminium as a construction material is currently rising on the global scale, partially owing to the development of modern standards for the design of aluminium structures. Since aluminium structural members are mostly slender and highly susceptible to buckling, stability verification of aluminium members is a mandatory step in the design process. Accordingly, the design of aluminium columns must include verification of flexural buckling. Over the years, the stability of extruded aluminium columns has been well investigated, and Eurocode 9 gives a reliable design procedure for the verification of flexural buckling of such columns. Moreover, the new generation of Eurocode 9 brings a revised and improved design method.

However, the design method for the buckling of longitudinally welded columns, as given in Eurocode 9, is mostly based on the experimental research conducted by the ECCS committee more than forty years ago, and the question arises on the accuracy of these methods. The revised version of Eurocode 9 brings no major im-

provements in this regard, which is primary due to the lack of laboratory testing of longitudinally welded columns. An experimental research on longitudinally welded columns in combination with parametric numerical analyses should be conducted in order to thoroughly assess and revise the verification procedure for longitudinally welded columns given in Eurocode 9. The analysis should focus on many parameters such as boundary conditions, column slenderness, various alloys and tempers, as well as welding procedures. The imperfections of welded aluminium columns and their influence on buckling resistance should also be accounted for. This should also constitute the basis for reliability analysis of a design method given in the new version of Eurocode 9.

References

- [1] Skejić, D.; Boko, I.; Torić, N. Aluminium as a material for modern structures. *Gradevinar* 2015, 67 (11), 1075–1085.
- [2] Dokšanović, T.; Markulak, M.; Džeba, I. State of the art review of the stability and welding of aluminium alloy elements. *Gradevinar* 2014, 66 (2), 1075–1085.
- [3] Mazzolani, F.M. Structural Applications of Aluminium in Civil Engineering. *Struct. Eng. Int.* **2006**, 16, 280–285.
- [4] Skejić, D.; Orehovec, D.; Ćurković, I. Prefabricated aluminium halls. *Gradevinar* 2021, 73 (2), 141–151.
- [5] Georgantzia, E.; Gkantou, M. Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*. 2021, 227, 111372.
- [6] Dokšanović, T.; Džeba, I.; Markulak, M. Applications of aluminium alloys in civil engineering. *Tehnički vjesnik* **2017**, 24(5), 1609-1618.
- [7] Mazzolani, F.M. Aluminium Alloy Structures. 2nd edition, Boca Raton: CRC Press; 1995.
- [8] European Committee for Standardization (CEN). *Eurocode 9: Design of Aluminium Structures—Part 1–1 General structural rules (EN 1999-1-1:2007+A2:2013)*; CEN: Brussels, Belgium, 2007.
- [9] Misiak, T.; Norlin, B.; Höglund, T. European buckling curves for aluminium compression members: A review of proposals for revision. In Proceedings of the Nordic Steel 2019: The 14th Nordic Steel Construction Conference, Copenhagen, Denmark, 18–20 September 2019; pp. 563–570.
- [10] European Committee for Standardization (CEN). *prEN 1999-1-1, Eurocode 9 - Design of Aluminium Structures—Part 1–1 General structural rules*; CEN: Brussels, Belgium, 2020.

- [11] Yuan, H.X.; Wang, Y.Q.; Chang, T.; Du, X.X.; Bu, Y.D.; Shi, Y.J.; Local buckling and postbuckling strength of extruded aluminium alloy stub columns with slender I-sections. *Thin-Walled Structures* 2015, 90, 140–149.
- [12] Misiek, T.; Norlin, B.; Höglund, T. Explanatory notes to buckling design of longitudinally welded aluminium compression members. Proceedings of the SDSS 2019: International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Prague, Czech Republic, 11–13 September 2019.
- [13] Misiek, T.; Norlin, B.; Höglund, T. A look at European buckling curves for aluminium members. *Steel Construction* 2019, 12 (2), 141–155.
- [14] European Committee for Standardization (CEN). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for building (EN 1993-1-1:2005)*; CEN: Brussels, Belgium, 2005.
- [15] Osgood, W.R.; Holt, M. The Column Strength of two Extruded Aluminum-Alloy H-sections; Report No.: 656; National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1938.
- [16] Zhu, J.H. Behaviour and design of aluminum alloy structural members. Doctoral Dissertation, University of Hong Kong, Hong Kong, 2006.
- [17] Zhu, J.H.; Young, B. Tests and design of aluminum alloy compression members. *Journal of structural engineering* 2006, 132 (7), 1096–1107.
- [18] Zhu, J.H.; Young, B. Experimental investigation of aluminum alloy circular hollow section columns. *Engineering Structures* 2006, 28, 207–215.
- [19] Adeoti, G. O.; Fan, F.; Wang, Y. Zhai, X. Stability of 6082-T6 aluminium alloy columns with H-section and rectangular hollow sections. *Thin-walled structures* 2015, 89, 1-16.
- [20] Wang, Y.; Fan, F.; Lin, S. Experimental investigation on the stability of aluminium alloy 6082 circular tubes in axial compression. *Thin-walled structures* 2015, 89, 54-66.
- [21] The Aluminum Association (AA). Aluminum design manual European; AA: Washington DC, 2005.
- [22] Australian/New Zealand Standard. AS/NZS1664.1 - Aluminium structures Part 1: Limit state design. Standards Australia/Standards New Zealand, Sydney, Australia, 1997.
- [23] Wang, Y. Q.; Yuan, H. X.; Chang, T.; Du, X. X.; Yu, M. Compressive buckling strength of extruded aluminum alloy I-section columns with fixed-pinned end conditions. *Thin-walled structures* 2017, 119, 396-403.
- [24] Wang, Z. X.; Wang, Y. Q.; Sojeong, J.; Ouyang, Y. W. Experimental investigation and parametric analysis on overall buckling behavior of large-section aluminum alloy columns. *Thin-walled structures* 2018, 122, 585–596.

- [25] MOHURD. GB 50429 - Code for design of aluminum structures. China Planning Press, Beijing, 2007.
- [26] Hill H. N.; Clark J. W.; Brungraber R. J. Design of Welded Aluminum Structures. *Journal of the Structural Division* 1960, 86(6), 101-124.
- [27] Lai, Y. F. W. Buckling Strength of Welded and Non-welded Aluminium Members. Doctoral Dissertation, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Sheffield, 1989.
- [28] Frey, F. Alu-alloy welded column buckling research program: test results, ECCS Committee 16, Doc. 16-77-3, 1977.
- [29] Faella, C. Mazzolani, F.M. Buckling behaviour of aluminium alloy welded columns, ECCS Committee 16, Doc. 16-78-2, 1978.
- [30] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS)—Technical Committee 2. European Recommendations for Aluminium Alloy Structures; ECCS: Bruxelles, Belgium, 1978.
- [31] Wu, Y.; Zhang, Q. Experimental investigation and design of aluminum columns with longitudinal welds. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China* 2011, 5(3), 366-373.

Influence of corrosion-induced damage in reinforced concrete on GPR signal parameters

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

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

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

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

Abstract

Ground penetrating radar (GPR) is a non-destructive technique (NDT) that is mainly used to locate reinforcement in structures. Even though several studies have shown promising results in characterizing corrosion with GPR, more research should be conducted on the effects of corrosion on GPR signal parameters. This paper presents experimental work aimed at observing the effects of water, water contaminated with chlorides, and corrosion-induced cracks in reinforced concrete, on the ground penetrating radar signal strength. Two reinforced concrete specimens with two reinforcing bars were cast; one to observe the influence of water and the other to observe the influence of water contaminated with chlorides and corrosion-induced cracks on GPR signal. The results show that, with the presented experimental setup, the changes due to these effects are small. Immersion in water for 11 days caused a decrease in amplitude of 3.7 %, 11.2 % for immersion in water contaminated with chlorides, and 12.69 % for a 0.8 mm crack.

Key words: ground penetrating radar (GPR), corrosion, concrete, chlorides, moisture

Utjecaj oštećenja izazvanih korozijom u armiranom betonu na parametre GPR signala

Sažetak

Georadar je nerazorna metoda koja se kod ispitivanja konstrukcija uglavnom koristi za određivanje lokacije armature. Iako postoje određene studije u kojima je korozija karakterizirana georadarom, potrebno je provesti više istraživanja o učincima korozije na signal georadara. Ovaj rad predstavlja eksperimentalni rad na promatranju utjecaja vode, vode i klorida te pukotina izazvanih korozijom u armiranom betonu na signal georadara. Dva armiranobetonska uzorka s dvije armaturene šipke su izrađena; jedan za promatranje utjecaja vode, a drugi za promatranje vode i klorida, i pukotina izazvanih korozijom na signal georadara. Rezultati su pokazali da su s prikazanom eksperimentalnom postavkom promjene zbog ovih učinaka bile male. Potapanje uzorka u vodu tijekom 11 dana uzrokovalo je smanjenje amplitude od 3,7 %, 11,2 % potapanje u vodu i kloride, te 12.69 % za pukotinu od 0,8 mm.

Cljučne riječi: georadar, korozija, beton, kloridi, vlaga

1 Introduction

Corrosion is the main problem that threatens service life of reinforced concrete structures [1]. Chloride-induced corrosion emanating from the marine environment and deicing salts is of great concern to global infrastructure. While some strategies aim to propose design-level solutions, the world yearns for strategies that can mitigate the effect of corrosion on existing structures. The extensive and rational use of non-destructive techniques (NDT), applied periodically, could lead to early detection of corrosion. The results of this type of inspection, integrated with management systems, could improve global performance of infrastructure facilities, leading to lower maintenance costs. In particular, this can also be improved by an optimum combination of NDT inspections.

Ground penetrating radar is one of the most promising non-destructive techniques [2] mainly because of the nature of the inspection. The technique involves acquisition of couple line scans to cover an area with a wheeled instrument. Depending on the area, the inspection can be completed in a few minutes. This method is electromagnetic based [3], and is mainly used to locate reinforcement in structures. However, proper and comprehensive analysis of the results can also be used for corrosion characterization [4–7]. The analysis is based on observing changes in signal strength during the corrosion process. This is still a new approach and there is no clear link between laboratory studies and field practice [8].

Laboratory research is based on the isolation of a single corrosion-related effect (e.g., chlorides and water that provoke it, and rust as its consequence) [9, 10, 11, 12]. The aim of these laboratory studies is to analyse in detail how this single effect influences the strength of the GPR signal. Field practice is based on simple localization of areas with disturbed signal as a sign of corrosion originating from synergistic corrosion effects [7, 13].

However, there is still much confusion in the research community as to what is the predominant cause of a disturbed signal strength. The effects of water, water contaminated with chlorides, and corrosion-induced cracks, on GPR signal are compared in this study.

2 Ground penetrating radar signal parameters

Ground Penetrating Radar (GPR) is an electromagnetic-based, non-destructive method used primarily to locate objects situated under the ground surface. The device has antennas that emit electromagnetic waves into the material and register the waves reflected from the object. GPR records the time it takes for the reflected wave to reach the object and return to the receiving antenna, as well as the strength of the reflected wave. These parameters can be seen on the A-scan

or trace, which is the starting point for analysing the results collected by GPR, Figure 1.

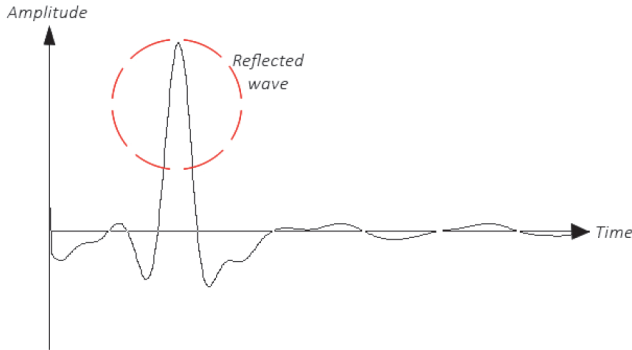


Figure 1. The A-scan

As mentioned before, the position and depth of the object is desired for most practical uses. For that purpose, the time t is converted into the depth d according to equation (1),

$$d = V \cdot \frac{t}{2} \quad (1)$$

where V is the velocity of electromagnetic waves. The velocity is calculated from equation (2),

$$V = \frac{C_{air}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

In this equation, C_{air} is the velocity of wave in the air (300 mm/ns), while ϵ_r is the dielectric constant of material [14].

The basis of propagation of electromagnetic waves through a material is described by Maxwell's equation [15] which depends on the material properties, namely electrical conductivity σ , dielectric permittivity ϵ , and magnetic permeability μ . In the case of concrete, which is considered to be devoid of magnetic properties, the magnetic permeability is equal to the permeability of free space [16]. On the other hand, the electrical conductivity and the dielectric permittivity are strongly dependent on the condition of concrete. The electrical conductivity is determined by the presence of free charges in the pores of concrete. If concrete pores are contaminated with free charges, e.g., chlorides, the propagation of electromagnetic waves will result in the movement of charges leading to a loss of electromagnetic energy. Similarly,

the dielectric permittivity depends on the ability of polar molecules in the material to resist rotation in the presence of an electromagnetic field. As a result, variations in material properties are to be expected in the presence of moisture and/or chlorides in concrete. The presence of water molecules and chlorides in pores results in an overall loss of energy and signal, as manifested in a reduced amplitude of the reflected wave in the A-scan.

3 Methods

Concrete specimens were produced using cement CEM I 42.5 R, river aggregate classified into three fractions (0/4mm, 4/8mm, 8/16mm), potable water, superplasticizer, and air-entraining admixture. The design of mixture is shown in Table 1.

Table 1. Concrete mix design

Cement [kg/m ³]	Water [kg/m ³]	River Aggregate			Superplasticizer [kg/m ³]	Air-entraining admixture [kg/m ³]
		(0/4mm)	(4/8mm)	(8/16mm)		
401	121	843	501	579	2	1,6

Two samples each measuring 70 cm in length, 30 cm in width, and 25 cm in height, were cast. Two rebars 20 mm in diameter were embedded 5 cm below the concrete surface, Figure 2a. Copper wires enabling electrical connection for the accelerated corrosion test were connected to the rebar. The connection was protected by an impermeable mastic. The sides of the specimens were coated with epoxy.

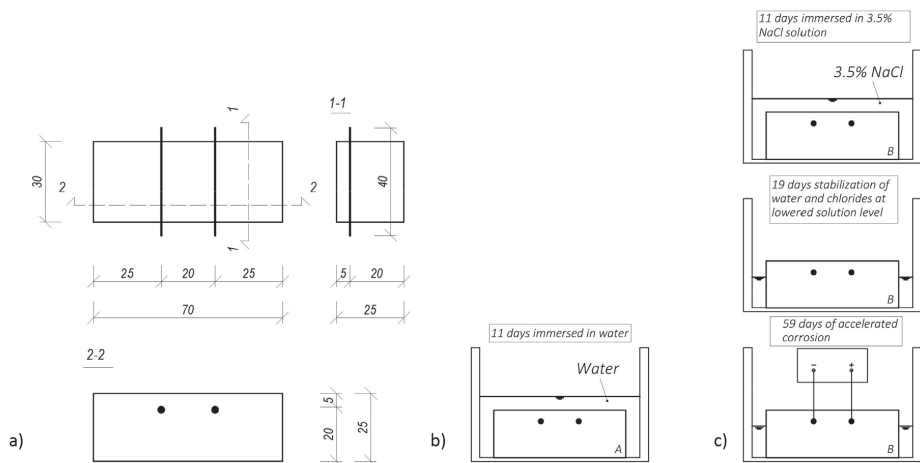


Figure 2. a) Sample design, b) Experimental setup for sample A, c) Experimental setup for sample B

The first sample (A) was used only to observe the effect of water on the GPR signal, while the second one (B) was used to observe the effect of water contaminated with chlorides, and corrosion-induced cracks. Sample A was immersed in water (Figure 2b), while sample B was immersed in a 3.5 % sodium chloride (NaCl) solution for 11 days (Figure 2c). Relative humidity of specimens was checked after immersion of samples using the Concrete Moisture Meter PosiTector CMM IS. This value was determined at the sample depth of 5 cm.

After immersion, the level of the solution was lowered 90 mm below the surface for sample B. The sample was then left for 19 days to stabilize the water and chloride content. The corrosion was then accelerated using the impressed current method. The working electrode is a rebar connected to the positive terminal of the current source, while the second electrode is connected to the negative terminal, Figure 2c. The current source was set to the constant current mode (CC), which means that the current intensity was not changed during the process. A total current of 0.038 A was applied, corresponding to a current density of $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. The sample was exposed to the accelerated corrosion process for 59 days, which is equivalent to a mass loss of 7,5 % according to Faraday's law.

Data were acquired using a 2.7 GHz GPR device with the scanning rate of 8 scans/cm. GPRA-scans were acquired over one rebar for sample A and over the working electrode for sample B. Measurements were acquired before and after immersion in water and sodium chloride for specimens A and B, and periodically during crack propagation induced by corrosion process for specimen B. GPR parameters were derived using Radan 7 software for the analysis of GPR data. The crack width was measured with a crack width ruler as a mean value of three measurements above the anode bar.

4 Results

4.1 Influence of water on GPR signal parameters

Relative humidity of sample A after immersion in water was 100 %. The results indicated that immersion in water influenced the overall decrease in signal amplitude and caused a delay in reflection, as can be seen in Figure 3. The presence of water molecules in concrete pores influenced the increase in dielectric permittivity and electrical conductivity, and this effect increased attenuation of waves.

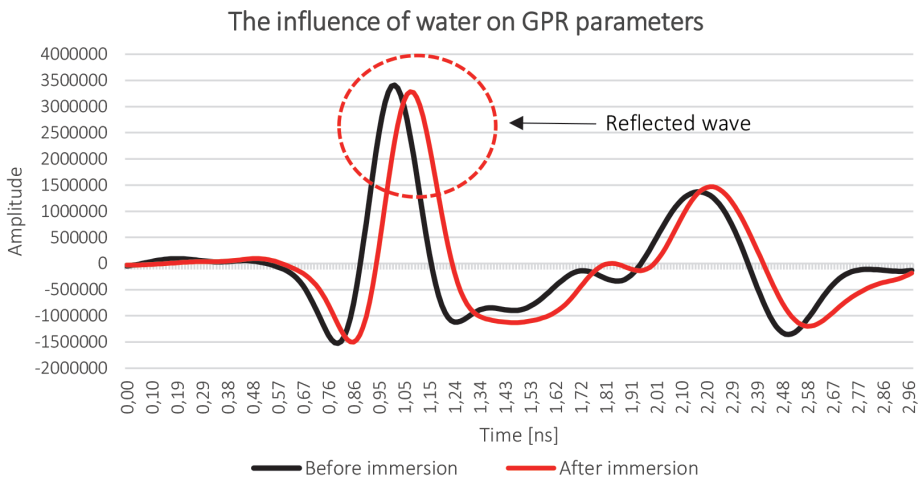


Figure 3. A-scans of sample A before and after immersion in water

4.2 Influence of water contaminated with chlorides on GPR signal parameters

Relative humidity of sample B after immersion in sodium chloride solution was 100 %. The change in signal strength was more pronounced when specimen was immersed in sodium chloride solution than in the case of pure water. This is expected since chlorides additionally have strong influence on material properties. Namely, chlorides in large degree influence electrical conductivity which enforces attenuation of signal.

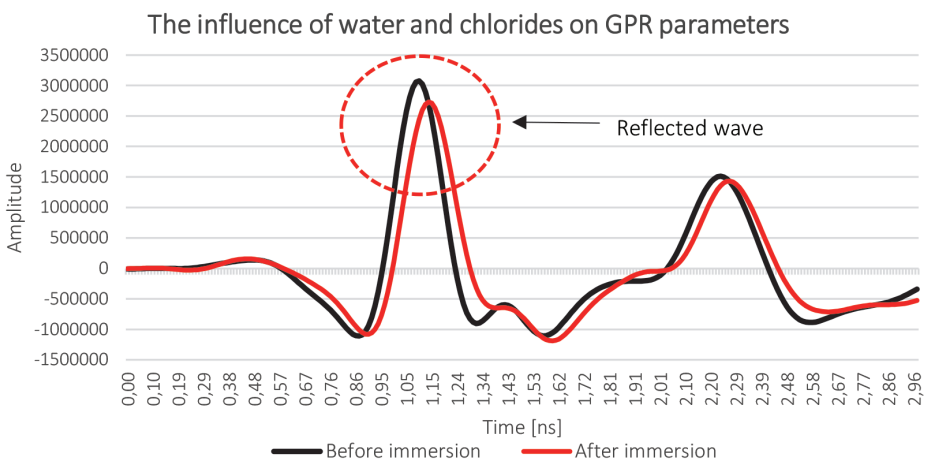


Figure 4. A-scans of sample B before and after immersion in sodium chloride

4.3 Influence of cracks on GPR signal parameters

The trend of change of signal amplitude during crack propagation is shown in Figure 5. Amplitudes of reflected waves are given for various crack widths. In general, the decrease in amplitude was observed with an increase in crack width. The exception was for crack widths 0.4, 0.5 and 0.7 mm, where the amplitudes were very similar, and it could not be argued that there was a clear influence from crack widening. The loss of signal could be explained by irregular crack boundaries affecting dispersion of the signal and general decrease in wave amplitude.

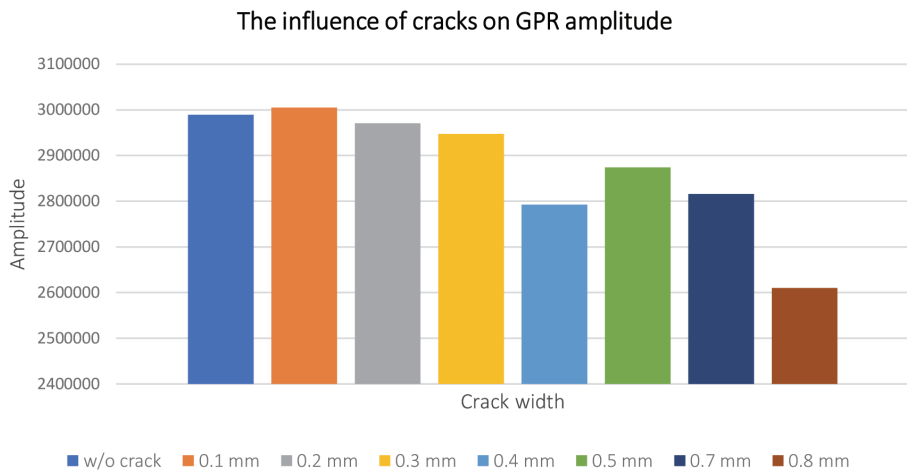


Figure 5. Signal amplitudes of sample B during crack propagation

4.4 Discussion

To compare the influence of water, water contaminated with chlorides and cracks, on GPR amplitude, the comparison before and after these influences is shown in Table 2.

Table 2. Comparison between various effects on GPR amplitude

	Event	Amplitude	Change relative to amplitude before immersion [%]	Change relative to amplitude w/o crack [%]	
Water	Before immersion in water	3413082	/	/	
	After immersion in water	3287298	3.69		
Water contaminated with chlorides	Before immersion in sodium chloride	3075655	/		
	After immersion in sodium chloride	2730460	11.22		
Cracks	w/o crack	2989515	/		/
	0.1 mm	3004932			-0.52
	0.2 mm	2970671			0.63
	0.3 mm	2947078			1.42
	0.4 mm	2792562		6.59	
	0.5 mm	2873972		3.86	
	0.7 mm	2815890		5.81	
	0.8 mm	2610181		12.69	

Based on results, It was concluded that the most severe amplitude decrease was caused by a 0.8 mm crack. However, the authors are aware that all signal strength changes listed in this paper are very subtle. The amplitude changes are consistent with the theory, but they should be more obvious to claim that some effect influences the change in amplitude. The cause of the subtle changes due to water and chlorides could be a very dense concrete with high durability properties, and so the exposure of the specimens to this condition is not realistic.

5 Conclusion

Preliminary experimental work on the influence of corrosion-related effects on the parameters of the ground penetrating radar signal is presented in this paper. The influence of water and chlorides, and corrosion-induced cracks, was observed.

It was found that a 0.8 mm crack caused a more significant change than immersion in water and sodium chloride for 11 days. However, the changes in amplitude were small for all three effects. Further research will focus on observing the effect of different material properties and exposure conditions on the signal strength. Furthermore, extensive research will aim to confirm the subtle change in amplitude

originating from cracks. In addition, crack widths will be extended to determine which crack width causes a significant change in signal.

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] Alexander, M., Beushausen, H.: Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique, *Cement and Concrete Research* **122** (2019), pp. 17–29, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.04.018.
- [2] Omar, T., Nehdi, M. L., Zayed, T.: Performance of NDT Techniques in Appraising Condition of Reinforced Concrete Bridge Decks, *Journal of Performance of Constructed Facilities* **31** (2017), doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001098.
- [3] Daniels, D.J.: *Introduction (Chapter 1)*, Ground Penetrating Radar 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, London, pp.1-11, 2004.
- [4] Lai, W.W.L., 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.
- [5] Hong, S., Wiggenhauser, H., Helmerich, R., Dong, B., Dong, P., Xing, F.: Long-term monitoring of reinforcement corrosion in concrete using ground penetrating radar, *Corrosion Science* **114** (2017), pp. 123–132, doi: 10.1016/j.corsci.2016.11.003.
- [6] 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.
- [7] Tarussov, A., Vandry, M., De La Haza, A.: Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: Ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation, *Construction and Building Materials* **38** (2013), pp. 1246–1254, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.026.
- [8] Tešić, K., Baričević, A., Serdar, M.: Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete, *Materials (Basel)* **14** (2021).
- [9] Senin S. F., Hamid, R.: Ground penetrating radar wave attenuation models for estimation of moisture and chloride content in concrete slab, *Construction and Building Materials* **106** (2016) pp. 659–669, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.156.

- [10] Kalogeropoulos, A., Van Der Kruk, J., Hugenschmidt, J., Busch, S., Merz, K.: Chlorides and moisture assessment in concrete by GPR full waveform inversion, *Near Surface Geophysics* **9** (2011), pp. 277–285, doi: 10.3997/1873-0604.2010064.
- [11] Hong, S., Lai, W.W.L., Helmerich, R.: Experimental monitoring of chloride-induced reinforcement corrosion and chloride contamination in concrete with ground-penetrating radar, *Structure and Infrastructure Engineering* **11** (2015), pp. 15–26, doi: 10.1080/15732479.2013.879321.
- [12] Wong, P.T.W., Lai, W.W.L., Sham, J.F.C., Poon, C.S.: Hybrid non-destructive evaluation methods for characterizing chloride-induced corrosion in concrete, *NDT and E International* **107** (2019), pp. 102-123, doi: 10.1016/j.ndteint.2019.05.008.
- [13] Dinh, K., Gucunski, N., Kim, J., Duong, T.H.: Understanding depth-amplitude effects in assessment of GPR data from concrete bridge decks, *NDT and E International* **83** (2016), pp. 48–58, doi: 10.1016/j.ndteint.2016.06.004.
- [14] ACI International and International Concrete Repair Institute: *Concrete Repair Manual*. 1999.
- [15] 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.
- [16] Laurens, S., Balayssac, J.P., Rhazi J., Arliguie, G.: Influence of concrete relative humidity on the amplitude of ground-penetrating radar (GPR) signal, *Materials and Structures* **34** (2002), pp. 198–203, doi: 10.1617/13815.

Mogući pristup analizi procesa podlokavanja oko stupova mostova nastalih pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara

Martina Kovačević¹, doc.dr.sc. Kristina Potočki²

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

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kristina.potocki@grad.unizg.hr

Sažetak

Promjene u hidrološkom režimu, nastale pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara, omogućuju bolje poimanje hidrauličkih i geomorfoloških procesa u rijekama. Varijabilnost protoka i karakteristike poplavnih valova intenziviraju erozijske procese u rijekama i utječu na podlokavanje oko stupova mosta, što rezultira smanjenjem njihove sigurnosti. Cilj ovog rada je dati pregled literature mogućeg pristupa analizi procesa podlokavanja pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta i prikaz u te svrhe korištenih znanstvenih metoda s opisom onih koje će biti primjenjivane za buduće istraživanje. Također, postavlja se temelj za daljnje istraživanje povezano s R3PEAT projektom ("Remote Real-time Riprap Protection Erosion Assessment on large rivers"), podržanog od strane Hrvatske zaklade za znanost, koji istražuje utjecaj hidroloških procesa na erozijske procese oko mostova, koji prelaze preko velikih nizinskih rijeka u Hrvatskoj.

Ključne riječi: hidrološki i meteorološki parametri, podlokavanje, mostovi, R3PEAT projekt

Possible approach for evaluation of scour depth around bridges based on hydrological and meteorological parameters

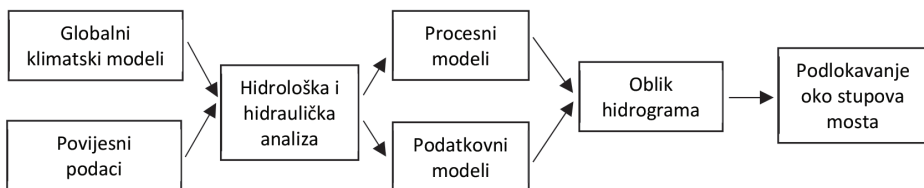
Abstract

The analysis of changes in the hydrological regime under the influence of hydrological and meteorological parameters allows a better understanding of hydraulic and geomorphological processes in rivers. The variability of discharge and characteristics of flood waves can lead to increased erosion of the riverbed and scouring in the vicinity of bridges, resulting in a reduction in the safety of infrastructure. The aim of this paper is to provide a literature review of the possible modelling approach for the scour analysis under the influence of hydrological and meteorological parameters on the scour around bridges and an overview of applied scientific methods with an emphasis on the ones that will be used for future research. Furthermore, a foundation is laid for future work associated with the R3PEAT ("Remote Real-time Riprap Protection Erosion Assessment on large rivers") project, supported by Croatian Science Foundation, investigating the influences of these hydrological processes on bed erosion around the construction of bridges crossing large rivers in Croatia.

Key words: hydrological and meteorological parameters, scouring, bridges, R3PEAT project

1 Uvod

Klimatske promjene ogledaju se u sve češćim i intenzivnijim promjenama u režimu voda i nanosa rijeka te posredno utječu na procese erozije u riječnom koritu. Mostovi, čiji su elementi pod utjecajem rijeka, izloženi su lokalnoj eroziji koja može dovesti do njihovog rušenja. Povećanje učestalosti i intenziteta poplava otežava ispravnu procjenu rizika oštećenja mostova uzrokovanih čimbenicima povezanim s poplavama [1]. Poplave intenziviraju eroziju riječnoga dna i podlokavanje, čime bitno narušavaju stabilnost mosta [2]. Strujna slika tečenja u vodotocima je pod utjecajem različitih faktora, poput količine oborina i karakteristika slivnog područja kao što su pokrov i površina. Uslijed toga, detaljna analiza dugoročnih utjecaja i rizika od poplava na životni vijek mostova i drugih prometnica, zbog svoje kompleksnosti, nije uvijek ekonomski isplativa. Iako ponekad financijski zahtjevna, analiza utjecaja djelovanja klimatskih promjena na prometnu infrastrukturu je od iznimne važnosti za njezinu stabilnost, što stvara potrebu za provođenjem sveobuhvatne statističke analize koja nije toliko računalno zahtjevna za provedbu [1]. Primjena metoda obrade podataka (npr. statističke metode, metode strojnog učenja i prema potrebi dodatne analize u vremensko-frekvencijskoj domeni) može se koristiti za usporedbu tako obrađenih klimatskih podataka prilagođenih s globalne na lokalnu razinu sa stvarnim podacima o vodotoku na pojedinoj lokaciji [3]. Ovakav pristup uzima u obzir utjecaje iz različitih globalnih klimatskih modela i scenarija emisije stakleničkih plinova na oštećenja uzrokovana poplavama, dok tradicionalni pristupi ne uzimaju u obzir posljedice klimatskih promjena i hidrološke karakteristike vodnih valova, što može dovesti do krive procjene utjecaja na budući rizik lokalne erozije korita i razvoja podlokavanja u blizini mostova [1]. Utjecaj na podlokavanje oko stupova mosta, osim poznatih hidroloških varijabli poput vodostaja i brzine toka [4], imaju volumen, trajanje i oblik hidrograma [5, 6], odnosno oblik vodnih valova [7]. Shodno tome, u sklopu rada prikazana su prethodna istraživanja na temu utjecaja hidroloških i klimatskih parametara na podlokavanje oko stupova mosta primjenom nekoliko znanstvenih metoda i modela, koji su pregledom literature ocijenjeni kao prikladni s obzirom na njihovu kompleksnost, popularnost, potrebu za podacima i sl. Također, opisane su temeljne metode i određen je smjer budućeg istraživačkog rada, koji je grafički prikazan na slici 1.



Slika 1. Dijagram toka istraživanja utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta

2 Pregled prethodnih istraživanja

Procjenu utjecaja klimatskih promjena na rizik od podlokavanja stupova mostova pod utjecajem poplava analizirali su Yang i Frangopol [8] primjenom *top-down* pristupa. Temelji se na globalnim klimatskim modelima i budućim klimatskim scenarijima. Geoprostorni podaci prikupljeni iz nekoliko baza podataka korišteni su za hidrološko modeliranje pomoću alata Soil & Water Assessment Tool (SWAT). Također, predložena je nova metoda za određivanje dubine temelja mosta koristeći informacije iz američke baze podataka National Bridge Inventory (US NBI). Kombinirajući rezultate hidroloških i klimatskih analiza koje utječu na vodne valove i procijenjene dubine temelja mosta, dugoročni regionalni rizik od podlokavanja kod mostova se može odrediti uključujući različite globalne klimatske modele i predviđanja. Klimatsko modeliranje na temelju globalnih klimatskih modela i tehnika statističkog skaliranja, ovisno o različitim klimatskim scenarijima, može prikazati buduće klimatske podatke. Postoje nesigurnosti prilikom korištenja raznih globalnih klimatskih modela zbog odabira klimatskih scenarija, čiji odabir rezultira potencijalno velikim razlikama u konačnim troškovima i kumulativnom riziku prilikom analize rizika od podlokavanja oko stupova mosta, pa se treba oprezno pristupiti tom području [9]. Hidrološko modeliranje omogućuje fizikalnu ekstrapolaciju podataka o protocima temeljenu na budućim temperaturama i oborinama dobivenih iz globalnih klimatskih modela. Također, hidrološko modeliranje može zamijeniti nepostojeće podatke o protoku na područjima gdje nema mjernih postaja. Da bismo analizirali rizik od podlokavanja povezan s predviđanjima o protoku potrebno je dobiti podatke o temeljima mosta, konkretno njihovoj dubini. Potrebni podaci dobiveni su iz US NBI. Postoje nedoumice o korištenju različitih klimatskih modela u sva tri odabrana buduća scenarija, no rezultati pokazuju da kod poplava koje rezultiraju podlokavanjem, klimatske promjene više utječu na frekvenciju poplava nego na intenzitet podlokavanja.

Khandelov i Solimanov [1] pristup podrazumijeva preuzimanje podataka s globalnih klimatskih modela proučavanog područja i njihovo adekvatno skaliranje na regionalnu razinu pomoću analogne metode Bias Correction Constructed Analogs (BCCA). U svrhu provođenja hidrološkog modeliranja poplavnih događaja koriste hibridni konceptualni alat IHACRES, koji povezuje podatke o oborinama, temperaturi i protoku dobivene iz globalnih klimatskih modela te na temelju budućih podataka o oborinama i temperaturi predviđa buduće dnevne protoke. Stacionarnost parametara uzeta je kao polazišna pretpostavka za analizu, a Khandel i Soliman za analizu nestacionarnih parametara predlažu metodologije drugih autora [10, 11]. Predviđanje vremenskog razvoja podlokavanja oko stupova mosta nastalog zbog erozijskog djelovanja protoka pod utjecajem klimatskih promjena provedeno je Monte Carlo simulacijama na modelu pripremljenom u programskom jeziku MATLAB. Zaključeno

je da vremenski razvoj erozijskih procesa (podlokavanja) oko mosta ovisi o odabranom klimatskom scenariju te je u budućim analizama potrebno usporediti sve potencijalne klimatske scenarije kako bi se adekvatno kvantificirao rizik od urušavanja mosta uvjetovanog poplavnim događajima.

Khandel i Soliman [12] paralelno predstavljaju okvir za dugoročno upravljanje mostovima temeljen na metodi dubokog učenja uzimajući u obzir utjecaj klimatskih promjena. Ulazni podaci za modeliranje su 15-godišnji zapisi o temperaturi i oborinama na 30 meteoroloških postaja, koji služe kao trening podaci za metodu neuronskih mreža (NN1) kako bi se uspostavio odnos između navedenih ulaznih parametara i podataka o protoku, dobivenih skaliranjem s globalnih na regionalne klimatske modele. Pomoću metode konačnih elemenata, koristeći OpenSees finite element (FE) softver, generiran je set podataka za treniranje druge neuronske mreže (NN2). Preliminarni podaci pokazuju da NN2 može ubrzati Monte Carlo simulaciju, nakon koje se može nastaviti računanje krivulja vjerojatnosti oštećenja mosta pod utjecajem poplava i njihovih posljedica.

Pristup dugoročnom upravljanju mostovima temeljen na trendovima poplavnih događaja pod utjecajem različitih klimatskih scenarija prikazan je na primjeru mosta na rijeci Lehigh u Pennsylvaniji [13]. Ulazni podaci preuzeti su s Max Planck Institute for Meteorology—Earth System Model—Low Resolution (MPI-ESM-LR) modela zbog njegove sličnosti sa stvarnim uvjetima. Provedena je statistička prilagodba podataka s globalnog klimatskog modela na rezoluciju 14-14 km, nakon koje je provedeno hidrološko modeliranje pomoću SWAT alata. Dubina podlokavanja oko stupova mosta empirijski je određena pomoću Hydraulic Engineering Circular (HEC-18) jednadžbi kako bi se procijenila stabilnost mosta pod utjecajem događaja povezanih s klimatskim promjenama. Zaključeno je da se dugoročni utjecaj poplavnih događaja, koji se manifestira podlokavanjem, može znatno ublažiti kratkotrajnim rješenjima poput riprap obloge te provođenjem precizne regionalne analize za svaki promatrani most.

Bento i dr. [14] predstavljaju metodologiju za procjenu rizika stabilnosti od podlokavanja temelja mosta u tri koraka. Prvi korak predstavlja statistička analiza maksimalnih godišnjih protoka i analiza frekvencije poplavnih događaja, uzimajući u obzir vršni protok i povratni period. Statistička analiza provedena je određivanjem teorijskih i empirijskih vjerojatnosti razdiobe podataka te konačnim odabirom modificirane metode aritmetičke sredine (MM method). Analiza frekvencije poplavnih događaja provedena je korištenjem dostupnog MATLAB koda. Nadalje, pomoću Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) softvera određene su hidrauličke varijable protoka (dubina i brzine) na lokaciji mosta, koje su uz ostale potrebne varijable (vrsta materijala, dimenzije mosta, maksimalna dubina podlokavanja oko stupova mosta) korištene za modeliranje u HEC-RAS Scour modelu te uspoređene s empirijskim izrazima. Modeliranjem dobiveni rezultati iskorišteni su za određivanje

rizika od podlokavanja na stabilnost mosta. Zaključeno je da se predložena metodologija može koristiti za redovitu inspekciju mostova te da je moguće korištenje sofisticiranijih modela za njezinu kalibraciju, konkretno korištenjem Computational Fluid Dynamics (CFD) softverskih alata.

Sintetički vodni valovi predstavljaju opis karakterističnih statističkih parametara i uvjeta tečenja dobivenih na temelju nizova mjenjenih povijesnih vodnih valova i mogu se odrediti raznim metodama u vremenskoj i frekvencijskoj domeni [3, 15]. Važan su hidraulički rubni uvjet u svrhu modeliranja uvjeta tečenja i provođenja morfoloških procjena kod kojih dolazi do lokalne erozije i podlokavanja u riječnom koritu. Pomoću statističke analize povijesnih podataka o vodnim valovima stvaraju se sintetički hidrogrami sezonskih vodnih valova s okvirnim brojem poplavnih valova za velike riječne slivove. Sintetički hidrogrami sezonskih vodnih valova koriste se u različite svrhe, poput procjene hidrauličkih uvjeta do kojih dolazi te lokalne erozije i podlokavanja u blizini mostova [16]. Pregledom literature iz metodologije analize hidroloških i meteoroloških parametara vodnih valova izdvojeno je nekoliko radova prikazanih u tablici 1. s obzirom na tip modela, korištene hidrološke i meteorološke varijable i veličinu vremenskog koraka.

Tablica 1. Pregled literature u području utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta

Primjena	Hidrološke i meteorološke varijable	Autori (godina)	Vremenski korak	Procesni model	Podatkovni model
Vjerojatnost urušavanja mosta	Protok	Khandel, O., Soliman, M. (2019) [1]	Godišnji	-	IHACRES
Upravljanje mostovima	Temperatura Oborine Protok	Khandel, O., Soliman, M. (2019) [12]	Dnevni	-	Neuronske mreže
Rizik podlokavanja oko mosta	Temperatura Oborine Protok	Yang, D. Y., Frangopol, D. M. (2019) [8]	Dnevni	SWAT	-
Upravljanje mostovima	Temperatura Oborine	Liu, L., et al. (2020) [13]	Dnevni	SWAT	-
Rizik podlokavanja oko mosta	Protok	Bento, A. M., et al. (2020) [14]	Dnevni	HEC-RAS	Statističke metode
Proračunski rizik podlokavanja oko mosta	Protok	Tubaldi, E., et al. (2017) [17]	Dnevni	HEC-RAS	-
Proračunski rizik podlokavanja oko mosta	Protok	Kallias, A. N., Imam, B. (2016) [18]	Godišnji	-	WINFAP-FEH 3
Proračunski rizik podlokavanja oko mosta	Protok	F. C. K. Ting, et al. (2011) [19]	Godišnji	-	Statističke metode

Definiranje karakterističnih vodnih valova na nizinskim rijekama te njihova veza s klimatskim indikatorima omogućila bi dodatnu informaciju u kratkotrajnom razdoblju u svrhu ranog uzbunjivanja te za procjenu rizika rušenja mostova uslijed podlokavanja u dugom razdoblju i time poboljšala upravljanje sigurnošću mostova. Istraživanjima procesa erozije oko stupova mosta s izvedenom riprap zaštitom i dubine podlokavanja, koji su glavni razlog urušavanja mostova, bavi se projekt R3PEAT (UIP-2019-04-4046), nastao kao nastavak dosadašnjih istraživanja.

3 Znanstvene metode

3.1 Procesni modeli

Procesni hidrološki modeli predstavljaju matematički idealiziran prikaz stvarnih procesa na slivu uključujući u proračun načela fizikalnih procesa. Njihovo korištenje ne zahtijeva toliko duge nizove ulaznih podataka za kalibraciju kao što je to kod podatkovnih modela, već velik broj varijabli koje opisuju fizikalne karakteristike sliva [20]. U praksi se koristi veći broj procesnih hidroloških modela poput: TOPMODEL, Institute of Hydrology Distributed Model (IHDM), Hydrologic Research Center Distributed Hydrologic Model (HRCDHM), Semi-Distributed Physically based Hydrologic Model using Remote Sensing and GIS (DPHM-RS), TOPNET, SWAT i dr.

Procesni hidraulički modeli za svoje korištenje zahtijevaju dovoljnu količinu podataka o geometriji vodotoka i okolnog terena, s preciznim opisom parametara u svrhu točnog predviđanja protoka i vodostaja nizvodno [21]. Između ostalog, u svrhu analize poplavnih događaja koriste se HEC-RAS, MIKE11, MIKE FLOOD i InfoWORKS, a HEC-RAS predstavlja jedan od najčešćih hidrauličkih modela za analizu poplavnih događaja [22, 23]. Budući da su SWAT i HEC-RAS u ovom pregledu literature detektirani kao odabrani pristup za opis hidrološko-hidrauličkih procesa, slijedi njihov bliži prikaz.

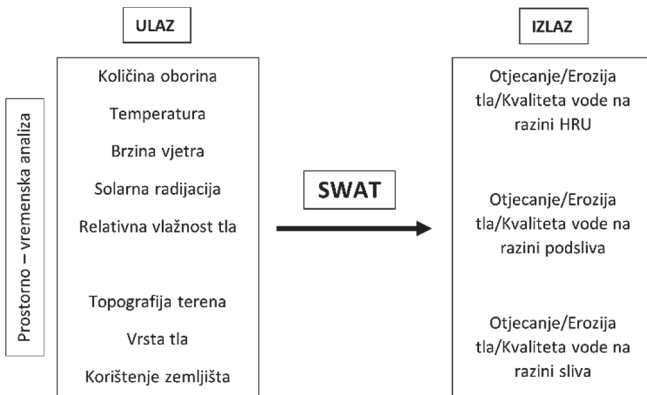
3.1.1 SWAT

SWAT [24, 25] predstavlja jedan od najkorištenijih procesnih modela za hidrološko modeliranje na razini sliva. Razvijen je u svrhu procjene utjecaja poljoprivrednih mjera na stanje vode i sedimenta u velikim riječnim slivovima. Model funkcionira na principu diskretizacije slivnog područja na manje jedinice (podslivove) te dodatnom podjelom podslivova na podjedinice - HRU (Hydrological Response Units), koji predstavljaju jedinstvenu kombinaciju podataka o vrsti tla, korištenju zemljišta i nagibu terena. Za simulaciju hidrološkog ciklusa SWAT koristi jednadžbu vodne bilance:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

gdje je SW_t ukupna zapremina vode na dan t [mm], SW_0 početna zapremina vode na dan i [mm], R_{day} ukupna količina oborine na dan i [mm], Q_{surf} količina površinskog otjecanja na dan i [mm], E_o iznos potencijalne evapotranspiracije na dan i [mm], W_{seep} količina procjeđivanja na dan i [mm] te Q_{gw} koji predstavlja povratni tok podzemnih voda na dan i [mm].

Modeliranje pomoću SWAT modela iziskuje detaljnu analizu promatranog područja, koja uključuje procesuiranje ulaznih podataka o oborinama, temperaturi, brzini vjetra, solarnoj radijaciji, relativnoj vlažnosti tla, korištenju zemljišta, vrsti tla i topografiji terena (slika 2).



Slika 2. Prikaz ulaznih i izlaznih varijabli hidrološkog modela SWAT

3.1.2 HEC-RAS

HEC-RAS [26] je računalni program inženjerskog odjela američke vojske (U.S. Army Corp of Engineers) razvijen u svrhu proračuna razine vodnog lica pri stacionarnom ili nestacionarnom tečenju u prirodnim i umjetnim vodotocima, pronosa nanosa, analize temperature i kvalitete vode. Jednodimenzionalnim HEC-RAS hidrauličkim modelom određuju se profili razina vodnog lica i brzina toka u svim čvorovima vodotoka uz poznavanje ulaznih podataka o protoku, hrapavosti kanala, rubnim uvjetima, promjenama u geometriji kanala na promatranom dijelu i sl. Profili razina vodnog lica računaju se od najnižvodnijeg čvora *Backward standard step* metodom primijenjenom na jednodimenzionalnu jednadžbu energije [27]:

$$H = Z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

gdje je H vrijednost energetske linije, Z visina iznad nulte ravnine, p tlak u točki [Pa], γ specifična težina vode [kN/m^3], α Coriolisov koeficijent korekcije kinetičke energije, v prosječna brzina toka [m/s] te g koji predstavlja akceleraciju sile teže [m/s^2].

Dvodimenzionalni HEC-RAS hidraulički model temelji se na rješavanju dvodimenzionalnih Saint-Venantovih jednadžbi ili difuznih jednadžbi koristeći algoritam implicitne metode konačnih volumena [28] na setu ulaznih podataka, koji se sastoji od diskretizirane proračunske mreže koja opisuje geometriju terena, rubnih uvjeta na uzvodnoj i nizvodnoj granici promatranog područja i odabira koeficijenta hrapavosti korita. HEC-RAS model za modeliranje zahtijeva veći broj ulaznih parametara kako bi se minimiziralo odstupanje od stvarnih procesa u prirodi. Ovisno o raspoloživosti podataka, može biti veoma primjenjiv alat za modeliranje utjecaja hidroloških veličina poput protoka i vodostaja, koje direktno utječu na podlokavanje oko stupova mosta.

3.2 Podatkovni modeli

Podatkovni ili empirijski hidrološki modeli temelje se na rješavanju matematičkih jednadžbi koje opisuju ulazne i izlazne podatke, zanemarujući analizu fizikalnih procesa na slivu. Iako su rezultati modela primjenjivi samo unutar promatranih granica modela, prednost im je što s obzirom na jednostavnu primjenu daju zadovoljavajuće rezultate analize. Primjeri podatkovnih hidroloških modela su metoda jediničnog hidrograma, statističke metode koje koriste regresijske i korelacijske modele te hidroinformatičke metode poput neuronskih mreža i metode neizrazite (fuzzy) logike [29]. U nastavku su opisane metode neuronskih mreža i statističke metode, koje su detektirane kao metode korištene u literaturi vezanoj za područje utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta (tablica 1), čija se upotreba očekuje tijekom daljnjeg istraživanja.

3.2.1 Neuronske mreže

Umjetne neuronske mreže temelje se na biološkim neuronskim mrežama, a sastoji se od skupa umjetnih neurona, čiji rezultat ovisi o procesu učenja kojim mreža stječe znanje o rješavanju određenog problema sadržanog u intenzitetu međuneuronskih veza. Primjenom nadziranog učenja za poznate ulazne vrijednosti i tražene izlazne vrijednosti parametri se korigiraju tako da se svakom iteracijom minimizira pogreška.

Sustavni pristup formiranju modela neuronskih mreža za hidrološka predviđanja započinje određivanjem izlaznih varijabli, koraka računanja i ulaznih varijabli. Prikladan oblik podataka za modeliranje neuronskih mreža podrazumijeva transformaciju podataka standardizacijom ili skaliranjem, nakon čega se skup podataka dijeli na podskupove za kalibraciju, testiranje i validaciju. Prije identifikacije sustava (pode-

šavanje strukture, kalibracija i validacija modela) potrebno je izabrati arhitekturu neuronske mreže, od kojih su najpoznatije: višeslojni perceptron (MLP), neuronske mreže s prijenosnom funkcijom radijalne baze (engl. Radial Basis Function, RBF), samoorganizirajuće mape (SOM), GRNN (engl. Generalized Regression Neural Networks), RNN (engl. Recurrent Neural Networks), SVM (engl. Support Vector Machines), TNN (engl. Temporal Neural Networks) te neuro-fuzzy, a MLP predstavlja najčešće korištenu arhitekturu za modeliranje hidroloških sustava. Konačno, potrebno je kvalitativno ocijeniti model ispitivanjem generalizacijskih svojstava mreže prije afirmacije mreže kao neuronskog modela pomoću: apsolutnih mjera (srednja kvadratna pogreška (MSE), korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE), srednja apsolutna pogreška (MAE), potencijalna pogreška (PE), i dr.), relativnih mjera (Pearsonov koeficijent (r), koeficijent određenosti (R^2), koeficijent učinkovitosti (CE), indeks podudarnosti (D), i dr.) te posebnih mjera (PI (eng. Persistence index), PBIAS (eng. Percent bias) i RSR (eng. RMSE to standard deviation ratio), i dr.) [30].

Hidrološko modeliranje neuronskim mrežama funkcionira na principu preslikavanja vektora ulaznih podataka (oborine, temperatura) u izlaz (protok) bez analize složenih procesa koji uvjetuju izlazne podatke.

3.2.2 Statističke metode

Pristup se temelji na primjeni metode ekstrema (engl. Extreme Value Analysis – EVA), kojom se može proučavati ekstremne događaje na godišnjoj razini (engl. Annual Maxima – AM) ili metodom prekoračenja praga (engl. Peak Over Threshold – POT). Analiza ekstrema najčešće se provodi u kombinaciji s prilagodbom teorijskih funkcija distribucije kako bi se odredila učestalost pojavljivanja promatrane varijable (povratni period). Najčešće korištene teorijske funkcije distribucije u modeliranju ekstrema su: Generalized extreme values (GEV), Gumbel (G), Log normal (LN), Pearson type 3 (P3), Log Pearson type 3 (LP3) i Generalized logistics (GL) [31]. Na odabranoj teorijskoj funkciji distribucije potrebno je provesti testove prilagodbe podacima u svrhu bolje preciznosti rezultata. U svrhu analize utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta, statistički pristup je prikladan zbog svoje jednostavnosti, no odabir konkretne statističke metode analize ulaznih podataka, prikladne funkcije distribucije i testa prikladnosti može bitno utjecati na konačne rezultate, što povlači problem subjektivnosti prilikom analize podataka.

3.3 Karakteristike prikazanih metoda

Daljnijim istraživanjem pokušat će se odgovoriti na pitanja utjecaja pojedinačnog poplavnog vala ili nekoliko uzastopnih vodnih valova manjeg intenziteta na intenzitet podlokavanja, definiranja veze između hidroloških parametara vodnih valova i erozije korita i utjecaja klimatskih promjena na karakteristike vodnih valova primjenjujući odabrane statističke metode, metode znanosti o podacima te metode numeričkog modeliranja za verifikaciju rezultata. U svrhu pripreme za buduće istraživanje u tablici 2 prikazane su karakteristike prethodno opisanih metoda, temeljene na proučavanju literature vezane uz utjecaj hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta pod utjecajem klimatskih promjena [1, 12, 13, 18], tehničkoj dokumentaciji SWAT modela [25], preglednog rada na temu hidroloških modela [29] i doktorskog rada o predviđanju hidrološkog dotoka pomoću umjetnih neuronskih mreža [30]. Karakteristike opisane u tablici 2 su klasificirane kao korisne i priložene kao doprinos budućem istraživanju, koje je predviđeno na području velikih nizinskih rijeka u Republici Hrvatskoj. Opisani modeli zasnovani na podacima (poglavlje 3.2), prilikom modeliranja u takvim uvjetima, ne uzimaju u obzir složene procese na slivu, poput infiltracije, evapotranspiracije, i sl. S druge strane, procesni modeli (poglavlje 3.1.) prevladavaju navedene nedostatke, no nedostupnost različitih ulaznih parametara (morfološki, hidrološki, meteorološki, i sl.) i pojava nereprezentativnih vremenskih serija podataka (manje od 30 godina dnevnih zapisa) onemogućava njihovo funkcioniranje. Proučavajući karakteristike predloženih znanstvenih metoda u svrhu modeliranja utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta možemo zaključiti da bi za potrebe modeliranja na pilot mostovima u budućem istraživanju bilo poželjno kombinirati nekoliko pristupa (ovisno o dostupnosti ulaznih podataka).

Tablica 2. Usporedba predloženih znanstvenih metoda za istraživanje utjecaja hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta

Karakteristike metoda	Literatura	PROCESNI MODELI		PODATKOVNI MODELI	
		SWAT	HEC - RAS	Neuronske mreže	Statističke metode
Velika količina različitih ulaznih parametara	[1, 18, 25, 30]	+	+	+/-	-
Dugi nizovi ulaznih podataka	[25, 30]	-	-	+	+
Veća računalna zahtjevnost	[1, 25, 29]	+	+	-	-
Zahtjev za prostorno distribuiranim ulaznim podacima	[13, 25, 29, 30]	+	+	-	-
Mogućnost primjene modela na drugom slivu	[25, 29]	+	+	-	-
Modeliranje neizučениh slivova	[25, 29]	+	+	+/-	-
Veća subjektivnost u odabiru koraka analize a na rezultate hidrološko-hidrauličkih procesa	[1, 12, 30]	-	-	+/-	+

* Oznake „+“ i „-“ u tablici predstavljaju istinitost tvrdnje (karakteristike metoda) za pojedini model

4 Zaključak

Analiza promjena u hidrološkom režimu, intenzitetu i frekvenciji kratkotrajnih poplavnih događaja omogućuje bolji uvid u hidrauličke i geomorfološke procese u rijekama. Promjene u karakteristikama vodnih valova i varijacije intenziteta protoka mogu pojačati eroziju riječnog dna i umanjiti sigurnost izgrađene infrastrukture poput mostova preko rijeka.

U ovom radu prikazan je pregled literature mogućeg pristupa analizi procesa podlokavanja pod utjecajem hidroloških i meteoroloških parametara na podlokavanje oko stupova mosta, zajedno s korištenim znanstvenim metodama od kojih su detaljnije opisane one koje su detektirane kao mogući pristup za buduće istraživanje. Također, prikazan je osvrt na karakteristike opisanih znanstvenih metoda klasificiranih kao korisne za potrebe budućeg istraživanja na konkretnim podacima.

Buduća istraživanja orijentirat će se na primjenu opisanih znanstvenih metoda na dostupne podatke za nekoliko vodomjernih postaja u Republici Hrvatskoj, što će pridonijeti R3PEAT projektu boljom definicijom ulaznih hidrauličkih parametara, na način da se definira model koji povezuje utjecaj klimatskih promjena i karakteristike vodnih valova s procesima lokalne erozije korita i razvoja kaverni u neposrednoj blizini mostova.

Zahvala

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u okviru projekata „Daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu” (R3PEAT, UIP-2019-04-4046) i „Projekt razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti” (DOK-2020-01), koje financira Hrvatska zaklada za znanost.

Literatura

- [1] Khandel, O., Soliman, M.: Integrated Framework for Quantifying the Effect of Climate Change on the Risk of Bridge Failure Due to Floods and Flood-Induced Scour, *Journal of Bridge Engineering* 24 (2019) 9.
- [2] Cook, W., Barr, P. J., Halling, M. W.: Bridge failure rate, *Journal of Performance of Constructed Facilities* 29 (2015) 3.
- [3] Kovačević, M., Potočki, K.: Application of Continuous Wavelet Transform for Analysis of Discharge and Precipitation Variability on the Three Stations in the Sava River Basin, *Fifth International Workshop on Data Science, Zagreb, Croatia, 2020*.
- [4] Dalvand, R., Komasi, M.: Evaluation of nonparametric tree models for predicting the scour depth of bridge piers, *Ukrainian Journal of Ecology*, 9 (2019) 3.
- [5] Ting, F. C., Larsen, R. J., Jones, A. L.: Hydrographs and Estimates of Scour Depth Excess for Pier Scour Prediction: Use for Ungauged Streams with Scour Rate in Cohesive Soils Method, *Transportation research record*, 2262 (2011) 1, pp. 193-199.
- [6] Maroni, A., Tubaldi, E., Val, D. V., McDonald, H., Zonta, D.: Using Bayesian networks for the assessment of underwater scour for road and railway bridges, *Structural Health Monitoring*, 2020.
- [7] Kovačević, M., Potočki, K., Gilja, G.: The analysis of streamflow variability and flood wave characteristics on the two lowland rivers in Croatia, *EGU General Assembly 2021*, Vienna, 2021.
- [8] Yang, D. Y., Frangopol, D. M.: Physics-based assessment of climate change impact on long-term regional bridge scour risk using hydrologic modeling: Application to Lehigh river watershed, *Journal of Bridge Engineering* 24 (2019) 11.
- [9] Piontek, F., Müller, C., Pugh, T. A., Clark, D. B., Deryng, D., Elliott, J., ..., Schellnhuber, H. J.: Multisectoral climate impact hotspots in a warming world, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (2014) 9, pp. 3233-3238.
- [10] Wallner, M., Haberlandt, U.: Non-stationary hydrological model parameters: a framework based on SOM-B, *Hydrological Processes*, 29 (2015) 14, pp. 3145-3161.

- [11] Pathiraja, S., Marshall, L., Sharma, A., Moradkhani, H.: Hydrologic modeling in dynamic catchments: A data assimilation Approach, *Water Resources Research* 52 (2016) 5, pp. 3350–3372.
- [12] Khandel, O., Soliman, M.: Deep learning based framework for long-term management of bridges considering climate change effects, *In Proceeding of 2019 IABSE Congress*, New York, 2019.
- [13] Liu, L., Yang, D. Y., Frangopol, D. M.: Network-level risk-based framework for optimal bridge adaptation management considering scour and climate change, *Journal of Infrastructure Systems* 26 (2020) 1.
- [14] Bento, A. M., Gomes, A., Viseu, T., Couto, L., Pêgo, J. P.: Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations, *Engineering Structures* 223 (2020).
- [15] Potočki, K., Gilja, G., & Kunštek, D.: An overview of the applications of wavelet transform for discharge and suspended sediment analysis, *Technical Gazette* 24 (2017) 5, pp. 1561-1569.
- [16] Karmaker, T., Dutta, S.: Generation of synthetic seasonal hydrographs for a large river basin, *Journal of hydrology* 381 (2010) 3-4, pp. 287-296.
- [17] Tubaldi, E., Macorini, L., Izzuddin, B. A., Manes, C., Laio, F.: A framework for probabilistic assessment of clear-water scour around bridge piers, *Structural safety*, 69 (2017), pp. 11-22.
- [18] Kallias, A. N., Imam, B.: Probabilistic assessment of local scour in bridge piers under changing environmental conditions, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12 (2016) 9, pp. 1228-1241.
- [19] Ting, F. C., Larsen, R. J., Jones, A. L.: Hydrographs and Estimates of Scour Depth Excess for Pier Scour Prediction: Use for Ungauged Streams with Scour Rate in Cohesive Soils Method, *Transportation research record*, 2262 (2011) 1, pp. 193-199.
- [20] Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'connell, P. E., Rasmussen, J.: An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of hydrology*, 87 (1986) 1-2, pp. 61-77.
- [21] Gichamo, T. Z., Popescu, I., Jonoski, A., Solomatine, D.: River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling, *Environmental Modelling & Software*, 31 (2012), pp. 37-46.
- [22] Alaghmand, S., bin Abdullah, R., Abustan, I., Eslamian, S.: Comparison between capabilities of HEC-RAS and MIKE11 hydraulic models in river flood risk modelling (a case study of Sungai Kayu Ara River basin, Malaysia), *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2 (2012) 3, pp. 270-291.

- [23] Carling, P., Villanueva, I., Herget, J., Wright, N., Borodavko, P., Morvan, H.: Unsteady 1D and 2D hydraulic models with ice dam break for Quaternary megaflood, Altai Mountains, southern Siberia. *Global and Planetary Change*, 70 (2010) 1-4, pp. 24-34.
- [24] Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., Green, C. H.: History of model development at Temple, Texas, *Hydrological Sciences Journal* 53 (2008) 5, pp. 948–960, 2008.
- [25] Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009, *Texas Water Resources Institute*, 2011.
- [26] Brunner, G. W.: HEC-RAS river analysis system 2D modeling user's manual, *US Army Corps of Engineers—Hydrologic Engineering Center*, pp. 1-171, 2016.
- [27] U.S. Army Corps of Engineers: HEC-DSS User's Guide and Utility Program Manuals, *Hydrologic Engineering Center*, Davis CA, 1990.
- [28] Brunner, G. W., & CEIWR-HHT.: Benchmarking of the HEC-RAS Two-Dimensional Hydraulic Modeling Capabilities, *US Army Corps of Engineers—Hydrologic Engineering Center*, 2018.
- [29] Devia, G. K., Ganasri, B. P., Dwarakish, G. S.: A review on hydrological models, *Aquatic Procedia*, 4 (2015), pp. 1001-1007.
- [30] Matić, P.: Short-term Inflow Prediction Using Artificial Neural Network, University of Split, Croatia, 2014.
- [31] Morlot, M., Brilly, M., Šraj, M.: Characterisation of the floods in the Danube River basin through flood frequency and seasonality analysis, *Acta hydrotechnica* 32 (2019) 57, pp. 73-89.

Behaviour of thin-walled cold-formed steel structures in fire

Anton Kralj¹, Prof. Davor Skejić²

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Structures, anton.kralj@grad.unizg.hr

² University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Structures, davor.skejic@grad.unizg.hr

Abstract

Thin-walled cold-formed steel (CFS) members have become increasingly popular over the last decades in the light-steel frame (LSF) construction industry as primary load-bearing members. Valuable properties of CFS arise from the manufacturing process, while the undesirable ones, such as cross-section and member instabilities, are especially pronounced at extreme temperatures. Considering present-day stringent fire safety regulations, which require that all buildings and their structural components perform safely in fire situations, structural designers have to make greater efforts to understand complex structural behaviour at elevated temperatures. Besides laboratory testing, numerical analyses provide adequate and economic solutions for better understanding and predicting such complex behaviour.

Key words: cold-formed steel, fire design, laboratory testing, numerical simulation

Ponašanje tankostijenih hladno oblikovanih čeličnih konstrukcija u uvjetima požara

Sažetak

U proteklih nekoliko desetljeća, tankostijeni hladno oblikovani čelični elementi (CFS) sve češće se u lakim čeličnim okvirnim konstrukcijama (LSF) koriste kao primarni nosivi elementi. Vrijedna svojstva CFS-a proizlaze iz proizvodnog procesa, a nepoželjna svojstva, poput nestabilnosti poprečnog presjeka i elemenata, naročito su izražena pri ekstremnim temperaturama. S obzirom na današnje stroge propise u pogledu protupožarne sigurnosti, prema kojima sve građevine i njihove nosive komponente trebaju biti otporne na djelovanje požara, konstrukteri trebaju nastojati u što većoj mjeri proniknuti u složeno ponašanje konstrukcija pri visokim temperaturama. Uz laboratorijska ispitivanja, numeričke analize također pružaju prikladna i ekonomična rješenja koja omogućuju bolje razumijevanje i predviđanje takvog složenog ponašanja.

Ključne riječi: hladno oblikovani čelik, protupožarno projektiranje, laboratorijsko ispitivanje, numerička simulacija

1 Introduction

Ever since its introduction, cold-formed steel (CFS) has shown its advantages over traditional materials. The most important advantage is that steel is a non-combustible material and, due to low resistance of timber buildings to fire, CFS became interesting already in 1850 when it was for the first time applied in construction industry [1]. Over the past decades, CFS has been increasingly gaining in popularity in both industrial and residential constructions, and its members are widely used for load-bearing purposes in light-steel frame structures (LFS). For this reason, it is very important that structural engineers take into consideration load-bearing capacities at both ambient temperatures and at extreme temperatures during fire events [2].

CFS members exhibit a specific structural behaviour due to instabilities arising from the manufacturing process. Although such behaviour can be seen already at ambient temperatures, these members become even more sensitive in the case of extreme temperatures during fire events, because of non-uniform distribution of temperature through the cross-section. Usually, CFS members are a structural part of panel systems consisting of protection materials (e.g., pasteboard) and insulation materials (e.g., stone wool), which improve their thermal and structural performance. On the other hand, these materials result in less uniform temperatures. Thus, greater care must be taken to understand their complex structural and thermal behaviour.

The effective width method (EWM) is used in the traditional approach to structural design of CFS for ambient temperatures [3]. The new and currently growing replacement for this method is the Direct Strength Method (DSM), which combines local, distortional or global buckling, with cross-sectional resistance [2]. Both methods can be used in the fire design of CFS members, where DSM advantages are more pronounced. Because of the non-uniform distribution of temperature in CFS members, cross-sections must be divided into a large number of parts (strips) of uniform temperature, which will influence various mechanical properties of each part. This is why DSM seems to be a better approach in design, and could be preferred to the traditional EWM [2].

Design can also be carried out using a more sophisticated approach involving parametric numerical simulations with general FE software such as ABAQUS [4]. ABAQUS is applied for both heat transfer modelling and structural analysis. The structural-thermal analysis is performed so that realistic temperature profiles can be used in the simulation of structural response. This method is more exact than any hand calculation method but requires modelling experience, and it is always important to demonstrate simulation validity with experimental results.

Building with CFS is still in the development phase due to the lack of tests and studies. There are many studies on which Eurocode is based, but they are usually numerical without an experimental method that would enable comparison [5]. This is why every new experimental study with numerical simulation is one step forward toward better and simplified design, especially in the sphere of fire design.

2 Production of cold-formed steel frames

The name of cold-formed comes from the forming method used in the manufacturing process, during which steel remains in a cold state. Unlike the hot-rolled steel (HRS), the cold-formed steel is formed at roughly room temperature which makes it different in chemical composition, i.e., making it strong, durable and lightweight, among other valuable properties. Methods of forming CFS are cold roll forming, press brake operation, and bending brake operation. Roll forming, as the fastest manufacturing process, is usually used for building components such as individual structural members. Machine pair of rolls progressively form strips into the final required shape. The thickness of steel strip generally used in cold-formed steel structure members ranges from 0.38 mm to about 2.00 mm. Strips are no more than 825 mm wide. Manufacturers supply cold-rolled steel in coils and can adapt to the client's wishes such as the maximum and minimum dimensions and coil weights, and the length of the strip also depends on such adaptations. The maximum yield strength is 420 MPa, according to EN 10268 [6], and the hot dip galvanised coating is used [7, 8]. The speed of the rolling process ranges from 6 to 92 m/min. After forming, they are cut to the required lengths by an automatic cut-off tool without stopping the machine. Cut lengths usually vary between 6 and 12 m and can always be adapted to specific requirements. The tolerances in roll forming are usually affected by the section size, product type, and material thickness. All these facts are necessary for automation of the manufacturing process so as to enable mass-production.

The biggest advantage of CFS members is high optimization of cross-section, with a variety of configurations coming from the manufacturing process. Thanks to such varied configurations, CFS members can be structurally extremely efficient and able to suit any specific application. The main advantage is their very low weight to strength ratio. Their limitation also comes from the manufacturing process and is related to wall thickness. In fact, there are many instabilities that do not occur in HRS. These are categorized as local, distortional and global buckling.

CFS members usually come in shapes such as C-sections, Z-sections, I-sections, angles, hat sections, T-sections, and tubular sections (Figure 1). A major function of individual framing members is to carry load, providing structural strength and stiffness. These elements are generally used for roof decks, floor decks, and wall panels.

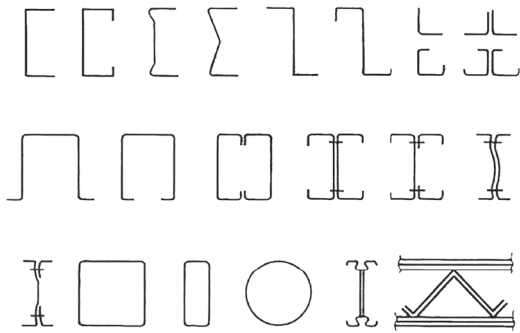


Figure 1. Typical CFS cross-sections [9]

CFS members are primarily used in constructions as structural load-bearing members such as columns, beams and roof trusses. In the light-steel frame (LSF) construction industry, the primary load-bearing components are walls. Walls are usually assembled in panels (Figure 2), which are made of CFS thin-walled members that are used to form load-bearing framing, and gypsum plasterboards with or without insulation infill. Besides the structural load-bearing function, a panel should incorporate insulation and fire resistance function in a single assembly. The framing consists of individual members connected together to form a load-bearing structure. Joints between bearing members transmit forces and moments between members and are conceptualized in such a way to retain the advantage of fast construction, i.e., fast assembly.

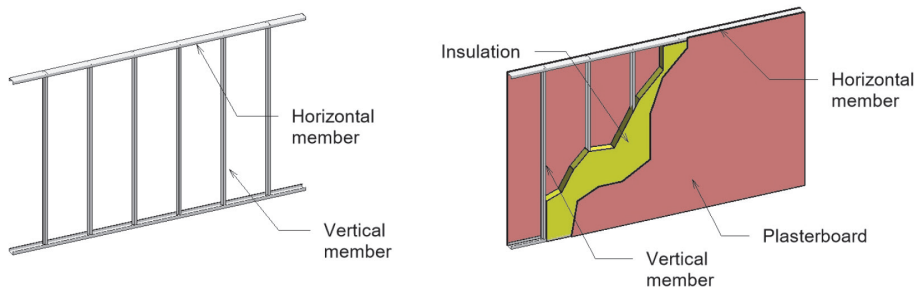


Figure 2. LSF wall panel

Connections in CFS framing construction industry are divided into nine types. They can be made with bolts, self-tapping screws, blind rivets, powder actuated pins, spot welding, puddle welding, clinching, self-piercing rivets, and nailing [9]. Different types of connection are used depending on the application, for example, bolts are used to connect individual members while self-tapping screws, blind rivets, and

powder-actuated pins are used to fasten thin sheeting such as plasterboards. Plasterboard and infill materials will also have a significant influence on the behaviour of CFS thin-walled members [10]. Plasterboards protect CFS studs from rapid temperature rise in fire conditions and provide adequate resistance against twisting and buckling [11]. Infill materials are used as insulation and many types are available, e.g., stone wool, glass wool, and various types of polymer foams. They can also influence behaviour of CFS thin-walled members, i.e., as protection from temperature rise in a fire situation, or they can provide some kind of restraint with regard to cross-sectional or member instabilities.

3 Fire requirements

Fire design is an important and essential requirement in the design process for buildings/structures [12]. The main goal of fire protection is to limit risk to people and property. To ensure safety of lightweight steel-framed constructions, adequate regulations have been proposed with regard to their resistance to fire. Within Europe, fire resistance requirements are specified in national building regulations [13]. All buildings must meet some functional requirements, and these are usually linked to the purpose and height of a building [12]. That means that a construction has to have adequate resistance and retain its stability for a reasonable period of time. In a fire event, the building has to perform in a satisfactory manner to limit propagation of fire, to ensure evacuation of the occupants, or to allow safe operations. All these requirements are connected with the time of survival in the standard fire test. A comparison between several national building code regulations (Croatia, Austria, Germany) is presented in Table 1.

In Table 1, the resistance class symbol “R” represents resistance and the number means how many minutes of adequate resistance needs to be obtained in the standard fire test [14]. Reaction to fire class symbol “A” with number represents a material’s contribution to fire spread, where “A1” and “A2” are non-combustible materials. The method for calculating the resistance class is defined in Eurocodes. Thus, the information about thermal actions for temperature analysis is given in EN 1991-1-2 [14], and the method for calculating temperature rise in steelwork can be found in EN 1993-1-2 [15]. If the structural fire performance of elements is based on testing such as in the case of load-bearing walls, the procedure for obtaining a class resistance value is provided at the end of EN 1365-1 [16].

Table 1. Comparison between national building regulations on fire resistance

Part of the building	Country	Building Class				
		1	2	3	4	5
Top floor or attic	Croatia	without requirements	R30	R30	R30	R60
	Austria	without requirements	R30	R30	R30	R60
	Germany	without requirements	R30	R30	R60	R90
Ground floor or other floors	Croatia	R30	R30	R60	R60	R90
	Austria	R30	R30	R60	R60	R90 (6 floors and higher - R90 and A2)
	Germany	without requirements	R30	R30	R60	R90
Underground floors	Croatia	R60	R60	R90	R90	R90
	Austria	R60	R60	R90 and A2	R90 and A2	R90 and A2
	Germany	R30	R30	R90	R90	R90

4 Structural fire performance of LSF

4.1 Design of structural members according to Eurocode

Because of complex behaviour of CFS members, design methods are lagging behind others such as the ones for HRS members [12]. Their specific behaviour requires more studies and, because of specific manufacturing process and variety of possible configurations, they can not be fully covered by standard methods. General performance of CFS differs greatly from that of HRS because of a class of cross-section 4 which is defined in EN 1993-1-1 [17]. The reason for this is high slenderness of thin walls of cross-section and very low torsional stiffness in correspondence with bending stiffness. Moreover, CFS exhibit more instability phenomena which become even more pronounced in extreme temperature situations [18].

The most common fire design method for steel is to design a building for the ambient temperature load, and then to cover the steel members with adequate fire protection to ensure that a specific temperature is not exceeded. Eurocode offers a more flexible approach to fire design, involving a simple consideration of an isolated member approach or consideration of physical parameters coupled with an analysis of the entire building [12]. The fire design Eurocode can be simplified into three components, i.e., characterisation of fire model, consideration of temperature distribution within the structure, and assessment of structural response.

The design approach for CFS members is based on EN 1993-1-1 [17] which gives general rules for the design of steel structures. Additional design rules for CFS members are given in EN 1993-1-3 [3], which gives additional information related to instabilities, in addition to the one for HRS. The EN 1993-1-2 [15] contains an informative Annex E for class 4 (slender) cross-section that specifies temperature

reduction factors for the stress-strain relationship of CFS. This method from Annex E suggests that CFS members should be designed according to a method that is a direct extrapolation of the method for room temperature design [19]. Several researchers [20-23] investigated this issue and concluded that design rules given in standards for ambient temperatures can be used to determine capacities of CFS members at elevated temperatures. Also, the European standard is supported by several numerical analyses of CFS members subjected to fire, as proposed by Arrais [24], Couto [25], and Laim and Rodrigues [26]. They concluded that current rules are on the safe side and that they are sometimes even too conservative. On the other side, the method proposed in Eurocode [15] provides mechanical properties reduction factors that largely differ from recent research regarding the manufacturing process, chemical composition, thickness, and grade. Several numerical studies suggest that EN 1993-1-2 [15] is unreliable in some cases.

Couto [25] and Laim and Rodrigues [26] investigated CFS beam members. Couto et al. [25] suggest different design curves in the case of lateral-torsional buckling of slender (class 4) beam cross-sections.

Gunalan et al. [22] investigated compression resistance of CFS columns at elevated temperatures and suggested that more studies should be performed as there is in some cases a lack of non-linear material characteristics in design standards. This concerns non-linearity between the proportional limit stress and yield strength, strain hardening between yield and ultimate strength, and varying yield strength to Young's modulus ratio [27].

The main method given through EN 1993-1-3 [3] is the effective width method. Thus, structural properties of a particular member can be specified through testing and also through the FE method explained in EN 1993-1-5 [28], Annex C. In addition, laboratory testing results or parametric numerical study results should be provided so that a more realistic analysis of CFS members can be performed. Parametric laboratory testing is cost and time consuming and it is sometimes difficult to find materials with different non-linear properties. Numerical simulation is a cost-effective method to obtain a detailed parametric study [27]. On the other hand, it is essential to set appropriate modelling properties and factors to achieve an accurate structural response. Therefore, simulations like FEM require validation of models based on experimental results.

4.2 Laboratory testing

4.2.1 Laboratory testing of individual members

To get appropriate results from testing, it is essential to subject the specimen to conditions of the environment that it will be used in. EN 1993-1-2 [15] proposes a standard fire test in furnace where temperature depends on the ISO 834 [14] stand-

ard fire curve [29]. Also, a group of European standards EN 1365 gives fire testing specifications for individual members and systems such as walls or floors. Members of the structure sometimes require individual approach as they are not part of the structural system like walls or floors. Procedures for testing individual members are defined in European standards EN 1365-3 [30] and EN 1365-4 [31]. These standards specify heating and loading conditions as well as the performance criteria that must be applied to measure time of fire resistance.

4.2.2 Laboratory testing of structural systems

In LSF construction industry, walls and floors are the primary load-bearing components that are covered by parts of EN 1365-1 [32] for walls and EN 1365-2 [33] for floors and roofs. The purpose of these tests is to measure the ability to maintain load-bearing capacity and resist the spread of fire from one side to another. The standard also specifies equipment required to perform a test, test conditions (furnace atmosphere, loading and restraints), test specimen (size, number, design, construction and verification), application of instrumentations (devices for measuring temperature, load and deflection) and test procedure. Finally, it gives performance criteria according to EN 1363-1 [29], while standard requirements for buildings (fire resistance class) can be determined according to EN 1991-1-2 [14] and national building regulations [13].

For example, detailed information on structural performance criteria for vertical load-bearing capacity of the element is given in EN 1363-1 [29], where element failure occurs when one of two criteria connected with deflection is exceeded. The first criterion relates to the limit value of deflection, C_{limit} , equation (1), and the second one concerns the deflection rate, $(dC/dt)_{\text{limit}}$, expressed in minutes, equation (2), where h is the initial height of specimen in millimetres.

$$C_{\text{limit}} = \frac{h}{200} \text{ [mm]} \quad (1)$$

$$\left(\frac{dC}{dt} \right)_{\text{limit}} = \frac{3h}{1000} \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

Specification EN 1363-1 [29] provides strict rules for testing procedures that can be performed only by specialized and certified laboratories.

4.3 FEM simulation

In LFS structures subjected to fire, temperature is usually non-uniformly distributed through individual members. Members are generally a part of structural systems such as walls and floors that are exposed to fire from one side, which leads to non-uniform distribution of temperature through the CFS cross-section. Also, they are assembled in different configurations of sheeting and infill material, which influences temperature distribution, stiffness, and stability. Knowledge about behaviour of individual members at elevated temperatures is essential for understanding behaviour of LSF structural systems in fire conditions. Figure 3.a shows comparison of experimentally and numerically obtained typical failure modes of individual members subjected to compression at elevated temperature. In steel sections, temperature depends on the temperature of the fire compartment, which in the case of the standard fire test follows the standard fire curve ISO 834 [14]. The issue is about transferring heat from fire compartment to the structural element [12]. The governing equation for that is the heat conduction equation and its boundary, which is the basis for the simplified thermal conductivity. The main section factors for conduction are the mass and the surface area of the member exposed to fire. In Eurocode, the simplification is divided into protected and unprotected steelwork exposed to fire [15].

More advanced models of heat transfer need to be applied due to complex heat conduction when CFS members are implemented in LSF systems such as walls and floors [2]. Sheetting and infill materials protect CFS members from direct influence of extreme temperatures and from rapid rise in temperature by distributing the heat through their mass. This gives an opportunity for heat to spread more efficiently and slowly before heating the CFS members. Figure 3.b. shows non-uniform temperature distribution of LSF wall cross-section [34]. This is very important for CFS members that are extremely sensitive in the case of extreme temperatures.

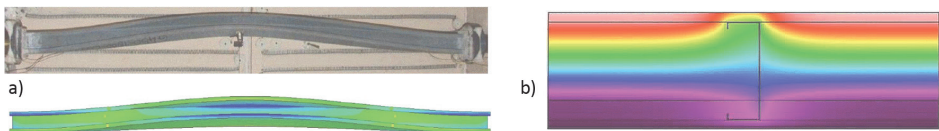


Figure 3. Complex results of FEM simulations: a) Comparison of typical failure modes based on test and FEM [27], b) FEM model for temperature distribution [34]

Another benefit that comes from sheetting and infill materials is that they have positive effects on instabilities of cross-section and member buckling, preventing early collapse of CFS members at 'low' temperatures. Complex simulation of that behaviour necessitates that, for every temperature value, a profile of temperature distri-

bution needs to be obtained along the member, and then structural analysis needs to be performed. In order to obtain valuable results, this needs to be analysed in small temperature intervals. Eurocode [15] also allows for advanced calculation models such as the finite element solution for the determination of thermal and structural performance, which can be performed using software like ABAQUS [4]. To ensure accuracy of the numerical model, the model should be validated with relevant fire test results. Normally, the behaviour of CFS members subjected to fire is simulated with two separate FE models. One model is for the determination of temperature distribution in members, and the other one is used for structural response of the structure. Recent research [35, 36] suggests that a fully coupled FEM model be based on the fundamental physical behaviour (simulation) and that it would be, in fact, more accurate than two uncoupled models. Nevertheless, that model would also be more challenging for simulation and would require more advanced modelling skills, like selecting the most appropriate simulation parameters such as the element type, mesh size, initial imperfection and scale, and temperature profile along the length and in cross-section of the member [15].

5 Conclusion

The main goal of this paper is to offer an insight into the behaviour of CFS members exposed to extreme temperature situations such as fire. Unlike individual members, LSF constructions are assembled by means of several components/materials that have a particular desirable function but also together provide more complex structural behaviour in a fire situation. CFS members assembled in frames have a structural function as main load-bearing components, sheeting function (e.g., plasterboards), and fire protection (and aesthetic) function, while infill materials (e.g., polymer foam) provide for insulation. Connections for all components are conceived for a specific purpose and to enable fast construction and assembly. Along with their main functions, sheeting and infill can also contribute to structural performance of CFS framing, providing restraints for instabilities of CFS members and protecting them from direct fire exposure by lowering heat transfer and preventing rapid rise of temperature. This leads to non-uniform heat transfer, which requires specific numerical calculation of conductivity. Complex behaviour of CFS members, arising from themselves and from other components, requires a very consistent approach for solving structural and thermal performance. Such complex behaviour can be analysed via laboratory testing that is limited and often too expensive, or through numerical analyses (FEM) that are sometimes too complex for interpretation and require advanced knowledge.

Future research on this topic would involve detailed study of relevant FEM simulation techniques. This should be a precondition for establishment of a valuable

FEM model for predicting global behaviour of innovative CFS structural systems (LFS structures). Such preliminary numerical simulation will ensure a good insight into the complex behaviour and planning of the fire testing programme. After performing laboratory testing, it is crucial to question the accuracy of preliminary numerical results, and to perform calibration with experimental results. Such a calibrated numerical model will enable a detailed parametric analysis, which can result in economic optimisation of the entire structural system.

Acknowledgments

The research presented in this paper was conducted within the project “KK.01.1.1.07.0060 - Composite lightweight panel with integrated load-bearing structure” funded by the European Structural and Investment Funds, and the Ministry of Regional Development and EU Funds.

References

- [1] Allen, D.: History of Cold Formed Steel. Struct. Mag. (2006) 11, pp. 28–32.
- [2] Shahbazian, A., Wang Y. C.: Fire Resistance Design Method for Cold-Fire Resistance Design Method for Cold-Formed Thin-Walled Steel Columns, PGR Conference 2011.
- [3] European Committee for Standardization (CEN): Design of Steel Structures, Part 1-3 General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting (EN 1993-1-3 2006 +AC 2009).
- [4] Dassault Systems Simulia Corporation, ABAQUS (Analysis User’s Guide), USA, 2017.
- [5] Laim, L., Rodrigues J. C. P., Correia, A., M.: Fire resistance of cold formed roof beam, NSCC 2009.
- [6] European Committee for Standardization (CEN): Cold-rolled flat products made of high yield strength micro-alloyed steels for cold forming - General delivery conditions (EN 10268 2013).
- [7] European Committee for Standardization (CEN): Continuously hot-dip coated strip and sheet of steel with higher yield strength for cold forming – Technical delivery conditions (EN 10292 2007).
- [8] Tata Steel Europe: Cold Rolled High Strength Steel – Detail specifications, www.tatasteeleurope.com/ts/engineering/products/cold-rolled/high-strength-steel
- [9] W. W. Yu: Cold-Formed Steel Design, New York, USA, 3rd edition, 2000.
- [10] Ariyanayagam, A., Mahendran, M.: Fire performance and design of load bearing light gauge steel frame wall systems exposed to realistic design fires, Conference paper 2014.

- [11] Ariyanayagam, A., Mahendran, M.: Residual capacity of fire exposed light gauge steel frame walls, Thin Walled-Structures, 2018.
- [12] Franssen, J. M., Real, P. V.: Fire Design of Steel Structures, 2010.
- [13] Ministarstvo unutarnjih poslova (MUP): Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljavati u slučaju požara (NN 29/10), 2010.
- [14] European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 1: Action on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire (EN 1991-1-2:2002+AC2009).
- [15] European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-2 General rules Structural Fire Design (EN 1993-1-2:2005+AC2009)
- [16] European Committee for Standardization (CEN): Fire resistance tests – Part 1 – General requirements (EN1363-1 2020).
- [17] European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1 General rules and Rules for Buildings (EN 1993-1-1:2005+AC2009).
- [18] Laim, L., Rodrigues J. C. P., Correia, A., M.: Fire resistance of cold formed roof beam, NSCC 2009.
- [19] Franssen, J. M., Zhao, B., Gernay, T.: Experimental testing and numerical modelling of eight slender steel columns under increasing temperatures, 8th International Conference on Structures in Fire, Shanghai, China, 2014.
- [20] Chen J., Young B.: Cold-formed steel lipped channel columns at elevated temperatures, Engineering Structures 29 (10) (2007), pp. 2445-2456.
- [21] Ranawaka T., Mahendran M.: Distortional buckling tests of cold-formed steel compression members at elevated temperatures, Journal of Constructional Steel Research 65 (2) (2009), pp. 249-259.
- [22] Gunalan, S., Bandula Heva Y., Mahendran M.: Flexural-torsional buckling behaviour and design of cold-formed steel compression members at elevated temperatures, Engineering Structures 79 (2014), pp. 149-168.
- [23] Gunalan, S., Bandula Heva Y., Mahendran M.: Local buckling studies of cold-formed steel compression members at elevated temperatures, Journal of Constructional Steel Research 108 (2015), pp. 31-45.
- [24] Arrais, F., Lopes, N., Vila Real, P.: Parametric study on the fire resistance of steel columns with cold-formed lipped channel section, Applications of Structural Fire Engineering, Dubrovnik, Croatia, 2015.
- [25] Couto, C., Vila Real, P., Lopes, N., Zhao, B.: Numerical investigation of the lateral-torsional buckling of beam with slender cross sections for the case of fire, Engineering Structures 106, 2016.

- [26] Laim, L., Rodrigues, J. P. C.: Simple fire design of cold-formed steel c-section beams with lateral torsional buckling, Ernst & Sohn, 2017.
- [27] Rokilan, M., Mahendran, M.: Effects of nonlinear elevated temperature stress-strain characteristics on the global buckling capacities of cold-formed steel columns, Brisbane, Australia.
- [28] European Committee for Standardization (CEN): Design of Steel Structures, Part 1-5 Plated structural elements (EN 1993-1-5 2006).
- [29] European Committee for Standardization (CEN): Fire resistance tests – Part 1 – General requirements (EN1363-1 2020).
- [30] European Committee for Standardization (CEN): Fire resistance tests for load bearing elements – Part 3 – Beams (EN1365-3 2012).
- [31] European Committee for Standardization (CEN): Fire resistance tests for load bearing elements – Part 4 – Columns (EN1365-4 2014).
- [32] European Committee for Standardization (CEN): Fire resistance tests for load bearing elements – Part 1 – Walls (EN1365-1 2012).
- [33] European Committee for Standardization (CEN): Fire resistance tests for load bearing elements – Part 2 – Floors and roofs (EN1365-2 2014).
- [34] Ariyanaqagam, A., Mahendran, M., Keerthan, P.: Thermal modelling of load bearing cold-formed steel frame walls under realistic design fire conditions, Advance Steel Constructions, 2017.
- [35] Rusthi, M., Keerthan, P., Mahendran, M.: Investigating the fire performance of LSF wall systems using finite element analyses, Journal of Structural Fire Engineering, 2017.
- [36] Steau, E., Keerthan, P., Mahendran, M.: Thermal modelling of LSF floor systems made of lipped channel and hollow flange channel section joists, Copenhagen, Denmark, 2017.

Keramici slični anorganski polimerni materijali: oporaba boksitnog ostatka

Marko Rukavina¹, doc.dr.sc. Marijana Serdar²

1 Termoterra d.o.o., Topusko, Hrvatska, marko@termoterra.hr

2 Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, marijana.serdar@grad.unizg.hr

Sažetak

Zbog svoje opasne korozivne prirode, $\text{pH} \approx 11,5$, crveni mulj predstavlja vrlo ozbiljan i alarmantan ekološki problem. Procjenjuje se da se na svjetskoj razini godišnje približno stvara 150 milijuna tona crvenog mulja; od toga 5 – 6 milijuna tona nastaje na području Europe te se većina tog otpada odlaže na otvorenim deponijima. U ovom radu ispitana je mogućnost zamjene dijela metakaolinske geopolimerne matrice s boksitnim ostatkom. Molarni omjer $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ geopolimerne paste postavljen je na 1:1:4. Kao glavni parametar uspješnosti geopolimerizacije i primjene boksitnog ostatka korištena je tlačna čvrstoća geopolimernog morta. Referentni mort dobiven iz čistog metakaolina postigao je tlačnu čvrstoću u iznosu od 37,7 MPa, dok su geopolimeri sa zamjenom 20 mas.% metakaolina s boksitnim ostatkom u prosjeku ostvarivali tlačnu čvrstoću u iznosu od 26,7 MPa.

Cljučne riječi: crveni mulj, boksitni ostatak, metakaolin, geopolimer, tlačna čvrstoća

Ceramic-like inorganic polymer materials: recovery of bauxite residue

Abstract

Due to its dangerous corrosive nature, $\text{pH} \approx 11,5$, red mud is a very serious and alarming environmental problem. It is estimated that approximately 150 million tonnes of red mud is produced annually worldwide; of which 5 – 6 million tonnes are generated in Europe, and most of this waste is disposed of in open landfills. In this paper, the possibility of replacing a part of the metakaolin geopolymer matrix with a bauxite residue was investigated. The molar ratio of $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ of the geopolymer paste was set to 1:1:4. Compressive strength of geopolymer mortar was used as the main parameter of successful geopolymerization and successful application of bauxite residues. The reference mortar obtained from pure metakaolin achieved a compressive strength of 37,7 MPa, while geopolymers with a substitution of 20 wt.% of metakaolin with a bauxite residue achieved on average a compressive strength of 26,7 MPa.

Key words: red mud, bauxite residue, metakaolin, geopolymer, compressive strength

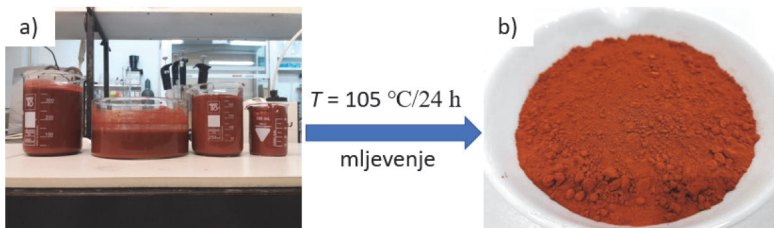
1 Uvod

Crveni mulj ili boksitni ostatak je nusproizvod u preradi boksitne rude u Bayerovom procesu proizvodnje glinice (Al_2O_3) te se kao takav smatra tehnološkim otpadom [1]. Prema procjenama iz 2015. godine na svjetskoj razini godišnje se proizvede otprilike 150 milijuna tona crvenog mulja, a od toga 5 – 6 milijuna tona na području Europe. Naime, za proizvodnju 1 tona glinice u prosjeku se generira 1 – 1,5 tona otpadnog crvenog mulja koji se zbog svoje fizikalno-kemijske stabilnosti smatra sigurnim za odlaganjem u velikim, otvorenim bazenima [2]. Unatoč prividnoj sigurnosti, crveni mulj predstavlja potencijalnu ekološku katastrofu zbog velikih količina mulja koje se stvaraju prilikom proizvodnje glinice te zbog njegovog visokog pH koji iznosi 10.5 – 12.5 [1]. Ne treba ići daleko u prošlost i izvan granica Europe odnosno Hrvatske kako bi se našli primjeri ekoloških problema, katastrofa, prouzročenih crvenim muljem. Ne tako davne 2010. godine došlo je do puknuća brane bazena s odloženim crvenim muljem u Ajki, Mađarskoj. Izliveni crveni mulj poplavio je oko 40 km^2 uključujući obližnje selo Kolontar i grad Devescer, a u nesreći je smrtno stradalo 10 osoba dok ih je 150 bilo ozlijeđeno [3, 4, 5]. Drugi primjer problema s crvenim muljem nalazi se upravo u Republici Hrvatskoj na području Obrovca – bivša tvornica Jadral. Premda je tvornica bila aktivna vrlo kratko, od 1977. do 1981. godine [6], posljedice njezinog rada osjećaju se i danas. Tvornica Jadral ostavila je iza sebe velike količine opasnog crvenog mulja u bazenima koji se nalaze u krškom kraju. Bazeni puni crvenog mulja zbog neodržavanja, a u konačnici i zbog loše sanacije, prijete rijeci Zrmanji i gradu Obrovcu [6, 7]. Upravo zbog navedenih problema smatra se značajnim svaki pokušaj razrade mogućnosti šire upotrebe crvenog mulja, a jedna od potencijalnih primjena crvenog mulja je primjena u geopolimernoj tehnologiji. Naime, geopolimeri se definiraju kao klasa anorganskih polimernih, amorfnih, vezivnih materijala bogatih aluminosilikatom. Najčešće se sintetiziraju u alkalnoj otopini pa se prema tome može reći kako se geopolimeri sastoje od oksida Al_2O_3 , SiO_2 i oksida alkalnih metala (Na_2O , K_2O ,...) [8] – što čini crveni mulj potencijalno dobrim kandidatom za ovu primjenu. Geopolimeri se mogu sintetizirati u širokom području kemijskog sastava, ali najčešće su centrirani oko molarog omjera 1:1:4 koji označava 1 mol M_2O :1 mol Al_2O_3 :4 mola SiO_2 gdje je M alkalni metal [8]. Geopolimerni materijali na bazi otpadnog aluminosilikatnog materijala smatraju se ekološki prihvatljivim i održivim tzv. "zelenim materijalima" jer omogućuju oporabu aluminosilikatnog otpada te samim time smanjuje njegovu štetnost za okoliš i čovjeka [9].

2 Eksperimentalni dio

2.1 Materijali

Materijali korišteni kao aluminosilikatni izvor su metakaolin (MK) Metamax od proizvođača BASF, te crveni mulj ili boksitni ostatak (BR) dobiven iz tvornice Alumina, Zvornik, BiH. Svježi crveni mulj se prvotno dekantirao, a zatim sušio i mljeo bez dodatnog prosijavanja s ciljem odvajanja boksitnog ostatka od zaostale lužine iz Bayerovog procesa, slika 1. Nakon mljevenja osušeni boksitni ostatak dan je na XRF analizu kako bi se odredio njegov oksidni sastav (tablica 1) te se kalcinirao na 500, 600 i 700 °C kako bi se ispitao utjecaj zamjene metakaolina s nekalcinirnim i kalcinirnim boksitnim ostatkom na tlačnu čvrstoću geopolimernog materijala. Vrijeme kalciniranja boksitnog ostaka bilo je dva sata na zadanim temperaturama, a brzina zagrijavanja iznosila je 5 °C/min.



Slika 1. Predobrada crvenog mulja za analize i sinteze; (a) dekantirani crveni mulj, (b) osušeni i samljeveni crveni mulj odnosno boksitni ostatak

Za potrebe eksperimenta pripravljene su dvije različite alkalne otopine, slika 2. Alkalne otopine pripravljene su modificiranjem komercijalnog natrijevog silikata proizvođača Alumina dodatkom peleta NaOH (98 mas.%) proizvođača Ivero. Kemijski sastav otopina natrijevih silikata prikazan je u tablici 2. Fini kvarcni pijesak granulacije 0,1 – 0,6 mm proizvođača Samoborka odabran je kao sitni agregat sa svrhom ojačanja geopolimernog veziva i sprječavanja nastajanja pukotina.



Slika 2. Pripravljene otopine natrijevog silikata - zbog izrazito egzotermne reakcije prilikom dodatka (otapanja) NaOH peleta, otopinu treba povremeno promiješati dok se temperatura ne ustali na sobnu temperaturu kako ne bi došlo do lijepljenja NaOH peleta za dno boce

2.2 Kemijski sastav materijala

Obradeni crveni mulj sa slike 1 podvrgnut je XRF analizi u akreditiranom Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju HEP-Proizvodnje d.o.o. te su rezultati prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Oksidni sastav aluminosilikatnih prekursora

Uzorak	Maseni udio [%]												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃	SrO	BaO
BR	12,10	14,45	47,20	8,39	0,05	9,91	0,60	6,66	0,23	0,32	<0,01	0,09	0,03
MK	52,30	45,20	0,42	0,22	0,15	0,04	0,04	1,74	0,08	-	-	-	-

Tablica 2. Kemijski (oksidni) sastav izvorne i modificiranih otopina natrijevog silikata

Naziv	Izvorna otopina	Otopina A	Otopina B
	Maseni udio [%]		
SiO ₂	27,71	25,85	26,64
Na ₂ O	11,53	15,86	14,01
H ₂ O	60,76	58,29	59,35
Maseni omjer SiO ₂ /Na ₂ O	2,40	1,63	1,90

2.3 Mješavine

Parametri sastava mješavine postavljeni su na način da ukupni ulazni molarni omjer oksida Na₂O:Al₂O₃:SiO₂ bude 1:1:4 (fini kvarcni pijesak ne ulazi u proračun). Vodo-vezivni omjer postavljen je na 0,55, a omjer aluminosilikatni prekursor/fini kvarcni pijesak na 1. Pripremljeno je pet različitih geopolimera od kojih se jedan kao referentni uzorak sastojao od 100 mas.% metakaolina, a u preostale četiri mješavine zamijenjeno je 20 mas.% metakaolina s nekalciniranim odnosno s kalciniranim boksitnim ostatkom.

Zbog molarnog omjera 1:1:4 - referentni geopolimerni uzorak pomiješan je s alkalnom otopinom A, a preostali uzorci s 80 mas.% metakaolin + 20 mas.% boksitni ostatak (RT, 500, 600 i 700 °C) pomiješani su s otopinom B. Nastale geopolimerne paste ručno su miješane 10 minuta nakon čega je u paste dodana zadana količina finog kvarcnog pijesaka. Dobivene smjese su miješane dodatnih 5 minuta; nakon čega su geopolimerne mase izlivenne u silikonske kalupe, dimenzija 50x50x50 mm, koje nije bilo moguće izvibrirati. Kalupi su omotani prijanjajućom folijom kako bi se spriječila prerana dehidracija uzoraka. Svježi uzorci su najprije njegovani 24 h ± 1 h na sobnoj temperaturi, a zatim 24 h ± 1 h na 50 °C. Nakon njegovanja uzorci su izvađeni iz kalupa i ostavljeni sljedeća dva dana da se suše na sobnoj temperaturi prije testiranja na tlačnu čvrstoću.

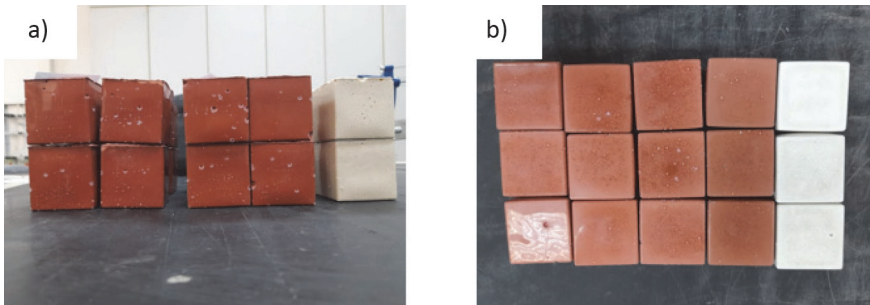
3 Rezultati i rasprava

3.1 Masa i dimenzije geopolimera

Prosječna masa geopolimera iznosila je $251,4 \text{ g} \pm 6,3 \text{ g}$, a prosječna duljina brida je $52,0 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ – što upozorava na nedovoljno čvrste stijenke silikonskog kalupa, pa je trebalo proširiti dimenzije kalupa tijekom ugradnje materijala u njih.

3.2 Promjena boje

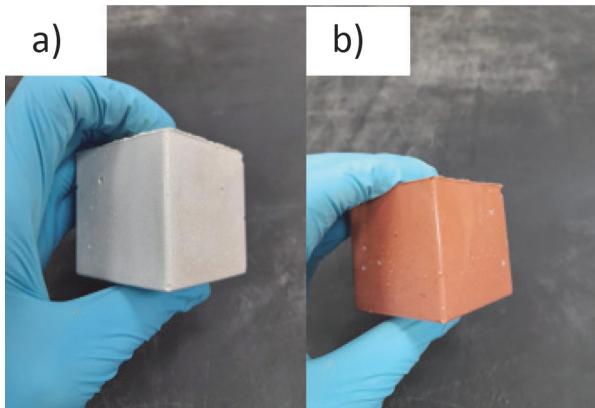
Tijekom njegovanja i sušenja uzoraka na zraku primijećena je značajna promjena boje geopolimera s boksitnim ostatkom; od tamnocrvene do svjetlocrvene boje, slika 3. Do promjene boje dolazi zbog nedovršenog procesa stvrdnjavanja gdje čestice vode nastale tijekom reakcije polimerizacije (polikondenzacije) nisu imale priliku difundirati iz polimerne matrice što je rezultiralo hidratnim oblikom čvrstog polimera [10]. Na slici 3.a prikazani su uzorci odmah nakon njegovanja na $50 \text{ °C}/24 \text{ h}$, a na slici 3.b prikazani su nakon 2 dana sušenja na sobnoj temperaturi, netom prije ispitivanja tlačne čvrstoće.



Slika 3. Sintetizirani geopolimerni uzorci; sdesna nalijevo referentni uzorak (bijeli) te 20 mas.% zamjena metakaolina s boksitnim ostatkom (nekalcinirani - RT, 500 °C , 600 °C , 700 °C)

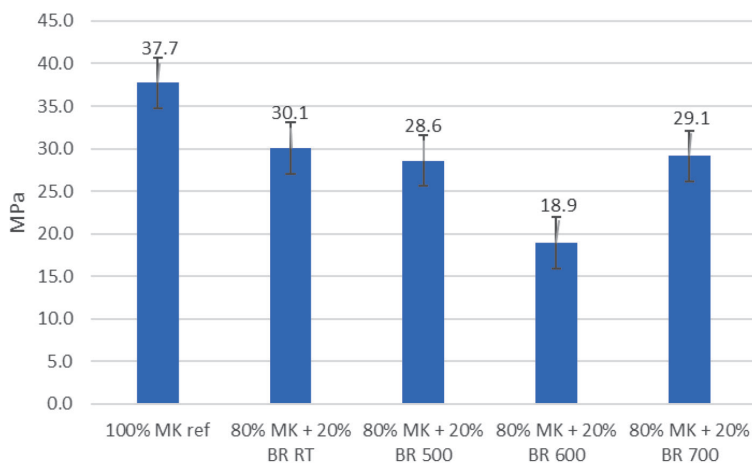
3.3 Tlačna čvrstoća

Zbog izrazito visoke otpornosti geopolimernog materijala na habanje, uzorci su ispitani na tlačnu čvrstoću bez značajnije obrade tlačnih površina, slika 4.



Slika 4. Geopolimerni uzorci: a) referentni metakaolinski geopolimer, b) 20 mas.% boksitnog ostatka kalciniranog na 700 °C

Na slici 5 prikazane su srednje vrijednosti dobivenih tlačnih čvrstoća geopolimera nakon četiri dana. Uočljivo je da referentni geopolimer, MK ref ima najveću tlačnu čvrstoću dok se geopolimerima s nekalciniranim i kalciniranim boksitom na 500 i 700 °C vrijednosti tlačnih čvrstoća kreću oko 29,4 MPa \pm 0,7 MPa. Zbog korištenja nestandardnih kalupa, rezultati mogu služiti isključivo za internu usporedbu kao i za preliminarne optimizacije mješavina. Kod uzoraka s boksitnim ostatkom, kalciniranim na 600 °C, najvjerojatnije je došlo do značajne pogreške u tlačnoj čvrstoći materijala zbog loše ugradnje i/ili zbog neravnih tlačnih površina (nepravilna raspodjela tlačne sile). Naime, srednja vrijednost izmjerenih tlačnih čvrstoća iznosila je 18,9 MPa, što je daleko ispod tlačne čvrstoće nekalciniranog boksitnog ostatka i/ili boksitnog ostatka kalciniranog na 500 °C odnosno 700 °C.



Slika 5. Grafički prikaz dobivenih tlačnih čvrstoća geopolimera nakon 4 dana

4 Zaključak

U preliminarnim istraživanjima prikazanima u ovom radu pokazana je opravdanost potencijalne primjene problematičnog boksitnog ostatka (crvenog mulja) u geopolimernoj tehnologiji u građevinskoj industriji. Na nestandardnim uzorcima korištenima u istraživanjima nakon samo četiri dana njegovanja postignute su relativno velike čvrstoće od 29,4 MPa. Primjenom boksitnog ostatka u geopolimerima ne samo da se ekonomično postupa s velikim količinama problematičnog crvenog mulja, već se na taj način smanjuje i potrebna količina prirodnih sirovina i energije u proizvodnom procesu, odnosno CO₂ emisije. Zamjenom 20 mas.% metakaolina s osušenim, nekalciniranim, boksitnim ostatkom, geopolimer i dalje zadržava visoku tlačnu čvrstoću u iznosu od 30,1 MPa. Daljnja ispitivanja bit će usmjerena na spektrometrijsku analizu geopolimerne strukture te na ispitivanje fizikalno-kemijske stabilnost materijala.

Zahvala

Novčana sredstva za izradu ovog rada osigurana su u okviru istraživačkog projekta "Alternativna veziva za beton (ABC): Razumijevanje mikrostrukture za predviđanje trajnosti", oznaka projekta: UIP-05-2017-4767, koji je financirala Hrvatska zaklada za znanost. Zahvaljujem Mariji Lukić, *mag. ing. cheming* na pomoći i Marinku Markiću, *mr. sc.* na ustupanju laboratorija Comprehensive Water Technology d.o.o. na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu.

Literatura

- [1] Smiljanić, S., Ostojić, G., Vasiljević, Lj.: Uticaj hemijskog i mineraloškog sastava crvenog mulja na parametre alkaliteta, *Zaštita materijala* 58 (2017) 4, pp. 515-529.
- [2] Aluminium Insider - Red mud – addressing the problem, 2016, <https://aluminiuminsider.com/red-mud-addressing-the-problem/>
- [3] The Guardian – Hungary declares a state of emergency after sludge disaster, 2010, <https://www.theguardian.com/world/2010/oct/05/hungary-sludge-disaster-state-of-emergency>
- [4] NBCnews – Red sludge floods towns in Hungary, 2010, <https://www.nbcnews.com/id/wbna39503888>
- [5] Burai, P., Smailbegović, A., Lenart, C., Berke, J., Milics, G., Tomor, T., Biro, T.: Preliminary analysis of red mud spill based on aerial imagery, *AGD Landscape & Environment* 5 (2011) 1, pp. 47-57.

- [6] Zadarski (Slobodna Dalmacija) – Kako je Tvornica glinice Jadral umjesto uspjeha donijela propast Obrovcu, tamo niti jedan project više nije uspio, čak I sanacija bazena s lužinom!, <https://zadarski.slobodnadalmacija.hr/zadar/4-kantuna/kako-je-tvornica-glinice-jadral-umjesto-uspjeha-donijela-propast-obrovcu-tamo-niti-jedan-projekt-vise-nije-uspio-cak-i-sanacija-bazena-s-luzinom-542486>
- [7] Bezik, D.: Utjecaj crvenog mulja i drugih ostataka proizvodnje aluminija na okoliš, *završni rad*, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [8] Kriven. W.M., 5.9 Geopolymer-Based Composites (Chapter), *Comprehensive Composite Materials II*, (ur. Zweben, C.H., Beaumont, P.), Academic Press, Oxford, pp. 269-280, 2018.
- [9] Ren, B., Zhao, Y., Bai, H., Kang, S., Zhang, T., Song, S.: Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review, *Chemosphere* 267 (2020).
- [10] Cesul, B.T.: Investigation into Suitability of Geopolymers (Illite & Metakaolin) for the Space Environment, *doktorska disertacija*, Air Force Institute of Technology, Ohio.

Analiza mogućnosti primjene daljinskih istraživanja u popunjavanju nedostajućih podataka u operativnom sustavu hidroloških prognoza

Mirza Sarač¹, izv.prof.dr.sc. Damir Bekić², doc.dr.sc. Mateo Gašparović³

¹ Međunarodna komisija za sliv rijeke Save, msarac@savacommission.org

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

³ Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, mgasparovic@geof.unizg.hr

Sažetak

U hidrologiji postoji pravilo da podatak koji nije izmjeren neće ni moći biti izmjeren. Potreba za hidrometeorološkim podacima postoji, kako na hidrološki neizučeni slivovima, tako kod popunjavanja prekida u podacima, a što je izazovno područje istraživanja u hidrologiji. Podaci daljinskih istraživanja Sentinel, Landsat i drugih misija su prostorno-vremenski određeni i dostupni širom svijeta te se uz brojne druge primjene koriste kod hidroloških prognoza i za potrebe popunjavanja nepotpunih vremenskih nizova. U radu su prikazane opcije interpolacije nepotpunih vremenskih nizova u operativnom sustavu hidroloških prognoza za sliv rijeke Save korištenjem daljinskih istraživanja s osvrtnom na klasične statističke metode popunjavanja podataka.

Ključne riječi: daljinska istraživanja, modeliranje, prognoziranje, nedostajući podaci, interpolacija, sliv rijeke Save

An analysis of the possible application of remote sensing for interpolation of missing data in the operational hydrological forecasting

Abstract

In hydrology, there is a rule that the data not currently recorded will never be recorded. The need for hydrometeorological data exists for the hydrologically ungauged basins as well as for the filling of gaps in timeseries, which is a challenging research area in hydrology. The remote sensing data from Sentinel, Landsat and other missions are spatially and temporally determined and have worldwide coverage, and can be used, among many other purposes for the flow forecast and the data gap filling. This paper presents the possibilities of gap fillings in timeseries in the operational hydrological forecasting system for the Sava River Basin by using remote sensing data with reference to classical statistical methods of data interpolation.

Key words: remote sensing, modelling, forecasting, missing data, interpolation, Sava River Basin

1 Uvod

Nepotpuna hidrološka mjerenja ograničavaju kvalitetu različitih studija koje zahtijevaju hidrološke podatke i provedbu operativnih kratkoročnih kao i dugoročnih hidroloških prognoza [1]. Podaci prikupljeni putem opažanja i mjerenja na hidrometeorološkim postajama se u postupku operativnog hidrološkog modeliranja sve više pokazuju kao nedovoljni zbog prostorne nejednolikosti hidroloških fenomena, vremenskog odmaka dobivanja podatka (za opažanja), kao i zbog prilagodbe modela prostorno distribuiranim ulaznim podacima. Nadalje, pojedini ulazni hidrometeorološki podaci, kao na primjer parametri topljenja snijega ili evapotranspiracije, vrlo često su nepoznati zato što ili nisu izmjereni ili su mjerenja nedostatna za predmetno područje. Osim toga, postoji i evidentna potreba za interpolacijom nedostajućih podataka kod vremenskih nizova hidrometeoroloških podataka zbog prestanka rada meteoroloških ili hidroloških postaja u određenom kraćem ili dužem razdoblju. Prekidu u mjerenjima na postajama se dešavaju uslijed različitih okolnosti, a koje onda utječu na funkcionalnost i pouzdanost cjelokupnog prognostičkog modela.

Problem nepotpunih hidroloških mjerenja prepoznat je i u okviru operativnog prognostičkog sustava u slivu rijeke Save. Naime, nedostaci u ulaznim podacima, zbog nepotpunih mjerenja ili nepostojanja ulaznih podataka (topljenje snijega, evapotranspiracija, volumen vode u akumulacijama) u značajnoj mjeri ograničavaju kvalitetnu simulaciju hidroloških procesa na slivu te time utječu na pouzdanost hidroloških prognoza. Dodatna je potreba za popunjavanjem nepotpunih podataka u dugoročnom prekidu mjerenja u razdoblju od 1991. godine, pa ponegdje sve do 2005. godine, u regiji sliva rijeke Save gdje gotovo uopće nije bilo sustavne provedbe hidroloških mjerenja.

Moguće primjene rezultata naprednih metoda daljinskih istraživanja u hidrologiji su brojne, naročito uzimajući u obzir neposredne posljedice nepostojećih i/ili nepotpunih hidroloških podataka, od koji se mogu izdvojiti:

- poboljšanje pouzdanosti operativnog hidrološkog modeliranja i prognoziranja;
- poboljšanje praćenja hidroloških pojava i s njima povezanih prirodnih procesa;
- poboljšanje definiranja statističkih pokazatelja hidroloških veličina;
- poboljšanje definiranja vjerojatnosti pojave različitih hidrometeoroloških varijabli;
- poboljšanje analiza trendova vremenskih nizova hidroloških veličina, itd.

U ovom radu daje se pregled postojećih pristupa i metoda u hidrološkoj praksi za popunjavanje nedostajućih vremenskih nizova hidroloških veličina s naglaskom na primjenu podataka iz daljinskih istraživanja. Prikazana je mogućnost primjene raspoloživih produkata misija Sentinel -1 -2 i -3 [2], Landsat [3], AVHRR (eng. *Advanced Very High Resolution Radiometer*) [4], MODIS (eng. *Moderate Resolution*

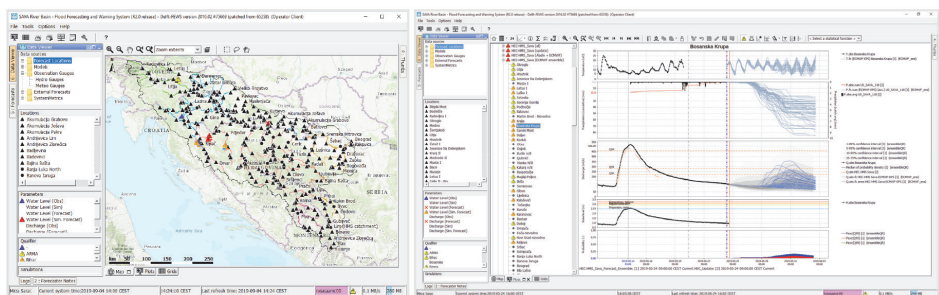
Imaging Spectroradiometer) [5], AMSR-E (eng. *Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System*) [6], DMSP (eng. *Defense Meteorological Satellite Program*) [7] i drugih. Veliki potencijal primjene podataka daljinskih istraživanja je evidentan, kako za kalibriranje hidroloških modela tako i za operativno hidrološko prognoziranje kao i za popunjavanje nedostajućih vremenskih nizova na slivovima bez terenskih mjerenja ili s nedostatnom mrežom mjernih postaja.

2 Operativni hidrološki prognostički sustav za sliv rijeke Save i daljinska istraživanja

Hidrološki prognostički sustav za sliv rijeke Save – Sava FFWS (eng. *Flood Forecasting and Warning System*), uspostavljen je 2018. godine i zasnovan je na Delft-FEWS softverskoj platformi [8]. Delft-FEWS platforma primijenjena je za sustave hidroloških prognoza na brojnim slivovima, ali uglavnom u okviru jedne države.

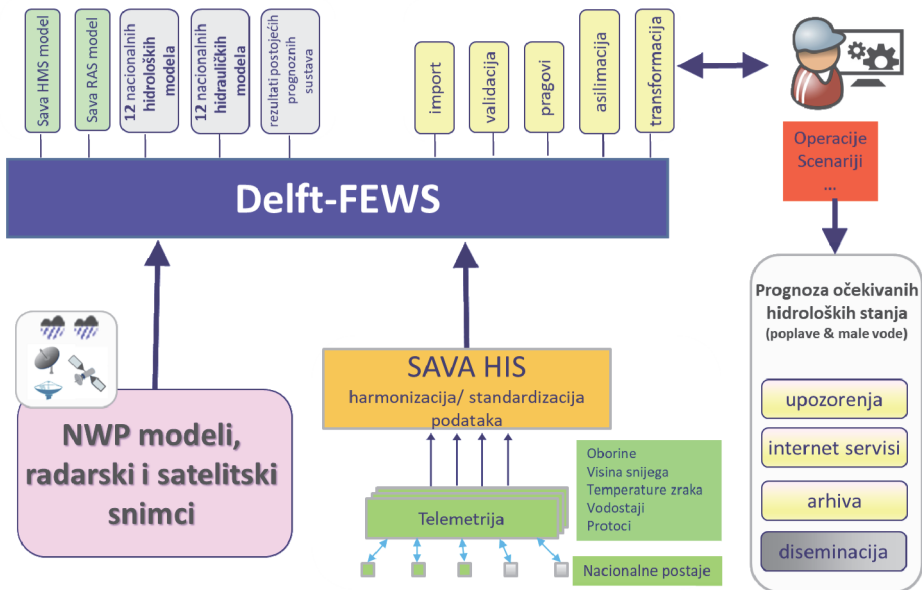
Sava FFWS implementiran je kao otvorena struktura za upravljanje podacima i prognozama uz integraciju različitih podataka i modela iz pet savskih zemalja, a uključuje sljedeće međusobno povezane ulazne komponente:

- izmjerene hidrološke i meteorološke podatke u stvarnom vremenu - Hidrološki informacijski sustav sliva rijeke Save (Sava HIS),
- razne numeričke meteorološke prognostičke produkte,
- dostupne vremenske radarske i satelitske snimke,
- izlaze i rezultate postojećih nacionalnih prognostičkih sustava,
- različite meteorološke, hidrološke i hidrauličke modele.



Slika 1. Prikaz klijentske aplikacije Sava FFWS sustava

Na slici 2. prikazana je struktura Sava FFWS sustava koji u najvećoj mogućoj mjeri koristi postojeću infrastrukturu i modele.



Slika 2. Shema strukture Sava FFWS sustava

2.1 Numerički meteorološki prognostički produkti

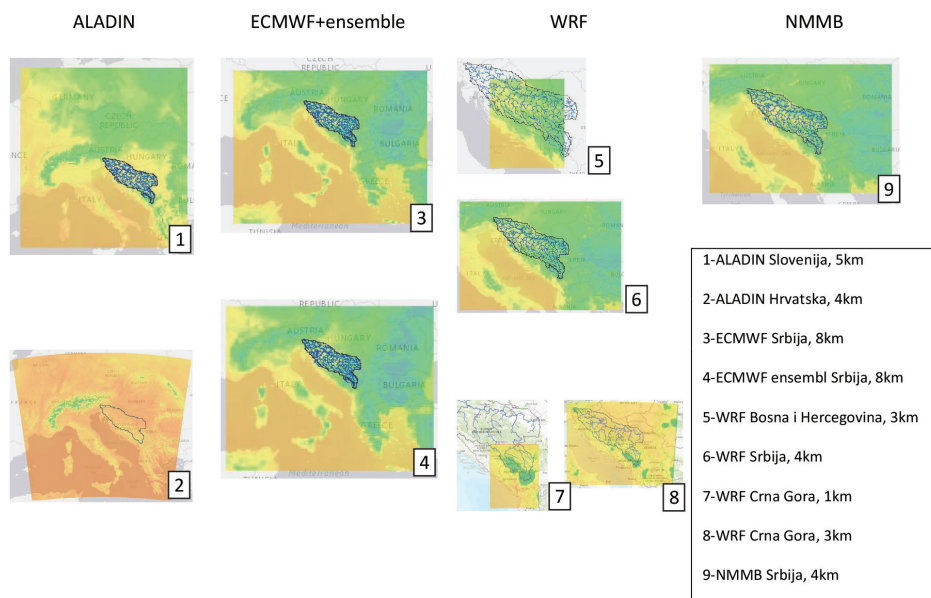
Za hidrološke prognoze u Sava FFWS sustavu osnovni izvor podataka o meteorološkoj prognozi su produkti numeričkih vremenskih modela - NWP (eng. *Numerical Weather Prediction*). NWP su rezultati matematičkih modela koji daju vremenske prognoze na osnovi trenutačnih atmosferskih uvjeta, a u hidrološkim operativnim modelima kao ulazi koriste se prognoze oborina i temperature zraka. Tijekom posljednjih godina podaci daljinskih istraživanja postupno postaju dodatni izvor informacija za prilagodbu NWP modela. To je omogućeno zahvaljujući značajnom poboljšanju uređaja za daljinsko mjerenje različitih atmosferskih veličina, ali u velikoj mjeri i poboljšanjima u tehnikama asimilacije podataka. Prednost satelitskih podataka je u tome što pružaju ujednačenu prostornu i vremensku pokrivenost atmosfere. Međutim, tu prednost sadržaju podataka prati uglavnom nedovoljna vertikalna rezolucija uređaja koji se trenutačno koriste i poteškoće s oblacima, oborinama i površinskim zaprekama, pa su zbog toga NWP produkti i dalje u najvećoj mjeri oslonjeni na matematičku komponentu modela [1].

U okviru Sava FFWS koristi se devet NWP produkata kao ulazni podaci (slika 3), a rezultat su slijedećih regionalnih i globalnih modela:

- model za dinamičku prilagodbu ograničenog područja, ALADIN [9],
- model Europskog centra za srednjoročne prognoze i skupnu, ensembl prognozu, ECMWF [10],

- model istraživanja i prognoziranja vremena, WRF [11],
- više srazmjerni nehidrostatski model, NMMB [12].

Dostupni NWP produkti omogućuju korisnicima pregled i daljnje korištenje rezultata vremenskih prognoza o oborinama i temperaturi zraka za nekoliko (3, 5, 7, 9) dana unaprijed kao ulaznih podataka za hidrološki model.



Slika 3. NWP produkti u slivu rijeke Save, raspoloživi i integrirani u Sava FFWS (s naznačenom prostornom rezolucijom)

2.2 Satelitski i radarski snimci

Uz NWP produkte, Sava FFWS je pripremljen i za ekstrapolaciju radarskih ili satelitskih snimaka oborina radi osiguranja vrlo precizne kratkoročne hidrološke prognoze za do 2 sata unaprijed, odnosno za nekoliko sati unaprijed na osnovi izmjerenih vrijednosti (eng. *nowcasting*). Trenutačno ipak ne postoje dostupni produkti za ovu vrstu prognoze u slivu rijeke Save, a prvi korak je dostupnost detaljnih radarskih snimaka oborina korigiranih s izmjerenim podacima na kišomjernim postajama. U Sava FFWS integrirani su samo podaci s radara Lisca Agencije za okolje Republike Slovenije, ARSO [13]. Uzimajući u obzir važnost osiguranja detaljne kratkoročne hidrološke prognoze i podizanja svijesti stručnjaka i na ovaj ulazni podatak, tijekom uspostave, u Sava FFWS su integrirane kompozitne OPERA radarske snimke Europskog udruženja nacionalnih meteoroloških i hidroloških službi, EUMETNET [14] kao

i H-SAF satelitske snimke Europske organizacije za korištenje meteoroloških satelita, EUMETSAT [15].



Slika 4. Raspoložive radarske i satelitske snimke u slivu rijeke Save integrirane u Sava FFWS

Ovi podaci se trenutačno unutar sustava koriste samo za prikaz i vizualnu usporedbu s NWP produktima i nisu povezani s hidrološkim modelima.

Uzimajući u obzir sve potencijale daljinskih istraživanja i činjenicu da se primjena njihovih podataka pokazala mnogo točnijom od regularnih NWP podataka kod kratkoročnih prognoza, integracija produkata daljinskih istraživanja u Sava FFWS je neminovna. U budućim istraživanjima dat će se prijedlog produkata za redovno korištenje u prognozama i za popunjavanje nedostajućih podataka u hidrološkom modeliranju.

2.3 Simulacijski modeli

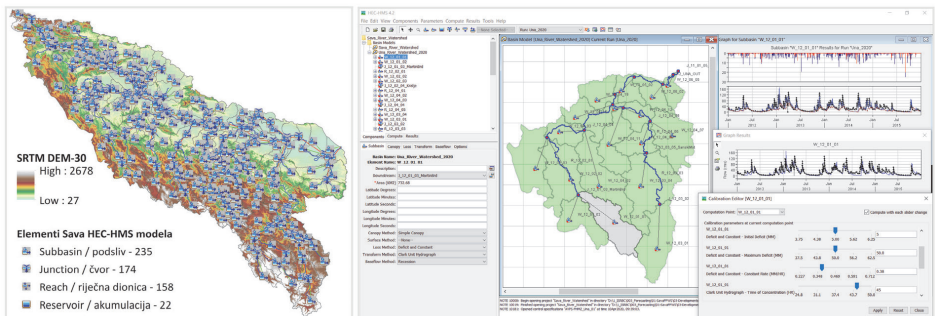
U Sava FFWS-u je trenutačno integrirano 13 hidroloških modela od kojih pojedini modeli uključuju i hidrauličku komponentu te dodatnih 13 zasebnih hidrauličkih modela. Neki modeli pokrivaju relativno velika slivna područja, dok drugi samo lokalne riječne slivove odnosno riječne dionice, a razvijeni su korištenjem različitih alata (HEC, DHI, Wflow, HBV). HEC-HMS (eng. *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*) [16] hidrološki model za sliv rijeke Save jedini pokriva cjelokupni sliv rijeke Save i okosnica je Sava FFWS sustava te će se koristiti za ispitivanje primjenjivosti popunjavanja nedostajućih podataka putem daljinskih istraživanja.

2.3.1 Sava HEC-HMS hidrološki model

HEC-HMS model za simulaciju hidroloških procesa na slivu rijeke Save (Sava HEC-HMS) razvijen je pomoću USACE (eng. *United States Army Corps of Engineers*) standardnih alata HEC-HMS, HEC-GeoHMS, i HEC-DSSVue. Sava HEC-HMS model razvijen je kao skup 21-nog podmodela neposrednih slivovova glavnog toka rijeke Save, a koji su sastavljeni u jedan cjelovit model (slika 5). U okviru Sava HEC-HMS modela koriste se sljedeći pristupi kod simulacije hidroloških procesa [16]:

- efektivne oborine,
- transformacija efektivnih oborina u direktno otjecanje,
- bazno otjecanje,
- propagacija vodnog vala duž korita vodotoka.

Početna kalibracija modela bila je zasnovana na izmjenjenim poplavnim događajima u razdoblju 2009.-2015. Korišteni su kratki kalibracijski periodi, uglavnom zimi i karakteriziraju ih uvjeti prosječnih do velikih voda, dok periodi malih voda nisu bili uključeni. Nakon integracije hidrološkog modela u operativni Sava FFWS sustav, model je ponovno kalibriran na duge vremenske nizove u razdoblju 2010.-2018. Upravo kroz ponovljenu kalibraciju modela utvrđene su određene manjkavosti vezane na nedostupnost pojedinih ulaznih parametara, a ističu se utjecaj topljenja snijega i evapotranspiracije, kao i volumen vode u velikim akumulacijama.



Slika 5. Struktura cjelovitog Sava HEC-HMS modela i prikaz elemenata kalibracije jednog od podmodela u HEC-HMS

Budući da model simulira hidrološke procese kroz dvije komponente: (1) meteorološki model i (2) model otjecanja sliva, ovdje će se prikazati mogućnosti primjene daljinskih istraživanja u ova dva osnovna elementa.

Numerički meteorološki produkti unutar Sava FFWS sustava daju satne prognoze oborina i temperatura zraka na slivovima. U okviru Sava HEC-HMS modela izračun prosječnih meteoroloških veličina na slivu provodi se metodom inverznih udaljenosti za oborine, a metodom temperaturnog indeksa za topljenje snijega. Za evapotranspiraciju koristi se prosječna mjesečna potencijalna evapotranspiracija. Uzimajući u obzir nedostatne podatke o topljenju snijega, bitno je istaknuti da su za metodu temperaturnog indeksa korištene početne vrijednosti vodnog ekvivalenta snijega - SWE (eng. *Snow Water Equivalent*). Utvrđivanje SWE je važan parametar za određivanje volumena otjecanja od snijega. Za Sava HEC-HMS model, SWE je

izračunan na osnovi dnevnog globalnog SWE grida AMSR-E/Aqua Level 3, prostorne rezolucije 25 km [17], uz pridruživanje početnih SWE vrijednosti za tri visinska dijapazona unutar svakog podsliva po kalibracijskim događajima. Granice visinskih dijapazona, koji su definirani za potrebe izračunavanja razlika u padanju snijega i snježnog sloja preko raspona nadmorskih visina za svaki podsliv, postavljene su pomoću SRTM DEM-30. Zbog niske rezolucije SWE grida, točnost je dosta neizvjesna, međutim satelitski SWE grid tijekom razvoja Sava HEC-HMS modela bio je najbolji dostupan podatak.

Hidrološki model otjecanja u Sava FFWS sustavu (Sava HEC-HMS) simulira otjecanje sa slivova i transformaciju vodnih valova u vodotocima te uključuje i 22 velike akumulacije. Iako HEC-HMS model omogućava upotrebu različitih metoda kod hidroloških procesa, za Sava HEC-HMS su odabrane metode u skladu sa specifičnim karakteristikama sliva (vrsta terena, urbanizacija i drugo), ali i prema dostupnosti potrebnih podataka. Za model efektivnih oborina primijenjene su: metoda konstantnih gubitaka i pojednostavljena metoda intercepcije; za model direktnog otjecanja: Clark metoda jediničnog hidrograma; za model baznog otjecanja: metoda recesije; za model propagacije duž toka: Muskingum-Cunge metoda. Za izračun fizikalnih parametara sliva (delineacija podslivova, dužina riječnih tokova, vrijeme koncentracije, parametri jediničnog hidrograma) korišten je SRTM (eng. *Shuttle Range Topography Mission*) digitalni model visina 30-metarske rezolucije (DEM-30).

Trenutačno najveći nedostatak Sava HEC-HMS modela se upravo odnosi na meteorološku komponentu, točnije ulazne podatke o oborinama, topljenju snijega i evapotranspiraciji, a iz razloga nedovoljnog broja meteoroloških postaja, odnosno vrlo skromnih mjerenja i nepostojanja podataka o topljenju snijega i evapotranspiraciji.

3 pristupi u popunjavanju nedostajućih podataka

Popunjavanje nedostajućih podataka je složena aktivnost u hidrološkoj praksi i može se rješavati na više načina i metoda. Često se formiraju zavisnosti veličina između postaja s nedostajućim podacima i reprezentativnih (mjerodavnih) postaja na kojima podaci postoje, a primjenom višestrukih linearnih i nelinearnih korelacijskih i regresijskih zavisnosti te primjenom metoda interpolacije putem stohastički linearnih skalarnih i vektorskih modela, npr. autoregresije pomičnog prosjeka – ARMA (eng. *AutoRegressive Moving Average*), kao i asimilacijom vremenskih nizova primjenom dostupnih metoda, npr. Kalman filter ensembla - EnKF (eng. *Ensemble Kalman Filtering*). Zavisnosti se definiraju za dovoljno duga razdoblja za koja podaci postoje na obje postaje, a kasnije se te zavisnosti koriste za popunu nedostajućih vremenskih nizova. U okviru realizacije ovakvih metoda nužno je definirati reprezentativne (mjerodavne) mjerne postaje (meteorološke i hidrološke), uključujući

sve potrebne kriterije (postojanost i raspoloživost podataka za promatrani period). Ova aktivnost uključuje i prikupljanje svih raspoloživih vremenskih nizova podataka za definirane mjerodavne mjerne postaje, kao i drugih važnih podataka i informacija. Navedeni kriteriji, tijekom realizacije, mogu biti uz odgovarajuću argumentaciju prilagođeni shodno raspoloživosti mjerodavnih postaja i podataka. Međutim, ako se za razmatrano područje i postaje, za koje je nužno izvršiti popunjavanje nedostajućih podataka, nema dovoljno raspoloživih podataka, problem se vraća na početak. Upravo iz tog razloga se u okviru cjelovitog istraživanja planira razmatranje mogućnosti korištenja raspoloživih produkata daljinskih istraživanja kao izvora podatka koji bi bili osnova za popunjavanje nedostajućih informacija u hidrološkom modelu za sliv rijeke Save, uključujući specifične parametre i vremenske nizove. Svakako će jedan od pristupa biti korištenje ensembela raznovrsnih izvora podataka daljinskih istraživanja kroz statistički pristup ažuriranja pojedinog člana ensembela radi analize raspona povjerenja primjene, npr. ARMA modela. Raspon povjerenja bit će analiziran primjenom algoritma kvantilne regresije za procjenu hidrološke nepouzdanosti koja će biti temeljena na analizama povijesnih simulacija u kojima će se generirati nedostajući podaci primjenom „savršenih“ graničnih uvjeta. Na ovaj način će se simulirati procjena ukupne nepouzdanosti koja obuhvaća i meteorološku i hidrološku nepouzdanost. U ovom postupku Sava HEC-HMS model bit će korišten za analizu raspodjele vjerojatnosti hidrološke nepouzdanosti korištenja svakog pojedinačnog člana ensembela podataka daljinskih istraživanja. Detaljan opis ovog postupka, kao jednog od mogućih, opisan je u radu Verkade i dr. [17].

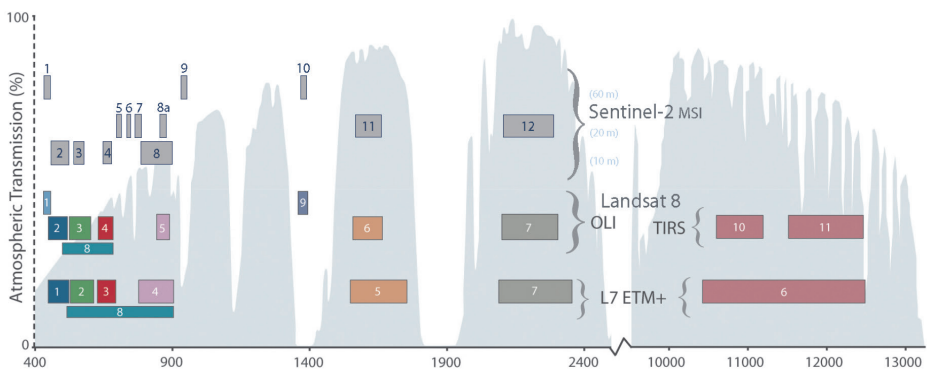
4 Raspoloživa i relevantna daljinska istraživanja pogodna u hidrološkom modeliranju

Jedan od zasigurno najznačajnijih mogućih izvora za popunjavanje nedostajućih podataka u hidrološkom modeliranju su podaci koji su na raspolaganju kroz satelitske misije, npr. projekta Copernicus Europske svemirske agencije – ESA, zatim više različitih projekata Američke nacionalne uprave za zrakoplovstvo i svemir – NASA, Američke nacionalne oceanografske i atmosfere službe / Nacionalnog centra za informacije o okolišu – NOAA i drugih [1]. Prikupljeni podaci, pokrivenost misija i velika učestalost ponovnih snimanja omogućuju generiranje velike količine geoinformacija na lokalnoj, regionalnoj, nacionalnoj i međunarodnoj razini, a od kojih je većina potpuno besplatna. Podaci su dizajnirani tako da ih modificiraju i prilagođavaju korisnici zainteresirani za tematska područja kao što su: prostorno planiranje; agrookoliš; sektor voda; šuma i vegetacije; kopneni ugljik, praćenje prirodnih resursa; globalni nadzor usjeva [2].

Sentinel-1 satelit, kao prvi u seriji ESA-e, lansiran je u orbitu u travnju 2014. godine, a sada pruža operativne radarske snimke za brojne primjene. Sentinel-1 SAR (*eng.*

Synthetic Aperture Radar), signal je radara sa sintetičkim otvorom antene tako da prolazi kroz oblake i može dati prilično dobru procjenu terena, dok vodena tijela ne odražavaju takav signal (ili vrlo malo). Često se koristi za odvajanje poplavnog područja ili čak za praćenje nadmorske visine, ali to zahtijeva više prolazaka i napredne tehničke obrade podataka satelitskih snimaka kako bi se u osnovi dobila točna procjena [2]. U lipnju 2015. slijedio je Sentinel-2 koji koristi multispektralni optički snimač visoke rezolucije s 13 spektralnih opsega i nudi novu perspektivu zemlje i vegetacije. Sentinel-2 MSI (*eng. Multispectral Instrument*) ima 13 spektralnih opsega signala u rasponu od infracrvenog do graničnog UV-a, a također pruža vidljivi (RGB) spektralni opseg ili područje. Neki opsezi su vrlo korisni za oblake i vodenu paru. Od ukupnog broja spektralnih opsega, četiri su na 10 metara prostorne rezolucije, šest na 30 metara i tri na 60 metara. Podaci Sentinel misija se kroz Copernicus program prerađuju u skup produkata biofizičkih varijabli koje opisuju stanje i razvoj vegetacije, energetske proračun, vodni ciklus i kriosferu na kopnu na globalnoj razini, uključujući i elemente za pripremu podataka o ekvivalentu vode u snijegu, evapotranspiraciji i promjenama u volumenu velikih akumulacija [2].

Landsat misija NASA-e je također vrlo koristan izvor za utvrđeni problem, a u usporedbi sa Sentinel misijom, točnije Sentinel-2 MSI, može se reći da ima vrlo slične karakteristike, s time da Landsat 8 posjeduje i termalne kanale termalnog infracrvenog senzora pogodne za mjerenje temperature tla i objekata na zemlji [3]. Specifični položaj opsega Sentinel-2 MSI, u usporedbi s Landsat 7 i 8, može se vidjeti na slici 6.



Slika 6. Usporedba opsega signala Sentinel-2 MSI s Landsat 7 i 8 u odnosu na valnu duljinu (izvor: USGS)

Glavni vidljivi i bliski infracrveni opsezi Sentinel-2 MSI imaju prostornu rezoluciju od 10 metara, dok njegovi "crveni rubovi" (crveni i bliski infracrveni opsezi) i dva kratkovalna infracrvena opsega imaju prostornu rezoluciju od 20 metara. Obalni/aerosolni, vodena para i cirrusni opsezi imaju prostornu rezoluciju od 60 metara. Produkti Landsat 8 imaju sličnu geometrijsku točnost kao Sentinel-2, a uzimajući u

obzir da je Landsat misija i nešto starija od Sentinela, ne bi trebalo biti puno informacija koje Sentinel ne može pružiti [19].

Iako mu je primarni cilj skeniranje površine oceana i kopna kako bi se prikupile informacije povezane s biološkim procesima, Sentinel-3 OLCI (*eng. Ocean and Land Colour Imager*) pruža 22 spektralna kanala uključujući mnogo informacija o atmosferi, a fokusira se na površinske temperature i pokrivač tla i ima dnevno vrijeme ponovnog snimanja ili čak i više. Ovisno o određenom produktu, ocijenjen je kao još jedan izvor koji bi mogao biti vrlo koristan za popunjavanje nedostajućih podataka u okviru hidrološkog modeliranja [2].

Uz Sentinel i Landsat produkte značajan potencijal je prepoznat i kod snimaka naprednog radiometra vrlo visoke rezolucije – AVHRR, a koji se mogu koristiti za klasifikaciju naoblake (za raspodjelu oborina unutar sliva) i razmjere snijega (za ažuriranje internog mehanizma modela). Indeksi vegetacije izvedeni iz podataka AVHRR pomažu u procjeni isparavanja i transpiracije iz svake vrste pokrivača. Protuvrijednost volumena vode nastale od snijega može se izračunati i korištenjem pasivnih mikrovalnih podataka satelita DMSP. Također podaci spektrometra za snimanje umjerene rezolucije – MODIS kao i pasivnih mikrovalnih istraživanja – AMSR-E, a koji kod uspostave Sava HEC-HMS modela zasigurno su već upotrijebljeni izvori koji će biti uzeti u obzir kod cjelovitog istraživanja, uključujući i nove tehnologije istraživanja u nastajanju, npr. bespilotni zrakoplovni sustavi – dronovi koji koriste globalne navigacijske satelitske sustave – GNSS (*eng. Global Navigation Satellite System*) s interferometrijskom reflektometrijom i sl. [19].

5 Zaključak

Rezultati ovog rada pokazuju da korištenje podataka daljinskih istraživanja u hidrološkom modeliranju mogu poslužiti u rješavanju hidroloških problema u riječnom slivu vezanih za nedostatak podataka nužnih za provedbu pouzdanih hidroloških simulacija i prognoza. Budući da napredne metode daljinskih istraživanja putem satelitskih, radarskih kao i drugih sofisticiranih tehnologija u nastajanju, u novije vrijeme dostižu vrlo zavidne rezultate u pogledu pouzdanosti s visokom prostornom i vremenskom rezolucijom, sve je veća tendencija korištenja njihovih produkata, posebice podataka otvorenog pristupa. Trenutačna uporaba podataka daljinskih istraživanja u hidrološkom modeliranju, a naročito u slivu rijeke Save, još je uvijek na dosta niskoj razini. Razlozi su vezani za više različitih problema, kao što je nedostatak odgovarajuće obuke o primjeni ovih produkata, ali je jedan od glavnih razloga taj što postoji samo nekoliko univerzalno primjenjivih operativnih metoda za preuzimanje i pripremu hidroloških parametara iz kompleksnih podataka daljinskih istraživanja. U radu je prikazan dio mogućnosti produkata daljinskih istraživanja koja raspoložu velikom količinom podataka, a za koja se još uvijek pronalaze odgovarajuće tehni-

ke za njihovu primjenu u hidrološkom modeliranju. Za hidrološki model sliva rijeke Save uočena je potreba korištenja podataka daljinskog istraživanja, posebice vodeni ekvivalent snijega, evapotranspiracije i promjene volumena vode u velikim akumulacijama. Algoritmi i procedure za uporabu navedena tri ulaza iz daljinskih istraživanja u hidrološkom modeliranju još uvijek su ograničeni na određena područjima na koja se mogu primijeniti. Radari sa sintetičkim otvorom antene multispektralni optički snimači visoke rezolucije, kao i pasivni mikrovalni podaci koriste se rutinski za procjenu vodnog ekvivalenta snijega, ali su algoritmi trenutačno ograničeni na određene regije i pokrov zemlje. Poznavanje evapotranspiracije i promjena volumena vode u velikim akumulacijama također je od važnosti za Sava HEC-HMS model, ali postojeći algoritmi za dobivanje ovih podataka iz daljinskog istraživanja često su pojednostavljeni i primjenjuju se samo na određena područja.

Potreba za razvojem algoritama za pripremu podataka daljinskih istraživanja za operativne hidrološke modele svakako postoji. Takvo cjelovito istraživanje trebalo bi dovesti i do razrade metode popunjavanja nepostojećih i/ili nepotpunih hidroloških podataka vremenskih nizova.

Literatura

- [1] Kite G.W., Pietroniro A. (1996), Remote sensing applications in hydrological modelling, *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*, 41(4), pages 563-591
- [2] Sentinel, Europska svemirska agencija – ESA, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>.
- [3] Landsat, Američka nacionalna uprava za zrakoplovstvo i svemir – NASA, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- [4] AVHRR, Napredni radiometar vrlo visoke rezolucije, Američka nacionalna oceanografska i atmosferska služba / Nacionalni centar za informacije o okolišu – NOAA, https://www.avl.class.noaa.gov/release/data_available/avhrr/index.htm.
- [5] MODIS, Spektroradiometar za snimanje umjerene rezolucije, Američka nacionalna uprava za zrakoplovstvo i svemir – NASA, <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- [6] AMSR-E, Napredni radiometar za mikrovalno skeniranje, Američka nacionalna uprava za zrakoplovstvo i svemir – NASA, <https://aqua.nasa.gov/amr-e>.
- [7] DMSP, Meteorološki satelit progama odbrane Američka nacionalna oceanografska i atmosferska služba / Nacionalni centar za informacije o okolišu – NOAA, <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>.
- [8] Delft-FEWS, Deltares, <https://www.deltares.nl/en/software/flood-forecasting-system-delft-fews-2/>

- [9] ALADIN (eng. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational), Model za dinamičku prilagodbu ograničenog područja, <http://www.umr-cnrm.fr>
- [10] ECMWF (eng. European Center for Medium range Weather Forecasting), Model Europskog centra za srednjoročne prognoze i skupnu, ensembl prognozu, <https://www.ecmwf.int/>
- [11] WRF (eng, the Weather Research and Forecasting model), Model istraživanja i prognoziranja vremena, <https://www.mmm.ucar.edu/>
- [12] NMMB (eng. Nonhydrostatic Mesoscale Model on B-grid), Više srazmjerni nehidrostatski model, Američka nacionalna oceanografska i atmosferska služba / Nacionalni centar za informacije o okolišu – NOAA, <https://nomads.ncep.noaa.gov>
- [13] Lisca, Radar Agencije za okolje Republike Slovenije – ARSO, <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/weather/observ/radar/>
- [14] OPERA, Radarski program Europskog udruženja nacionalnih meteoroloških i hidroloških službi – EUMETNET, <https://www.eumetnet.eu/>
- [15] H-SAF, Satelitska aplikacija za podršku operativnoj hidrologiji i gospodarenju vodama Europske organizacije za korištenje meteoroloških satelita – EUMETSAT, <https://www.eumetsat.int/h-saf>
- [16] Feldman A. (2000), Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual, *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. Dostupno na: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs>
- [17] Tedesco M., Kelly R., Foster J.L., Chang A. T.C. (2004). AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids. Version 2. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Dostupno na: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_DYSNO.002
- [18] Verkade J.S., Brown J.D, Davids F, Reggiani P, Weerts A.H (2017), Estimating predictive hydrological uncertainty by dressing deterministic and ensemble forecasts; a comparison, with application to Meuse and Rhine, *Journal of Hydrology*, Volume 555, pages 257-277. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.024>
- [19] Sentinel Hub, Sinergise Laboratory for geographical information systems, Ltd., <https://www.sentinel-hub.com/>

Metodologija procjene karakteristika odbačene kaverne nastale uz riprap zaštitu od podlokavanja

Robert Fliszar¹, doc.dr.sc. Gordon Gilja²

¹ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, robert.fliszar@grad.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, gordon.gilja@grad.unizg.hr

Sažetak

Podlokavanje oko stupa mosta narušava njegovu stabilnost i dovodi do razvoja kaverne te promjene lokalnog polja tečenja. Dosadašnja istraživanja podlokavanja su uglavnom bila fokusirana na podlokavanje oko stupova koji nemaju izvedenu zaštitu od podlokavanja, dok se kod stupova obloženih riprap zaštitom kaverna pojavljuje nizvodno od mosta, a ne na području oko samog stupa. Cilj je ovog istraživanja razviti sustav praćenja razvoja kaverne i odrediti empirijske jednadžbe kojima će se opisati vremenski razvoj kaverne na stupovima mosta zaštićenima riprap zaštitom. Na fizičkom i numeričkom modelu ispitivat će se razvoj kaverne pri rasponu različitih hidroloških događaja, a modeli će biti verificirani na temelju terenskih mjerenja.

Ključne riječi: podlokavanje, most, riprap, kaverna, fizički model, numerički model, R3PEAT

Research approach for estimation of deflected scour hole characteristics developed next to riprap protection

Abstract

Local scour around bridge pier impairs its stability and leads to the development of a scour hole and local changes in flow field in the bridge opening. Previous research has been mostly focused on the local scour around unprotected bridge piers, while next to the piers protected with riprap, scour hole appears downstream of the bridge opening instead next to the pier. The aim of this research is to establish a system for monitoring of the scour hole development and to define empirical equations that will describe the temporal development of the scour hole around bridge piers protected with riprap. Scour hole development under the range of characteristic hydrological events will be examined using physical and numerical model, verified on data acquired from field measurements.

Key words: local scour, bridge, riprap, scour hole, physical model, numerical model, R3PEAT

1 Uvod

Podlokavanje oko stupova mostova jedan je od najčešćih uzroka otkazivanja stabilnosti mostova u svijetu. Budući da oštećenja na mostovima i njihovo potencijalno urušavanje mogu dovesti do velikih materijalnih šteta pa i gubitka ljudskih života, posebna pozornost treba se usmjeriti prema djelovanju toka vode na korito u neposrednoj blizini stupova mosta. Djelovanje vodotoka na konstrukciju može biti izravno kao hidrodinamičko djelovanje uzrokovano opstrujavanjem vode oko dijelova konstrukcije mosta, ili neizravno kao učinak vode na promjenu geometrije korita vodotoka u području mosta, što je vrlo opasno jer uzrokuje podlokavanje dijelova konstrukcije i time mijenja geometriju te utječe na statički proračun i/ili uvjete temeljenja [1]. Podlokavanje je prirodni fenomen uzrokovan erozivnim djelovanjem toka vode u aluvijalnim riječnim koritima. Tri su osnovna fenomena erozije u blizini mosta: globalna erozija koja se javlja duž vodotoka, erozija uslijed suženja toka kroz mostovski profil i lokalno podlokavanje do kojeg dolazi zbog tečenja oko tijela urođenog u struju toka. Osnovni mehanizam koji uzrokuje lokalno podlokavanje oko stupova je formiranje vrtloga pri dnu stupa [2]. Postoji više mjera zaštite stupa od lokalnog podlokavanja, kao što su pomoćne građevine i riprap (kameni nabačaj) oko stupa koje su prikazane kroz brojne studije i eksperimente [3]. Riprap je najčešće korištena zaštita od podlokavanja, učinjena od velikih lomljenih kamena postavljenih oko stupa kako bi se smanjila erozija uslijed vrtloga formiranih uz stupove i nastajanje kaverne [4] (slika 1). Razlog zašto je riprap najčešća zaštita od podlokavanja jest jednostavnost njegove izvedbe, niska cijena i jednostavni popravak u slučaju oštećenja, u usporedbi s drugim metodama [5]. Međutim, utvrđeno je da riprap ne sprječava nastajanje kaverne nego ju samo odbacuje nizvodno od mosta zbog čega dolazi do morfodinamičkih promjena u koritu što predstavlja opasnost za infrastrukturu i hidrotehničke građevine u blizini mosta. Također su rijetko istraživane povezanosti između urušavanja riprapa u kavernu sa stabilnošću i sigurnošću mostova, osobito za karakteristike riprapa koji se primjenjuje u Hrvatskoj [6].



Slika 1. Riprap zaštita oko stupa mosta

Od kasnih 1950-ih do danas napravljene su brojne studije o podlokavanju oko stupova mostova koje su najčešće rezultirale jednadžbama za ravnotežno stanje kaverne korištene za projektiranje adekvatne zaštite od podlokavanja [7]. S druge strane, suvremen trend u istraživanju podlokavanja je proučavanje promjena kaverne u vremenu, za razliku od proučavanja kaverne u ravnotežnom stanju jer se ravnoteža postiže nakon dugog vremena stacionarnih hidroloških uvjeta, što se u prirodi rijetko događa [8]. Vremenska varijacija lokalnog podlokavanja oko stupova vrlo je važan aspekt riječnog inženjerstva jer dostizanje ravnotežnog stanja kaverne traje jako dugo što utječe na procjenu utjecaja na konstrukciju [9]. Niz znanstvenika je istraživao vremenski razvoj kaverne oko stupova konstantnog presjeka. Melville i Chiew [10] razvili su metodu za predviđanje vremenskog razvoja kaverne oko stupa koja je temeljena na kombinaciji njihovih podataka i podataka istraživanja Etteme [11]. Mohammadpour i dr. [12] istražili su vremenski razvoj kaverne na kratkim upornjacima, $L/y < 1$ (gdje L i y predstavljaju duljinu i dubinu toka). Zaključili su da se 80 – 90 % maksimalne dubine kaverne razvije u prvih 20 – 40 % vremena potrebnog za dolazak kaverne u ravnotežno stanje. Yang i dr. [13] identificirali su četiri faze razvoja kaverne za složene stupove: faza inicijacije, faza stagnacije, faza razvitka i faza ravnoteže. Link i dr. [14] pri izračunu mjerila fizičkog modela koriste efektivni rad toka W^* i njegovu povezanost s normalnom dubinom kaverne Z^* . Ključni bezdimenzijski parametri su: promjer zrna D^* , relativna gustoća nanosa ρ i standardna devijacija veličine zrna nanosa σ . Također su svojim rezultatima potvrdili ideju da je utjecaj ubrzanja toka na podlokavanje zanemariv. Lee i Sturm [15] u svom radu utvrđuju kako je odabir nanosa u fizičkom modelu najvažniji zbog toga što se geometrijskim skaliranjem baziranim na Shieldsovom kriteriju dobiju jako male veličine zrna nanosa u modelu, pa se javljaju sile između čestica koje ne postoje u aluvijalnim koritima rijeka. Zbog toga se radi distorzija u mjerilu modela. Maynord [16] je pri izradi fizičkog mikromodela rijeke došao do zaključka da minimalna gustoća nanosa u modelu mora biti $1,05 \text{ g/cm}^3$ kako bi se pravilno pronosio, iako je problematično pokretanje toka u modelu čak i s tom gustoćom. Tabarestani [17] koristi modificirani Reynoldsov i Froudov broj, odnosno Reynoldsov broj čestice (Re^*) i Shieldsov broj (θ^*), koji sadrži omjer specifične težine tekućine i potopljenog nanosa, za izračun mjerila fizičkog modela podlokavanja oko stupa mosta. Također koristi distorzirano mjerilo po vertikalnoj osi kako bi poboljšao sličnost procesa toka, smanjio utrošak vremena i troškove izgradnje velikih modela koji zauzimaju puno prostora. Mjerilo vremena pronosa nanosa dobiveno je iz bezdimenzijskog broja pronosa nanosa T^* u prototipu i modelu. Dobiveno je horizontalno mjerilo modela od 1:37,5 prema prototipu, iz čega dalje proizlaze izračuni za vertikalno mjerilo modela prema prototipu od 1:19,6 te veličina zrna u modelu 1:0,31 prema prototipu. Link i dr. [18] istražili su na 17 različitih eksperimenata podlokavanja oko stupova mosta, koristeći tri različita nanosa i dva druga materijala različite gustoće i veličine zrna, sličnosti modela i

prototipa za različita mjerila. Utvrdili su da mjerilo vremena ovisi o promjeru stupa, relativnoj gustoći nanosa i brzini toka.

Guven i Gunal [19] razvili su hibridni numeričko – matematički model koji simulira vremenski razvoj kaverne i polje tečenja u laboratorijskom kanalu. Matematički model računa oblik kaverne, a numerički simulira dvodimenzionalno polje tečenja u kaverni. Hibridnim modelom predviđen vremenski razvoj kaverne i simulirano polje tečenja dobro su se podudarali s eksperimentalnim rezultatima.

Sve prethodno navedene studije izvođene su za mostove bez dodatne zaštite od podlokavanja, a doprinos ovog istraživanja je usredotočenost na mostove s izvedenom riprap zaštitom od podlokavanja. U ovom radu opisana je metodologija procjene karakteristika odbačene kaverne nastale uz riprap zaštitu od podlokavanja koja će biti primijenjena u izradi doktorskog rada u sklopu projekta Daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu (R3PEAT, [20]).

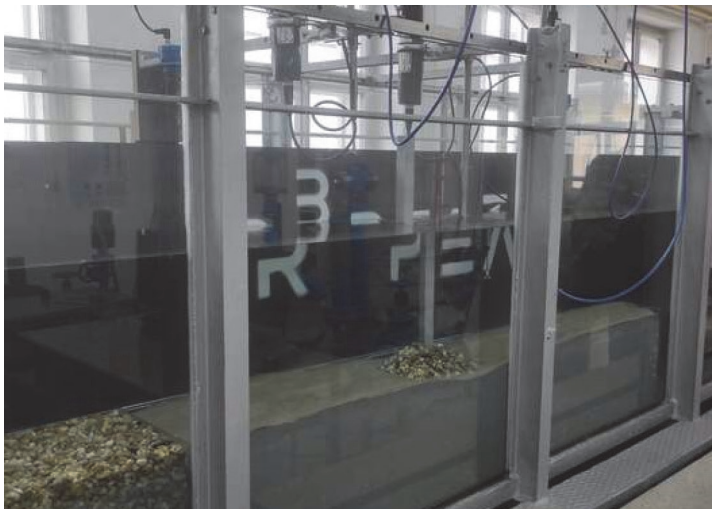
Cilj doktorskog rada je istražiti vremenski razvoj kaverne uzrokovane podlokavanjem oko stupa mosta zaštićenog riprapom i definirati odgovarajuće empirijske jednadžbe primjenjive za procjenu razvoja kaverne na velikim rijekama u području takvih mostova.

2 Metodologija

Kako bi se dobili valjani rezultati podlokavanja oko stupova mostova zaštićenih riprap zaštitom, u doktorskome radu planira se provoditi istraživanje na fizičkom i numeričkom modelu koji će biti verificirani podacima izmjerenim na terenu.

2.1 Fizički model

U svrhu istraživanja izrađen je fizički model za proučavanje podlokavanja oko stupa mosta obloženog riprap zaštitom u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Za uspostavljanje fizičkog modela korišten je 18 m dug, 0,9 m širok i 0,9 m visok recirkulirajući hidraulički kanal pravokutnog poprečnog presjeka. Radni dio kanala je 3 m dug, 0,4 m širok i 0,7 m dubok. Upuštanje vode u kanal kontrolirano je pomoću dvije frekventno regulirane crpke maksimalnog kapaciteta 50 l/s, a vodostaj je kontroliran zglobno pričvršćenom pomičnom klapnom.



Slika 2. Fizički model smješten u hidraulički kanal u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku

Mjerilo je izračunano posebno za svaki pilot-most – dva mosta na rijeci Dravi (Osijek, Botovo) i jedan na rijeci Savi (Jasenovac). Hidrološki uvjeti određeni su analizom amplitude i trajanja poplavnog vala izmjerenih na hidrološkoj stanici koja pripada dionici rijeke na kojoj se nalazi pojedini pilot-most. Eksperimenti će biti provedeni s različitim oblicima poprečnog presjeka i dimenzijama stupa. Raspon protoka, koji će simulirati različite uvjete toka, određen je kako bi se maksimalno iskoristila ograničenja crpke na hidrauličkom kanalu. Za određivanje debljine substrata nanosa u modelu, procijenjena je očekivana dubina podlokavanja jednadžbama za ravnotežnu dubinu kaverne [21]. Analiza osjetljivosti 13 različitih empirijskih jednadžbi provedena je zbog različitosti u hidrauličkim i geometrijskim uvjetima pojedinog prototipa. Budući da mjerilo modela utječe na vremenski parametar, adekvatno mjerilo vremena je također izračunano kako bi se postigao cjeloviti razvoj kaverne [22]. U prvom slučaju koristit će se nanos iz prirode ($\rho = 1,65 \text{ g/cm}^3$), za koji je horizontalno mjerilo modela 1:125 prema prototipu, distorzirano je u vertikalnom smjeru gdje je mjerilo modela prema prototipu 1:11,18. U drugom slučaju koristit će se nanos materijala koji će zamijeniti nanos gustoće ($\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$), za koji će horizontalno mjerilo modela biti 1:29,77 prema prototipu, distorzirano je u vertikalnom smjeru gdje je mjerilo modela prema prototipu 1:17,5. Mjerenje karakteristika polja brzine toka izvodi se pomoću dva Vectrino Profiler (VP) (slika 3) i jednog Vectrino Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) uređaja koji su pričvršćeni na pomičnim kolicima pričvršćenim na stijenke kanala kako bi se mogli postaviti na različite pozicije uzduž modela te po širini i dubini. Oba uređaja prikupljaju podatke s frekvencijom od 100 Hz. Za mjerenje razine vode koriste se dva Geolux lx-80 (slika 3) mjeriča razine, postavljena na najuzvodniju i najnižvodniju točku radnog dijela modela. Budući da

VP i ADV uređaji rade na bazi doplera, prisutan je Dopplerov šum u sirovom zapisu, zbog čega će se u naknadnoj obradi izvesti filtriranje podataka pomoću MATLAB programskog okruženja.



Slika 3. Geolux lx-80 mjerac razine (lijevo), Vectrino Profiler (sredina), glava VP/ADV uređaja (desno)

2.2 Numerički model

Numeričkim se modeliranjem planira simulirati najveći broj podataka za analizu - karakteristike polja tečenja, pronos nanosa, morfodinamičke promjene korita i vremenski razvoj kaverne. Prednost numeričkog modela je simulacija tečenja na većoj dionici vodotoka, što se ne može postići fizičkim modelom zbog njegovih prostornih ograničenja, kao i detaljnost rezultata po cijeloj domeni vodotoka. Kalibracija numeričkog modela provest će se pomoću izmjerenih podataka o polju tečenja s terenskih mjerenja, a verifikacija preko dimenzija kaverne. Za numeričko modeliranje koristit će se FLOW-3D programski paket.

FLOW-3D komercijalni je softver prigodan za modeliranje kompleksnih problema kod fluida, široko korišten za potrebe modeliranja nestacionarnih trodimenzionalnih tokova sa slobodnim vodnim licem i kompleksnom geometrijom, a radi na metodi konačnih volumena i koristi pet turbulentnih modela kao što su k- ϵ i RNG [23].

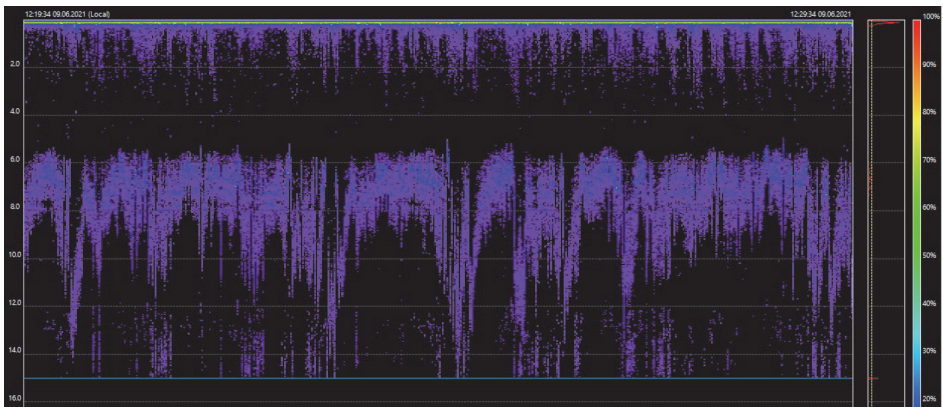
2.3 Terenska mjerenja

Na lokaciji pilot mostova bit će izmjerene karakteristike polja tečenja akustičnim strujomjerom (ADCP) na nizu kontrolnih poprečnih profila. Batimetriju korita izmjerit će geodeti, a pronos suspendiranog nanosa izmjeren je fizičkim hvatačem nanosa i uređajem LISST. Za potrebe terenskih mjerenja unutar projekta R3PEAT razvija se metodologija sveobuhvatnog autonomnog snimanja vremenskog razvoja kaver-

ne tijekom velikovodnih događaja. Metodologija obuhvaća konvencionalna mjerenja akustičnim strujomjerom, dubinomjerom i akustičnim mjeračem koncentracije nanosa te razvoj autonomne plutače ScourBuoy [24] koja omogućuje prikupljanje podataka u uvjetima nedostupnim konvencionalnim metodama, kao što su ekstremno visoki vodostaji pri kojima nije dopuštena plovidba, noćni uvjeti i dugotrajno kontinuirano mjerenje tijekom nailaska vodnog vala. ScourBuoy je kompletiran od Echologger EA400 dubinomjera koji mjeri dubinu, temperaturu te nagib po dvije horizontalne osi i mobitela pomoću kojeg se mjeri 3D pozicija i kompas za orijentaciju u odnosu na sjever (slika 4) uklopljenim u plutaču koja se sidri na dno rijeke. Kombinacija izlaznih podataka iz uređaja daje korisniku mogućnost za izračun dubine i praćenje vremenskog razvoja kaverne u uvjetima velikih voda.



Slika 4. ScourBuoy (1. prototip) (lijevo), dubinomjer Echologger EA400 (sredina), vodootporno kućište s mobitelom (desno)



Slika 5. Primjer zapisa dubine toka snimljene Echologger dubinomjerom

Prednost ScourBuoya je prilagodba uvjetima na terenu, kao što je pozicioniranje direktno iznad kaverne, i jednostavnija promjena lokacije u odnosu na druga fiksna rješenja. Cilj je daljnjim usavršavanjem unaprijediti ScourBuoy da postane pouzdano rješenje za monitoring podlokavanja u stvarnom vremenu.

3 Opis pilot-mostova

3.1. Drava – Osijek

Most Drava-Osijek nalazi se u Osijeku na km 2+088,443 pruge M301 dg-Beli Manastir-Osijek, te premošćuje rijeku Dravu. Most ima 3 otvora. Dva stupa, visine oko 30.0 m, betonska su na betonskim temeljima i AB ležajnom gredom i oba su smještena u vodotoku. Podaci o srednjem protoku i vodostaju izmjereni su na mostu najbližoj vodomjernoj postaji – VP Osijek. Srednji vodostaj na VP Osijek iznosi $H_{sv} = 82.52$ m n. m., s pripadajućim protokom od $Q_{sv} = 507$ m³/s. Dno korita na lokaciji mosta sastavljeno je od jednoliko graduiranog pijeska promjera 50%-tnog zrna $d_{50} = 0.25$ mm.



Slika 6. Most Drava – Osijek

3.2 Drava – Botovo

Most Drava-Botovo je čelični most koji se nalazi se u Botovu na km 523 + 579 pruge Og - Botovo - Dugo Selo, te premošćuje rijeku Dravu. Most ima 3 otvora. Oba stupa nalaze se u koritu vodotoka. Podaci o srednjem protoku i vodostaju izmjereni su na mostu najbližoj vodomjernoj postaji – VP Botovo. Srednji vodostaj na VP Botovo iznosi $H_{sv} = 122.51$ m n. m., s pripadajućim protokom od $Q_{sv} = 507$ m³/s. VP Botovo je smješteno upravo na lokaciji analiziranog željezničkog mosta. Dno korita na lokacijama sastavljeno je pretežito od šljunka promjera 50%-tnog zrna $d_{50} = 10$ mm.



Slika 7. Most Drava - Botovo

3.3 Sava – Jasenovac

Mosta Sava - Jasenovac u naselju Jasenovac čelična je, zakovana i djelomično zavarana, rešetkasta konstrukcija otvorenog kolosijeka, a nalazi se na km 317+403 pruge M502 Zagreb GK –Sisak - Novska. Most je ukupne duljine 220,00 kn i s tri otvora (50,50+50,50 +57,50 m) premošćuje rijeku Savu istočno od Jasenovca. Stupovi su betonski. Podaci o srednjem protoku i vodostaju izmjereni su na mostu najbližoj vodomjernoj postaji – VP Jasenovac. Srednji vodostaj na VP Jasenovac iznosi $H_{sv} = 293$ m n. m., s pripadajućim protokom od $Q_{sv} = 781$ m³/s. Dno korita na lokacijama sastavljeno je pretežito od šljunka promjera 50%-tnog zrna $d_{50} = 7$ mm.



Slika 8. Most Sava – Jasenovac

4 Rasprava

Dosadašnja istraživanja o podlokavanju oko stupova mostova koncentrirala su se na mostove bez izvedene zaštite od podlokavanja. Budući da je riprap zaštita najčešće izvedena u Hrvatskoj, u sklopu doktorskog rada istražiti će se podlokavanje na mostovima s takvom zaštitom. S obzirom na to da riprap ne sprječava nastanak kaverne nego se ona propagira nizvodno od samoga mosta, izradit će se sustav praćenja podlokavanja koji će se moći postaviti iznad nastale kaverne i pratiti procese podlokavanja. Izvedenim fizičkim modelom i numeričkim simulacijama analizirat će se vremenski razvoj kaverne za raspon različitih hidroloških uvjeta, na temelju kojega će se doći do zaključka o nastanku kaverne oko stupova mostova zaštićenih riprapom.

5 Zaključak

U ovom radu prikazana je metodologija istraživanja podlokavanja koja će biti primijenjena u izradi doktorskog rada u sklopu projekta R3PEAT. Doprinos istraživanja je određivanje vremena razvoja kaverne za stupove zaštićene riprapom, što će rezultirati pouzdanijim empirijskim jednadžbama za korištenje u struci pri projektiranju mostova kao i pri praćenju stanja izgrađenih mostova. Kako bi se dobili što pouzdaniji rezultati, pri istraživanju će se paralelno koristiti fizički i numerički model, a verifikaciju će se provesti na osnovi terenskih mjerenja u različitim hidrološkim uvjetima.

Zahvala

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

Literatura

- [1] Kuspilić, N., Gilja, G.: Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova, *E-zbornik: elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta*, 8 (2018) pp. 24-38
- [2] Khwairakpam, P., Mazumdar, A.: Local Scour Around Hydraulic Structures, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1 (2009) pp. 59-61
- [3] Ji, U., Yeo, W., Kang, J.: Subsidence of riprap protection without filters for different installation types of riprap around a pier in sands, *Journal of Hydro-environment Research*, 7 (2013) pp. 41-49
- [4] Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Zevenbergen, L.W., Girard, L.G.: *Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour*, National Cooperative Highway Research Program - Transportation Research Board, 2007
- [5] Park, S.K., Julien, P.Y., Ji, U., Ruff, J.F.: Case Study: Retrofitting Large Bridge Piers on the Nakdong River, South Korea, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (2008) 11, pp. 1639-1650
- [6] Park, S.W., Hwang, J.H., Ahn, J.: Physical Modeling of Spatial and Temporal Development of Local Scour at the Downstream of Bed Protection for Low Froude Number, *Water*, 11 (2019) 5, pp. 1041
- [7] Saha, R., Lee, S.O., Hong, S.H.: A Comprehensive Method of Calculating Maximum Bridge Scour Depth, *Water*, 10 (2018) 11, pp. 1572
- [8] Kothiyari, U.C., Kumar, A.: Temporal variation of scour around circular bridge piers, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 16 (2010) sup1, pp. 35-48
- [9] Dey, S., Barbhuiya, A.K.: Time Variation of Scour at Abutments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (2005) 1, pp. 11-23
- [10] Melville, B.W., Chiew, Y.-M.: Time Scale for Local Scour at Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (1999) 1, pp. 59-65
- [11] Ettema, R.: *Scour at Bridge Pier*, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, pp. 527, 1980
- [12] Mohammadpour, R., Ghani, A.A., Azamathulla, H.M.: Estimation of dimension and time variation of local scour at short abutment, *International Journal of River Basin Management*, 11 (2013) 1, pp. 121-135
- [13] Yang, Y., Melville, B.W., Macky, G.H., Shamseldin, A.Y.: Temporal Evolution of Clear-Water Local Scour at Aligned and Skewed Complex Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 146 (2020) 4, pp. 04020026
- [14] Link, O., Castillo, C., Pizarro, A., Rojas, A., et al.: A model of bridge pier scour during flood waves, *Journal of Hydraulic Research*, 55 (2017) pp. 310-323

- [15] Lee, S.O., Sturm, T.W.: Effect of Sediment Size Scaling on Physical Modeling of Bridge Pier Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135 (2009) 10, pp. 793-802
- [16] Maynard, S.T.: Evaluation of the Micromodel: An Extremely Small-Scale Movable Bed Model, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (2006) 4, pp. 343-353
- [17] Tabarestani, M.K., Salamatian, S.A.: Physical modelling of local scour around bridge pier, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 28 (2016) 3, pp. 349-364
- [18] Link, O., Henríquez, S., Ettmer, B.: Physical scale modelling of scour around bridge piers, *Journal of Hydraulic Research*, (2018) pp.
- [19] Guven, A., Gunal, M.: Hybrid modelling for simulation of scour and flow patterns in laboratory flumes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, (2009) pp. n/a-n/a
- [20] Gilja, G., Harasti, A., Potočki, K., Varga, M., *et al.*: Istraživački okvir projekta R3PEAT - daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu, *OKRUGLI STOL: Nanos u vodnim sustavima - stanje i trendovi*, Varaždin, pp. 2020
- [21] Cikojević, A., Gilja, G., Kuspilić, N.: Sensitivity analysis of empirical equations applicable on bridge piers in sand-bed rivers, *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, Skopje, Republic of North Macedonia, pp. 2019
- [22] Fliszar, R., Gilja, G., Harasti, A., Potočki, K.: Scaling approach for physical modelling of pier scour, *EGU General Assembly 2021*, Beč, Austrija, pp. 2021
- [23] Razavi, A.R., Ahmadi, H.: Numerical Modelling of Flow in Morning Glory Spillways Using FLOW-3D, *Civil Engineering Journal*, 3 (2017) 10, pp. 956
- [24] Harasti, A., Gilja, G., Varga, M., Fliszar, R.: ScourBuoy – concept for scour monitoring system, *EGU General Assembly 2021*, Beč, Austrija, pp. 2021

Review of thermal performance of LSF walls used for nZEB: Influence of components

Tomislav Ščapec¹, doc.dr.sc. Marija Jelčić Rukavina²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, tomislav.scapec@grad.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, marija.jelcic.rukavina@grad.unizg.hr

Abstract

Light steel framed (LSF) panels are relatively new construction systems that are light weight, highly resistant, recyclable, and reusable. In general, this building system incorporates three main parts: steel studs, sheathing boards, and insulation materials. Each part of a LSF panel has a distinct and significant role in fulfilling basic building requirements. Based on literature review, this article gives a brief overview of the properties of insulation and sheathing materials, various panel configuration performances, their main advantages and disadvantages, with the focus on the thermal performance at ambient and elevated temperatures.

Key words: LSF panels, thermal performance, sheathing boards, insulation, ambient temperatures, elevated temperatures

Pregled toplinskih svojstava LSF zidova koji se primjenjuju za nZEB: Utjecaj komponenti

Sažetak

Paneli od čeličnih, tankostijenih elemenata odlikuju se smanjenom težinom, mehaničkom otpornošću, mogućnošću recikliranja i ponovne uporabe. Sistem se može podijeliti na tri osnovna djela: čelični profili, obložni materijali i izolacijski materijali. Svaki dio ima različitu i bitnu ulogu kojom se ispunjavaju osnovni zahtjevi za građevinu. U ovom članku daje se kratki osvrt izolacijskih i obložnih materijala koji se mogu koristiti ili koji se koriste u panelnim sistemima te ostala istraživanja gdje su istraživane različite panelne konfiguracije, njihove prednosti i mane s fokusom na ponašanje na sobnim i povišenim temperaturama.

Ključne riječi: tankostijeni čelični panel, toplinsko ponašanje, obložni materijali, izolacija, sobne temperature, povišene temperature

1 Introduction

Light steel framed (LSF) walls are increasingly used as an alternative to traditional brick, mortar and concrete building systems. When compared to traditional construction, LSF construction offers advantages such as: reduced weight with simultaneous high mechanical strength; easier prefabrication, allowing modular elements and higher quality control; shorter on-site assembly periods; no dimensional variations caused by moisture; low cost; reusability and recyclability. Additionally, the implementation of LSF panels can satisfy the necessary nearly zero-energy building (nZEB) requirements due to the use of thermal insulation materials in the system. Load-bearing or non-load bearing types of LSF panel configurations are being used in structures, depending on the type of construction and the designed load path. For loadbearing types, three main parts of assembly are: steel studs, sheathing boards, and insulation material. The base of this system, i.e., steel studs, are made of bended cold-formed steel plates, and they are the main load-bearing support. Being a metallic material, these steel studs are vulnerable to outside influences (water, chlorides, fire, etc.) and they need to be protected with adequate sheathing boards and insulation. The boards do not only protect the steel and the cavity but they also provide an adequate surface finish and aesthetics. Furthermore, they also have a structural role in load-bearing walls, mainly for horizontal loads (e.g., wind) in the plane of the wall [1]. The thermal insulation of LSF panels can be placed inside the cavity i.e. between the two sheathing boards or at the outside of the boards. LSF panels are therefore classified as cold frame, hybrid frame, and warm frame constructions [2], as shown in Figure 1.

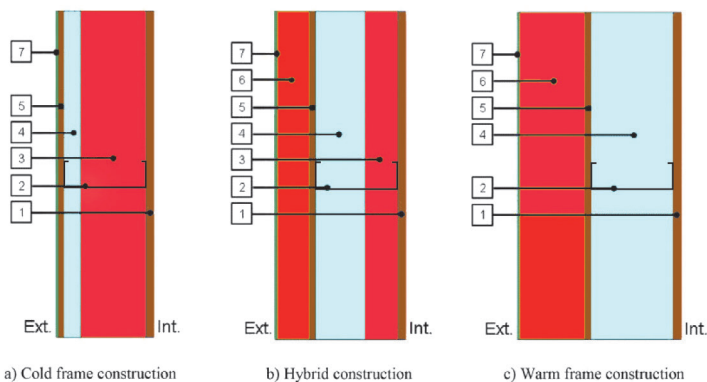


Figure 1. Classification of LSF constructions depending on position of insulation materials (1- Gypsum; 2- LSF; 3- Insulation ; 4- Air gap; 5- OSB; 6- EPS; 7- ETICS) [1]

The biggest downside of the LSF panel is the lack of thermal mass and the somewhat questionable fire behaviour. At elevated temperatures, LSF components behave very differently than at ambient temperatures and it is therefore crucial to observe their behaviour when evaluating the overall performance of the panel. Thermal diffusivity has to be defined to understand thermal performance of the components and of the entire panel system. Thermal diffusivity is the rate of temperature spread through a material and it can be expressed as [3]:

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot C_p) \quad (1)$$

where λ is the thermal conductivity of the material, ρ the material density and C_p the specific heat capacity. A material with a higher thermal diffusivity transfers heat through the material faster and, therefore, it is important to evaluate these properties to understand thermal performance of the material. Consequently, if LSF components have a higher thermal diffusivity it is reasonable to assume that the failure time of the whole panel will increase.

The main goal of this manuscript is to briefly present the current research data about the most often used sheathing and insulation materials for LSF panels, and their main properties (thermal conductivity, specific heat capacity and material density) as needed to evaluate thermal performance of the components at ambient and elevated temperatures. Furthermore, some studies of various panel configurations exposed to high temperatures are presented to show influence of the sheathing and insulation materials.

2 Sheathing boards

Sheathing boards for LSF panels can be divided into two distinct groups: metallic and non-metallic. As stated by Gnanachelvam et al. [4] fire resistance, sound insulation, impact and moisture resistance, durability and economy influence the choice of suitable wallboards. Out of the mentioned parameters, reaction to fire of the boards is especially important given that the load bearing elements, i.e., steel studs, are susceptible to structural failure due to the reduction in mechanical properties at elevated temperatures [5].

2.1 Metallic sheathing

The only more widely used metallic sheathing material is the thin steel sheathing that is often used for industrial hall applications [1]. The application of sheathing can also be attributed to other benefits this sheathing provides. According to Steau et al. [6] the use of thin steel sheathing has been found to provide enhanced stiff-

ness to structural members while improving strength, high impact resistance, blast resistance, mechanical or seismic vibration resistance and enhanced durability. Steel itself is a well-known material and it shares the same thermal performance properties as the load-bearing studs. The basic thermal performance parameters of steel are given in Table 1. The temperature dependent properties are further defined in HRN EN 1993-1-2.

Table 1. Thermophysical properties of steel at ambient temperature[7]

Type of board	Thermal conductivity [W/mK]	Density [kg/m ³]	Specific heat capacity [J/kgK]
Steel	40-50	7600-7800	450-460

As shown in Table 1, steel is a high thermal conductor and it has a high thermal diffusivity which makes it unpractical for energy efficient buildings. Additionally, the thin sheathing material itself is susceptible to the same failures and degradations (especially when exposed to fire, i.e., elevated temperatures) as the steel studs. However, experimental studies on fire performance of steel sheathed LSF walls have rarely been conducted to date [8].

2.2 Non-metallic sheathing

The use of non-metallic sheathing is more common in LSF construction systems that are used for residential and non-residential buildings. Unfortunately, they are produced in fixed lengths that rarely exceed 3.5 m [9]. This in turn demands a greater attention to detail when designing the joints and connections of LSF panels. The most usual sheathing panels are made of Oriented Strand Boards (OSB for short) and gypsum plasterboards for the outer and inner layers of external walls, respectively [1]. Many sheathing options also include magnesium oxide boards, calcium silicate boards, and various types of fiber cement boards [8] while new sheathing options are continuously being developed. Apart from OSB boards, other aforementioned boards are purposefully used as fire protective boards in LSF panels to prevent the temperature rise inside the cavity and steel members due to their low thermal diffusivity. Table 2 gives a summary of the thermo-physical properties for various non-metallic boards used in LSF panels, while a brief description of the boards that are most commonly used (OSB and gypsum plasterboards) are given in following sections.

Table 2. Thermo-physical properties of described non-metallic sheathing

Type of board	References	Thermal conductivity [W/mK]	Density [kg/m ³]	Specific heat capacity [J/kgK]
OSB Board	[10,11]	0.109-0.129	600-680	1420-1550
Gypsum plasterboard	[12–14]	0.23	600-1000	880-1000
Gypsum fiber board	[15,16]	0.32-0.38	1000-1250	880-100
Magnesium oxide board	[4,12,17]	0.39-0.47	1025	1400
Magnesium sulphate board	[12]	0.53	1080	1400
Calcium Silicate board	[18]	0.21-0.26	830-870	560-750

All non-metallic boards, except OSB, experience a thermal conductivity decrease while exposed to elevated temperatures while the specific heat capacity rises at first, and then rapidly falls due to the loss of bound and free water inside the structure of the board. Due to the loss of water, the density also decreases. Because of this effect, the boards are good in preventing a rapid temperature rise on ambient side, which makes them perfect as fire protective boards. Changes in specific heat, thermal conductivity and mass loss of the aforementioned boards are represented in Figure 2. The data on thermal behaviour of calcium silicate boards are limited and are therefore not represented in the figure. In addition, the type I and type II magnesium oxide boards differ in their chemical composition, which is why they are both represented in the figure.

As shown in Figure 2, most mentioned boards experience similar changes at elevated temperatures. As thermal conductivity and specific heat show similar behaviour, the choice of adequate board falls on the changes in the density i.e. on the mass loss of the board. A rapid mass loss leads to faster integrity failure and subsequently lower thermal performance at elevated temperatures.

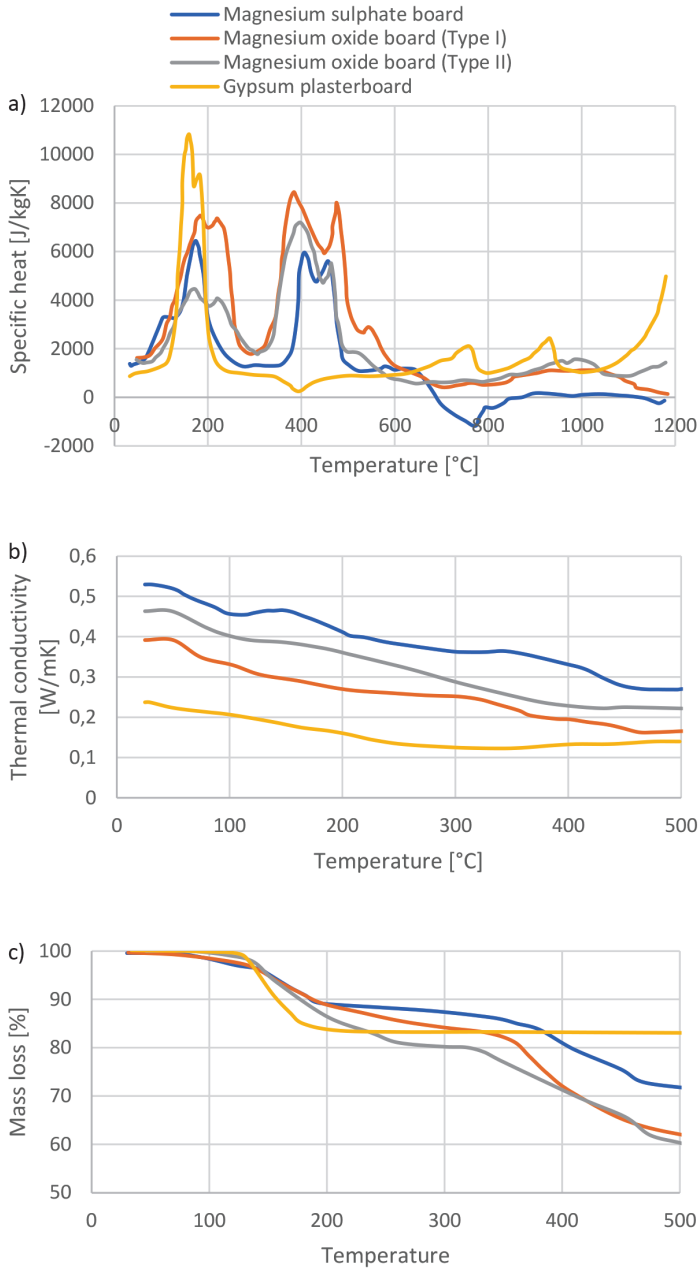


Figure 2. Thermal properties of various sheathing boards: a) thermal conductivity, λ , b) specific heat, C_p , and c) mass loss i.e. ρ change) with temperature increase [4,12]

2.1.1 OSB boards

OSB boards are composite materials, and they have wood chips as their matrix and adhesives as reinforcement [19]. The rise of OSBs as a sheathing material is due to the fact that they provide sufficient mechanical strength and resistance. At ambient temperatures the thermal performance of the OSB boards is fairly consistent, as wood materials are thermal insulators and do not conduct heat [20]. The thermo-physical properties of the board highly depends on the structure, material components, compression methods, and additives [10]. Thermo-physical properties, i.e., thermal conductivity, specific heat, and density, is presented in Table 2. On the other hand, as a timber-based material, OSB boards are prone to ignition [20,21] and they contribute to the overall fire load which makes them unpractical when considering modern fire safety standards. Given the poor fire performance, the use of these boards is limited and should be considered with care.

2.1.2 Gypsum plasterboards and gypsum fibreboards

The gypsum board remains the most widely used sheathing product [8] because it acts as a passive protective layer [22]. It contains approximately 80 % of gypsum (Calcium Sulphate dihydrate), around 5 % of cellulose, and around 5 % of vermiculite [4]. Other additives can also be added into the mixture to increase certain properties. Additionally, the boards incorporate around 20 % of chemically bound water and 4-5 % of free water [22]. Thermo-physical properties of the boards are given in Table 2. Water content is important for understanding the mechanisms that develop during exposure of boards to elevated temperatures, i.e., fire, because the water evaporates and preserves the integrity. The dehydration process is an endothermic reaction and it occurs on two separate occasions, the first one around 100-120 °C, and the second around 300 °C [4,8,12,13,22]. Gypsum fibreboards are a variation of gypsum plasterboards, the only notable difference being the added cellulose fibres in the gypsum core and a somewhat better reaction to fire [23].

3 Thermal insulation materials

LSF panels are often provided with cavity insulation to minimize energy consumption of buildings because the insulation resists the heat flow to the buildings from the external environment [24]. When considering thermal insulation materials, several factors not associated with thermal performance, have to be taken into account during selection of insulation materials such as sound insulation, fire resistance, permeability, environmental impact, and impact on human health [12]. Generally, there is no single classification of insulation materials and it ultimately depends

on the author but, for the purposes of this paper, they are divided into organic and inorganic materials. Insulation materials frequently used for LSF panels include mineral wool (MW), expanded polystyrene (EPS), polyurethane (PUR) foams, or extruded polystyrene (XPS) [1,25]. It is also important to mention that some new innovative materials, such as vacuum insulated panels and aerogels, are also used, but their properties, service life, and overall safety, are still being researched and developed [1,12]. A brief summary of the most frequently used materials is given in this section. Thermal properties at ambient temperatures, for insulation materials described in this section, are presented in Table 3.

Table 3. Thermo-physical properties of various insulation materials

Insulation material	Reference	Thermal conductivity [W/mK]	Density [kg/m ³]	Specific heat capacity [J/kgK]	Reaction to fire in accordance with EN-13501-1 [26]
MW	[27–29]	0.030-0.040	15-200	800-1000	A1
EPS	[27–29]	0.032-0.045	10-80	1250	E-F
XPS	[27–29]	0.025-0.040	15-85	1450-1700	E-F
PUR	[27–29]	0.022-0.040	15-160	1300-1450	D-F
PIR	[28,29]	0.018-0.035	28-45	1400-1500	D-F

3.1.1 Mineral wool (MW)

Mineral wool is an inorganic fibrous material that can be used in a broad spectrum of applications [30]. It covers glass wool (fibre glass) and rock wool, which is normally produced as mats and boards, but occasionally also as a filling material [29]. Glass wool is produced from borosilicate glass at a temperature of approximately 1400°C, while rock wool is produced from melting stone (diabase, dolerite) at about 1500°C [29]. Thermal properties at ambient temperatures are shown in Table 3. Both glass wool and stone wool have a reaction to fire class A1 according to European standard EN13501-1 [26], which means that they do not produce smoke or flaming droplets. Due to this, they can be used at very high temperatures, normally reaching up to 600 °C and, in certain cases, up to 1000 °C [30]. Livkis et al. [31] tested the insulating capability of stone wool in fire conditions and determined that, although considered as a non-flammable, the temperature inside the stone wool rose above the exposure environment temperature. According to the authors, this is due to the small amount of organic components i.e. binders that are added during production of the wool.

3.1.2 Expanded polystyrene (EPS) and extruded polystyrene (XPS)

The EPS and XPS are considered to be organic insulation materials due to the fact that they are produced as petrochemical derivatives. EPS is one of the most widely used thermal insulation materials for buildings due to its excellent insulation effects and low cost [32]. The EPS and XPS are fairly similar products, the only notable difference being the moisture resistance, i.e., XPS absorbs less moisture and costs more, while both materials have the same combustion issues [28]. Thermal properties at ambient temperatures are presented in Table 3. The EPS and XPS are resistant to short term temperatures of 90 °C and long-term temperatures of 80 °C. Above these temperatures, EPS will soften, until at approximately 150 °C it will begin to shrink and return to its original density as a solid polystyrene. Continued heating will melt EPS to a liquid and then gas form above 200 °C. Such gas can be ignited at temperatures between 360 and 380 °C, and self-ignition occurs at approximately 500 °C [32].

3.1.3 Other organic materials

Other organic cellular insulation materials that are used for LSF panels are PUR and PIR foams. These insulation materials have seen a surge in construction industry [28]. They have superior thermal insulation properties than other organic and inorganic materials, while also preserving advanced acoustic properties. In general, PUR foams, as cellular materials, have a higher insulation R-values compared to commercially available insulation products. Thus, PUR gives thinner walls and roofs of lower height, while increasing space utilization, maximizing efficiency, and reducing operating costs [33]. Its thermal properties at ambient temperatures are given in Table 3. PUR is produced in many variations and densities, which enables achievement of various mechanical, dynamic, thermal, and other features [33]. However, PUR foam lags behind PIR when it comes to reaction to fire and thermal performance at elevated temperatures. Out of all polymer materials, PIR exhibits the best reaction to fire [28]. Similar to EPS and XPS, PUR is considered flammable and prone to ignition but the overall fire resistance of the material can be slightly improved by adding adequate flame retardants. Gunther et al. [34] examined the influence of the flame retardants, and found that PUR with the retardants exhibited an increased fire resistance due to formation of a char layer, which temporally prevented rapid decay. Also, the same authors concluded that although the reaction to fire of such foam is better, PUR foam with and without the retardant ignites and starts to decompose at 250-500 °C. An additional issue of flame-retarded PUR foam is formation of poisonous gases while burning, which has a hazardous effect on the safety and security of the panel [29].

When choosing an insulation layer, it is important to evaluate the reaction to fire, decomposition temperature of the material, and subsequent behaviour at elevated temperatures. As the sheathing boards have an important role in preventing the temperature and fire spread, the selection of insulation should also be made with care.

4 Research on thermal performance of various LSF panel configurations

Thermal performance of LSF panels is often regarded through their properties at elevated temperatures because they must offer adequate fire resistance to prevent property damage and loss of lives during fire accidents. The easiest way of reaching this goal is by using adequate insulation and sheathing materials with proper thermal performance characteristics, as described in previous chapters. Various LSF panel configurations have been subjected to full scale fire tests and the thermal performance is described through the failure time of the system. Some researchers like Gnanachelvam et al. [4] performed fire tests on LSF panels with various wallboards devoid of insulation layer, in order to determine failure time of the sheathing boards only. A failure time is defined based on three main criteria: insulation, integrity or stability. As stated in [35], LSF panels are generally provided with cavity insulation to minimize energy consumption of buildings, because the insulation resists the heat flow to the buildings from the external environment. While the applied insulation provides sufficient thermal comfort and energy efficiency, the best composition of the panel is still debated. The same authors cited that the performance of such panels decreased and they are supported by Steau and Mahendran [36] who concluded that the failure time of the panel decreased by 12 % when cavity insulation was used. On the other hand, Ariyanayagam et al. [37] proved that the failure time increases with the application of cavity insulation when the panel is used as a non-load bearing element. The testing on loadbearing and non-loadbearing panels is not the same and therefore an increase in failure time for non-loadbearing panels is due to different criteria. Table 4 gives a few examples found in literature on the research conducted about different cavity insulated LSF panels and their configuration, the goal being to determine their overall thermal performance. All fire tests were conducted in a furnace following the ISO, using the cellulose fire curve. The failure time given in Table 4 represents the minimum time needed for the panel configuration to fail according to the insulation, integrity, or mechanical resistance criteria.

Table 4. Summary of previous studies on various LSF configurations

Author	Board thickness [mm]	Type of board	Board configuration	Insulation	Application	Failure [min]
Gunalan et al. [38]	16	Gypsum plasterboard	Double layer	Glass fiber	Loadbearing walls	101
				Rock fiber		107
				Cellulose fiber		110
Ariyanayagam et al. [37]	16	Gypsum plasterboard	Single layer	-	Non-load-bearing walls	94
	16	Gypsum plasterboard	Single layer	Glass fiber		106
Steau et al. [36]	19 mm Plywood, 16 mm Gypsum plasterboard	Plywood and gypsum plasterboard	Double layer of plasterboard on the fire side Single layer of plywood	Mineral wool	Celling	120
Le Dréau et al. [39]	18	Gypsum fibreboard	Single layer	Rigid PUR	Not defined	33

As can be seen in Table 4. the configuration with gypsum plasterboards and fibre insulation can easily withstand a fire load for more than 100 minutes. In turn, this configuration could be used for buildings with the fire resistance rating of REI30, REI60, or more. The configuration with a single layer of gypsum plasterboard and flammable PUR foam showed a greatly reduced failure time. This shows that the choice of insulation matters and that it greatly influences the usability of such panels in fire conditions. Therefore, it can be concluded that such configurations can only be used in buildings with lower requirements for fire resistance. Furthermore, the configuration with plywood and gypsum plasterboard also has a formidable failure time but it is important to mention that the plywood was not directly exposed to fire load during testing. As the materials are fairly similar, the same can be concluded for the OSB boards.

5 Conclusion

A brief review presented in the paper describes materials that are frequently used in LSF panels, and their behaviour at ambient and elevated temperatures. Through the review, it can be seen that a wide variety of sheathing wallboards and insulation materials are used in LSF systems, and that the thermal performance of the panel highly depends on the materials applied. As thermal performance is a major factor that influences the quality of living inside a LSF building, the choice of adequate material is of crucial significance. Through the literature review it can be seen that cellular organic insulation materials like PUR and PIR provide the best insulation

properties, i.e., they have the best thermal performance at ambient temperatures and can easily fulfil the nZEB requirements, but are highly flammable. As they show great promise as an adequate thermal insulation material, organic cellular materials and the thermal performance of such panels should be further considered and examined. Research review showed that only one paper addressed the potential combination of rigid PUR foam as a cavity insulation and gypsum fibreboards, but the thermal performance was significantly lower when compared to other systems. On the other hand, given the excellent thermal performance of the insulation material at ambient temperatures, this type of configuration could still be used in low-rise buildings where there is no need for significant resistance to fire.

Acknowledgement

This research was funded by the European Union through the European Regional Development Fund's Competitiveness and Cohesion Operational Program, grant number KK.01.1.1.07.0060, project "Composite lightweight panel with integrated load-bearing structure (KLIK-PANEL)".

References

- [1] Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J. J., Simões da Silva, L.: Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78 (2017), pp. 194–209,
- [2] Santos, P., Martins, C., Simões Da Silva, L.: Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems, *Metallurgical Research & Technology* 111 (2014) 6, pp. 329–338
- [3] Salazar, A.: On thermal diffusivity, *European Journal of Physics* 24 (2003) 4, pp. 351–358
- [4] Gnanachelvam, S., Ariyanayagam, A., Mahendran, M.: Fire resistance of LSF wall systems lined with different wallboards including bio-PCM mat., *Journal of Building Engineering* 32 (2020), p. 101628
- [5] Rokilan, M., Mahendran, M.: Elevated temperature mechanical properties of cold-rolled steel sheets and cold-formed steel sections, *Journal of Constructional Steel Research* 167 (2020), p. 10585
- [6] Steau, E., Mahendran, M., Poologanathan, K.: Experimental study of fire resistant board configurations under standard fire conditions, *Fire Safety Journal* 116 (2020), p. 103153
- [7] Thermal Properties of Metals, Conductivity, Thermal Expansion, Specific Heat, https://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm.

- [8] Dias, Y., Keerthan, P., Mahendran, M.: Fire performance of steel and plasterboard sheathed non-load bearing LSF walls, *Fire Safety Journal* 103 (2019) pp. 1–18, Jan. 2019
- [9] Davies, J. M.: *Lightweight Sandwich Construction*, Hoboken, NJ : Wiley, 2008.
- [10] Kotoulek, P. et al.: Basic thermal properties and geometric characteristics of wood and oriented strand boards used in low-energy buildings, *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 22, (2018) 2, pp. 73–75
- [11] Czajkowski, Ł., Olek, W., Weres, J., Guzenda, R.: Thermal properties of wood-based panels: specific heat determination, *Wood Science and Technology* 50 (2016) 3, pp. 537–545
- [12] Gnanachelvam, S., Mahendran, M., Ariyanayagam, A.: Elevated temperature thermal properties of advanced materials used in LSF systems, *Fire and Materials* (2021), pp. 1-17
- [13] Thomas, G.: Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures, *Fire and Materials* 26 (2002) 1, pp. 37–45
- [14] British Gypsum, <https://www.british-gypsum.com/technical-advice/faqs/114-what-is-the-density-of-gyproc-plasterboards#:~:text=Density will be approximately 600,m3 depending on board type>.
- [15] Fermacell: Izjava o svojstvima, Izjava o svojstvima Gipsvlaknasta ploča (2019)
- [16] Fermacell: Izjava o svojstvima, Izjava o svojstvima Firepanel A1 (2019)
- [17] Rusthi, M., Keerthan, P., Ariyanayagam, A., Mahendran, M.: Numerical studies of gypsum plasterboard and MgO board lined LSF walls exposed to fire, *Second International Conference on Performance-based Life-cycle Structural Engineering*, Brisbane, pp. 1077–1084, 2016.
- [18] De Oliveira, T. B., Alves, T. A., Mesquita, L. M. R.: Thermal Conductivity of Calcium Silicate Boards at Hight Temperatuers: An Experimental Approach, *11th National Congress on Experimental Mechanics*, Porto pp. 171–182, 2018.
- [19] Lunguleasa, A., Dumitrascu, A. E., Ciobanu, V. D.: Comparative studies on two types of OSB boards obtained from mixed resinous and fast-growing hard wood, *Applied Sciences* 10 (2020) 19, 2020
- [20] Tureková, I., Marková, I., Ivanovičová, M., Harangózo, J.: Experimental study of oriented strand board ignition by radiant heat fluxes, *Polymers* 13 (2021) 5, pp. 1–13
- [21] Chen, W., Ye, J., Bai, Y., Zhao, X. L.: Improved fire resistant performance of load bearing cold-formed steel interior and exterior wall systems, *Thin-Walled Structures* 73 (2013), pp. 145–157

- [22] Gnanachelvam, S., Ariyanayagam, A., Mahendran, M.: Fire resistance of light gauge steel framed wall systems lined with PCM-plasterboards, *Fire Safety Journal* 108 (2019) p. 13
- [23] Gypsum Fiber Boards, <https://innovhousing.net/gypsum-fiber-boards/>
- [24] Kesawan, S., Mahendran, M.: Improving the Fire Performance of LSF Wall and Floor Systems Using External Insulation, *Journal of Architectural Engineering* 23(2017) 4, p. 04017022
- [25] Zhou, B., Yoshioka, H., Noguchi, T., Wang, K., Huang, X.: Upward Fire Spread Rate Over Real-Scale EPS ETICS Façades, *Fire Technology* (2021)
- [26] European Committee for Standardization, European standard EN 13501-1 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests (2019)
- [27] Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Asdrubali, F.: Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016) pp. 988–1011
- [28] Duijve, M.: Comparative assessment of insulating materials on technical, environmental and health aspects for application in building renovation to the Passive house level, (2012) p. 139
- [29] Jelle, B. P.: Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities, *Energy Buildings* 43 (2011) 10, pp. 2549–2563
- [30] Karamanos, A., Hadiarakou, S., Papadopoulos, A. M.: The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool, *Energy Buildings* 40 (2008) 8, pp. 1402–1411
- [31] Livkiss, K., Andres, B., Bhargava, A., van Hees, P.: Characterization of stone wool properties for fire safety engineering calculations, *Journal of Fire Sciences* 36 (2018) 3, pp. 202–223
- [32] Zhou L., Chen, A., Gao, L., Pei, Z.: Effectiveness of vertical barriers in preventing lateral flame spread over exposed EPS insulation wall, *Fire Safety Journal* 91 (2017), pp. 155–164
- [33] Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mohotti, D., Mutalib A. A., Badri, K. H.: The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review, *Construction And Building Materials* 190 (2018), pp. 995–1014
- [34] Günther, M., Lorenzetti, A., Schartel, B.: From Cells to Residues: Flame-Retarded Rigid Polyurethane Foams, *Combustion Science and Technology* 192 (2020) 12, pp. 2209–2237

- [35] Kesawan, S., Mahendran, M.: Improving the Fire Performance of LSF Wall and Floor Systems Using External Insulation, *Journal of Architectural Engineering* 23 (2017) 4, p. 04017022
- [36] Steau, E., Mahendran, M.: Fire resistance behaviour of LSF floor-ceiling configurations, *Thin-Walled Structures* 156 (2020), p. 106860
- [37] Ariyanayagam, A. D., Mahendran, M.: Influence of cavity insulation on the fire resistance of light gauge steel framed walls, *Construction and Building Materials* 203 (2019), pp. 687–710
- [38] Gunalan, S., Mahendran, M.: Fire performance of cold-formed steel wall panels and prediction of their fire resistance rating, *Fire Safety Journal* 64 (2014), pp. 61–80
- [39] Le Dréau, J., Jensen, R. L., Kolding, K.: Thermal behaviour of a gypsum fibre board associated with rigid polyurethane foam under standard fire conditions, *Energy Procedia* 78 (2015), pp. 2736–2741

Mogućnosti upotrebe otpadnih vlakana u cementnim kompozitima visokih uporabnih svojstava

Katarina Didulica¹, doc.dr.sc. Ana Baričević²

¹ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, katarina.didulica@grad.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, ana.baricevic@grad.unizg.hr

Sažetak

Upotreba vlakana u cementnim kompozitima utječe na unapređenje njihovih svojstava i produženi uporabni vijek. Ono je vidljivo u smanjenom skupljanju u ranoj starosti, povećanoj vlačnoj i čvrstoći na savijanje te žilavosti. U radu je dan pregled stanja područja primjene različitih vrsta vlakana u cementnim kompozitima, s posebnim naglaskom na reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma te ugljična, bazaltna i staklena vlakna. Upotreba i ponašanje odabranih otpadnih vlakana, dobivenih najvećim dijelom kao ostatak pri proizvodnji visokovrijednih tkanina i mrežica za građevinarstvo, nisu u potpunosti istraženi te je cilj istraživačke grupe ReWire istražiti i objasniti njihov doprinos svojstvima cementnih kompozita.

Ključne riječi: otpadna vlakna, staklena vlakna, ugljična vlakna, bazaltna vlakna, polimerna vlakna iz otpadnih guma

Possibilities of using waste fibers in high- performance cementitious composites

Abstract

The use of fibers in cementitious composites leads to an improvement in the properties and an extension in the service life of high- performance cementitious composites. This is evident in the reduction of early shrinkage and increase in tensile and flexural strength, as well as toughness. This paper briefly reviews the state of the art regarding the application of different types of fibers in cementitious composites, with particular emphasis on recycled tire polymer, carbon, basalt, and glass fibers. Considering that the use of the selected waste fibers, mainly generated as waste in the production of high- quality construction textiles, has not been fully explored, the aim of the ReWire research group is to explore and explain a full understanding of their contribution to the properties of cementitious composites.

Key words: waste fibers, glass fiber, carbon fiber, basalt fiber, recycled tire polymer fiber

1 Uvod

Beton je najčešće korišteni građevni materijal u svijetu te čini veći dio izgrađenog okoliša. Međutim, krtoš i mala vlačna čvrstoća te posljedično pojava pukotina koja uzrokuje degradaciju betona i gubitak svojstava smatraju se glavnim nedostatkom [1]. To je moguće umanjiti primjenom kratkih vlakana; ona zbog svojih karakteristika pospješuju ponašanje cementne matrice te imaju mogućnost premošćivanja pukotina i odgađanja sloma, odnosno pridonose duktilnijem ponašanju cementnih materijala [2].

Na tržištu su dostupne razne vrste vlakana te je njihova upotreba u cementnim kompozitima istražena i poznata [3–5]. Upotrebom polimernih vlakana se ostvaruje smanjeno skupljanje, odnosno smanjuje se broj pukotina te njihova širina [6, 7], a primjenom ugljičnih vlakana doprinose unapređenju vlačne čvrstoće i žilavosti [8–10]; staklena i bazaltna vlakna doprinose se smanjenju skupljanja i poboljšanju mehaničkih svojstava, ali je njihova upotreba ograničena uslijed propadanja pri izloženosti alkalnoj okolini cementnog kompozita [11–13]. Iako su utjecaji pozitivni u pogledu svojstava, upotreba je ograničena zbog visoke cijene industrijski proizvedenih vlakana čime se povećava ukupna cijena kompozita. Umjesto industrijski proizvedenih vlakana, moguće je korištenje otpadnih vlakana lokalnih industrija koja bi u protivnom morala biti odložena na odlagalištu ili spaljena kao dio energetskog procesa [14]. Na taj način razvijaju se učinkoviti i ekološki prihvatljiviji cementni materijali, a u isto vrijeme se smanjuju količine otpada.

Otpadna vlakna mogu biti dio polimernih kompozita, onečišćena ili čista vlakna dobivena kao ostatak pri proizvodnji [15–17]. Otpadna vlakna koja su dio kompozita najprije treba toplinski obraditi i očistiti. Iako se nakon toplinske obrade vlaknima umanjuju svojstva, njihova upotreba je još uvijek moguća. Onečišćena vlakna se sastoje od vlakana te drugih čestica i nečistoća, a čista otpadna vlakna neobrađeni su ostatak u proizvodnji koji nema daljnju upotrebu. Velik potencijal se pronalazi u čistim otpadnim vlaknima jer zahtijevaju manju potrošnju energije za pripremu i obradu, a imaju svojstva slična ili jednaka u odnosu na industrijski proizvedena.

U sklopu projekta “Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima” – ReWire, analizirat će se reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma (RTPF) te ugljična (C), staklena (G) i bazaltna (B) vlakna dobivena kao ostatak prilikom proizvodnje visokovrijednih tkanina i mrežica za građevinarstvo. Cilj projekta ReWire je karakterizacija lokalno dostupnih otpadnih vlakana, razvoj tehnologija obrade i integracije koje će otvoriti potencijal otpadnih vlakana te ih pretvoriti u vrijedan resurs u građevinskoj industriji za razvoj mikroarmiranih cementnih materijala. U ovom radu dan je kratak pregled osnovnih svojstava odabranih otpadnih vlakana te dosadašnje spoznaje o primjeni u cementnim kompozitima.

2 Izvor otpadnih vlakana

Tekstil je opći naziv za vlakna i sve proizvode načinjene od njih bilo kojom prerađivačkom tehnologijom, odnosno pređenjem, tkanjem, pletenjem, čipkanjem, pustenjem, iglanjem i drugim suvremenim tehnikama [18]. Ono uključuje sve tekstilne tvorevine i proizvode koji se iz njih izvode. Tekstili i mrežice se često koriste u građevinarstvu, a mogu imati različita svojstva ovisno o načinu tkanja te orijentaciji i vrsti vlakna. Način tkanja može biti isprepletanjem pod pravim kutom, pletenje u petlju, pletenje dva ili više vlakana ne pod pravim kutom ili netkani tekstil spojen kemijski, mehanički ili toplinsko. Koriste se za ojačanje, sanaciju, izolaciju, kao dio fasada, ploča i strukturnih elemenata, za predgotovljene elemente ili u umjetničkim djelima (skulpturama i sl.). Prilikom tkanja stroj ima ograničenje radne širine te se zbog sklonosti raspletanju na rubovima mrežica reže. Odrezani rub širine 5 – 6 cm se odvaja te s obzirom na to da nema daljnju upotrebu sortira prema vrsti vlakna i skladišti kao otpad. Tako nastali otpad (slika 1) je čist i u većini slučajeva povezan staklenom ili viskoznom niti.

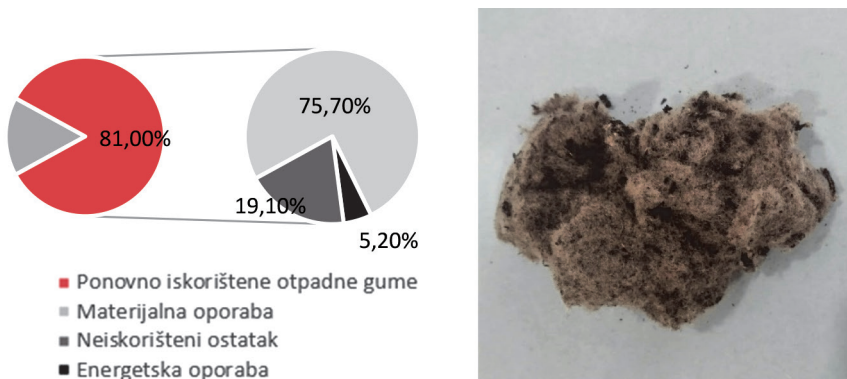
Prema anketama provedenim u sklopu projekta ReWire među proizvođačima mrežica za građevinarstvo, dobiven je podatak da se samo na području Hrvatske generira približno 327 tona otpadnih vlakana godišnje, odnosno 10 % korištene vrijednosti [19]. Otpad se skladišti u spremnicima i odlaže na odlagalištu. Sve to predstavlja trošak za proizvođača, a istovremeno nije u skladu s Direktivom o otpadu [20].



Slika 1. Otpadna vlakna dobivena u proizvodnji mrežica za građevinarstvo; s lijeva na desno: staklena, ugljična, bazaltna vlakna

Tekstil svoju primjenu pronalazi i za ojačanje automobilskih i drugih vrsta guma. Nakon isteka uporabnog vijeka gume, provodi se njeno recikliranje. Ono se uglavnom odvija mehaničkim putem, trganjem na manje komade i usitnjavanjem do željene veličine. Posljednji podaci iz 2019. godine pokazuju da je u Europi 95 % prikupljenih otpadnih guma ponovno iskorišteno na tržištu sekundarnih materijala, a ta vrijednost za Hrvatsku je 81 % (slika 2, lijevo) [21]. Rezultati anketa provedenih u sklopu

projekta ReWire pokazuju da se recikliranjem otpadne gume dobije približno 10 % polimernih vlakana, 10 – 15 % čeličnih vlakana te 75 – 80 % gume [19]. Ako uzme-
mo u obzir da se u Europi svake godine prikupi više od 3,5 milijuna tona guma [21],
jasno je da upotreba sekundarnih materijala iz otpadnih guma predstavlja značajan
izvor za korištenje u građevinskoj industriji. Samo na razini Hrvatske godišnje nast-
je 220 - 250 tona recikliranih polimernih vlakana iz otpadnih guma (RTPF) (slika 2,
desno) [19]. Dosadašnja istraživanja primjene RTPF-a u cementnim kompozitima
upućuju na njihov pozitivan doprinos pri ranom skupljanju bez velikih utjecaja na
mehanička svojstva [22–24].



Slika 2. Odnos vrsta ponovnog iskorištavanja otpadnih guma u Hrvatskoj (lijevo); onečišćena polimer-
na vlakna dobivena recikliranjem otpadnih guma (desno)

3 Osnovna svojstva vlakana za upotrebu u cementnim kompozitima

Poznavanje svojstava vlakana bitno je za određivanje njihove daljnje uporabe. Po-
trebno je da vlakna zadovolje osnovna svojstva za preradu i dodatna svojstva za
određenu namjenu. Za definiranje vlakana potrebno je znati njihovu duljinu, pro-
mjer, finoću, čvrstoću, savitljivost te kod upotrebe u cementnim kompozitima i mor-
fološke karakteristike, sposobnost upijanje vlage i vode, ponašanje pri zagrijavanju
te otpornost na kiseline i alkalije.

Duljina vlakna se odnosi na razmak između krajeva ispravljenog, ali ne istegnutog
vlakna; razlikujemo vlasasto- kratko i filamentno- dugo vlakno. Kako je vidljivo u
tablici 1 i tablici 2, koriste se vlakna širokog raspona duljine. Makrovlakna (> 30
mm) imat će veći utjecaj na čvrstoću i žilavost materijala, a kraća, mikrovlakna (≤ 30
mm) imat će veći utjecaj na ponašanje pri skupljanju [4, 9, 25–28]. Promjer mono-
filamenta kod kružnog presjeka vlakna se izražava u mikrometrima, a u slučajevima
nepravilnog presjeka potrebno je odrediti njegovu ekvivalentnu vrijednost (promjer

kruga s površinom jednakom srednjoj poprečnoj površini presjeka). Promjer je moguće opisati i finoćom vlakna, odnosno odrediti mu duljinsku masu. Ona predstavlja masu u jediničnoj duljini vlakna i izražava se pomoću mjerne jedinice tex ($1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$) [18].

Čvrstoća vlakana izražava se kao omjer prekidne sile i površine vlakna te se izražava u centinjutnima cN ili duljinske mase u cN/tex . Vlakna se odlikuju iznimno visokom vlačnom čvrstoćom, tablice 1 i 2, u odnosu na cementnu matricu ($f_{\text{CM}} = 2,0 - 4,0 \text{ MPa}$) te imaju sposobnost preuzimanja vlačnih opterećenja na sebe. Zbog toga dolazi do povećanja vlačne i čvrstoće na savijanje kompozita [2–4]. Nisu primjetni veći utjecaji na iznos tlačne čvrstoće, ali primjetan je utjecaj na mehanizam sloma, odnosno duktilnije ponašanje kompozita [2–4]. Duljina koju vlakno postigne prije pucanja pri vlačnom opterećenju u odnosu na početnu duljinu nazivamo prekidno istezanje. Prema vrijednostima prikazanim u tablicama 1 i 2, čvrstoća i prekidno istezanje mogu varirati i unutar iste vrste vlakana, ovisno o proizvodnji i namjeni. Najveću vrijednost vlačne čvrstoće imaju ugljična vlakna na bazi smole, a najmanje su vrijednosti zabilježene za polimerna mikrovlakna. Isti trend vrijedi i za vrijednosti modula elastičnosti. Bazaltna i staklena vlakna imaju usporedive karakteristike, ali mehanička svojstva kompozita su bolja u slučaju bazaltnih vlakana [11, 25].

Izgled površine vlakana i poprečni presjek uvelike utječu na vezu vlakna i matrice koja definira ponašanje kompozita. Povoljni način sloma se događa izvlačenjem vlakana te je mehanička veza između vlakna i cementne matrice vrlo važna kod predviđanja ponašanja. Mikrostruktura sučeljka između mikrovlakana i cementne matrice je gusta i ne može se primijetiti jasna razlika zone te se razlikuje od zone između većeg dodatka, npr. agregata ili makrovlakana i cementne matrice. Razlog tomu je isti red veličine promjera vlakna i cementa što minimizira nepovoljne utjecaje [29]. Iako je promjer vlakna istog reda veličine kao i promjer cementa, njegova duljina je puno veća te iz 3D perspektive dolazi do pogoršanja određenih svojstava.

Tablica 1. Osnovna svojstva proizvedenih vlakana ovisno o vrsti vlakna [3, 4, 25, 27, 28, 30–36, 5, 6, 8–13]

Vrsta vlakna	Vlačna čvrstoća [GPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Duljina [mm]	Promjer (eq) [μm]	Gustoća [g/cm^3]	Prekidno istezanje [%]
Ugljična vlakna	1,0 – 7,0	150 – 820	3 – 10	5 – 10	1,6 – 1,8	0,5 – 3,2
na bazi PAN	1,4 – 3,5	140 – 820	10	9 – 18	1,8 – 2,2	0,5–1,1
na bazi smole	1,8 – 7,0	230 – 540	3	7 – 9	1,6 – 1,7	0,5 – 1,5
Bazaltna vlakna	0,9 – 4,8	40 – 115	6 – 30	6 – 20	1,9 – 2,8	2,4 – 3,2
E – staklo	1,4 – 3,8	72 – 76	–	6 – 21	2,5 – 2,6	1,8 – 4,8
Ar – staklo	1,0 – 3,5	72 – 80	6	14 – 20	2,5 – 2,8	2,0 – 4,0
S – staklo	4,2 – 4,6	83 – 97	–	6 – 21	2,5	5,3
Polimerna (mikro) vlakna	0,3 – 0,7	3 – 40	6 – 12	10 – 60	0,9 – 1,4	3,0 – 60,0

Iz tablice 2 je vidljivo da reciklirana vlakna imaju nešto lošija svojstva u odnosu na proizvedena vlakna prikazana u tablici 1. Prikazana reciklirana ugljična i staklena vlakna su dobivena iz mrežica i sustava polimera ojačanog vlaknima te traka, panela, i sl., a reciklirana polimerna vlakna dobivena su iz otpadnih guma. Pregledom literature nisu pronađeni izvori korištenih recikliranih bazaltnih vlakana. Najveće vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti imaju reciklirana ugljična vlakna, a najniže vrijednosti dobivene su na recikliranim polimernim vlaknima. Iako su vrijednosti niže u odnosu na proizvedena vlakna, svojstva recikliranih vlakana su još uvijek povoljna u odnosu na cementnu matricu. Upotrebom recikliranih vlakana u cementnim kompozitima očekivano je manje poboljšanje čvrstoća te poboljšanje ponašanja uslijed skupljanja [22–24, 30, 37–41]. Iz dosadašnjih ispitivanja vidimo da postoji velik potencijal otpadnih vlakana bilo da se radi o obrađenim ili neobrađenim vlaknima.

Tablica 2. Osnovna svojstva recikliranih vlakana ovisno o vrsti vlakna, [15, 16, 22–24, 26, 30, 37–39, 40, 41]

Vrsta vlakana	Vlačna čvrstoća [GPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Duljina [mm]	Promjer (eq) [μm]	Gustoća [g/cm^3]	Prekidno istezanje [%]
Reciklirana ugljična vlakna	3,15 – 4,95	200 – 252	6 – 40	7 – 11	1,55 – 2,00	1,5
Reciklirana bazaltna vlakna	–	–	–	–	–	–
Reciklirana staklena vlakna	1,75	71,5	10	12	2,69	–
Reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma	0,10 – 0,48	2,1–3,5	8,5 – 19	8 – 38	0,92 – 1,16	–

4 Ponašanje cementnih kompozita ojačanih vlaknima

Kako je prethodno objašnjeno, moguće je korištenje raznih vrsta i geometrijskih karakteristika vlakana. Svaka od njih različito utječu na ponašanje cementnih kompozita u svježem i očvrnulom stanju. Neka od svojstava prikazana su u tablici 3 na način da strelica prema dolje označava smanjenje, odnosno pad vrijednosti navedenog svojstva, strelica prema gore označava povećanje, odnosno rast vrijednosti te horizontalna strelica koja označava da vlakno nema utjecaja na svojstvo. Potrebno je naglasiti da za određena svojstva smanjenje može značiti pogoršanje, ali za neka ono znači poboljšanje ponašanja.

Tablica 3. Ponašanje cementnih kompozita ovisno o vrsti dodanog vlakna, [3-6, 8-13, 25, 27, 28, 30-36]

SVOJSTVO	CF			BF			GF			PF		
Plastično skupljanje	↓			↓			↓			↓		
Skupljanje uslijed sušenja	↓			↓			↓			↓		
Širina pukotina (GSU)	↓			↓			↓			↓		
Postpukotinsko ponašanje (GSN)		↑			↑			↑				↔
Vlačna čvrstoća savijanjem		↑			↑			↑				↔
Tlačna čvrstoća		↑			↑	↔	↓		↔	↓		↔
Eksplozivno odlamanje	↓			↓					↔	↓		
Optimalna količina [%V]	0,1 – 1,0			0,1 – 0,4			0,1 – 1,0			0,1 – 3,0		

U odnosu na mješavinu bez vlakana, dodatak vlakana rezultirat će smanjenjem vrijednosti konzistencije svježe mješavine slijeganjem. Gubitak konzistencije je veći što je veći koeficijent oblika vlakna (omjer duljine i (ekivalentnog) promjera vlakna) i povećanjem količine vlakana [8, 26, 29, 31, 42]. Smanjenje konzistencije slijeganjem mikroarmiranog kompozita ne znači nužno lošiju, manje obradivu mješavinu već se preporuča ispitivanje obradivosti Vebe postupkom ili obrnutim *slump* testom [31]. Utjecaj vlakana na svježja svojstva objašnjava se sposobnošću vlakana da upijaju vodu i/ili uključivanjem sastojaka igličastog oblika velike specifične površine u sastav [29, 31, 42]. Upijanje vode većemo uglavnom za prirodna vlakna, a umjetna vlakna od anorganskih tvari (ugljična, staklena, bazaltna i dr.) i vlakna od sintetskih polimera upijaju vrlo malo ili nimalo. Unatoč promjenama u reološkom ponašanju, prema radu Panzera i suradnika [42], ne očekuju se veće promjene prilikom procesa hidratacije cementnih kompozita s vlaknima koja ne upijaju vodu. Međutim, kod dodatka prirodnih vlakana moguće je upijanje vode te njeno naknadno otpuštanje, odnosno unutarinja njega. Vrsta anorganskih i polimernih vlakana nema veliku ulogu u pogoršanju svojstava u svježem stanju, već je veći utjecaj geometrijskih karakteristika. Koeficijent oblika manji od 60 najbolji je u pogledu manipulacije i miješanja, ali koeficijent oblika oko 100 je poželjan s gledišta čvrstoće, a koeficijent oblika od 50 do 70 najbolji je za unaprijed pripremljene mješavine [42]. Svojstva svježe mješavine je moguće korigirati projektiranjem sastava te dodatkom kemijskih i mineralnih dodataka pa je moguće zadovoljiti i zahtjeve samozbijajućeg betona ojačanog vlaknima [36, 43].

Tijekom procesa hidratacije dolazi do smanjenja volumena kompozita i stvaranja mikropukotina. Mikropukotine predstavljaju kritično mjesto koje napredovanjem prerasta u makropukotinu koja naposljetku dovodi do loma. Navedeno je moguće kontrolirati mikrovlaknima visoke vlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Prema dostupnoj literaturi, kod ugljičnih [10], bazaltnih [11, 25, 27, 28], staklenih [11, 25] i polimernih [4] vlakana primjetno je smanjenje skupljanja u odnosu na referentnu

mješavinu bez vlakana. Osim industrijski proizvedenih vlakana, za postizanje smanjenog skupljanja mogu se koristiti i reciklirana vlakna iz otpadnih guma [22–24] te reciklirana ugljična vlakna [30, 44].

Iako dodatak mikrovlakana doprinosi poboljšanju mehanizma sloma, nema veći utjecaj na vrijednost tlačne čvrstoće [2, 8, 10, 11], ali dodatkom makrovlakana postiže se povećanje tlačne čvrstoće i žilavosti [25, 27, 45]. Povećanjem količine i dimenzija vlakana vlačna i čvrstoća na savijanje se poboljšavaju, ali do određene granice. Nakon toga nema daljnjeg napretka svojstava ili, štoviše, dolazi do pogoršanja [6, 11, 27, 28]. Prevelika količina vlakana otežava miješanje, uvlači prevelike količine zraka i pospješuje nakupljanje vlakana. Kod ugljičnih vlakana optimalna mehanička svojstva se postižu dodatkom 0,25 – 0,75 % vlakana [8, 10], dok su količine za bazaltna i staklena vlakna 0,5 – 1,0 % [11]. Isti trend rasta vrijedi i kod ispitivanja žilavosti i apsorpcije energije [2, 4, 8, 10, 11].

Iz tablice 3 je vidljivo da dodatak ugljičnih, bazaltnih i polimernih vlakana ima pozitivan utjecaj i pri eksplozivnom odlamanju tijekom požara. Tijekom izloženosti visokim temperaturama u betonu dolazi do ograničenog toplinskog skupljanja te isparavanja prisutne vode i stvaranja pritisaka koji narušavaju stabilnost i otpornost. Kod upotrebe polimernih vlakana dolazi do otapanja vlakana i stvaranja kanala kojima se omogućuje distribucija pritiska [33, 34], a upotrebom bazaltnih vlakana utječe se na osiguranje čvrstoće elementa zbog otpornosti vlakana na visoku temperaturu [35]. Izlaganjem ugljičnih, staklenih (S- staklo) i bazaltnih vlakana temperaturi do 200°C ponašanje vlakana je približno jednako, odnosno dolazi do minimalnog gubitka čvrstoće. Porastom temperature izlaganja na 600°C bazaltna vlakna zadržavaju i do 90 % vrijednosti čvrstoće, dok je kod ugljičnih i staklenih vlakana ostvaren pad vrijednosti za približno 40 % [32].

5 Zaključak

Upotreba vlakana u cementnim kompozitima omogućuje unapređenje mehaničkih i svojstava trajnosti. Ovisno o zahtjevima upotrebe moguće je korištenje vlakana različitog materijala, dimenzija i svojstava. Unatoč poboljšanju svojstava i posljedično duljem uporabnom vijeku kompozita te smanjenom potrebom za održavanjem i sanacijom, upotreba vlakana nije česta u svakodnevnoj primjeni zbog visoke cijene industrijski proizvedenih vlakana. Kako bi se otklonio utjecaj cijene na korištenje vlakana u cementnim kompozitima, potiče se korištenje otpadnih vlakana. Na taj način se osim poboljšanja svojstava kompozita smanjuju količine otpada na odlagalištima te umanjuje potrošnja prirodnih resursa potrebna za proizvodnju novih vlakana.

Dosadašnja ispitivanja provedena na recikliranim vlaknima dobivenim radom industrije, ugljična i staklena vlakna, te recikliranim polimernim vlaknima iz otpadnih

guma upućuju na mogućnosti njihove primjene u cementnim kompozitima. Mogućnosti uključuju poboljšanje svojstava kompozita prilikom skupljanja i svojstava trajnosti, ali bez nepovoljnih utjecaja na mehanička svojstva u odnosu na kompozite bez vlakana. Cilj projekta ReWire je nastaviti istraživanja primjene otpadnih vlakana u cementnim kompozitima i dokazati mogućnost njihove primjene bez nepovoljnih utjecaja na ponašanje kompozita.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u sklopu projekta “Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima” – ReWire (UIP-2020-02-5242) koji se provodi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, financiranom od strane Hrvatske zaklade za znanost.

Literatura

- [1] Bjegović, D., Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [2] Micelli, F., Renni, A., Kandalajt, A. G., Moro, S.: Fiber-reinforced concrete and ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete materials, *New Materials in Civil Engineering*, Elsevier, pp. 273–314, 2020.
- [3] Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M., Fischer, G.: Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, *Construction and Building Materials*, vol. 230. Elsevier Ltd, 10-Jan-2020.
- [4] Brandt, A. M.: Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 1–3, pp. 3–9, Nov. 2008.
- [5] Hussain, I., Ali, B., Akhtar, T., Jameel, M. S., Raza, S. S.: Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene), *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, Dec. 2020.
- [6] Wongtanakitcharoen, T., Naaman, A. E.: Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers, *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, no. 3, pp. 289–300, 2007.
- [7] Ullah, F.: *Early Age Autogenous Shrinkage and Long-term Drying Shrinkage of Fibre Reinforced Concrete*, Aalto University, 2017.
- [8] Safiuddin, M., Yakhlaif, M., Soudki, K. A.: Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 477–488, Mar. 2018.

- [9] Shu, X., Graham, R. K., Huang, B., Burdette, E. G.: Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar, *Mater. Des.*, vol. 65, pp. 1222–1228, Jan. 2015.
- [10] Kizilkanat, A. B.: Experimental evaluation of mechanical properties and fracture behavior of carbon fiber reinforced high strength concrete, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 60, no. 2, pp. 289–296, 2016.
- [11] Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., Akça, A. H.: Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study, *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, pp. 218–224, Dec. 2015.
- [12] Wang, Q., Ding, Y., Randl, N.: Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments, *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, 2021.
- [13] Scheffler, C., Förster, T., Mäder, E., Heinrich, G., Hempel, S., Mechtcherine, V.: Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function, *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 355, no. 52–54, pp. 2588–2595, 2009.
- [14] Bartl, A. Hackl, A., Mihalyi, B., Wistuba, M., Marini, I.: Recycling of fibre materials, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 83, no. 4 B, pp. 351–358, 2005.
- [15] Abdou, T. R., Botelho Junior, A. B., Espinosa, D. C. R., Tenório, J. A. S.: Recycling of polymeric composites from industrial waste by pyrolysis: Deep evaluation for carbon fibers reuse, *Waste Manag.*, vol. 120, pp. 1–9, Feb. 2021.
- [16] Nguyen, H., Carvelli, V., Fujii, T., Okubo, K.: Cement mortar reinforced with reclaimed carbon fibres, CFRP waste or prepreg carbon waste, *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 321–331, Nov. 2016.
- [17] Haramina, T., Jelavić, T., Šolić, T., Katalinić, M., Pilipović, A. Analiza mogućnosti recikliranja diskontinuiranih E-staklenih vlakana, *Polim.*, vol. 32, no. 2, pp. 52–61, 2011.
- [18] Čunko, R., Andrassy, M.: *Vlakna*, Zagreb, Zrinski, 2005.
- [19] Didulica, K., Baričević, A., Carević, I., Jelčić Rukavina, M., Frančić Smrkić, M.: D2.2. Izvješće o dostupnim količinama otpadnih vlakana u regiji, Zagreb, 2021.
- [20] Direktiva o otpadu, Direktiva 2008/98/EZ,
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>.
- [21] ETRMA - European Tyre & Rubber Manufacturers association, <https://www.etrma.org/>.
- [22] Baričević, A., Jelčić Rukavina, M., Pezer, M., Štirmer, N.: Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 91, pp. 29–41, Aug. 2018

- [23] Baricevic, A., Pezer, M., Jelcic Rukavina, M., Serdar, M., Stirmer, N.: Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 135–144, Jul. 2018.
- [24] Serdar, M., Baričević, A., Jelčić Rukavina, M., Pezer, M., Bjegović, D., Štirmer, N.: Shrinkage Behaviour of Fibre Reinforced Concrete with Recycled Tyre Polymer Fibres, *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, 2015.
- [25] Ahmad W., Khan, M.: Effect of Short Fiber Reinforcements on Fracture Performance of Cement-Based Materials : A Systematic Review Approach, pp. 1–44, 2021.
- [26] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A.: The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages, *Compos. Part B Eng.*, vol. 112, pp. 74–92, Mar. 2019.
- [27] Ruijie, M. A., Yang, J., Liu, Y., Zheng, X.: Influence of length-to-diameter ratio on shrinkage of basalt fiber concrete, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 242, no. 1, 2017.
- [28] Wang, X., He, J., Mosallam, A. S., Li, C., Xin, H.: The Effects of Fiber Length and Volume on Material Properties and Crack Resistance of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC), *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2019, 2019.
- [29] He, S., Li, Z., Yang, E. H.: Quantitative characterization of anisotropic properties of the interfacial transition zone (ITZ) between microfiber and cement paste, *Cem. Concr. Res.*, vol. 122, no. May, pp. 136–146, 2019.
- [30] Belli, A., Mobili, A., Bellezze, T., Tittarelli, F.: Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 109, May 2020.
- [31] Daniel, J. I., Ahmad, S. H., Arockiasamy, M., Ball, H. P.: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete reported by ACI Committee 544, *Acı.544.1R-96*, vol. 96, no. Reapproved, 2002.
- [32] Sim, J., Park, C., Moon, D. Y.: Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, *Compos. Part B Eng.*, vol. 36, no. 6–7, pp. 504–512, 2005.
- [33] Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., Zhang, Z.: Durability of ultra-high performance concrete – A review, *Constr. Build. Mater.*, vol. 255, p. 119296, 2020
- [34] Wu, H., Lin, X., Zhou, A.: A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, vol. 135. Elsevier Ltd, 01-Sep-2020
- [35] Yonggui, W., Shuaipeng, L., Hughes, P., Yuhui, F.: Mechanical properties and microstructure of basalt fibre and nano-silica reinforced recycled concrete after exposure to elevated temperatures, *Constr. Build. Mater.*, vol. 247, Jun. 2020.

- [36] Algin, Z., Ozen, M.: The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 678–685, 2018.
- [37] Mastali, M., Dalvand, A.: The impact resistance and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with recycled CFRP pieces, *Compos. Part B Eng.*, vol. 92, pp. 360–376, May 2016
- [38] Faneca, G., Segura, I., Torrents, J. M., Aguado, A.: Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 92, pp. 135–144, Sep. 2018.
- [39] Aflaki Samani, M., Jabbari Lak, S.: Experimental investigation on the mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced by waste carbon fibers, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 8, pp. 4519–4530, Aug. 2019.
- [40] Mastali, M., Abdollahnejad, Z., Dalvand, A., Sattarifard, A., Illikainen, M.: Comparative effects of using recycled CFRP and GFRP fibers on fresh- and hardened-state properties of self-compacting concretes: a review, *New Materials in Civil Engineering*, Elsevier, 2020, pp. 643–655.
- [41] Yildizel, S. A., Timur, O., Ozturk, A. U.: Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Waste-Glass-Fiber-Reinforced Roller-compacted Concrete, *Mech. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 2, pp. 251–256, May 2018.
- [42] Panzera, T. H., Christoforo, A. L., Ribeiro Borges, P. H.: High performance fibre-reinforced concrete (FRC) for civil engineering applications, *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 552–581
- [43] Ferrara, L., Park, Y. D., Shah, S. P.: A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 6, pp. 957–971, Jun. 2007.
- [44] Akbar, A., Liew, K. M.: Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials, *J. Clean. Prod.*, vol. 274, Nov. 2020.
- [45] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. R.: The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers, *J. Clean. Prod.*, vol. 124, pp. 312–324, 2016.

Izloženost tipskih zgrada u Zagrebu izgrađenih u drugoj polovini 20. stoljeća

Tea Žagar¹, izv.prof.dr.sc. Mario Uroš², izv.prof.dr.sc. Josip Atalić³

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, tea.zagar@grad.unizg.hr

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

³ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, josip.atalic@grad.unizg.hr

Sažetak

Rizik od potresa ne ovisi samo o seizmičkom hazardu, nego i o dva faktora na koje je moguće utjecati s ciljem ublažavanja posljedica potresa – izloženosti i fizičkoj oštetljivosti. U sklopu projekta 2BESAFE, za kritičnu stambenu infrastrukturu izabrane su tipične zgrade u Zagrebu izgrađene u drugoj polovini 20. stoljeća kada su se sustavno gradile iste ili vrlo slične zgrade. Zgrade su grupirane u pet tipova zgrada kojima su grubo procijenjene razina oštetljivosti, analizom osnovnih atributa, te razina izloženosti, određivanjem njihovog broja i pripadne bruto razvijene površine. Zaključeno je da odabrani tipovi zgrada značajno pridonose riziku od potresa što opravdava njihovu daljnju analizu.

Ključne riječi: potres, rizik od potresa, seizmički hazard, izloženost, fizička oštetljivost, identifikacija, karakteristični tipovi, tipska gradnja

Exposure of standardised buildings in Zagreb built in the second half of the 20th century

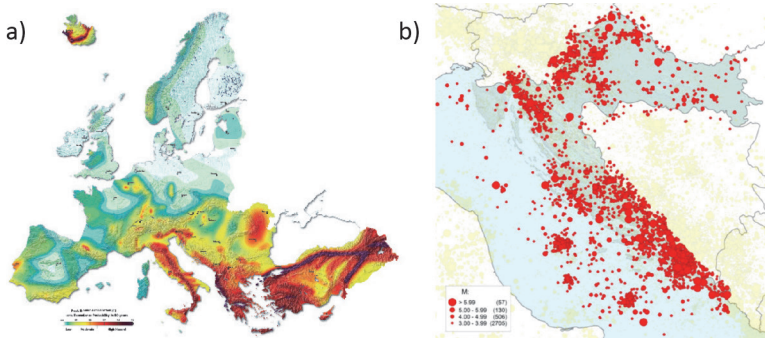
Abstract

The risk of earthquakes depends not only on seismic hazard, but also on two factors that can be influenced with the aim of reducing the effects of earthquakes – exposure and fragility. As part of project 2BESAFE, for the critical residential infrastructure for observation were chosen the standardised residential buildings in Zagreb, built in the second half of the 20th century, the period during which the very similar or identical buildings were being systematically build. The buildings are grouped into five types of buildings that roughly assess the fragility, analysing basic attributes, and level of exposure, determining their number and the corresponding gross floor area. In conclusion, selected types of buildings significantly contribute to the seismic risk, which approves their further analysis.

Key words: earthquake, seismic risk, seismic hazard, exposure, fragility, identification, characteristic types, construction standardisation

1 Uvod

Potres je prirodna katastrofa koju s određenom vjerojatnošću možemo očekivati diljem Zemlje u bilo kojem trenutku, ali ju je gotovo nemoguće predvidjeti i nemoguće spriječiti. Najčešće se očituje kao podrhtavanje tla zbog iznenadnog oslobađanja nakupljene elastične potencijalne energije unutar nekog ograničenog područja u Zemljinoj unutrašnjosti (kori) u obliku seizmičkih valova i topline. [1]. Uzroci oslobađanja energije mogu biti različiti, ali s obzirom na važnosti u pogledu utjecaja na ljudsku okolinu, posebice graditeljsku baštinu, u kontekstu potresnog inženjerstva se u pravilu razmatraju potresi povezani s teorijom tektonskih ploča, odnosno potresi koji nastaju zbog tektonskih promjena [2]. Područje Hrvatske nalazi se na dijelu Sredozemlja koje je seizmički i tektonski aktivno zbog konvergentnog kretanja Afričke prema Euroazijskoj ploči [3]. Središnji i istočni Mediteran seizmotektonski je najaktivnije područje u Europi, a s obzirom na to da Republika Hrvatska pripada mediteransko-transazijskom pojasu visoke potresne aktivnosti, prema Europskoj karti seizmičkog hazarda (slika 1.a) jedna je od potresno najugroženijih država u Europi [5]. Potresima je najviše izloženo priobalno područje, posebice južna Dalmacija, te sjeverozapadna Hrvatska [6]. Važno je istaknuti da su u Hrvatskoj područja najjače potresne aktivnosti ujedno i područja najveće naseljenosti, a time i od posebne gospodarske i društvene važnosti (primjerice područje Zagreba, Splita, Rijeke i Dubrovnika).

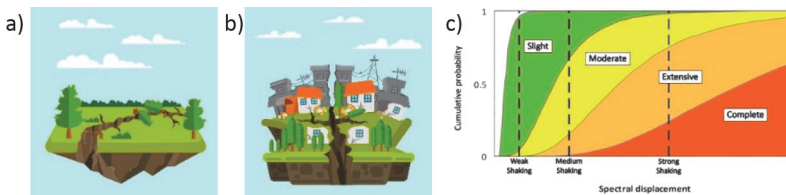


Slika 1. a) Karta seizmičkog hazarda u Europi [4]; b) Epicentri potresa u Hrvatskoj od 373. g. pr. Kr. do 2011. [7]

Unatoč velikom znanstvenom i tehnološkom napretku u području potresnog inženjerstva, uslijed potresa i dalje dolazi do uništenja izgrađenog okoliša uz često velik broj žrtava i golemih ekonomskih gubitaka. Na potres, njegovu pojavu, jačinu i intenzitet, čovjek ni na koji način ne može utjecati. Ipak, jačina i intenzitet potresa ne moraju biti i često nisu proporcionalni s gubicima (ekonomskim i socijalnim) uzrokovanim potresom. Postoje primjeri događaja umjerene jačine koji su uzrokovali

goleme posljedice i humanitarnu katastrofu (Drač, 2019.) kao i događaji veće jačine od spomenutog koji su rezultirali blažim posljedicama ili gotovo nikakvim. Razlog je tome što je potresna opasnost ili seizmički hazard samo jedna od komponenata koje utječu na konačni ishod nakon djelovanja potresa, drugim riječima, postoje i neki drugi čimbenici na koje se, za razliku od seizmičkog hazarda, ljudskom aktivnošću može utjecati s ciljem ublažavanja posljedica potresa. Ključni preduvjeti za provedbu mjera ublažavanja djelovanja potresa jesu procjena ponašanja potresom ugroženih građevina, što može omogućiti predviđanje šteta i dimenzioniranje sustava odgovora na katastrofe te osvjешćivanje društvene zajednice na rizik od potresa. Time se podrazumijeva ispravno, kontrolirano, planirano i ekonomski isplativo djelovanje prije potresa (identificiranjem i ciljanim ojačanjem kritičnih skupina građevina) i poslije potresa (planovima zbrinjavanja, intervencijama spašavanja i procjenama šteta) što nije samo pitanje stručnjaka i znanstvenika nego informiranost i način života cijele zajednice koja se nalazi na rizičnom području.

Ujedinjeni narodi su 2015. godine donijeli dokument *Sendai okvir za smanjenje rizika od katastrofa 2015–2030* koji potiče na djelovanje znanstvenoistraživačke zajednice usmjereno na faktore i scenarije rizika od katastrofa, a posebice za regionalne, nacionalne i lokalne primjene. Taj dokument je podloga i za strateška djelovanja Europske unije uslijed čega je Europska komisija 2017. godine potres identificirala kao jedan od jedanaest glavnih rizika Europske unije (European Commission SWD(2017) 176 final). Kao članica EU, Hrvatska je 2015. godine donijela dokument *Procjena rizika od katastrofa za RH* [5], ažuriran 2019. godine [8], gdje je prikazano da je rizik od potresa neprihvatljiv rizik za funkcioniranje cijele države s mogućim katastrofalnim posljedicama. Rizik od potresa može se definirati kao kombinacija posljedica događaja i odgovarajuće vjerojatnosti njegove pojave za određenu razinu seizmičkog hazarda [9]. Procjena rizika od potresa najčešće polazi od očekivanog oštećenja postojećeg fonda građevina na temelju kojeg se izračunavaju moguće opasnosti za ljudsko zdravlje i život te odgovarajući financijski gubici, izravni ili neizravni, zbog nastale štete [10]. Zbog toga je pri uspostavi modela rizika od potresa osim seizmičkog hazarda na nekoj lokaciji potrebno obuhvatiti izloženost izgrađenog okoliša i stanovništva te pridružiti odgovarajuću razinu fizičke oštetljivosti pojedinim tipovima građevina [11]. Rizik se od potresa može kvantitativno izraziti u obliku konvolucije individualnih faktora: seizmičkog hazarda, izloženosti i oštetljivosti [12] (slika 2.).



Slika 2. Faktori koji sačinjavaju rizik od potresa: a) seizmički hazard; b) izloženost; c) fizička oštetljivost

Seizmički hazard ili potresna opasnost obuhvaća potencijalno razorne učinke potresa (podrhtavanje tla, likvefakcija, odroni i slično) na promatranoj lokaciji. Izražava se statističkom vjerojatnošću premašivanja odabranog parametra u zadanom razdoblju (vršnog ubrzanja tla ili spektralnog ubrzanja). Na području je RH hazard definiran kartom potresnih područja [13]. Izloženost se može definirati kao razmjer ljudske aktivnosti (primjerice prisutnost građevina) u područjima izloženim seizmičkom hazardu. Najvažniji dio podataka o izloženosti odnosi se na popis postojećih zgrada (fond) koji značajno pridonosi društvenom i ekonomskom riziku. Fizička oštetljivost može se definirati kao podložnost izloženih građevina učincima potresa (oštećenjima), a cilj njene procjene je odrediti vjerojatnost pojave zadane razine oštećenosti kod određenog tipa građevine zbog djelovanja potresa. U suvremenim se procjenama rizika najčešće razina fizičke oštetljivosti građevina opisuje pomoću krivulja oštetljivosti (engl. vulnerability curves) često definiranih kao vjerojatnost gubitaka za određenu razinu djelovanja potresa, i/ili pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja (engl. fragility curves) koje predstavljaju vjerojatnost prekoračenja određenih graničnih stanja, npr. fizičkih oštećenja, za određenu razinu djelovanja potresa. Primjera radi, u područjima manjeg seizmičkog hazarda rizik od potresa može biti veći nego u području većeg seizmičkog hazarda zbog neprikladne gradnje (oštetljivost) i/ili velike gustoće naseljenosti (izloženost).

Izloženost, kao jedna od tri komponente procjene rizika, predmet je ovog istraživanja koje se provodi u sklopu projekta 2BESAFE. Projekt 2BESAFE interdisciplinarni je projekt iz područja potresnog inženjerstva koji se bavi upravo procjenom oštetljivosti ugroženih zgrada isključivo stambene namjene u urbanim područjima koje značajno pridonose riziku od potresa i mogućnostima poboljšanja njihovih svojstava primjenom ojačanja. Cilj je dobiti nove krivulje oštetljivosti te detektirati kritične elemente i mehanizme sloma ugroženih građevina u svrhu razvoja nove metodologije optimalnih ciljanih ojačanja. Općenito, rizik se od potresa procjenjuje na regionalnoj, nacionalnoj ili lokalnoj razini, uzimajući u obzir i promatrajući sve građevine kojima je jedini uvjet odabira pripadnost promatranom području. Bitno je, stoga, naglasiti da se projekt 2BESAFE neće baviti kompletnom izloženosti promatranog područja, konkretno grada Zagreba, nego samo odabranim tipovima armiranobetonskih i zidanih zgrada u urbanim područjima za koje se procijeni da su najviše ugrožene s obzirom na rizik od potresa, odnosno koje značajno pridonose riziku bilo zbog svoje brojnosti i velikog broja stanara ili zbog važnosti za zajednicu, a za koje se očekuje djelomično ili potpuno rušenje pri snažnijem potresu. Podaci o izloženosti fonda građevina su važna podloga pouzdanoj ocjeni rizika od potresa, ali i ozbiljna prepreka tome, ponajviše zbog velikih nedostataka baze podataka s karakteristikama postojećeg fonda građevina. U ovom radu bit će obrađen samo dio promatrane izloženosti koji se odnosi na tipsku gradnju zgrada stambene namjene nakon Drugog svjetskog rata i na područje koje velikim dijelom pripada Novom Zagrebu.

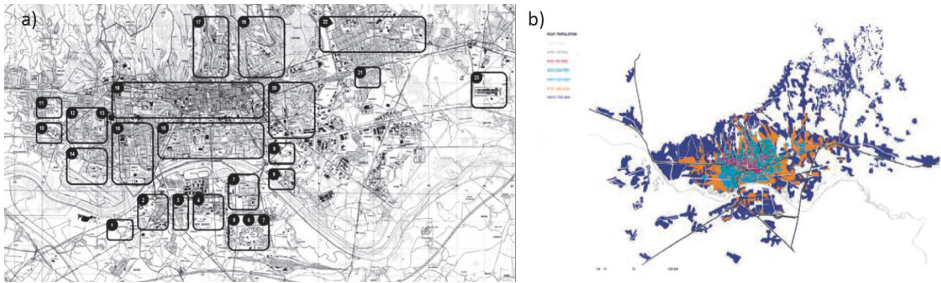
2 Izloženost fonda građevina

Uz seizmički hazard, bitnu komponentu procjene rizika na određenoj lokaciji čine značajke/atributi građevina. Ponovimo, izloženost se može definirati kao razmjernost ljudske aktivnosti (primjerice prisutnost građevina) u područjima izloženim seizmičkom hazardu. Najvažniji dio podataka o izloženosti odnosi se na popis postojećih zgrada (fond), jer oštećenje ili uništenje građevina prilikom djelovanja potresa značajno pridonosi društvenom i ekonomskom riziku [14]. Na popis se zgrada veže popis stanovnika, način korištenja (stambene, industrijske, kritična infrastruktura itd.), trošak zamjene zgrada (dio proračuna financijskih gubitaka) i slično. U izloženost se također ubrajaju osviještenost i pripremljenost stanovništva i hitnih službi na potres, no taj dio neće biti obuhvaćen ovim istraživanjem.

Fond zgrada uobičajeno se opisuje odabranom taksonomijom pomoću koje se pojedini odabrani atributi obuhvaćaju na ujednačen način tako da se može provesti jednodržna klasifikacija, jer se procjene rizika rade na „gruboj rezoluciji“ (primjerice za grupe sličnih zgrada) [12]. Primjer globalno primjenjivog sustava za opis zgrada je suvremena taksonomija *Brzev et al 2013* [15] razvijena u sklopu zaklade Global Earthquake Model (GEM). GEM je inicijativa s ciljem stvaranja opće prihvaćene baze podataka u skladu sa suvremenim dostignućima te modela i programskih paketa/alata za procjenu rizika od potresa na globalnoj razini i za razvitat prateće informatičke strukture. *GEM Basic Building Taxonomy* obuhvaća 13 atributa zgrada: smjer, materijal konstrukcijskog sustava za preuzimanje horizontalnih sila, konstrukcijski sustav za preuzimanje horizontalnih sila, visina, datum gradnje ili ojačanja, nastanjenost, položaj zgrade unutar bloka, tlocrtni oblik, konstrukcijske nepravilnosti, vanjski zidovi, stropni sustav i sustav temeljenja. Države uglavnom razvijaju/dopunjuju svoju taksonomiju ovisno o specifičnoj tipologiji gradnje u pojedinoj državi.

Grad Zagreb je glavni grad Republike Hrvatske u kojem živi više od 1/5 ukupnog stanovništva te kao takav predstavlja istaknuto administrativno i dominantno gospodarsko središte s više od 1/3 ekonomije [5]. U sklopu projekta NERA (*Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation*) napravljena je karta (slika 3.) [16] gdje je postojeći fond zgrada u Zagrebu grubo kategoriziran s obzirom na karakteristične tipove građevina (nosivih konstrukcija) i način gradnje uz odgovarajuća razdoblja izgradnje za pojedine dijelove grada što zapravo predstavlja prvi korak preciznije kategorizacije postojećeg fonda zgrada u gradu Zagrebu s obzirom na lokalne specifičnosti. Takvi podaci su vrlo bitni jer se tijekom povijesti način gradnje mijenjao ovisno o razvoju tehnologija građevinskih konstrukcija, spoznajama o karakteristikama tla, urbanističkim spoznajama o uređivanju prostora, potrebama za građevnim prostorom i slično [12]. Valja spomenuti da je za Zagreb, kao i za ostatak Hrvatske, specifična i vrlo slaba dokumentacija o rekonstrukcijama koje znatno utječu na ponašanje konstrukcije pri djelovanju potresa

i velik broj nezakonito izgrađenih ili rekonstruiranih zgrada, što nije tako čest slučaj u ostatku Europske unije.



Slika 3. a) Zastupljenost tipova građevina u urbanim područjima u Hrvatskoj prema rezultatima projekta NERA [16]; b) Dijagram rasta grada Zagreba [17]

Tijekom ažurirane procjene rizika [8] definirano je 14 karakterističnih tipova zgrada grada Zagreba (slika 4.), a unutar Studije za saniranje posljedica potresa [16] napravljena je još detaljnija kategorizacija na 42 tipa koja je nastala grananjem već postojećih tipova na podtipove.



Slika 4. Konstrukcijski sustavi zgrada za neke mjesne odbore

Od oznaka 14 karakterističnih tipova konstrukcijskih sustava, URM se odnose na zidane zgrade bez serklaža, RC2 na zgrade s armiranobetonskim zidovima, RC4 na zgrade kojima je dominantan konstrukcijski sustav okvir s ispunom i omeđeno žiđe, RC5 na tipske armiranobetonske zgrade (tzv. limenke) i NEB na armiranobetonske tornjeve. Na prikazanoj slici nedostaje još naknadno dodani tip CM koji se odnosi na omeđeno žiđe. U svim oznakama L, M i H se odnose na broj katova. Svaki karak-

teristični tip predstavlja skup karakterističnih atributa kojima se pod zajedničkim imenom mogu opisati zgrade istog ili, do određene granice, sličnog odgovora, ponašanja i posljedica od djelovanja potresa s obzirom na način i razdoblje gradnje te vrstu i materijal nosivog sustava. To omogućava provođenje proračuna na višestruko manjem broju numeričkih modela, a dobiveni se rezultati mogu primijeniti na značajnom dijelu fonda građevina na tom području.

Od ostalih aktivnosti u Hrvatskoj, važno je spomenuti Građevinski fakultet u Osijeku gdje je napravljena Brza procjena seizmičkog rizika u Hrvatskoj 2016. godine [18] [19] i izrađena baza podataka o građevinama za grad Osijek, pri čemu je dosad obrađeno više od 1500 zgrada [20].

2.1 Odabir kritičnih zgrada stambene namjene

Kao što je rečeno, predmet istraživanja neće biti izloženost ukupnog fonda građevina u gradu Zagrebu nego onih za koje se procjenjuje da predstavljaju kritičnu stambenu infrastrukturu.

Zgrade su procijenjene kao kritična stambena infrastruktura ako ispunjavaju sljedeće uvjete:

1. izgrađene do 1981. godine (zastarjeli propisi, dotrajalost, neodržavanje)
2. manjak ili nepostojanje elemenata za preuzimanje horizontalnog djelovanja u jednom ili oba smjera
3. velik broj istih ili izrazito sličnih zgrada
4. rasprostranjenost na relativno velikom području (pojavljivanje na više različitih mjesta u gradu)
5. velik broj stanara
6. nepovoljno ponašanje pri djelovanju potresa i značajan pridonos riziku

Brojnim je istraživanjima odavno utvrđeno da je cijelo područje Zagreba izloženo velikom riziku od potresa (pogotovo Donji grad) te velik broj tipova zgrada zadovoljava uvjete kritične stambene infrastrukture, no izbor u velikoj mjeri sužavaju uvjeti 3. – 5. kojima se problematika svodi prije na **tipski izgrađene zgrade u drugoj polovini 20. stoljeća**. Naime, nakon Drugog svjetskog rata započeta je gradnja novozagrebačkih naselja pri čemu su se sustavno gradile gotovo iste ili vrlo slične zgrade na cijelom području južno od rijeke Save. S obzirom na to, značajan se broj zgrada može svrstati u samo nekoliko vrlo specifičnih tipova zgrada. Okosnica identifikaciji tipova zgrada u urbanim područjima, koji su značajno ugroženi od djelovanja potresa, jest odabir karakterističnih tipova proveden u Ažuriranoj procjeni rizika od potresa [8] i Studijama za saniranje posljedica potresa [21]. Međutim, u ovom će se slučaju od tipski građenih zgrada unutar planski izgrađenih naselja promatrati vrlo uzak krug specifičnih atributa koje odabrane zgrade, uz minimalna odstupanja, moraju sadržavati. Pripadnost pojedinih zgrada istom tipu tada karakterizira

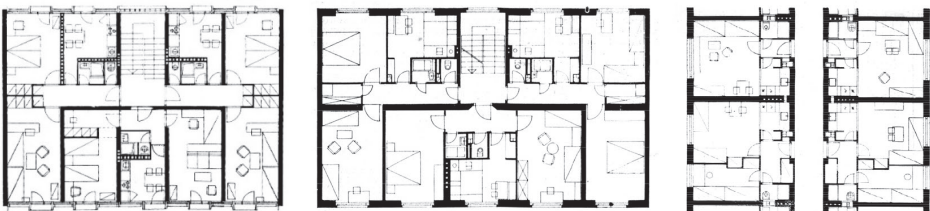
te zgrade kao gotovo iste, a ne samo slične. Drugim riječima, promatrat će se detaljno razgranati podtipovi već određenih karakterističnih tipova kako bi se mogle napraviti detaljne analize potresnog ponašanja prilagođene i primjenjive isključivo na odabrane tipove građevina i pripadajući modeli vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti dobiveni prikladnim, detaljnim i samo njima namijenjenim metodama, a da se uz tako visoku razinu točnosti proračuna i procjene rizika ipak može pokriti veliki broj građevina na relativno velikom području s velikim brojem stanara. Tako razvijen model procjene rizika i ponašanja tipskih izgrađenih građevina omogućava razvoj i predstavlja podlogu provedbe tipskih ojačanja svih građevina koje pripadaju identificiranom podtipu.

2.2 Tipologija

Promatrani tipovi zgrada koje pripadaju tipskoj gradnji druge polovine 20. stoljeća na području (uglavnom) Novog Zagreba su:

- tip Korbar (Volta)
- tip Bartolić
- tip Tučkorić
- tip Jugomont JU 59, JU 60 i JU 61
- tip tunelska oplata

Tip Volta, Tučkorić, Bartolić i Jugomont predstavljaju zgrade tipskih tlocrta koje se, u neznatno različitim podvarijantama, pojavljuju na brojnim lokacijama diljem grada. Tip tunelska oplata obuhvaća zgrade različitih tlocrta, ali istog načina i tehnike gradnje tunelskom oplatom, istog materijala i relativno bliskog vremenskog perioda nastanka zbog čega su uglavnom projektirane po istom propisu, što znači da su slično armirane. U nastavku će biti dan pregled osnovnih atributa pojedinih tipova određenih na temelju analize dostupnih podataka prikupljenih terenskim metodama iz postojećih arhiva i baza te dokumenata o procjenama rizika od potresa (nacrti, projektnu dokumentaciju) uz korištenje *Google Maps Street View*a.



Slika 5. Tlocrt karakterističnog kata tip a) Korbar (Volta); b) Bartolić [22]; c) tip Tučkorić

Tip Volta

- rasprostranjenost: Voltino, Trnsko, Siget, Sopot

Nosiva se konstrukcija sastoji od poprečnih nosivih zidova od betonskih blokova (ne-armirano ziđe) debljine 20 cm na razmaku 3,2 – 3,4 m s horizontalnim serklažima i međukatne konstrukcije debljine 16 cm širine 100, 120 i 140 cm. Temelji su trakasti. Montažne AB ploče izvedene su sa štednim otvorima koji se, nakon montaže, betoniranjem horizontalnih serklaža i spojnicama među pločama uz izradu monolitno izlivenih klinova za vezu, pretvaraju u monolitne stropove. Nosivi zidovi ukrućeni su uzdužnim zidom od bet. bloketa, a na krajevima okvirom kojeg formiraju horizontalni uzdužni serklaži kao prečke i AB završeci poprečnih zidova.

Tip Bartolić

- rasprostranjenost: Trnsko, Folnegovićevo naselje, Avenija Marina Držića, Selska ulica, Krapinska ulica, Paška ulica, Rapska ulica, Zvečajska ulica

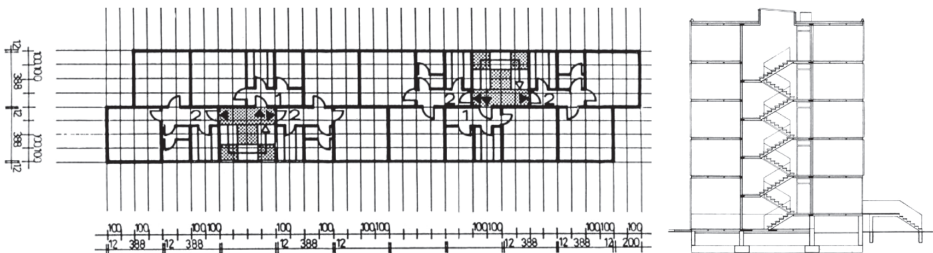
Nosiva se konstrukcija sastoji od uzdužnih nosivih zidova opeke NF (omeđeno ziđe) debljine 38 cm na razmaku cca 5 m s horizontalnim i vertikalnim serklažima i međukatne konstrukcije od predgotovljenih sitnobrečastih gredica T-presjeka. Temelji su trakasti.

Tip Tučkorić

- rasprostranjenost: Trnsko, Voltino, Folnegovićevo naselje

Nosiva se konstrukcija sastoji od uzdužni nosivih zidova od betonskih blokova debljine 20 cm i međukatne konstrukcije od predgotovljenih sitnobrečastih gredica T-presjeka. Temelji su trakasti.

Poprečni zidovi između stanova, osim kao zvučna izolacija, služe i za ukrutu.



Slika 6. Karakteristični tlocrt i presjek limenki sustava Jugomont JU 60

Tip Jugomont

Polumontažni sustav je srednje panelne predgotovljenosti od armiranobetonskih elemenata. Ovisno o godini gradnje i kvaliteti spojeva, postoje sustavi gradnje Jugomont JU 59, JU 60 i JU 61, poznate pod nazivom “kazete” i “limenke”.

- rasprostranjenost
 - JU 59 i 60: Folnegovićevo naselje, Remetinec, Borongaj
 - JU 61: Remetinec, Borongaj, Zapruđe, Utrina

Nosiva se konstrukcija sastoji od nosivih zidova od armiranobetonskih predgotovljenih panela (MB 30, C25/30) debljine 12 cm obostrano armiranih mrežama i dominantnih u poprečnom smjeru sa središnjim uzdužnim ukrutnim pojasom. Međukatna se konstrukcija razlikuje s obzirom na sustav gradnje, pa su tako kod Jugomonta JU 59 i JU 60 to polumontažne ploče debljine 12 cm na rasponu 3,6 m, a kod Jugomonta JU 60 montažne armiranobetonske ploče debljine 12 cm na rasponu 3,6 m armirane samo u vlačnoj zoni. Temelji su monolitni armiranobetonski.

Predgotovljeni zidni paneli i ploče međusobno su povezani horizontalnim i vertikalnim serklažima tako što su vareni nastavci armature. Zbog slabih veza među panovima, limenkama građenim sustavima JU 59 i JU 60 bila je limitirana visina građenja (P+3 i P+4). Uvođenjem dodatne ukrute sustava interpolacijom moždanika u reške nastala je „najmodernija“ i posljednja inačica Jugomont sustava – JU 61. Povećanjem krutosti spojeva, bila je omogućena gradnja viših zgrada, odnosno omogućeno je povećanje etažnosti i do 50 % (čak do P+8).

Tip tunelska oplata

Zgrade izgrađene prostornom ili tunelskom oplatom kojom se istovremeno betoniraju stijene i ploče. Radi se o klasičnoj monolitnoj gradnji armiranobetonskih zidova otprilike do 90-ih godina 20. stoljeća.

- rasprostranjenost: Dugave, Središće, Slobošćina

Nosiva se konstrukcija sastoji od nosivih zidova od betonskih blokova debljine 20 cm dominantnih u poprečnom smjeru i međukatne konstrukcije od armiranobetonskih ploča. Temelji su trakasti ili temeljna ploča.

Prizemlje često ima različitu visinu od katova. Pročelja su izvedena od predgotovljenih armiranobetonskih panela, svi ostali elementi izvedeni su monolitno.

3 Rezultati i diskusija

U tablici 1. prikazani su osnovni atributi iz poglavlja 2.2 *Tipologija* na temelju kojih je ugrubo kvalitativno procijenjena njihova oštetljivost.

Tablica 1. Prikaz osnovnih atributa odabranih tipova zgrada i gruba kvalitativna procjena oštećljivosti

NAZIV TIPa	Godina izgradnje			Katnost		Materijal			Nosivi zidovi		Pridonos fasadnih zidova	Serklaži		Međukatna konstrukcija		Podrumska etaža	Pravilnost		Zgrade u nizu	OŠETLJIVOST
	prije 1964.	1964. - 1982.	poslije 1982.	3-5 (6-15 m)	6-9 (> 15 m)	nearmirano zide	omeđeno zide	armirani beton	uzdužni	poprečni		horizontalni	vertikalni	AB ploče	sitnorebričaste T-gredice		u tlocrtu	po visini		
Korbar (Volta)	✓	✓		✓	✓				✓	X	✓		✓		X	✓	✓	✓	✓	VISOKA OŠETLJIVOST
Bartolić	✓	✓		✓		✓		✓		X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	○		
Tučkorić	✓	✓		✓	✓			✓		X	✓		✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	
JU 59																			○	
JU 60	✓	✓		✓			✓	✓		X		✓		○	✓	✓	✓	○		
JU 61					✓													○		
tunelska oplata		✓	✓	✓	✓		✓	✓	X			✓		○	✓	✓	✓	✓	✓	

✓ da X ne ○ moguće

Godina izgradnje

U tablici 1., godina izgradnje podijeljena je na tri intervala: do 1964., do 1982. i nakon 1982. godine. Navedene su godine prijelomna razdoblja u razvoju tehničkih propisa. Godina 1964. predstavlja prvi značajan korak propisa za projektiranje građevina u kojem se prvi put značajnije uzima u obzir djelovanje potresa nakon potresa u Skopju 1963. godine. Propisi do 1964. smatraju se zastarjelima, zatim slijedi prijelazno razdoblje do 1982. godine koja označava početak suvremenih propisa. Vidljivo je iz tablice 1. da su samo zgrade građene tunelskom oplatom građene i projektirane nakon 1982. godine, pa je u tom smislu upitna razina oštećljivosti svih navedenih tipova s obzirom na propise temeljem kojih su projektirani i izgrađeni.

Katnost

Tipovi zgrada su srednje (3 – 5 katova) i visoke (6 – 9 katova) katnosti.

Materijal

S obzirom na materijal, potresno najugroženiji su tipovi Korbar i Tučkorić jer se radi o neomeđenom zidu srednje do visoke katnosti zgrada. Valja spomenuti i činjenicu vrlo vjerojatne dotrajlosti materijala s obzirom na godinu izgradnje svih tipova, što dodatno pridonosi razini oštećljivosti.

Nosivi zidovi

Glavni elementi za preuzimanje horizontalnih potresnih sila su nosivi zidovi. Iz tablice 1. vidi se da niti jedan od odabranih tipova nema nosive zidove u oba smjera. Nedostatak elemenata za preuzimanje horizontalnih sila u oba smjera predstavlja velik problem potresnoj otpornosti promatranih tipova i izrazito negativno utječe na njihovu oštetljivost.

Pridonos fasadnih zidova

Svim tipovima ili nedostaju fasadni zidovi ili oni svojom dužinom ne pridonose značajno horizontalnoj krutosti. To je uz raspored nosivih zidova, drugi najveći problem potresne otpornosti odabranih tipova zgrada.

Međukatna konstrukcija

Međukatne konstrukcije ne utječu negativno na potresnu otpornost tipova zgrada.

Pravilnost

Svi tipovi zgrada su pravilni u tlocrtu i po visini što utječe povoljno na potresnu otpornost.

Zgrade u nizu

Zgrade promatranih tipova uglavnom se pojavljuju u nizu što je povoljno za ponašanje zgrade u potresu, no upitna je kvaliteta dilatacija.

S obzirom na navedene osnovne atribute koji su analizirani na temelju dostupnih podataka, može se zaključiti da odabrani tipovi zgrada imaju očekivanu visoku razinu oštetljivosti i nedovoljnu potresnu otpornost, što opravdava njihov odabir za daljnje razmatranje.

U tablici 2. prikazana je grubo procijenjena razina izloženosti odabranih tipova zgrada na temelju okvirnih podataka o površini karakterističnog kata, broju katova i istraženog broja zgrada te na temelju izračunane bruto razvijene površine (BRP).

Tablica 2. Izračun bruto razvijene površine odabranih tipova zgrada i gruba procjena razine izloženosti

	Korbar (Volta)	Bartolić	Tučkorić	Jugomont			
				P + 3	P + 4	P + 5	P + 8
Površina karakterističnog kata [m²]	204	200	360	456	456	550	595
Broj katova	6	6	6	4	5	6	9
Broj zgrada	57	160	16	28	17	25	39
BRP [m²]	69768	192000	34560	51072	38760	82500	208845
IZLOŽENOST	VISOKA IZLOŽENOST						
*u tablici nisu dani podaci o tunelskoj oplati jer u ovoj fazi istraživanja nije obrađen dovoljan broj zgrada							

S obzirom na broj zgrada koje su zahvaćene odabranim tipovima i na temelju grubo izračunanog BRP-a, može se zaključiti da je predviđena izloženost zgrada visoka, što opravdava odabir promatranih tipova za daljnju analizu.

U nastavku obrađivanja navedenih tipova zgrada u potpunosti će se definirati njihovi položaji u gradu Zagrebu radi točnog definiranja seizmičkog hazarda i kvalitete tla na lokalnoj razini. Sljedeći je korak utvrditi postojeće stanje zgrada procjenom degradacije svojstava materijala. Za to ispitivanje primijenit će se vizualne metode i terenska istraživanja, pri čemu se svojstva materijala i količina armature te njena raspodjela određuju eksperimentalnim metodama ispitivanja radiovalovima (radarom), ultrazvukom i sklerometrom. Procjena degradacije svojstava materijala, zajedno s eksperimentalnim ispitivanjima inicijalnih dinamičkih parametara zgrada, predstavljaju podlogu numeričkim modelima za preliminarnu ocjenu ponašanja odabranih zgrada.

4 Zaključak

Pri uspostavi modela rizika od potresa, osim seizmičkog hazarda na nekoj lokaciji, potrebno je obuhvatiti izloženost izgrađenog okoliša i stanovništva te pridružiti odgovarajuću razinu fizičke oštetljivosti pojedinim tipovima građevina. Od tri individualna faktora rizika od potresa, nije moguće utjecati samo na seizmički hazard, a poznavanje i utjecaj na preostala dva, izloženost i fizičku oštetljivost, može ublažiti posljedice djelovanja potresa. Podaci o izloženosti fonda građevina su važna podloga pouzdanoj ocjeni rizika od potresa, ali i ozbiljna prepreka tome, ponajviše zbog velikih nedostataka baze podataka s karakteristikama postojećeg fonda građevina. Karakteristični tip predstavlja skup karakterističnih atributa kojima se pod zajedničkim imenom mogu opisati zgrade istog ili, do određene granice, sličnog odgovora, ponašanja i posljedica od djelovanja potresa s obzirom na način i razdoblje gradnje te vrstu i materijal nosivog sustava.

Područje interesa istraživanja u sklopu kojeg je obrađivana tema ovog rada su kritične zgrade stambene namjene na području grada Zagreba. Zgrade su identificirane kao kritične slijedom ispunjavanja ovih uvjeta:

- izgrađene do 1981. godine (zastarjeli propisi, dotrajalost, neodržavanje)
- manjak ili nepostojanje elemenata za preuzimanje horizontalnog djelovanja u jednom ili oba smjera
- velik broj istih ili izrazito sličnih zgrada
- rasprostranjenost na relativno velikom području (pojavljivanje na više različitih mjesta u gradu)
- velik broj stanara
- nepovoljno ponašanje pri djelovanju potresa i značajan pridonos riziku

Na temelju postavljenih uvjeta, kao kritične zgrade stambene namjene procijenjene su tipski izgrađene zgrade iz druge polovine 20. stoljeća na području (uglavnom) Novog Zagreba. Razlog je tome taj što se na taj način značajan broj zgrada može svrstati u samo nekoliko specifičnih (precizno definiranih) tipova zgrada što bi omogućilo da pripadajući modeli vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti budu dobiveni prikladnim, detaljnim i samo njima namijenjenim metodama, a da se uz tako visoku razinu točnosti proračuna i procjene rizika ipak može pokriti veliki broj zgrada na relativno velikom području s velikim brojem stanara. Za procjenu izloženosti odabrani su sljedeći tipovi stambenih zgrada:

- tip Volta
- tip Bartolić
- tip Tučkorić
- tip Jugomont JU 59, JU 60 i JU 61
- tip tunelska oplata

Tip Volta, Bartolić, Tučkorić i Jugomont predstavljaju zgrade tipskih tlocrta koje se, u neznatno različitim podvarijantama, pojavljuju na brojnim lokacijama diljem grada, dok tip tunelska oplata obuhvaća zgrade različitih tlocrta, ali istog načina i tehnike gradnje tunelskom oplatom, istog materijala i relativno bliskog vremenskog nastanka zbog čega su uglavnom projektirane po istom propisu, što znači da su slično armirane.

Analizirajući dostupne podatke prikupljene terenskim metodama iz postojećih arhiva i baza te dokumenata o procjenama rizika od potresa (nacрте, projektnu dokumentaciju) uz korištenje *Google Maps Street Viewa*, utvrđeni su osnovni atributi svakog tipa s najizraženijim nedostatcima u pogledu potresne otpornosti zgrada. Utvrđeno je da je glavni problem odabranih tipova preuzimanje horizontalne sile od djelovanja potresa i to mahom zbog kroničnog nedostatka nosivih zidova u jednom od dva glavna smjera (uzdužnom ili poprečnom) ili nepostojanja konkretne jezgre unutar konstrukcije te zbog zanemarive uloge fasadnih zidova u horizontalnoj krutosti zgrada, odnosno preuzimanju horizontalnih potresnih sila. Osim navedenih problema, potresnu otpornost dodatno umanjuje starost zgrade zbog zastarjelih propisa projektiranja i građenja te dotrajalih materijala izgradnje. Istražena brojnost zgrada i gruba procjena bruto razvijene površine opravdavaju pretpostavljenu visoku izloženost odabranih tipova zgrada. S obzirom na grubo procijenjenu visoku oštetljivost i izloženost, uz već utvrđenu potresnu opasnost zagrebačkog područja, zaključeno je da odabrani tipovi zgrada značajno pridonose riziku od potresa što opravdava njihovu daljnju analizu.

Literatura

- [1] Dasović, I., Herak, M., Prevolnik, S.: Uvodno o potresu i njegovim učincima (poglavlje), *Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada* (ur. Uroš, M., Todorčić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 13-36
- [2] Elnashai, A.S., Di Sarno, L. (2018) *Fundamentals of Earthquake Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd.
- [3] Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčić-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B.: GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and PO Plain sites, and geodynamic implications, *Tectonophysics* 483 (2010), pp. 214-222
- [4] Giardini D., Woessner J., Danciu L.: *European Seismic Hazard Map*, Swiss Seismological Service, ETH Zürich, Switzerland. (<http://www.share-eu.org/>), 2013.
- [5] Atalić, J., Hak, S.: Procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet u suradnji s Ministarstvom graditeljstva i prostornog uređenja i Državnom upravom za zaštitu i spašavanje, Hrvatska, 2014.
- [6] Državna uprava za zaštitu i spašavanje, Republika Hrvatska, Procjena ugroženosti Republike Hrvatske od prirodnih i tehničko-tehnoloških katastrofa i velikih nesreća (<http://www.duzs.hr/>), 2013.
- [7] Ivančić, I.: *Croatian Earthquake Catalogue – Presentation*, Hrvatska seizmološka služba, Geofizički odsjek, Prirodoslovnomatemički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, The Nato Science for Peace and Security Programme Workshop, (<http://www.wbalkanseismicmaps.org/>), 2011.
- [8] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Ažurirana procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet u suradnji s Ministarstvom graditeljstva i prostornog uređenja i Državnom upravom za zaštitu i spašavanje, Hrvatska, 2018.
- [9] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjernicama za budućnost, *GRAĐEVINAR* 71 (2019) 10, pp. 923-947
- [10] Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J., Restrepo- Velez, L.F., Crowley, H.: Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies Over the Past 30 Years, *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43 (2006) 3, pp. 75-104, <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0082-4>
- [11] Erdik, M. (2017), Earthquake risk assessment, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (12), pp. 5055-5092
- [12] Bal, I.E., Crowley, H., Pinho, R.: Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock, Research Report Rose 2010/02, IUSS Press, Pavia, 2010.

- [13] Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović I.: Republic of Croatia, Seismic hazard map, 2011. <http://seizkarta.gfz.hr>
- [14] Spence, R., Foulser-Piggott, R., Pomonis, A., Crowley, H., Masi, A., Chiauzzi, L., Zuccaro, G., Cacace, F., Zulfikar, C., Markus, M., Schaefer, D., Sousa, M.L., Kappos, A.: The European Building Stock Inventory: Creating and Validating a Uniform Database for Earthquake Risk Modelling, Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.
- [15] Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A.W., Allen, I., Greene, M., Jaiswal, K., Silva, V.: GEM Building Taxonomy Version 2.0, GEM technical report 2013-02 V1.0, GEM Foundation, Pavia, 2013.
- [16] Crowley, H., Ozcebe, S., Baker, H., Foulser-Piggott, R., Spence, R.: D7.2 State of the Knowledge of Building Inventory Data in Europe, NERA - Seventh Framework Programme EC project number: 262330 www.nera-eu.org, 2014.
- [17] Sekcija mladih DAZ-a, [ur.]: Zagreb - arhitektura u džepu, DAZ - Društvo arhitekata Zagreba, 2017.
- [18] Hadzima-Nyarko, M., Kalman Šipoš, T., Pavić, G., Trbojević, M., Markasović, D.: Potresna oštetljivost i karakteristike zgrada gradskog bloka u Osijeku, Zbornik VII. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa (ur. Holcinger, N.), Zagreb, pp. 94-101, 2018
- [19] Kalman Šipoš, T., Hadzima-Nyarko, M.: Rapid Seismic Risk Assessment, International Journal of Disaster Risk Reduction, 24 (2017), pp. 348-360.
- [20] Hadzima-Nyarko, M.: Creating the database of buildings of Osijek, Croatia, research performed at the Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek, SERA Balkans Seismic Risk workshop, Belgrade, 2019.
- [21] Atalić, J., Krolo, J., Damjanović, D., Uroš, M., Sigmund, Z., Šavor Novak, M., Hak, S., Korlaet, L., Koščak, J., Duvnjak, I., Bartolac, M., Serdar, M., Dokoza, I., Prekupec, F., Oreb, J., Mušterić, B.: Studija za saniranje posljedica potresa, I-VI faza, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2013-2018.
- [22] Bobovec, B., Korlaet, L., Virag, N.: Arhitekt Ivo Bartolić, prolegomena opusu, *Znanstveni časopis za arhitekturu i urbanizam* 23 (2015), 1 (49), pp. 160-173

Synergy of red mud, calcined clay and limestone in cementitious binders

Ivana Vladić Kancir¹, Asst. Prof. Marijana Serdar²

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, ivana.vladic.kancir@grad.unizg.hr

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

Abstract

Previous research has shown that the reuse of bauxite residues from alumina production, also known as red mud, has potential for use as a cement substitute, especially when combined with other supplementary cementitious materials. The idea behind this research was to investigate the synergy between locally available red mud, clay, and limestone. The synergy study included measurements of heat of hydration at paste level and compressive strength on mortar samples. The mineralogical composition of the mixed binder was analysed by thermogravimetric analysis, which is an indirect method for the confirmation of mineral phases. The investigations revealed that there is a positive synergy between the red mud, clay and limestone and that, with good optimization, a higher cement replacement can be achieved without affecting mechanical properties of mortar.

Key words: red mud, synergy, clay, limestone, heat of hydration, compressive strength

Sinergija crvenog mulja, kalcinirane gline i vapnenca u cementnim vezivima

Sažetak

Prijašnja istraživanja su pokazala da uporaba boksitnog ostataka prilikom proizvodnje aluminija, također poznatog i kao crveni mulj, ima velik potencijal za korištenje kao zamjenski materijal za cement, posebno u kombinaciji s drugim mineralnim dodatcima. Ideja ovog istraživanja bila je detektirati sinergiju između lokalno dostupnog crvenog mulja, gline i vapnenca. Sinergija navedenih materijala istražena je mjerenjem topline hidratacije na razini paste kao i tlačne čvrstoće na uzorcima morta. Mineraloški sastav miješanog veziva analiziran je termogravimetrijskom analizom koja je indirektna metoda za potvrđivanje mineralnih faza. Istraživanje je pokazalo da postoji sinergija između crvenog mulja, gline i vapnenca te da se uz dobru optimizaciju može postići veća zamjena cementa bez narušavanja mehaničkih svojstava morta.

Ključne riječi: crveni mulj, sinergija, glina, vapnenac, topline hidratacije, tlačna čvrstoća

1 Introduction

Cement industry is nowadays making great efforts to reduce environmental impact of cement production by using, for instance, waste materials from different industries in blended cements. Large quantities of supplementary cementitious materials (SCM) such as fly ash, granulated blast furnace slag, silica fume, and natural pozzolans have been used in cement industry for many years [1], [2]. On the other hand, availability of commonly used SCMs is decreasing. For example, due to coal exit strategy in Europe, the amount of fly ash is declining [3]. For that reason, other waste materials, that could be used as partial replacement for cement, are being researched.

Over the last few decades, a lot of attention has been attributed to bauxite residue also known as red mud [4, 5]. Red mud is a by-product from aluminium industry, and it is generated from the bauxite ore refining in the scope of the Bayer process. In the Bayer process, after bauxite digestion with sodium hydroxide, the insoluble product is called red mud. This material is widely available and it is produced in great quantities. Between 0.8-1.5 tons of bauxite residue are produced per one ton of alumina produced, [6] resulting in reserves of approximately in excess of 2.7 billion tones worldwide [7]. Chemical composition of red mud is rather complex. Since bauxite ore is washed with the high alkaline sodium hydroxide, it is not surprising that red mud is a highly alkaline slurry of pH 10-13.5 and is therefore considered a great environmental threat [8].

The application of red mud is limited because of the presence of alkalis, high iron content, and very fine particle size distribution, [9]. However, many studies conducted so far have proven the utility of using red mud as construction material [5, 10, 11]. Even though red mud has a lower quantity of reactive silica and calcium than usual SCMs, the idea of its use in concrete is still present. High alkali content in red mud can help achieve a synergic effect between the usual SCMs like slag, fly ash, clay, or limestone [12]. Furthermore, researchers have established that a highly alkaline environment, which is characteristic of red mud, can promote hydration of Portland cement [13]. According to studies, red mud can achieve good synergic effect in cement blends with hydrated lime, fly ash, and silica fume, due to its high alkalinity [11].

The idea behind this research was to investigate synergic effect between red mud, calcined clay and limestone, which are considered as SCMs, in cement composites. 20 % of cement by weight was replaced with red mud in all mixtures. Also, in addition to red mud, clay and limestone were added to the mixtures in order to explore the hydration, compressive strength, and hydration products of such composites. All materials used in this study were sourced from different industrial processes such as aluminium production, stone quarry and clay excavation sites, and they all originated from areas close to the cement production plant in Croatia.

2 Materials, mix design and methods

2.1. Materials

Materials from the region were used in combination with commercial cement, CEM I 42.5 N, produced by Holcim Koromačno, Croatia. The red mud (RM) used in the study is a waste from alumina production in Dobro Selo, Bosnia and Herzegovina. The limestone (LS) sample originates from the quarry in Zvečaj, Arkada, Croatia. The Clay (C) sample, calcined at 800 °C for one hour, originates from brick production in Cerje Tužno, Croatia. Chemical composition of all the materials is given in Table 1. Additionally, the appearance of raw materials and their SEM equivalents is shown in Figure 1.

Table 1. Chemical composition of materials (wt. %)

	CEM I	Red mud	Clay	Limestone
SiO ₂	19.3	21.9	62.4	20.2
Al ₂ O ₃	4.9	16.9	21.3	4.3
Fe ₂ O ₃	2.9	37.9	7.3	1.4
CaO	64.0	10.0	2.2	71.6
MgO	1.8	0.6	1.8	1.7
SO ₃	2.8	0.2	0.1	0.1
Na ₂ O	0.2	7.2	1.5	<0.01
K ₂ O	0.8	0.2	2.5	0.1
P ₂ O ₅		0.5	0.4	0.4

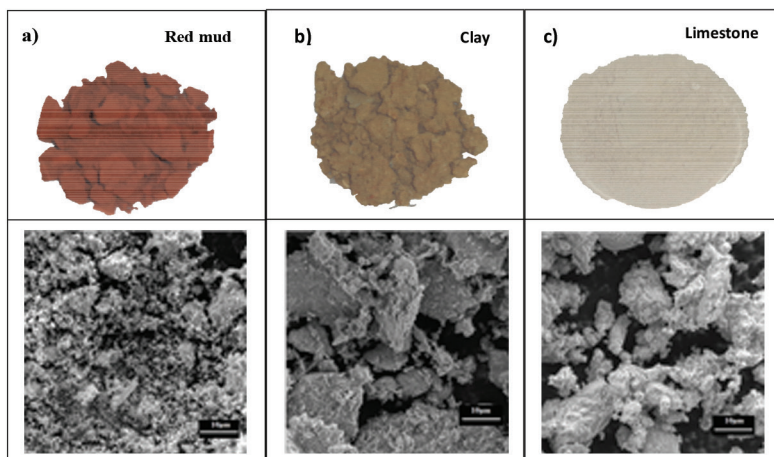


Figure 1. Images of raw materials (top) and their microscopic images (bottom)

2.2 Mix design and methods

2.2.1 Mix design

Cement was replaced by red mud (RM) in all mixtures in the amount of 20 % by weight, and then additionally by clay (C) also in the amount of 20 % by weight. Furthermore, 5 % of limestone (LS) was added to the mixture. Mixtures were labelled with the amount of cement replacement and abbreviation of the material. For example, in mixture 20RM20C5LS cement was replaced with 20 % of red mud, 20 % of clay, and 5 % of limestone.

Table 2. Mix proportions of cement composites

Mix label	Mass ratio within the binder (%)			
	CEM I	RM	C	LS
CEM	100	0	0	0
20RM	80	20	0	0
20RM20C	60	20	20	0
20RM20C5LS	55	20	20	5

2.2.2 Methods

In order to evaluate the synergy between red mud, clay and limestone, the heat of hydration of the reference and blended pastes, with different binder compositions, was determined using the 8-channel TAM Air isothermal calorimeter. For each mix, 10 g of fresh paste with 0.5 w/b ratio was prepared, mixed outside the calorimeter, cast into glass vials, and then placed into the calorimeter. The heat of hydration was measured for 3 days at 20 °C.

The thermogravimetric analysis (TGA) was performed with TGA 55, TA instruments on mortar samples after 2, 7, and 28 days. 50±5 mg samples were heated from 40 °C to 1000 °C, at a constant heating rate of 20 °C and a nitrogen flow of 40mL/min. The compressive strength test was performed on mortar samples. The samples were cast in 40 x 40 x 160 mm moulds, all according to EN 196-1. The samples were demoulded after 24 hours and cured in moisture chamber (20 °C and 95 % RH) until testing time. The compressive strength was tested after 2, 7 and 28 days, according to EN 196-1.

3 Results

The heat of hydration of the OPC, red mud only system and red mud + clay + (limestone) are shown in Figure 2. Generally, the first peak corresponds to the hydration silicate phases in the isothermal calorimetry curve of the OPC, while the second peak is associated with the reaction of the aluminate phases [14]. When red mud is added to the system, the second peak becomes more pronounced in blended systems.

The red mud sample contains a relatively high amount of alumina compared to the OPC sample, as shown in Table 1. The presence of alumina affects the second or shoulder peak of hydration in calorimetry by increasing it [5], [15]. Moreover, the percentage of alkalis in the red mud system is higher than in the OPC system, which are present due to the origin of red mud, and alkalis could advance the second peak of hydration because the presence of alkalis affects hydration of aluminates [16]. Hydration curves change further once the calcined clay is added to the system. The second peak is more pronounced when clay has been added, probably due to the synergy with red mud, where the alkalis from red mud enhance the aluminate reaction, and alumina content is even higher with clay in the system. The activation of aluminate phases seems to improve with the addition of limestone. With 5 % of limestone, the second peak occurs earlier and is even more pronounced. Additionally, the total heat released per gram of cement is higher with limestone addition, compared to binder with red mud and calcined clay only.

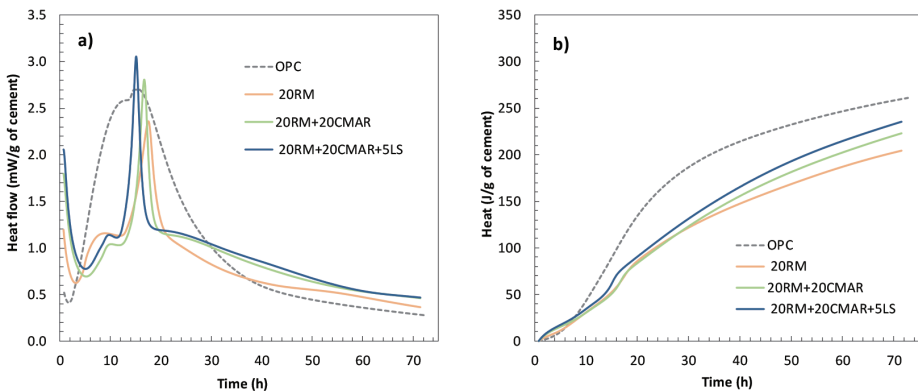


Figure 2. Heat flow a) and cumulative heat b) curves of the systems with red mud and clay (without and with the addition of limestone) obtained by isothermal calorimetry for 72 hours

The differences in hydration products occurring in OPC sample and blended mixes were analysed using TGA on 28-day-old mortar samples. The corresponding results are shown in Figure 3. The amount of portlandite decreased in the mixes with ce-

ment substitution, which is indicated by the peak between 400 °C - 500 °C [17]. This peak is higher in the mixture with limestone than in the mixture with red mud and clay only.

A smaller peak, present in mixed systems in the range between 110 °C and 160°, proves formation of Afm phases [18]. This peak has not been observed in the OPC system. The appearance of the peak between 60 °C and 100 °C is usually caused by the decomposition of ettringite, CSH and CAH gel.

In the system with limestone, the curve changes and both the first and second peaks seem to decrease, which is probably related to the differences in the Afm phase where monocarboaluminate forms instead of monosulphate. This change can explain an increase in compressive strength [19].

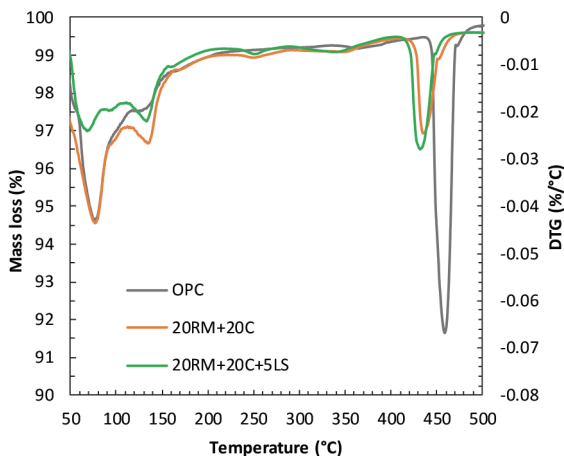


Figure 3. Derivative of mass loss (DTG curve) for mortar mixtures after 28 days of curing

Compressive strength results for mortar prepared with red mud, clay, and limestone are presented per mass of cement in Figure 4. These results reveal that the addition of clay causes decrease in early strength, compared to mix with red mud only. The synergy between red mud and clay is evident after 7 and 28 days of curing when higher strength is reached. On the other hand, when 5 % of limestone is added, both early and later strength increase, especially after 28 days. It can be observed that even small content of limestone improved synergy between red mud and clay, due to its filling effect and the additional amount of calcium interacting with alumina hydrates [19]. Compressive strength results are in good correlation with the heat of hydration.

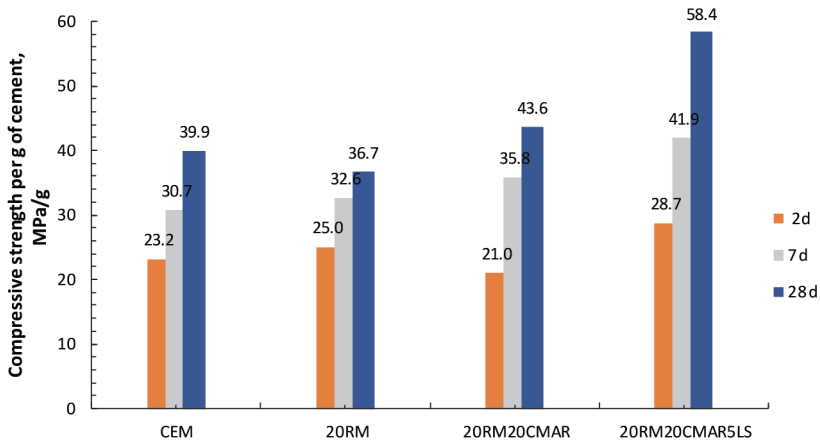


Figure 4. Compressive strength of mortar per gram of cement after 2, 7 and 28 days

4 Conclusion

The synergy between red mud, clay and limestone was investigated in this study. The heat of hydration of the pastes was measured and compared with compressive strength to determine if the synergy exists. Thermogravimetric analysis was also carried out to determine if the microstructure was altered by the addition of red mud, clay, and limestone. The results show that there is an interaction between clay and red mud, and that this interaction improved with the addition of limestone. The addition of limestone improved the reactivity of the alumina based mixtures and resulted in higher compressive strength. Moreover, with the addition of limestone, the (dTG) curve also changed, indicating a change in the phases where monosulphoaluminate was converted to monocarboaluminate. This change can explain the increase in compressive strength. This study showed that, with a good combination of materials and favourable optimization, a higher amount of cement can be substituted with SCM providing satisfactory mortar properties.

Acknowledgement

The research presented is part of a scientific project “*Alternative binders for concrete: understanding the microstructure to predict durability, ABC*” (UIP-05-2017-4767), funded by the Croatian Science Foundation.

References

- [1] Flegar, M., Serdar, M., Londono-Zuluaga, D., Scrivener, K. Regional Waste Streams as Potential Raw Materials for Immediate Implementation in Cement Production // *Materials*, 13 (2020), 23; 5456, 15 doi:10.3390/ma13235456
- [2] Lothenbach, B., Scrivener, K., and Hooton, R. D.: Supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.*, 41 (2011) 12, pp. 1244–1256.
- [3] European Coal Combustion Products Association (ECOBA): Production and utilisation of CCPs in 2016 in Europe (EU 15).
- [4] Tang, H. C. W., Wang, Z., Liu, Y.: Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater* 178 (2018), pp. 178,288-300.
- [5] Lima, M. S. S., Thives, L. P., Haritonovs, V. and Bajars, K.: Red mud application in construction industry: Review of benefits and possibilities, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Riga, 2017.
- [6] Liu, X. and Zhang, N.: Utilization of red mud in cement production: A review, *Waste Manag. Res.*, vol. 29 (2011) 10, pp. 1053–1063.
- [7] Khairul, M. A., Zanganeh, J. and Moghtaderi, B.: The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud, *Resour. Conserv. Recycl.*, 141 (2019), pp. 483–498.
- [8] Danner, T. and Justnes, H.: bauxite Residue as Supplementary Cementitious Material – Efforts to Reduce the Amount of Soluble Sodium, *Nord. Concr. Res.*, 62 (2020) 1, pp. 1–20.
- [9] Kumar, A. and Kumar, S.: Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization, *Constr. Build. Mater.*, 38 (2013), pp. 865–871.
- [10] Yang J., and Xiao, B.: Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process, *Constr. Build. Mater.*, 22 (2008) 12, pp. 2299–2307.
- [11] Kavas, T.: Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick, *Build. Environ.*, 41(2006)12, pp. 1779–1783.
- [12] Ribeiro, D. V., Labrincha, J. A. and Morelli, M. R.: Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement, *Mater. Res.*, 14 (2011) 1, pp. 60–66.
- [13] Ribeiro, D. V., Labrincha, J. and Morelli, M.R.: Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement, *Materials Research-ibero-american Journal of Materials*, 14 (2011) pp. 60–66.
- [14] Taylor, H. F. W.: *Cement chemistry*, 2nd ed. London: Thomas Telford Services Ltd, 1997.

- [15] Bizzozero, J.: Hydration and dimensional stability of calcium aluminate cement based systems, École polytechnique fédérale de Lausanne - EPFL, Lausanne, 2014.
- [16] Jawed, I. and Jan, S.: ALKALIES IN CEMENT: A REVIEW Effects of Alkalies on Hydration and Performance of Portland Cement, *Cem. Concr. Res.*, 8 (1978) 37–52.
- [17] Paula, E., Cheriaf, M. and Cavalcante, J.: Microstructure, mineralogy and environmental evaluation of cementitious composites produced with red mud waste, *Constr. Build. Mater.*, 67 (2013), pp. 29-36.
- [18] Scrivener, K., Snellings, R. and Lothenbach, B.: A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.
- [19] Kuzel, H. J. and Pollman, H.: HYDRATION OF C3A IN THE PRESENCE OF Ca(OH)_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ AND CaCO_3 , *Cem. Concr. Res.* , 21 (1991), pp. 885–895.

Strength development of calcium aluminate cement with slag

Alma-Dina Bašić¹, Martina Grubor, PhD², Asst. Prof. Marijana Serdar³, Ingrid Mikanovic, MSc⁴, Günther Walenta, PhD⁴

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, alma.dina.basic@grad.unizg.hr

² University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, martina.grubor@grad.unizg.hr

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

⁴ Calucem GmbH, Besselstrasse 8, Mannheim, Germany

Abstract

Calcium aluminate cement is used for various applications, in building chemistry, refractory and sewer rehabilitation industry, but its use for structural applications is limited because of the conversion process and limited amount of raw material for production. The addition of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) can inhibit the conversion process and prevent significant decrease in compressive strength. Moreover, the use of slag as a cement substitute has positive impact on the CO₂ footprint for cement industry. The aim of this paper is to present the influence of different types of GGBFS on mechanical properties of calcium aluminate cement mortar.

Key words: calcium aluminate cement, conversion, slag, stratlingite, compressive strength

Razvoj čvrstoće kalcij-aluminatnog cementa sa zgurom

Sažetak

Kalcij aluminatni cement koristi se za različite primjene, ali upotreba je ograničena zbog procesa konverzije i ograničene količine osnovne sirovine. Dodatak zgure može ublažiti proces konverzije i spriječiti nagli pad tlačne čvrstoće. Također, upotreba zgure kao zamjene za cement smanjuje negativan utjecaj proizvodnje cementa na okoliš. Cilj ovog rada je prikazati utjecaj nekoliko vrsta zgure različitog kemijskog sastava na razvoj tlačne čvrstoće morta s kalcij aluminatnim cementom.

Ključne riječi: kalcij aluminatni cement, proces konverzije, zgura, stratlingit, tlačna čvrstoća

1 Introduction

Calcium aluminate cement (CAC) has been used in the construction industry for more than 100 years and was patented in 1908 by Jules Bied. It was originally used to increase cement resistance to aggressive sulfates and chloride attacks [1]. In relation to Portland cement, other advantages also occur, such as rapid early strength gain, high wear resistance, and resistance to various chemical activities. Due to its unique properties, it is used for various purposes, some of them being emergency and rapid repairs, dam overflows, sewers, industrial floors, as a refractory material, for concreting in cold conditions and in grout mixes for tunnel linings [2,3]. Although it is used for various applications and is one of the most important non-Portland cements, its application is limited due to occurrence of conversion phenomena and limited quantity of the raw material (high quality bauxite) [2]. The production of calcium aluminate cement is 2 million t / year [4] and it is more expensive than Ordinary Portland Cement (OPC) [5]. Basic raw materials for the production of calcium aluminate cement are bauxite and limestone. The raw materials are blended, homogenized, and then melted or sintered at temperatures above 1450 °C (depending on the Al_2O_3 content) [4]. Accordingly, chemical composition of calcium aluminate cement differs from that of Ordinary Portland Cement (OPC). CAC contains higher proportion of alumina and lower proportion of silica compared to OPC [6].

Cement hydration is a chemical process in which minerals react with water to form hydration products. CAC has different hydration products compared to Portland cement. Monocalcium aluminate (CA) is the main phase of the calcium aluminate cement [7]. In contact with water, calcium (Ca^{2+}) and aluminate ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) ions form four main phases during cement hydration. The first phases, CAH_{10} and C_2AH_8 , are referred to as metastable hydrates. Over time, a stable C_3AH_6 hydrate forms from the metastable hydrates [4,5]. With the appearance of C_3AH_6 , an AH_3 gel is formed, and water is subsequently released. The conversion process is highly dependent on the temperature and relative humidity of the environment. The conversion is a thermodynamically unavoidable process [7]. The metastable hydrate CAH_{10} forms at temperatures < 15 °C. At temperatures > 30 °C, the initial form of metastable hydrate is C_2AH_8 , while at temperatures between 15 °C and 30 °C, both metastable hydrate and AH_3 gel are formed [1,5]. When the temperature rises above 30 °C, the reaction kinetics increases and C_3AH_6 and AH_3 are formed in a short time. The temperature to which the material is exposed determines relative amounts of hydrates formed during hydration of the calcium aluminate cement. Stable hydrates are formed after a certain period of time when the material is exposed to sufficient relative humidity and if temperature of the material is above 20 °C for at least a certain part of the material's lifetime [5]. The CA hydration process is shown in the following equations [1, 5, 7, 8, 9]:



These reactions take place in the presence of a solution. The reaction phases are dissolved and the products precipitate from the solution. When stable hydrates begin to form, they will be formed even if the temperature drops during the curing time. The low-density hexagonal phases of metastable hydrates (CAH_{10} and C_2AH_8) fill the space at the beginning of the CAC cement hydration, conferring higher early strength. However, cubic phases of stable hydrates (C_3AH_6 and AH_3) form during the conversion process, decreasing the compressive strength [1,7]. The porosity of the cement matrix increases, which also leads to a decrease in strength, and the bonds between C_3AH_6 and AH_3 become weaker than the bonds between CAH_{10} and C_2AH_8 even at similar porosity [10]. Furthermore, when the minimum strength is reached, the water released by the conversion process can still participate in the hydration of the remaining (non-hydrated) cement particles and thus increase the long term strength [7, 8].

The aim of this study was to investigate in which way the replacement of 30 % of calcium aluminate cement with slag influences development of compressive strength of CAC mortar. Five mixtures with laboratory milled slag, one mixture with industrially milled slag, one mixture with quartz, and one reference mix, were prepared. The specimens were cured in water bath at 20 °C. The compressive strength of all mortar mixtures was monitored for 28 days.

2 Effect of CAC replacement by slag on compressive strength

The influence of the conversion process on compressive strength can be reduced by the use of chemical and / or mineral additives. Most studies have been carried out with the addition of pozzolanic materials such as slag, fly ash, and silica fume [11,12]. Unground BFS (blast furnace slag) has a maximum particle size of 5 mm and is predominantly glassy. The high glass content allows latent hydraulic reactivity, which in turn enables the use of slag in the production of composite cements and for concrete production as a cement substitute. In order to achieve slag compatibility with cement and higher reactivity, the slag in grains must be milled into smaller

particle sizes [13]. The addition of slag alters hydration products of CAC cement. Slag contains 32-42 % of silicon dioxide (SiO_2) in its chemical composition [13]. A large amount of SiO_2 in the composition of slag forms compounds that inhibit the conversion process in the conversion of hydrates [3]. Silica reacts with calcium aluminate cement hydrates to form C_2ASH_8 hydrate (Stratlingite or Gehlenite hydrate) [1,3,10,14]. The amount of C_2ASH_8 formed depends on the activation ability of slag to release silica. The activation is assisted by a small amount of alkali metal hydroxide phases in the CA cement [15]. The C_2ASH_8 hydrate formation process is shown in the following equations [1]:



The reaction of silica with CAC hydrates reduces the formation of C_2AH_8 , and C_2ASH_8 is formed at the same time, depending on the amount of slag with which the cement is replaced. This reaction is beneficial because it reduces the effects of the conversion process, and so no significant decrease in compressive strength can be expected [1,16]. Moreover, the strength increases continuously until the hydration process is completed. The slag has a favourable effect on mechanical properties up to a certain percentage of replacement. If the replacement percentage is too high, the hydraulic phases in the composition are reduced and a large amount of unreacted slag particles ultimately remain. The hydration of unhydrated CAC particles is hindered, resulting in the decrease of compressive strength.

Previous studies by Kirca [16] have shown that a 20 % replacement of cement by slag has no significant effect on the hydration products formed during the hydration of CAC. The conversion of metastable hydrates to stable hydrates was not hindered, suggesting that the addition of 20 % slag is not sufficient to avoid a reduction in strength during the conversion process. On the other hand, if the replacement percentage is increased to 40 %, 60 % and 80 %, the strength reduction after 28 days is avoided due to formation of sufficient amount of Stratlingite [16].

In addition, the formation of C_2ASH_8 (Stratlingite) depends on the temperature to which the sample is exposed. As the curing temperature increases, Stratlingite is formed more slowly than C_3AH_6 and cannot completely replace it. Thus, Kirca et al. [10] conducted a study on the effect of curing temperature and percentage of cement replacement by slag on the development of compressive strength of mortar. The authors concluded that mixes with 20 % replacement by slag cured at a temperature of 20 °C reached the maximum strength after 28 days. When cured at 30 °C, 40 °C and 50 °C, the maximum compressive strength is reached after 210 days, regardless of the curing temperature. Even when 40 % is replaced by slag, the com-

pressive strength increases continuously irrespective of the curing temperature. There is no visible decrease in strength over time due to the formation of Stratlingite instead of the conversion of CAH_{10} hydrate to C_3AH_6 hydrate. The ability to form Stratlingite is reduced at higher temperatures (50 °C) due to faster formation of C_3AH_6 hydrates. Therefore, the lowest strengths are obtained by curing samples at 50 °C. The favourable influence of slag on the development of compressive strength was also confirmed by Majumdar et al. [15]. They investigated the development of compressive strength of concrete with the addition of slag depending on the w/c ratio and curing temperature. Specimens were cured at temperatures of 20 °C and 40 °C. It was concluded that by replacing cement with a 50 % of slag prevents reduction in strength caused by conversion process.

The development of compressive strength mainly depends on the percentage of cement replacement by mineral additive, curing temperature and relative humidity. From the above examples, it can be concluded that the addition of slag has a positive effect on the development of CAC strength at later ages, but the main disadvantage of replacing cement with slag is that an increase in the percentage of replacement reduces the early strength of the concrete. By replacing the cement with a sufficient amount of slag (up to 50 %), the conversion process can be mitigated or even prevented.

3 Mechanical properties of calcium aluminate cement with slags

The research presented in this paper is carried out as part of the EU project “Development of a new innovative ECO_2 Flex product” under the coordination of Calucem. The aim of the project is to develop an innovative technological solution in the construction industry to reduce CO_2 emissions and energy in the production of cement. In order to minimize the impact of CO_2 emissions, a part of the CAC will be replaced by supplementary cementitious materials (SCM). To evaluate the impact of replacing the CAC with slag, 30 % of cement was replaced with slag. Five laboratory milled BFS samples (S1, S2, S3, S4, S5) and one industrially milled slag sample (S6) were investigated. In addition, a mixture with 30 % replacement by quartz (Q) and a reference mix (CAC) were prepared. A special calcium aluminate cement produced by Calucem was used. CEN standard sand and tap water were used to prepare the mortar mixes. The slags were first dried in an oven at 105 °C for 24 hours and then milled in a laboratory disk mill for 5 minutes. The compressive strength of mixes was determined according to EN 14647. The composition of the mortar was 1350 g CEN standard sand, 500 g binder (CAC and/or slag and/or Quartz), and 200 g water. The water to binder ratio was 0.4 for all mortar mixes. Before mortar casting, all components were conditioned at 20 °C. The specimens were covered and stored for 6h in metal moulds measuring 40x40x160 mm in a humidity chamber at 20 °C, with a

relative humidity of 95 %. After 6h, the specimens were demoulded and tested for the six-hour compressive strength. The remaining specimens for testing compressive strength after 24h, 7d and 28d were stored in water at 20 °C in the humidity chamber until the day of testing.

3.1. Characterization of slag

Main chemical constituents of all slags used are SiO_2 , CaO and Al_2O_3 . Compared to CAC cement, all slags have a significantly higher amount of SiO_2 and lower amount of Al_2O_3 . The glass content of all slags was higher than 99 % determined by quantitative X ray diffraction using the Rietveld method. Five of the slags (S1, S2, S3, S4, S5) were obtained in grains ($d_{50}=0,66$ to 1,2 mm) and one was obtained industrially milled (S6). In order to achieve slag compatibility with cement, and to ensure higher reactivity, the slag in grains was milled for 5 minutes in a laboratory disk mill. Prior to milling, the slags were dried in oven for 24h at 105 °C due to their varying moisture content. The particle size distribution by laser diffraction for all slags, quartz powder, and CAC, is shown in Figure 1.

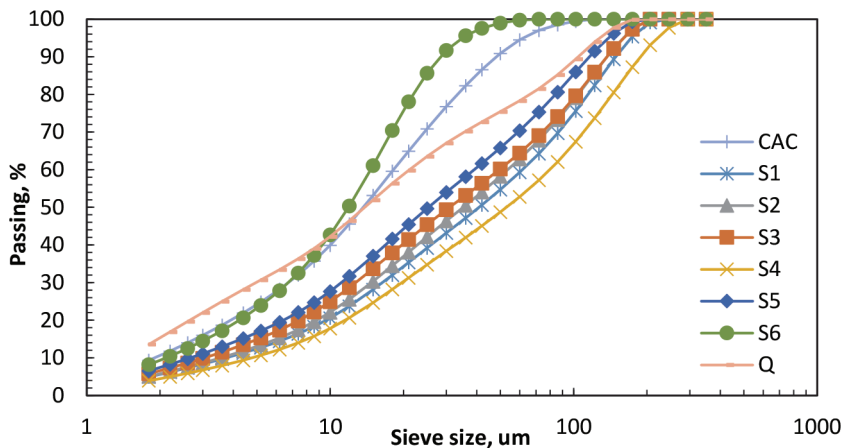


Figure 1. Particle size distribution of slags and CAC

The results show a similar particle size distribution for all laboratory-milled slags. The values of Blaine, d_{10} , d_{50} and d_{90} of slag, quartz and calcium aluminate cement used, are shown in Table 1. It can be observed that slag that was industrially milled (S6) had the finest particle size distribution compared to other slags, but also compared to cement and quartz used in this study.

Table 1 Comparison of Blaine, d_{10} , d_{50} and d_{90}

	Blaine [cm^2/g]	d_{10} [μm]	d_{50} [μm]	d_{90} [μm]
CAC	4000	1,9	14	49
S1	2076	3,6	41	160
S2	2178	3,6	36	145
S3	2407	3	31	145
S4	1768	4,9	52	190
S5	2668	2,6	26	125
S6	3715	2,1	12	29
Q	2800	0	15	110

3.2. Development of strength

The compressive strength test results are shown in Figure 2 and the results of the compressive strength relative to the pure CAC mix are shown in Figure 3. The measurements were carried out on mortar samples after 6 hours, 24 hours, 7 days, and 28 days. It can be observed that mixes with the 30 % slag replacement have lower initial strength than the pure CAC mix. Moreover, the replacement of CA cement with slag reduced the compressive strength by 30-60 % in the first 6 hours.

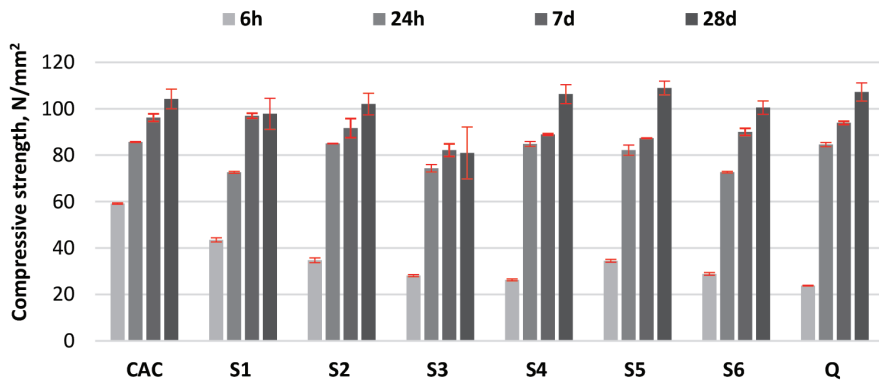


Figure 2. Compressive strength results of mortars

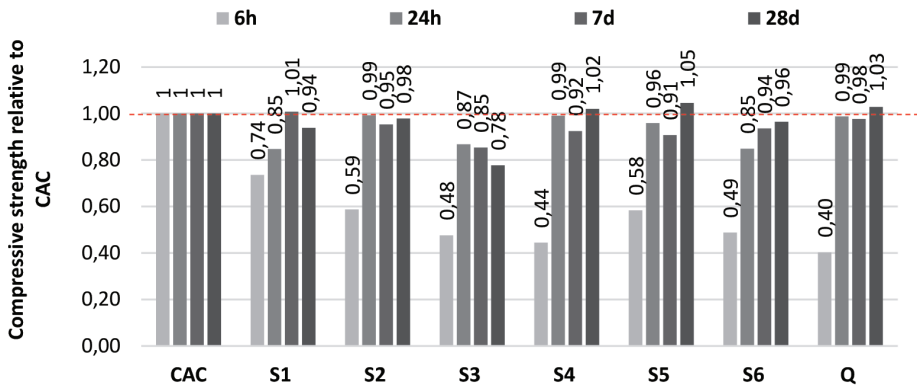


Figure 3. Relative compressive strength of mortars

After 24h, the slag starts to contribute to the development of compressive strength in all mixes. In fact, after 24 hours, all the mixes have compressive strength similar to that of the reference CAC mix. The highest initial compressive strength was developed by the mixture with slag S1. Moreover, at later ages (7 and 28 days), the mixes replaced with S1, S4 and S5 slags even have higher compressive strength compared to the pure CAC mix. Mixes S4 and S5 have higher compressive strength after 28 days compared to the pure CAC mixture. After 28 days of curing, more than 90 % of the CAC compressive strength is achieved in all mixes, except for the slag S3. It should be noted that quartz, which has a filler effect in the OPC systems, actively participates in hydration in the CAC systems and contributes to the development of compressive strength. The analysis of results shows that a 30 % replacement of the CAC cement by slag can cause a uniform development of compressive strength.

4 Conclusion and further research

The main goal of this study was to determine the effect of replacing 30 % of the calcium aluminate cement with slag on the development of compressive strength of mortar. From the analysis of the results, it can be concluded that the slags used in this study have the potential to replace some of the CAC cement in mortar. The initial compressive strengths are lower than the compressive strength of the reference mix. By replacing 30 % of the cement with slag, almost the same compressive strength can be achieved after 28 days as in the reference mix. Conversion process in CAC cement can be predicted by curing specimens at elevated temperatures (38 °C and 50 °C), and so further research will focus on the methods aimed at accelerating conversion process at elevated temperatures.

Acknowledgement

The research presented in the paper is a part of scientific projects “Development of a new innovative ECO₂Flex product” (KK.01.2.1.02.004)”, funded by the European Union, European Regional Development Fund, and “Alternative binders for concrete: understanding the microstructure to predict durability, ABC” (UIP-05-2017-4767), funded by the Croatian Science Foundation.

References

- [1] Yang, H.J., Ann, K.Y. and Jung, M.S.: Development of strength for calcium aluminate cement mortars blended with GGBS, *Advances in Material. Science Engineering*, volume 2019, 2019
- [2] Fu, T., Adams, M.P. and Ideker, J.H.: A Preliminary Study on A Calcium Aluminate Cement Concrete Maturity Theory in Predicting Conversion, *14th International Congress on the Chemistry of Cement*, Beijing, October, 2015,
- [3] Quillin, K., Osborne, G., Majumdar, A. and Singh, B.: Effects of w/c ratio and curing conditions on strength development in BRECEM concretes, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 4. pp. 627–632, 2001
- [4] Bizzozero, J.: Hydration and dimensional stability of calcium aluminate cement based systems, vol. 6336, 2014.
- [5] Ideker, J.H., Scrivener, K.L., Fryda, H. and Touzo, B.: *Calcium aluminate cements* (Chapter), Lea`s Chemistry of Cement and Concrete (ur. Hewlett, P., Liska, M.), England: Elsevier Science Publishers Ltd., 2019
- [6] Barborak, R.: Calcium Aluminate Cement Concrete (Class CAC Concrete), *Texas Department of Transportation*, Special Specification SS-4491 Tip Sheet, vol. 3, no. August, p. 6, 2010.
- [7] Adams, M.P., Lute, R.D., Moffatt, E.G. and Ideker, J.H.: Evaluation of a Procedure for Determining the Converted Strength of Calcium Aluminate Cement Concrete, *Journal of Testing and Evaluation* 46, no. 4 (2018), pp. 1659-1672
- [8] Scrivener, K.: *Calcium aluminate cements* (Chapter), *Advanced Concrete Technology* (ur. Newman, J., Choo, B.S.) England: Elsevier Science Publishers Ltd., 2003
- [9] CEN/TC 51 N802, prEN 14647. *Calcium aluminate cement: composition, specifications, and conformity criteria*. Lisbon; 2004
- [10] Kirca, Ö., Özgür Yaman, I. and Tokyay, M.: Compressive strength development of calcium aluminate cement-GGBFS blends, *Cement and Concrete Composites*, vol. 35, no. 1, pp. 163–170, 2013

- [11] Colleparidi, M., Monosi, S. and Piccioli, P.: The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of aluminous cement, *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 5. pp. 961–968, 1995
- [12] López, A.H., Calvo, J.L.G., Olmo, J.G., Petit, S. and Alonso, M.C.: Microstructural evolution of calcium aluminate cements hydration with silica fume and fly ash additions by scanning electron microscopy, and mid and near-infrared spectroscopy, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 91, no. 4. pp. 1258–1265, 2008
- [13] Matthes, W., Vollpracht, A., Villagran, Y., Kamali-Bernard, S., Hooton, D, Gruyaert, E., Soutsos, M. and De Belie, N.: Ground Blast-Furance Slag (Chapter), *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials* (ur. De Belie, N., Soutsos, M. and Gruyaert, E.): *State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4.*, pp. 1-53, 2018.
- [14] Heikal, M., Radwan, M.M., Saad Morsy, M.: Influence of curing temperature on the physico-mechanical, characteristis of calcium aluminate cement with air-cooled slag or water-dooled slag, *Directory of Open Access Journals*, vol. 48, no. 4, pp. 185-196, 2004
- [15] Majumdar, A.J., Singh, B. and Edmonds, R.N.: Hydration of mixtures of 'Ciment Fondu' aluminous cement and granulated blast furnace slag, *Cement and Concrete Research*, vol. 20, no. 2. pp. 197–208, 1990
- [16] Kirca, Ö.: Temperature Effect on Calcium Aluminate Cement Based Composite Binders, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, July, 2006.

Assessing chemical reactivity of blast furnace slag as supplementary cementitious material

Josipa Skočibušić Pejić¹, Martina Grubor, PhD², Asst. Prof. Marijana Serdar³, Markus Schmid, PhD⁴, Günther Walenta, PhD⁴

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, josipa.skocibusic.pejic@grad.unizg.hr

² University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, martina.grubor@grad.unizg.hr

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

⁴ Calucem GmbH, Besselstrasse 8, Mannheim, Germany

Abstract

Reduction of CO₂ emissions associated with cement production represents one of the most important and urgent challenges for the cement industry. Thus, the replacement of cement by Supplementary Cementitious Materials (SCM) has been a widely adopted industrial practice. The reactivity of slag is considered to be an important parameter for assessing its suitability as a cement replacing material in concrete. The aim of this paper is to determinate reactivity of slag originating from various sources using isothermal calorimetry and bound water measurement.

Key words: blast furnace slag, supplementary cementitious material, isothermal calorimetry, bound water

Procjena kemijske reaktivnosti zgure visoke peći kao dopunskog cementnog materijala

Sažetak

Smanjenje emisije CO₂ povezano s proizvodnjom cementa predstavlja jedan od najvažnijih i najhitnijih izazova za cementnu industriju. Stoga je zamjena cementa mineralnim dodatcima široko prihvaćena industrijska praksa. Reaktivnost zgure smatra se važnim parametrom za procjenu njezine prikladnosti kao mineralnog dodatka za cement u betonu. Cilj ovog rada je utvrditi reaktivnost zgure različitog podrijetla koristeći izotermalnu kalorimetriju i određivanje sadržaja vezane vode.

Ključne riječi: zgura visokih peći, zamjenski cementni materijal, izotermalna kalorimetrija, vezana voda

1 Introduction

Carbon dioxide emissions are the main driver of global climate change. It is now known that the world must reduce emissions to avoid the worst effects of climate change. Emissions growth has slowed over the last few years, but they have yet to reach their peak [1]. Although cement is a low-cost and low-energy product compared to other construction materials, it is responsible for 6 – 8 % of anthropogenic CO₂ emissions due to its extremely large-scale production. Reduction of CO₂ emissions associated with cement production is thus one of the most important and urgent challenges facing cement industry. Cement industry is undoubtedly facing an increasing demand for supplementary cementitious materials (SCMs) as an alternative to cement and, in this context, the global and local availability of the materials should also be considered as an important parameter [2].

As separate materials and in contact with water, most SCMs do not show significant hydraulic reactions of cementitious value. However, as fine powders and under alkaline aqueous conditions, or in contact with calcium hydroxide, they will react chemically through the „pozzolanic reaction“ [2]. Nowadays, the replacement of cement with SCMs is a widespread industrial practice. Moreover, the development and characterization of SCMs has attracted considerable attention in the academia and research circles for at least the last 20 years [3-7].

SCMs affect the hydration kinetics of clinker phases and of the formed products. In general, the reaction of SCMs is slower than that of the main clinker phase in Portland cement. SCMs affect hydration of blended or composite cements in two main ways. First, through physical effects that also occur in inert fine powders or fillers, hence the collective term “filler effect” [8-9]. Secondly, by participating in chemical reactions to form hydration products. This chemical reaction follows the dissolution-precipitation mechanism, where three main components are the solid reactants, the solid hydrate reaction products, and the (pore) solution.

Two main types of chemical behaviour are distinguished for the SCM as a solid reactant. If the reaction of the SCMs consumes Ca(OH)₂, it is called a “pozzolanic reaction”. If the reaction does not require Ca(OH)₂ or if it is used mainly for pH activation, then it is called a “hydraulic” or “latent hydraulic reaction”. The fineness of SCMs affects the reaction kinetics of SCM particles as their dissolution increases with an increase in surface area. Moreover, the number of nucleation sites for hydrate precipitation and growth increases with a decrease in SCM particle size, which can accelerate the hydration process for both SCMs and clinker phases at early ages [2]. In addition, the presence of SCMs in blended cements increases the early hydration of the cement phases by the filler effect, which provides additional water and space for the formation of hydration products due to of the effectively lower water- clinker ratio [2].

1.1 Ground granulated blast furnace slag

Ground granulated blast furnace slag (GGBFS), a by-product of the steel manufacturing industry, is used as an effective partial cement replacement material and has already been shown to improve various properties of concrete. It was found that the reactivity as well as chemical composition of GGBFS depends on the properties of GGBFS, which in turn depend on the source of GGBFS, the type of raw material used, the process and the cooling rate [10-11]. GGBFS originating from the same blast furnace has a fairly constant composition, as consistent quality of pig iron is a priority for blast furnace operations [11]. Blast furnace slag is formed by the combination of earthy constituents of iron ore with limestone flux. When the molten slag is quickly quenched with water in a pond, or cooled with powerful jets of water, it forms a fine, granular, almost completely non-crystalline, glassy form known as granulated slag, which has latent hydraulic properties [10]. The latent hydraulic reactivity of GGBFS was discovered in the 19th century by Emil Langen. Due to its latent hydraulic properties, GGBFS begins to hydrate when it comes into contact with water. However, this reaction decreases with time. The GGBFS hydration continues only in the presence of an activator. The activation potential depends largely on GGBFS properties [11]. Basically, major chemical constituents of blast furnace slag are CaO, MgO, SiO₂ and Al₂O₃. Its crystalline phases are mainly of the melilite solid solution series, β -C₂S and amorphous phase. Most of the minerals are non-hydraulic, except for small amounts of β -C₂S [12]. In general, the reactivity of the GGBFS increases with an increase in CaO, Na₂O, and Al₂O₃ content, and with a decrease in SiO₂, FeO, TiO₂, MnO, and MnS content [11]. One of the classical methods to increase slag reactivity is to increase fineness of the slag [13].

1.2 Assessment of slag reactivity

The reactivity of slag is considered to be an important parameter for assessing its suitability as a cement replacement material in concrete [14]. To better understand the factors affecting the reaction rate of SCMs, it is important to have a good method to evaluate the degree of reaction of these materials independently of the degree of reaction of the clinker component [15]. In this paper, the reactivity of GGBFS was measured using isothermal calorimetry and bound water measurement [16-18]. These methods were developed and proposed by the RILEM TC-267 committee as standard test methods for measuring chemical reactivity of supplementary cementitious materials [17]. Both methods are used to evaluate chemical reactivity of an SCM as determined by cumulative heat release or bound water content measurement of hydrated pastes consisting of the SCM, calcium hydroxide, calcium carbonate, potassium sulphate, and potassium hydroxide cured at 40 °C for 3 and 7 days. Results of these test methods can be used to estimate potential contribution

of an SCM to the development of strength, or other properties such as lower permeability, when used with Portland cement. It is important to note no distinction is made in these two test methods between hydraulic and pozzolanic reactivity.

The basic principle of the R^3 test methods is to use a simplified model system to measure response of an SCM separately. This is done to avoid interference and overlap with the clinker hydration reactions that occur in a blended cement system. In addition, the use of laboratory chemicals instead of local Portland cements avoids many variations in the composition of the material. Isothermal calorimetry is a common method for testing cementitious materials. It is used to quantify both the very early reactions (first hour or hours), the onset of the main reaction, and the main hydration peak. The development of most of the properties of cement-based materials is related to their heat release [19].

2 Materials and methods

The main objective of this paper is to determine the reactivity of slags of various fineness as well as the reactivity of slags of various origin. Six distinct types of slags were analysed: GGBFS 1, GGBFS 2, GGBFS 3, GGBFS 4, GGBFS 5. The main constituents of all these slags are SiO_2 (35.40 % – 39.80 %), CaO (34.70 % - 42.50 %) and Al_2O_3 (10.80 % - 13.50 %). For the reactivity study of slag of the same origin, the duration of milling was different for the samples. For the reactivity study of the slags of different origin, the particle size distribution is relatively similar, with d_{50} ranging from 26 to 53 μm .

The reactivity of the materials was studied using a calorimetry test developed under the RILEM TC-267 committee and referred to as the R^3 test [16-18]. Samples of the pastes containing SCM, sulphate, and alkali additive were placed in an isothermal calorimeter TAM Air with 8 channels at a temperature of 40 °C for 3 and 7 days to obtain the total heat release. For each mix, a ratio of $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{SCM}$ and CaCO_3/SCM of 3 and 1/2, respectively, was used, while the alkali solution was prepared with 3M of K in the form of KOH and K_2SO_4 . All materials and reagents were weighed, mixed and stored at 40 °C in the oven for 24 h before the experiment. A high shear mixer was operated at 1600 ± 50 rpm for 2 min to obtain a homogeneous paste, which was immediately poured into a glass vial and placed in an isothermal calorimeter.

Samples of the pastes for bound water measurement were prepared in the same manner as for isothermal calorimetry. The prepared pastes were placed in a plastic container and then cured in the oven at $40 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ for 7 days. The pastes were then milled in a mortar and dried at 350 °C for 2 hours. The bound water was calculated by measuring mass change before and after heating at 350 °C. The evaluated chemically bound water of the hydration pastes is used as a measure of the hydraulic reactivity of the SCM.

3 Results

To determine whether the R^3 test is suitable for detecting different reactivity of slags of the same origin but of different milling time (different fineness), the GGBFS 5 slag with different particle size was analysed by isothermal calorimetry and by measurement of bound water. The results are shown in Figure 1 and Table 1. Slags are named GGBFS 5A (time of milling 30 s), GGBFS 5B (time of milling 90 s) and GGBFS 5C (time of milling 180 s) where fineness increases from A to C.

The results of the R^3 test, shown in Figure 1 and Table 1, reveal that the reactivity of GGBFS 5 increases with an increase in milling time. GGBFS 5A has the coarser particle size and the lowest reactivity. On the other hand, the GGBFS 5C slag with the finest particle size has the highest reactivity. The heat release after 3 days ranged from 105.6 Jg^{-1} (GGBFS 5A) to 202.8 Jg^{-1} (GGBFS 5C) and the bound water content ranged from 4.5 % to 6.3 %. The heat release value and the bound water content increase with an increase in fineness of GGBFS 5 slag. Both isothermal calorimetry and the bound water method can detect differences in the reactivity of slag from the same origin with the change in fineness.

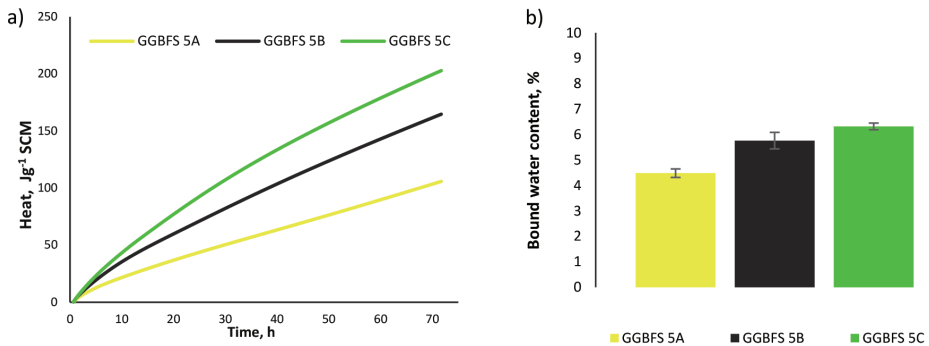


Figure 1. R^3 test of GGBFS 5 slag with different fineness values a) heat of hydration; b) bound water content

Table 1. Heat release for GGBFS 5 slag with various fineness values after 24 and 72 hours and bound water content after 7 days

Slag	Time of milling, [s]	Heat release 24 h, [$\text{Jg}^{-1} \text{ SCM}$]	Heat release 3 d, [$\text{Jg}^{-1} \text{ SCM}$]	Bound water, [%]
GGBFS 5A	30	42.4	105.8	4.5
GGBFS 5B	90	68.8	164.7	5.8
GGBFS 5C	180	89.5	202.8	6.3

In addition, the R^3 test was performed to determine reactivity of laboratory milled slags of similar particle size distribution (PSD) but of different origin GGBFS 1, GGBFS 2, GGBFS 3, GGBFS 4 and GGBFS 5. Quartz was used as an inert material due to its ability to distinguish the so-called filler effect from the contribution of a reactive mineral addition (GGBFS), [20]. The results are shown in Figure 2, Figure 3, Table 2, and Table 3.

Table 2. Ranking of slags based on heat release (isothermal calorimetry)

Rank	Slag	Particle size d_{50}' [mm]	Heat [Jg^{-1} SCM]			
			6 h	24 h	3 d	7 d
1	GGBFS 1	41	99.8	241.8	358.3	382.0
2	GGBFS 2	36	66.9	197.4	316.6	349.5
3	GGBFS 3	53	36.6	129.4	255.3	312.1
4	GGBFS 4	26	29.1	117.2	220.1	268.2
5	GGBFS 5	31	21.2	77.6	157.1	207.5

According to Figure 2 and Figure 3, all tested slags show significantly higher reactivity than the reference quartz. The release of heat from tested slags after 7 days ranges from 207.5 Jg^{-1} (for GGBFS 5) to 382.0 Jg^{-1} (for GGBFS 1). Compared to other slags, GGBFS 1 slag shows the best results in initial reaction, besides the higher amount of heat released over the 7 days. According to heat release, GGBFS 1 is followed by GGBFS 2 and then by GGBFS 3 and GGBFS 4, while the slag with the lowest heat release is GGBFS 5. The results of the bound water test (Figure 3) show almost the same trend in reactivity as the results of the isothermal calorimetry test. The bound water content for the tested slags ranges from 4.7 % (for GGBFS 5) to 7.3 % (for GGBFS 1). Based on the bound water results, the most reactive slag is GGBFS 1, which is followed by GGBFS 2, GGBFS 4 and GGBFS 3, while the least reactive slag is GGBFS 5.

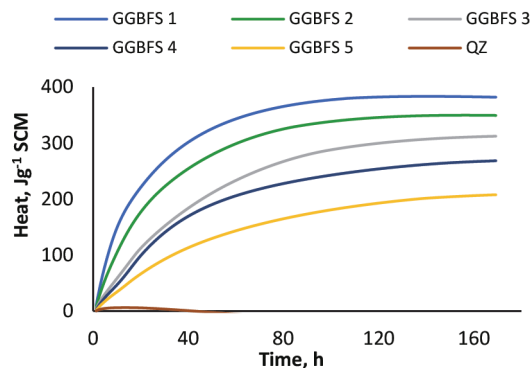


Figure 2. Heat release for slags from different origin, GGBFS 1, GGBFS 2, GGBFS 3, GGBFS 4, GGBFS 5 and quartz (QZ) as reference

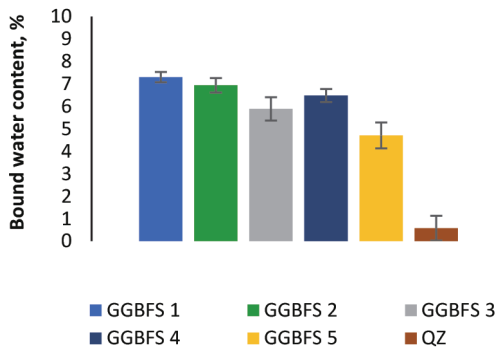


Figure 3. Bound water content for slags from different origin, GGBFS 1, GGBFS 2, GGBFS 3, GGBFS 4, GGBFS 5 and quartz (QZ) as inert material

Table 3. Ranking of slags based on bound water content

Rank	Slag	Bound water content [%]
1	GGBFS 1	7.3
2	GGBFS 2	6.9
3	GGBFS 4	6.5
4	GGBFS 3	5.9
5	GGBFS 5	4.7

4 Conclusion and future perspectives

The main objective of the present study was to evaluate reactivity of various available slag types with similar particle size distribution. In addition, the applicability of isothermal calorimetry and bound water measurement for the reactivity of ground granulated blast furnace slag was evaluated. It was found that differences in the reactivity of the slags can be detected using the R³ protocol for isothermal calorimetry and the bound water test method. The difference in reactivity can be found both for similar slags with different fineness and for the slags of different origin. When there is a significant difference in particle size distribution, then higher fineness of slag results in higher reactivity. However, if the particle size distribution is similar, the reactivity is influenced mainly by the slag chemistry.

These results point to the possibility of using isothermal calorimetry and bound water measurement for slag reactivity prediction. Future research will involve the analysis of slag reactivity with calcium aluminate cement based on isothermal calorimetry, as well as the assessment of phases that are forming through the TGA and XRD analysis. The objective will be to determine which properties of slags are responsible for lower or higher reactivity in the calcium aluminate cement environment.

Acknowledgement

The research presented in the paper is part of scientific projects “Development of a new innovative ECO₂Flex product” (KK.01.2.1.02.004), funded by the European Union, European Regional Development Fund, and „Alternative binders for concrete: understanding the microstructure to predict durability, ABC” (UIP-05-2017-4767), funded by the Croatian Science Foundation.

References

- [1] Ritchie, H. and Roser, M.: CO₂ and Greenhouse Gas Emissions, 2017, <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions?country=>.
- [2] Skibsted, J. and Snellings, R.: Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends, *Cem. Concr. Res.*, 124, 2019
- [3] Lothenbach, B., Scrivener, K and Hooton, R. D.: Supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.*, 41 (12), pp. 1244–1256, 2011.
- [4] Siddique, R. and Khan, M. I.: *Supplementary Cementing Materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [5] Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E. and Scrivener, K.: Influence of limestone on the hydration of Portland cements, *Cem. Concr. Res.*, 38 (6), pp. 848–860, 2008.
- [6] Juenger, M. C. G. and Siddique, R.: Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cem. Concr. Res.*, 78, pp. 71–80, 2015.
- [7] Yang, K. H., Jung, Y. B., Cho, M. S., and Tae, S. H.: Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete, *J. Clean. Prod.*, 103, pp. 774–783, 2015.
- [8] Gutteridge, W. A. and Daizel, J. A.: Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement, 20, pp. 853–861, 1990.
- [9] Cyr, M., Lawrence, P. and Ringot, E.: Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration, *Cem. Concr. Res.*, 35 (4), pp. 719–730, 2005.
- [10] Pal, S. C., Mukherjee, A. and Pathak, S. R.: Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete, *Cem. Concr. Res.*, 33 (9), pp. 1481–1486, 2003.
- [11] De Belie, N., Soutsos, M. and Gruyaert, E.: *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*, Springer Nature, 2018.

- [12] Ionescu V., D.: The hydraulic potential of high iron bearing steel slags, Doctoral Thesis, The University of British Columbia, 1999.
- [13] Hallet, V., De Belie, N. and Pontikes, Y.: The impact of slag fineness on the reactivity of blended cements with high-volume non-ferrous metallurgy slag, *Constr. Build. Mater.*, 257, 2020.
- [14] Bougara, A., Lynsdale, C. and Milestone, N. B.: Reactivity and performance of blast furnace slags of differing origin, *Cem. Concr. Compos.*, 32 (4), 319–324, 2010.
- [15] Kocaba, V., Gallucci, E. and Scrivener, K. L.: Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes, *Cem. Concr. Res.*, 42 (3), pp. 511–525, 2012.
- [16] Avet, F., Snellings, R., Alujas Diaz, A., Ben Haha, M. and Scrivener, K., Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays, *Cem. Concr. Res.*, 85, , 2016.
- [17] Li, X.; Snellings, R.; Antoni, M.; Alderete, N.M.; Ben Haha, M.; Bishnoi, S.; Cizer, Ö.; Cyr, M.; de Weerd, K., Dhandapani, Y.; et al., Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1. *Mater. Struct. Constr.* 2018, 51, 151
- [18] Flegar, M., Serdar, M., Londono-Zuluaga, D., and Scrivener, K., Regional waste streams as potential raw materials for immediate implementation in cement production, *Materials.*, 13 (23), 2020.
- [19] Linderoth, O., Wadsö, L. and Jansen, D.: Long-term cement hydration studies with isothermal calorimetry, *Cem. Concr. Res.*, 141, 2021.
- [20] Scrivener, K., Snellings, R. and Lothenbach, B., *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2018.

Bond coefficients of beams reinforced with FRP and strengthened with FRC fibres

Besart Avdyli¹, Prof. Tomislav Kisicek², Prof. Naser Kabashi³

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, avdyli.besart@gmail.com

² University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, kisha@grad.hr

³ University 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 resin matrix continuous fibre (fibre reinforced polymer – FRP) reinforcement in concrete. The unique FRP characteristic, i.e. the fact that it is not susceptible to corrosion, makes its use particularly suitable in various situations. However, due to generally low elastic modulus and poor bond, the use of FRP results in larger crack widths under SLS, especially in the case of beams reinforced with GFRP bars. The work presented herein includes results obtained on 24 beams tested under four-point bending for GFRP beams with plain concrete and FRC. Based on this approach, the existing codes (ACI 380, Eurocode 2, ISIS, CSA etc.) are reviewed and compared, and also modified (adapted), in order to calibrate with the corresponding results. Corrective bond coefficients are introduced as reflection of bond characteristics, and fibre coefficients are used to quantify the effectiveness of FRC.

Key words: RC Beams, GFRP, CFRP, FRC, “kb” and “k1” values, fibre coefficients, cracks

Koeficijenti prionljivosti za grede od vlaknima pojačanog betona armirane FRP armaturom

Sažetak

Postoji više razloga zbog kojih bi građevinari i konstrukteri trebali koristiti pojačanje betona u vidu kontinuiranog vlaknastog armiranja s matricom od smole (polimera armiranog vlaknima – FRP). Jedinstvena karakteristika FRP-a, tj. otpornost na korozivno djelovanje, čini taj materijal posebno pogodnim za razne namjene. Međutim, zbog općenito niskog modula elastičnosti i lošeg vezivanja, primjena FRP-a dovodi do pojave većih pukotina u graničnom stanju uporabivosti, naročito u slučaju greda armiranih GFRP šipkama. U ovom radu prikazani su i rezultati dobiveni na 24 grede, koje su ispitane savijanjem u četiri točke, za GFRP grede s običnim betonom i FRC-om. Na temelju tog pristupa, postojeće norme se analiziraju (ACI 380, Eurokod 2, ISIS, CSA itd.) i uspoređuju te modificiraju (prilagođavaju) kako bi se provelo usklađivanje s odgovarajućim rezultatima. Uvode se korektivni koeficijenti vezivanja kao odraz karakteristika vezivanja, a koeficijenti vlakana koriste se za kvantificiranje djelotvornosti FRC-a.

Ključne riječi: B grede, GFRP, CFRP, FRC, vrijednosti “kb” i “k1”, koeficijenti vlakana, pukotine

1 Introduction

Corrosion as phenomenon is one of the most common causes of deterioration in reinforced concrete structures. The alkaline environment of concrete normally provides necessary protection to conventional steel reinforcement from the environment by a passive oxide layer that forms on the surface of reinforcement. Nonetheless, when exposed, or when the alkaline environment is neutralised, conventional steel corrodes and leads to spalling of the concrete cover. Codes of practice prescribe thick concrete covers for steel reinforcement, as well as other measures aimed at controlling concrete crack width and reducing permeability. Corrosion occurs also when chloride ions penetrate through concrete into reinforcement and cause breakdown of the protective oxide layer [7]. Deicing salts (parking lots, highway structures, marine structures) are a major factor of the chloride induced corrosion. Current methods for preventing corrosion, such as those relating to permeability or protection of reinforcing bars, are either costly or their long-term effectiveness has not been established.

The use of FRP in concrete for anti-corrosion purposes is expected to find applications in structures in or near marine environments, in or near the ground, in chemical and other industrial plants, in places where good quality concrete cannot be achieved, and in thin structural elements. Nowadays, FRP bars have increasingly become commercially available and are therefore utilized in many countries. A number of studies have recently been made about using FRP to replace conventional steel as flexural reinforcement [1]. There are several reasons why civil and structural engineers may need to use FRP reinforcement in concrete. The primary reason is durability, but other reasons include electromagnetic neutrality (steel reinforcement can interfere with magnetic fields), high strength (high strength of FRP reinforcement can be utilized to reduce congestion of reinforcement in certain applications), high cut ability in temporary applications, and lightweight. Most types of FRP bars exhibit a low elastic modulus and have a relatively poor bond to concrete. Direct yielding effects are larger crack widths and deflection under service load when compared to beams reinforced with conventional steel bars. Additional disadvantages are related to linear elastic behaviour with no yielding zone and long-term durability of FRP bars in concrete environment [2].

Fibres as micro-reinforcement is a concept applicable in various fields. FRC can be defined as concrete containing relatively short, discrete, discontinuous fibres. The fibres tend to bridge the cracks, control crack development and prevent occurrence of large cracks [3]. This feature of fibres tends to cover the yielding effects of low elastic modulus of beams reinforced with FRP, especially GFRP. The purpose of this study is also to determine whether the use of fibres can improve cracking resistance in concrete. Beams reinforced with GFRP bars are more influenced by excessive

crack widths and for that purpose three sets of identical beams (in terms of geometry and reinforcement) were tested in order to identify differences when fibres are added (plain concrete vs FRC). The cracking response of specimens was studied so as to clarify improvements that came as a result of fibre reinforcement.

2 Experimental works

The reinforced concrete beams consist of twenty-four specimens with various reinforcement, of rectangular cross section, measuring 130 mm in width and 220 mm in height. Each reinforced beam specimen contains two reinforcing bars placed at the bottom in a single layer, and two identical bars ($\phi 6$ conventional steel) placed as top reinforcement for each specimen (behaviour of FRP bars in compression section is not determined). The cross-section geometry and number of reinforcing bars were chosen so as to represent various reinforcement conditions (insufficient reinforcement, balanced reinforcement, and excessive reinforcement). Specimen geometry and loading conditions can be seen on Figure 1. Concrete mix was prepared with the requested class of concrete C 30/37. An adequate number of specimens were cast during beam casting. At the same time, another six prisms were cast with plain concrete and FRC. The FRC used in this investigation contained micro polypropylene fibres with a fibre fraction of 0.063% or 600gr/m³ [4]. Monofilament polypropylene fibres had a tensile strength of 650 Mpa, an elastic modulus of 3.5 GPa, and a length of 12 mm. This dosage of fibres is partly suggested by fibre manufacturer, and it also comes from our tendency to economise the FRC as related to conventional concrete. The test procedure is compliant with guidelines given in EN 14651: 2005, and it involves prismatic specimens measuring 150x150 x 600 mm, and three-point bending process, as presented in Figure 2. The specimens are notched at mid span with a high 25 mm notch.



Figure 1. Experimental setup for flexure test of notched specimens

The loading was performed with deformation control. The method allows measurement of force-displacement or force-CMOD (crack mouth opening displacement) relations. One transducer was installed on the specimen at mid-depth directly over supports to measure the corresponding deflection [8]. During the flexure testing, the same rate of the CMOD is maintained throughout the process.

Table 1. Test specimens

Specimen	Reinforcing type	Bar size, metric	Concrete type	Compaction cubic strength, Mpa	Flexure strength, Mpa	Reinforcing ratio ρ , %	Balanced reinforcing ρ_b , %
S1G1	GFRP	$\phi 6$	Plain	36.6	3.96	0.22	0.50
S2G2	GFRP	$\phi 8$	Plain	37.1	3.53	0.40	0.45
S3G3	GFRP	$\phi 10$	Plain	38.1	4.19	0.63	0.35
S1S1	Steel	$\phi 6$	Plain	36.6	3.56	0.22	1.59
S2S2	Steel	$\phi 8$	Plain	38.1	3.53	0.4	2.10
S3S3	Steel	$\phi 10$	Plain	38.1	3.62	0.63	2.99
S1G1F	GFRP	$\phi 6$	FRC	36.6	3.37	0.22	0.50
S2G2F	GFRP	$\phi 8$	FRC	37.1	3.47	0.40	0.45
S3G3F	GFRP	$\phi 10$	FRC	38.1	3.45	0.63	0.35

The testing set up for beams was organised in such a way that LVDTs were placed in critical positions for analysing cracks, deflections, and displacements. One LVDT was used to measure the width of the first flexural crack in the beam right under the concentrated force.

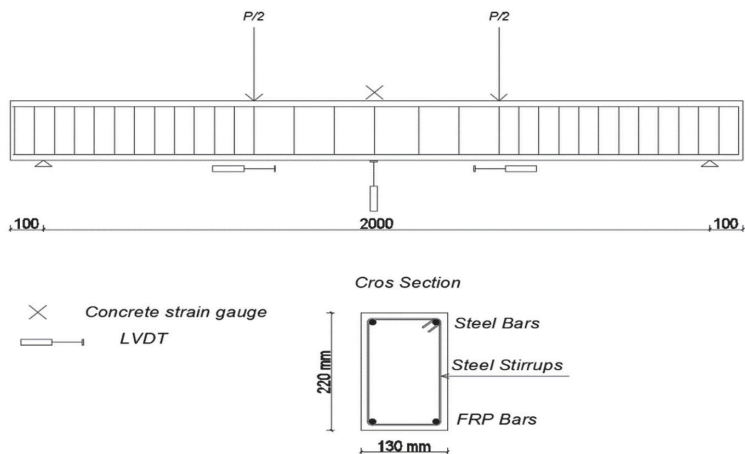


Figure 2. Beam details, instrumentation, and geometrical parameters of concrete beams

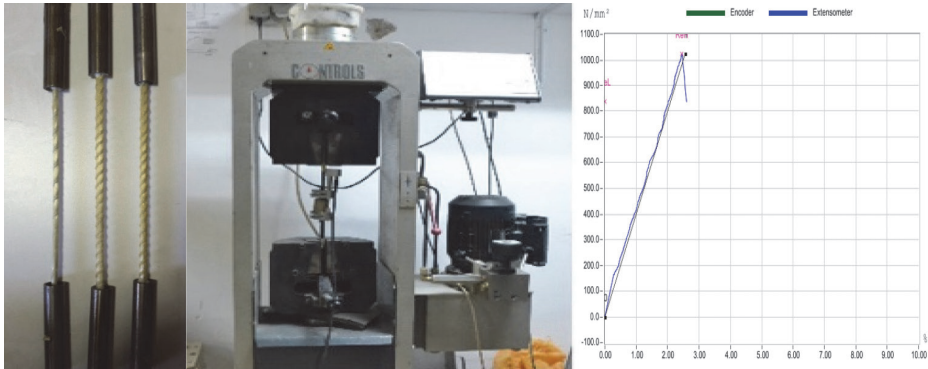


Figure 3. Specimens, testing, and determination of mechanical properties of GFRP bars

Mechanical properties of FRP bars were examined based on ASTM D 7205 [9]. The edges of the bars were embedded inside engraved metallic cylinders in order to avoid constriction or shear stress of the FRP bars as shown in Figure 2, [5]. Conventional steel properties were defined according to known parameters based on previous research works for S 500. GFRP (helically grooved) bars were used in this research [10].

Table 2. Mechanical properties of GFRP bars and conventional bars

Bar type	Bar size, metric	Elastic Modulus [Gpa]	Tensile strength [Mpa]	Design tensile strength [Mpa]	Yield strain [%]	Rupture strain [%]
(S1B1) GFRP	φ6	50.59	1022	731.3	/	1.2
(S2B2) GFRP	φ8	54.3	1108.2	802.7	/	2.34
(S3B3) GFRP	φ10	52.08	1218.8	903.5	/	2.72
(S5B1) Steel	φ6	200	400	347.8	2	10
(S7B2) Steel	φ8	200	400	347.8	2	10
(S8B3) Steel	φ10	200	400	347.8	2	10

3 Different approaches of adhesion coefficients k_b , and k_1 and introduction of fibre coefficients k_5 , k_{fb} , k_{fb}'

Symbols k_b and k_1 denote coefficients that account for the degree of bond between FRP bar and the surrounding concrete. The adhesion coefficient k_b refers to ACI 318 Gergely-Lutz equation while k_1 is the bond coefficient for crack width calculation in Eurocode 2. An average value of k_b has been found to range from 0.60 to 1.72 depending on the type of FRP, manufacturers, fibre types, resin nature, and type of surface treatments, while k_1 ranges from 0.8 to 1.6. Some typical k_b predicted values for deformed GFRP bars cited in ACI are between 0.8 and 1.80. However, ACI Codes and Manuals suggest that designers assume a value of 1.2 for deformed GFRP bars unless more specific information is available for a particular bar. The ACI Committee 440 modified the Gergely-Lutz equation for the use with concrete members incorporating the effects of different bond and mechanical properties of FRP.

$$w = 2.20 \frac{f_{frp}}{E_f} \cdot \beta \cdot k_b \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (1)$$

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

$$w = 2.2 \frac{M}{A_{frp} \cdot E_{frp} \cdot j \cdot d} \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot k_b \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (2)$$

The pre-cracking behaviour of beams does not correspond to the linearity nature of the Gergely-Lutz equation because the width starts to increase with the moment only at the cracking moment when the crack first forms. A modification to the Gergely-Lutz equation [12] was used to include the pre-cracking behaviour, as a crack does not form immediately with the application of moment but rather when the tensile strength has been reached [6].

$$w = 2.2 \frac{M - M_{cr}}{A_{frp} \cdot E_{frp} \cdot j \cdot d} \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot k_b \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (3)$$

The Eurocode 2 crack width equation is strain-based and can be adopted directly for determining the crack width of FRP RC elements (3). The difference in bond characteristics is implemented through the coefficient k_1 and for long terms stress via the parameter k_t .

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

$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ is the difference in deformation between bars and concrete over the maximum crack distance.

In this expression, the strain difference can be calculated as for an ordinary concrete. However, a new coefficient needs to be introduced in the crack spacing formula where k_5 is the additional factor that accounts for the effects of fibres.

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

Fibre effect coefficients incorporate the ratio of tensile strength and residual tensile strength where calibration values are obtained through experimental investigation [10]. Also, fibre coefficients k_{fb} and k_{fb}' were implemented for Gergely-Lutz and modified Gergely-Lutz equation.

$$w = 2.2 \frac{M}{A_{frp} \cdot E_{frp} \cdot j \cdot d} \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot k_b \cdot k_{fb} \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (6)$$

$$w = 2.2 \frac{M - M_{cr}}{A_{frp} \cdot E_{frp} \cdot j \cdot d} \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot k_b' \cdot k_{fb}' \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (7)$$

An additional aim of this study is to develop bond models that can accurately simulate the response regarding improvement of crack width for GFRP reinforced concrete beams. ATENA is used as software analyser and, based on experimental results, the corresponding bond models are calibrated. The bond model strives to develop behaviour of reinforcement relating to concrete using the slip (m) versus bond strength relation.

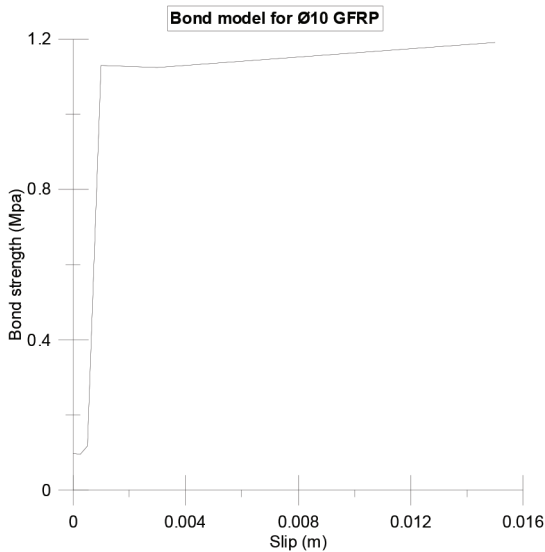


Figure 4. Bond model - performance function of bond characteristics

4 Test 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 bond coefficient means improvement of bond characteristics of the reinforcing bar in comparison 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 (S1B1 and S2B2) revealed inferior bond characteristics related to steel, while excessively (over-) reinforced sets (S2B2) exhibited relatively similar bond characteristics.

The corresponding values of bond coefficients in different phases of loading are shown in Figure 4, where the difference in the bond coefficient of the modified Gergely-Lutz can clearly be seen. The approximation happens only in the pre-cracking phase, while the difference from reference values can be observed in the following phases. An increase in fibre ratio affects the pre-cracking behaviour, but the ratio taken for this experiment did not archive the nominal fibre content in order to influence the post-cracking behaviour (3).

Table 3. Calculated bond coefficients

Bar diameter [mm] Bar type		SET	S1B1	S2B2	S3B3	S5B1	S7B2	S8B3
		6	8	10	6	8	10	
		GFRP	GFRP	GFRP	Conventional	Conventional	Conventional	
Corrective bond coefficients	"SLS" State	k1	0.65	1.8	0.7	1.1	0.7	1
		kb	0.95	1.5	0.85	1.3	0.85	1
		kb'	N/C	N/C	1.2	N/C	1.25	1.4
	(M/M _u - 50%)	k1	1.1	1.6	0.8	N/C	0.95	1
		kb	1.4	1.6	1	N/C	0.95	0.9
		kb'	3.5	2.7	1.2	0.8	1.2	1.6
	(M/M _u - 75%)	k1	0.95	1.6	1.1	N/C	0.8	0.9
		kb	1.45	2.4	0.95	N/A	0.8	0.95
		kb'	2.4	3.3	1.15	0.6	1.3	1.5

**Note; N/C-Not corresponded while M/M_u is percentage of load*

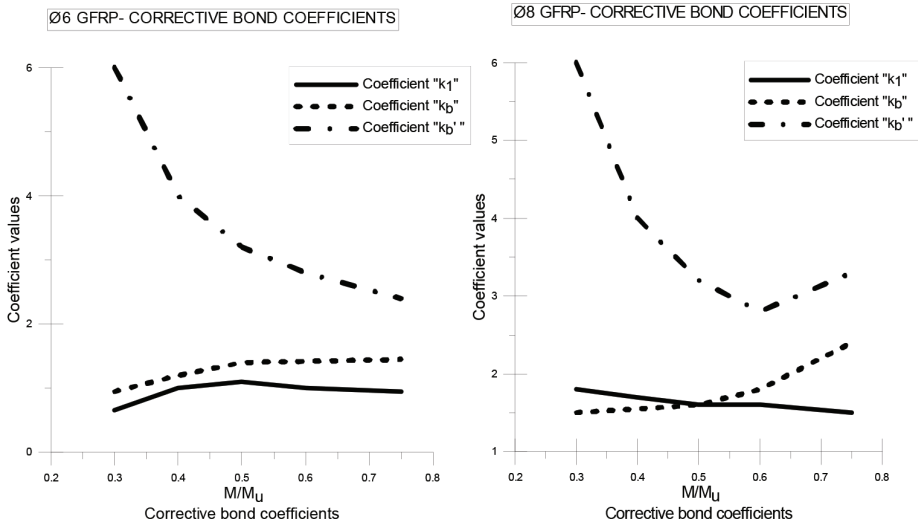


Figure 5. Corrective bond coefficients versus M/M_u

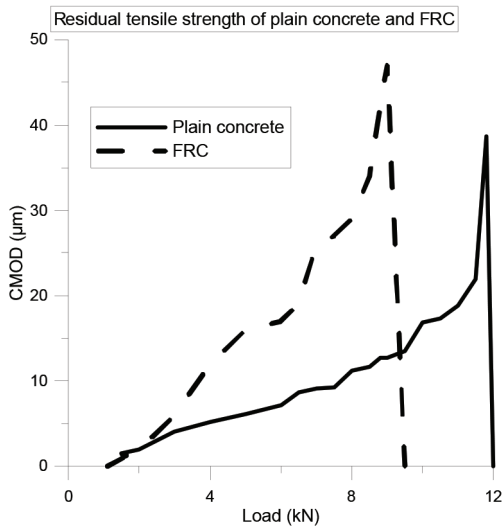


Figure 6. Effects of fibres in relation to Load-CMOD

Ductile behaviour is not influenced by adding a small fraction of fibres. On the contrary, some parameters such as the volume fraction, fibre length, and modulus of elasticity, tend to improve brittle failure. Fibres on the fracture surface did not bridge the cracks and behaved in an inactive manner, like voids or errors in concrete matrix.

Table 4. Calculated fibre coefficients

SET	Bar type	"SLS" State			(M/Mu - 50%)			(M/Mu - 75%)		
		Fibre coefficients			Fibre coefficients			Fibre coefficients		
		k5	kfb	kfb'	k5	kfb	kfb'	k5	kfb	kfb'
S1B1	Ø6 GFRP-F	1.2	1.1	1	0.75	0.85	0.75	0.75	0.9	0.85
S2B2	Ø8 GFRP-F	0.9	0.95	0.85	0.95	1.2	1.15	1	0.9	0.9
S3B3	Ø10 GFRP-F	1.8	1.4	1.7	1.55	1.35	1.35	1.2	1.5	1.5

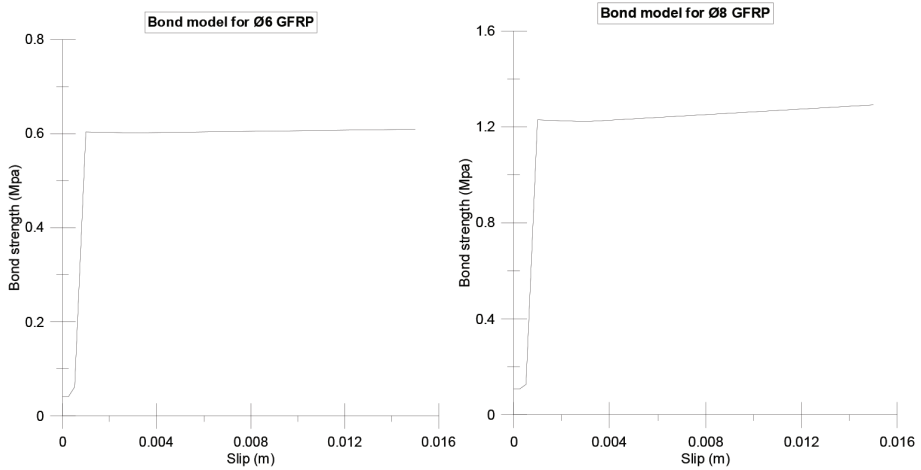


Figure 7. Bond model- performance function of bond characteristics

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

5 Conclusions

The cracking behaviour of plain and polypropylene FRC beams with GFRP and reference conventional steel was analysed. The following conclusions can be drawn from the experimental investigation results:

Beams with balanced reinforcement and especially over-reinforced (excessively reinforced) GFRP beams (7 to 10% deviation) tend to approximate with reference values of bond coefficients while beams with minimum reinforcement have shown inferior bond characteristics.

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.

Through fibre coefficients, an attempt was made to incorporate the effects of fibres with variation of residual tensile strength as yield effect.

The addition of small quantity of polypropylene fibres does have a contrary effect as related to the pre-yield cracking behaviour.

The effect of fibres can be obtained in the final stage of bearing capacity with symbolic influence (1%-S1G1F, 6%-S2G2F, 1.5%-S3G3F) as related to reference beams without fibres.

This investigation was conducted to determine the measured values of k_b , and this experiment showed that there is a significant difference between the values deter-

mined according to different standards and the measured real values. The authors therefore suggest that the design be more based on measured values than on theoretical ones. Otherwise, to accurately determine the behaviour of bars in terms of bond coefficient, additional research should be conducted in the future, involving a large number of measured values.

References

- [1] Nanni, A., "Flexural behaviour and design of RC Members Using FRP Reinforcement", *Journal of Structural Engineering*, V. 119, No. 11, 1993, pp.3344-3359. Mehta, P.: *Concrete in the marine environment*. Essex IG11 8JU, England: Elsevier Science Publishers Ltd., 1991.
- [2] 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.
- [3] Fib Bulletin 40 "FRP reinforcement in RC structures", 2007, pp.31-51.
- [4] 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. COIN Project report 66-2015" *Structural FRC – Design approach and experimental results*" 2015, pp.3-5
- [5] 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.
- [6] CNR-DT 2032006; *Guide for Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fibre-Reinforced Polymer Bars*" National Research Council, Rome; Italy, 2006
- [7] Singh, Sh.B.; "FRP Reinforced Concrete Structures" 2014, pp.75
- [8] CEB-FIP Technical report "FRP reinforcement in RC structures" bulletin 40, pp.70.
- [9] ASTM D 7205 Standard Test Method for Tensile Properties of Fibre Reinforced Polymer Matrix Composite Bars (2005).
- [10] J. R. Correia, F. A. Branco, and J. Ferreira, "GFRP-concrete hybrid cross-sections for floors of buildings" *Engineering Structures*, vol. 31, no. 6, pp. 1331–1343, 2009.
- [11] S. H. Chidananda, R. B. Khadiranaikar, "Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP rebars", *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 119–128, 2017.
- [12] Gergely-Lutz Equation, ACI 318-89, 99, P.Gergely, L.A. Lutz, *Maximum Crack Width in RC Flexural Members, Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete*, SP-20, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp. 87-117.

Mogućnosti primjene seizmičkih metoda u plićem podmorju

Božo Padovan¹, doc.dr.sc. **Lovorka Librić²**

¹ Terra Compacta d.o.o., bpadovan@terra-compacta.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, lovorka.libric@grad.unizg.hr

Sažetak

U sklopu geotehničkih istražnih radova za potrebe projektiranja nove ribarske luke u uvali Lamjana na otoku Ugljanu izvedena su i geofizička istraživanja. Nova ribarska luka Vela Lamjana bit će jedna od najvećih na Jadranu te, uz ostalih sedam koje se grade, najveći sustav ribarske infrastrukture na Mediteranu. Za potrebe izgradnje novih dokova te produblivanja uvale, primijenjena su geofizička istraživanja metodom seizmičke refrakcije pod morem, u kombinaciji s ručnim sondažnim bušenjem. Osnovni cilj istraživanja je bio definirati debljinu marinskih sedimenata i dubinu do osnovne stijene. Specifičnost izvođenja geofizičkih mjerenja je bila u potrebi da se profili postave djelomice na kopnu, a djelomice pod morem. Iz tog razloga mjerenja su izvođena kombiniranjem geofonskih i hidrofonskih rasporeda te korištenjem seizmičkih izvora za kopno i more.

Ključne riječi: seizmička refrakcija, geofizička istraživanja pod morem, debljina marinskih sedimenata

Possibilities of applying seismic methods in the shallower submarine

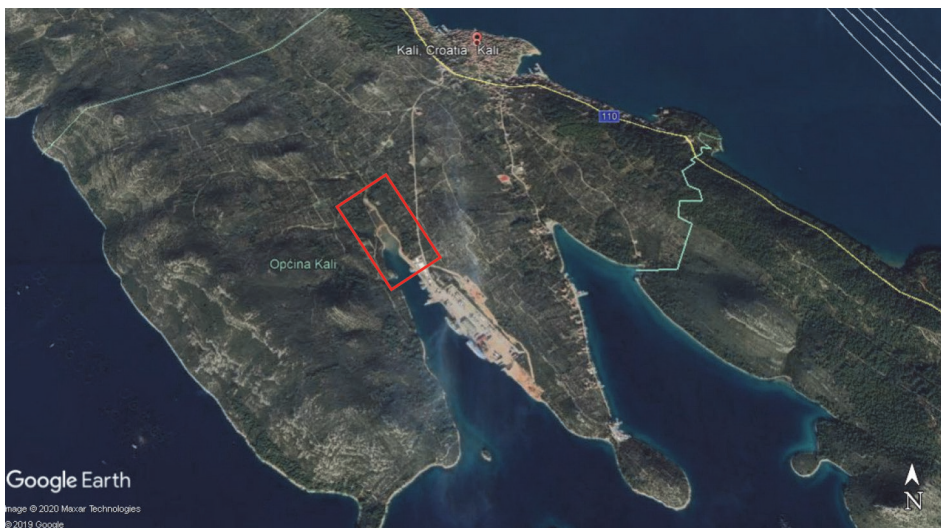
Abstract

As part of geotechnical research works for the needs of designing a new fishing port in the bay of Lamjana on the island of Ugljan, geophysical research was performed. The new fishing port of Vela Lamjana will be one of the largest in the Adriatic and, along with the other seven under construction, the largest fishing infrastructure system in the Mediterranean. For the purpose of building new docks and deepening the bay, geophysical surveys were applied by the method of seismic refraction under the sea, in combination with manual drilling. The main goal of the research was to define the thickness of marine sediments and the depth to the base rock. The specificity of performing geophysical measurements was the need to place the profiles partly on land and partly under the sea. For this reason, measurements were performed by combining geophonic and hydrophone layouts and using seismic sources for land and sea.

Key words: seismic refraction, geophysical research under the sea, thickness of marine sediments

1 Uvod

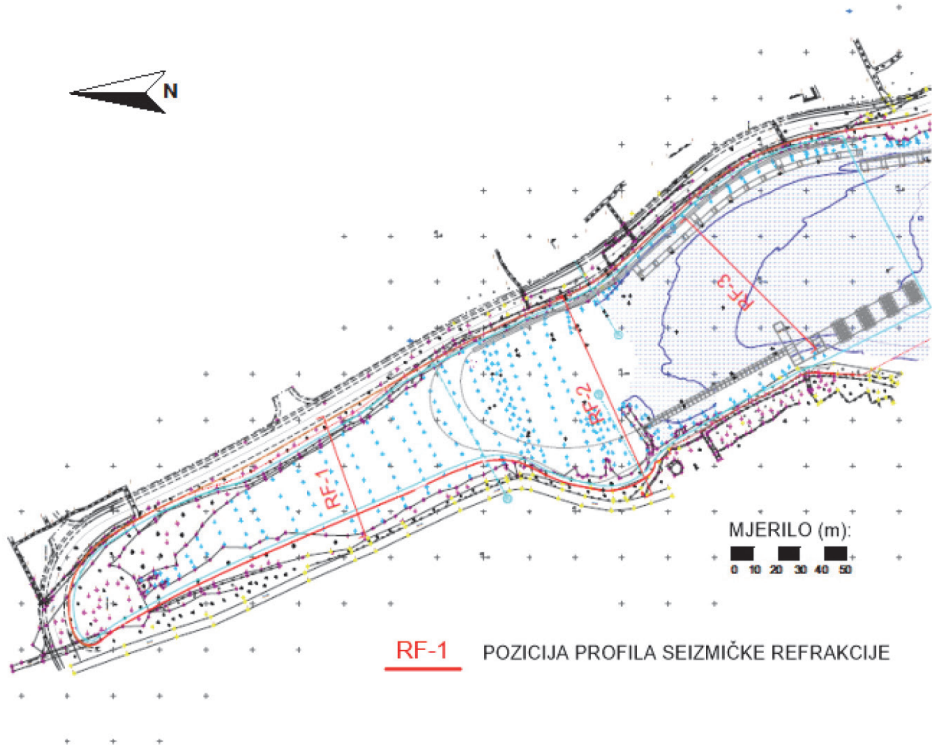
Primjenom geofizičkih metoda u sklopu geotehničkih istražnih radova upotpunjuje se njihova prostorna pouzdanost. Korelacijom geotehničkih istražnih bušotina kao 1D podataka i "in situ" mjerenjima u njima s rezultatima geofizičkih metoda koji su predstavljeni 2D i 3D prikazima dobiva se detaljan model podzemlja u istraživanom području [1]. U sklopu geotehničkih istraživanja za potrebe nove ribarske luke u uvali Lamjana na otoku Ugljanu (slika 1) izvedena su geofizička istraživanja i ručno sondiranje terena metalnom šipkom umjesto istražnog bušenja. Cilj istraživanja je bio što pouzdanije odrediti debljinu marinskih sedimenata i dubinu do karbonatne podloge. U ovom radu prikazani su rezultati geofizičkih istraživanja metodom seizmičke refrakcije pod morem i njihova korelacija s rezultatima sondiranja terena [2]. Geofizički profili postavljeni su poprečno na uvalu, približno paralelno jedni drugima (slika 3). Prvi profil je postavljen u najplićem dijelu uvale, a treći u najdubljem. Profili RF-1 i RF-2 su dijelom postavljeni i na obali dok je profil RF-3 cijeli snimljen po dnu mora. Profili su duljine 60 m (RF-1), 95 m (RF-2) i 90 m (RF-3) te su snimani na 12 aktivnih kanala, s pet metara razmaka među njima. Terenska mjerenja su izvođena uz upotrebu pomoćne brodice i uz asistenciju ronioca (slika 2). Klasifikacija tla učinjena je sukladno dobivenim brzinama P-valova, prema teoretskim [3] i iskustvenim vrijednostima, uz korelaciju s determinacijom ručnog sondiranja po profilima. Specifičnost ovog istraživanja je primjena geofizičkih metoda pod morem, i to zbog posebnih uvjeta samih terenskih mjerenja te načina obrade i interpretacije rezultata. Saturiranost sedimenata morem utječe na vrijednosti brzina širenja P-valova, što može dovesti do pogrešne klasifikacije vrste i stanja stijenske mase, pa stoga pouzdanosti konačnih rezultata pridonosi korelacija s istražnim bušenjem ili ručnim sondiranjem.



Slika 1. Lokacija istraživanja u Velj Lamjani



Slika 2. Izvođenje terenskih mjerenja



Slika 3. Položaj geofizičkih profila RF-1 do RF-3

2 Metoda seizmičke refrakcije

Na lokaciji istraživanja primijenjena je metoda seizmičke refrakcije P-valova po dnu mora. Metoda se temelji na očitanju prvih nailazaka dolaska elastičnih valova na geofone ili hidrofone postavljene duž profila na površini terena, odnosno dnu mora [4]. Iz poznatog geometrijskog rasporeda postavljenih prijemnika, točaka iniciranja vala i vremena nailazaka, metodama inverznog modeliranja izračunava se 2D model promjene brzine širenja P-valova u istraživanom podzemlju. Općenito, refrakcijska metoda temelji se na refrakciji elastičnog vala na granici dviju sredina čije brzine zadovoljavaju uvjet $V_1 < V_2$ (V_1 -brzina u gornjoj sredini, V_2 -brzina u donjoj sredini), pa je kao takva idealna za geološki model uvale Vela Lamjana u kojem se očekuje deblji pojas marinskih sedimenata manjih brzina (do nekoliko metara) te karbonatna stijena većih brzina ispod. Primjena novih metoda obrade podataka putem inverznog modeliranja omogućila je svladavanje ograničenja o prirastu brzina s dubinom te omogućila detektiranje zona inverzije brzina [5]. Za potrebe snimanja profila položenih i na kopnu i po dnu mora korišteni su geofoni rezonantne frekvencije 10 Hz, a profil po dnu mora je snimljen uporabom hidrofona iste rezonantne frekvencije. Kao izvor elastičnih valova primijenjena je puška na lovački metak s piezoelektričnim triggerom kao izvor u moru, a čekić mase 8 kg i čelična ploča kao izvor na kopnu.

3 Obrada seizmičkih podataka

Obrada rezultata seizmičkih refrakcijskih mjerenja učinjena je WET-tomografijom [6], u programu Rayfract 3.33, pri čemu je za ulazni model korištena Delta-t-v-metoda [7]. Za prikaz rezultata korištena je Kriging-metoda interpolacije. Rezultati obrade prikazani su u obliku interpretiranih dubinskih seizmičkih presjeka. Na interpretiranim 2-D profilima prikazana je promjena brzine P-vala po dubini. Klasifikacija stjenovite mase prema brzinama P-valova učinjena je sukladno očekivanim vrijednostima za vrstu i stanje stijene, činjenici da su sedimenti i stijena saturirani morskom vodom te korelacijom s podacima ručnog bušenja. S obzirom na to da su dva profila (RF-1 i RF-2) dijelom i na kopnu, kod klasifikacije je i to uzeto u obzir.

4 Analiza i interpretacija rezultata

Na slikama 5 do 7 prikazani su interpretirani 2D modeli promjene brzine širenja P-valova. Na refrakcijskim profilima naznačene su granice između četiri pojasa sukladno klasifikaciji prema brzinama iz tablice 1, a koja je izvedena korelacijom s rezultatima ručnog sondiranja. Podzemlje je klasificirano u četiri osnovne zone: pojas građen od marinskih nevezanih sedimenata, pretežito mulja (seizmičke brzine manje od 2000 m/s), prijelazna zona građena od marinskih nevezanih sedimenata

te mogućih odlomaka karbonatne stijene (seizmičke brzine između 2000 m/s i 2500 m/s), razlomljena karbonatna stijena unutar koje se lokalno može očekivati jača raspucanost (seizmičke brzine između 2500 m/s i 2800 m/s) i osnovna karbonatna stijena (seizmičke brzine veće od 2800 m/s). Razlomljenost stijene opada s povećanjem seizmičke brzine.

Na sva tri profila ucrtane su i pozicije izvedenih ručnih sondi te dubina njihovog maksimalnog prodiranja (slike 5 do 7). Dubina prodiranja sondi i brzina P-valova na toj dubini može se korelirati. Na sondama koje su bile na profilima, ili u njihovoj blizini, može se ustanoviti da se maksimalno prodiranje grupira oko brzine 2500 m/s što odgovara pojavi vrlo razlomljene stijene. Ručnim sondiranjem se može dosegnuti pojava stijene ako utiskivanje sonde nije prekinuto pojavom odlomka karbonatne stijene – samca ili neke druge prepreke.

Tablica 1. Klasifikacija tla i stjenovite mase prema brzinama P-valova

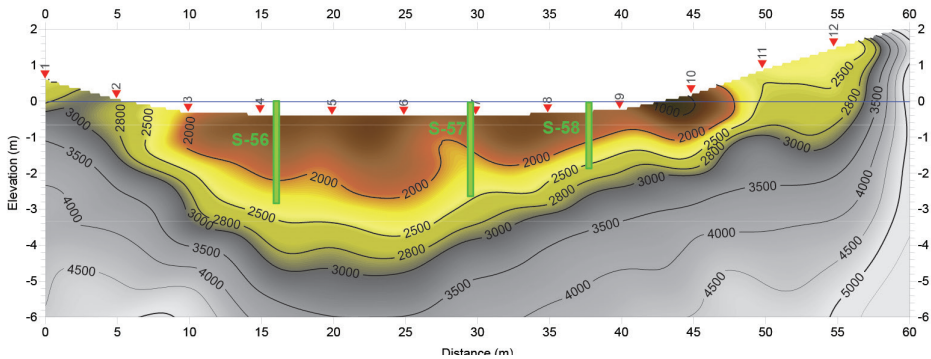
Brzina širenja P-valova [m/s]	VRSTA STIJENE
< 2000	Marinski nevezani sediment, glina, nasuti materijal
2000 - 2500	Izmjena marinskih nevezanih sedimenata i odlomaka karbonatne stijene
2500 - 2800	Razlomljena karbonatna stijena
> 2800	Osnovna karbonatna stijena



Slika 4. Legenda uz interpretirane seizmičke profile

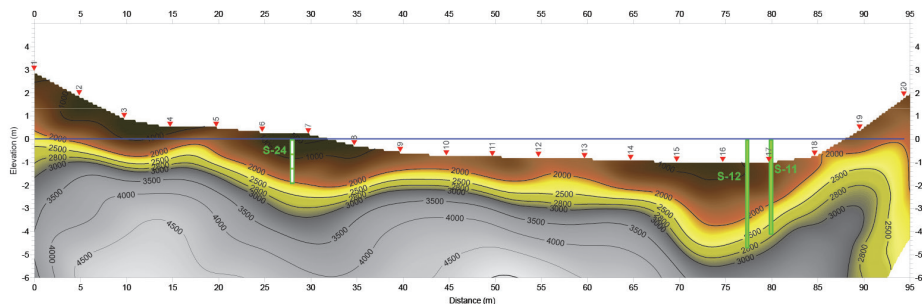
Seizmički profil RF-1 (slika 5) duljine je 60 m. Trasa profila je položena tako da je od petog do 43. metra profil pod morem, dok je početak i kraj profila na kopnu. Pojava pojasa građenog od marinskih nevezanih sedimenata (brzina seizmičkih valova manja od 2000 m/s) može se pratiti od sedmog do 46. metra profila. Maksimalna debljina mu je oko 2.3 m, između 20. i 25. metra profila. Ispod njega je pojas u kojem se pojavljuju marinski nevezani sedimenti s mogućnošću pojave odlomaka karbonatne stijene - samaca (seizmičke brzine između 2000 m/s i 2500 m/s). Debljine je do približno jedan metar. Dublje se pojavljuje karbonatna stijena. Brzine iznad 2500

m/s karakteriziraju pojavu karbonatne stijene, pri čemu je ona u intervalu 2500 do 2800 m/s razlomljena te joj s povećanjem brzine raste kompaktnost. U kopnenom dijelu profila (prvih pet te zadnjih 15 metara) stijena se pojavljuje praktički pri površini što je evidentirano i geološkim kartiranjem na terenu. Usporedbom s rezultatima ručnog sondiranja (sonde S-56, S-57 i S-58) može se uočiti da maksimalna dubina prodiranja sonde korelira približno s brzinom od 2500 m/s ili nešto manje (sonda S-56 – 2350 m/s).



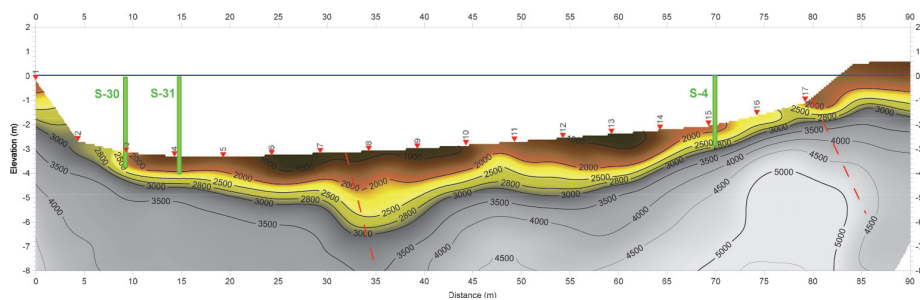
Slika 5. Interpretirani seizmički profil RF-1 s ucrtanim pozicijama i dubinama prodiranja ručnih sondi S-56, S-57 i S-58

Seizmički profil RF-2 (slika 6) duljine je 95 m. Prvih sedam te zadnja dva geofona položena su na kopnu (prvih 30 i zadnjih 7.5 metara profila), a središnji dio profila duljine 60 m je položen pod morem, na morskom dnu. Debljina pojasa građenog od marinskih nevezanih sedimenata (brzina seizmičkih valova manja od 2000 m/s), duž cijelog profila 0.5-2 m. Ispod njega je pojas u kojem se pojavljuju marinski nevezani sedimenti s mogućnošću pojave odlomaka karbonatne stijene - samaca (seizmičke brzine između 2000 m/s i 2500 m/s). Debljine je do približno pola metra. Dublje, s povećanjem brzine iznad 2500 m/s, pojavljuje se karbonatna stijena kojoj s povećanjem brzine raste kompaktnost. Na profilu su ucrtane pozicije tri ručne sonde, od kojih je pozicija sonde S-24 projekcija na profil jer je lateralno udaljena oko 10 metara.



Slika 6. Interpretirani seizmički profili RF-2 s ucrtanim pozicijama i dubinama prodiranja ručnih sonda S-24, S-12 i S-11

Seizmički profil RS-3 (slika 7) duljine je 90 m. Debljina pojasa građenog od marinskih nevezanih sedimenata (brzina seizmičkih valova manja od 2000 m/s) je do 1.2 metara. Ispod njega je pojas u kojem se pojavljuju marinski nevezani sedimenti s mogućnošću pojave odlomaka karbonatne stijene - samaca (seizmičke brzine između 2000 m/s i 2500 m/s). Debljine je približno pola metra, osim u dijelu profila između 30. i 40. metra gdje je oko jedan i po metar. Kao i na profilima RF-1 i RF-2, s porastom brzine iznad 2500 m/s dublje se pojavljuje karbonatna stijena. Na profilu su ucrtane pozicije tri ručne sonde S-30, S-31 i S-4.



Slika 7. Interpretirani seizmički profili RF-3 s ucrtanim pozicijama i dubinama prodiranja ručnih sonda S-30, S-31 i S-4

6 Zaključak

Primjenom geofizičke metode seizmičke refrakcije u sklopu geotehničkih istraživanja za potrebe izrade projektne dokumentacije proširenja obale u uvali Lamjana na otoku Ugljanu postignut je cilj pouzdanijeg i jasnijeg prostornog definiranja debljine marinskih sedimenata i dubine do osnovne stijene. Uzimajući u obzir distribuciju dobivenih brzina te rezultate prethodnog ručnog sondiranja metalnom šipkom, učinjena je klasifikacija tla prema seizmičkim brzinama. Ručnim sondiranjem je utvrđena dubina maksimalnog prodiranja metalne šipke na više pozicija unutar zaljeva, od kojih su one koje su izvedene na seizmičkim profilima iskorištene za kalibraciju brzina. Važno je napomenuti da maksimalna dubina prodiranja može korelirati s pojavom razlomljene karbonatne stijene, ali i lokalne pojave kao što su samci unutar marinskih sedimenata. Na taj način utvrđeno je da pojava osnovne karbonatne stijene korelira s povećanjem brzine P-valova iznad 2800 m/s. U intervalu brzina od 2500 do 2800 m/s očekuje se pojava razlomljene karbonatne stijene. Izmjena marinskih nevezanih sedimenata i odlomaka karbonatne stijene korelira s brzinama u intervalu 2000 do 2500 m/s, a marinski nevezani sedimenti s brzinom ispod 2000 m/s. Kako bi se mogla učiniti što pouzdanija geološka interpretacija dobivenih modela brzina širenja P-valova, važno je raspolagati podacima istražnog bušenja ili, kao u ovom radu, rezultata ručnog sondiranja. Također, s obzirom na to da na brzine širenja P-valova utječe saturiranost morem, a na brzine S-valova nema utjecaja, mogućnost primjene višekanalne analize površinskih valova, MASW-a (eng. Multichannel Analysis of Surface Waves) dodatno bi upotpunila izradu geološkog modela te dala procjenu dinamičkih modula. Pri tome je parametre snimanja seizmičkih podataka kao što su duljina snimke, vrijeme uzorkovanja, razmak među geofonima ili hidrofona potrebno prethodno isplanirati kako bi se zadovoljila vremenska i prostorna rezolucija snimljenih podataka potrebnih za analizu površinskih, tzv. Scholte-ovih valova [8, 9].

Literatura

- [1] Witeley, B. (2002).: Integrating Geophysical and Geotechnical Technologies for Improved Site Assessment of Ports and Harbours, PIANC 2002, 30th INTERNATIONAL NAVIGATION CONGRESS S8D3 P127 SYDNEY-SEPTEMBER 2002
- [2] Padovan, B. (2020).: Izvješčaj o geofizičkim istraživanjima u uvali Lamjana
- [3] EAGE Publications bv (2014.): Application Manual of Geophysical Methods to Engineering Problems, EAGE Publications, PO Box 59, 3990 DB Houten, The Netherlands, p.p. 91
- [4] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990): Applied Geophysics, Cambridge University Press

- [5] Rohdenwald, S.R.C. (2006).: Rayfract Tutorial, Intelligent Resources
- [6] Schuster, G.T, Quintus-Bosz, A. (1993).: Wavepath eikonal traveltime inversion: Theory, Geophysics, Vol. 58., No.9
- [7] Gebrande, H.; Miller, H. Refraktionsseismik (in German) (1985). In Angewandte Geowissenschaften II; Ferdinand, E., Bender, F., Eds.; Enke: Stuttgart, Germany, 1985; pp. 226–260.
- [8] Park C.B., Miller R.D., Xia, J, Ivanov, J. (2005): Underwater MASW to evaluate stiffness of water-bottom sediments, The Leading Edge, July
- [9] Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Hunter J.A., Good, R.L, Burns, R.A. (2000).: Joint analysis of surface-wave and refraction events from river-bottom sediments, SEG 2000 Expanded Abstracts

Metode proračuna za određivanje prividne energije aktivacije

Petra Štefanec¹, izv.prof.dr.sc. Ivan Gabrijel²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, petra.stefanec@grad.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, ivan.gabrijel@grad.unizg.hr

Sažetak

U suvremenoj znanosti o betonu, energija aktivacije koristi se za procjenu propusnosti, trajnosti i čvrstoće betona. Također koristi se za učinkovito predviđanje razvoja temperature u betonu prilikom stvrdnjavanja. Energija aktivacije izračunava se iz eksperimentalnih podataka o čvrstoći ili toplini hidratacije mješavina cementne paste, morta ili betona njegovanim na različitim temperaturama. U literaturi se često navode kontradiktorne vrijednosti prividne energije aktivacije jer se primjenjuju različite procedure izračunavanja iz podataka dobivenih mjerenjem. U ovom radu cilj je bio objasniti različite metode proračuna prividne energije aktivacije na temelju podataka dobivenih ispitivanjem izotermnom kalorimetrijom na temperaturama od 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C i 60 °C. Primijenjene su tri proračunske metode: metoda linearne aproksimacije, modificirana ASTM C 1074 metoda te inkrementalna metoda. Sve tri metode pokazale su prihvatljive vrijednosti s obzirom na literaturne podatke, međutim metoda linearne aproksimacije i modificirana ASTM C 1074 metoda vrlo su varijabilne i ovisne o osobi koja provodi proračun.

Ključne riječi: prividna energija aktivacije, izotermna kalorimetrija, metode proračuna, Arrheniusov zakon, portland cement

Calculation methods for determining the apparent activation energy

Abstract

In modern concrete science, activation energy is used to assess the permeability, durability and strength of concrete. It is also used to effectively predict the development of temperature of concrete during hardening. The activation energy is calculated from the experimental data of the strength or heat of the hydration of the cement paste, mortar or concrete mixture at different temperatures. In the literature, there is often the contradictory values of apparent activation energy because different procedures for calculating the data obtained by measurement are applied. In this paper, the aim was to interpret the various methods of apparent activation energy based on data obtained by testing isothermal calorimetry at temperatures of 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C and 60 °C. Three calculation methods were applied: linear approximation method, modified ASTM C 1074 method and incremental method. All three methods have shown acceptable values with regard to the literature data, but the linear approximation method and the modified ASTM C 1074 method are very variable and dependent on the person who performing the calculation.

Key words: apparent activation energy, isothermal calorimetry, calculation methods, Arrhenius' law, portland cement

1 Uvod

Hidratacija cementa je kemijska reakcija cementa i vode pri čemu nastaju produkti hidratacije, te dolazi do postupnog vezivanja i očvršćivanja. Kako se portland cement sastoji od različitih minerala, tijekom procesa hidratacije istodobno se odvija više reakcija i pri tome različiti sastojci hidratiziraju različitom brzinom [1]. Hidratacija je egzoterman proces, a važnost topline hidratacije u betonu je višestruk. Bez obzira ispituje li se hidratacija cementne paste, hidratacija cementa u mortu ili hidratacija u betonu, oslobađanje topline moguće je podijeliti u više faza. Te faze odvijaju se sljedećim redom: faza brzog oslobađanja topline, indukcijska faza, faza akceleracije, faza usporavanja, faza difuzije [2]. Proces hidratacije koji se javlja u fazi stvrdnjavanja betona ovise o brojnim čimbenicima koji u različitoj mjeri utječu na brzinu hidratacije. Metode koje se uobičajeno koriste za ocjenjivanje razvoja svojstava materijala u ranoj fazi su: metoda određivanja stupnja hidratacije i metoda zrelosti [3]. Stupanj hidratacije, α , je parametar u rasponu od 0 do 1 koji opisuje stupanj proreagiranoosti cementnog sustava. Stupanj hidratacije pri starosti t ($\alpha(t)$) definira se kao omjer količine hidratiziranog cementa (m_{hid}) i početne mase cementa koja je ušla u reakciju m_0 [3], odnosno $\alpha(t) = m_{hid} / m_0$. Stupanj hidratacije može se procijeniti direktnim ili indirektnim metodama. Jedna od najčešće korištenih indirektnih metoda procjene bazirana je na mjerenju topline hidratacije. U tom slučaju vrijedi: $\alpha(t) = Q(t) / Q_{max}$, gdje je $Q(t)$ toplina oslobođena do starosti t , a Q_{max} ukupna količina topline koja se može osloboditi kada je u potpunosti izreagirao sav cement. Metoda zrelosti koristi se za izražavanje stupnja hidratacije betona [4], a najčešće u svrhu predviđanja razvoja čvrstoće. Ta metoda u obzir uzima istodobni utjecaj temperature i vremena na kinetiku hidratacije u betonu [3]. Ekvivalentna starost, t_{eq} , jednadžba (1), izravno je povezana s metodom zrelosti i odgovara vremenu tijekom kojeg se beton mora održavati na referentnoj temperaturi kako bi se dobila ista vrijednost zrelosti kao u stvarnim uvjetima stvrdnjavanja [4, 5].

$$t_{eq} = \int_0^t \frac{K(T(\tau))}{K(T_{ref})} d\tau \quad (1)$$

gdje je T_{ref} referentna temperatura, a t_{eq} je ekvivalentna dob pri T_{ref} [4].

Metoda ekvivalentne starosti temelji se na Arrheniusovom zakonu, jednadžba (2), koji se pokazao najtočnijim za opisivanje kinetičkog utjecaja temperature na mnoge kemijske i fizikalne procese [4, 6].

$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

gdje je k konstanta brzine reakcije; A je faktor frekvencije (Hz); E je energija aktivacije (J/mol); R je plinska konstanta (8,314 J/mol K), a T je apsolutna temperatura (K).

U jednadžbi (2), E je parametar koji se odnosi na osjetljivost kinetike hidratacije na temperaturne promjene. Arrheniusova jednadžba opisuje homogene kemijske sustave koji se odvijaju po jednoj, točno definiranoj kemijskoj reakciji. Cement je višefazni materijal, pa hidratacija cementa nije jednostavna reakcija, jer hidratacija različitih bezvodnih komponenata cementa uključuje nekoliko međusobno ovisnih kemijskih reakcija. Stoga se energija aktivacije naziva "prividnom" i označava kao E_a [6].

Vrijednost faktora frekvencije obično se ne uzima u obzir kod ispitivanja cementa ili betona, niti pri hidrataciji portland cementa, vrijednost prividne energije aktivacije stoga se može izračunati neovisno o A , izračunavanjem zrelosti. Prema Freiseleben Hansenu i Pedersenu, energija aktivacije je funkcija temperature betona samo za temperature ispod 20 °C [7].

2 Metode za određivanje prividne energije aktivacije

Bilo koja metoda kojom se mjeri svojstvo osjetljivo na napredak reakcija hidratacije, može se koristiti za prikupljanje kinetičkih podataka, ali najčešće su metode razvoj tlačne čvrstoće i razvoj topline [8]. Mehanička metoda za određivanje prividne energije aktivacije obično se temelji na ispitivanju tlačne čvrstoće uzoraka morta ili betona. Kada-Benamure, Wirquin i Duthoit (2000) zaključili su kako: "... mehanička čvrstoća, za razliku od topline hidratacije, ne odražava čisto kemijski mehanizam i stoga ne može u potpunosti udovoljiti Arrheniusovom zakonu." [5] Također, ta metoda je složenija od kalorimetrijskih zbog velikog broja mjerenja potrebnih za određivanje E_a .

Određivanje E_a kalorimetrijskom metodom može se provesti u izotermnim ili u adijabatskim uvjetima [5]. S obzirom na to da su kemijske reakcije termički aktivirane, poželjno je raditi u izotermnim uvjetima [7, 9]. E_a za hidrataciju cementa najčešće se izračunavaju usporedbom kinetičkih podataka paralelnih uzoraka, izotermno hidratiziranih na različitim temperaturama. U ovom radu prikazat će se tri različite proračunske metode primijenjene na podatke koji su dobiveni iz ispitivanja izotermne kalorimetrije.

Metodom linearne aproksimacije izračunava se konstanta brzine reakcije na temelju brzine oslobađanja topline u periodu akceleracije prema jednadžbi (3):

$$k = \frac{dQ(t)}{d(t)} \cdot \frac{1}{Q_{max}} \quad (3)$$

Uz normiranu ASTM C 1074 metodu, koja opisuje postupak određivanja E_a ispitivanjem tlačne čvrstoće, postoji i takozvana *modificirana ASTM C 1074 metoda* koja se primjenjuje na rezultate kalorimetrijskih mjerenja. U ovoj metodi provodi se regresijska analiza krivulje razvoja stupnja hidratacije $\alpha(t)$ nekim od pogodnih matematičkih modela. U ovom radu primijenjen je troparametarski eksponencijalni model (jednadžba 4):

$$\alpha(t) = \alpha_u \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\beta} \quad (4)$$

gdje je α_u najveći stupanj hidratacije koji se može postići; τ vremenski parametar; β parametar oblika. Konstanta brzine reakcije jednaka je $1/\tau$.

Prividna energija aktivacije izračunava se iz nagiba regresijskog pravca u koordinatnom sustavu $\ln(k)-1/T$ prema jednadžbi (5):

$$E_a = -\frac{n \sum_1^n \ln(k) - \sum_1^n \frac{1}{T_n} \sum_1^n \ln(k)}{n \sum_1^n \left(\frac{1}{T_n}\right)^2 - \left(\sum_1^n \frac{1}{T_n}\right)^2} \cdot R \quad (5)$$

gdje je T_n izotermna ispitna temperatura, a n je broj temperatura pri kojima je provedeno mjerenje.

Inkrementalna metoda temelji se na istim principima kao i linearna metoda aproksimacije te pokazuje kako razvoj hidratacije utječe na vrijednost E_a . Kako bi se izračunala E_a za bilo koji α , potrebne su inkrementalne brzine reakcije pri jednakim stupnjevima hidratacije za sve ispitne temperature.

3 Analiza E_a iz rezultata ispitivanja izotermnom kalorimetrijom

Mjerenje topline hidratacije u izotermnim uvjetima provedeno je na cementnoj pasti vodo-cementnog omjera (v/c) 0,4. Za izradu cementne paste korišten je industrijski proizveden cement CEM I 52,5 N-SR3 CE PM-CP2 NF HRC, *Lafarge*. Cementna pasta je izrađena s vodom iz vodovoda te uz dodatak plastifikatora *Sikaplast Techno 80*, *Sika* (0,45% na masu cementa). Ispitivanja su provedena pri temperaturama: 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C i 60 °C.

Ukupna količina topline $Q_{\max} = 471,5$ J/g izračunata je iz podataka o kemijskom i mineraloškom sastavu prema jednadžbi (6), a koji su navedeni u tablici 1.

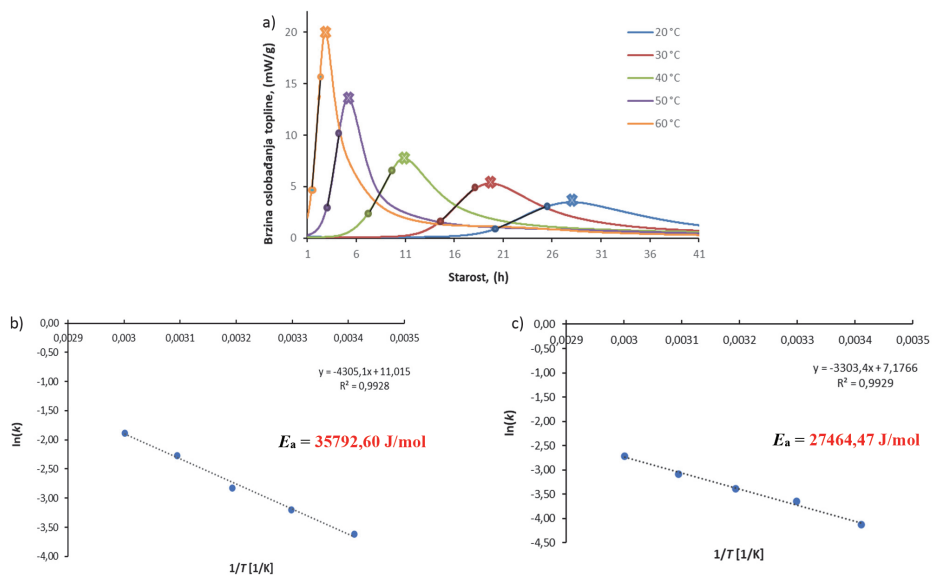
$$Q_{\max} = 500p_{C_3S} + 260p_{C_2S} + 866p_{C_3A} + 420p_{C_4AF} + 624p_{SO_3} + 1186p_{N-CaO} + 850p_{MgO} \quad (6)$$

gdje p_i predstavlja masu određenih komponenti.

Tablica 1. Kemijski sastav CEM I 52,5 N-SR3 CE PM-CP2 NF HRC [10]

Sastojak	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₃
Količina [%]	67	12	2	13	1,9	2,7

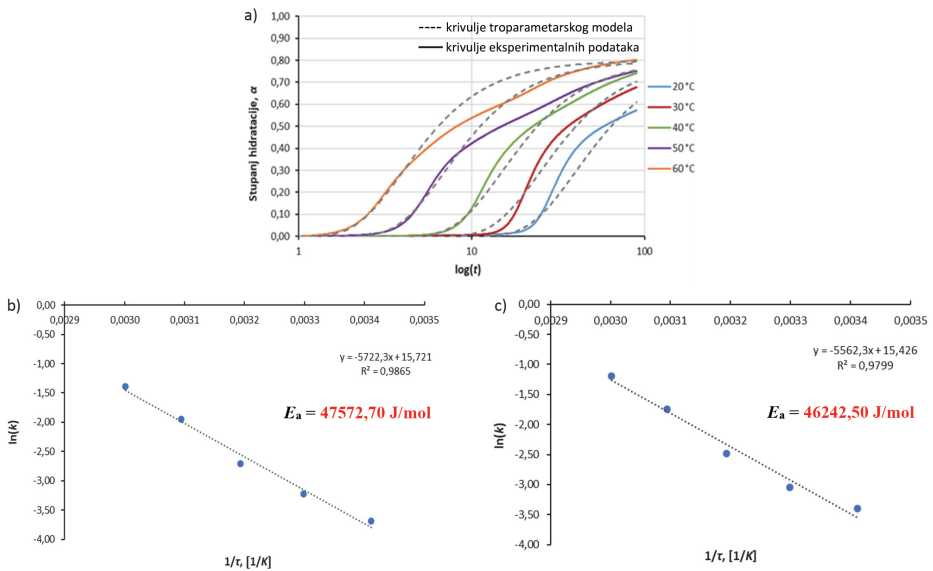
Rezultati mjerenja topline hidratacije izotermnim kalorimetrom prikazani su na slici 1(a). Sa slike 1(a) vidljivo je da se brzina oslobađanja topline povećava kako raste temperatura odvijanja reakcije. Na istom dijagramu označeno je i područje unutar kojega je procijenjeno da se brzina oslobađanja topline hidratacije linearno mijenja, a koje je relevantno za primjenu metode linearne aproksimacije. Unutar linearnog područja odredi se prosječna vrijednost brzine oslobađanja topline hidratacije (dQ/dt) te se uz primjenu jednadžbe (3) odredi vrijednost k . Na slici 1(b) prikazan je dijagram $\ln(k)-1/T$ za metodu linearne aproksimacije te je navedena vrijednost E_a . Na slici 1(c) prikazani su rezultati analize E_a ako se umjesto prosječne vrijednosti k u linearnom području koristi najveća vrijednost dosegnuta tijekom hidratacije.



Slika 1. Rezultati mjerenja izotermnom kalorimetrijom i grafički prikaz linearanog dijela krivulja (a); Određivanje E_a u ovisnosti o najvećoj brzini hidratacije, $\ln(k)$, o $1/T$ (b); Određivanje E_a ovisno o prosječnoj brzini hidratacije, $\ln(k)$, o $1/T$ (c)

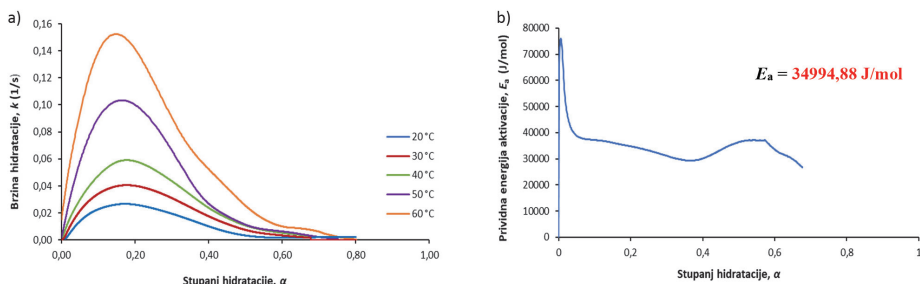
Modificiranom ASTM C 1074 metodom predviđa se razvoj hidratacije, a usporedba razvoja stupnja hidratacije dobivenog eksperimentalno i rezultata dobivenih troparametarskim eksponencijalnim modelom pomoću regresijske analize, prikazana je na slici 2(a). Na slici 2(b) prikazani su dijagrami $\ln(k)-1/T$, gdje je E_a određena pri

uvjetima kada je parametar τ varijabilan, a α i β konstante. Na slici 2(c) prikazani su rezultati određivanja E_a ako su β i τ varijabilni, a α konstanta.



Slika 2. Predviđanje razvoja hidratacije regresijskom analizom (a); Određivanje E_a ovisno o brzini hidratacije, kada je parametar τ varijabilan, a α i β konstante (b); Određivanje E_a u ovisnosti o brzini hidratacije, kada su β i τ varijabilni, a α konstanta (c)

Na slici 3(a) prikazana je ovisnost brzine reakcije o stupnju hidratacije koji se primjenjuju kao ulazni podaci za inkrementalnu metodu te se za svaki stupanj hidratacije određuje E_a . Rezultat proračuna prikazan je na slici 3(b) na kojoj je navedena i prosječna vrijednost E_a .



Slika 3. Ovisnost brzine hidratacije i stupnja hidratacije (a); Ovisnost prividne energije aktivacije o stupnju hidratacije (b)

4 Zaključak

Provedena je izotermna kalorimetrijska analiza na uzorcima cementne paste u temperaturnom intervalu od 20 °C do 60 °C. U ovom radu primjenjene su tri različite metode za proračun prividne energije aktivacije. U metodi linearne aproksimacije za određivanje maksimalne brzine hidratacije koriste se podaci iz faze akceleracije. Također, mogući nedostatak ove metode nastaje zbog vrlo subjektivnog odabira podataka za proračun prividne energije aktivacije. Modificirana ASTM C 1074 metoda također se temelji na subjektivnom odabiru podataka i time može varirati konačna vrijednost proračuna. Međutim, pomoću te metode može se vrlo dobro i praktično preko troparametarskog eksponencijalnog modela izračunati prividna energije aktivacije. Inkrementalna metoda sama po sebi jest najkompliciranija za izvedbu, ali je nesubjektivna pri odabiru podataka i pri pravilnom slijedu u proračunu može se reći kako daje najtočnije rezultate i uvid u prividnu energiju aktivacije određenog sustava. S obzirom na sve pozitivne i negativne strane ovih modela, cilj daljnjih istraživanja je na temelju znanja i iskustava pokušati na alternativni način odrediti podatke potrebne za određivanje prividne energije aktivacije, a pri tome određivanju koristiti se novim proračunskim modelom.

Literatura

- [1] Bjegović, D., Štirmer, N., Teorija i tehnologija betona, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015., p. 73.
- [2] Bijelić, N., Praćenje transformacije cementnih kompozita iz pseudo-viskozno u kruto stanje elastičnim valovima, Zagreb; Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2009.
- [3] Morabito, P., "APPARENT ACTIVATION ENERGY An example of determination from adiabatic hydration tests," Lulea University of Technology, Lulea, 2001.

- [4] Wirquin, E., Broda, M. and Duthoit, B., "Determination of the apparent activation energy of one concrete by calorimetric and mechanical means - Influence of a superplasticizer," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 8, pp. 1207-1213, 2002.
- [5] Kada-Benameur, H., Wirquin, E. and Duthoit, B., "Kada-Benameur, H., Wirquin, E. and Duthoit, B. (2000) Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry," *Cement and Concrete Research.*, vol. 30, pp. 301-305, 2000.
- [6] D'aloia, L. and Chanvillard, G., "Determining the "apparent" activation energy of concrete E a-numerical simulations of the heat of hydration of cement," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1277-1289, 2002.
- [7] Poole, J. L., Riding, K. A., Folliard, K. J., Juenger, M. C. G. and Schindler, A. K., "Methods for calculating activation energy for portland cement," *ACI Materials Journal*, vol. 104, no. 1, pp. 303-311, 2007.
- [8] Thomas, J. J., "The instantaneous apparent activation energy of cement hydration measured using a novel calorimetry-based method," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 95, no. 10, pp. 3291-3296, 2012.
- [9] Broda, M., Wirquin, E. and Duthoit, B., "Conception of an isothermal calorimeter for concrete - Determination of the apparent activation energy," *Materials and Structures*, vol. 35, no. 251, pp. 389-394, 2002.
- [10] Gabrijel, I., Skazlić, M., Estimating rate of hydration in ultrasonic tests from temperature measurements, *Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019): Novel Methods for Characterization of Materials and Structures Paris: RILEM Publications S.A.R.L.*, pp. 264-271, 2019.

Utjecaj otvora na krutost naknadno prednapetih ploča

Krešimir Tarnik¹, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček²

¹ U.O.I.G. Tarnik Krešimir, kresimir@tarnik-grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, tomislav.kisicek@grad.unizg.hr

Sažetak

S obzirom na nedostatak literature o naknadnom prednapinaju (NP), dokazivanja naknadno prednapetih ploča velikog raspona nameće mnoga pitanja. Ploče s mnogobrojnim otvorima poseban su zadatak koji je postavljen pred projektante, a kombinacija oba problema predstavlja značajan izazov i za projektante s velikim iskustvom. Postavlja se pitanje kada je veličina i broj otvora u ploči strukturni problem. Je li kod velikog broja otvora u ploči, konstrukcija postala kasetirani strop s proizvoljno lomljenim gredama? Kakav utjecaj na krutost konstrukcije ima veličina, oblik i broj otvora u ploči. Ima li utjecaj i raspored otvora u tlocrtu? Prilikom rješavanja problema jednog takvog velikog raspona ploče s brojnim otvorima, autor je pretpostavio da se takva ploča ponaša bliže punoj olakšanoj ploči nego kasetiranom stropu. U ovom radu će se pokušati prikazati kako mnogobrojni otvori u ploči, ako su pravilno raspoređeni i s povoljnom geometrijom otvora, ne utječu značajno na krutost ploče što će se pokazati proračunom na elastičnim progibima.

Ključne riječi: naknadno prednapete ploče, veliki raspon, zeleni krov, krutost ploče, otvor u ploči, utjecaj otvora na krutost

Effect of openings on stiffness of post-tensioned slabs

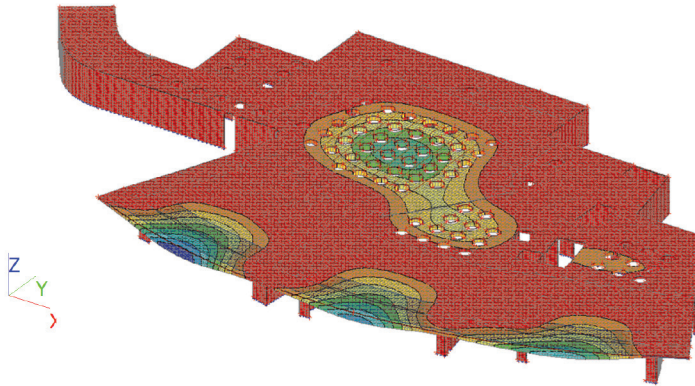
Abstract

Given the lack of literature on post-tensioned slabs (PTs), proving high-span prestressed slabs raises many questions. Slabs with numerous openings are a special task that is set before the designers, and the combination of both problems represents a significant challenge even for a designer with extensive experience. The question arises when the size and number of openings in the plate is a structural problem. With a large number of openings in the slab, did the structure become a coffered ceiling with arbitrarily "broken" beams? What effect does the size, shape and number of holes in the slab have on the rigidity of the structure. Does the layout of the openings in the floor plan also have an impact? In this paper, we will try to show how the numerous openings in the slab, if they are properly arranged and the geometry of the openings is favorable, do not significantly affect the stiffness of the slab, which will be shown by calculation on elastic deflections.

Key words: post-tensioned slabs, large span, green roof, slab stiffness, slab opening, hole impact on stiffness

1 Uvod

Problem dokazivanja velikih raspona ploča je u svladavanju progiba. Povećanjem debljine ploče povećava se statička visina, ali i vlastita težina sustava. Kako vlastita težina ima najveći utjecaj na progibe, rješenja takvih sustava je ili u rebrastim, kasetiranim pločama, šupljim predgotovljenim pločama ili u prednapinjanju. Kad je ograničena i debljina ploče, odnosno ne mogu se raditi vitka i visoka rebra kasetiranog stropa, a šuplje ploče se ne proizvode u traženim rasponima, potrebno je pronaći novo rješenje. Ideja ovog rada je da se istraži kombinacija naknadno prednapetih ploča s neprianjajućim kabelima i olakšanih ploča. Provođen će se ispitivanje naprezanja i progiba na jednoj takvoj ploči koja je projektirana kao ploča "zelenog krova" velikog raspona iznad radnog prostora s dostatnim brojem otvora za svjetlarnike. Raspon krovne konstrukcije je oko 26×28 m, a postoji ograničenje u visini konstrukcije i u veličini progiba. Rješavanje ploča velikih raspona naknadnim prednapinjanjem sa slobodnim vođenjem kabela omogućava lakše zaobilazanje "problema" otvora ako se otvori postavljaju tako da se horizontalni pomak kabela može prilagoditi omjeru 1:6. Naknadnim prednapinjanjem se rješavaju i problemi progiba, a smanjuje se i utjecaj od skupljanja u ranoj fazi sazrijevanja betona. Kako je uobičajeno grupirati kabele za naknadno prednapinjanje, kabeli se mogu provlačiti između otvora u snopovima (grupirani u grupe) i to u oba smjera, odnosno proizvoljno u dva općenito međusobno okomita smjera. Literatura o naknadnom prednapinjanju je općenito siromašna, a utjecaj otvora na krutost naknadno napetih AB ploča nije nigdje opisan, pokazala se potreba za praćenjem naprezanja i progiba takve konstrukcije kako bi se dokazale pretpostavke uzete pri odabiru proračunskog modela. Za rješenje problema takve konstrukcije smatralo se važnim odabrati pravilnu geometriju otvora kojom se izbjegavaju koncentracije naprezanja na kutovima otvora, a trebalo je uzeti u obzir i njihovo izvođenje i armiranje. Kao logično rješenje odabrani su kružni otvori za koje je predviđeno armiranje kružnim šipkama i zrakasto postavljenim sponama te dodatnim dijagonalama. U trenutku razmišljanja o obliku otvora, postavilo se pitanje o načinu proračuna takve ploče. Je li to ploča s otvorima (oslabljenjima) ili je to kasetirani strop, s obzirom na to da su otvori pravilno raspoređeni prema oblikovanju arhitekta. Uz blaga pomicanja otvora u fazi idejnog projekta, dobio se pravilan raster kružnih otvora (promjer otvora 155 cm na svijetlom razmaku od približno 100 cm) koji ocrtavaju jasno vođenje armature i kabela u dvama međusobno okomitim smjerovima. Ploča je slobodno oslonjena na AB zidove debljine od 35 do 50 cm.



Slika 1. Raster otvora promjera 155 cm na svijetlom razmaku od cca 100 cm iz arhitektonskog projekta

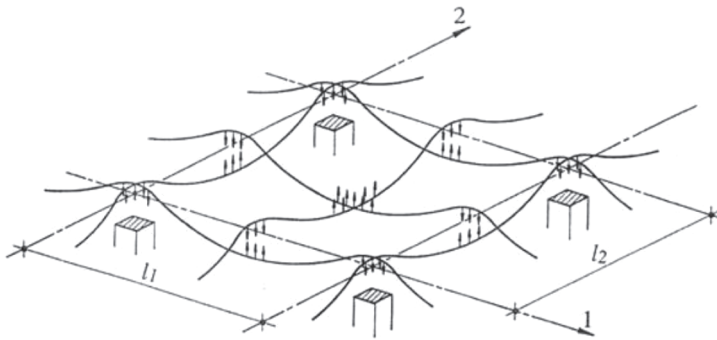
Nedoumice su riješene konzervativnim pristupom, odnosno proračun se provodio na modelu ploče s otvorima, a armatura se oblikovala kao da je riječ o kasetiranom stropu s grupiranom armaturom kao za plitke i široke grede (shallow beam [11]) s višereznim sponama i to u oba smjera ploče. Kod modeliranja na više modela i softvera došlo se do zaključka da se konstrukcija ponaša kao olakšana ploča, a ne kao sustav kasetirane ploče (sustav međusobno okomitih greda).

2 Proračunski pristup

2.1 Princip naknadnog prednapinjanja

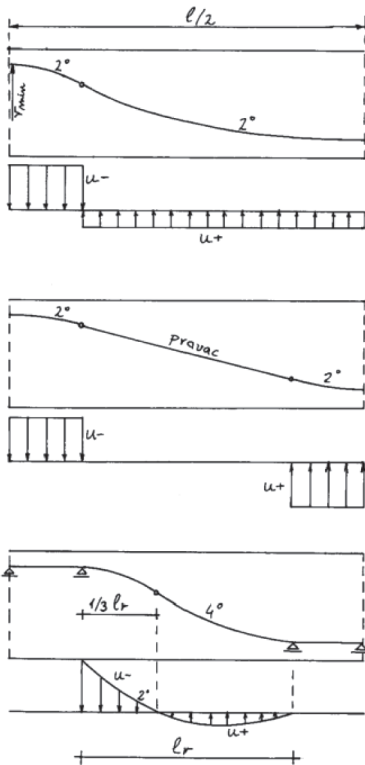
U Europi se naknadno prednapinjanje monolitnih ab ploča (u daljnjem tekstu NP ploče) u visokogradnji koristi već pedeset godina [1], dok je kod nas ta tehnologija prisutna zadnjih dvadesetak godina [4]. Intenzivnije korištenje te tehnologije počinje s dubljim ekonomskim i tehničkim analizama projekata u visokogradnji gdje prednosti ovih ploča prema klasičnoj izvedbi dolaze do izražaja pri rasponu većem od 8,0 metara [5]. Osnovni princip tehnologije je da se uz tlačnu silu koriste i skretne sile koje se javljaju od vođenja kabela po trajektorijama naprezanja. Te skretne sile djeluju u polju protivno gravitaciji, odnosno iznad ležaja protivno reakcijskoj sili (smanjuju silu proboja). To omogućava svladavanje većih raspona uz manju debljinu konstrukcijskih elemenata (ploče i greda). Time se smanjuju progibi, a uz povećanje područja tlačnog naprezanja u ploči reduciraju se i pukotine [6, 8, 11]. Prednosti u ekonomskom smislu očituju se većom brzinom gradnje (jednostavnija oplata, napinjanje se obavlja u prosječnim uvjetima nakon 3 dana, nakon čega se može skidati oplata). Manja težina ploče može smanjiti i cijenu temeljenja, a smanjenje visine kata ukidanjem greda može rezultirati i većom prodajnom površinom zbog dodatnih etaža za jednaku visinu zgrade. Valja napomenuti da postoje dva tipa na-

knadnog prednapinjanja s obzirom na kontakt užadi za prednapinjanje s betonom, “Unbonded” i “bonded” tehnologija. Užad u zaštitnoj cijevi u koju ulazi injekcijska cementna smjesa odnosno prijanjajući kabeli (bonded tendons), i užad u plastičnoj cijevi sa zaštitnom masti odnosno neprijanjajući kabeli (unbonded tendons), dakle užad bez direktnog dodira s betonom [12, 13, 14]. Po iskustvu iz izvođenja preferira se primjena tehnologije s neprijanjajućim kabelima, zbog puno više prednosti u odnosu na injektirane, prijanjajuće kabele kao što su manji presjeci kabela, manje ograničenja pri izvođenju, manji gubitak sile od trenja i sl. U ovom radu koristit će se isključivo izrazi za “Unbonded” tehnologiju naknadnog prednapinjanja.



Slika 2. Shematski princip vođenja kabela za prednapinjanje kroz ploču

Slika 2. prikazuje shemu karakterističnog polja ploče s vođenjem kabela i reakcijama skretnih sila koje rasterećuju konstrukciju. Paraboličan oblik linije obaju smjerova ima zaobljenje veće zakrivljenosti u području stupa i zamišljene oslonake trake. Smjer zaobljenja određuje smjer skretnih sila koje djeluju okomito na tangentu u smjeru središta zakrivljenosti. Sumarno se komponente skretnih sila poništavaju. Slika 3. prikazuje liniju jednog smjera prednapinjanja. U točkama infleksije mijenja se predznak skretnih sila. Budući da je kut nagiba kabela mali, horizontalne komponente skretnih sila se mogu zanemariti pa je određen analitički izraz jednolikog vertikalnog djelovanja između točaka infleksije (za slučaj parabole drugog reda). Općenito, zadatak projektanta je pronalaženje linije vođenja kabela koji daju vertikalno djelovanje kabela koje najpovoljnije poništava momente od vertikalnog opterećenja. Najniži graf gornje slike pokazuje takozvano slobodno vođenje kabela kod kojeg se kabeli pod utjecajem vlastite težine deformiraju po krivulji četvrtog stupnja.



Slika 3. Shema načina vođenja kabela s pripadajućim skretnim silama

2.2 Princip slobodnog vođenja

Vođenje kabela po linijama parabole preko cijelog raspona konstrukcije zahtijeva veći broj međupridržanja, a to usporava ugradnju. Kod tanjih elemenata ploča i greda u središnjim dijelovima raspona linija vođenja je bliža pravcu. Na sveučilištu u Innsbrucku 1998. godine, prof. Wicke [7] opisao je metodu primjenjivu za neprijajajuće kabele tzv. slobodnog vođenja kabela (eng. *free tendon layout*). Koristeći činjenicu da se kabel prema svojoj krutosti iz gornje do donje točke pridržanja oblikuje sam pod svojom težinom po zakonu parabole četvrtog stupnja s infleksijom u trećini zone krivljenja, tako je odredio i dužinu između gornje i donje točke pridržanja koja je funkcija visine strelice, odnosno debljine ploče. Provedeni su pokusi za debljine ploča od 20 do 45 cm te su ova pravila ušla u DIN 1045-1 propise. Budući da je dužina skretanja kod srednjih polja oko 3 metra, srednji dio raspona u polju je pokriven kabelom u pravcu koji leži na donjoj zoni armature.

2.3 Matematički algoritam slobodnog vođenja

Općenito je vertikalno djelovanje kabela (kN/m') funkcija položaja i sile u kabelu. Stoga se opći zapis može prikazati kao:

$$u(x) = z''(x) \cdot P_{m0} \quad (1)$$

odnosno za slobodno vođenje kabela kod proste grede izraz je u funkciji debljine konstrukcijskog elementa:

$$u_r(x) = e_r \cdot P_{m0} \cdot \left[\frac{12 \cdot x^2}{l_r^4} - \frac{12 \cdot x}{l_r^3} \right] \quad (2)$$

$$u_m(x) = e_m \cdot P_{m0} \cdot \left[\frac{36 \cdot x^2}{l_m^4} - \frac{48 \cdot x}{l_m^3} + \frac{12}{l_m^2} \right] \quad (3)$$

gdje su u_r i u_m kontra opterećenje od slobodnog odnosno od upetog elementa.

Ukupna sila vertikalne reakcije kabela je prema tome

$$U_{1r} = U_{2r} = \frac{2 \cdot e_r}{l_r} \cdot P_{m0} \quad (4)$$

$$U_{1m} = U_{2m} = \frac{16}{9} \cdot \frac{e_m}{l_m} \cdot P_{m0} \quad (5)$$

U navedenim izrazima l_r i l_m su duljine slobodnog "padanja" kabela za padanje od osi grede (4), odnosno od gornjeg ruba (5) te prema tome e_r i e_m su udaljenost od osi do kabela u najnižem položaju (na armaturi donje zone), odnosno od najvišega gornjeg do najnižega donjeg položaja kabela.

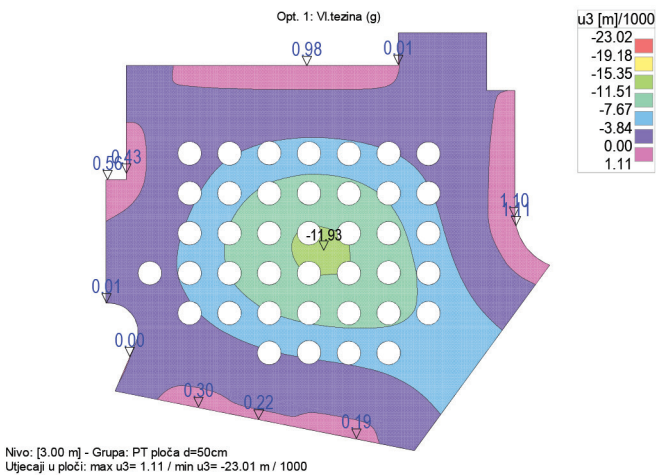
$$l_r = 99,2 \cdot \sqrt[4]{e_r} \quad (6)$$

$$l_m = 130,5 \cdot \sqrt[4]{e_m} \quad (7)$$

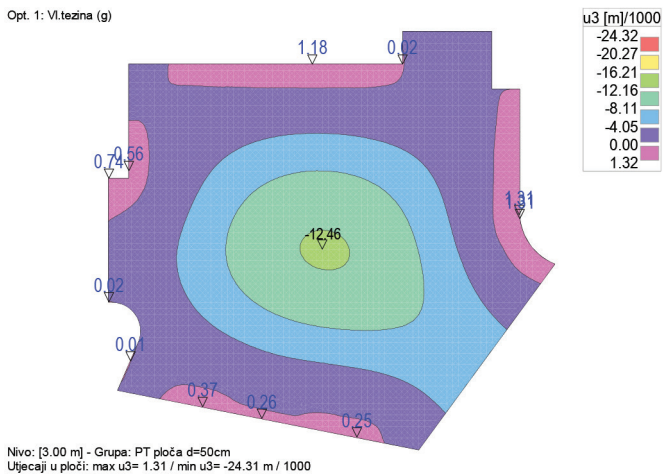
U izrazima (6) i (7) dane su vrijednosti duljine "padanja" kabela za vođenje od osi do donjeg ruba (6) odnosno za vođenje od gornjeg do donjeg ruba linije vođenja kabela (7).

2.4 Model ploče s otvorima i bez njih

Nakon proračuna linija vođenja kabela ploča je modelirana kao ploča i kao sustav greda. Model kao za ploču dao je veći progib, a model greda daje veću potrebnu armaturu. Kabeli su modelirani u oba programska paketa (Tower 8 i SCIA ENGINEER 20) kao opterećenje unošeno po krivulji n-1 stupnja. Oba programska paketa posjeduju mogućnost slobodnog unosa svih parametara potrebnih za prilagodbu na proračun s naknadnim prednapinjanjem. Daljnjim analizama uočava se da otvori nemaju utjecaj na krutost ploče već djeluju kao olakšanja što se može vidjeti prema elastičnim progibima (slika 4).

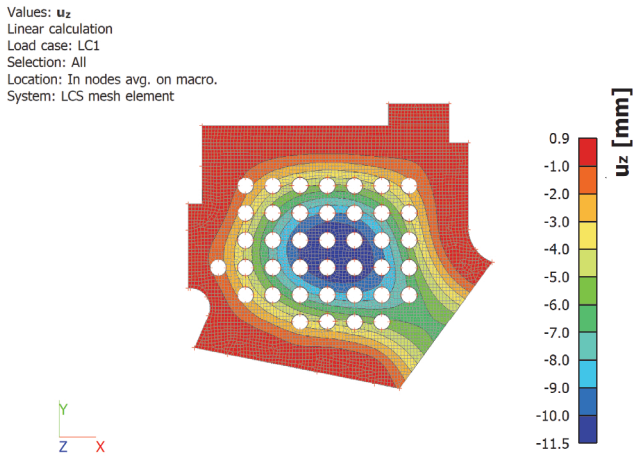


Slika 4. Segment ploče s otvorima i progibi od vlastite težine (program Tower 8.0)



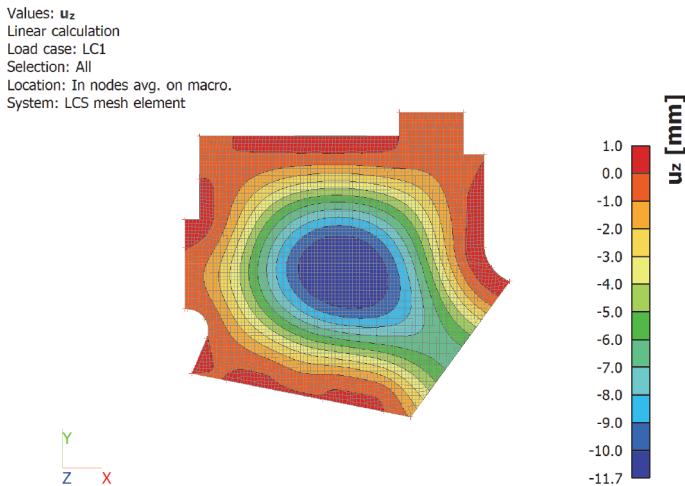
Slika 5. Segment ploče bez otvora i progibi od vlastite težine (program Tower 8.0)

Na slici 5. isti je model ploče bez otvora s identičnim oblikom progiba, ali s manjim vrijednostima. Uzrok tome je vjerojatno manja težina ploče. Za usporedbu je rađen i model u *Scia engineer 20* programskom paketu koji je dao identične oblike progiba.



Slika 6. Segment ploče s otvorima i progibi od vlastite težine (program Scia engineer 20)

Za usporedbu s prethodnim modelom, progibi su gotovo identični.



Slika 7. Segment ploče bez otvora i progibi od vlastite težine (program Scia engineer 20)

4 Zaključak

Proračunima na različitim modelima dobiju se povoljniji rezultati progiba konstrukcije za ploče s pravilnim rasporedom otvora koje su se ipak ponašale kao krute ploče s olakšanjima, a ne kao kasetirani stropovi. Oblik otvora je uvelike pridonio ponašanju konstrukcije kao pune ploče jer su izbjegnute koncentracije naprezanja na oštrim rubovima otvora. Grupiranje otvora uvelike je olakšalo raspored kabela za naknadno prednapinjanje, a utjecaj tlačne sile od kabela dodatno je pomogao sustavu da se ponaša kao jedinstveni kruti element [8].

Za prave zaključke potrebno je provesti modeliranje na još nekoliko softvera i također potvrditi eksperimentalnim postupcima mjerenja naprezanja i progiba na takvoj konstrukciji. Konstrukcija je u izradi, a postupak mjerenja provodi Zavod za tehničku mehaniku, Katedra za mehaniku materijala i ispitivanje konstrukcija po vodstvom doc. dr. sc. Ivana Duvnjaka. Ograničenja ovakvog modeliranja odnose se na ograničenja softvera i na znana ograničenja naknadno prednapinjanih konstrukcija kao što su osjetljivost konstrukcija za naknadno bušenje otvora i ograničenja u dimenzijama konstrukcije (najveća debljina elementa do 50 cm). Pretpostavlja se da bi se sličan postupak mogao provoditi na debljim elementima i većim rasponima, ali s vođenjem kablova po parabolama drugog stupnja. Također je očita primjena kod svladavanja velikih raspona uz uporabu elemenata za olakšanje (PVC sfere ili blokovi XPS-a) u pravilnom rasporedu gdje se traži ravan podgled ili prohodan krov. Ovakvi postupci otvaraju mogućnost svladavanja velikih raspona s malim visinama konstrukcije i to je smjer u kojem se želi nastaviti ovo istraživanje.

Literatura

- [1] O'Brien, E.J., Keogh, D.L., Upstand finite element analysis of slab bridges, *Computers and Structures*, 69, pp. 671-683., 1998.
- [2] Bathe, K.J., Wilson, E.L., *Numerical methods in finite element analysis*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1980.
- [3] Presečki, P., Kovač, M., Implementation of kinematic restrictions in analyses of complex spatial models, *International conference on bridges*, Dubrovnik, 2006.
- [4] Presečki, P., Kovač, M., Pičulin, S., Kinematičke veze u proračunima prednapetih AB ploča, *Građevinar* 59, (2007), 2, 83-97
- [5] Presečki, P., Kovač, M., Pavilić, D., Post tensioned slabs for big spans in urban development, *symposium 4ccc, Opatija* 2008.
- [6] Morgen, K., Diedrich, N., Wollrab, E.: *Flachdecken mit Vorspannung ohne Verbund nach DIN 1045-1, Beton – und Stahlbetonbau* 99, Heft 11, PP.914-928, 2004.

- [7] Wicke, M, Maier, K.: Die freie Spanngliedlage, Bauingenieur, Heft 4, pp. 162-169, 1998.
- [8] Presečki, P., Kovač, M., Orešković, M., Klimenko E.V., Soldo, B. Estimation of stiffness on the basis of theoretical and experimental results of PT slabs with big spans, International conference Structure formation, strength and destruction of composite building materials and constructions, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- [9] Presečki, P., Kovač, M., Soldo, B., Modelling post-tensioned slabs using kinematic connections, International scientific conference People buildings and environment, Lednice, Czech Republic, 2012.
- [10] BBR VT CONA Unbonded Post-tensioning System, European Technical Approval ETA-06/0165
- [11] Aalami, O. B. (1993). Effective width and post-tensioning. PTI technical notes.
- [12] Aalami, O. B. (1994). Unbonded and bonded post-tensioning systems in building construction. Phoenix, AZ: PTI- Technical Note #5, Post-tensioning Institute.
- [13] Aalami, O. A. (2009) . Osnove proračuna naknadno napetih betonskih stropova. Zagreb: HUBITG.
- [14] Mattacchione, A. (1992). Unbonded PT-slabs: an economical alternative. Concrete International.
- [15] Aalami, O. B. (2001). Nonprestressed bonded reinforcement in post-tensioned building design. Technical publication. Phoenix, Arizona: ADAPT.
- [16] Presečki, P., Kovač, M. & Taritaš, Z. (2008). Konstrukcija podzemne garaže Tuškanac u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska
- [17] Presečki P. & Kovač, M. (2013). Prednapete stropne ploče- Javna podzemna garaža Kapucinski trg u Varaždinu, BBR-ADRIA, Zagreb, Hrvatska

Uključivanje promjenjivih klimatskih parametra u predviđanje uporabnog vijeka konstrukcija

doc.dr.sc. **Marija Kušter Marić**

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marija.kuster.maric@grad.unizg.hr

Sažetak

Klimatske promjene glavni su izazov 21. stoljeća s kojim se moraju suočiti sve djelatnosti te je neophodno uzeti u obzir utjecaj klimatskih promjena na infrastrukturu koju projektiramo, gradimo i održavamo. U okviru ovog rada predstavljeni su rezultati znanstvenog usavršavanja na Sveučilištu u Stuttgartu koja uključuje razvoj i primjenu najnovije verzije 3D kemo-higro-termo mehaničkog modela u koji su uključeni promjenjivi klimatski parametri za predviđanje uporabnog vijeka konstrukcija. Numerički model je implementiran u računalni program te je primijenjen na hrvatskim mostovima izloženim solima za odleđivanje.

Ključne riječi: 3D model, uporabni vijek, klimatski parametri, betonski most, kloridi

Incorporating changing climatic parameters in predicting the service life of structures

Abstract

Climate change is a major challenge of the 21st century that all activities must face, hence it is necessary to consider the impact of climate change on the infrastructure we design, build and maintain. This paper presents results of scientific workshop at University of Stuttgart including development and application of the latest version of the 3D chemo-hygro-thermo-mechanical model that includes variable climatic parameters to predict the service life of structures. The numerical model is implemented in a computer software and applied on Croatian bridges exposed to de-icing salts.

Key words: 3D model, service life, climatic parameters, concrete bridge, chlorides

Energetske geotehničke konstrukcije: analize i projektiranje

doc.dr.sc. **Mario Bačić**

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

Sažetak

U radu se daje prikaz znanja stečenih kroz znanstveno usavršavanje, provedeno u sklopu radionice na temu teoretskih aspekata, analiza i projektiranja geotehničkih konstrukcija koje se, osim svoje primarne uloge u osiguranju otpornosti i stabilnosti, koriste kao sastavni dio geotermalnih sustava. Usavršavanje je doprinijelo sveobuhvatnom i potpunijem razumijevanju kako transfera geotermalne energije na sučelju tlo – konstrukcija, tako i mehaničkog ponašanja geotehničkih konstrukcija koje su na ovaj način izložene dodatnim opterećenjima. Predavanjem se daje sažeti prikaz postupaka istraživanja, projektiranja, ali i izvedbe ovakvih inovativnih sustava.

Ključne riječi: energetske konstrukcije, geotermalna energija, termalno opterećenje, piloti, tuneli, potporne konstrukcije

Energy geostructures: analysis and design

Abstract

The paper presents the knowledge gained through scientific workshop, conducted on the topic of theoretical aspects, analysis and design of geotechnical structures which, in addition to their primary role in ensuring sufficient capacity and stability, are used as an integral part of geothermal systems. The workshop contributed to a comprehensive and more complete understanding of both the transfer of geothermal energy at the soil - structure interface, and the mechanical behaviour of geotechnical structures that are thus exposed to additional loads. The lecture provides a concise overview of the research, design and implementation of such innovative systems.

Key words: energy geostructures, geothermal energy, thermal load, piles, tunnels, retaining structures

Usavršavanje u području primjene georadara u ispitivanju konstrukcija

Ksenija Tešić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ksenija.tesic@grad.unizg.hr

Sažetak

Adekvatna obrada signala ključan je korak za pravilnu interpretaciju rezultata dobivenih ispitivanjem konstrukcija georadarom. Jedna od vodećih tvrtki u proizvodnji georadara, Geophysical Survey Systems (GSSI), organizira trodnevnu edukaciju analize rezultata primjenom softverskog paketa RADAN, te jednodnevnu edukaciju u primjeni modela StructureScan Mini XT. Oba dijela usavršavanja su ovaj put održana online zbog posebnih pandemijskih uvjeta. Prvi dio edukacije pruža razumijevanje alata koji se primjenjuju u RADAN softveru, te njihovu praktičnu primjenu demonstriranu kroz niz specifičnih primjera. Drugi dio edukacije obuhvaća detaljan opis rada specifičnog modela georadara StructureScan Mini XT. Ovaj dio edukacije je također iskorišten za diskusiju s članovima GSSI o konkretnim primjerima dobivenim ispitivanjem konstrukcija ovim modelom georadara koji koristi Građevinski fakultet u Zagrebu. U ovom predavanju predstavljen je koncept edukacije, a zatim su prikazani primjeri analize rezultata georadara koji su bili predmet edukacije.

Ključne riječi: usavršavanje, georadar, armiranobetonske konstrukcije, NDE, SHM

Training in the application of ground penetrating radar in the assessment of structures

Abstract

Proper signal processing is an important step in interpreting results when assessing structures with ground penetrating radar (GPR). One of the leading manufacturers of GPR, Geophysical Survey Systems (GSSI), organised a three-day training on analysing results with the RADAN software package and a one-day training on using the StructureScan Mini XT model. Both parts of the training were conducted online this time due to the special pandemic conditions. The first part of the training provides an understanding of the tools used in the RADAN software and their practical application, demonstrated through a series of specific examples. The second part of the training includes a detailed description of the work of a GPR model StructureScan Mini XT. This part of the training was also used to discuss with GSSI members about specific examples obtained during the examination of structures with this GPR model, which is used on Faculty Civil Engineering in Zagreb. In this presentation, the concept of the training is introduced and then examples of analysis of GPR results that were the subject of the training are presented.

Key words: training, ground penetrating radar, reinforced concrete structures, NDE, SHM

Uspostava suradnje sa znanstvenicima u inozemstvu prikazana na primjeru mobilnosti na Stockholm University

doc.dr.sc. **Kristina Potočki**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, kristina.potocki@grad.unizg.hr

Sažetak

Glavni cilj COST Akcija je suradnja znanstvenika zemlja članica kroz fleksibilan i otvoren “bottom up” pristup. Sudjelovanjem u “Natural Flood Retention on Private Land” (LAND4FLOOD) COST Akciji uspostavljena je suradnja sa znanstvenicima sa Stockholm University, Department of Physical Geography i Bollin Centre for Climate research. Ostvorena je mobilnost prema toj ustanovi u sklopu koje je održano predavanje i dogovorena suradnja kroz zajedničke znanstvene publikacije i inicijative. Dostupne strategije za umrežavanje i financiranje prikazane su na primjeru ove mobilnosti.

Ključne riječi: COST, LAND4FLOOD, prirodna rješenja, poplave, umrežavanje, znanstvena mobilnost

Collaboration with the scientists abroad using the example of mobility to Stockholm University

Abstract

The main objective of COST Actions is the cooperation of scientists from member states through a flexible and open “bottom up” approach. Through participation in the “Natural Flood Retention on Private Land” (LAND4FLOOD) COST Action, collaboration with scientists from Stockholm University, Department of Physical Geography and Bollin Center for Climate Research was established. Mobility to this institution was achieved, where a presentation was given and collaboration through joint scientific publications and initiatives was agreed. Available networking and funding strategies are presented using this mobility as an example.

Key words: COST, LAND4FLOOD, nature-based solutions, floods, networking, scientific mobility

Izazovi akademskih mobilnosti u vrijeme pandemije

doc.dr.sc. **Mislav Stepinac**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mislav.stepinac@grad.unizg.hr

Sažetak

Pandemija koronavirusa pogodila je cjelokupno društvo pa tako i znanstveni sektor. Veliki broj mobilnosti je ili ukinut ili obustavljen u potpunosti. Kako je za znanstveno usavršavanje jedan od ključnih čimbenika upravo boravak izvan matične institucije, učinci pandemije osjetit će se tek u doglednoj budućnosti. U ovom radu bit će prikazani izazovi i problemi u ostvarivanju akademskih mobilnosti u vrijeme pandemije koronavirusom, ali i određene prednosti koje se neočekivano javljaju. U radu će biti prikazana mobilnost od dva mjeseca na Sveučilištu Minho u Portugalu te akademski boravak na INSA Toulouse.

Ključne riječi: pandemija, mobilnost, usavršavanje, inozemstvo, University of Minho, INSA Toulouse

Challenges of academic mobility during a pandemic

Abstract

The coronavirus pandemic has affected society as a whole, including the scientific sector. As a result, many mobilities have either been abolished or suspended altogether. However, as one of the key factors for scientific excellence is specialization abroad, the effects of the pandemic will be felt only in the foreseeable future. This paper will present the challenges and problems in achieving academic mobility during a coronavirus pandemic and certain advantages that appear unexpectedly. The paper will present two-month mobility at the University of Minho and academic mobility at INSA Toulouse.

Key words: pandemic, mobility, training, University of Minho, INSA Toulouse

Wondering wanderer – academic experiences and thoughts to spark emergent phenomena

Nenad Bijelić, PhD CE

EPFL (Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland), nenad.bijelic@epfl.ch

Abstract

Navigating the academic world and making sound decisions about one's future career path are, much like the broader and related question of happiness in life, definitely non-trivial optimization problems. In addition, the path forward is always and unavoidably fraught with uncertainty at every step. Yet, through deep personal reflection on core values, perseverance and resilience as well as through interaction with other people, a sensible solution will present itself. With the primary goal of motivating early-stage graduate students to make the most out of their studies, this talk will showcase why and how the author navigated the academic path from undergraduate studies at the University of Zagreb, to MS and PhD research at Stanford University, and including his present scientific work with highlights of some of the key societal and research questions that the author is tackling in the domain of earthquake engineering and risk mitigation. Additionally, the experiences of some of the author's colleagues that have gone on to have rewarding careers beyond academia will also be presented for inspirational purposes. The emphasis will be on transferable insights collectively gained along the way and actionable tips helpful when considering personal and career goals over different time scales.

Key words: academic path, scholarship, decision making, experiences, uncertainty

Znatiželjni putnik – akademska iskustva i razmišljanja za poticanje novih spoznaja

Sažetak

Putovanje kroz akademski svijet i donošenje ispravnih odluka o svojoj budućoj karijeri, isto kao i povezano pitanje nalaženja sreće u životu, ne može se svesti na puko pitanje optimalizacije. Osim toga, put u sutrašnjicu uvijek je i neizbježno, baš na svakom koraku, ispunjen raznim nesigurnostima. Ipak, kroz duboka osobna promišljanja o ključnim vrijednostima, kroz ustrajnost i upornost, isto kao i kroz interakciju s drugim osobama, ukazat će nam se na kraju ono razumno rješenje. S prvenstvenom nakanom motiviranja studenata koji tek kreću na diplomski studij da iz tog studija izvuku što više saznanja, u ovom radu se pokazuje kako i zašto je autor putovao kroz akademske sfere počevši od dodiplomskog studija na Sveučilištu u Zagrebu, pa do magisterija i doktorata na Sveučilištu u Stanfordu, uključujući i njegov sadašnji znanstveni rad, s osvrtom na neka od ključnih društvenih i istraživačkih pitanja kojima se autor bavi u domenama potresnog inženjerstva i ublažavanja rizika. Osim toga, kao moguća inspiracija, prikazat će se i iskustva nekih od autorovih kolega koji su ostvarili uspješne karijere i izvan akademskih krugova. Naglasak se stavlja na pritom ostvarena prenosiva kolektivna saznanja te se daju provedivi savjeti koji mogu pomoći u ostvarenju osobnih i stručnih ciljeva u raznim vremenskim razdobljima.

Ključne riječi: akademski put, stipendija, donošenje odluka, iskustva, nesigurnost

Iskustva s doktorskog studija i koristi stjecanja doktorata za rad u industriji

dr.sc. **Josip Pišković**

IVICOM Consulting d.o.o., josip.piskovic@ivicom.hr

Sažetak

U predavanju će se predstaviti iskustva s doktorskog studija i koristi stjecanja doktorata na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu za rad u građevinskoj industriji. Teoretsko znanje i uska specijalizacija predstavljaju dobar temelj za daljnju nadogradnju specifičnih znanja i vještina u praksi. U predavanju će se dati kratki pregled iskustava prilikom stjecanja doktorata od 2009. do 2015. te stjecanja praktičnog znanja i rješavanja izazova u projektiranju i izgradnji industrijskih i poslovnih građevina.

Gljučne riječi: koristi od doktorata, rad u industriji

Experience from doctoral studies and the benefits of obtaining a doctorate for work in industry

Abstract

The lecture will present the experiences from the doctoral study and the benefits of obtaining a doctorate at the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb for work in the construction industry. Theoretical knowledge and narrow specialization provide a good foundation for further upgrading specific knowledge and skills in practice. The lecture will provide a brief overview of experiences in obtaining a doctorate from 2009 to 2015, and gaining practical knowledge and solving challenges in the design and construction of industrial and commercial buildings.

Key words: benefits from a doctorate, work in industry

Izazovi u uspostavi i provođenju eksperimentalnog istraživanja u okviru doktorske disertacije

dr.sc. **Marina Bagarić**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, marina.bagaric@grad.unizg.hr

Sažetak

Kroz predavanje je preneseno iskustvo definiranja smjera dokorskog istraživanja na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, a koje je proizašlo završetkom jednog znanstvenog projekta. Prikazani su izazovi i ograničenja u uspostavi, ali i provođenju, laboratorijskog te terenskog istraživanja. Nadalje, istaknute su mogućnosti sufinanciranja eksperimentalnog istraživanja kroz suradnju sa industrijom i potpore Sveučilišta u Zagrebu. Zaključeno je kako osobni kontakt s relevantnim stručnjacima s međunarodnih institucija unaprjeđuje disertaciju te pruža prilike doktorandu za buduće suradnje i razvoj.

Ključne riječi: doktorska disertacija, terenski monitoring, sufinanciranje istraživanja, suradnja s industrijom, izazovi

Challenges in planning and conducting the experimental part of doctoral research

Abstract

This lecture conveyed the experience of setting the direction of the doctoral research at the Faculty of Civil Engineering in Zagreb, which resulted from the completion of a scientific project. Challenges and limitations in planning, but also in conducting laboratory and field research were presented. It also highlighted opportunities for co-funding experimental research through collaboration with industry and support from the University of Zagreb. It was concluded that personal contact with relevant experts from international institutions enhances the dissertation and provides the PhD student with opportunities for future collaboration and development.

Key words: doctoral dissertation, field monitoring, research co-funding, industry collaboration, challenges

**SAŽECI OBRANJENIH
DOKTORSKIH RADOVA**
rujan 2020. - srpanj 2021.

Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2020. - srpanj 2021.

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
2020. godina	
Mehanička svojstva nekoherentnog tla stabiliziranog geomrežama u uvjetima troosnog statičkog i cikličkog opterećenja dr. sc. Jelena Kaluđer	235

dr.sc. Jelena Kaluđer

Životopis

Jelena Kaluđer diplomirala je na Građevinskom fakultetu u Osijeku 2014. godine. Tijekom studija nagrađena je za uspješnost na studiju s pet Dekanovih nagrada, nagradom tvrtke „Vodovod“ 2011. godine, nagradom Lions kluba Osijek 2013. godine te stipendijama za nadarene studente. U sklopu IAESTE programa bila je na stručnoj praksi u Sewerage Board of Nicosia, Cipar u razdoblju od srpnja do kolovoza 2012. godine. U sklopu Erasmus programa, od travnja do rujna 2014. godine, bila je na stručnoj praksi u EMPA Dübendorf, Švicarska. Od rujna 2015. godine zaposlena je na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek kao asistent. U sklopu ERASMUS+ programa usavršavala se u Zavodu za gradbeništvo u Ljubljani u razdoblju od rujna do listopada 2018. godine te od siječnja do ožujka 2019. godine.

Mentor: prof.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**
 prof.dr.sc. **Mensur Mulabdić**

Datum obrane: 21. 12. 2020.

Naslov doktorskog rada

Mehanička svojstva nekoherentnog tla stabiliziranog geomrežama u uvjetima troosnog statičkog i cikličkog opterećenja

Sažetak

Armirano tlo ima široku primjenu zahvaljujući poboljšanju svojstava tla, jednostavnosti ugradnje, uštedama u vidu smanjenja utroška prirodnih materijala i/ili troškova održavanja i/ili produljenog životnog vijeka konstrukcije. Jedan primjer primjene armiranog tla je mehanička stabilizacija nevezanog nosivog sloja ceste, pri čemu se najčešće koriste geomreže. Ovaj rad usmjeren je na utvrđivanje utjecaja građe i krutosti geomreže na mehanička svojstva nekoherentnog tla u statičkim i cikličkim uvjetima opterećenja. U sklopu istraživanja provedena su ispitivanja pokusom statičkog troosnog posmika, cikličkim troosnim pokusom te pokusom troosnog posmika na velikim uzorcima. Ispitivanja su provedena na uzorcima drobljenca koji je klasificiran kao dobro građuirani šljunak. Programom ispitivanja bile su obuhvaćene dvoosne i troosne geomreže izrađene 3D ispisom različitih dimenzija rebara (duljina, širina, visina) te dvije komercijalno dostupne dvoosne i troosne geomreže. Geomreže su ugrađene u sredini visine uzorka, a cikličkim troosnim pokusom dodatno je ispitan utjecaj većeg broja geomreža na rezultate ispitivanja pri čemu su u uzorak ugrađene četiri geomreže. U radu je provedena analiza korelacija veličine otvora geomreže i granulometrijskog sastava tla na temelju rezultata provedenog ispitivanja i rezultata istraživanja objavljenih u literaturi. Dodatno je, temeljeno na rezultatima provedenih ispitivanja statičkim troosnim posmikom, promatran utjecaj krutosti geomreže u navedenim korelacijama.

DOI: 10.5592/C0/PhDSym.2021

ISBN 978-953-8168-50-5

