

11. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
11. rujna 2025.

Zbornik radova

urednica
ANA BARIČEVIĆ

ISSN 2991-4892



Izdavač

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Fra Andrije Kačića-Miošića 26
10000 Zagreb

Urednica

izv. prof. dr. sc. Ana Baričević

Dizajn naslovnice

minimum d.o.o.

Prijelom

Tanja Vrančić

Tisak

Tiskara Zelina d.d., 2025.

ISSN

ISSN 2991-4892 (Online)
ISBN 978-953-8168-80-2

DOI

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2025>

Zagreb, rujan 2025.

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.

11. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

11. rujna 2025., Zagreb

Zbornik radova

Urednica

Ana Baričević

Organizacijski odbor simpozija

izv. prof. dr. sc.	Ana Baričević	Prodekanica za znanost
izv. prof. dr. sc.	Mario Bačić	Zavod za geotehniku
izv. prof. dr. sc.	Gordon Gilja	Zavod za hidrotehniku
prof. dr. sc.	Davor Skejić	Zavod za konstrukcije
izv. prof. dr. sc.	Kristina Ana Škreb	Zavod za matematiku
izv. prof. dr. sc.	Marijana Serdar	Zavod za materijale
prof. dr. sc.	Mladen Vukomanović	Zavod za organizaciju, tehnologiju i menadžment
izv. prof. dr. sc.	Ivo Haladin	Zavod za prometnice
izv. prof. dr. sc.	Marina Frančić Smrkić	Zavod za tehničku mehaniku
izv. prof. art. dr. sc.	Silvio Bašić	Samostalna Katedra za zgradarstvo

Predgovor

Dragi doktorandi,

veliko nam je zadovoljstvo najaviti 11. Simpozij doktorskog studija Građevinarstvo, koji se i ove godine održava u organizaciji Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta. Simpozij je zamišljen kao platforma za razmjenu ideja, predstavljanje istraživačkih tema te poticanje međusobne suradnje i znanstvenog dijaloga među doktorandima, mentorima i stručnjacima iz prakse.

Ovogodišnji program koncipiran je u dva tematska dijela.

U prvom dijelu, poseban naglasak stavljen je na razvoj komunikacijskih vještina doktoranada. Radionica pod nazivom "Pitch perfect: pronađi svoju priču", koju vodi Deni Nurkić iz Inovacijskog centra Nikola Tesla (ICENT), pružit će doktorandima praktična znanja o tome kako sažeto, jasno i uvjerljivo predstaviti svoje istraživačke ideje u ograničenom vremenu što predstavlja ključnu vještinu u akademskom i poslovnom okruženju.

Drugi dio Simpozija održava se 11. rujna 2025. i uključuje niz zanimljivih sadržaja poput okruglog stola o ulozi istraživanja u inženjerskoj struci na kojem sudjeluju predstavnici gospodarstva koji su svoje istraživačko iskustvo s doktorskog studija prenijeli u praksu, zatim slijedi predstavljanje istraživačkih tema doktoranada u sklopu kojeg će doktorandi primijeniti praktična znanja savladana tijekom održanih pripremnih radionica. Predavanje o pisanju znanstvenih radova s međunarodnim dosegom održat će prof. Došlić koji je drugu godinu za redom svrstan među 2% najcitiranijih znanstvenika te ćemo dan završiti inspirativnim predavanjem poslijedoktoranda dr. sc. Shaqfa koji će ispričati svoju priču znanstvenog usavršavanja u međunarodnom okruženju.

Veselimo se vašem sudjelovanju i doprinosu!

U ime organizacijskog tima,

Prodekanica za znanost i međunarodnu suradnju


izv. prof. dr. sc. **Ana Baričević**

Zagreb, kolovoz 2025.

Sadržaj

Predgovor	5
Primjena sastavljenih nosača od hladno oblikovanih čeličnih profila s valovitim hrptom Emanuel Krupa-Jurić, Ivan Lukačević.....	9
Posmični zidovi izvedeni dvoslojnim hladno oblikovanim čeličnim limovima s betonskim ispunom Marko Barišić, Ivan Lukačević	19
Proračun naprezanja prijanjanja između prednapetog AB nosača i FRP-a Tomislav Brozović, Tomislav Kišiček	29
Reinforcing 3D printed concrete – challenges and current developments Vita Varezić, Marko Bartolac, Josip Galić.....	37
Drvene konstrukcije bez adheziva i metalnih spajala Bruno Zadavec, Vlatka Rajčić	49
Pregled pristupa numeričkom modeliranju zidanih građevina Sara Vaing, Maja Baniček, Josip Atalić	59
Regional waste materials as candidates for mineral carbonation-based CO ₂ sequestration Viktor Kolčić, Marijana Serdar	73
Pregled digitalnih alata za kružno graditeljstvo Marina Džunić Matak, Maja–Marija Nahod	81
Prepoznavanje rizika u izvedbi infrastrukturnih projekata uz pomoć umjetne inteligencije Kristijan Vilibić, Ivica Završki.....	97
Primjena BIM-a u ugovorima projekta gradnje: kritička analiza Filip Ivančić, Mladen Vukomanović.....	107
Prediktivno održavanje tramvajskih kolosijeka na čvrstoj podlozi primjenom tehnologije digitalnog blizanca Franka Meštrović, Ivo Haladin	121
Evaluating Soil Liquefaction Susceptibility Using CPT Data: A Case Study from Brest Pokupski Antonia Mirčeta, Lovorka Librić, Mario Bačić, Meho Saša Kovačević.....	133
USAVRŠAVANJA	143

Primjena sastavljenih nosača od hladno oblikovanih čeličnih profila s valovitim hrptom

Emanuel Krupa-Jurić¹, izv. prof. dr. sc. **Ivan Lukačević²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, emanuel.krupa.juric@grad.unizg.hr

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

Sažetak

U radu su istraženi sastavljeni nosača od hladno oblikovanih čeličnih profila s valovitim hrptom povezanih točkastim zavarima. Primjenom hladno oblikovanih čeličnih presjeka i valovitog hrpta postićemo lagani, konstruktivno učinkoviti i ekonomični nosač koji može imati različite primijene. Osim konstrukcijskih prednosti, takav konstrukcijski element ima potencijal za automatiziranu proizvodnju i prednosti u pogledu održivosti. Kako valoviti hrbat i način spajanja hladno oblikovanih elemenata imaju veliku ulogu u ponašanju nosača istražen je njihov utjecaj. Također, istražene su i moguće primjene ovakvih nosača.

Ključne riječi: hladno oblikovani čelik, sastavljeni nosači, točkasti zavari, valoviti hrbat, spregnuta međukatna konstrukcija

Application of built-up corrugated web cold-formed steel girder

Abstract

The study investigates built-up corrugated web cold-formed steel girders that are connected by spot welds. By using cold-formed steel sections and a corrugated web, a lightweight, structurally efficient, and economical girder is achieved, which has various applications. In addition to structural advantages, such an element also has the potential for automated production and offers sustainability benefits. Since the corrugated web and the method of connecting cold-formed elements significantly influence the behaviour of the beam, their effects were examined. Possible applications of these beams were also explored.

Key words: cold-formed steel, built-up beams, resistance spot welds, corrugated web, composite floor system

1 Uvod

Hladno oblikovani profili (eng. *Cold Formed Steel* - CFS) imaju veliku primjenu u građevinarstvu kao sekundarni elementi, a u zadnjim godinama raste interes za upotrebu CFS profila kao primarnih elementa. Atraktivne karakteristike CFS profila su njihova mala vlastita težina i raznolikost oblika poprečnih presjeka koji se oblikuju točno prema zahtjevima namjene. Također, sloboda u oblikovanju poprečnih presjeka omogućuje izvedbu konstruktivno racionalnih presjeka bez nepotrebnog utroška materijala. Mala vlastita težina omogućuje jednostavan transport i montažu na gradilištu. Nadalje, CFS profili imaju veliku otpornost na koroziju. Antikorozivna zaštita se izvodi vrućim cinčanjem limova čija je prednost u tome što nakon hladnog oblikovanja nije potrebno dodatno obrađivati površinu i zaštita može biti učinkovita tijekom cijelog životnog vijeka građevine. Osim konstruktivnih prednosti, CFS profili imaju veliki potencijal u pogledu održivosti. Negativni utjecaji na okoliš uslijed transporta i montaže su znatno smanjeni upotrebom CFS profila. Na kraju životnog vijeka, moguća je demontaža i reciklaža ili ponovna upotreba profila.

Upotreba tankih limova i složene geometrije presjeka uzrokuju i određene poteškoće kod dokaza mehaničke otpornosti i stabilnosti kao što su pojave globalnih, lokalnih i distorzijskih oblika gubitka stabilnosti te interakcije između navedenih oblika. Interakcija između lokalnih i globalnih oblika otkazivanja čini CFS profile izrazito osjetljivim na nesavršenosti radi čega dolazi do redukcije teorijske vrijednosti otpornosti. S obzirom na to da su nesavršenosti uvijek prisutne, interakcija lokalnih i globalnih oblika otkazivanja su kod CFS profila uvijek prisutne. Osim toga, tankostijeni nosači otvorenog presjeka imaju malu torzijsku krutost. Kod jedno osno simetričnih presjeka postoji opasnost od značajnih torzijskih deformacija ako opterećenje ne djeluje u centru posmika [1].

Navedene nedostatke moguće je umanjiti ili čak izbjeći povezivanjem pojedinačnih CFS profila pri čemu je moguće dobiti presjeke simetrične oko obje osi s većom torzijskom krutosti i većom otpornošću. Prema navedenom, može se zaključiti da je upotrebom sastavljenih profila moguće ostvariti ideju primjene CFS profila kao primarnih elemenata u konstrukcijama [2].

Primjer inovativnog tehničkog rješenja je sastavljeni nosač kojemu je hrbat izveden valovitim limom na kojeg su povezane četiri pojasnice od C profila (eng. *Corrugated web beam* - CWB), slika 1.



Slika 1. CWB nosač i njegove komponente

U radu su istraženi sastavljeni CWB nosači kao potencijalno lagani, konstruktivno učinkoviti i ekonomični konstrukcijski elementi koji imaju potencijal za automatiziranu proizvodnju te prednosti u pogledu održivosti. Kako valoviti hrbat i način spajanja imaju veliku ulogu u ponašanju nosača detaljnije je obuhvaćen njihov utjecaj, a zatim moguće primjene.

2 Bitni aspekti ponašanja CWB nosača

2.1 Povezivanje CFS profila

Postoji više mogućih rješenja spajanja pojedinih CFS profila kao što su već spomenuti vijci, zakovice i različiti načini zavarivanja. S obzirom na to da CFS profili imaju vrlo tanke stijenke, u slučaju zavarivanja konvencionalne metode nisu primjenjive [1,3]. Prema tome, optimalno rješenje spajanja treba odrediti ovisno o prikladnosti metode spajanja za konkretan slučaj, mehaničkim karakteristikama spoja te karakteristika proizvodnog procesa i cijene.

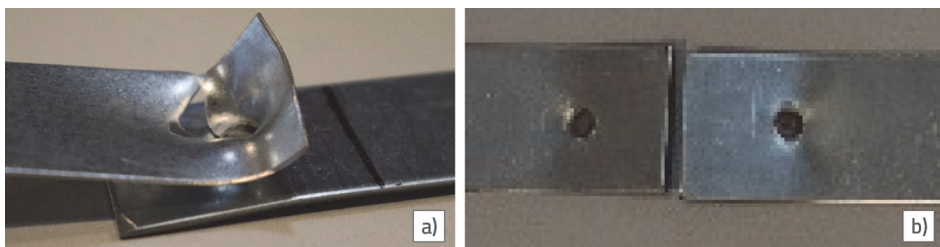
U radu [4] provedena je usporedna studija zakovica (eng. Self-Pierce Riveting - SPR), elektro otpornog točkastog zavarivanja (eng. Resistance Spot Welding - RSW) i točkastog spajanja pomoću trenja (eng. Spot Friction Joining - SFJ). Spojevi sa zakovicama imaju najbolje mehaničke karakteristike, ali je primjena opravdana samo u slučaju značajnih zahtjeva za mehaničkom otpornošću zbog visoke cijene i ograničenja proizvodnog procesa. SFJ spojevi imaju prednost u pogledu potrošnje energije i izvedbe velikog broja istih spojeva, ali su ograničeni u pogledu vremena proizvodnje, debljine limova koji se spajaju te imaju slabije mehaničke karakteristike u odnosu na SPR i RSW. Kao optimalno rješenje se pokazalo RSW, uzimajući u obzir mehaničke karakteristike, cijenu proizvodnje, mogućnost automatizacije i masovne proizvodnje.

Lasersko zavarivanje je također jedna od mogućnosti povezivanja, ali otpornost spoja između limova s pocinčanom površinom u nekim slučajevima može biti značajno reducirana. Isto tako, otpornost je uvjetovana razmakom limova koji se povezuje, a u slučaju većeg razmaka zavarivanje nije moguće [2].

Spajanje pojedinih CFS profila moguće je i samobušećim vijcima, ali veza ostvarena samobušećim vijcima je posmično podatljiva te dolazi do proklizavanja između elemenata što nije slučaj kod RSW spojeva. Primjenom točkastih zavara nema relativnog pomaka između elemenata, prema tome nosač s točkastim zavarima ima veću otpornost i krutost u odnosu na nosač sa samobušećim vijcima [3,5].

Eksperimentalna i numerička istraživanja u [5,6] rezultirala su mehaničkim karakteristikama i načinima otkazivanja točkastih zavara. Moguća su dva oblika otkazivanja, 'full button pull out', prikazan na slici 2 a), kod kojega dolazi do otkazivanja limova u okolini zavara i 'interfacial fracture failure', prikazan na slici 2 b), kod

kojega dolazi do otkazivanja zavora. Najčešći oblik otkazivanja je 'full button pull out', ali otpornost spoja nije uvjetovan oblikom otkazivanja. Osobitost ovog spoja je ta što je krajnja otpornost ograničena plastičnom otpornošću tanjeg lima.



Slika 2. Oblici otkazivanja RSW spojeva: a) full button pull out; b) interfacial fracture failure

2.2 Valoviti hrbat

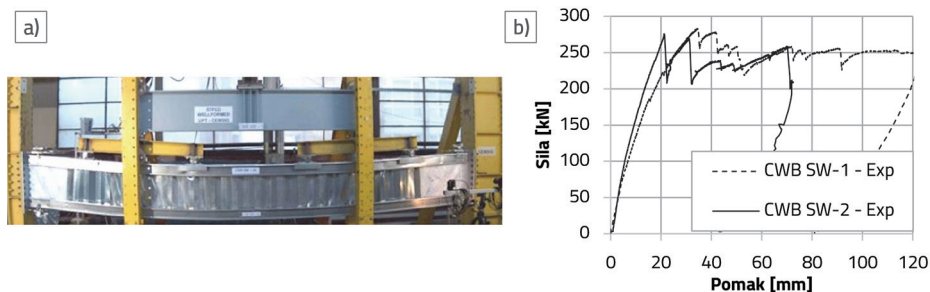
Nosači s valovitim hrptovima se primjenjuju zadnjih nekoliko desetljeća u zgradarstvu i mostogradnji. Primjena valovitih hrptova opravdana je sa konstrukcijskog i ekonomskog stajališta. Valoviti hrptovi imaju veću stabilnost nego ravni hrptovi čime je moguća znatna ušteda u materijalu. U odnosu na konvencionalno proizvedene presjeke procijenjena ušteda je između 10 i 30%, a u odnosu na vruće valjane profile i više od 30%. Otpornost na izvijanje valovitog hrpta debljine od 1.5 do 3 mm je konkurenta otpornosti na izvijanje ravnog hrpta debljine 12 mm [7]. Također, nisu potrebna dodatna vertikalna ukrućenja čime se znatno smanjuje vrijeme izrade i povećava otpornost na umor [8]. Valoviti hrbat sudjeluje samo u prijenosu poprečnih sila dok se moment savijanja prenosi pojasnicama. Prema rezultatima istraživanja nema naznake interakcije savijanja i poprečnih sila [9]. Ovisno o geometriji valovitog hrpta mogu se javiti lokalni i globalni gubitak stabilnosti te njihova interakcija. Kod lokalnog izbočivanja, valoviti hrbat se promatra kao niz ravnih limova pridržanih pojasnicama i po visini s susjednim limovima valovitog hrpta. U slučaju gušćeg rasporeda valova, javlja se globalno izvijanje [10]. Analiza bočno torzijskog izvijanja nosača s valovitim hrptom je pokazala kako je otpornost u odnosu na nosače s ravnim hrptom veća do 10% [11].

3 Primjena sastavljenih nosača od CFS profila s valovitim hrptom

3.1 Eksperimentalna i numerička parametarska analiza CWB nosača

U radu [12] autori su proveli numeričku i eksperimentalnu studiju CWB nosača. Svi čelični CFS profili su međusobno spojeni sa SRW. Nosači su raspona 5157 mm i visine poprečnog presjeka od 600 mm. Eksperimentalno su ispitana dva nosača

s posmičnim limovima različitih dimenzija i debljine. Također, istražen je različiti način povezivanja valovitih hrptova s obzirom na to da je valoviti hrbat sastavljen od više limova. Na jednom nosaču su dijelovi hrpta povezani jednim redom točkastih zavora, a na drugom u dva reda. Oba nosača su imala jednak slijed otkazivanja. Prvo je došlo do otkazivanja posmičnih panela, zatim distorzija valovitih hrptova i na kraju, nakon dosezanja krajnje sile došlo je do otkazivanja pojedinih zavora. Rezultati ispitivanja nosača prikazani su na slici 3. Analizom krivulja sila – pomak zaključeno je kako se nosači ponašaju duktilno s vrlo dobrom otpornošću. Također, usporedbom krivulja uočeno je kako na duktilnost, a u manjoj mjeri na otpornost utječe konfiguracija veze između dijelova valovitog hrpta. Nosač u kojemu su valoviti limovi povezani u dva reda točkastih zavora ima gotovo dvostruko veći krajnji pomak.



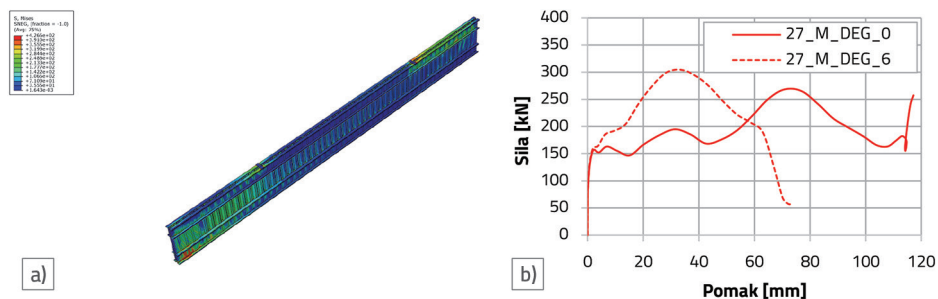
Slika 3. Eksperimentalno ispitivanje CWB nosača [13]: a) deformacija nosača prilikom ispitivanja; b) dijagram sila-pomak

U daljnjim analizama CWB nosača autori rada [13] napravili su numeričku parametarsku analizu s ciljem identifikacije komponenata nosača koje značajno utječu na otpornost. U radu su ispitali utjecaj sljedećih parametara: rubni uvjeti, jednostruki i dvostruki valoviti hrbat, broj točkastih zavora na pojasnicama, razmak točkastih zavora na pojasnicama, debljina pojasnica, debljina valovitog hrpta i debljina posmičnog panela. Usporedbom rezultata nosača s nominalno upetim i zglobnim ležajevima zaključeno je kako je moguće značajno smanjiti kompleksnost sustava izvedbom zglobnih ležajevima jer je redukcija otpornosti zanemariva. S druge strane, krutost i otpornost značajno rastu izvedbom nosača s dvostrukim valovitim hrptom. Također, broj točkastih zavora na pojasnici imaju određeni utjecaj na ponašanje. Inicijalna krutost nosača s dva i tri zavora na pojasnici je gotovo ista, ali postoji odstupanje u krajnjoj otpornosti. U slučaju tri zavora, zavori nisu bili oštećeni dok je u slučaju dva zavora došlo do otkazivanja zavora i naglog pada krutosti i otpornosti. S manjim brojem zavora dolazi do većeg razdvajanja profila što znači da broj zavora utječe na način otkazivanja pa samim time i na otpornost. Suprotno tomu, razmak između zavora na pojasnici

ima zanemariv utjecaj. Debljine pojasnica i valovitog hrpta imaju značajnu ulogu u otpornosti. Za male debljine pojasnica otpornost na savijanje je vrlo mala zbog rane pojave instabiliteta pojasnice a i zbog otkazivanja zavora. S većom debljinom valovitog hrpta se postiže veća otpornost, a dolazi i do promjene načina izvijanja i kod većih debljina nema otkazivanja zavora. Većom debljinom posmičnih panela postiže se veća otpornost, ali je utjecaj manji nego što je to slučaj kod debljine valovitog hrpta.

3.2 Numerička analiza CWB nosača većih raspona

Nadalje, u radu [14] provedena je numerička parametarska analiza CWB nosača za veće raspone. U gore navedenim radovima analizirani su rasponi nosača do 6 m, a u ovom radu autori proširuju analizu na raspone od 12 m i 27 m. Na Slici 4 a) prikazan je deformirani oblik, raspodjela von Mises naprezanja kod doseganja maksimalnog kapaciteta za polovicu modela raspona 27 m, a na slici 4 b) prikazan je pripadni dijagram sila-pomak. Uzimajući u obzir primjere industrijskih građevina, jednostrešni i dvostrešni krovovi podrazumijevaju nosače u nagibu pa je stoga analiziran i taj slučaj. Osim raspona i nagiba nosača, analiziran je utjecaj debljina posmičnog panela, visina i debljina pojasnica, debljina valovitog hrpta i visina poprečnog presjeka. Utjecaj debljina pojedinih komponenata jednak je kao i u radu [13]. Povećanjem momenta tromosti C profila otpornost se ne povećava jer nosač otkazuje na posmičnim komponentama što je osobito za nosače manjih raspona. Kod nosača većih raspona zbog povećanja omjera momenta i poprečne sile dolazi do koncentracije naprezanja na ležajevima. To uzrokuje tečenje koje se vidi kao plastični plato u dijagramu sila-pomak. Kod nosača pod nagibom, javlja se uzdužna tlačna sila i dolazi do redukcije momenta savijanja i poprečne sile. Iako se javlja uzdužna tlačna sila, zbog redukcije momenta savijanja i poprečne sile, nagib nosača povoljno utječe na krutost i otpornost. Kod većih raspona opažena je distorzija pojasnica.



Slika 4. Rezultati numeričke analize CWB nosača većih raspona [14]: a) Deformirani oblik i raspodjela von Mises naprezanja za nosač raspona 27 m; b) Dijagram sila pomak za nosač raspona 27 m

3.3 Eksperimentalna i numerička analiza CWB nosača s otvorima

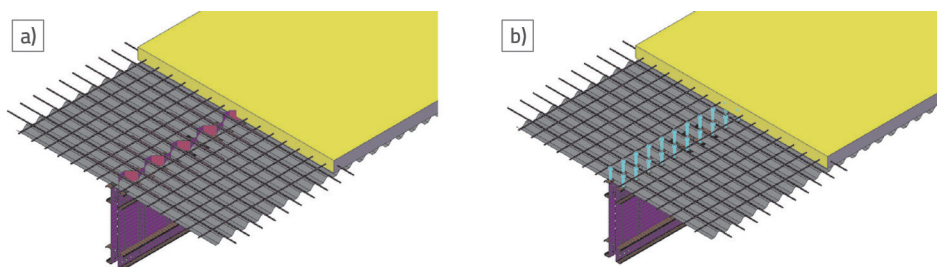
Moguća primjena CWB nosača je i u međukatnim konstrukcijama. U tom slučaju, potrebno je omogućiti prostor za vođenje instalacija izvođenjem otvora u hrptu. U radu [15] predstavljena je eksperimentalna i numerička analiza takvog elementa. Autori su ispitali dvije konfiguracije ojačanja otvora na pojedinim nosačima. Prvo ojačanje je izvedeno ravnim čeličnim limom točkasto zavarenim s jedne strane zbog ne mogućnosti zavarivanja i sa druge strane. Također, lim je savinut pod pravim kutom i točkasto zavaren na pojasnicu kako bi dodatno ojačao konturu otvora. Drugi otvor je ojačan tako što je lim savijen u obliku konture i zavaren MIG postupkom (eng. Metal Inert Gas - MIG). Položaj otvora se odredio tako da se izbjegnu maksimalna naprezanja od posmika na ležaju i od savijanja na polovini raspona, a visina otvora određena je prema dimenzijama instalacija dok je širina uvjetovana razmakom između valova hrpta. Primijećene su znatne deformacije u dijelu nosača između otvora i bližeg ležaja. Otkazivanje je išlo sljedećim tokom: izbočivanje posmičnih panela, deformacija kutova otvora, distorzija valovitog hrpta u blizini ležajeva, posmično izbočivanje valovitog hrpta, otkazivanje točkastih zavora pri povećanju ostalih deformacija i lokalno izbočivanje pojasnica u mjestima unosa sile. S obzirom na to da se jedino razlikuje način ojačavanja otvora, usporedbom rezultata se zaključilo kako nosač u kojemu je lim zavaren MIG zavarivanjem ima veću krutost i otpornost jer zavar sprečava distorziju valovitog lima. U slučaju točkastog zavarivanja došlo je do distorzije valovitog lima u početnim fazama opterećivanja što je uzrokovalo pad krutosti. Iako rješenje ojačanja otvora s MIG zavarivanjem ima veću krutost i otpornost, radi jednostavnije izvedbe i mogućnosti automatizacije proizvodnog procesa kao optimalno rješenje odabrano je rješenje u kojemu je ojačanje spojeno točkastim zavarima. Analizom je utvrđeno kako izvedba ojačanja otvora ima vrlo pozitivan učinak te dolazi do manjih redukcija u otpornosti i krutosti koje mogu biti vrlo značajne u slučaju izvedbe otvora bez ojačanja.

3.4 LWT-FLOOR sustav

Konkretna primjena CWB nosača u međukatnim konstrukcijama je ostvarena LWT-FLOOR projektom [16]. Prikaz sustava i rješenja ostvarivanja posmičnog spoja kod LWT-FLOOR sustava prikazana su na slici 5.

U okviru projekta provedena su opsežna eksperimentalna i numerička istraživanja predloženog sustava. Rad [17] obrađuje rezultate eksperimentalnog ispitivanja točkastih zavora, 'push-out' ispitivanja demontažnog posmičnog spoja i savijanje spregnutog CWB nosača s ciljem kalibracije numeričkih modela. Nadalje, autori su u radu [18] proveli numeričku analizu savijanja spregnute međukatne konstrukcije od CFS sastavljenog nosača i betona. Usporedba eksperimentalnih i

numeričkih rezultata pokazuje vrlo dobro poklapanje. U parametarskoj analizi ispitani su utjecaji sljedećih parametara: stupanj posmične veze, gustoća točkastih zavora, klasa betona, debljina čeličnih limova i promjer moždanika. Analizom je zaključeno da na otpornost na savijanje nosača najviše utječu gustoća točkastih zavora, debljina limova i stupanj posmičnog spoja veze kao najznačajniji parametar.



Slika 5. LWT-FLOOR sustav-rješenja ostvarivanja posmičnog spoja: a) Betonski moždanici; b) Demontažni moždanici s glavom

4 Zaključak

U radu su istraženi sastavljeni CWB nosači sastavljeni od C profila kao pojasnica i valovitog hrpta koji su povezani RSW zavarima. Takvom kombinacijom hladno oblikovanih čeličnih profila i limova postiže se vrlo lagani nosač s izvrsnim mehaničkim karakteristikama. Primjena valovitog hrpta omogućuje upotrebu vrlo tankih limova zbog odlične otpornosti na izvijanje čime se značajno smanjuje vlastita težina nosača i cijena te se pojednostavljuje izvedba jer nije potrebno izvoditi ukrčenja. Dosadašnja istraživanja CWB nosača pokazala su kako imaju veliku otpornost i duktilnost te da je moguća izvedba nosača velikih raspona kao sastavni dio čelične okvirne konstrukcije ili u kombinaciji s betonskom pojasnicom međukatne konstrukcije. Osim konstrukcijskih prednosti, takav konstrukcijski element ima potencijal za automatiziranu proizvodnju i prednosti u pogledu održivosti. S obzirom da za ovakav čelični element ne postoji normirani postupak proračuna, potrebno je privesti daljnja istraživanja za primjene u različitim uvjetima.

Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-2964 (LWT-FLOOR).

Literatura

- [1] Dubina D, Ungureanu V, Landolfo R. Design of Cold-formed Steel Structures. Wiley; 2012. <https://doi.org/10.1002/9783433602256>.
- [2] Landolfo R, Mammana O, Portioli F, Di Lorenzo G, Guerrieri MR. Laser welded built-up cold-formed steel beams: Experimental investigations. *Thin-Walled Structures* 2008;46:781–91. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.03.009>.
- [3] Rasmussen KJR, Khezri M, Schafer BW, Zhang H. The mechanics of built-up cold-formed steel members. *Thin-Walled Structures* 2020;154:106756. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106756>.
- [4] Briskham P, Blundell N, Han L, Hewitt R, Young K, Boomer D. Comparison of Self-Pierce Riveting, Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0774>.
- [5] Ungureanu V, Both I, Burca M, Tunea D, Grosan M, Neagu C, et al. WELDING TECHNOLOGIES FOR BUILT-UP COLD-FORMED STEEL BEAMS: EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS . Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018), Hong Kong: 2018.
- [6] Rajić A, Lukačević I, Ćurković I, Žuvelek V. Performance evaluation of cold-formed steel spot weld connections. *Ce/Papers* 2023;6:1959–64. <https://doi.org/10.1002/cepa.2627>.
- [7] Ungureanu V, Dubina D. Influence of Corrugation Depth on Lateral Stability of Cold-Formed Steel Beams of Corrugated Webs. *Acta Mechanica et Automatica* 2016;10:104–11. <https://doi.org/10.1515/ama-2016-0017>.
- [8] Elgaaly M, Seshadri A, Rodriguez R, Ibrahim S. Bridge Girders with Corrugated Webs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2000;1696:162–70. <https://doi.org/10.3141/1696-19>.
- [9] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton RW. Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering* 1997;123:772–82. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:6\(772\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:6(772)).
- [10] Elgaaly M, Hamilton RW, Seshadri A. Shear Strength of Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering* 1996;122:390–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:4\(390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(390)).
- [11] Moon J, Yi J-W, Choi BH, Lee H-E. Lateral–torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending. *Thin-Walled Structures* 2009;47:21–30. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.04.005>.

- [12] Ungureanu V, Both I, Burca M, Radu B, Neagu C, Dubina D. Experimental and numerical investigations on built-up cold-formed steel beams using resistance spot welding. *Thin-Walled Structures* 2021;161:107456. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107456>.
- [13] Lukačević I, Ungureanu V. Numerical parametric study on corrugated web built-up beams with pinned end supports. *Cold-Formed Steel Research Consortium Colloquium 2022, Baltimore (MD); 2022*.
- [14] Ungureanu V, Lukačević I, Both I, Dubina D. Numerical investigations on built-up cold-formed steel beams for long spans. *Ce/Papers* 2021;4:2277–84. <https://doi.org/10.1002/cepa.1550>.
- [15] Cristian AA, Ungureanu V. Parametric Study on Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Web Openings Connected by Spot Welding. *Buildings* 2023;13:237. <https://doi.org/10.3390/buildings13010237>.
- [16] Lukačević I, Ćirković I, Rajić A, Bartolac M. Lightweight Composite Floor System-Cold-Formed Steel and Concrete-LWT-FLOOR Project. *Buildings* 2022;12:209. <https://doi.org/10.3390/buildings12020209>.
- [17] Lukačević I, Ćirković I, Rajić A, Žuvelek V. Advancements in Lightweight Cold-Formed Composite Steel-Concrete Floor Systems: Recent Findings from the LWT-FLOOR Project. *IABSE Congress San Jose 2024 Beyond Structural Engineering in a Changing World, San Jose: 2024, p. 64–72*. <https://doi.org/10.2749/sanjose.2024.0064>.
- [18] Rajić A, Lukačević I, Ćirković I, Žuvelek V. Numerical study of cold-formed steel-concrete composite floor system with demountable shear connectors. *Cold-Formed Steel Research Consortium Colloquium 2022 (CFSRC Colloquium 2022), Baltimore: Baltimore (MD); 2022*.

Posmični zidovi izvedeni dvoslojnim hladno oblikovanim čeličnim limovima s betonskim ispunom

Marko Barišić¹, izv. prof. dr. sc. **Ivan Lukačević²**

¹MBK biro za konstrukcije d.o.o., marko.baristic@mbk.hr

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

Sažetak

Posmični zid s dvoslojnim čeličnim limovima i betonskim ispunom inovativan je sprengnuti posmični zid sastavljen od čeličnih limova kao vanjske ovojnice, betonskog ispuna i spojnih sredstava. U usporedbi sa klasičnim armiranobetonskim zidovima ovakvi sustavi odlikuju se visokom posmičnom otpornošću i duktilnošću, dok istovremeno omogućuju značajne uštede, od manje debljine zidova, pa do veće brzine izvedbe. U radu je dan opis pojedinačnih komponenti posmičnog zida te pregled važnijih provedenih istraživanja ključnih varijabli koje utječu na ponašanje ovakvih zidova te mogućnost njihove inovativne primjene kod dvojnih okvirnih sustava u kombinaciji s hladno oblikovanim čelikom.

Ključne riječi: sprengnute konstrukcije, posmični zidovi, stabilizacija, betonski ispun, hladno oblikovani čelični limovi

Double-skin cold-formed steel shear walls with concrete infill

Abstract

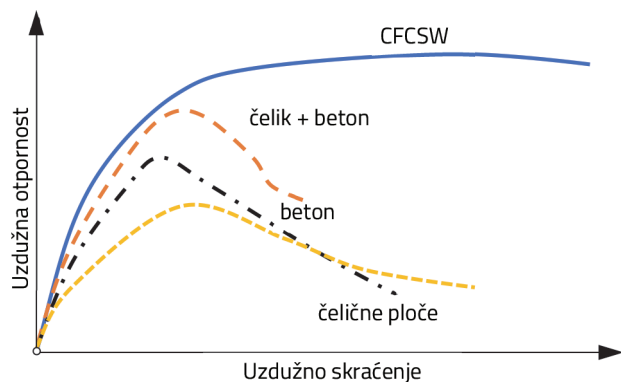
A double-skin steel shear wall with concrete infill is an innovative composite wall consisting of a double-skin steel sheet as an outer shell, concrete infill, and intermediate fasteners. Such systems are characterised by higher shear strength and ductility compared to traditional reinforced concrete walls. Additionally, they enable significant savings, ranging from smaller wall dimensions to increased construction speed. This paper describes the individual components of a shear wall and provides an overview of the most important key research on the variables that influence the behaviour of such walls and the possibility of their innovative application to dual frame systems in combination with cold-formed steel.

Key words: composite structures, shear walls, bracing system, concrete infill, cold-formed steel sheeting

1 Uvod

Čelične konstrukcije od hladno oblikovanih profila imaju široku primjenu u niskim (do 4 kata) i višekatnim zgradama (10 do 12 katova). Njihova popularnost može se pripisati mnogim prednostima, koje između ostalog uključuju veliku otpornost uz malu vlastitu težinu, jednostavnost masovne proizvodnje, brzu izgradnju te ekološku prihvatljivost [1]. Upravo je brzina izgradnje ključni argument koji ide u prilog ovakvim konstrukcijama u usporedbi sa tradicionalnim sustavima, dok se ekološke prednosti ovakvih konstrukcija očituju u manjoj količini otpada uslijed tvorničke proizvodnje te mogućnosti ponovne uporabe ili potpune reciklaže, što promiče kružno gospodarstvo i održivu gradnju. Nadalje, svi elementi ovakvih konstrukcija su zaštićeni od korozije prevlakama cinka što uvelike olakšava održavanje konstrukcije u cjelini. Zbog navedenih prednosti sustava od hladno oblikovanih profila značajno je porastao interes za istraživanjem poboljšanja ponašanja takvih sustava, kao i mogućnost demontaže istih na kraju životnog vijeka. Jedna od mogućih primjena hladno oblikovanih čeličnih elemenata su posmični zidovi, čija je uloga u otpornosti globalnog konstrukcijskog sustava na horizontalna djelovanja ključna [2]. Međutim, niska posmična otpornost, krutost i mala duktilnost takvih zidova podrazumijeva da se ovaj tip posmičnog zida prvenstveno može koristiti kod niskih zgrada ili područjima s niskom seizmičnošću [3-5]. U visoko seizmičkim područjima za stabilizaciju srednje visokih i visokih zgrada posmična otpornost sustava može se povećati uvođenjem betona kao ispune [6], odnosno izvedbom spregnutih zidova. Spregnuti sustavi čelik-beton općenito su jedan od najisplativijih konstrukcijskih sustava i imaju različite primjene u građevinarstvu za izvedbu nosivih elemenata konstrukcija kao što su spregnuti nosači, stupovi i međukatne konstrukcije. U ovim sustavima konstrukcijski čelik i beton djeluju zajedno, pri čemu se iskorištava prednost svih materijala: visoka tlačna otpornost betona, odnosno vlačna otpornost i duktilnost čelika, kako bi se postigla optimalna konstrukcija u odnosu na korištenje pojedinačnih materijala [7]. Prva primjena sustava spregnutih zidova koji kombiniraju dvoslojne čelične limove s betonskim ispunom zabilježena je u nuklearnoj industriji te visokim čeličnim okvirnim konstrukcijama zgrada, pokazujući izvrsne konstrukcijske karakteristike s obzirom na posmičnu otpornost i duktilnost [8]. U usporedbi sa klasičnim armiranobetonskim zidovima, spregnuti zidovi mogu ponuditi optimalnije tehničko rješenje u visokim građevinama, obzirom da se dimenzije zidova mogu znatno reducirati uz zadržavanje ekvivalentne ili veće mehaničke otpornosti i stabilnosti sustava, dok istovremeno omogućuju bržu izvedbu na gradilištu, obzirom na tvorničku proizvodnju predgotovljenih sklopova. Slika 1. prikazuje ponašanje posmičnih zidova od čeličnih limova, klasičnog armiranobetonskog zida i spregnutog zida od čeličnih limova i betonskog ispuna (eng. Concrete Filled Composite

Steel Wall - CFCSW) izloženih tlaku, pri čemu je tlačno, odnosno uzdužno skraćivanje istih prikazano na apscisi, dok je tlačna otpornost prikazana na ordinati. Podaci su prikupljeni iz eksperimentalnih rezultata koje su proveli Usami i suradnici [9]. Ispitivani su uzorci zidova u omjerima širine i debljine od 20, 30, 40 i 50 uz zadržavanje konstantne debljine zidova od 200 mm. Rezultati su pokazali da je tlačna otpornost CFCSW-a veća od zbroya tlačnih otpornosti čelika i betona pojedinačno.



Slika 1. Ponašanje različitih vrsta posmičnog zida u tlaku, prilagođeno iz [8]

Jedan od načina optimalne upotrebe materijala je primjena hladno oblikovanih čeličnih profila i limova u gore navedenom spregnutom sustavu. U radu je dan opis pojedinačnih komponenti CFCSW zidova te pregled važnijih provedenih istraživanja ključnih varijabli koje utječu na ponašanje CFCSW zidova te mogućnost njihove inovativne primjene kod dvojnih okvirnih sustava u kombinaciji s hladno oblikovanim čelikom.

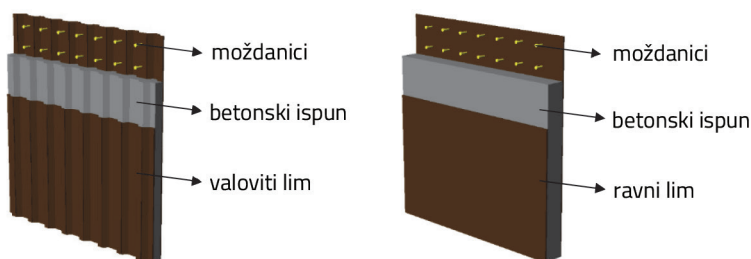
2 Elementi spregnutog posmičnog zida

Općenito, sustav spregnutih posmičnih zidova sastoji se od čeličnih limova kao obostrane vanjske oplata, betonskog ispuna i različitih spojnih elemenata za sprezanje, kao što su trnovi, vijci, dijafragme i slično. U nastavku je dan kratki opis pojedinačnih komponenti koje tvore sustav spregnutog posmičnog zida.

2.1 Čelični limovi

Čelični limovi mogu djelovati kao oplata prije izlivanja betona i istodobno preuzeti opterećenja u fazi izgradnje. Obično se proizvode u radionici i potom transportiraju na gradilište. U uporabnoj fazi djeluju kao ojačanja koja mogu pridonijeti otpornosti zidova na posmik, kao i dvoosno ukrućenje betona radi povećanja njegove tlačne čvrstoće, što dovodi do duktilnijeg načina otkazivanja. Slika 2. pri-

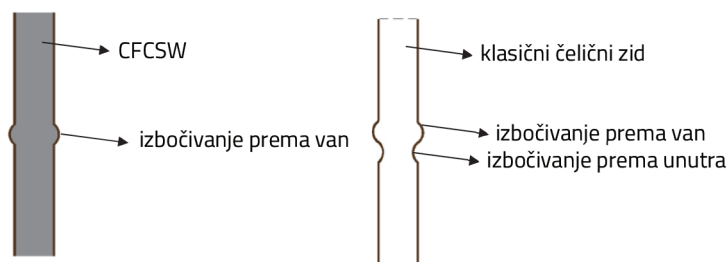
kazuje dva tipa oblikovanja vanjske ovojnice spregnutog posmičnog zida: valoviti, odnosno konvencionalni, ravni čelični lim. Razvidno je da valoviti čelični lim može pružiti dodatnu mehaničku otpornost – fizičku barijeru između čeličnog lima i betona na valovima. U navedenom slučaju betonski ispun doprinosi kompaktnosti sustava: pri horizontalnom djelovanju valoviti lim imati će manju mogućnost lokalne deformacije, obzirom da je ista ograničena visokom tlačnom otpornošću betonskog ispuna u valu. S druge strane, konvencionalni čelični limovi češće se koriste u praksi zbog jednostavnije proizvodnje i mogućnosti izvedbe u većim debljinama [8].



Slika 2. Oblikovanje vanjske ovojnice spregnutog posmičnog zida

2.2 Betonski ispun

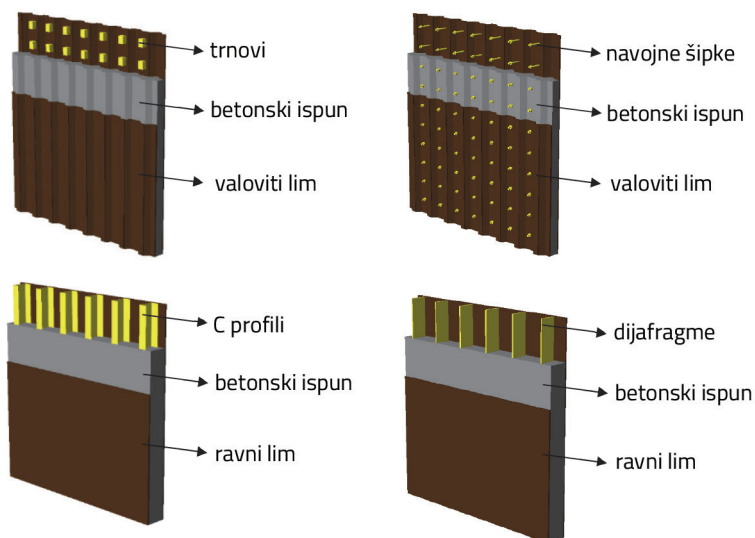
Osim što povećava globalnu otpornost sustava, betonski ispun može spriječiti lokalno izbočivanje čeličnih limova u ranim fazama. Slika 3. prikazuje oblik izbočivanja spregnutog zida od limova i betonskog ispuna te klasičnog čeličnog posmičnog zida. Iz navedenog je vidljivo da se u spregnutim zidovima lokalno izbočivanje događa isključivo prema van [8].



Slika 3. Način otkazivanja spregnutog i klasičnog čeličnog posmičnog zida, prilagođeno iz [8]

2.3 Spojna sredstva

Spregnuto djelovanje čelika i betona postiže se raznim spojnim sredstvima, kao što su trnovi, moždanici, vijci, navojne šipke, dijafragme, rubni i unutarnji profili i slično. O razmaku spojnih sredstava uvelike ovisi ponašanje posmičnog zida u cjelini. Slika 4. prikazuje neke vrste spojnih sredstava za sprežanje betona sa valovitim, odnosno konvencionalnim ravnim limovima.



Slika 4. Primjeri nekih spojnih sredstava u spregnutim posmičnim zidovima sa valovitim i ravnim limovima

3 Dosadašnja istraživanja spregnutih posmičnih zidova i njihova primjena

Spregnuti posmični zidovi tema su brojnih eksperimentalnih i numeričkih analiza pri statičkom, cikličkom i dinamičkom opterećenju. U nastavku je dan pregled važnijih provedenih istraživanja ključnih varijabli koje utječu na ponašanje CFCSW zidova te mogućnosti njihove primjene korištenjem hladno oblikovanih limova.

3.1 Omjer širine i debljine zida

O odabiru osnovne geometrije zidova, njegovoj projektiranoj debljini i visini, odnosno omjeru istih uvelike će ovisiti ponašanje zida. U istraživanju [9], za različite omjere širine (B) i debljine zida (t), eksperimentalnom analizom utvrđeno je da se lokalno izbočivanje čeličnih limova povećava sa smanjenjem omjera B/t . S

druge strane, povećanjem omjera B/t smanjuju se tlačna otpornost i mogućnost deformacije, odnosno duktilnost zida. Nadalje, krutost svih zidova opterećenih na tlačnu silu od 3MN bila je nepromijenjena, neovisno o omjeru B/t , dok se za primijenjenu silu veću od 3MN krutost zidova smanjivala za veće omjere B/t .

3.2 Omjer tlačnog opterećenja

Omjer tlačnog opterećenja posmičnog zida definira se kao omjer primijenjene tlačne sile i krajnje tlačne otpornosti posmičnog zida. Veći omjer tlačnog opterećenja doprinosi boljoj stiješnjenosti betona, stoga spregnuti zidovi apsorbiraju više energije te je samim time njihova sposobnost razgradnje energije veća. Međutim, betonski ispun ima tendenciju drobljenja u ranoj fazi pod većim omjerom tlačnog opterećenja, što dovodi do smanjenja krutosti i otpornosti pod cikličkim opterećenjem. Nadalje, povećanjem omjera tlačnog opterećenja smanjuju se deformacijska sposobnost i duktilnost posmičnog zida [8]. Uzevši u obzir navedeno, pri projektiranju posmičnih zidova potrebno je projektirati odgovarajući omjer tlačnog opterećenja, kako bi se osiguralo da sposobnost razgradnje energije, krutost, otpornost, duktilnost i deformacijska sposobnost posmičnog zida mogu postići zadovoljavajuću vrijednost [8].

3.3 Debljina limova

U fazi eksploatacije čelični limovi djeluju kao armatura. Nastavno na navedeno, provedene su razne studije kako bi se analizirao utjecaj debljine čeličnog lima na sustav spregnutog zida. Takeda i suradnici [10] proveli su eksperimente s tri različite debljine limova, pokazujući da veća debljina lima doprinosi većoj krutosti, posmičnoj otpornosti i stabilnijoj krivulji histereze. Međutim, Ozaki i suradnici [11] naveli su da povećanjem debljine lima može doći do većih oštećenja betonske ispuna pri cikličkom opterećenju, jer se posmična čvrstoća betona nije povećala, što dovodi do smanjenja duktilnosti. Za spregnute zidove pod tlačnim opterećenjem, rezultati istraživanja pokazali su da su povećanjem debljine lima krutost i otpornost na izvijanje povećane [11]. S druge strane, povećanjem debljine lima spregnuto djelovanje sustava se smanjilo. Spregnuto djelovanje može se izraziti kao duljina preko koje lim doseže vlačnu granicu popuštanja. Razvojna duljina u spregnutom posmičnom zidu inspirirana je konceptom razvojne duljine u klasičnim armiranobetonskim zidovima, koja se može definirati kao potrebna duljina ugrađene armature za spregnuto djelovanje betona i čelika [8]. Istaknuto je da veća debljina čeličnog lima rezultira manjom razvojnom duljinom i manjim spregnutim djelovanjem. Međutim, slično klasičnom armiranobetonskom zidu, razvojna duljina CFCSW-a trebala bi biti dva do tri puta veća od debljine zida, što ograničava debljinu lima [12]. Osim otpornosti na savijanje u ravnini, utvrđeno je

da debljina lima ima značajan utjecaj na savijanje izvan ravnine. Utvrđeno je da je korelacija između debljine čeličnog lima i otpornosti na savijanje izvan ravnine gotovo linearna prema eksperimentalnim rezultatima [13]. Međutim, nisu pronađeni značajni utjecaji na posmičnu otpornost izvan ravnine promjenom debljine čeličnog lima [14].

3.4 Razmak spojnih sredstava

Velik broj studija proveden je kako bi se istražio utjecaj razmaka spojnih sredstava na ponašanje spregnutih zidova. Liang i suradnici [15, 16] istraživali su utjecaje razmaka spojnih sredstava na otpornost na izvijanje i krajnju otpornost pri dvoosnom tlačnom opterećenju [15] te dvoosnom tlačnom opterećenju i posmiku [16]. U navedenim radovima predloženi su analitički izrazi za izračun maksimalnog dopuštenog razmaka spojnih sredstava tako da se lokalno izbočivanje lima između spojnih sredstava ne bi dogodilo prije dostizanja granice popuštanja. Osim lokalne vitkosti, razmak spojnih sredstava značajno utječe na spregnuto djelovanje sustava u cjelini. Rezultati istraživanja također su pokazali da se s manjim razmakom spojnih sredstava može postići djelomično spregnuto djelovanje u iznosu od 75-90% [17]. Istovremeno, Sener i Varma [14] te Sener i suradnici [13] definirali su bazu podataka za provođenje parametarske analize razmaka spojnih sredstava na ponašanje spregnutih zidova pri posmiku izvan ravnine [14] i savijanju izvan ravnine [13]. Rezultati istraživanja pokazali su da je posmična otpornost izvan ravnine poboljšana s malim razmakom spojnih sredstava. Međutim, razmak spojnih sredstava nije imao utjecaja na ponašanje spregnutih zidova pri savijanju izvan ravnine.

3.5 Mogućnost primjene

Potencijalna primjena sustava može biti u razvoju seizmički otpornih sustava koji nadilaze nedostatke konvencionalnih rješenja poput okvira otpornih na moment savijanja (eng. *Moment Resisting Frame* - MRF) i okvira poduprtih centričnim veznim sustavom (eng. *Concentric Braced Frame* - CBF). MRF sustavi imaju visoku sposobnost razgradnje seizmičke energije kroz popuštanje nosača, ali potencijalno veliki pomaci mogu otežati zadovoljenje graničnog stanja uporabljivosti. S druge strane CBF sustavi nude veću bočnu krutost čime se ograničavaju pomaci, ali je njihova sposobnost razgradnje smanjena zbog izvijanja dijagonala. Jedna mogućnost poboljšanja je izvedba sustava okvira poduprtog ekscentričnim dijagonalama (eng. *Eccentric Braced Frame* - EBF) koji kombiniraju visoku bočnu krutost s duktilnošću zahvaljujući disipativnom ponašanju seizmičkih spona. Međutim, ovakvi sustavi nemaju sposobnost ponovnog centriranja, što može rezultirati značajnim troškovima popravaka nakon potresa. Ideja dvojnih sustava temelji se

na kombinaciji MRF sustava s inovativnim zamjenjivim veznim sustavom, kao što su seizmičke spone [18] ili zamjenjivi posmični zidovi [19], kako bi se postigla razgradnja seizmičke energije na specifičnim lokacijama i sposobnost ponovnog centriranja, što značajno smanjuje troškove popravaka. Ključni koncept dvojnih sustava je da MRF dio sustava ostaje u elastičnom području tijekom potresa, dok zamjenjive spone ili zidovi razgrađuju energiju. Nakon potresa, oštećeni disipativni elementi se uklanjaju, a elastični MRF okviri osiguravaju sile potrebne za vraćanje konstrukcije u prvobitni položaj.

Preliminarna istraživanja [19, 20] pokazala su da dvojni sustavi s zamjenjivim inovativnim CFCSW uz primjenu hladno oblikovanih čeličnih limova pokazuju tražene prednosti dvojnih sustava u smislu razgradnje energije i sposobnost ponovnog centriranja. Iako su ovi sustavi pokazali obećavajuće rezultate, potrebna su daljnja istraživanja koja će obuhvatiti različite tipologije posmičnih zidova kako bi se dobio dublji uvid u mogućnosti njihove praktične primjene. Također, potrebne su daljnje eksperimentalne i numeričke studije koje će uključiti ciklička opterećenja kako bi se dobio bolji uvid u ponašanje CFCSW zidova u realističnim potresnim uvjetima. Nadalje, ključno je istražiti način spajanja posmičnog zida s čeličnim okvirom kako bi se omogućila demontaža zida nakon nelinearnih deformacija i njegova zamjena novim.

4 Zaključak

Pregledom dosadašnjih istraživanja vidljivo je da će učinkovitost istraživanih sustava posmičnih zidova ovisiti o čitavom nizu varijabli (omjeru tlačnog opterećenja, geometriji čeličnih limova, položaju i broju spojnih elemenata...), što ostavlja značajan prostor za daljnja istraživanja i primjene u građevinarstvu. Uzimajući u obzir navedeno, a u svrhu iznalaženja optimalnog rješenja, konstrukcijske i ekološke učinkovitosti sustava, u budućim istraživanjima potrebno je dodatno istražiti sustave posmičnih zidova koji se sastoji od obostrano postavljenih hladno oblikovanih valovitih čeličnih limova koji su međusobno povezani spojnim sredstvima te ispunjeni betonom, uz eventualnu kombinaciju sa klasičnom armaturom. Također, potrebno je dodatno istražiti primjenu ovog sustava kao stabilizacije čelične okvirne konstrukcije. Posebnu pozornost treba posvetiti načinima povezivanja čelika i betona kao i načinu povezivanja posmičnog zida i čeličnog okvira koji će omogućiti demontažu za zamjene, buduće ponovne uporabe ili recikliranje na kraju životnog vijeka. Također potrebno je istražiti otpornost, krutost, duktilnost te sposobnost razgradnje energije uslijed cikličkog djelovanja potresa te potencijal za primjenu u dvojnog sustavu u kombinaciji s čeličnim okvirima.

Literatura

- [1] J. M. Jacinto, O. G. D. Cruz, and E. J. Guades, "Cold-Formed Steel Structure for Mid-Rise Residential Building: A Literature Review," *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 310, pp. 37–51, 2023, doi: 10.1007/978-981-19-8024-4_4.
- [2] W. Zhang *et al.*, "Influencing factors analysis on shear capacity of cold-formed steel light frame shear walls," *Structures*, vol. 33, pp. 3588–3604, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2021.06.064.
- [3] F. W. Wu and Y. Q. Li, "Large-scale shaking table tests of a six-story floor-by-floor assembled CFS frame-framing shear wall structure," *Eng Struct*, vol. 293, p. 116608, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.116608.
- [4] R. Aktepe, S. Akduman, and B. Guldur Erkal, "Experimental investigation on lateral behavior of novel hybrid cold-formed steel walls with composite sheathing," *J Constr Steel Res*, vol. 202, p. 107766, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.JCSR.2022.107766.
- [5] M. Hasanali *et al.*, "A critical review of cold-formed steel seismic resistant systems: Recent developments, challenges and future directions," *Thin-Walled Structures*, vol. 180, p. 109953, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.TWS.2022.109953.
- [6] I. Curkovic *et al.*, "Seismic performance of composite plate shear walls with variable column flexural stiffness," *Steel and Composite Structures*, vol. 33, no. 1, p. 19, 2019, doi: 10.12989/SCS.2019.33.1.019.
- [7] B. Androić, D. Dujmović, and I. Lukačević, *Projektiranje spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4*. Zagreb: IA projektiranje, 2012.
- [8] J. Mo *et al.*, "A review of the behaviour and design of steel–concrete composite shear walls," *Structures*, vol. 31, pp. 1230–1253, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2021.02.041.
- [9] S. Usami *et al.*, "Study on a concrete filled steel structure for nuclear power plants (part 2). Compressive loading tests on wall members," in *Transactions of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT13)*, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, Aug. 1995.
- [10] T. Takeda *et al.*, "Experimental Study on Shear Characteristics of a Concrete Filled Steel Plate Wall," in *Transactions of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT13)*, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, Aug. 1995.
- [11] M. Ozaki *et al.*, "Study on steel plate reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 228, no. 1–3, pp. 225–244, Mar. 2004, doi: 10.1016/J.NUCENGDES.2003.06.010.

- [12] A. H. Varma *et al.*, "Steel-plate composite (SC) walls for safety related nuclear facilities: Design for in-plane forces and out-of-plane moments," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 269, pp. 240–249, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.NUCENGDES.2013.09.019.
- [13] K. C. Sener, A. H. Varma, and D. Ayhan, "Steel-plate composite (SC) walls: Out-of-plane flexural behavior, database, and design," *J Constr Steel Res*, vol. 108, pp. 46–59, May 2015, doi: 10.1016/J.JCSR.2015.02.002.
- [14] K. C. Sener and A. H. Varma, "Steel-plate composite walls: Experimental database and design for out-of-plane shear," *J Constr Steel Res*, vol. 100, pp. 197–210, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.JCSR.2014.04.014.
- [15] Q. Q. Liang *et al.*, "Local and post-local buckling of double skin composite panels," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, vol. 156, no. 2, pp. 111–119, 2003, doi: 10.1680/STBU.2003.156.2.111.
- [16] Q. Q. Liang *et al.*, "Local Buckling of Steel Plates in Double Skin Composite Panels under Biaxial Compression and Shear," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 443–451, Mar. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(443).
- [17] K. Zhang *et al.*, "Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 269, pp. 231–239, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.NUCENGDES.2013.08.035.
- [18] I. Lukačević, T. Maleta, and D. Dujmović, "Behaviour of dual eccentrically braced steel frames with short and long seismic links," *20th Congress of IABSE, New York City 2019: The Evolving Metropolis - Report*, pp. 1674–1681, 2019, doi: 10.2749/NEWYORK.2019.1673.
- [19] I. Lukačević *et al.*, "Behaviour of dual steel frames with innovative double skin cold-formed steel concrete composite shear walls," pp. 634–645, Mar. 2025, doi: 10.5592/CO/3CROCEE.2025.105.
- [20] V. Žuvelek *et al.*, "Numerical Investigation of Double-Skin Cold-Formed Steel Shear Wall Filled with Concrete," *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 489 LNCE, pp. 105–115, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-57800-7_9/FIGURES/7.

Proračun naprezanja prijanjanja između prednapetog AB nosača i FRP-a

Tomislav Brozović¹, prof. dr. sc. **Tomislav Kišiček²**

¹Institut IGH d.d., tomislav.brozovic@igh.hr

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

Sažetak

Istraživanja nosivosti betonskih nosača ojačanih na savijanje FRP-om pokazala su da je delaminacija, odnosno gubitak prijanjanja između FRP-a i betona primarni oblik sloma ojačanog nosača. U ovom radu opisan je proračunski model naprezanja prijanjanja između FRP-a i prednapetog betonskog nosača. Numerički proračun se temelji na određivanju zakrivljenosti poprečnih presjeka duž nosača. Zakrivljenost poprečnih presjeka se određuje pomoću dijagrama moment savijanja – zakrivljenost, koji je opisan sa 5 karakterističnih točaka, odnosno 4 područja u kojima se presjek može nalaziti ovisno o momentu savijanja.

Ključne riječi: prednapeti AB nosač, dijagram moment savijanja – zakrivljenost, prijanjanje, FRP, ojačanje

Bond calculation between prestressed RC girder and FRP

Abstract

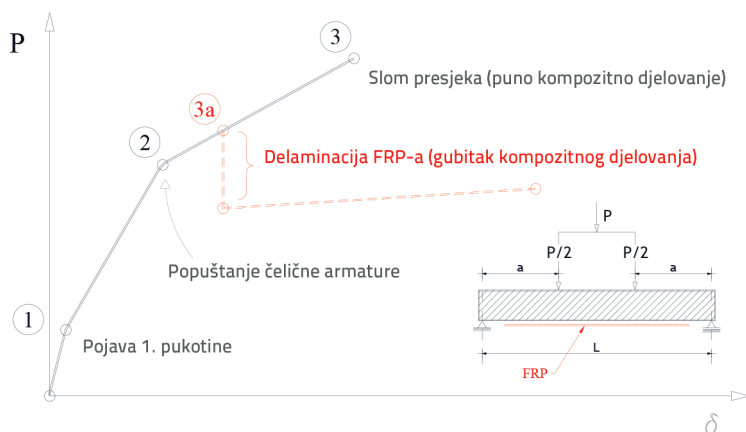
Bond failure and loss of composite action between FRP sheets and concrete surface is the main issue of FRP strengthening technique applied to concrete girders. In this work the procedure for bond shear stress calculation between FRP sheets and prestressed concrete beam is presented. The calculation is based on double integration of the curvature, which can be calculated by a cross-section analysis along the RC beam. Curvature of the cross-section can be determined with the 5-point bending moment – curvature diagram.

Key words: prestressed RC beams, bending moment – curvature diagram, bond shear stress, FRP, strengthening

1 Uvod

Promjena momenta savijanja u betonskoj gredi ojačanoj FRP-om odražava se i na promjenu sile u FRP-u preko posmičnog naprezanja prijanjanja. Stoga je osnovni uvjet uspješnosti primjene FRP-a u ojačanju betonskih greda jaka prijanjajuća veza između FRP-a i betona koja omogućuje njihovo zajedničko spregnuto djelovanje i time veću nosivost ojačanog konstruktivnog elementa.

Dosadašnja su istraživanja pokazala da je raskid prijanjajuće veze i posljedična delaminacija FRP-a od površine betona glavni i izrazito dominantni oblik sloma betonskih nosača pojačanih FRP-om [1]. Takvi oblici sloma (slika 1), neovisno o tome jesu li nastali u zoni sidrenja FRP-a u blizini ležajeva ili su nastali u zoni raspucavanja u sredini raspona nosača, se u pravilu događaju iznenada, bez prethodne najave, sa naglim padom nosivosti i krutosti, te su stoga opasni i nedopustivi.



Slika 1. P- δ dijagram za presjek u sredini raspona slobodno oslonjene AB grede ojačane FRP-om

U sklopu ovog rada prikazan je postupak numeričkog proračuna globalnog naprezanja prijanjanja između FRP-a i prednapete AB grede. Proračun se temelji na analizi zakrivljenosti poprečnih presjeka uzduž nosača. Svaki poprečni presjek duž nosača ima određenu zakrivljenost nastalu zbog naprezanja od momenta savijanja. Za određeni oblik poprečnog presjeka nosača te za poznate mehaničke karakteristike materijala i poznatu količinu i položaj armature i FRP-a, moguće je proračunati dijagram moment savijanja – zakrivljenost ($M - 1/r$) [2]. Pritom se zanemaruje zakrivljenost i progib zbog poprečnih sila.

U radu [3], opisan je postupak proračuna progiba FRP-om ojačanog prednapetog AB nosača na temelju analize zakrivljenosti poprečnih presjeka, određenih pomoću $M - 1/r$ dijagrama. $M - 1/r$ dijagram je u [3] opisan sa četiri karakteristične točke, a koje opisuju: početno stanje (nakon prednapinjanja), pojavu prve pukoti-

ne, popuštanje natege te slom. Međutim, ovisno o koeficijentu armiranja prednapetog nosača i stupnju prednapinjanja, armatura može osim konstruktivne imati i značajnu nosivu ulogu u prijenosu vlačnih naprezanja (djelomično prednapeti nosači), a što je u radovima [3, 4] zanemareno.

U sklopu ovog rada prikazan je proračun koji se bazira na preciznijem $M-1/r$ dijagramu opisanom sa 5 točaka, a u kojem će se uzeti u obzir i pojava popuštanja čelične armature ($M_v, 1/r_v$).

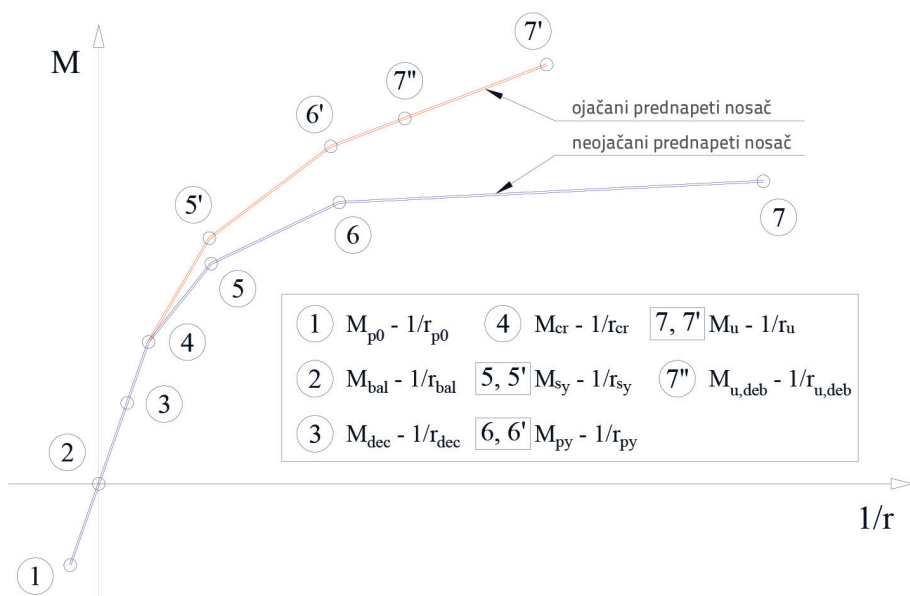
2 Dijagram moment savijanja – zakrivljenost opisan sa 5 karakterističnih točaka

Prvi korak u proračunu progiba, naprezanja u materijalu te proračunu globalnog naprezanja prijanjanja između FRP-a i ojačane prednapete AB grede jest analiza zakrivljenosti poprečnih presjeka uzduž nosača.

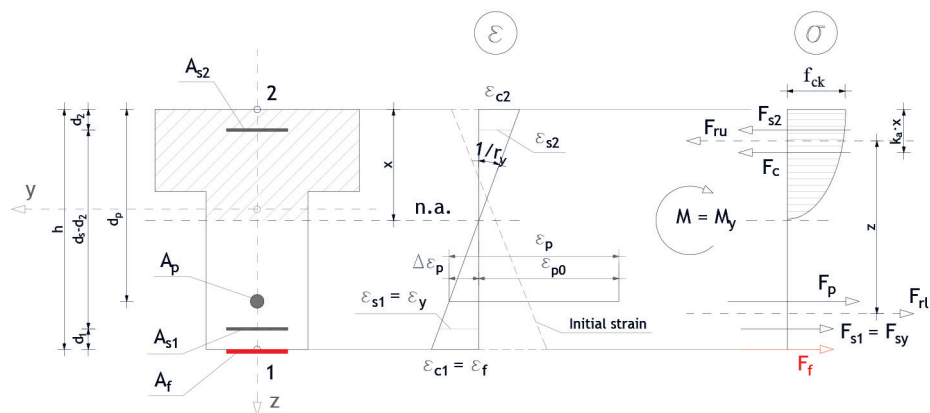
Na $M - 1/r$ dijagramu, u prvom području, koje je omeđeno točkama 1 i 4, (slika 2), presjek nosača se nalazi u stanju naprezanja I, što znači da su vlačna naprezanja u presjeku mala te ih može preuzeti beton. Beton je dakle neraspucao, što rezultira velikim momentom tromosti, odnosno velikom savojnom krutosti nosača. Točka 1 predstavlja početno stanje naprezanja nakon prednapinjanja, dok se u točki 2 presjek nalazi u uravnoteženom (balansiranom) stanju, pri čemu je distribucija napona jednolika po visini presjeka. Daljnjim povećanjem opterećenja, tlačno naprezanje iščezava na gornjem rubu (točka 3 - dekompresija).

Drugo karakteristično područje na $M - 1/r$ dijagramu je omeđeno točkama 4 i 5. Pri opterećenju koje je pridruženo točki 4 dolazi do prekoračenja vlačne čvrstoće betona te do njegovog pucanja, odnosno do otvaranja prve pukotine (prelazak u stanje naprezanja II). Time dolazi i do pada momenta tromosti betonskog presjeka, odnosno do pada krutosti, a što je na dijagramu vidljivo u smanjenju nagiba $M - 1/r$ krivulje. Obzirom da je beton isključen iz prijenosa vlačnih naprezanja, sva vlačna naprezanja u raspucanom presjeku preuzima ugrađena čelična armatura, natege te FRP kao dodatna vanjska armatura.

Ukoliko se dodatno poveća opterećenje nosača, vlačna naprezanja u promatranom kritičnom presjeku nosača rastu te dostižu granicu popuštanja čelične armature (točka 6) i popuštanja natege (točka 7). Nakon pojave popuštanja armature i/ili natege krutost nosača značajno pada i već pri malom prirastu sile značajno raste progib grede. Kritično središnje područje slobodno oslonjenog nosača je u stanju naprezanja III, te u konačnici dolazi do sloma, a koji može biti u obliku drobljenja betona, pucanja čelične armature ili natege, te pucanja ili delaminacije FRP-a.



Slika 2. Usporedba $M - 1/r$ dijagrama za pojačani i nepojačani presjek prednapete AB grede



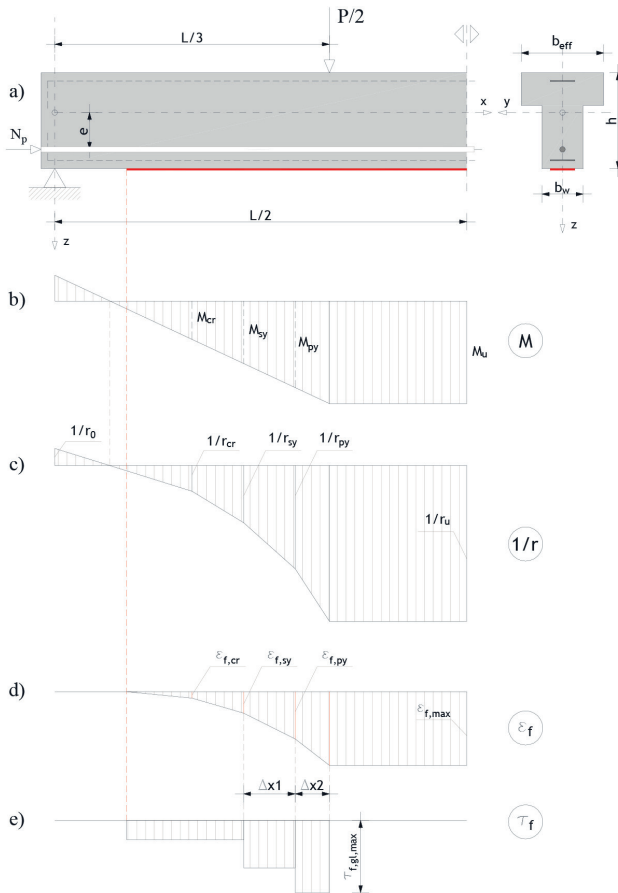
Slika 3. Raspodjela relativnih deformacija i naprezanja u poprečnom presjeku pojačane prednapete AB grede u trenutku popuštanja armature

3 Proračun zakrivljenosti i prijanjanja uzduž nosača

Nakon što se proračunaju karakteristične točke koje opisuju dijagrame odnosa moment savijanja – zakrivljenost, moguće je za neki moment savijanja (M) odrediti pripadnu zakrivljenost ($1/r$).

Za prednapetu AB gredu zakrivljenost nekog poprečnog presjeka se u funkciji momenta savijanja računa prema slijedećim izrazima:

$$1/r = f(M) = \begin{cases} 1/r_0 & \text{za } M = M_0 \\ 1/r_0 + \frac{1/r_{cr} - 1/r_0}{M_{cr} - M_0} (M - M_0) & \text{za } M_0 \leq M \leq M_{cr} \\ 1/r_{cr} + \frac{1/r_{sy} - 1/r_{cr}}{M_{sy} - M_{cr}} (M - M_{cr}) & \text{za } M_{cr} \leq M \leq M_{sy} \\ 1/r_{sy} + \frac{1/r_{py} - 1/r_{sy}}{M_{py} - M_{sy}} (M - M_{sy}) & \text{za } M_{sy} \leq M \leq M_{py} \\ 1/r_{py} + \frac{1/r_u - 1/r_{py}}{M_u - M_{py}} (M - M_{py}) & \text{za } M_{py} \leq M \leq M_u \\ 1/r_u & \text{za } M = M_u \end{cases} \quad (1)$$



Slika 4. Prikaz prednapete AB grede; te dijagrama momenta savijanja (M), zakrivljenosti ($1/r$), relativne deformacije FRP lamele (ε_f) i naprezanja prijanjanja (τ_f)

Proračun karakterističnih točaka, tj. parova vrijednosti, kojima se opisuje M-1/r dijagram temelji se na Bernoullijevoj pretpostavci ravnog poprečnog presjeka, pri čemu su uzima u obzir da nema proklizavanja između betona s jedne strane te natega, armature i FRP-a s druge strane.

Za svaku karakterističnu točku M-1/r dijagrama računaju se vrijednosti relativnih deformacija u slojevima presjeka u kojima se polaže armatura, natege i FRP, te na gornjem i donjem rubu betonskog presjeka. Nakon što se za svaku točku iscrta dijagram relativnih deformacija, može se napraviti dijagram odnosa zakrivljenosti ($1/r$) i relativne deformacije u određenom sloju poprečnog presjeka (ε_{c2} , ε_{sv} , ε_{pv} , ε_f) [5].

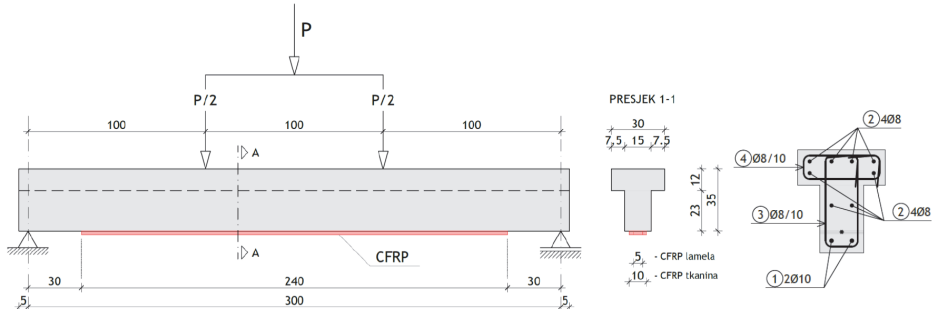
Na slici (4a) prikazan je prednapeti AB nosač opterećen na savijanje koncentriranim silama u trećinama raspona. Za poznate vrijednosti momenta savijanja (slika 4b), na temelju izraza danim u (1), mogu se u diskretnim točkama izračunati redom: zakrivljenost (slika 4c) te relativne deformacije i uzdužna naprezanja u betonu, čeličnoj armaturi te u FRP-u (slika 4d).

Na temelju poznate vrijednosti relativne deformacije u FRP-u može se u nekom intervalu nosača, omeđenom točkama i i i+1, izračunati posmično naprezanje prijanjanja (slika 4e) između FRP-a i betona slijedećim izrazom:

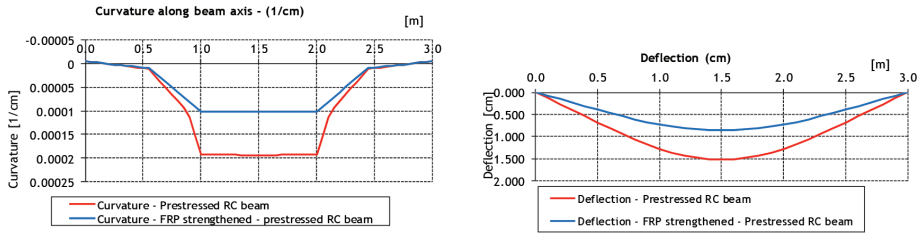
$$\tau_f = \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \cdot E_f \cdot t_f}{\Delta x} \quad (2)$$

4 Numerički primjer proračuna naprezanja prijanjanja

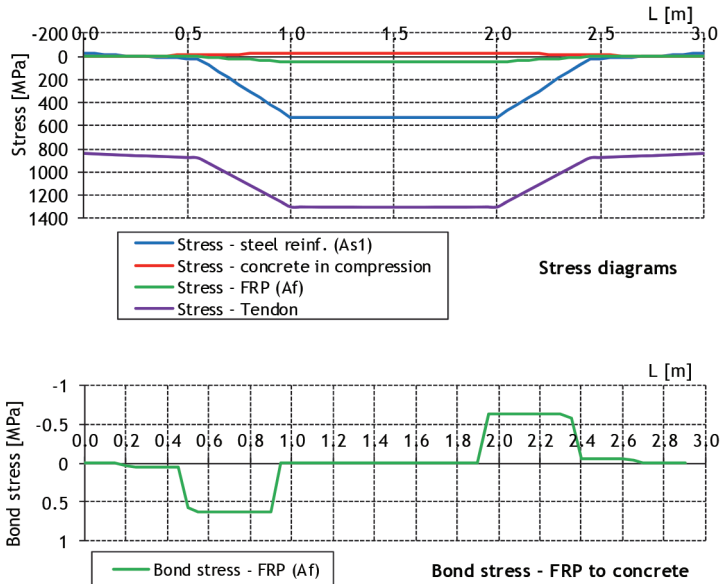
U nastavku se daje numerički primjer proračuna progiba, uzdužnih naprezanja u betonu, armaturi, natezi i FRP-u, te globalnog naprezanja prijanjanja između FRP-a i betona. Proračun je napravljen u programu MS Excel (upis ulaznih podataka i ispis rezultata), dok je proračunski model programiran u VBA-u. U proračunu su uzeti u obzir slijedeći parametri grede i materijala: $L = 3,0$ m, $b_w/b_{eff}/h/h_f/c = 15/30/35/12/2$ cm, tlačna čvrstoća betona: C40/50, $A_s = 3\Phi 12$, $A_{frp} = 50 \times 1,2$ mm, $\Phi_p = 0,5$, $N_p = 80$ kN. Greda je opterećena koncentriranim opterećenjem u trećinama raspona (slika 5).



Slika 5. Geometrijske karakteristike analizirane prednapete AB grede



Slika 6. Usporedba M-1/r dijagrama i progibnih linija ojačane i neojačane grede



Slika 7. uzdužna naprezanja i naprezanje prianjanja između FRP-a i betona

5 Zaključak

U radu je prikazan postupak proračuna naprezanja u betonu, čeličnoj armaturi, nategama te FRP-u u prednapetoj AB gredi ojačanoj na savijanje lijepljenjem FRP-a na vlačnu pojasnicu. Također, prikazan je i proračun naprezanja prianjanja između FRP-a i betona. Postupak se temelji na analizi zakrivljenosti diskretnih točaka nosača. Zakrivljenost se računa pomoću dijagrama moment savijanja – zakrivljenost ($M - 1/r$), opisanog sa 5 karakterističnih točaka. Dosadašnja istraživanja opisivala su $M - 1/r$ dijagram sa 4 točke, pri čemu nije bilo uzimano u obzir popuštanje čelične armature.

Sva su dosadašnja istraživanja o ponašanju prednapetih AB nosača ojačanih na savijanje FRP trakama bila fokusirana na istraživanje nosivosti i krutosti nosača

kroz odnos opterećenja i progiba. Budući je dokaz graničnog stanja naprezanja jedan od ključnih dokaza u provjeri prednapetih nosača, proračunskim modelom opisanim u ovom radu mogu se precizno izračunati uzdužna naprezanja u materijalu te globalno naprezanje prijanjanja između FRP-a i betona.

Literatura

- [1] fib Bulletin No. 90. "Externally applied FRP reinforcement for concrete structures", Technical report, 2019, fib
- [2] Kišiček, T., Sorić, Z.: Dijagram moment savijanja – zakrivljenost za armiranobetonske grede, GRAĐEVINAR 55 (2003) 4, pp 207 – 215
- [3] Kramer, K., W., Rasheed, H.: Analytical load-deflection behavior of prestressed concrete girders strengthened with FRP, ACI Journal Proceedings, Vol. 327, (2018)
- [4] El-Tawil, s., Okeil, A.: Design of concrete bridge girders strengthened with CFRP laminates, Technical report, University of Florida, (2001)
- [5] Czaderski C., Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures, in The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering, CRC Press, 2013. p. 235-252

Reinforcing 3D printed concrete – challenges and current developments

Vita Varezić¹, izv. prof. dr. sc. **Marko Bartolac²**, prof. dr. sc. **Josip Galić³**

¹University of Zagreb Faculty of Architecture, vita.varezik@arhitekt.hr

²University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, marko.bartolac@grad.unizg.hr

³University of Zagreb Faculty of Architecture, josip.galic@arhitekt.hr

Abstract

In recent years, 3D printing in the construction industry has gained significant interest due to its ability to create complex structural forms with notable savings in both time and cost. Despite this growing interest, it continues to face various technical and operational difficulties. In order for 3D printed concrete to have a meaningful, long-term influence on construction practices it is essential to develop strategy for integrating reinforcement without contradicting the advantages that the 3D printing process delivers. This paper seeks to give a comprehensive review of the current developments on reinforcement strategies for 3D printed structures.

Key words: 3D printed concrete, additive manufacturing, layered-extrusion, reinforcement, fibers

Armiranje 3D printanog betona – izazovi i trenutna postignuća

Sažetak

U posljednjih nekoliko godina, 3D printanje u građevinskoj industriji izazvalo je značajan interes zbog svoje sposobnosti stvaranja složenih oblika konstrukcije uz znatne uštede vremena i troškova. Unatoč rastućem interesu, tehnologija i dalje nailazi na razne tehničke i operativne poteškoće. Kako bi konstrukcije od 3D printanog betona imale značajan i dugoročan utjecaj na građevinsku struku nužno je osmisliti načine integriranja armature koji ne kontriraju prednostima koje proces 3D printanja omogućuje. Cilj ovog rada je pružiti sveobuhvatan pregled trenutnog razvoja u području armiranja 3D printanih konstrukcija

Gljučne riječi: 3D printani beton, aditivna proizvodnja, slojevito istiskivanje, armatura, vlakna

1 Introduction

The fundamental concept behind 3D printing involves fabricating structures layer by layer, where three-dimensional components are created using computer-aided-design. Among the available 3D printing technologies, the ones that have attracted the most interest in the construction industry are binder jetting and layered extrusion. In binder jetting, a bed of dry powder is selectively bound by spraying water, applying a liquid binder, or injecting cement paste into layers of aggregate. In the layered extrusion method, pre-mixed concrete is extruded through a nozzle, mounted on either a gantry or a robotic arm, to form the structure. For the construction of large-scale buildings, which is the central topic of this discussion, the most widely adopted process is an automated technique called Contour Crafting (CC), which was developed by Khoshnevis [1]. The use of 3D printed concrete (3DPC) in construction offers several notable benefits. Despite some ongoing debate, it is widely believed that the cost of producing structural elements through 3D printing is lower compared to conventional construction methods, and the total time required to complete a building project can be greatly reduced mainly by eliminating the need for formwork. Additionally, the approach is seen as more environmentally friendly because 3D printing produces significantly less material waste and dust than traditional building practices [2]. The composition of 3DPC mixtures is based on wet-mixed mortars initially developed for spray applications. The mortar used generally contains a high concentration of cement and fine aggregates, because the use of coarse aggregates could cause nozzle blockage. Coarse aggregates play a key role in minimizing shrinkage, therefore, in combination with the low water-to-cement ratios, printable concrete mixes are highly prone to cracking. To address this issue, the inclusion of additives such as superplasticizers and retarders, viscosity-modifying agents and accelerators is necessary. The rheological characteristics of low-flowable mixtures continually evolve due to the ongoing hydration reactions defining a limited time window within which the 3DPC maintains acceptable performance in a fresh-state. If long interruptions occur during the printing process, extended pauses between layers may result in cold joints, where weak interlayer bonding compromises structural integrity.

The fundamental difference, compared to the conventional concrete, is the anisotropy of 3DPC, mainly due to the layered structure created during the printing process. While cast concrete cubes fail in a typical cone-shaped manner, cracks in the printed samples develop parallel to the direction of compression [3]. This crack pattern results from the alignment of deposited filaments parallel to the load direction, with the interfaces between these filaments being inherently weak and more susceptible to separation or cracking under stress [3]. Conse-

quently, 3DPC exhibits greater strength in the vertical (layer-stacking) direction than in the horizontal one. In study by Pham et al. [4] the printed sample tested in direction perpendicular to the layer orientation showed greater flexural strength than the cast samples.

2 Reinforcement strategies

For 3DCP to be viable in real-world structural applications, components must withstand significant tensile forces. Mortar alone is insufficient, so steel or other reinforcement is needed. These must allow for ductile structural performance, be cost-effective, maintain geometric flexibility, and align with automated production methods.

2.1 Conventional reinforcement

The first and most straightforward method for integrating reinforcement involves using traditional steel reinforcement within the printed structure according to current engineering standards. Reinforcing bars are placed manually into the printed concrete and then covered with a following layer of concrete. In addition to steel bars, steel wire mesh could be placed manually onto the freshly printed concrete [3] (Figure 1a). An additional method is to vertically install steel mesh in place first and then apply concrete layer by layer, effectively enclosing the mesh reinforcement from both sides [5] using a modified forked nozzle (Figure 1b). This technique has been commercially employed by the Chinese company HuaShang Tengda [6]. While promising, this approach faces several constraints - the mesh height is limited by the nozzle size, reinforcement is restricted to layers close to the wall's centerline and only vertical walls (without slope) can be produced [7]. Generally, the major issue is the lack of continuous vertical reinforcement and bonding between reinforced bars and 3D printed specimens, considering that reinforcement is placed on top of every layer manually. In [8] authors noted that the bond strength of reinforcement bars and 3DPC was lower than in mold-cast samples, due to inter-layer defects introduced during the extrusion-based printing process. A contributing factor is the low fluidity of the freshly printed mortar, which limits its ability to properly fill reinforcement grooves. Furthermore, the printing direction also influenced bond performance, in particular, parallel-printed specimens demonstrated slightly higher bond strength between reinforcing bars and concrete compared to inclined ones, while vertically printed specimens had the weakest bonding performance. Most common method to include steel reinforcement in 3DPC is to create a permanent integrated formwork and place both vertical and horizontal reinforcements inside before pouring in the concrete

(Fig 1c) [9]. This technique maintains the mold-free benefit of 3DPC while aligning with conventional reinforcement practices, thereby enabling the continued use of existing structural design standards.

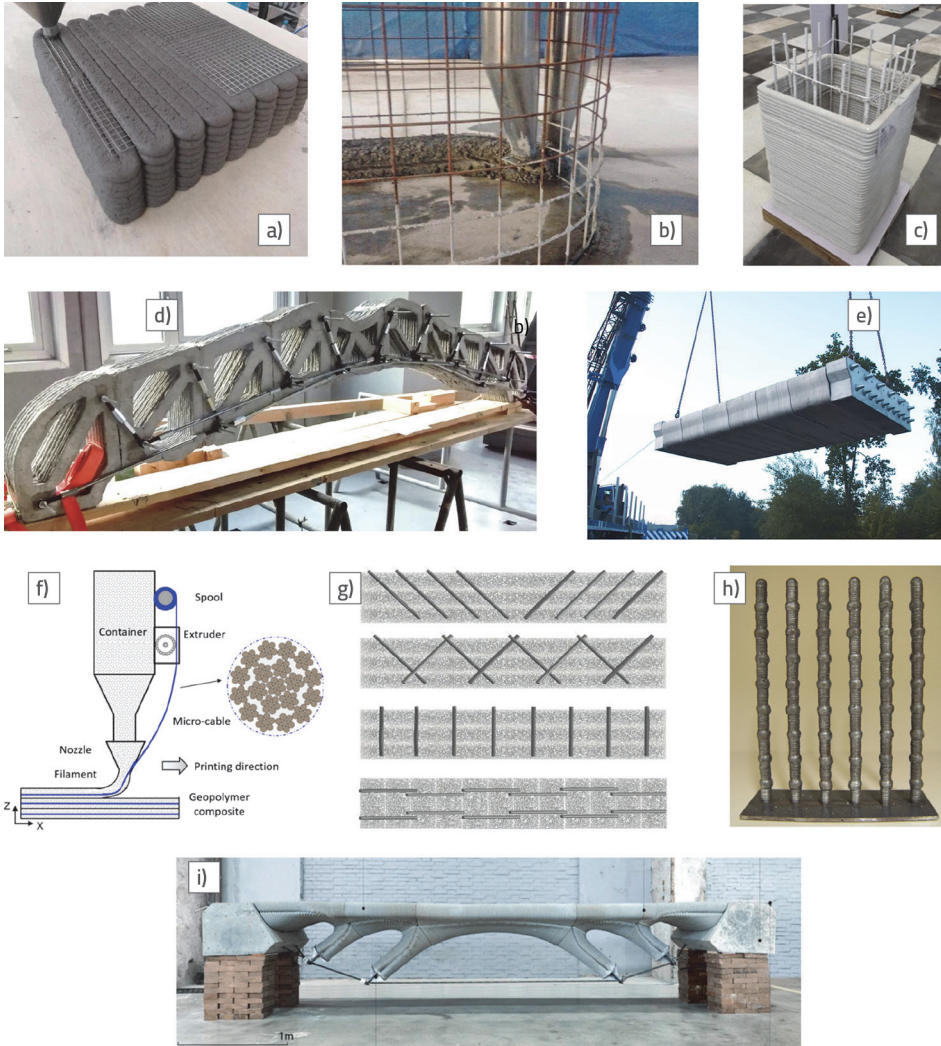


Figure 1. Different reinforcement strategies: a) manual placement of wire mesh [3], b) modified forked nozzle [7], c) permanent formwork produced by CC [2], d) externally prestressed girder [10], e) on site assembly of bicycle bridge [11], f) schematic illustration of printer with embedded micro-cable [12], g) scheme of nail placement across the layers [13], h) profiled 3D printed reinforcement bars [14] i) steel cable supported bridge [15]

Reinforcement elements can be inserted across the interfaces between layers to improve bonding between layers and mechanical performance (Fig 1g). The addition of nails to the layered structure of the printed cement [13] enhanced bending strength by up to 50%, depending on whether the nails were smooth or rusty and the angle at which they were inserted. U-shaped nails [16] have been shown to act as dowels when placed across interfaces, leading to improvements in tensile bonding strength up to 62% and shear bonding strength by as much as 120%.

2.2 Automated reinforcement

Mechtcherine et al. [14] proposed a novel approach to overcome challenges like pre-bending bars, automated placement and bonding between reinforcement and concrete by printing both the reinforcement and the concrete as simultaneously as possible. In WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) method, the reinforcement is constructed drop by drop, allowing for high geometric flexibility i.e. locally increasing thickness of the printed bars to enhance the bond between concrete and the reinforcement (Figure 1h). However, this approach is challenged by high localized temperatures in reinforcement zones, which could possibly damage the concrete, and shorter printing time of steel reinforcement than concrete which could form cold joints in concrete. In addition to short fibers, long reinforcements—like wires, chains, and cables—can also be embedded within the extruded material during the printing process (Figure 1f). Including embedded flexible wire reinforcement directly into the extruded filament through devices attached to the nozzle [12], eliminates the need for additional placement automation. In such cases, the reinforcement material needs to be flexible enough to change direction easily with the printer head, but not too soft to avoid tangling. Furthermore, the reinforcement feeding must be synchronized with nozzle movement to prevent misalignment. Both swinging (in a case of excessively stiff reinforcement) and poor synchronization can displace the reinforcement relative to the cement matrix, leading to voids. These voids and air gaps pose a serious risk to 3D printed structures by allowing harmful substances to penetrate, ultimately reducing long-term durability. Another limitation is that this method only provides interlayer reinforcement and does not bridge layers. Because of that, it is often used with other reinforcement strategies.

2.3 Prestressed reinforcement

External prestressed reinforcement is a commonly used approach in the assembly of prefabricated components for large-span structures, such as bridges. This method was explored in the assembly of structurally optimized post-tensioned

3D printed girder with a span of 3 m [10]. In this case, steel bars were placed externally, anchored into holes at the corners of the printed components, which were later filled with high-strength cement-based mortar (Figure 1d). The researchers showed that the initial flexural stiffness of the externally reinforced beam structure was comparable to that of an equivalent solid beam. However, cracks formed at the anchor points during tensile testing, compromising the structure's overall nonlinear flexural performance. This strategy must also address the issue of corrosion of exposed steel reinforcements.

Another approach involves designing internal voids into the print, forming conduits which allow placement and anchoring of steel reinforcement or cables, which are eventually prestressed and grouted. A practical implementation of post-tensioning strands is the world's first 3D-printed bicycle bridge, developed by TU Eindhoven and BAM [11]. Its segments were fabricated off-site and then assembled using prestressed steel strands anchored in cast concrete end blocks, passing through internal integrated channels of printed parts (Figure 1e). Li et al. [15] utilized composite structural system where pre-tensioned steel cables supported the 3DPC components, allowing them to perform at high levels without additional reinforcement, particularly suitable for structural applications like bridges and roofs.

2.4 Fibers

Although fiber-reinforced concrete (FRC) has been researched for years, its practical use remains limited to elements where compressive forces are dominating, mostly because conventional FRC often exhibits strain-softening behavior, which leads to localized failure and lacks the ductility needed for reliable structural design.

In 3DPC, fibers are typically added after the initial wet mixing phase to ensure uniform dispersion while maintaining the mix's rheological properties essential for smooth extrusion. When the brittle cement-based matrix experiences cracking under tensile stress, the randomly distributed fibers within the composite are capable of bridging across the crack. These fibers limit the crack's width, while simultaneously bearing the tensile load. Because of this mechanism, it is energetically more demanding to further widen the existing microcrack than to initiate a new microcrack in a different area of the matrix [17]. This way, composite material evenly distributes the deformation and effectively prevents catastrophic brittle failure. Based on [18] increasing the fiber ratio, the crack spacing and number of cracks increased, regardless of fiber length. In the Figure 2, flexural stress – strain curves for brittle and ductile failure of fiber reinforced 3D printed concrete (FR3DPC) are shown. Curve representing ductile failure has three significant stages. The first stage ends when the initial cracking occurs, it demonstrates a

linear-elastic behavior in flexural response and is based on tensile resistance of cement-based matrix. After the initial drop in stress, FR3DPC shows a renewed increase in stress, indicating strain-hardening behavior and beginning of the next stage. Stress transfer between fibers and matrix occurs, known as fiber bridge mechanism. Bending stress increases non-linearly up to ultimate value. In the final stage, flexural stress decreases with displacement. Although the material still exhibits a strain-softening response after peak load, the increase in both flexural strength and fracture energy proves beneficial.

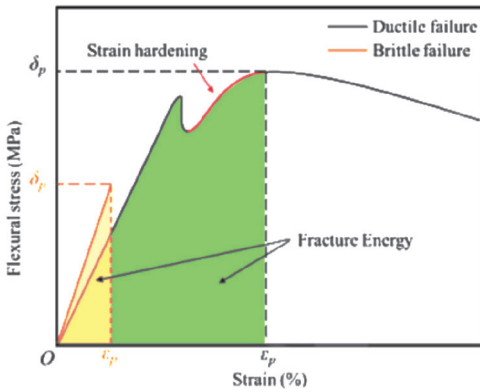


Figure 2. Stress strain curve of FR3DPC [19]

[18] showed that specimen's failure with fiber reinforcement, compared to one without reinforcement, was no longer primarily due to the weak interface created by 3D printing. Pham et al. [4] highlighted that fiber orientation, critical length and volume fraction are key factors in enhancing flexural performance via fiber bridging. Volume fraction refers to the amount of fibers added to a concrete mix, expressed as a percentage of the total volume of the composite. In case of FR3D-PC, it usually ranges from 0,1% to 3% [20]. During the extrusion process, fibers tend to align with the path of the filament because of the constrained size and flow direction of the filament. This preferential alignment in printed materials leads to pronounced anisotropic mechanical behavior. Regarding the fiber orientation, maximum performance is reached with fibers oriented perpendicular to the compressive load direction [21] because fiber resistance is based on pull-out behavior rather than yielding, as is the case with traditional rebars. In [18] authors demonstrated that post-peak performance was directly related to fiber length. In contrast, shorter fibers are less effective due to limited bonding and a lower probability of intersecting cracks. It is important to note that although longer fibers improve post-peak behavior, they also impose higher requirements on the printer's mixing process and the design of the print head.

Fibers can be generally categorized as rigid or flexible depending on their elastic modulus and aspect ratio where flexible fibers have a higher aspect ratio compared to rigid ones [22]. Flexible fibers, such as polypropylene (PP) have a lower modulus than the cement-based matrix and they tend to break under stress transfer. Polyethylene (PE) fibers have superior tensile strength and are hydrophobic, compared to the commonly used polyvinyl alcohol (PVA) fibers. The hydrophobic nature of PE fibers reduces fiber-matrix chemical bonding, significantly increasing the complementary energy during fiber bridging [23]. Rigid fibers, like steel fibers, have higher modulus than cement matrix and are successful in shifting stress from the matrix to the fiber which enhances compressive strength by means of fiber pull-out [19]. In the following table, a review of investigative studies on the effect of different types of fibers on mechanical properties is given. All values are representative for testing load direction perpendicular to the printing path, hence fiber orientation (Z direction). Increase (+) or decrease (-) of flexural and compressive strength in comparison to non-reinforced specimen is presented if data was available.

Table 1. Effect on mechanical properties of various fiber types

Reference	Fibers	Volume fraction (%)	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
[23]	*PE	1	15.6	39.8
		1.5	19.4	44.6
		2	14.5	47.3
[24]	flax	1	9 (+30%)	48 (+6%)
	carbon	1	8.1 (+17%)	39 (-14%)
[18]	PE	0.25	5.97 (+87%)	
		0.5	4.94 (+54%)	
		1	9.53 (+200%)	
		1.4	10.29 (+220%)	
[25]	glass	0.25	4.05	24
		0.5	4.6	22
		0.75	5	23
		1	5.82	22.74
[26]	basalt	1	13.8 (+30%)	33.7 (+13%)
	carbon	1	29.1 (+175%)	27.4 (-8%)
	glass	1	12.4 (+17%)	20.6 (-30%)
[27]	PP	0.25	7.8 (+2.6%)	35.8 (+60%)
		0.5	7.1 (-7%)	34.3 (+53%)
		0.75	6.1 (-20%)	25.9 (+13%)
		1	7.5 (-1.3%)	18.2 (-18%)
[28]	steel	2.1	5.96 (+422%)	
[29]	PVA	1	5.17 (-5%)	37.66 (-2.5%)
		1.5	4.91 (-8%)	29.95 (-22%)
*UHDC - ultra high ductility concrete				

3 Conclusion

The ability of 3D printing to create low cost and architecturally complex housing could greatly accelerate the widespread use of 3D printing in commercial construction. It is expected that the mechanical properties of printed components are at least comparable to those of parts produced by conventional techniques. Anisotropic behavior, introduced by extrusion-based technique of 3DPC, as well as application of standardized, continuous, two-directional reinforcement presents a major challenge in achieving load-bearing behavior of conventional reinforced concrete. This paper examines the strengths and weaknesses of different reinforcement techniques. Current reinforcing strategies are limited to low-rise buildings and low design forces, because they either don't meet design regulations, are too expensive or limit the full benefits of 3D printing technology, like speed and automatization. Strategy with most potential, in authors' opinion, is prestressed reinforcement and fiber reinforcement. Further research should focus on improving these strategies, possibly with "smart" reinforcement materials to back-up smart technology of 3D printing. One proposal is shape memory alloy, material developed just recently, having unique properties, such as super-elasticity and shape memory effect. Such a materials could enhance durability of concrete structures due to their ability of crack recovery, self-centering and strength enhancement.

References

- [1] B. Khoshnevis: Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies, *Automation in Construction*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, Jan. 2004.
- [2] P. Wu, J. Wang, and X. Wang: A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry, *Automation in Construction*, vol. 68, pp. 21–31, Aug. 2016.
- [3] M. Liu, Q. Zhang, Z. Tan, L. Wang, Z. Li, and G. Ma: "Investigation of steel wire mesh reinforcement method for 3D concrete printing," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 1, Mar. 2021.
- [4] L. Pham, P. Tran, and J. Sanjayan: Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance, *Construction and Building Materials*, vol. 250, Jul. 2020.
- [5] T. Marchment and J. Sanjayan: Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing, *Automation in Construction*, vol. 109, p. 102992, Jan. 2020.
- [6] [https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3 d-print-house](https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3-d-print-house) (Accessed January 15, 2025)

- [7] V. Mechtcherine and V. N. Nerella: Integration der Bewehrung beim 3D-Druck mit Beton, Beton- und Stahlbetonbau, vol. 113, no. 7, pp. 496–504, Jul. 2018.
- [8] X. Sun, C. Gao, and H. Wang: “Bond performance between BFRP bars and 3D printed concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 269, Feb. 2021.
- [9] B. Zhu, J. Pan, B. Nematollahi, Z. Zhou, Y. Zhang, and J. Sanjayan: Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction, *Materials and Design*, vol. 181, p. 108088, Nov. 2019.
- [10] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, and V. Mercuri: 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach, *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 218–231, Mar. 2018.
- [11] <https://www.3d.weber/en/projects/3d-printed-bridge-gemert> (Accessed January 15, 2025)
- [12] G. Ma, Z. Li, L. Wang, and G. Bai: Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing, *Materials Letters*, vol. 235, pp. 144–147, Jan. 2019.
- [13] A. Perrot, Y. Jacquet, D. Rangeard, E. Courteille, and M. Sonebi: Nailing of Layers: A Promising Way to Reinforce Concrete 3D Printing Structures, *Materials*, vol. 13, no. 7, p. 1518, Mar. 2020.
- [14] V. Mechtcherine, J. Grafe, V. N. Nerella, E. Spaniol, M. Hertel, and U. Füssel: 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour, *Construction and Building Materials*, vol. 179, pp. 125–137, Aug. 2018.
- [15] Y. Li, H. Wu, X. Xie, L. Zhang, P. F. Yuan, and Y. M. Xie: FloatArch: A cable-supported, unreinforced, and re-assemblable 3D-printed concrete structure designed using multi-material topology optimization, *Additive Manufacturing*, vol. 81, p. 104012, Feb. 2024.
- [16] L. Wang, G. Ma, T. Liu, R. Buswell, and Z. Li: Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails, *Cement and Concrete Research*, vol. 148, p. 106535, Oct. 2021.
- [17] D. G. Soltan and V. C. Li: A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing, *Cement and Concrete Composites*, vol. 90, pp. 1–13, Jul. 2018.
- [18] T. Ding, J. Xiao, S. Zou, and X. Zhou: Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers, *Composite Structures*, vol. 254, Dec. 2020.
- [19] Y. Zhang et al.: Comparison of printability and mechanical properties of rigid and 2 flexible fiber-reinforced 3D printed cement-based materials. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=4481449>

- [20] S. B. F. Warsi, B. Panda, and P. Biswas: Exploring fibre addition methods and mechanical properties of fibre-reinforced 3D printed concrete: A review, *Developments in the Built Environment*, vol. 16, Dec. 2023.
- [21] M. T. Souza, I. M. Ferreira, E. Guzi de Moraes, L. Senff, and A. P. Novaes de Oliveira: 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects,” Nov. 01, 2020, Elsevier Ltd.
- [22] R. F. Zollo: Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, no. 2, pp. 107–122, 1997.
- [23] K.-Q. Yu, J.-T. Yu, J.-G. Dai, Z.-D. Lu, and S. P. Shah: Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers, *Construction and Building Materials*, vol. 158, pp. 217–227, Jan. 2018.
- [24] K. Korniejenko et al.: Mechanical Properties of Short Fiber-Reinforced Geopolymers Made by Casted and 3D Printing Methods: A Comparative Study, *Materials*, vol. 13, no. 3, p. 579, Jan. 2020.
- [25] B. Panda, S. Chandra Paul, and M. Jen Tan: Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, *Materials Letter*, vol. 209, pp. 146–149, Dec. 2017.
- [26] M. Hambach, H. Möller, T. Neumann, and D. Volkmer: Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (> 100 MPa), *Cement and Concrete Research*, vol. 89, pp. 80–86, Nov. 2016.
- [27] B. Nematollahi et al.: Effect of Polypropylene Fibre Addition on Properties of Geopolymers Made by 3D Printing for Digital Construction, *Materials*, vol. 11, no. 12, p. 2352, Nov. 2018.
- [28] F. P. Bos, E. Bosco, and T. A. M. Salet: Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers, *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 14, no. 2, pp. 160–174, Apr. 2019.
- [29] Y. Zhang and F. Aslani: Development of fibre reinforced engineered cementitious composite using polyvinyl alcohol fibre and activated carbon powder for 3D concrete printing, *Construction and Building Materials*, vol. 303, p. 124453, Oct. 2021.

Drvene konstrukcije bez adheziva i metalnih spajala

Bruno Zadravec¹, prof. dr. sc. **Vlatka Rajčić²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, bruno.zadravec@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, vlatka.rajcic@grad.unizg.hr

Sažetak

U građevinskoj industriji od rastuće je važnosti provođenje održive gradnje i principa 3R, što drvene konstrukcije u potpunosti omogućavaju. Kako bi se elementi nosive konstrukcije mogli što bolje prilagoditi principu 3R, minimizira se uporaba adheziva na naftnoj bazi i čeličnih spojnih sredstava. Jedno od alternativnih rješenja takvih sustava je povezivanje elemenata drvenim trnovima ili tesarskim spojevima. Nosivost elemenata spojenih drvenim trnovima uvjetovana je njihovim brojem i razmakom, kao i usmjerenjem u odnosu na vlakna. Trnovi mogu biti i zavareni pomoću visoke brzine rotacije svrdla pri ugradnji. Zavarenim trnovima postiže se veća nosivost nego tijesno ugrađenim.

Ključne riječi: drvo; 3R – reduce,reuse,recycle; spojevi; zavareni trnovi; trnovima lamelirano drvo (Dowel laminated timber -DLT); održivost

Timber structures without adhesives and metal connectors

Abstract

In the construction industry, the implementation of sustainable building practices and the 3R principles is becoming increasingly important, and timber structures fully support these approaches. To better align load-bearing structural elements with the 3R principles, use of petroleum-based adhesives and steel fasteners is minimized. One alternative solution for such systems is the connection of elements using wooden dowels or traditional carpentry joints. The load-bearing capacity of elements connected with wooden dowels depends on their number and spacing, as well as their orientation relative to the wood grain. Dowels can also be welded using high drill rotation speed during installation. Welded dowels achieve higher load-bearing capacity than tightly fitted ones.

Key words: timber; 3R – reduce,reuse,recycle; Joints; Welded dowels; Dowel laminated timber (DLT); sustainability

1 Uvod

Građevinski sektor odgovoran je za znatnu količinu proizvedenog otpada i emisije štetnih plinova svake godine. Provedena istraživanja [1] navode da je 40% ukupne potrošene energije i otpada proizvedenog u Europi proizašlo iz građevinske industrije. Posljedično navedenom, u građevinarstvu se javljaju razne inicijative usmjerene prema ekološki prihvatljivoj gradnji uz uporabu održivih materijala. Drvo kao građevni materijal najpovoljniji je za implementaciju 3R inicijative. Smanjenje, recikliranje i ponovna uporaba (3R) također djeluju ekonomski povoljno jer se uporaba elemenata po isteku vijeka trajanja može promijeniti te se samim time smanjuje količina potrebnog materijala. Osim navedenog, drvena građa ima znatno manji ekološki otisak. Istraživanje [2] usporedilo je proizvodnju 3 metara visokog stupa izvedenog od drva, čelika, betona i opeke. Drvo ima najmanji utrošak materijala, a potrošena energija je tri puta manja za drvo u odnosu na armirano betonski stup te devet puta manja u odnosu na čelični stup. Mogućnost recikliranja klasičnih drvenih konstruktivnih elemenata ograničena je uporabom adheziva na naftnoj bazi i uporabom čeličnih spojnih sredstava. Potpuno drvena rješenja istražuju se već određeno vrijeme, kako je prikazano u istraživanju [3]. Osnovni način povezivanja potpuno drvenih konstrukcija je uz pomoć drvenih trnova i tesarskih spojeva. Nosivost spojeva trnovima ovisi o tipu i promjeru trna, njihovom razmaku i kutu ugradnje. Danas u građevinskoj industriji već postoje komercijalizirani elementi tog tipa. Iako su DLT (dowel laminated timber) elementi već niz godina na tržištu te su provedena brojna istraživanja, sam sustav je još u fazi razvoja i optimizacije. To je jasno prikazano u istraživanju [2] gdje su uspoređene cijene iz više europskih zemalja vezano za drvene plošne elemente sastavljene sa više tipova spojnih sredstva. DLT sustavi skuplji su do 35% od klasičnih CLT elemenata. Uspoređeni su također različiti tipovi DLT sustava, koji se primarno razlikuju u smjeru ugradnje trnova. Iako je mogućnost recikliranja veća, takvi sustavi ostvaruju manju nosivost za veću cijenu što ih čini neprivlačnim za uporabu. Daljnji proces mehanizacije i ispitivanja provedena na tim sustavima znatno će doprinijeti njihovoj uporabi u industriji. Osim klasične ugradnje utiskivanjem, trnovi mogu biti i zavareni. Takvi trnovi pokazuju bolja mehanička svojstva [4]. U sklopu samog istraživanja biti će provedeno ispitivanje čvrstoće drvene građe na pritisak po omotaču rupe. U Eurokodu 5 [5] ne postoje proračuni za drvene elemente povezane drvenim trnovima. Rezultati dobiveni eksperimentalno biti će uspoređeni sa analitičkim vrijednostima dobivenim iz Eurokoda 5 (Formula 8.31) za spojeve sa metalnim štapastim spajalima.

Eksperimentalno dobivena vrijednost pritiska po omotaču rupe koristit će se u izradi analitičkih i numeričkih modela linijskih i plošnih ispitanih elemenata.

Cilj ovog djela istraživanja je predložiti korekcijske formule za pritisak po omotaču rupe koje su dane u Eurokodu 5 za čelične trnove. Također, ovo je jedna od kritič-

nih provjera kod izrade DLT elemenata i određivanje razlike između eksperimentalno dobivenih i analitičkih vrijednosti eliminirat će odstupanja pri određivanju nosivosti kompozitnih nosača koji će biti ispitani. Osim detalja, ispitat će se linijski i plošni elementi. Elementi se razlikuju po količini, usmjerenju i promjeru trnova koji ih povezuju. Plošni elementi biti će ispitani na vertikalna i horizontalna djelovanja. Nastavno na laboratorijska ispitivanja proračunat će se numerički modeli koji mogu precizno odrediti svojstva nosivosti i uporabivosti ovisno o spojnim sredstvima.

DLT elementi mogu naći svoju primjenu u stambenim i poslovnim objektima manjih do srednjih raspona te rekonstrukciji i ojačanju postojećih konstrukcija. Pozitivan aspekt velike nosivosti drva u odnosu na masu čini ga izuzetno povoljnim za sanacije i ojačanja u potresno aktivnim područjima.

2 Densificirani trnovi

Nosivost trnova primarno je definirana kvalitetom drvene građe od koje su izrađeni. Svi trnovi su izrađeni od tvrdog drva klase D60 (bukva). Prije ispitivanja provedeni su kroz postupak densifikacije. Densifikacija je proces smanjenja poprečnog presjeka pod djelovanjem pritiska i visokim temperaturama. Takvi trnovi pokazuju čak i do 3.5 puta veću nosivost u odnosu na klasične trnove od tvrdog drva na posmik okomito na smjer vlakanca [6]. Također, densificirani trnovi pokazuju znatno bolju duktilnost u odnosu na trnove tvrdog drva, gotovo kao čelični [6], što je povoljno jer će pretpostavljeni oblici loma za čelične spojeve biti vrlo slični lomu densificiranih trnova.

Takvi trnovi zbog procesa densifikacije u spoj ulaze manje relativne vlažnosti nego drveni elementi koje povezuju. To dovodi do povećanja razine vlage i dimenzija, čime se ostvaruje još bolja veza između elementa i spojnog sredstva. Važno je za napomenuti da takva interakcija spojnog sredstva sa okolnim elementima dovodi i do promjene mehaničkih svojstva samog trna što je potrebno uzeti u obzir kod proračuna i provoditi kontrole detalja za vrijeme vijeka trajanja građevine.

Proračun nosivosti veza ostvarenih štapastim spojnim sredstvima u Eurokodu 5 definiram je prema Johanssensu za spoj drvo-drvo pomoću metalnog spojnog sredstva. Jedan od ciljeva istraživanja je uz provjeru pritiska po omotaču rupe predložiti korekcijske formule za moment tečenja spojnog sredstva. Linijski elementi (grede i stupovi) biti će ispitani sa više različitih razmaka trnova te će se provoditi usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih proračunski u kojima je koeficijent sprežanja proračunat prema Eurokodu 5 (formula B.5 – nacionalni dodatak B).

Usmjerenje trnova ima izuzetno veliki utjecaj na duktilnost i nosivost elemenata. Trnovi postavljeni okomito na element prenose isključivo posmična napreza-

nja, dok trnovi postavljeni pod kutom prenose posmična i uzdužna naprezanja. Uzdužna naprezanja mogu biti vlačna i tlačna, ovisno o poziciji trna. Potrebno je utvrditi koje je usmjerenje trnova optimalno po pitanju nosivosti te usporediti rezultate sa ostalim tipičnim nagibima u svrhu određivanja stupnja utjecaja položaja na nosivost. Istraživanja ovog tipa već postoje (npr. [4]) no rezultati su ograničeni i najčešće ispituju mehanički utisnute trnove jednog promjera. Eksperimentalno je dokazano da će trnovi ugrađeni okomito na element imati jednaku krutost no znatno manju silu loma u odnosu na trnove postavljene pod kutom od 45° .

2.1 Varenje trnova

Ispitivani uzorci biti će podijeljeni u dvije skupine po načinu ugradnje trnova. Zavarivanje trnova ugradnjom pri velikoj brzini rotacije pokazalo se da stvara spojeve znatne čvrstoće ([7], [8]). Pri ugradnji zbog utjecaja trenja generira se toplina koja otapa lignin u drvenoj građi. Posljedica tog utjecaja je bolja povezanost samog spoja ([4], [7]). Takvi spojevi ne koriste dodatne adhezive. Istraživanje [4] izvršilo je ispitivanja na linijskim elementima opterećenim na savijanje u kojima su lamele povezane zavarenim trnovima, trnovima povezanim adhezivima (PVA), čavlima te klasične lamele povezane adhezivima. Rezultati pokazuju da nosivost drvenih trnova promjera 10 mm daje jednako dobru, ako ne i bolju nosivost od spojeva čavlima standardnih dimenzija 3,1x70 mm. Također, eksperimentalno je dobiveno da je krutost spojeva trnovima duplo veća od krutosti spojeva čavlima. Zavareni trnovi imaju manju nosivost nego trnovi povezani adhezivima (PVA). Nosivost i krutost sustava zavarenih trnova znatno ovisi o kutu ugradnje trna. Rezultati su ograničeni na trnove promjera 10 mm te sa samo jednim razmakom. Konkurentnost trnova može se postići optimizacijom samog rasporeda i promjera kako bi se osigurala veća nosivost i krutost.

3 Čvrstoća pritiska po omotaču rupe

Ispitivanje čvrstoće pritiska po omotaču rupe provodit će se prema normi HRN EN 383:2007. Ispitivat će se trnovi različitih promjera. Pritisak po omotaču rupe mjeriti će se pod kutovima 0° , 45° i 90° u odnosu na smjer vlakna.

Trenutno su ispitani trnovi promjera 10 i 12 mm i dobivene su prosječne krivulje sila-pomak. Za provedena istraživanja analizirani su rezultati (Tablica 1.). U rezultatima je vidljivo odstupanje proračunskih od eksperimentalnih vrijednosti maksimalno 16%. Iako je podudaranje rezultata relativno dobro, u trnovima promjera 10 mm eksperimentalni rezultati dali su manju nosivost nego što je dobiveno proračunski. Potrebno je uvažiti da je trenutno ispitano samo 7 uzoraka svake serije te da rezultati znatno variraju. Također, pri mjerenju gustoće ispitanih ele-

menata zamijećena je oscilacija u gustoći između uzoraka iste skupine do 20%, kako je prikazano u tablici 2 i 3. Sa povećanjem kuta djelovanja nosivost elementa sa trnovima promjera 10 mm pada gotovo linearno. Na nosivost trnova promjera 12 mm također znatno utječe promjena gustoće pojedine skupine.

Prije prijedloga korekcije formula iz Eurokoda 5 potrebno je povećati broj uzoraka kako bi se dobile preciznije vrijednosti sa manjim utjecajem oscilacija.

Tablica 1. Usporedba eksperimentalnih i proračunskih vrijednosti čvrstoće pritiska po omotaču rupe

UZORAK	EKSPERIMENTALNO DOBIVEN PRITISAK PO OMOTAČU RUPE [N/mm ²]	ANALITIČKI DOBIVEN PRORAČUNSKI PRITISAK PO OMOTAČU RUPE [N/mm ²]
Ø10 - nagib trna 0°	23.62	20.44
Ø10 - nagib trna 45°	21.37	23.99
Ø10 - nagib trna 90°	19.33	22.01
Ø12 - nagib trna 0°	19.46	18.24
Ø12 - nagib trna 45°	20.88	19.10
Ø12 - nagib trna 90°	17.58	17.73

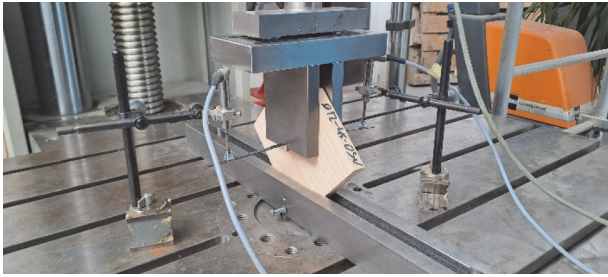
Tablica 2. Gustoća ispitanih uzoraka sa trnovima Ø10

MASA UZORKA (g)	Ø10-0	Ø10-0-V	Ø10-45	Ø10-45-V	Ø10-90	Ø10-90-V
UZORAK 1	77	77	118	143	262	254
UZORAK 2	86	87	124	145	258	249
UZORAK 3	76	86	116	147	263	253
UZORAK 4	77	88	124	144	262	282
UZORAK 5	86	86	118	144	246	267
UZORAK 6	74	88	124	149	257	261
PROSJEČNA MASA (g)	79.33	85.33	120.67	145.33	258.00	261.00
MAX DIMENZIJE (cm)	14x9.5x1.5	14x9.5x1.5	19.5x13.5x1.5	19.5x13.5x1.5	40x10x1.5	40x10x1.5
VOLUMEN ELEMENTA (m ³)	0.0001995	0.0001995	0.000258188	0.000258188	0.0006	0.0006
VOLUMEN RUPE (m ³)	1.178E-06	1.178E-06	1.1775E-06	1.1775E-06	1.178E-06	≤1.178E-06
UKUPNI VOLUMEN (m ³)	0.0001983	0.0001983	0.00025701	0.00025701	0.0005988	0.0005988
GUSTOĆA (kg/m ³)	400.02	430.28	469.50	565.48	430.85	435.86

Tablica 3. Gustoća ispitanih uzoraka sa trnovima Ø12

MASA UZORKA (g)	Ø12-0	Ø12-0-V	Ø12-45	Ø12-45-V	Ø12-90	Ø12-90-V
UZORAK 1	140	121	197	189	309	425
UZORAK 2	121	122	193	193	357	397
UZORAK 3	124	122	189	199	372	384
UZORAK 4	111	125	191	189	312	388
UZORAK 5	120	124	191	197	319	376
UZORAK 6	125	120	189	191	372	336
PROSJEČNA MASA (g)	123.50	122.33	191.67	193.00	340.17	384.33
MAX DIMENZIJE (cm)	17x10x2	17x10x2	23.5x16.5x2	23.5x16.5x3	48x10x2	48x10x2
VOLUMEN ELEMENTA (m ³)	0.00034	0.00034	0.000503	0.000503	0.00096	0.00096
VOLUMEN RUPE (m ³)	1.696E-06	1.696E-06	1.6956E-06	1.6956E-06	1.696E-06	1.696E-06
UKUPNI VOLUMEN (m ³)	0.0003383	0.0003383	0.000501304	0.000501304	0.0009583	0.0009583
GUSTOĆA (kg/m ³)	365.06	361.61	382.34	385.00	354.97	401.06

**Slika 1. Smjer djelovanja sile 90°****Slika 2. Smjer djelovanja sile 0°**



Slika 3. Smjer djelovanja sile 45°

4 Linijski i plošni elementi

Linijски i plošni DLT elementi već se koriste u građevinskoj industriji [2]. Sustav je i dalje u fazi razvoja, te se daljnjom optimizacijom pozicije, promjera i usmjerenja trnova može poboljšati konkurentnost što bi imalo izuzetno dobre posljedice na ekološki aspekt građevinarstva. Plošni elementi biti će ispitani na vertikalno opterećenje (ploče) te kombinaciju vertikalnog i horizontalnog opterećenja (zidovi). Usmjerenje lamela, kao i kod CLT elemenata određuje smjer glavne nosivosti. Uzorci će biti podijeljeni na sustave sa slojevima u smjeru i okomito na smjer sila i sustave sa lamelama postavljenim pod kutom od 45° u odnosu na smjer primarnog opterećenja.

U istraživanju [3] uspoređeni su rezultati iz više izvora u kojima su ispitani i uspoređeni linijski elementi sastavljeni od lamela na savijanje u tri točke. Rezultati provedenih istraživanja su uniformni. Nosivost DLT elemenata znatno varira ovisno o položaju trnova te vrsti ugradnje (mehanička, varenje). Iako postižu bolju krutost i nosivost u odnosu na lamele povezane čavlima, uporaba adheziva i dalje daje najbolje rezultate.

Pregledom istraživanja vidljivo je da razmak i promjer trnova nisu uzeti u obzir već se u istraživanjima koriste kao fiksna varijabla. Navedeni parametri direktno utječu na koeficijent sprežanja lamela takvog nosača i posljedično na samu krutost i nosivost. Cilj ispitivanja linijskih elemenata je testirati veliki broj uzoraka u kojima variraju parametri: usmjerenje, promjer, razmak i tip ugradnje trnova. Pomoću prikupljenih podataka izvesti će se numerički model kojim se mogu precizno definirati veze između lamela i tako dobiti ponašanje elemenata ovisno o navedenim varijablama.

Do sada su ispitani uzorci iz 4 serije koji koriste trnove promjera 10 mm sa uniformnim razmakom na gredama duljine 2,2m. Kako bi se omogućila preliminarna usporedba nosivosti različitih tipova ugradnje, 2 serije su izvedene tako da svaki trn povezuje samo po dvije lamele, mehanički i varom. Zadnje dvije serije sastoje se od grede sa trnovima ugrađenim okomito na element kroz cijelu duljinu i sa

trnovima ugrađenim pod kutom od 45° . Svi elementi ispitani su na savijanje u četiri točke. Uspoređene su vrijednosti krutosti i nosivosti za srednje vrijednosti od svake serije (Tablica 2). U budućim istraživanjima predviđa se ispitivanje lameliranih nosača kvalitete građe GL24h istog presjeka kako bi se mogle usporediti vrijednosti nosivosti i krutosti DLT elemenata u odnosu na sustave sa potpunim sprežanjem lamela.

Tablica 4. Usporedba krutosti i nosivosti greda ispitanih na savijanje u četiri točke

UZORAK	KRUTOST [N/mm]	NOSIVOST [kN]
TRNOVI UNESENI POD KUTOM OD 90°	93,30	14,38
TRNOVI UNESENI POD KUTOM OD 45°	99,08	16,21
VERTIKALNI TRNOVI POVEZUJU PO DVIJE LAMELE, MEHANIČKI UGRAĐENI	91,28	13,22
VERTIKALNI TRNOVI POVEZUJU PO DVIJE LAMELE, ZAVARENI	94,02	13,31



Slika 4. Linijski element neposredno prije otkazivanja



Slika 5. Otkaz linijskog elementa u donjoj zoni

Rezultati dobiveni ispitivanjem za mehaničko ugrađene trnove u skladu su sa pretpostavljenim rezultatima na temelju do sada provedenih ispitivanja. Trnove ugrađene pod kutom od 45° pokazuju veću krutost i nosivost u odnosu na trnove ugrađene pod kutom od 90° . Zavareni trnove pokazuju zanemarivo bolja svojstva

od onih mehanički ugrađenih. Važno je naglasiti da je svaka serija imala po 5 uzoraka za ispitivanje. Također, trnovi promjera 10 mm spadaju u trnove manjih promjera te gubitak djela poprečnog presjeka pri varenju ima veći utjecaj na nosivost trna i kvalitetu veze nego kod trnova većeg promjera.

5 Zaključak

Potpuno drveni konstrukcijski sustavi, bez uporabe adheziva i metalnih spajala, predstavljaju jedinstveno rješenje za održivu gradnju. U kontekstu 3R inicijative u građevinarstvu, drvo se ističe kao najsvrsishodniji i najprikladniji materijal. Zamjena adheziva i metalnih spajala u konstrukcijskim detaljima korištenjem isključivo drvenih spojnih sredstava dodatno povećava potencijal za recikliranje i ponovnu upotrebu elemenata. Trenutno je korištene takvih elemenata u građevinskoj industriji ograničeno visokom cijenom proizvodnje i manjom nosivosti. Provođenjem daljnjih istraživanja i korekcijom osnovnih parametara, DLT elementi mogu postati konkurentno rješenje za građevine manjih do srednjih raspona. Potpuno upetu vezu između lamela, kakvu dobijemo uporabom adheziva na naftnoj bazi, nije moguće dobiti uporabom trnova. No, optimizacijom parametara koji će se testirati u ovom radu smatra se da se može postići nosivost i krutost sustava prihvatljive veličine. Također, zbog nedostatka informacija cijena proizvodnje je viša jer ne postoje pogoni koji su specijalizirani za taj tip proizvodnje. Područje je u razvoju, i postoji mnogo prostora za napredovanje. Prikupljanjem dovoljno velike baze podataka o ponašanju takvih sustava, moguće je predložiti korekcijske formule koje bi se mogle koristiti u analitičkim proračunima. Rezultati trenutno provedenih ispitivanja ograničeni su brojem ispitanih uzoraka te su u skladu sa rezultatima istraživanja nađenih pri pregledu stanja područja. Smatra se da trnovi promjera 10 mm nisu pogodni za ugradnju pomoću vara zbog gubitka poprečnog presjeka koji se sprži. Mehanizacija kojom su se proizvodili zavareni detalji za ispitivanja provedena do sada bila je ograničena za uporabu trnova većih promjera. U daljnjim istraživanjima potrebno je povećati promjere trnova kako bi se dobili mjerodavniji rezultati.

Literatura

- [1] Gluch, P. : Environmental Survey for the construction and real estate sector: a survey of the sector's environmental work: CMB 2007 report, http://www.cmb-chalmers.se/publikationer/miljobarometern_2006.pdf
- [2] Buck, D., Wang, X.(A.), Hagman, O., Gustafsson, A.: Comparison of Different Assembling Techniques Regarding Cost, Durability, and Ecology - A Survey of Multi-layer Wooden Panel Assembly Load-Bearing Construction Elements, *BioResources* 10(4)(2015), pp. 8378-8396.

- [3] Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiry, I., Harte, A. M., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Haller, P., Namari, S., Makradi, A., Belouettar, S., Bouhala, L., Deneufbourg, F., Guan, Z.: Review of State of the Art Dowel Laminated Timber Members and Densified Wood Materials as Sustainable Engineered Wood Products for Construction and Building Applications, *Developments in the Built Environment* Volume 1(2020), 100004
- [4] Bocquet, J.F., Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H.R., Resch, L., Michel, D., Letort, F.: Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21:3-4 (2007). pp. 301-317.
- [5] Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1-1: Općenito – Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1995-1-1:2004+AC:2006+A1:2008) (2013)
- [6] Jung, K., Kitamori, A., Komatsu, K.: Evaluation on structural performance of compressed wood as shear dowel, *Holzforschung* 62(4) (2008), pp. 461-467.
- [7] Pizzi, A., Leban, J.-M., Kanazawa, F., Properzi, M., Pichelin, F.: Wood dowel bonding by high-speed rotation welding, *Journal of Adhesion Science and Technology* (2012), pp. 1263-1278.
- [8] Leban, J. M., Pizzi, A., Properzi, M., Pichelin, F., Gelhaye, P., Rose, C.: Wood welding: A challenging alternative to conventional wood gluing, *Scandinavian Journal of Forest Research* 20(6) (2005), pp. 534-538.

Pregled pristupa numeričkom modeliranju zidanih građevina

Sara Vaing¹, dr. sc. **Maja Baniček¹**, prof. dr. sc. **Josip Atalić¹**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, sara.vaing@grad.unizg.hr, maja.banicek@grad.unizg.hr, josip.atalic@grad.unizg.hr

Sažetak

Povijesne zidane građevine iznimno su osjetljive na potresna djelovanja i znatno pridonose ukupnom potresnom riziku. Za pouzdaniju procjenu ponašanja pri djelovanju potresa koristimo nelinearne proračune, pri čemu veliku ulogu imaju nesigurnosti u modeliranju, osobito epistemičke, koje se često zanemaruju. U radu se analiziraju različite metode modeliranja, s naglaskom na metodu ekvivalentnih okvira kao najrašireniju. Većina metoda ne uključuje otkazivanja izvan ravnine, dok se kod ekvivalentnih okvira koristi makroelement koji obuhvaća ponašanje u i izvan ravnine. Taj je element implementiran u OpenSees, napredni alat otvorenog koda za nelinearne seizmičke analize.

Ključne riječi: zidane građevine, nesigurnosti pri modeliranju, metoda ekvivalentnih okvira, OpenSees, otkazivanje izvan ravnine

Overview of approaches to numerical modeling of masonry structures

Abstract

Historic masonry buildings are highly vulnerable to seismic actions and significantly contribute to overall seismic risk. Accurate assessment of their seismic response requires nonlinear analysis, which is heavily influenced by modeling uncertainties, especially epistemic ones that are often overlooked. This paper reviews various modeling approaches, highlighting their advantages and limitations, with a focus on the equivalent frame method as the most widely used. Most methods do not account for out-of-plane failure, whereas the equivalent frame method incorporates a macroelement that captures both in-plane and out-of-plane behavior of masonry elements. This element is implemented in the open-source software framework OpenSees, which, despite some limitations, remains one of the most advanced tools for performing nonlinear seismic analysis of structural and geotechnical systems.

Key words: unreinforced masonry structures, modelling uncertainty, equivalent frame approach, OpenSees, out-of-plane failure

1 Uvod

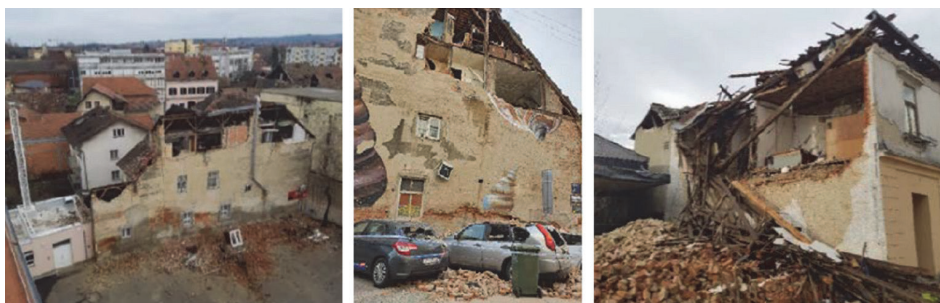
Potresi u svijetu [1], a i nedavni potresi u Hrvatskoj [2] istaknuli su visoku ranjivost tradicijskih zidanih građevina koje čine većinu povijesnih centara raznih gradova u svijetu. Kako bi se potencijalni rizik od potresa smanjio, potrebno je unaprijediti razumijevanje njihovog ponašanja. Odrediti dobar numerički model koji predstavlja stvarno ponašanje predstavlja jedan od najvažnijih izazova u analizi postojećih zidanih konstrukcija te projektiranju njihova pojačanja. Odziv i ponašanje zidanih građevina ovisi o mehaničkim karakteristikama opeke i morta te njihovoj međusobnoj povezanosti. Vrijednosti tih karakteristika su radi same povijesti i dotrajalosti tradicijskih zgrada degradirale, to jest smanjile su se u odnosu na početne vrijednosti u doba izgradnje, što materijal čini heterogenim te se javlja potreba za nelinearnim proračunima. Kod postojećih zidanih konstrukcija veza između opeke i morta je izuzetno slaba što utiče na gubitak adhezije i smanjenje nosivosti ziđa [3]. U zadnjih pola stoljeća posebna se pažnja posvećuje računskoj analizi zidanih zgrada te ovaj rad daje pregled nekih od metoda koje se koriste za izradu numeričkih modela zidanih konstrukcija [4]. Kako bi numerički model vjerodostojno prikazivao ponašanje, važno je posebnu pažnju posvetiti detaljima koji se često zanemaruju ili pojednostavljaju, a znatno utječu na nesigurnosti pri modeliranju [5]. Metoda ekvivalentnih okvira u radu je istaknuta kao najkorištenija metoda u akademskoj zajednici ali i inženjerskoj praksi te je u sklopu te metode suvremeni napredni alat OpenSees istaknut kao izvrsno znanstveno rješenje spomenutih problema koji se javljaju u procjeni ponašanja zidanih zgrada na područjima izloženim potresima.

2 Nesigurnosti pri modeliranju

Kako bi se doprinos postojećih zidanih zgrada riziku od potresa smanjio, potrebno je konstantno istraživati njihovo ponašanje te primijeniti postupke procjene koji odražavaju njihove specifičnosti. Na žalost, precizna procjena otpornosti na potres često je otežana radi nedostatka informacija o materijalu, konstrukciji i spojevima [6]. Veliki utjecaj na rezultate proračuna imaju nesigurnosti koje se često ne uzimaju u obzir, a vrlo su važne kada se govori o zidanim konstrukcijama. U kontekstu modeliranja, glavna podjela nesigurnosti je na aleatorne i epistemičke. Aleatorne (lat. alea, u prijevodu bacanje kocke) proizlaze iz prirode samog procesa. Znamo da postoje i da su uzrokovane intrinzičnom varijabilnošću problema. Nije ih moguće u potpunosti eliminirati dok epistemičke (lat. episteme, u prijevodu znanje) proizlaze iz nedostatka znanja ili podataka, te ih je moguće smanjiti dodatnim istraživanjem i boljim razumijevanjem [7].

2.1 Epistemičke nesigurnosti

Neki od parametara koji utiču na epistemičke nesigurnosti pri procjeni ponašanja zidanih građevina su mehaničke karakteristike materijala. Radi same povijesti i dugog vijeka povijesnih građevina, karakteristike opeke i morta su promijenjene u odnosu na doba izgradnje. Eksperimentalna ispitivanja su skupa, a neka od njih nije dozvoljeno provoditi na povijesnim građevinama. Često se vrijednosti materijala razlikuju i unutar same građevine, radi rekonstrukcija kroz vrijeme, te je općenito izazovno odrediti dobre ulazne podatke. Veliki utjecaj na rezultate ima i odabir krutosti horizontalne dijafragme, što je također vrlo teško odrediti [8]. Doprinos nesigurnosti imaju i nelinearni spojevi vertikalnih i horizontalnih konstrukcijskih elemenata koji utječu na razvoj mehanizma otkazivanja elemenata van ravnine. To su spojevi između zidova, spojevi između podova i zidova a u slučaju blokova, kontakt između građevina koje ne dijele zajednički zid. Karakteristike tih spojeva vrlo je teško procijeniti. Često se uzimaju u obzir kao krute, što uzrokuje pogrešnu procjenu ponašanja, osobito kod proračuna pojačanja [9]. Većina pristupa modeliranju zidanih građevina ne uzima u obzir otkazivanje elemenata izvan ravnine već je taj proračun potrebo provesti zasebno. Taj je mehanizam vrlo važno uzeti u obzir radi velikih posljedica koje ima u smislu oštećenja građevina, ugroze ljudskog života, te ekonomskog učinka. Pregledi oštećenja građevina nakon potresa u Zagrebu i Petrinji 2020. i 2021. godine pokazala su da je ovaj način otkazivanja zastupljen kod zidanih građevina te najviše doprinosi ukupnoj šteti nakon potresa, slika 1. Osim što uzrokuje veliku štetu na samoj građevini, velik je broj susjednih zgrada proglašeno privremeno neuporabljivo radi vanjskih utjecaja gdje im je prijetila opasnost od urušavanja dimnjaka ili fasadnih zidova. Primijećena su otkazivanja zabatnih zidova po cijeloj visini građevine te fasadnih zidova van ravnine. Osim na novčanu štetu, veliki utjecaj imaju i na ugrozu ljudskog života te zemetanje ulica što otežava prolazak interventne službe i hitne pomoći [10].

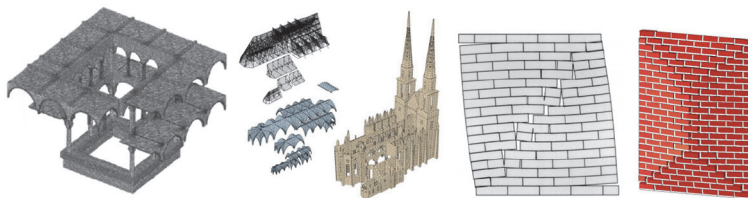


Slika 1. Otkazivanja zidova van ravnine u Zagrebačkom potresu 2020. godine [9]

3 pristupi modeliranju zidanih konstrukcija

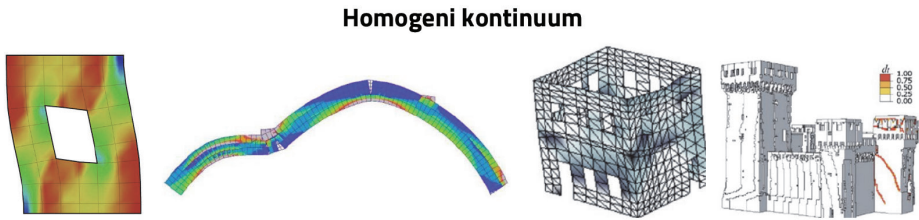
Zide je kompozitni materijal koji se sastoji od elementa (kamen, opeka) i morta, a mehanizmi otkazivanja mogu biti vlačni slom elementa i spoja, otkazivanje spoja na posmik i tlačno otkazivanje kompozita. Ovi fenomeni mogu se uzeti u obzir mikro-modeliranjem gdje se zidani element i mort modeliraju zasebno. Nasuprot tome, pristupom makro-modeliranja materijal se promatra kao anizotropan homogeni kontinuum pri čemu se međudjelovanje komponenti ne može uključiti izravno u numerički model već se uspostavlja veza između srednjih naprezanja i deformacija. Mikro-modeliranja su nužna za bolje razumijevanje lokalnog ponašanja zidanih konstrukcija. Ova vrsta modeliranja posebno je primjenjiva na analizu detalja, dok je makro-modeliranje orijentirano na praktičnu primjenu zbog jednostavnije izrade modela i manjeg zahtjeva za računalnim vremenom i memorijom [11]. U novije vrijeme, posebna se pažnja posvećuje računskoj analizi zidanih zgrada pa u znanstvenoj literaturi postoje razni pristupi modeliranju koji se temelje na idealizacijama materijala i konstrukcije, no [12] opsežnu literaturu svodi na četiri temeljna pristupa: modeli temeljeni na elementima i njihovoj interakciji, modeli temeljeni na homogenom kontinuumu, modeli temeljeni na geometriji i proračunu krutih tijela te modeli temeljeni na zamjenskim elementima. Prvi pristup predstavlja ponašanje zida na razini pojedine komponente, element i mort, te njihove međusobne interakcije. Ovaj pristup prikazuje detaljno ponašanje materijala i mehanizme sloma u ravnini i izvan ravnine. Prednosti ove metode su visoka točnost i preciznost, pogodna je za složene i nepravilne geometrije, omogućuje uvid u lokalno ponašanje i mehanizme sloma, korisna je za analizu povijesnih građevina i kalibraciju drugih modela, a nedostaci što je izrazito računalno zahtjevna, složeno je i vremenski zahtjevno modeliranje, potrebni su detaljni ulazni podaci koji često nisu dostupni, ograničena je primjena u inženjerskoj praksi, koristi se uglavnom u znanstvenim istraživanjima i za objekte posebne važnosti. Neki od softverskih alata koji primjenjuju ovu metodu su SAP2000, Abaqus, DIANA [13–15]. Neki od primjera prikazani su na slici 2.

Elementi i njihova interakcija



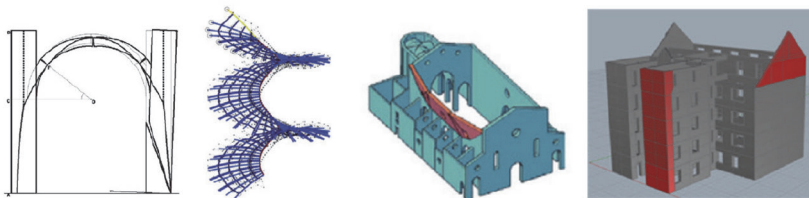
Slika 2. Primjeri modela i dosadašnjih istraživanja pristupom elemenata i njihove interakcije, redom [11, 16–18]

Jednostavnija metoda od modeliranja zida „ciglu po ciglu“ je modeliranje s pretpostavkom zida kao kontinuiranog deformabilnog tijela (slika 3) gdje se razlika između opeke i morta gubi u prikazu zida na makrorazini te se svojstva cijelog zida definiraju kroz zamjenski homogeni materijal. Takvi modeli najčešće se kalibriraju prema podacima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima. Ova metoda široko je primjenjiva i često je korištena, pogodna je za složene i monumentalne građevine, podržava različite pristupe (plastično oštećenje, homogenizacija). Međutim, moguće je precijeniti deformabilnost i granični pomak, ograničeno je prikazivanje lokalnih efekata, trenutno nije potpuno razvijena 3D homogenizacija, homogenizacija zahtijeva dodatni trud i može smanjiti preciznost, veća je računalna složenost u odnosu na jednostavnije modele. Također se mogu koristiti softveri poput Abaqus-a i DIANA.



Slika 3. Primjeri modela i dosadašnjih istraživanja temeljenih na homogenom kontinuumu [19-22]

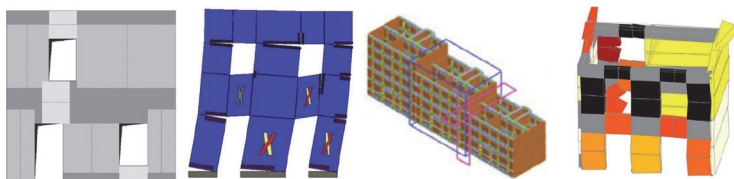
Treći pristup temelji se na geometriji, pri čemu se konstrukcija promatra kao skup krutih tijela, a analiza se uz geometriju i opterećenja svodi na rješavanje jednadžbi ravnoteže temeljene na statičkim ili kinematičkim teoremima. Metoda se koristi za procjenu lokalnih mehanizama sloma i stabilnosti konstrukcije. Ova metoda ima jednostavnu primjenu, nije potrebno detaljno modeliranje materijala, omogućuje razumijevanje mehanizama sloma, prikladna je za složene svodove i lukove, te je ključna za procjenu stabilnosti. No, ne uključuje mehaničke i materijalne karakteristike, pojednostavljuje ponašanje konstrukcije, ne podržava dinamičku analizu i ograničena je na zakrivljene elemente. Analiza se provodi pomoću CAD alata poput Rhino i Grasshopper [23]. Neki od primjera prikazani su na slici 4.



Slika 4. Primjeri modela i dosadašnjih istraživanja temeljenih na geometriji, redom [24-27]

Zadnji pristup predstavlja metodu zamjenskih elemenata, kod koje se zidovi zgrade idealiziraju kao skup elemenata zida i nadvoja, čije je nelinearno ponašanje definirano fenomenološki. Ovaj pristup omogućuje brzu procjenu seizmičkog odziva konstrukcije, a novije inačice uključuju i makroelement koji istovremeno obuhvaća ponašanje elementa u ravnini i izvan nje. Primjenjiva je u inženjerskoj praksi, analiza je brza i jednostavna, pogodna je za analizu običnih zgrada pod potresnim opterećenjem. Međutim, kalibracija se temelji samo na zidovima, i nije primjenjiva za složene i nepravilne građevine. Trenutno najpoznatiji softverski alati koji koriste ovu metodu su TREMURI, 3Muri, OpenSees i dr [28-30], a neki od modela prikazani su na slici 5.

Modeli temeljeni na zamjenskim elementima



Slika 5. Primjeri modela i dosadašnjih istraživanja temeljeni na zamjenskim elementima, redom [31-34]

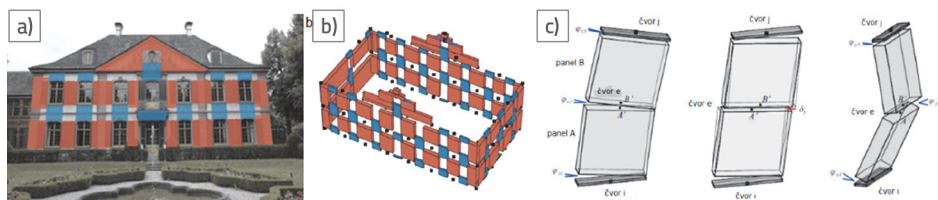
4 Metoda temeljena na zamjenskim elementima

Svaka od navedenih metoda predstavlja mogućnost modeliranja zidanih zgrada na različitim skalama, no radi složenosti izrade modela, potrebnih ulaznih podataka te ograničenosti provedbe dinamičke analize na cijelu zgradu, nijedna od njih nije primjenjiva u inženjerskoj praksi kao metoda ekvivalentnih okvira, a preporuča se i u nekim normama [35, 36]. Ova metoda diskretizira zid na deformabilne elemente koji imaju nelinearan odziv i krute elemente koji ih spajaju. U vidu ove metode razlikuju se deformabilni elementi zid (engl. pier) i nadvoj (eng. spandrel) koji su povezani krutim zonama (eng. rigid panels). Pier-ovi su glavni nosivi elementi koji prenose i vertikalne i horizontalne sile, dok su spandrel sekundarni elementi koji povezuju dva susjedna pier-a i njihov odgovor u slučaju bočnih opterećenja, te na taj način doprinose kapacitetu nosivosti zida na bočne sile. Na temelju pregleda oštećenja nastalih nakon potresa te eksperimentalnih ispitivanja, zaključilo se da se pukotine i mehanizmi otkazivanja pojavljuju na određenim mjestima na zidu na temelju čega se formira geometrija deformabilnih elemenata [37]. Na slici 6 a) i b) prikazan je primjer idealizirane fasade i modela s makroelementima: crvena boja označava element zida (pier), plava označava element nadvoja

(spandrel), a sivo su krute zone (nodal panels). Prednosti ove metode su što je jednostavna za razumijevanje i primjenu u odnosu na druge nelinearne metode, omogućuje brzo izvođenje analiza, uključuje nelinearno ponašanje, raširena je u inženjerskoj praksi i softverima, te je prikladna za analizu postojećih građevina. Premda je izrada numeričkih modela ovom metodom jednostavna i brza, glavni nedostaci su idealiziranje stvarnog ponašanja zidova pri čemu se gubi dio složenosti stvarnog ponašanja posebno kod heterogenih materijala, nepouzdanost rezultata kod nepravilnih građevina u tlocrtu ili visini, te nepravilnog rasporeda otvora na zidovima, metoda je primarno dvodimenzionalna te ne obuhvaća prostornu interakciju elemenata, te analizira globalni odgovor zgrade, ne uzimajući u obzir lokalne mehanizme otkazivanja izvan ravnine [38].

4.1 Makroelement za modeliranje ponašanja zidanih elemenata unutar i izvan ravnine

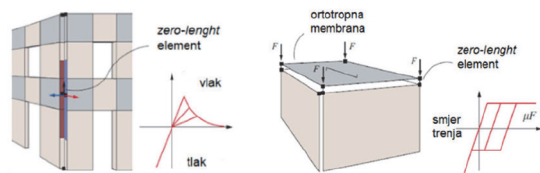
Postojeći modeli ekvivalentnih okvira uglavnom su ograničeni na ravninsku analizu to jest promatraju globalni odziv građevine, dok je za sveobuhvatnu procjenu ponašanja zidanih zgrada prilikom opterećenja potresom potrebno analizirati i razvoj mehanizama sloma van ravnine. U nazad par godina razvijen je makroelement koji obuhvaća ponašanje zidanih elemenata u ravnini kao i izvan nje [39]. Element je jednodimenzionalan a definiran je pomoću tri čvora, dva na rubu i jedan u sredini elemenata, koji su definirani u trodimenzionalnom prostoru. Odgovor unutar ravnine temeljen je na formulaciji makroelementa od Penna et al [40] koji se koristi u programima poput TREMURI i 3muri, a odgovor izvan ravnine obuhvaćen je $P-\Delta$ formulacijom. Definicija elementa kao i defomacije prikazane su na slici 6 c). Makroelement [41] integriran je u OpenSees, napredni objektno orijentirani softverski okvir otvorenog koda koji je razvijen na University of California, Berkeley od strane PEER centra [43]. OpenSees omogućuje vremenski učinkovito provođenje statičkih i dinamičkih analiza uzimajući u obzir nelinearno ponašanje materijala i geometrije. Softver koristi Tcl ili Python, što omogućuje automatizaciju analiza, te podržava paralelno izvođenje simulacija [44]. Unatoč naprednim mogućnostima, bez grafičkog sučelja korisnicima je otežana vizualizacija modela i rezultata a rezultati proračuna osjetljivi su na preciznost ulaznih parametara. [45] daje prikaz razvijenih grafičkih sučelja do 2023. godine. Dokumentacija je djelomično zastarjela, što dodatno usporava uvođenje novih korisnika. OpenSees besplatan je i dostupan softver a njegova objektno-orijentirana arhitektura omogućuje razvoj i implementaciju novih elemenata, materijala i algoritama. Zbog toga se OpenSees primarno koristi u znanstvenim istraživanjima, dok mu je primjena u inženjerskoj praksi ograničena. Ipak, ostaje jedan od najsnažnijih alata za nelinearnu seizmičku analizu.



Slika 6. a) diskretizacija fasade na mrežu makroelemenata, b) model temeljen na makroelementima, c) definicija i deformacije 3D makroelementa [42]

4.2 Definiranje nelinearnih spojeva u OpenSees-u

OpenSees ima mogućnost zadavanja nelinearnih spojeva koji su spomenuti ranije u radu u kontekstu nesigurnosti pri modeliranju, a zadaju se zero-length elementom. Element definiraju dva čvora koji se nalaze na istoj lokaciji. Nelinearnost se definira pridruživanjem željenih materijalnih ponašanja zadanom elementu koji predstavljaju odnos sile i deformacije elementa. Očekivani izvor nelinearnosti spojeva između ploče i zidova je proklizavanje drvenih grednika i moguće otkazivanje tog spoja, te je zero-length elementu potrebno pridružiti odgovarajući materijalni model ponašanja. Primjer jednostavnog materijalnog modela prikazan je na slici 7 gdje je prikazana histereza u smjeru klizanja. Sila trenja raste do maksimuma μF te dolazi do klizanja i povećanja pomaka. Veza između zidova također se modelira zero-length elementom, a potencijalna nelinearnost spoja može se postići otvaranjem vertikalne pukotine što može dovesti do otkazivanja fasadnog zida van ravnine. Spoj se može modelirati zadavanjem elementa na rubnim čvorovima zidova, kojima se dodjeljuju odgovarajuća vlačna svojstva. Maksimalna vlačna sila koju spoj može prenijeti može se definirati integracijom vlačne čvrstoće duž pripadajućeg presjeka, dok spoj u tlaku ima linearno ponašanje [46].



Slika 7. Definiranje nelinearnih spojeva u OpenSees-u [42]

5 Zaključak

Različite strategije modeliranja zidanih konstrukcija nude kompromise između točnosti, složenosti i praktične primjenjivosti. Detaljno modeliranje elemenata i njihove interakcije pruža najvišu razinu preciznosti te je nezamjenjivo za analizu povijesnih i monumentalnih građevina, no visoka računalna zahtjevnost i kompleksnost ove metode ograničavaju njenu širu primjenu. S druge strane, modeli homogenog kontinuuma omogućuju složene analize, ali pate od problema gubitka preciznosti i ograničene mogućnosti prikaza lokalnih fenomena. Geometrijski modeli, iako pojednostavljeni, ključni su za razumijevanje mehanizama sloma kod zakrivljenih elemenata, dok su ekvivalentni okviri jedina metoda praktična za svakodnevnu inženjersku primjenu zbog jednostavnosti, brzine i mogućnosti provođenja velikog broja nelinearnih analiza. Međutim, primjena ove metode ograničena je na građevine pravilne geometrije. Stoga je izbor modela i dalje kompromis između točnosti, kompleksnosti i praktične primjene, pri čemu detaljne metode ostaju nezamjenjive za analizu povijesnih i kulturno vrijednih objekata.

Dodatni potencijal metode ekvivalentnih okvira leži u novo razvijenom makro-elementu, implementiranom u softverski alat OpenSees, koji omogućuju cjelovit prikaz odziva zida unutar i izvan ravnine. U OpenSees su također integrirani elementi te razni materijali nelinearnog ponašanja kojima se mogu uzeti u obzir i smanjiti epistemičke nesigurnosti. Navedeni program i spomenuta metoda planiraju se primijeniti u doktorskom radu za procjenu ponašanja u potresu tradicijskih zidanih zgrada u blokovima na području Donjeg grada u Zagrebu.

Literatura

- [1] D'Ayala D. F., Paganoni S.: Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009, *Bulletin of Earthquake Engineering* 9 (2011), pp. 81-104, doi: 10.1007/s10518-010-9224-4
- [2] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., and Hak, S., Post-earthquake damage assessment of buildings - Procedure for conducting building inspections, *Građevinar*, vol. 72, no. 12, pp. 1089–1115, 2021, doi: 10.14256/JCE.2969.2020.
- [3] Uroš M., Todorčić M., Crnogorac M., Atalić J., Šavor Novak M., Lakušić S.: Pristup problemu procjene nosivosti i pojačanja zgrada, *Potresno inženjerstvo - obnova zidanih zgrada*. Zagreb, Hrvatska: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [4] D'Altri, A.M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G. & de Miranda, S., 2019. A review of numerical models for masonry structures. In: *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures*, pp.3–53. doi:10.1016/B978-0-08-102439-3.00001-4.

- [5] Tondelli, M., Rota, M., Penna, A. & Magenes, G., 2012. Evaluation of uncertainties in the seismic assessment of existing masonry buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(S1), pp.36–64. doi:10.1080/13632469.2012.670578.
- [6] Crnogorac M. Izvorni i stečeni nedostaci konstrukcija zgrada. U: Uroš M., Todorčić M., Crnogorac M., Atalić J., Šavor Novak M., Lakušić S. (ur.) *Potresno inženjerstvo – obnova zidanih zgrada*. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2021, str. 219–243.
- [7] Der Kiureghian, A. and Ditlevsen, O., 2009. Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural Safety*, 31(2), pp.105–112. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>.
- [8] Tomić, I., Vanin, F. & Beyer, K., 2021. Uncertainties in the seismic assessment of historical masonry buildings. *Applied Sciences*, 11(5), p.2280. doi:10.3390/app11052280.
- [9] Bianchini, N., Ciocchi, M.P., Solarino, F., Romanazzi, A., Ramirez, R., D'Anna, J. & Aşikoğlu, A., 2024. Influence of wall-to-floor connections and pounding on pre- and post-diction simulations of a masonry building aggregate tested on a shaking table. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, pp.6141–6161. doi:10.1007/s10518-023-01641-x.
- [10] Uroš, M., Atalić, J., Demšić, M., Baniček, M., Šavor Novak, M. & Kadić, A., 2024. Impact of devastating earthquakes in Croatia in 2020. *Journal of Applied Engineering Science*, 22(2), pp.239–244. doi: 10.5937/jaes0-50405.
- [11] Lourenço, P.B., 2008. Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry. *Repositório da Universidade do Minho*. Dostupno na: *Repositório da Universidade do Minho* (preko ResearchGate) [pristupljeno 18. srpnja 2025.].
- [12] D'Altri, Antonio Maria, Vasilis Sarhosis, Gabriele Milani, Jan Rots, Serena Cattari, Sergio Lagomarsino, Elio Sacco, Antonio Tralli, Giovanni Castellazzi, and Stefano de Miranda: *Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification*, *Archives of Computational Methods in Engineering* 27 (2020), pp. 1153–1185, doi: 10.1007/s11831-019-09351-x.
- [13] Computers and Structures, Inc. (2024) SAP2000 – Integrated Structural Analysis and Design Software. Version 25. Available at: <https://www.csiamerica.com/products/sap2000> (Pristupljeno: 15.07.2025.).
- [14] Dassault Systèmes (2016) ABAQUS/CAE User's Guide. Version 6.16, Dostupno: http://130.149.89.49:2080/v2016/pdf_books/CAE.pdf (Pristupljeno: 15.07.2025.).
- [15] DIANA FEA korisnički priručnici. Dostupno na: <https://dianafea.com/diana-manuals/> (Pristupljeno: 15. srpnja 2025.).

- [16] Lazarević, D., Atalić, J. and Fresl, K. (2009) Reconstruction of Rector's Palace atrium in Dubrovnik: A key role of column connections. In: Proceedings of the 11th International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture (STREMAH). WIT Press. doi: 10.2495/STR090261.
- [17] Lazarević, D., Gidak, P., Šamec, E. and Jaguljnjak Lazarević, A. (2023) Seismic analysis of Zagreb Cathedral – current state. In: Proceedings of the 13th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2023), RILEM Bookseries. Springer. doi:10.1007/978-3-031-39603-8_74.
- [18] D'Altri, A.M., de Miranda, S., Castellazzi, G. and Sarhosis, V. (2018) 'A 3D detailed micro-model for the in-plane and out-of-plane numerical analysis of masonry panels', *Computers & Structures*, 206, pp. 18–30. doi: 10.1016/j.compstruc.2018.06.007.
- [19] Giambanco, G., La Malfa Ribolla, E. and Spada, A. (2018) 'Meshless meso-modeling of masonry in the computational homogenization framework', *Meccanica*, 53, pp. 1673–1697. doi: 10.1007/s11012-017-0664-7.
- [20] Pantò, B., Chisari, C., Macorini, L. and Izzuddin, B.A. (2022) 'A hybrid macro-modelling strategy with multi-objective calibration for accurate simulation of multi-ring masonry arches and bridges', *Computers and Structures*, 265, 106769. doi: 10.1016/j.compstruc.2022.106769.
- [21] Milani, G., Lourenço, P. and Tralli, A. (2007) '3D homogenized limit analysis of masonry buildings under horizontal loads', *Engineering Structures*, 29(11), pp. 3134–3148. doi: 10.1016/j.engstruct.2007.03.003.
- [22] Degli Abbati, S., D'Altri, A.M., Ottonelli, D., Castellazzi, G., Cattari, S., de Miranda, S. and Lagomarsino, S. (2019) 'Seismic assessment of interacting structural units in complex historic masonry constructions by nonlinear static analyses', *Computers & Structures*, 213, pp. 51–71. doi: 10.1016/j.compstruc.2018.12.001.
- [23] McNeel & Associates. Rhino3D Learn – Jump Start tutorials. Dostupno na: https://www.rhino3d.com/learn/?query=kind:%20jump_start&modal=null (Pristupljeno: 15.07.2025).
- [24] Block, P., Ciblac, T. and Ochsendorf, J. (2006) 'Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings', *Computers & Structures*, 84(29–30), pp. 1841–1852. doi: 10.1016/j.compstruc.2006.08.002.
- [25] Marmo, F. and Rosati, L. (2017) 'Reformulation and extension of the thrust network analysis', *Computers & Structures*, 182, pp. 104–118. doi: 10.1016/j.compstruc.2016.11.016.
- [26] Chiozzi, A., Grillanda, N., Milani, G. and Tralli, A. (2018) 'UB-ALMANAC: An adaptive limit analysis NURBS-based program for the automatic assessment of partial failure mechanisms in masonry churches', *Engineering Failure Analysis*, 85, pp. 201–220. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.013.

- [27] Uroš, M., Demšić, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Baniček, M., Jevtić Rundek, R., Duvnjak, I., Koščak, J., Pilipović, A. and Prevolnik, S. (2024) 'Damage Evaluation and Seismic Assessment of a Typical Historical Unreinforced Masonry Building in the Zagreb 2020 Earthquake: A Case Study—Part I', *Buildings*, 14(2), p. 474. doi: 10.3390/buildings14020474.
- [28] Lagomarsino, S., Galasco, A., Penna, A. and Cattari, S. (2007) *TREMURI Research Manual*. University of Genova, University of Pavia, European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/293817607/TREMURI-Research-Manual> (Pristupljeno: 15.7.2025.).
- [29] 3Muri User Manual. Dostupno na: https://www.ergocad.eu/uploads/9/9/7/7/99772912/3muri_eng.pdf (Pristupljeno: 15.7.2025.).
- [30] McKenna, F., Fenves, G.L. and Scott, M.H. (2006) *OpenSees Command Language Manual*. University of California, Berkeley. Dostupno na: <https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/OpenSeesCommandLanguageManualJune2006.pdf> (Pristupljeno: 15.7.2025.).
- [31] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. and Cattari, S. (2013) 'TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings', *Engineering Structures*, 56, pp. 1787–1799. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.08.002.
- [32] Calì, I., Marletta, M. and Pantò, B. (2012) 'A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings', *Engineering Structures*, 40, pp. 327–338. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.02.039.
- [33] Pinasco, S., Demšić, M., Pilipović, A., Šavor Novak, M., Uroš, M., Lagomarsino, S. and Cattari, S. (2025) 'Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate located in Zagreb', *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23, pp. 2715–2741. doi: 10.1007/s10518-025-02156-3.
- [34] Tomić, I., Vanin, F., Božulić, I. and Beyer, K. (2021) 'Numerical simulation of unreinforced masonry buildings with timber diaphragms', *Buildings*, 11(5), p. 205. doi: 10.3390/buildings11050205.
- [35] EN 1998-1. Eurocode 8. Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 1-1: General rules – seismic actions and general requirements for structures. CEN, Brussels, Belgium; 2004.
- [36] NTC 2008. Decreto Ministeriale 14/1/2008. Norme tecniche per le costruzioni. Ministry of Infrastructures and Transportations. G.U. S.O. n.30 on 4/2/2008; 2008 [na talijanskom].
- [37] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. & Cattari, S., 2013. TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, pp.1787–1799.

- [38] Quagliarini, E., Maracchini, G. & Clementi, F., 2017. Uses and limits of the Equivalent Frame Model on existing unreinforced masonry buildings for assessing their seismic risk: A review. *Journal of Building Engineering*, 10, pp.166–182. doi:10.1016/j.jobbe.2017.03.004.
- [39] Vanin, F., Penna, A. & Beyer, K., 2020. A three-dimensional macroelement for modelling the in-plane and out-of-plane response of masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(7), pp.682–704. doi:10.1002/eqe.3277.
- [40] Penna, A., Lagomarsino, S. & Galasco, A., 2014. A nonlinear macroelement model for the seismic analysis of masonry buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43, pp.159–179. doi:10.1002/eqe.2335.
- [41] EESD-EPGL Github Repository, <https://github.com/orgs/eesd-epfl/repositories>
- [42] EPFL, <https://www.epfl.ch/en/>
- [43] OPENSEES, <https://opensees.berkeley.edu/>
- [44] McKenna, F., Scott, M.H. & Fenves, G.L., 2010. Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(1), pp.95–107. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000002.
- [45] Shabani, A., 2023. A review of graphical user interfaces of OpenSees software framework. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1233116. doi:10.3389/fbuil.2023.1233116.
- [46] Vanin, F., Penna, A. & Beyer, K., 2020. Equivalent-frame modeling of two shaking table tests of masonry buildings accounting for their out-of-plane response. *Frontiers in Built Environment*, 6, p.42. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00042>.

Regional waste materials as candidates for mineral carbonation-based CO₂ sequestration

Viktor Kolčić¹, izv. prof. dr. sc. Marijana Serdar²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, viktor.kolcic@grad.unizg.hr

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

Abstract

This paper explores the application potential of regional waste materials for carbon dioxide (CO₂) sequestration through mineral carbonation. Seven waste materials of local origin were characterized using X-ray fluorescence (XRF) to assess their chemical suitability for carbonation. The results indicate that materials such as biomass ashes and concrete powder, due to their high CaO content, show promising potential for CO₂ uptake. Two complementary carbonation methods, dry carbonation in a climate chamber and wet carbonation via concurrent milling, are described as relevant reference approaches for future experimental validation.

Key words: mineral carbonation, CO₂ sequestration, waste materials, dry carbonation, wet carbonation

Regionalni otpadni materijali kao kandidati za vezanje CO₂ putem karbonatizacije

Sažetak

U ovom radu istražuje se mogućnost primjene regionalnih otpadnih materijala za vezanje ugljikova dioksida (CO₂) uz pomoć ubrzanе karbonatizacije. Sedam otpadnih materijala lokalnog podrijetla analizirano je metodom rendgenske fluorescencije (XRF) kako bi se procijenila njihova kemijska pogodnost za ovaj proces. Rezultati pokazuju da materijali poput biopepela i betonskog praha, zbog visokog udjela kalcijeva oksida (CaO), imaju izražen potencijal za vezanje CO₂. Opisane su dvije metode karbonatizacije, suha karbonatizacija u klimatskoj komori i mokra karbonatizacija uz istodobno mljevenje, kao primjeri prikladnih pristupa za buduća laboratorijska ispitivanja.

Ključne riječi: karbonatizacija, vezanje CO₂, otpadni materijali, suha karbonatizacija, mokra karbonatizacija

1 Introduction

The urgent need to reduce carbon dioxide (CO_2) levels in the atmosphere, one of the main causes of global climate change, has led to extensive research into sustainable mitigation strategies, particularly in sectors with high emissions intensity, such as the construction industry. This sector remains a significant contributor to the climate crisis, accounting for around 32% of global energy consumption and 34% of CO_2 emissions [1]. The reliance on carbon-intensive materials such as cement and steel, which together account for around 18% of global emissions, further intensifies the environmental impact [1]. One of the biggest contributors is cement production, which is essential for concrete production and emits an estimated 600 kg of CO_2 per ton of cement produced [2]. In addition, the construction industry is a major generator of waste, producing over 10 billion tons of construction and demolition waste annually [3].

Various solutions and strategies are currently being developed to combat climate change and reduce CO_2 emissions. One important approach is the use of supplementary cementitious materials (SCMs), as evidenced by the steadily decreasing clinker factor worldwide. According to the Global Cement and Concrete Association [4], the ratio of clinker to cement was around 0.85 in 1990 and is estimated to be around 0.76 in 2022. Among the most recognized and effective long-term strategies for achieving climate neutrality are Carbon Capture and Storage (CCS) and Carbon Capture and Utilization (CCU). These approaches aim to either permanently store captured CO_2 in geological formations or integrate it into useful products, thereby reducing the net amount of CO_2 released into the atmosphere [5, 6].

While many CCS and CCU methods require advanced technologies and significant energy input, mineral carbonation is a simpler process that converts CO_2 into stable carbonate minerals. In this process, CO_2 reacts with calcium- or magnesium-rich materials to form compounds such as calcite (CaCO_3), magnesite (MgCO_3) or dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) [7]. Under atmospheric conditions, where the CO_2 concentration is only about 0.04%, the carbonation of reactive solids is extremely slow, so that natural mineral sequestration is largely ineffective [7, 8, 9]. Increased CO_2 quantities or pressures are often used to improve the reaction kinetics. One of the most reactive components of SCMs is calcium oxide (CaO), a highly alkaline compound (equation 1). However, the direct reaction between gaseous CO_2 and CaO is kinetically inhibited and proceeds only slowly [10]. The presence of moisture accelerates this process considerably. Under such conditions, CO_2 dissolves in water, forms carbonic acid and then reacts with calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), which is formed by the hydration of CaO (equation 2) [7]. This sequence leads to the precipitation of calcium carbonate (CaCO_3), a com-

pound with very low solubility in water (equation 3) [10]. This carbonation pathway changes both the chemical composition and the physical structure of the material.



In this paper, chemical composition of seven different regional waste streams is determined using X-ray fluorescence (XRF). In addition, two different methods for mineral carbonation, dry carbonation and wet carbonation, are described. Based on the chemical compositions obtained, the potential of these materials for CO₂ sequestration is discussed.

2 Materials

Seven waste materials were selected for this study based on their local availability and industrial origin, with the assumption that their composition, resulting from high temperature or chemically intensive processes, could be suitable for CO₂ mineral sequestration.

Biomass ashes (Figure 1. a, b, c) were obtained from bioenergy facilities in Strizivojna, Spačva, and Ljubešćica (Croatia). These ashes are byproducts of bioenergy production processes, rich in calcium, and thus highly reactive with CO₂. Concrete powder (Figure 1. d) was provided by a company from Pula (Croatia), specializing in concrete products. This powder originates from waste generated during the manufacturing process, making it a material potentially suitable for CO₂ sequestration.

Red mud (Figure 1. e), a byproduct of alumina production, was sourced from Dobro Selo (Bosnia and Herzegovina). This highly alkaline material presents significant potential for CO₂ sequestration due to its chemical composition.

Raw olive pomace (Figure 1. f) was sourced from an oil mill in Vodnjan (Croatia). This material was first dried and subsequently calcined in an electric furnace at 800°C, with a temperature increase of 10°C per minute, resulting in olive pomace ash (Figure 1. h). Similarly, raw paper sludge (Figure 1. g), obtained from a packaging and paper manufacturing company in Belišće (Croatia), was dried and calcined under the same conditions to produce paper sludge ash (Figure 1. i).

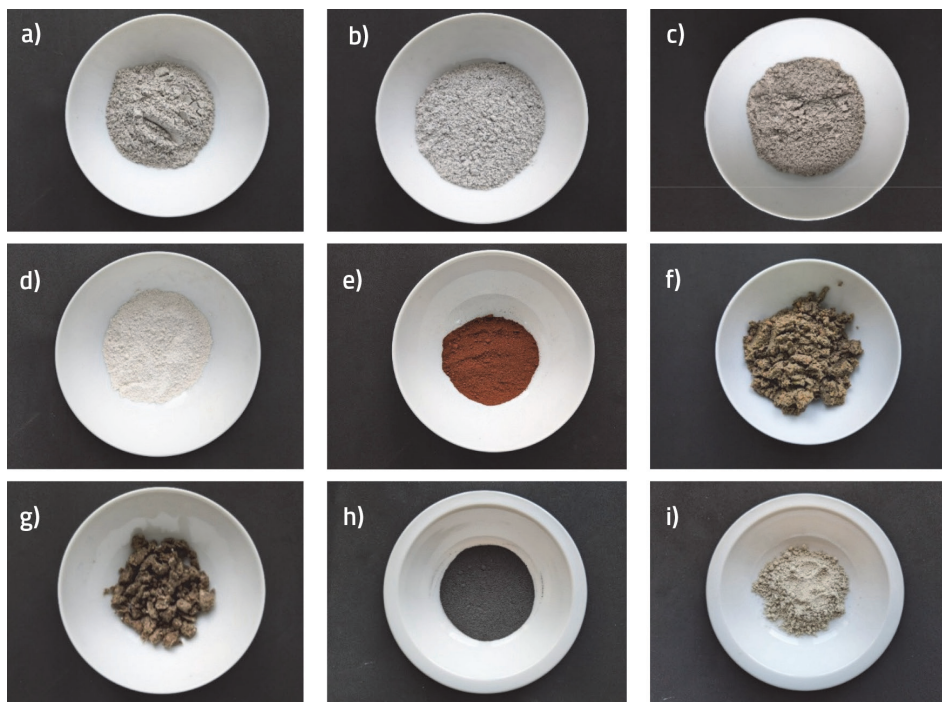


Figure 1. a) Biomass ash 1; b) Biomass ash 2; c) Biomass ash 3; d) Concrete powder; e) Red mud; f) Raw olive pomace; g) Raw paper sludge; h) Olive pomace ash; i) Paper sludge ash

2.1 X-ray fluorescence

Following initial sample preparation, the chemical composition of all seven materials was determined using XRF. The results, expressed as weight percentages of major oxides, are shown in Table 1. These values provide insight into the potential reactivity of each material towards CO_2 , particularly in terms of calcium and magnesium content, which are key for mineral carbonation.

Based solely on XRF results, it can be estimated that concrete powder (CP) and biomass ashes, particularly BA2, exhibit the highest potential for CO_2 sequestration via mineral carbonation. This is primarily due to their elevated CaO content - above 68% for all biomass ashes and over 85% for CP, which indicates a strong presence of reactive calcium phases. In contrast, red mud (RM), while rich in Fe_2O_3 and Al_2O_3 , contains relatively low levels of CaO (approx. 10%), suggesting limited reactivity with CO_2 through conventional carbonation pathways.

Table 1. Chemical composition of materials determined by XRF analysis

Material	Sample ID	Chemical composition [%]										
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
Biomass ash 1	BA1	68.62	10.46	3.08	1.95	4.02	4.33	0.420	4.87	0.260	0.463	1.06
Biomass ash 2	BA2	79.72	7.74	1.63	0.97	2.67	1.60	0.00	3.31	0.138	0.307	1.57
Biomass ash 3	BA3	67.95	11.15	2.81	1.62	3.14	2.31	0.78	6.42	0.198	0.97	1.42
Concrete powder	CP	85.70	7.56	1.67	1.10	1.95	0.07	0.10	0.29	0.12	0.01	1.56
Red mud	RM	9.96	21.95	16.94	37.88	0.61	0.47	7.23	0.18	4.13	0.43	0.24
Olive pomace ash	OPA	10.35	0.10	0.48	1.41	3.87	6.66	5.32	69.55	0.05	0.01	2.34
Paper sludge ash	PSA	48.50	24.40	14.40	2.19	3.47	0.50	0.10	0.58	1.21	0.01	4.80

Olive pomace ash (OPA) and paper sludge ash (PSA) display more complex compositions. OPA is characterized by a high potassium content ($K_2O > 69\%$), indicating potential for alternative reaction mechanisms, while PSA contains a moderately high CaO content (48.5%) and significant amounts of SiO₂ and Al₂O₃, which may influence both its carbonation behavior and reactivity.

It is important to note that while XRF provides insight into the total elemental composition, it does not distinguish between chemically bound and reactive (free) phases. For example, the high CaO content observed in the concrete powder (CP) may largely originate from limestone aggregates, where calcium is present in a stable mineral form (CaCO₃) and not readily available for carbonation. Therefore, to better assess the actual carbonation potential, complementary analysis such as X-ray diffraction (XRD) is needed to quantify the amount of free CaO and other reactive phases. This distinction is crucial, as only the unbound CaO and Ca(OH)₂ fractions can effectively participate in the mineral carbonation process.

3 Methods for mineral carbonation

In order to assess the CO₂ sequestration potential of SCMs, various mineral carbonation techniques have been developed. Among them, two approaches stand out due to their simplicity, scalability, and relevance for construction materials: dry (gas–solid) carbonation and wet (liquid–solid) carbonation coupled with mechanical activation.

This section presents two representative methodologies from the literature that can be used to evaluate the carbonation behavior of solid waste streams. Although these methods were not applied to the materials in this study, they are presented as useful examples for designing future experiments to evaluate and compare the CO₂ reactivity of waste-based SCMs.

3.1 Dry carbonation

Dry carbonation, also known as gas–solid carbonation, solid materials are exposed to elevated concentrations of CO₂ in a controlled environment. The method developed by Tominc and Ducman [11] provides a robust framework for assessing the sequestration capacity of combustion ashes under mild, accelerated conditions.

In this method, the ashes are first dried, homogenised and sieved (usually below 125 µm). The samples are then placed in trays inside a sealed carbonation chamber where they are exposed to a continuous stream of CO₂ flow with a concentration of 4 ± 0.1 vol% at a constant temperature (20 ± 1 °C) and varying relative humidity (typically 50–55% or 80–85%). The exposure lasts up to 28 days, with intermediate sampling at predefined intervals (e.g. 1, 7, 14, 21 and 28 days).

The extent of carbonation is quantified by thermogravimetric analysis (TGA), measuring the mass loss due to carbonate decomposition in the 550–950 °C range. The theoretical maximum CO₂ uptake is calculated using the Steinour equation [12], which estimates the stoichiometric CO₂ binding potential based on the oxide composition (in particular CaO, MgO, K₂O, Na₂O). The carbonation efficiency (CE) is then derived by comparing the experimental uptake with the theoretical maximum.

This method is particularly suitable for the evaluation of materials under realistic and low-energy conditions and has already been successfully applied to a variety of biomass and industrial ashes.

3.2 Wet carbonation

Wet carbonation, also known as liquid–solid carbonation, can be significantly accelerated by mechanical activation, i.e. simultaneous wet milling of the material under CO₂ pressure. The method, developed by De Schutter et al [13], shows how planetary ball milling can intensify the carbonation process, especially for hard-to-react residues such as steel slags.

In this technique, small amounts of the dry sample (1 g) are mixed with ultrapure water (typically 20 mL) and placed in a high-strength grinding jar with a gassing lid. The jar is filled with zirconia grinding media and placed in a planetary ball mill, which subjects the sample to rapid rotations. The jar is pressurized to 5 bar with

CO₂ and periodically re-pressurized during the experiment to ensure a consistent environment. The duration of the grinding ranges from seconds to several minutes, depending on the desired extent of the reaction.

Carbonation is driven by several simultaneous effects: reduction of particle size, break-up of crystalline structures, increase in surface area and improved CO₂ dissolution in the aqueous phase. The method enables rapid carbonation, in some cases achieving more than 50% of the theoretical CO₂ uptake in less than 10 minutes.

The extent of carbonation is determined by TGA and quantitative XRD. The method is particularly important for screening carbonation kinetics and can serve as a precursor for larger scale testing or product development.

4 Conclusion

This study underlines the potential of waste materials from the region for CO₂ sequestration through mineral carbonation. XRF analyses revealed that several materials, in particular biomass ashes and concrete powder, have a high CaO content and are therefore suitable candidates for carbonation processes. Two representative methods, dry and wet carbonation, were presented as useful reference frameworks for future testing. Although the experimental application of these methods to the selected materials is still pending, the chemical data and methodological overview provide a solid basis for further research focusing on the integration of carbon capture with the circular use of waste in construction materials.

Acknowledgement

Authors acknowledge support from the European Union through the Horizon Europe project "Active storage of captured CO₂ in net zero construction products – ASCCENT" (grant agreement no. 101159895) and the Erasmus+ project "Education for GREEN transformation of COnstruction sector – GREENCO" (grant agreement no. 101111694). The first author acknowledges the support of the "Young Researchers' Career Development Project – NPOO (C3 2 R2-I1)", funded by the Croatian Science Foundation.

Literature

- [1] United Nations Environment Programme: Global Status Report for Buildings and Construction, 2025.

- [2] IEA - Cement, <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>
- [3] K. Chen, J. Wang, B. Yu, H. Wu, and J. Zhang.: Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impact: A scientometric analysis, *Journal of Cleaner Production* 287 (2021) 125071.
- [4] GCCA, <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>
- [5] Xie, W. H., Li, H., Yang, M., He, L. N., and Li, h. R.: CO2 capture and utilization with solid waste, *Green Chemical Engineering* 3 (2022) 3, pp. 199-209.
- [6] Meylan, F. D., Moreau, V. and Erkman, S.: CO2 utilization in the perspective of industrial ecology, an overview, *Journal of CO2 Utilization* 12 (2015) pp. 101–108.
- [7] Li, L. and Wu, M.: An overview of utilizing CO2 for accelerated carbonation treatment in the concrete industry, *Journal of CO2 Utilization* 60 (2022) 102000.
- [8] Ashraf, W.: Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities, *Construction and Building Materials* 120 (2016) pp. 558-570.
- [9] Ekolu, S. O.: A review on effects of curing, sheltering, and CO2 concentration upon natural carbonation of concrete, *Construction and Building Materials* 127 (2016) pp. 306-320.
- [10] Lippiatt, N., Ling, T. C., and Pan, S. Y.: Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective, *Journal of Building Engineering* 28 (2020) 101062.
- [11] Tominc, S. and Ducman, V.: Methodology for Evaluating the CO2 Sequestration Capacity of Waste Ashes, *Materials* 16 (2023) 15, 5284.
- [12] Steinour, H. H.: Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete-discussion, *Journal of American Concrete Institute* 30 (1959) 2, pp. 905-907.
- [13] De Schutter, A., Ceyssens, L., Granata, G., and Van Gerven, T.: Improving the Carbonation of Steel Slags Through Concurrent Wet Milling, *Journal of Sustainable Metallurgy* 10 (2024) 3, pp. 1759–1773.

Pregled digitalnih alata za kružno graditeljstvo

Marina Džunić Matak¹, izv. prof. dr. sc. **Maja–Marija Nahod²**

¹marina.dzunic.matak@student.grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, maja.marija.nahod@grad.unizg.hr

Sažetak

Primjena principa kružne ekonomije u građevinskom sektoru predstavlja značajan potencijal. Digitalne tehnologije ključne su za tranziciju na kružno graditeljstvo. Ovaj rad istražuje zastupljenost komercijalnih digitalnih alata u znanstvenoj literaturi i daje kratki pregled digitalnih alata za praćenje principa kružne ekonomije u graditeljstvu. Izvršena je pretraga literature za 27 digitalnih alata u bazi "Web of science" i sastavljen je prikaz rezultata.

Ključne riječi: digitalni alati, kružno graditeljstvo, kružnost građevinskog sektora, pregled literature

Overview of the digital tools for circular construction

Abstract

The application of circular economy principles in the construction sector presents significant potential. Digital technologies are key to the transition toward circular construction. This paper explores the presence of commercial digital tools in scientific literature and provides a brief overview of digital tools for monitoring circular economy principles in construction. A literature review was conducted in the "Web of Science" database for 27 selected digital tools, and the results are presented

Key words: circular construction, circularity in construction sector, digital tools, literature review

1 Uvod

Kružna ekonomija označava sustav zatvorenih tokova dobara između dobave, korištenja i ponovne uporabe proizvoda [1], čime se napušta linearni model proizvodnje i otpada. Cilj je smanjiti potrebu za prirodnim resursima i emisije stakleničkih plinova [2]. Građevinski sektor ima ključnu ulogu u ovom prijelazu jer generira oko 25–35 % otpada i troši više od 50 % prirodnih resursa [3–6]. Iako su principi poput 3R (reduce, reuse, recycle) već prisutni u drugim sektorima, građevinarstvo se još uvijek dominantno oslanja na recikliranje [7]. Istraživanja pokazuju da uspješna implementacija kružnosti ne ovisi isključivo o tehnologiji, već o integraciji lanaca opskrbe, regulativi i troškovima [8, 9]. Literatura ističe potrebu za pouzdanim i strukturiranim podacima [10–12], a ključne prepreke su projektna orijentiranost, tržišni mehanizmi i složenost lanaca dobave [7, 13, 14]. Istovremeno se prepoznaje potreba za novim poslovnim modelima i digitalnim alatima [7, 15–18]. Praćenje kružnosti često se temelji na alatima za LCA ("Life cycle analysis") i indikatorima kao što su MCI ("Material Circularity Indicator") i CI ("Circularity Index"), iako još uvijek postoji jaz između analize kružnosti i analize cijelog opskrbnog lanca [19].

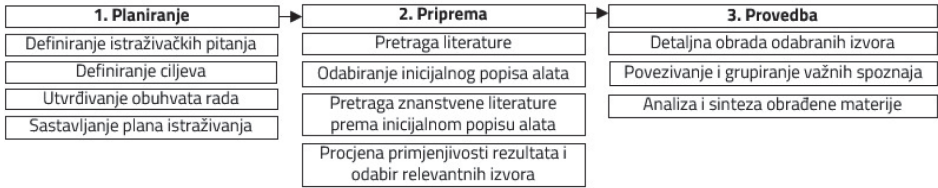
S obzirom na važnost digitalnih tehnologija za provedbu kružne ekonomije u građevinarstvu, ovaj rad ispituje prisutnost komercijalnih digitalnih alata u znanstvenoj literaturi. Također se daje pregled alata koji podržavaju praćenje principa kružnosti, s fokusom na održivost, LCA i ugljične kalkulatore.

Ciljevi ovog rada su: 1) ispitati pokrivenost tematskog područja digitalnih tehnologija za kružno graditeljstvo u znanstvenoj literaturi; 2) pružiti pregled dostupnih digitalnih alata za praćenje kružnosti u građevinskom sektoru.

Istraživačka pitanja oko kojih je razvijen ovaj rad su: IS1: Postoji li znanstvena literatura koja pruža pregled i podatke o digitalnim alatima za praćenje kružnosti u građevinskom sektoru?; IS2: Koji komercijalni digitalni alati su zastupljeni u znanstvenoj literaturi? Odgovori na istraživačka pitanja istraženi su kroz pregled stanja znanstvenog područja, pružanjem pregleda digitalnih alata zastupljenih u znanstvenoj literaturi.

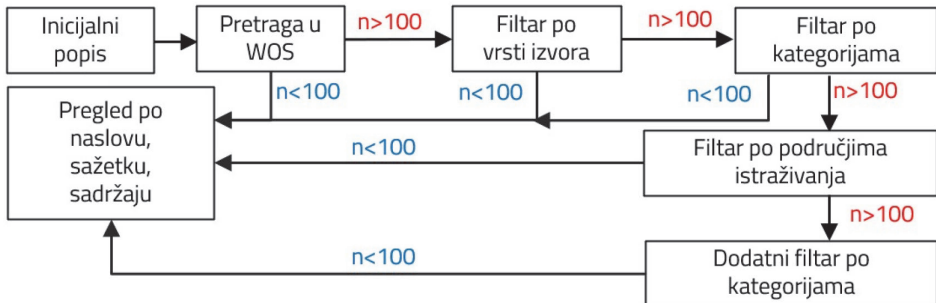
2 Metodologija

U inicijalnoj fazi rada sastavljen je plan istraživanja, prikazan na slici 1. koji se sastoji od 3 faze: Planiranje, Priprema i Provedba.



Slika 1. Pregled plana istraživanja, izrada autora prema primjerima iz literature [10, 20]

U fazi 1. Planiranje, definirana su istraživačka pitanja i ciljevi, određena je tema i usmjerenost na digitalne alate u kružnom graditeljstvu čime je utvrđen obuhvat rada, i sastavljen je plan istraživanja. U fazi 2. Priprema, učinjena je preliminarna pretraga literature, na temelju čega je sastavljen inicijalni popis od 27 digitalnih alata. Inicijalni popis je uključio digitalne alate koji se mogu primijeniti za potrebe praćenja određenih principa kružnosti u građevinskom sektoru. Za potrebe ovog rada za inicijalni popis su odabrani digitalni alati proizašli iz praćenja održivosti, LCA alati i softveri i kalkulatori utjecaja na klimu ili okoliš, od kojih poglavito kalkulatori ugrađenog CO₂. Isključeni su okviri, strategije, baze podataka i katalozi, koji nisu implementirani u obliku softvera ili aplikacija. Na temelju inicijalnog popisa izvršena je pretraga znanstvene literature u bazi "Web of science core collection" (dalje u tekstu WOS). Radi obuhvata rada istraživanje je ograničeno na ovu bazu, koja pruža uvid u relevantnu znanstvenu literaturu. Pretraživanje je provedeno u svibnju 2025. godine te su rezultati posljednji put ažurirani 11. svibnja 2025. godine. Pretraga je uključila znanstvene članke, zbornike radova s konferencija i pregledne članke na engleskom jeziku. Slika 2. prikazuje tijek i korake u fazi pretraživanja.



Slika 2. Tijek i koraci faze pretraživanja baze WOS, izrada autora

Nakon inicijalnog unosa naziva alata, u slučaju broja rezultata <100, pristupilo se pregledu usklađenosti izvora s temom. U slučaju rezultata > 100, pretraga je filtrirana primjenom kategorija: "Architecture", "Construction & Building Techno-

logy", "Engineering, Civil", "Engineering, Environmental", "Engineering, Multidisciplinary", "Environmental Studies", "Environmental Sciences", "Green Sustainable Science Technology". Slijedeće filtriranje izvršeno je prema području istraživanja (izvorno: "research areas"): "Architecture", "Business Economics", "Construction Building Technology" i "Engineering". Ove kategorije i područja istraživanja su odabrani jer su za najviše alata pokazivale najveću zastupljenost izvora te u konačnici pružale rezultate povezuje sa zadanim alatom. Ukoliko je broj rezultata nakon ovih koraka i dalje veći od 100, pretraga se dodatno ograničila samo na kategorije: "Architecture", "Construction Building Technology" i "Engineering, Civil", jer su te kategorije relevantne za područje ovog rada. U zadnjem koraku faze 2. Priprema, izvršena je procjena primjenjivosti rezultata i odabir relevantnih izvora na temelju usklađenosti s temom. U fazi 3. Provedba, izvršena je detaljna obrada odabranih izvora. Odabrani znanstveni izvori su povezani uz stavke inicijalnog popisa digitalnih alata te je izvršena, analiza. U završnom koraku je učinjena sinteza i opis rezultata istraživanja.

Istraživanje je izvršeno uz određena ograničenja. Zbog ograničenja obuhvata i duljine rada, istraživanje se usmjerilo na identificirane komercijalne digitalne alate, iako je prepoznato da certifikacijske sheme zelene gradnje i razni drugi standardi održivosti također omogućavaju praćenje kružnosti u građevinskom sektoru [21]. Oni se ne mogu okarakterizirati kao digitalni alati u smislu softvera ili aplikacija, no neke njihove funkcionalnosti omogućuju digitalnu analizu pojedinih aspekata kružnosti. Primjerice, WELL koji je u potpunosti digitaliziran standard zelene gradnje [22]. Kompleksnost i funkcionalnosti BIM-a nadilaze principe kružnosti i obuhvat ovog rada te se ovdje ne obrađuju. Iz istraživanja su isključene materijalne putovnice, iako su se prema znanstvenoj literaturi prometnule kao ključni alati za integriranje kružnosti u građevinskom sektoru [23]. Po pitanju terminologije postoji cijeli niz inačica kao što su primjerice "building passport" [24] "building renovation passport" [25] ili "cradle-to-cradle passport" [26]. U znanstvenoj literaturi dostupne su evaluacije materijalnih putovnica [23, 27], koje zaključuju da materijalne putovnice još uvijek nisu realizirane kao dinamični digitalni alati [23] i da u njima još uvijek nedostaje standardizirani univerzalni pristup po pitanju kružnosti [27].

3 Rezultati

Rezultati su prikazani tablično i prezentirani u nastavku (Tablica 1.). Sa "*" su označeni rezultati za koje je bilo potrebno izvršiti filtriranja i dovesti rezultat do onog primjenjivog na alat. Za alate označene s "***" metodologija nije bila primjenjiva, jer nakon primjene opisanog postupka nije davala relevantne rezultate povezuje s traženim alatom. U nastavku je izložena diskusija s prikazom postupka za konkretne primjere i dana su pojašnjenja dobivenih rezultata.

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora

	Alat i autori	Kratki opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
1	DuboCalc Rijkswaterstaat, Nizozemska	Punog naziva "Duurzaam Bouwen Calculator", u prijevodu s nizozemskog: kalkulator održive gradnje. Softver obavezan za sve velike postupke javnih nabava, posebno u sektoru cestovne i vodne infrastrukture. Na temelju svih okolišnih utjecaja izračunava "Environmental Cost Indicator" (ECI), koji se oduzima od cijene ponude [28].	2	članak
2	Eco2soft baubook GmbH, Austrija	Online alat za izradu LCA analiza zgrada, uključujući troškove izgradnje, obnove i zbrinjavanja. Široko korišten u Austriji radi kompatibilnosti s nacionalnim certifikatima. Pruža "Oekoindex OI3" za ocjenu ekološke kvalitete i pregled zgrade u cjelini ili samo ovojnice [29].	3	članak
3	Klimatkalkyl Trafikverket, Švedska	Alat za izračun klimatskog utjecaja i potrošnje energije za određeni projekt, proizvod ili mjeru [30], [31].	1	zbornik
4	eLCA* BBSR institut, Njemačka	Online LCA alat primjenjuje se na procjenu utjecaja na okoliš cijelog životnog ciklusa građevine u skladu s njemačkim normama i BNB sustavom [32].	1*	članak
5	LCAbyg SBI, Aalborg University, Danska	Implementacija DGNB certifikata u Danskoj utjecala je na razvoj ovog alata. Alat podržava stadij proizvoda, module za zamjene, potrošnju energije, otpad i odlaganje. U skladu s europskim normama [33].	7	zbornik (4), članak (3)
6	TOTEM* OVAM, Brussels Environment i Public Service of Wallonia, Belgija	Punog naziva "Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials". Alat za procjenu utjecaja građevinskih komponenti na okoliš. Koristi tzv. MMG LCA metodu po kojoj ispituje 17 okolišnih utjecaja [34].	5*	zbornik (1*), članak (4*)
7	National Circularity Assessment Framework UNOPS Strategic Initiatives team i One planet network, UN	Okvir za procjenu kružnosti u građevinskom sektoru na strateškoj političkoj razini. Kvantitativne i kvalitativni pokazatelji u formi excel tablice. Namjena mu je za praćenje implementacije politika kružnosti u građevinski sektor u cjelini, na državnoj razini [35].	0	0

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora - nastavak

	Alat i autori	Kratki opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
8	CoCircular 360° Advisor Saas CoCircular, Španjolska	Softver za digitalno i optimizirano upravljanje građevinskim otpadom, temeljen na AI [36].	0	0
9	Athena Impact Estimator Athena Sustainable Materials Institute, Kanada	Softver za procjenu utjecaja na klimu i okoliš tijekom cijelog životnog ciklusa zgrada, fokusiran na sjevernoameričke standard [37].	30	zbornik (3), članak (27)
10	Beacon** Thornton Tomasetti, Inc., SAD	Revit "plug-in" alat za mjerenje ugrađenog CO ₂ u građevinskim projektima prilikom projektiranja. Kategorizira kalkulacije po tipu materijala, građevinskoj komponenti i po razini kata [38].	0**	0**
11	HVB:ERT (unos: puni naziv) Hawkins Brown Architecture Ltd., UK UCL Institute for Environmental Design and Engineering, UK	U punom nazivu "Hawkins Brown Emission Reduction Tool", Online alat i Revit "plug-in". Nadogradnje i manualne korekcije Revita kako bi se omogućilo izvještavanje i vizualizaciju ugrađenog CO ₂ . Pregled podataka u online platformi, koja je omogućila jednostavnu vizualizaciju i usporedivost rezultata [39].	1	članak
12	One Click LCA* Bionova Ltd., Finska	Sveobuhvatan alat za LCA analize u građevinskoj industriji, kompatibilan s Revitom. Omogućuje analizu kružnosti kroz "Building Circularity tool". Kompatibilan s certifikacijskim sustavima LEED, BREEAM i Level(s) [40].	49*	zbornik (10*), članak (39*)
13	Tally KieranTimberlake Associates LLP, SAD	Revit dodatak za procjenu više kategorija okolišnih utjecaja tijekom životnog ciklusa materijala u građevinskim projektima [41],[42]. Usklađen s ISO 140400-14044.	15	članak (15)
14	Build Carbon Neutral** Mithun, Inc., SAD	Online kalkulator za procjenu ugrađenog CO ₂ u građevinskim projektima, primarno osmišljen za manje arhitektonske biroe i stručnjake koji nemaju resurse za razvoj sveobuhvatnih LCA [43].	0**	0**
15	EPIC** EHDD Architecture, Inc., SAD	U punom nazivu "Early Phase Integrated Carbon Assessment" je alat za analizu ugrađenog CO ₂ tijekom cijelog životnog ciklusa. Razvijen za podršku ranoj fazi planiranja kada je razina podataka niska i potencijal smanjenja emisija visok [44].	0**	0**

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora - nastavak

	Alat i autori	Kratak opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
16	Kaleidoscope** Payette Associates, Inc., SAD	Alat koji pruža dodatne informacije o ugrađenom CO ₂ , dok se LCA provodi u alatu Tally. Služi za usporedbu građevinskih sustava tijekom ranih faza dizajna, kroz više tzv. "leća" (različiti scenariji za izračun ugrađenog ugljika) [45].	0**	0**
17	EC3** Building Transparency, SAD	U punom nazivu "Embodied Carbon in Construction Calculator". Alat za benchmarking i smanjenje ugrađenog CO ₂ u građevinskim projektima. Koristi bazu podataka iz okolišnih deklaracija proizvoda (Environmental product declarations-EPD), koja omogućuju usporedivost materijala [46].	0**	0**
18	Pathfinder** Climate Positive Design, Inc., SAD	Online alat razvijen za krajobraznu arhitekturu i podršku mjerenju emisija CO ₂ u izgrađenom okolišu. Računa koliko se CO ₂ oslobađa korištenjem materijala, gradnjom, održavanjem i transportom i, obrnuto, koliko se smanjuje zelenom infrastrukturom [47].	1**	članak (1**)
19	UpStream Forestry & LCA Tool** ZGF Architects LLP i University of Washington, SAD	Alat za procjenu utjecaja na okoliš u šumarstvu i drvenih materijala u građevinskim projektima [48].	0**	0**
20	Climate&Circularity Calculator** Ihobe, Španjolska	Alat za procjenu klimatskog utjecaja i kružnosti, usmjeren na organizacije. Koristi pokazatelje kružnosti prema metodologiji "Circular Transition Indicators 3.0", koja je kompatibilna s budućom normom ISO 59020 [49].	0**	0**
21	GaBi* drugi naziv: Sphera "LCA for Experts" (rezultati za drugi naziv označeni s +) Sphera Solutions, Inc., SAD	Naziv potječe od 'Ganzheitliche Bilanzierung'. Osnovni autor je tvrtka PE International GmbH iz Njemačke (1992.), a danas ga razvija i održava Sphera Solutions, Inc. Sveobuhvatni profesionalni alat za LCA koji nudi i GaBi Circularity Toolkit za analizu kružnosti građevinskih projekata, implementacijom "Material Circularity Indicator"(MCI) [19].	27+5*	zbornik (3*), članak (24+5*)

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora - nastavak

	Alat i autori	Kratak opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
22	OpenLCA GreenDelta GmbH, Njemačka	Sveobuhvatni alat za izradu LCA koji omogućuje i analizu kružnosti kroz izračune indeksa kružnosti kao što su "Material Circularity Indicator" (MCI) i "Circularity Index" (CI) [19].	24	zbornik (5), članak (19)
23	SimaPro PRé Sustainability B.V., Nizozemska	Profesionalni LCA softver. Modelira životni ciklus proizvoda ili procesa definiranjem životnih faza i daje podatke o individualnim okolišnim aspektima, potrošnji sirovih materijala, štetnosti procesa i emisija tijekom životnog ciklusa [50]. Omogućuje izračun MCI, ali nije moguće pratiti sve faze životnog ciklusa [19].	120	zbornik (22), članak (98)
24	Circular Buildings Toolkit ARUP Group Ltd, UK	Priručnik i alati za integraciju principa kružnosti u dizajn zgrada [51].	0**	0**
25	EIME LCIE Bureau Veritas, CODDE, Francuska	EIME (Environmental Improvement Made Easy) je softver za LCA i eko-dizajn, razvijen od strane odjela CODDE unutar LCIE Bureau Veritas. Ovaj alat omogućava kvantificiranje utjecaja proizvoda i usluga na okoliš tijekom cijelog njihovog životnog ciklusa, te identifikaciju putova materijala za postizanje eko-dizajna [52].	1**	zbornik**
26	Brightway2 Mutel, C.; Hellweg, S.; ETH Zurich	Open-source softver za LCA analize napisan u programskom jeziku Python. Omogućuje analizu dobara ili usluga [53], [54].	17	zbornik (1), članak (16)
27	CO₂ Performance Ladder SKAO, Nizozemska	Sustav certificiranja za upravljanje energijom i praćenje emisija CO ₂ koji se koristi kao alat za zelenu javnu nabavu u Nizozemskoj [55].	2	članak (2)

Za alate označene s jednom zvjezdicom ("*") primjerice *eLCA*, osnovni unos "*eLCA*" daje ukupno 493 rezultata koji otkrivaju da se akronim "*ELCA*" koristi za širok spektar pojmova u raznim sferama znanosti. Odabirom prethodno određenih vrsta izvora, rezultat je smanjen na 439. Primjenom kategorija, pretraga je svedena na 56 izvora. Prema područjima istraživanja dobiveno je ukupno 34 rezultata. Na temelju pregleda naslova, sažetaka i sadržaja izvora ustanovljeno je da se niti jedan od navedenih izvora ne odnosi na alat *eLCA* već autori taj akronim koriste za pojmove poput "*environmental LCA*", "*exergy*" ili "*exergetic*" *LCA*. Tek unosom pojma "*eLCA software*" dobiven je 1 članak koji se zaista odnosi na navedeni alat, od ukupno 9 koji su dobiveni pretragom po tom pojmu. Za alat *TOTEM* osnovna pretraga dala je ukupno 2048 izvora, od kojih 1736 traženih vrsta te se nakon opisanog postupka ustanovilo da samo 5 izvora odgovara traženom alatu. Za softver *Tally* inicijalna pretraga je davala 6753 rezultata. Tu je primijenjen međukorak gdje su isključena imena autora čime je broj sveden na 6198, od čega su 5867 tražene vrste izvora. Nakon primjene filtriranja prema kategorijama, područjima istraživanja i dodatnog ograničenja kategorija, kako je opisano metodologijom, dobiveno je ukupno 74 rezultata od kojih se 15 odnosilo na traženi digitalni alat *Tally*. Predlaže se radije započeti pretragom unosom "*Tally LCA*", što u inicijalnom koraku daje 31 rezultat. *GaBi* (u znanstvenoj literaturi također pod nazivom *Sphera LCA for Experts* [56]) je pretragom u bazi WOS inicijalno rezultirao s 6859 izvora, isključenjem autora "*Gabi*" sa 6712, te primjenom opisanih metoda rezultirao s ukupno 27 primjenjiva izvora. Dodatnih 5 izvora pronađeno je pretragom prema drugome nazivu "*Sphera LCA for Experts*". Za alat *One Click LCA* izvršena je pretraga za unose "*One Click LCA*", "*OneClick LCA*" i "*OneClickLCA*", kako bi se izbjegle ortografske pogreške te je od inicijalnih 46 izvora ustanovljeno da se 41 odnosi na traženi alat, te je nakon dodatnih unosa ukupan broj rezultata uvećan za 7 u prvoj iteraciji te dodatan 1 izvor u posljednjoj iteraciji.

Za alate označene s dvije zvjezdice ("**") metodologija nije primjenjiva. Na primjeru alata *Beacon*, inicijalni rezultat od 27035 izvora je nakon primjene opisanog postupka sveden na 358 izvora, te od tih izvora niti jedan nije moguće povezati s traženim alatom. Unos pretrage je iteriran u 4 dodatna navrata kako bi se bolje povezao s traženim alatom ("*Beacon tool for Revit LCA*", "*Beacon tool for Revit*", "*Beacon Revit*", "*Beacon LCA*", "*Beacon Thornton*") te je u tim slučajevima pretraga davala 0 rezultata ili rezultate koji se nisu mogli povezati sa zadanim alatom. Isto se odnosi na ostale manje poznate komercijalne alate čiji nazivi nisu jednoznačno određujući i daju velik broj nepovezanih rezultata u inicijalnoj pretrazi: za *Build Carbon Neutral* (2418), *EPIC* (35063), *Kaleidoscope* (2546), *EC3* (1521), *UpStream Forestry & LCA Tool* (202332). Stoga je potrebno u osnovnu pretragu unijeti dodatne opisne riječi kao npr. "*LCA*", "*tool*", "*software*", "*calculator*" ili kombinaciju navedenog ili puno ime alata ili ime autora. U svim iteracijama, za sve navedene

alate, rezultati u konačnici nisu bili povezivi sa zadanim traženim alatom, osim u slučaju alata *Pathfinder*, gdje je detektiran 1 izvor. Posebnost je *Climate&Circularity Calculator*, organizacije Ilobe iz Španjolske, koji je za bilo koju iteraciju unosa davao 0 rezultata. Zaključuje se da u tim slučajevima metodologija nije primjenjiva. Prilikom pretrage znanstvene literature zabilježeni su dodatni alati koji nisu bili navedeni na inicijalnom popisu. To su: *Precinct Carbon Assessment (PCA) Tool* [47], *Elodie* [57], *SimulEIcon* [58], *DOE-2 eQUEST*, *IESVE Revit Plug-in* i Autodeskov *Green Building Studio* [59], *SIDAC* [60], *EnergyPlus* [61, 62], *Umberto* [63-65], *System Advisor Model (SAM)* i *Thermoflex + PEACE* [65], *Sustainable Minds* [50], *BEES* [66, 67], *BRE*, *Analytica*, *Pre*, *TEAM*, *GB Tool*, *Woolley*, *Curwell*, *March* [66], *Ansys Granta EduPack* (prethodno *CES EduPack*) i *SolidWorks Sustainability* [68]. Ispostavilo se da su brojni alati razvijeni za potrebe izgradnje i upravljanja cestama kao *VegLCA* [69], *ZEROInfra* i *FuelSave* [31], te alati za prometnu infrastrukturu kao što su: *ROAD-RES*, *PaLATE Version 2.2*, *ROADEO*, *PE-2*, *ECORCE-M*, *CO₂NSTRUCT* i *Virginia Tech Transportation Institute—University of California asphalt pavement LCA model* [28].

4 Zaključak

Na temelju provedenog istraživanja zaključeno je kako znanstvena literatura pruža informacije o digitalnim alatima za potrebe praćenja kružnosti u slučaju 7 najpoznatijih softvera, dominantno usmjerenih na LCA: *SimaPro*, *One Click LCA*, *GaBi*, *Athena Impact Estimator*, *OpenLCA*, *Brightway2* i *Tally*. Za ukupno 17 od promatranih 27 alata znanstvena literatura daje 5 ili manje relevantnih izvora, dok za 10 alata znanstvena literatura ne pruža niti jedan znanstveni izvor. Komercijalni alati koje razvijaju konzultantske ili projektantske tvrtke nisu znanstveno recenzirani. Rad je ispitao pokrivenost tematskog područja digitalnih tehnologija za kružno graditeljstvo u znanstvenoj literaturi i pružio pregled odabranih dostupnih digitalnih alata za praćenje kružnosti u građevinskom sektoru, čime je ostvario zadane ciljeve. Ograničenja istraživanja su radi razumijevanja rezultata predstavljena u poglavlju "2 Metodologija". Metodologija je pokazala slabosti u 10 slučajeva, gdje se pokazalo da nije primjenjiva i predloženi su načini dorade. Za daljnja istraživanja predlaže se provesti sistematični pregled literature, prema PRISMA metodi te uključiti bazu "Scopus" u istraživanje. Rezultati ovog istraživanja pružaju informaciju o postajanju i jednostavan pregled osnovnih funkcionalnosti digitalnih alata, što je korisno za stručnjake u građevinskom sektoru, te zbog toga što pružaju pregled praznine u znanstvenim istraživanjima, kao informacija za znanstvenu zajednicu. Osim toga, rad pomaže u promicanju osviještenosti o principima kružne ekonomije i popularizaciji istih u građevinskom sektoru.

Literatura

- [1] Ellen MacArthur Foundation, www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview
- [2] Iyer-Raniga, U.: Using the ReSOLVE framework for circularity in the building and construction industry in emerging markets, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Tokyo, 2019.
- [3] Europska komisija: Komunikacija Komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija - Novi akcijski plan za kružno gospodarstvo - Za čišću i konkurentniju Europu, COM/2020/98 final, eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098#footnote37
- [4] Ness, D.A. i Xing, K.: Toward a Resource-Efficient Built Environment: A Literature Review and Conceptual Model, *Journal of Industrial Ecology*, 21 (2017) 3, pp. 572–592.
- [5] Tukker, A., Behrens, P., Deetman, S., Hu, M., Migoni Alejandre, E., van der Meide, M., Zhong, X., Zhang, C.: Circular construction: Six key recommendations, *One Earth*, 6 (2023) 11, pp. 1425–1429.
- [6] Benachio, G.L.F., Freitas, M. do C.D., i Tavares, S.F.: Circular economy in the construction industry: A systematic literature review, *Journal of Cleaner Production*, 260 (2020).
- [7] Metinal, Y.B. i Gumusburun Ayalp, G.: Uncovering Barriers to Circular Construction: A Global Scientometric Review and Future Research Agenda, *Sustainability* 2025, 17 (2025) 4, pp. 1381.
- [8] Antunes, M., Santos, R.L., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R.B., i Colaço, R.: Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review, *Materials* 2022, 15 (2021) 1, pp. 209.
- [9] Del Serrone, G. i Moretti, L.: A stepwise regression to identify relevant variables affecting the environmental impacts of clinker production, *Journal of Cleaner Production*, 398 (2023), pp. 136564.
- [10] Bellini, A., Tadayon, A., Andersen, B., i Klungseth, N.J., :The role of data when implementing circular strategies in the built environment: A literature review, *Cleaner Environmental Systems*, 13 (2024), pp. 100183.
- [11] Davari, S., Jaber, M., Yousfi, A., i Poirier, E.: A Traceability Framework to Enable Circularity in the Built Environment, *Sustainability (Switzerland)*, 15 (2023) 10, pp.8278.
- [12] Çetin, S., Gruis, V., i Straub, A.: Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations, *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15 (2022), pp. 200110.

- [13] Winkler, H.: Closed-loop production systems-A sustainable supply chain approach, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4 (2011) 3, pp. 243–246.
- [14] Nasir, M.H.A., Genovese, A., Acquaye, A.A., Koh, S.C.L., i Yamoah, F.: Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry, *International Journal of Production Economics*, 183 (2017), pp. 443–457.
- [15] Kovacic, I., Honic, M., i Sreckovic, M.: Digital platform for circular economy in aec industry, *Engineering Project Organization Journal*, 9 (2020), pp. 1–16.
- [16] Četin, S., De Wolf, C., i Bocken, N.: Circular digital built environment: An emerging framework, *Sustainability (Switzerland)*, 13 (2021) 11, pp. 6348.
- [17] Setaki, F. i van Timmeren, A.: Disruptive technologies for a circular building industry, *Building and Environment*, 223 (2022), pp. 109394.
- [18] Yu, Y., Yazan, D.M., van den Berg, M., Firdausy, D.R., Junjan, V., i Iacob, M.E.: Circularity information platform for the built environment, *Automation in Construction*, 152 (2023), pp. 104933.
- [19] Cilleruelo Palomero, J., Freboeuf, L., Ciroth, A., i Sonnemann, G.: Integrating circularity into Life Cycle Assessment: Circularity with a life cycle perspective, *Cleaner Environmental Systems*, 12 (2024), pp. 100175.
- [20] Saunders, M., Lewis, P., i Thornhill, A.: *Research Methods for Business Students*, 9th Edition. Harlow, United Kingdom: PEARSON EDUCATION LIMITED, 2023.
- [21] Wong, D.H., Zhang, C., Di Maio, F., i Hu, M.: Potential of BREEAM-C to support building circularity assessment: Insights from case study and expert interview, *Journal of Cleaner Production*, 442 (2024), pp. 140836.
- [22] International WELL Building Institute (IWBI), :Standard | WELL V2., <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/overview>
- [23] Markou, I., Sinnott, D., i Thomas, K.: Current methodologies of creating material passports: A systematic literature review, *Case Studies in Construction Materials*, 22 (2025), pp. e04267.
- [24] Dos Santos Gonçalves, J., Mateus, R., Dinis Silvestre, J., Pereira Roders, A., i Bragança, L.: Building passport for the sustainable conservation of built heritage, *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 15 (2022) 2, pp. 168–180.
- [25] Sesana, M.M. i Salvalai, G.: A review on Building Renovation Passport: Potentialities and barriers on current initiatives, *Energy and Buildings*, 173 (2018) 9, pp. 195–205.
- [26] Cojocar, C.R.: Costs, Time, Reliability, Warehousing and Information Technology-source of Contradicting Requirements in Green Logistics, *Metalurgia International*, 17 (2012) 3, pp. 215–219.

- [27] Mao, S. i Cao, W.J.: Evaluating material passports for circularity in the construction industry, *Sustainable Production and Consumption*, 54 (2025), pp. 88–101.
- [28] Dos Santos, J.M.O., Thyagarajan, S., Keijzer, E., Flores, R.F., i Flintsch, G.: Comparison of life-cycle assessment tools for road pavement infrastructure, *Transportation Research Record*, 2646 (2017) 1, pp. 28–38.
- [29] Hafez, H., Kurda, R., Al-Ayish, N., Garcia-Segura, T., Cheung, W.M., i Nagaratnam, B.: A whole life cycle performance-based ECONomic and ECOlogical assessment framework (ECO2) for concrete sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 292 (2021), pp. 126060.
- [30] Toller, S.: Klimatkalkyl-Calculating greenhouse gas emissions and energy use of transport infrastructure from a life cycle perspective, 2018., https://bransch.trafikverket.se/contentassets/eb8e472550374d7b91a4032918687069/klimatkalky_report_v_5_0_and_6.0_english.pdf
- [31] Gebre, T.D., Wang, D., Eklöf, N., i Cannone Falchetto, A.: Evaluation of LCA Tools for Road Construction and Operation Purposes: A Case Study in Nordic Europe, *RILEM Bookseries*, 51 (2024), pp. 198–205.
- [32] Grajcar, M., Rumiantceva, K., i Weidlich, I.: On the Imaginary Accuracy of the LCA on the Basis of the Houseboat in Hamburg (Holistic Approach), *Environmental and Climate Technologies*, 23 (2019) 2, pp. 222–237.
- [33] Kanafani, K., Zimmermann, R.K., Rasmussen, F.N., i Birgisdóttir, H.: Learnings from developing a context-specific LCA tool for buildings—the case of Icabyg 4, *Sustainability (Switzerland)*, 13 (2021) 3, pp. 1–23.
- [34] Ramon, D., Allacker, K., Trigaux, D., Wouters, H., i van Lipzig, N.P.M.: Dynamic modelling of operational energy use in a building LCA: A case study of a Belgian office building, *Energy and Buildings*, 278 (2023), pp. 112634.
- [35] UNOPS; UNEP and UN-Habitat, *National Circularity Assessment Framework*. Copenhagen, Denmark, 2024. <https://drive.google.com/file/d/1OeMsDH5mUXLuisAhdSQR5yhnl8rtDmxx/view>
- [36] CoCircular 360 Advisor Saas, <https://cocircular.es/en/saas-360-advisor/>
- [37] Inyim, P., Zhu, Y., i Orabi, W.: Analysis of Time, Cost, and Environmental Impact Relationships at the Building-Material Level, *Journal of Management in Engineering*, 32 (2016) 4, pp. 04016005.
- [38]: Beacon, www.thorntontomasetti.com/capability/beacon
- [39] Bowles, L., Attwood-Harris, J., Khan-Fitzgerald, R., Robinson, B., i Schwartz, Y.: The Hawkins\Brown emission reduction tool, *The Journal of Architecture*, 26 (2021) 1, pp. 32–51.

- [40] Dragonetti, L., Papadaki, D., Mazzoli, C., Monacelli, A., Assimakopoulos, M.N., i Ferrante, A.: Circular deep renovation versus demolition with reconstruction: Environmental and financial evaluation to support decision making in the construction sector, *Energy and Buildings*, 336 (2025), pp. 115610.
- [41] Tushar, Q., Zhang, G., Bhuiyan, M.A., Navaratnam, S., Giustozzi, F., i Hou, L.: Retrofit of Building Façade Using Precast Sandwich Panel: An Integrated Thermal and Environmental Assessment on BIM-Based LCA, *Buildings*, 12 (2022) 12, pp. 2098.
- [42] Zahabi, N., Gu, H., Gong, M., i Blackadar, J., :A Comparative Whole-Building Life Cycle Assessment of the Four Framing Systems of the Bakers Place Building Using the Tally LCA Tool, *Buildings* 2025, 15 (2025) 7, pp. 1192.
- [43] Build Carbon Neutral 2.0 - Mithun, www.mithun.com/r-d-project/build-carbon-neutral-2/
- [44] EPIC | EHDD Architecture, www.ehdd.com/philosophy/epic/
- [45] Kaleidoscope: Embodied Carbon Design Tool - Payette, www.payette.com/kaleidoscope/
- [46] EC3 - Building Transparency, www.buildingtransparency.org/tools/ec3/
- [47] Nikologianni, A., Plowman, T., i Brown, B.: A Review of Embodied Carbon in Landscape Architecture. Practice and Policy, *C-Journal of Carbon Research*, 8 (2022) 2, pp. c8020022.
- [48] UpStream Documentation, <https://github.com/UpStream-LCA/Upstream-Forestry-Carbon-LCA>
- [49] Climate&Circularity Calculator, www.ihobe.eus/climate-circularity-3
- [50] Grajewski, D., Dudkowiak, A., Wiśniewski, M., i Dostatni, E.: Analysis of Selected IT Tools for Environmental Product Assessment, *Applied Sciences* 2024, 14 (2024) 24, pp.12002.
- [51] ARUP - Circular Buildings Toolkit, <https://ce-toolkit.dhub.arup.com/>
- [52] LCIE Bureau Veritas - LCA EIME software, www.lcie.fr/en/our-services/ecoconception/
- [53] Brightway LCA Software Framework — Brightway documentation, <https://docs.brightway.dev/en/latest/>
- [54] Alaux, N., Schwark, B., Hörmann, M., Ruschi Mendes Saade, M., Passer, A.: Assessing the prospective environmental impacts and circularity potentials of building stocks: An open-source model from Austria (PULSE-AT), *Journal of Industrial Ecology*, 28 (2024) 6, pp. 1435–1448.

- [55] Rietbergen, M.G., Van Rheede, A., i Blok, K.: The target-setting process in the CO₂ Performance Ladder: does it lead to ambitious goals for carbon dioxide emission reduction?, *Journal of Cleaner Production*, 103 (2015), pp. 549–561.
- [56] Sečkář, M., Schwarz, M., Pochyba, A., i Polgár, A.: A Comparative Analysis of the Environmental Impacts of Wood–Aluminum Window Production in Two Life Cycle Assessment Software, *Sustainability (Switzerland)*, 16 (2024) 21, pp. 9581.
- [57] Van Gulck, L. i Steeman, M.: The environmental impact of circular building design: A simplified approach to evaluate remountable building elements in life cycle assessment, *Building and Environment*, 254 (2024), pp. 111418.
- [58] Inyim, P., Rivera, J., i Zhu, Y.: Integration of Building Information Modeling and Economic and Environmental Impact Analysis to Support Sustainable Building Design, *Journal of Management in Engineering*, 31 (2014) 1, pp 1–10.
- [59] Mostafavi, N., Farzinmoghadam, M., i Hoque, S.: Envelope retrofit analysis using eQUEST, IESVE Revit Plug-in and Green Building Studio: a university dormitory case study, *International Journal of Sustainable Energy*, 34 (2015) 9, pp. 594–613.
- [60] Pereira de Souza, L., Melo, A.P., Triana, M.A., i Lamberts, R.: Thermal resilience and life cycle assessment of social housing: a discussion about limitations in Brazil, *Architectural Engineering and Design Management*, (2025) pp-1–20.
- [61] Zhu, S. i Chen, J., :A simulation study for a low carbon consumption HVAC project using energyplus, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7 (2012) 3, pp. 248–254.
- [62] Naeem, A., Ho, C.O., Kolderup, E., Jain, R.K., Benson, S., i de Chalendar, J.: EnergyPlus as a computational engine for commercial building operational digital twins, *Energy and Buildings*, 329 (2025), pp. 115257.
- [63] Lopes Silva, D.A., Nunes, A.O., Piekarski, C.M., da Silva Moris, V.A., de Souza, L.S.M., i Rodrigues, T.O.: Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem, *Sustainable Production and Consumption*, 20 (2019), pp. 304–315.
- [64] Sečkář, M., Schwarz, M., Golej, J., i Veverková, D.: Life cycle assessment and software tools comparison, *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 24 (2025) 2, pp. 145–162.
- [65] Gobio-Thomas, L.B., Darwish, M., i Stojceska, V.: Environmental impacts of solar thermal power plants used in industrial supply chains, *Thermal Science and Engineering Progress*, 38 (2023), pp. 101670.
- [66] Taygun, G.T. i Balanlı, A.: Analysis of the models for life cycle assessment of the building and building products, *Environmental Engineering and Management Journal*, 6 (2007) 1, pp. 59–64.

- [67] Asadi, S., Babaizadeh, H., Foster, N., i Broun, R.: Environmental and economic life cycle assessment of PEX and copper plumbing systems: A case study, *Journal of Cleaner Production*, 137(2016), pp. 1228–1236.
- [68] Ren, Z. i Su, D.: Comparison of different life cycle impact assessment software tools, *Key Engineering Materials*, 572 (2014) 1, pp. 44–49.
- [69] Gebre, T.D., Wang, D., Eklöf, N., i Cannone Falchetto, A.: Evaluation of LCA Tools for Road Construction and Operation Purposes : A Case Study in Nordic Europe, *RILEM Bookseries*, 51 (2024), pp. 198–205.

Prepoznavanje rizika u izvedbi infrastrukturnih projekata uz pomoć umjetne inteligencije

Kristijan Vilibić¹, prof. dr. sc. **Ivica Završki²**

¹Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, kristijan.vilibic@grad.unizg.hr

²Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ivica.zavrski@grad.unizg.hr

Sažetak

Upravljanje rizicima predstavlja jedan od najvažnijih, ali i najsloženijih aspekata velikih infrastrukturnih projekata, osobito u kontekstu gradnje željeznice, gdje su prisutne brojne neizvjesnosti povezane s financijama, sigurnošću, vremenskim uvjetima i regulatornim zahtjevima. Kako bi se povećala učinkovitost i uspješnost provedbe, nužno je pravodobno prepoznati potencijalne rizike, pravilno rasporediti resurse i donositi utemeljene odluke. Iako se tradicionalni alati poput stručnih procjena i probabilističkih analiza i dalje koriste, oni često nisu dovoljno učinkoviti u obradi kompleksnih i velikih količina podataka te u prepoznavanju međuovisnih rizika. Ovaj rad istražuje mogućnosti primjene GPT-4o modela umjetne inteligencije (UI) u prepoznavanju rizika, s fokusom na faze izvođenja i zatvaranja projekta „Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo – Novska (M103)“.

Ključne riječi: umjetna inteligencija, GPT-4o, upravljanje rizicima, infrastruktura, optimizacija projekta

Identifying risks in the delivery of infrastructure projects using artificial intelligence

Abstract

Risk management is one of the most critical yet complex aspects of large infrastructure projects, particularly in the context of railway construction, where numerous uncertainties arise related to finances, safety, weather conditions, and regulatory requirements. To improve the efficiency and success of project execution, it is essential to identify potential risks in a timely manner, allocate resources appropriately, and make informed decisions. Although traditional tools such as expert judgment and probabilistic analysis are still widely used, they often fall short when dealing with large volumes of complex data and interdependent risks. This paper explores the potential application of the GPT-4o artificial intelligence (AI) model for risk identification, with a focus on the execution and closing phases of the project “Reconstruction of the existing and construction of the second railway track Dugo Selo – Novska (M103).”

Key words: artificial intelligence, GPT-4o, risk management, infrastructure, project optimization

1 Uvod

Veliki infrastrukturni projekti, kao što su izgradnja željezničkih pruga, autocesta i mostova, odlikuju se visokom razinom složenosti te su izloženi raznim vrstama rizika, uključujući financijske, sigurnosne, okolišne, vremenske i regulatorne izazove [1]. Nedovoljno učinkovito upravljanje tim rizicima može dovesti do kašnjenja u provedbi, prekoračenja troškova i smanjene kvalitete izvedbe. Brojna istraživanja dodatno ukazuju na to da asimetrična dostupnost informacija među sudionicima i zanemarivanje ključnih faktora uspjeha dodatno povećavaju izloženost projektima rizicima [2, 3].

Tradicionalne metode procjene rizika, poput stručne procjene, registara rizika i probabilističkog modeliranja, često su spore, podložne subjektivnosti te teško primjenjive u obradi velikih količina međusobno povezanih podataka [4, 5]. Također, u ograničenoj su mjeri povezane s digitalnim alatima i sustavima, što smanjuje njihovu učinkovitost u suvremenom okruženju upravljanja projektima [6, 7]. Umjetna inteligencija (UI), a posebno napredni modeli poput GPT-4o, otvara nove mogućnosti u području identifikacije i obrade rizika. Ovi sustavi omogućuju automatiziranu analizu velike količine podataka, rano prepoznavanje prijetnji te generiranje projektne dokumentacije u skladu sa stvarnim potrebama [8, 9]. Dodatnu vrijednost donosi njihova integracija s tehnologijama kao što su Building Information Modeling (BIM) i Internet of Things (IoT), što omogućuje učinkovitije planiranje i nadzor projektnih aktivnosti [10].

U ovom radu istražuje se primjena umjetne inteligencije za identifikaciju rizika na primjeru infrastrukturnog projekta „Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo – Novska (M103)“. Fokus je stavljen na faze izvođenja i zatvaranja, koje imaju ključnu ulogu u osiguravanju uspješne realizacije projekta kroz pravovremeno prepoznavanje i upravljanje rizicima.

2 Metodologija

2.1 Odabir projekta i izvora podataka

Za potrebe ovog istraživanja odabran je projekt „Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo – Novska“, koji predstavlja složenu javnu infrastrukturnu investiciju. Tehnička dokumentacija preuzeta je s Elektroničkog oglasnika javne nabave [11], čime je omogućena analiza rizika na temelju autentičnih i dostupnih projektnih podataka. Projekt je organiziran u dvije ključne faze, izvođenje i zatvaranje, u skladu s definicijama životnog ciklusa projekta prema PM² metodologiji Europske komisije [12].

2.2 Tehnološki pristup

Za automatsko prepoznavanje potencijalnih rizika korišten je model umjetne inteligencije GPT-4o. Analiza je provedena fazno, a svaki upit bio je oblikovan s ciljem da se identificiraju rizici kroz uzroke, opis prijetnje i moguće posljedice. Rizici su dodatno razvrstani prema relevantnim područjima, poput tehničkog, pravnog, financijskog, administrativnog, operativnog i drugih.

2.3 Interakcija sa UI i kontrola kvalitete

Cijela analiza provedena je u jednoj sesiji kako bi se zadržao kontinuitet i kontekst prethodnih odgovora. Na taj je način simuliran rad stručnjaka koji postupno gradi znanje o projektu. Dobiveni rezultati uspoređeni su sa standardima definiranim u okviru PM² metodologije [12], a kvaliteta generiranih odgovora sustavno je praćena i evaluirana.

2.4 Očekivani doprinos

Primjena modela GPT-4o može uvelike unaprijediti identifikaciju projektnih rizika. Time se omogućuje šire prepoznavanje prijetnji, brža obrada informacija i donošenje bolje informiranih odluka. Iako UI ne zamjenjuje stručnjake, njezina uloga može biti iznimno korisna kao pomoć u provjeri, nadopuni i usmjeravanju ljudske procjene.

3 Rezultati

Rezultati istraživanja pokazuju da je model GPT-4o uspješno prepoznao rizike specifične za pojedine faze životnog ciklusa projekta, čime se potvrđuje njegov potencijal za sustavnu i učinkovitu analizu rizika. Rizici su organizirani prema relevantnim fazama, s fokusom na fazu izvođenja i fazu zatvaranja.

Na slici 1 prikazan je primjer upita koji je poslužio za učitavanje projektnih podataka u model GPT-4o.

U nastavku su prikazani rezultati koje je UI generirala za svaku fazu projekta, uz pripadajuće primjere upita korištenih za analizu. Za svaku fazu model je izradio prikaz sličan standardnim zapisima u registrima rizika. Generirane tablice rizika dosljedno uključuju stupce za: šifru rizika, izvor ili pokretač rizika, kratak opis rizika (najčešće u formatu uzrok–posljedica), zahvaćeno područje, kategoriju rizika i nositelja rizika.

Svezak III Knjiga 1 Tehničke specifikacij...
PDF

Pretvaraj se da si analitičar za upravljanje rizicima na velikom infrastrukturnom projektu u željezničkom sektoru. Dostavljen ti je tehnički opis projekta „Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo – Novska (M103)“.

Tvoj je zadatak detaljno proučiti i analizirati taj dokument.

Napomena: u sljedećim koracima koristit ćemo podatke iz dokumenta za različite zadatke vezane uz upravljanje rizicima, stoga je važno da u potpunosti razumiješ njegov sadržaj.

Kao analitičar za upravljanje rizicima na projektu "Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo – Novska (M103)", u cijelosti sam proučio tehnički opis iz *Sveska III, Knjiga 1 – Tehničke specifikacije, 1. dio*.

Projekt uključuje:

- Rekonstrukciju postojeće jednokolosiječne pruge u dvokolosiječnu (dionice A–D).
- Izgradnju novog kolosijeka i cjelovitu obnovu postojećeg kolosijeka.
- Modernizaciju svih infrastrukturnih podsustava: građevinskog, elektroenergetskog, signalno-sigurnosnog i prometno-upravljačkog.
- Uklanjanje razina prijelaza gdje je moguće, izgradnju novih nadvožnjaka/podvožnjaka.
- Uvođenje ETCS-a razine 1, rekonstrukciju elektrovučnih podstanica (Ludina, Novska), nova transformatorska postrojenja i izmještanje dalekovoda.
- Priklučke na komunalnu infrastrukturu i mjere zaštite okoliša.
- Organizaciju izvođenja radova uz kontinuirano odvijanje željezničkog prometa, s ograničenim vremenskim zatvorima pruge.

Rok realizacije: 62 mjeseca.

Dokument detaljno definira sve dionice, faze, infrastrukturne zahtjeve, tehničke norme i odgovornosti sudionika. Spreman sam analizirati sve aspekte rizika (građevinski, organizacijski, prometni, okolišni, pravni, sigurnosni itd.) na temelju ovog sadržaja.

Koji aspekt želiš prvo analizirati u kontekstu upravljanja rizicima?



Slika 1. Sažeti prikaz analize tehničkih specifikacija (Generirano pomoću GPT-4o)

Faza izvođenja

GPT4o upit:

'Generiraj mi tablicu identifikacije rizika. Želim da bude usmjerena na fazu izvođenja predviđenog infrastrukturnog (željezničkog) projekta - "Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo - Novska (M103)".'

Tablica bi trebala imati 7 stupaca: šifra, izvor rizika, uzrok/pokretač, rizik (pojava, događaj, posljedica), zahvaćeno područje, kategorija rizika i nositelj rizika.

- Razmotri sljedeće projektne sudionike za ovu fazu: Investitor, Vlada, Glavni izvođač, Gradilišni inženjer...'

GPT-4o odgovor (Slika 2) (Slika 3):

Evo generirane tablice identifikacije rizika za fazu izvođenja infrastrukturnog projekta „Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo – Novska (M103)“:

Šifra	Izvor rizika	Uzrok/Pokretač	Rizik (pojava, događaj, posljedica)	Zahvaćeno područje	Kategorija rizika	Nositelj rizika
R-001	Geotehnički uvjeti	Nestabilnost tla ili prisutnost podzemnih voda	Dodatni radovi na temeljenju i odvodnji, kašnjenja	Temelji pruge, mostovi, tuneli	Geotehnički	Glavni izvođač, Gradilišni inženjer
R-002	Opskrba materijalom	Zastoji u lancu opskrbe ili kašnjenja u isporuci materijala	Prekid radova, povećanje troškova	Čelik, beton, tucanik, signalna oprema	Logistika	Glavni izvođač, Investitor
R-003	Nedostatak radne snage	Manjak kvalificiranih radnika zbog tržišnih uvjeta ili ugovornih sporova	Smanjena kvaliteta izvedbe, odgode u radovima	Elektrifikacija, signalizacija, radovi na pruži	Radna snaga i produktivnost	Glavni izvođač, Investitor
R-004	Vremenski uvjeti	Ekstremne vremenske pojave (kiša, snijeg, toplinski valovi)	Usporavanje radova, opasnosti za sigurnost, oštećenje opreme	Iskopi, građevinski objekti, pruga	Okolišni	Glavni izvođač, Gradilišni inženjer

Slika 2. Tablica identifikacije rizika faze izvođenja 1/2 (Generirano pomoću GPT-4o)

R-005	Zaštita na radu	Neprovođenje sigurnosnih mjera i nadzora	Ozljede, nesreće na radu, prekid i kazne	Cijelo gradilište	Zdravlje i sigurnost	Glavni izvođač, Gradilišni inženjer
R-006	Mehanička oprema	Kvarovi ili zastoji građevinskih strojeva i opreme	Povećani troškovi zamjene i zastoja	Dizalice, rovokopači, vibrovaljci	Operativni	Glavni izvođač, Investitor
R-007	Sukobi s infrastrukturom	Sukobi s postojećim instalacijama ili neoznačene podzemne mreže	Potrebna za izmjenom projekta, dodatni troškovi i kašnjenja	Urbana područja, križanja, mostovi	Infrastrukturni	Vlada, Glavni izvođač
R-008	Regulatorni nadzor	Utvrđene nepravilnosti pri inspekcijskim nadzorima	Obustava radova, obvezne korektivne mjere	Sve gradilišne zone	Pravno i usklađenost	Vlada, Gradilišni inženjer
R-009	Prekoračenje budžeta	Podcijenjeni troškovi rada, materijala ili nepredviđeni izdaci	Povećani troškovi, potreba za rebalansom proračuna	Cijeli projekt	Financijski	Investitor, Vlada
R-010	Kašnjenje izvedbe	Slaba koordinacija podizvođača, kašnjenja u inspekcijama ili odobrenjima	Produženje trajanja projekta, dodatni troškovi	Stanice, elektro sustavi, radovi na pruži	Upravljanje vremenom	Voditelj projekta, Glavni izvođač

Slika 3. Tablica identifikacije rizika faze izvođenja 2/2 (Generirano pomoću GPT-4o)

Faza zatvaranja

GPT-4o upit:

‘Generiraj mi tablicu identifikacije rizika. Želim da bude usmjerena na fazu zatvaranja predviđenog infrastrukturnog (željezničkog) projekta - “Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo - Novska (M103)”.

Tablica bi trebala imati 7 stupaca: šifra, izvor rizika, uzrok/pokretač, rizik (pojava, događaj, posljedica), zahvaćeno područje, kategorija rizika i nositelj rizika.

Usredotoči se na opći rizik uzrokovan odgodom izdavanja uporabne dozvole.

- Razmotri sljedeće projektne sudionike za ovu fazu: Investitor, Regulatorna tijela...’

GPT-4o odgovor (Slika 4) (Slika 5):

Naravno. U nastavku je tablica identifikacije rizika za fazu zatvaranja projekta „Rekonstrukcija postojećeg i izgradnja drugog kolosijeka pruge Dugo Selo – Novska (M103)“, fokusirana na kašnjenje izdavanja uporabne dozvole, s uključenim relevantnim sudionicima:

Šifra	Izvor rizika	Uzrok/Pokretač	Rizik (pojava, događaj, posljedica)	Zahvaćeno područje	Kategorija rizika	Nositelj rizika
R-011	Završne inspekcije	Neusklađenost s tehničkim ili sigurnosnim standardima	Dodatni korektivni radovi uzrokuju kašnjenje primopredaje	Cjelokupna željeznička infrastruktura	Regulatorni	Investitor, Regulatorna tijela
R-012	Pogreške u dokumentaciji	Netočna, nepotpuna ili zakašnjela tehnička dokumentacija	Produjeni postupak pregleda i zahtjevi za dopunom	Proces izdavanja uporabne dozvole	Administrativni	Investitor
R-013	Okolišna usklađenost	Nepoštivanje uvjeta iz okolišnih studija ili neprovedene mjere ublažavanja	Odbijanje dozvole do provedbe korekcija	Ekološki osjetljiva područja, odvodnja	Ekološki	Investitor, Regulatorna tijela

Slika 4. Tablica identifikacije rizika faze zatvaranja 1/2 (Generirano pomoću GPT-4o)

R-014	Tehničke provjere	Kašnjenje u testiranju signalizacije, elektrifikacije i sigurnosnih sustava	Izdavanje dozvole odgođeno zbog neriješenih tehničkih pitanja	Signalni sustavi, elektroinstalacije, trasa	Tehnički	Investitor
R-015	Sporovi s dionicima	Prigovori lokalnih vlasti ili stanovništva na utjecaj projekta	Pravne intervencije koje usporavaju završno odobrenje	Urbana naselja, krizanja, bučna područja	Socijalni i pravni	Investitor, Regulatorna tijela
R-016	Dodatni troškovi	Naknadne korekcije ili mjere za usklađivanje s propisima	Financijski pritisak, mogućnost rezanja obujma projekta	Završni radovi, planiranje troškova	Financijski	Investitor
R-017	Upravna neefikasnost	Spori birokratski procesi kod izdavanja dozvole	Višemesečno čekanje na uporabnu dozvolu	Cijela željeznička mreža	Birokratski	Regulatorna tijela

Slika 5. Tablica identifikacije rizika faze zatvaranja 2/2 (Generirano pomoću GPT-4o)

4 Diskusija

Rezultati ove studije ukazuju na to da GPT-4o ima značajan kapacitet za brzo prepoznavanje velikog broja ključnih rizika u infrastrukturnim projektima. Identificirani rizici, uključujući kašnjenja u opskrbnim lancima, nedostatak kvalificirane radne snage te sigurnosni incidenti na gradilištu, uvelike se podudaraju s onima koje bi detektirali i iskusni stručnjaci [4].

UI je pokazala izrazitu prednost u obuhvatu analize, jer ne ostaje ograničena samo na najčešće poznate rizike, što je često slabost kod ljudskih timova. Ipak, njezin glavni nedostatak leži u nedovoljnom razumijevanju konteksta, što joj onemogućuje uočavanje lokalno specifičnih prijetnji koje nisu jasno navedene u dostupnoj dokumentaciji [13]. Istovremeno, UI pristupa analizi nepristrano i ne pokazuje tendenciju podcjenjivanja neugodnih ili nepopularnih scenarija, što je česta pojava kod ljudi [14]. S druge strane, bez dodatnih informacija može uključiti generičke ili manje relevantne prijetnje.

Kada je riječ o procjeni prioriteta rizika, koja zahtijeva subjektivnu prosudbu i poznavanje šireg konteksta, ljudski faktor i dalje igra ključnu ulogu. Iako UI može pomoći u kvantitativnim procjenama, konačne odluke ovise o iskustvu i stručnom uvidu [13].

Najveći potencijal UI pokazuje kada djeluje kao podrška ljudskim timovima. U takvom kombiniranom pristupu umjetna inteligencija omogućuje brzu i široku identifikaciju rizika, dok stručnjaci pružaju procjenu izvedivosti, donose odluke i definiraju konkretne mjere. UI može poslužiti kao osnova za izradu početnog registra rizika, koji se zatim dodatno obrađuje i prilagođava specifičnostima projekta [4]. U slučaju projekta Dugo Selo – Novska, većina identificiranih prijetnji bila bi prepoznata i od strane stručnjaka, dok bi oni dodatno uočili lokalne rizike koji nisu dokumentirani, ali proizlaze iz konteksta.

Ovakav pristup potvrđuju i nedavna istraživanja [15, 16, 17], koja naglašavaju vrijednost UI u planiranju, sigurnosnom nadzoru i upravljanju resursima. No, upravljanje timom, donošenje odluka, komunikacija sa dionicima i provedba mjera i dalje su područja u kojima ljudska uloga ostaje nezamjenjiva.

5 Zaključak

U ovom radu predstavljen je pristup upravljanju rizicima u infrastrukturnim projektima koji se temelji na primjeni modela GPT-4o, u potpunosti usklađenog s PM² metodologijom. Model je analizirao tehničku dokumentaciju i uspješno prepoznao rizike unutar odabranih faza projekta, pri čemu su rezultati prikazani u jasno strukturiranom formatu s informacijama o uzrocima, mogućim posljedicama i pogođenim područjima.

Usporedba s procjenama stručnjaka pokazala je da GPT-4o može identificirati širi raspon rizika, ali mu nedostaje sposobnost donošenja kontekstualno osjetljivih odluka, što ostaje u domeni ljudske prosudbe [4, 13].

UI se iskazala korisnim u fazi planiranja jer omogućuje brzu generaciju početnih prijedloga, ubrzava analizu i povećava razinu dosljednosti u rezultatima. Njezina sposobnost obrade velikih količina podataka doprinosi i boljem prijenosu znanja, osobito u timovima s manjkom prethodnog iskustva [18].

Kao zaključak, može se istaknuti da integracija umjetne inteligencije i stručne ljudske ekspertize predstavlja učinkovit i održiv pristup za kvalitetno upravljanje rizicima u tehnički zahtjevnim infrastrukturnim projektima.

Literatura

- [1] Pejić, M.S., Terzić, M., Stanojević, D., Peško, I., i Mučenski, V.: Improving construction projects and reducing risk by using artificial intelligence, *Social Informatics Journal*, 2(1), pp. 33–40, 2023.
- [2] vić, I. i Cerić, A.: Risks Caused by Information Asymmetry in Construction Projects: A Systematic Literature Review, *Sustainability*, 15(13), pp. 9979, 2023.

- [3] Lovrenčić Butković, L.: A new framework for ranking Critical Success Factors for International Construction Projects, *Organization, Technology and Management in Construction*, 13, pp. 2505–2520, 2021.
- [4] Nyqvist, R., Peltokorpi, A., i Seppänen, O.: Can ChatGPT exceed humans in construction project risk management?, *Engineering, Construction and Architectural Management*. Advance online publication, 2023.
- [5] Reddy, A. S.: Risk Management in Construction Industry - A Case Study, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(10), 10058, 2015.
- [6] Liao, C., Aminudin, E., Mohd, S., i Yap, L. S.: Intelligent risk management in construction projects: Systematic literature review, *IEEE Access*, 10, 72936–72954, 2022.
- [7] Afzal, F., Shao, Y., Nazir, M., i Bhatti, S. M.: A review of artificial intelligence-based risk assessment methods for capturing complexity-risk interdependencies: Cost overrun in construction projects, *International Journal of Managing Projects in Business*, 14(2), pp. 300–328, 2019.
- [8] Abioye, S.O., Oyedele, L.O., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J.M.D., Bilal, M., Akinade, O.O., i Ahmed, A.: Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges, *Journal of Building Engineering*, 44, 103299, 2021.
- [9] Korke, P., Gobinath, R., Shewale, M., i Khartode, B.: Role of Artificial Intelligence in Construction Project Management, *International Journal of Construction Management and Research*, 18(3), pp. 75–92, 2023.
- [10] Pan, Y., i Zhang, L.: Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122, 103517, 2021.
- [11] EOJN RH: Radovi na rekonstrukciji postojećeg i izgradnji drugog kolosijeka željezničke pruge Dugo Selo – Novska, Dostupno na: <https://eojn.hr/tender-eo/30943> (Pristupljeno: 26 Travnja 2025).
- [12] European Commission: PM² Project Management Methodology v3.1, Dostupno na: https://pm2.europa.eu/pm2-methodologies/pm2-project-management_en (Pristupljeno: 29 Travnja 2025).
- [13] Aladağ, H.: Assessing the Accuracy of ChatGPT Use for Risk Management in Construction Projects, *Sustainability*, 15(22), pp. 16071, 2023.
- [14] Emmons, D.L., Mazzuchi, T.A., Sarkani, S., i Larsen, C.E.: Mitigating Cognitive Biases in Risk Identification: Practitioner Checklist for the Aerospace Sector, *Defense Acquisition Research Journal*, 25(1), pp. 52–93, 2018.

- [15] Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., i Li, R. Y. M.: Opportunities and adoption challenges of AI in the construction industry: A PRISMA review, *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(1), pp. 45, 2022.
- [16] Chen, K., Zhou, X., Bao, Z., Skibniewski, M. J., i Fang, W.: Artificial intelligence in infrastructure construction: A critical review, *Frontiers of Engineering Management*, 12, pp. 24–38, 2024.
- [17] Jiang, C., Li, X., Lin, J.-R., Liu, M., i Ma, Z.: Adaptive control of resource flow to optimize construction work and cash flow via online deep reinforcement learning, *arXiv preprint arXiv:2307.10574*, 2023.
- [18] Costa, R. L., Dias, Á. L., Gonçalves, R., Pereira, L., i Abreu, S.: Artificial intelligence in project management: A systematic literature review, *International Journal of Technology Intelligence and Planning*, 13(2), pp. 143–163, 2022.

Primjena BIM-a u ugovorima projekta gradnje: kritička analiza

Filip Ivančić¹, prof.dr.sc. **Mladen Vukomanović²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, filip.ivancic@grad.unizg.hr

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

Sažetak

U radu se istražuje primjena BIM-a u ugovorima projekta gradnje. Provedena je kritička analiza relevantne znanstvene literature kako bi se utvrdio trenutni status primjene BIM-a u ugovornom kontekstu. Rezultati ukazuju na rastući interes, ali i na niz prepreka, poput nedostatka standardizacije i pravne neizvjesnosti u primjeni BIM-a u ugovornim odnosima. Iako BIM sve češće postaje obavezan u javnim i većim projektima, važeće regulative i standardni oblici ugovora još uvijek ga nedovoljno prepoznaju i prilagođeni su tradicionalnim modelima suradnje.

Ključne riječi: Informacijsko modeliranje gradnje (BIM), ugovorni okviri, pravni okvir, implementacijske prepreke, standardizacija

Application of BIM in Construction Project Contracts: A Critical Analysis

Abstract

This paper explores the application of Building Information Modeling (BIM) in construction project contracts. A critical analysis of relevant academic literature was conducted to determine the current status of BIM implementation within the contractual context. The findings indicate a growing interest in BIM, but also reveal several obstacles, such as a lack of standardization and legal uncertainty in its contractual use. Although BIM is increasingly becoming mandatory in public and large-scale projects, existing regulations and standard forms of contract still fail to adequately recognize it and remain oriented toward traditional collaboration models.

Key words: Building Information Modeling (BIM), contractual frameworks, legal framework, implementation barriers, standardization.

1 Uvod

Jedna od glavnih prepreka široj primjeni informacijskog modeliranja gradnje (*eng. Building information modelling-BIM*) jest nedostatak jasnih ugovornih okvira i pravnih standarda [1]. Ovaj je problem još izraženiji u zemljama u razvoju poput Malezije i Brazila, gdje je primjena BIM-a, iako u porastu, i dalje niska u usporedbi s razvijenim zemljama poput Ujedinjenog Kraljevstva [1,2], te Australije i SAD-a [3]. Unatoč rastućim stopama usvajanja, primjerice 73 % građevinskih tvrtki u Ujedinjenom Kraljevstvu do 2020. godine koristi BIM u projektima, nedosljednost prilikom implementacije BIM-a u ugovorima ostaje ključan izazov [4]. Također, pristup implementaciji BIM-a u ugovorima značajno se razlikuje među zemljama. Neke se odlučuju za pojedinačne ugovore sa svakim dionikom, dok druge preferiraju jedinstveni ugovor koji obuhvaća sve strane. U SAD-u kolaborativni tipovi ugovora poput Integrated project delivery (IPD) sve više dobivaju na važnosti, a idealni su za ugovaranja projekata u kojima se implementira BIM [5]. Postoji i druga praksa gdje se posebni BIM aneksi prilažu pojedinačnim ugovorima o gradnji, projektiranju, vođenju projekata itd., što omogućuje fleksibilnost uz očuvanje koherentnog okvira projekta [6]. Istraživanje Američkog instituta arhitekata iz 2019. godine pokazalo je da se samo 31 % arhitekata osjeća sigurnima u razumijevanje pravnih posljedica primjene BIM-a [4]. Ova praznina u znanju može ometati primjenu BIM-a, uzrokovati sporove i ograničiti koristi zbog nejasnih uloga i neriješenih pravnih pitanja [4]. Standardni oblici ugovora u Maleziji (PWD 203A, PAM 2018 i CIDB 2000) analizirani su u svrhu integracije BIM-a, ali istraživanja pokazuju da su napor u izradi BIM klauzula još uvijek u ranoj fazi [1]. Slično tome, ugovorna praksa u Španjolskoj i dalje nije dovoljno kolaborativna da bi omogućila učinkovitu primjenu BIM-a [7]. U Sjedinjenim Američkim Državama, ugovorne strategije često nisu kompatibilne s tehnološkom i suradničkom prirodom BIM-a [8]. Neodgovarajući ugovorni instrumenti ne samo da otežavaju usvajanje BIM-a, nego i umanjuju njegovu učinkovitost, jer se isporuke često svode na neobvezujuće elemente u projektima [9]. Bez univerzalno priznatih ugovornih alata prilagođenih BIM-u, projekti neće moći ostvariti puni potencijal ove metodologije, već će zadržati obilježja tradicionalnih, često konfliktnih načina isporuke [9]. Dodatnu poteškoću predstavlja i rašireno pogrešno razumijevanje BIM-a među stručnjacima, koji ga često percipiraju samo kao alat za 3D vizualizaciju, umjesto kao sveobuhvatan proces koji obuhvaća sve faze životnog ciklusa projekta [2]. Literatura često ističe da pravni rizici povezani s BIM-om proizlaze iz nejasnoća u definiranju uloga i odgovornosti među dionicima [3]. Bez ugovora koji jasno definiraju obveze, odgovornosti i rizike, učinkovita primjena BIM-a ostaje neostvariva [10]. Problemi u implementaciji BIM-a koji se javljaju su ograničenja postojećih pravnih okvira koji još uvijek nisu prilagođeni BIM-u. Zatim problemi zbog nedostatne

standardizacije ugovora i ugovornih dodataka za primjenu BIM-a u ugovorima, te pravne i ugovorne prepreke koje se javljaju u implementaciji, a proizlaze iz ograničenosti postojećih pravnih i ugovornih okvira. Cilj rada je analizirati ove pravne i ugovorne prepreke te identificirati potrebne izmjene pravnih i ugovornih struktura u svrhu učinkovite primjene BIM-a. U drugom poglavlju obrađuju se ograničenja pravnih okvira, u trećem poglavlju daje se prikaz standardnih ugovornih okvira. Pravne i ugovorne prepreke obrađuju se u četvrtom poglavlju ovoga rada. U petom poglavlju obrađena je primjena BIM-a u Republici Hrvatskoj.

2 Ograničenja postojećih pravnih okvira u implementaciji BIM-a

U mnogim zemljama postojeći zakoni i propisi još uvijek ne omogućuju električnu suradnju članova projekta u fazama projektiranja, nabave radova i izgradnje [11]. Većina pravnih instrumenata koji se koriste u BIM projektima razvijena je prije nego što je BIM postao relevantan i stoga se oslanjaju na dvostrane ugovore u kojima su odgovornosti strogo razgraničene [9]. Ugovori koji su razvijeni za fragmentirana okruženja teško definiraju uloge i odgovornosti u zajedničkim digitalnim platformama [12], što često rezultira nejasnoćama u vezi s odgovornošću kad više disciplina dijeli rizike [9]. Čak i kada su BIM modeli prepoznati kao ključni projektni rezultati, kao što je slučaj s uputama Texas Facilities Commission-a, tiskani dokumenti se i dalje zahtijevaju pri svakoj fazi projekta što jasno pokazuje sukob između digitalnih procesa i tradicionalnih pravnih očekivanja [13]. Građevinska industrija je povijesno poznata po konfliktnim odnosima i sporovima, što dodatno otežava provedbu BIM-a kao modela suradnje [9]. Osim toga, moderni pravni sustavi naglašavaju individualnu odgovornost sudionika, što je suprotno BIM-ovoj integriranoj prirodi [14]. Pokušaji da se uvedu novi oblici ugovora za BIM naišli su na oprez. Istraživači su prepoznali da sama novost BIM-a već predstavlja izazov, te bi potpuno novi ugovorni formati dodatno otežali njegovu provedbu [11]. Istodobno, BIM narušava tradicionalne uloge sudionika, jer zahtijeva razmjenu podataka između projekatanta, izvođača i dobavljača, čime se otvaraju pravna pitanja o vlasništvu nad podacima, pravima korištenja i raspodjeli rizika [8,15]. Prema [12], regulirana BIM praksa ima dvostruku korist: potiče širu primjenu BIM-a u industriji te omogućuje standardizaciju ugovornih praksi tijekom cijelog životnog vijeka projekta. Također, prema istraživanju [11], 78% ispitanika smatra da je uspostava jasnih BIM pravila i regulacija visoko važna za uspješnu provedbu projekata.

3 Standardni ugovorni okviri za primjenu BIM-a

Poduzeti su koraci za rješavanje pravnih izazova, uključujući izradu standardnih ugovornih protokola za BIM i promicanje modela suradničkih ugovora kao što je Integrated Project Delivery (IPD), koji potiče jaču suradnju među sudionicima BIM-projekata [16]. FIDIC aktivno radi na inicijativama koje podržavaju primjenu informacijskog modeliranja gradnje pripremom smjernica za tehnologiju i smjernica za definiciju opsega specifičnih za BIM [17]. Također, ISO 19650-2 definira izradu BIM protokola što bi trebalo definirati kao temelj za provedbu projekta u BIM okruženju. Značajan korak bio je ugovor Complex Projects Contract 2013 (CPC 2013), koji je postao prvi standardni građevinski ugovor koji izričito uključuje BIM klauzule i dodatke [18]. Unatoč postojanju različitih BIM protokola, uključujući JCT dodatak za javni sektor (2011), Document E203 TM -2013, ConsensusDocs 301, AEC BIM Protokol (2012) i CIC BIM Protokol (2013), njihova stvarna primjena u industriji ostaje niska [19]. Većina tih dokumenata koristi se tek kao dodaci glavnim ugovorima i ne pokrivaju sve specifične rizike povezane s BIM-om [14]. Osim toga, mnogi stručnjaci nisu upoznati s postojanjem BIM ugovornih protokola ili imaju vrlo ograničeno znanje o njihovom sadržaju. Prema Ritzerovom istraživanju iz 2012. godine 40,4 % ispitanika nije znalo za postojanje takvih dokumenata, a samo 48,5 % ih je imalo barem minimalno razumijevanje sadržaja jednog ili više njih [8]. U radu [12] potvrđuje se da, iako međunarodni protokoli poput AIA E203, ConsensusDocs 301 i CIC BIM protokola postoje, njihova se primjena u praksi rijetko provodi. Osim toga, ti dokumenti uglavnom služe kao dodatak glavnim ugovorima te ne razjašnjavaju dovoljno pravne odgovornosti koje se mijenjaju u BIM projektima [12]. Prema [11] rješenja koja se predlažu za rješavanje problema vezanih uz primjenu BIM-a u ugovorima dijele se na dvije grupe. Prva je razvoj neovisnih BIM ugovora koji su rijetkost u primjeni, a druga je razvoj BIM dodataka ugovoru koji su prihvaćeni od mnogih organizacija i država. Tablica 1 sažima različite ugovorne pristupe primijenjene u četiri vodeće zemlje u implementaciji BIM-a: SAD-u, UK-u, Singapuru i Kini.

Tablica 1. Pristupi ugovaranja BIM-a u nekim zemljama, prilagođeno prema [10]

Naziv kolekcije	Izdavač	Godina objave		Vrsta dokumenta		Država
		Godina objave – Prva	Godina objave – Najnovija	Neovisni BIM ugovor	BIM dodatak ugovoru	
The Consensus DOCS 301 BIM Addendum	AGC	2008	2017		✓	SAD
AIA Dokument C 106™	AIA	2007	2022	✓		SAD
AIA Dokument E203™, Izložak za informacijsko modeliranje gradnje i digitalne podatke	AIA	2013	2022		✓	SAD
AIA Dokument G201™, Protokol digitalnih podataka	AIA	2013	—		✓	SAD
AIA Dokument G202™, Protokol informacijskog modeliranja gradnje	AIA	2013	—		✓	SAD
PROTOKOL INFORMACIJSKOG MODELIRANJA GRADNJE (BIM)	CIC	2013	2018		✓	UK
BIM- posebni uvjeti	Building and Construction Authority	2012	2015		✓	Singapur
Zahtjevi za informacijsko modeliranje gradnje (BIM)	MOHURD	2020	—		✓	Kina

4 Pravne i ugovorne prepreke vezane uz BIM

Brojna istraživanja pokušala su identificirati ključne pravne i ugovorne prepreke primjene BIM-a u građevinskim projektima. Istraživanje [11] definira ključne pravne i ugovorne izazove povezane s primjenom BIM-a kroz analizu postojećih ugovora koji implementiraju BIM i prikupljanje stavova stručnjaka iz različitih sektora građevinske industrije. Istraživanje [14] definira pravne izazove integracije BIM-a u građevinske ugovore te, kroz višefazni istraživački pristup, predlaže preliminarnu kontrolnu listu koja može služiti kao alat za unapređenje pripreme ugovora. Istraživanje [12] definira okvirne pravne aspekte i ugovorne odredbe potrebne za učinkovitu administraciju BIM projekata, s posebnim fokusom na kontekst Tajvana kao primjera aktivne implementacije BIM-a u javnim projektima. Istraživanje [16] definira glavna pravna pitanja koja proizlaze iz primjene BIM-a te kritički razmatra postojeće pristupe i rješenja na temelju sustavne analize stručne literature.

U radu [3] identificirano je osam ključnih pravnih i ugovornih prepreka u implementaciji BIM-a u ugovorima projekta gradnje. To su prepreke povezane sa metodom nabave, ugovornom dokumentacijom, vremenom i troškovima, koordinacijom, definiranjem odgovornosti, sigurnosti podataka te pravnom regulativom. Pravna pitanja poput neusklađenosti sustava nabave, autorskih prava, odgovornosti i nejasnih uloga i prisutne su prilikom implementacije BIM-a tradicionalnim metodama nabave poput design and build, construction management i management contracting [16]. Međutim, ti se problemi ublažavaju kada se BIM primjenjuje unutar odnosa koji se temelje na partnerstvu, poput IPD-a ili projektnog savezništva, gdje postoji rana uključenost ključnih strana, transparentno financiranje, dijeljenje rizika i nagrada te zajedničko odlučivanje [16]. Modeli predani nakon izgradnje često nisu prilagođeni za upravljanje objektom, zbog neodgovarajuće razine detaljnosti i odstupanja od stvarno izvedenog stanja [13]. Iako su izvođači ugovorno obvezani ažurirati model, nerijetko izbjegavaju trošak jer ne prepoznaju izravnu korist [13]. Stručnjaci ističu da investitori još čekaju učinkovitiju suradnju unutar industrije, dok je povezivanje BIM-a s postojećim informacijskim sustavima i dalje zahtjevno i skupo [13].

Iako se BIM modeli sve češće integriraju u ugovore, njihova pravna hijerarhija ostaje nejasna, dok istraživanje [11] pokazuje da stručnjaci smatraju da BIM model ima viši prioritet od radnih naloga i posebnih uvjeta, ali ipak niži od osnovnog ugovora i općih uvjeta. Štoviše, digitalni podaci trebali bi biti priznati kao sastavni dio ugovorne dokumentacije [12]. Uspješna implementacija BIM-a ovisi o tome kako su definirani ugovori, a svi dionici smatraju ugovore ključnim mehanizmom za prevenciju tehničkih i organizacijskih problema u BIM projektima [13]. Konkretno, važnost BIM plana izvršenja (*eng. BIM execution plan-BEP*) istaknuta je u

praksi, ali ugovori često ne specificiraju tko je odgovoran za njegovu izradu [11]. Ugovorne odredbe često uključuju jamstva za ispravnu izvedbu, no rezultati istraživanja pokazuju da samo 33 % sudionika smatra da je jamstvo izvođača i dobavljača vrlo važno, dok 50 % dodjeljuje višu važnost jamstvenom roku projektanta prilikom primjene BIM-a [11]. Ujedno, odgovornost za nedostatke definira se tako da izvođači i dobavljači snose posljedice za propuste u vlastitom radu, ali nisu odgovorni za probleme koji proizlaze iz pogrešne upotrebe građevine [11]. U literaturi se naglašava da bi naručitelj, kao financijer projekta, trebao preuzeti inicijativu i postaviti zajedničke ciljeve u okviru pravednog sustava raspodjele rizika i dobiti [14].

Zbog dinamične prirode BIM-a i mogućnosti brzih izmjena modela, odobravanje promjena od strane članova tima predstavlja izazov, pri čemu se najveći značaj pridaje glavnom projektantu, a odobrenja izvođača često se zanemaruju [11]. Ovakav disbalans može narušiti kvalitetu i dosljednost modela, posebno u nedostatku jasnih procedura za upravljanje podacima. Kako bi informacije bile točne i dostupne pravim osobama u pravom trenutku, BIM menadžer treba strukturirati podatke prema verziji, autoru, statusu tijeka rada i drugim parametrima [16]. Bez takvih pravila, povećava se rizik od pogrešnih interpretacija i gubitka povjerenja. Stoga stručna literatura preporučuje da ugovorom budu definirani BIM ciljevi i kontrole kvalitete, čime se osiguravaju jasna očekivanja u upravljanju modelom i zaštiti podataka [12].

Jedan od glavnih izazova u praksi jest nejasno definiran odnos između klijenta, projektanta i izvođača, što dovodi do neusklađenosti u razmjeni informacija i grešaka u modelu [12]. Dodatno, nekompatibilnost različitih sustava i metoda rada otežava integraciju unutar BIM okruženja [13], dok nejasna struktura vlasništva i odgovornosti stvara neravnotežu među sudionicima [13]. Kao rješenje, literatura preporučuje redovite BIM koordinacijske sastanke, razvoj zajedničkih modela, uspostavu BIM standarda i imenovanje menadžera za upravljanje podacima s jasno definiranim ovlastima kroz ugovore [11,20]. Učinkovita koordinacija zahtijeva precizno definirane uloge i odnose među svim sudionicima [12].

Neujednačena integracija BIM modela među disciplinama stvara zbrku oko odgovornosti, što može dovesti do pravnih nesuglasica [13]. Prema [11], najveću odgovornost za nedostatke snosi projektant, zatim izvođačev konzultant, dok naručitelj ima najmanju odgovornost. Zbog mogućnosti lakog kopiranja i izmjena, pitanja vlasništva, autorskih prava i povjerljivosti posebno su osjetljiva. Čak 73,4 % ispitanika smatra da su prava intelektualnog vlasništva ključna u ugovorima koji implementiraju BIM, pri čemu 80,7 % modela pripada naručitelju, a 67,8 % projektantu [11]. Standard profesionalne odgovornosti dodatno se opterećuje ugovornim obvezama. Dok neki protokoli (npr. ConsensusDocs 301) nameću odgovornost za točnost modela, drugi (npr. CIC 2013a) je ograničavaju ako se

slijedi protokol [20]. Oba pristupa imaju ograničenja, osobito kada su podaci izvan kontrole sudionika. Kao rješenje, preporučuje se jasno ugovorno definiranje vlasništva i odgovornosti, uključujući prava pristupa i korištenja modela [12]. Dava-telji podataka trebaju odgovarati za točnost unosa, a zaštita prava intelektualnog vlasništva može se osigurati kroz standardne ugovorne klauzule, poput onih u praksi Ujedinjenog kraljevstva [20]. Također se ističe potreba za pravnom edu-kacijom i postupnim proširivanjem odgovornosti s iskustvom sudionika [11,20]. Sigurnost podataka u BIM okruženju je ključna, osobito kod projekata koji uklju-čuju patente, autorska prava i poslovne tajne. Mogući su sporovi oko ponovne upotrebe modela s zaštićenim informacijama, ovisno o ugovoru i kontekstu [13]. Korištenje inozemnih podatkovnih centara dodatno povećava rizik zbog različi-tih zakonskih okvira [20]. Najveću odgovornost za sigurnost snosi projektant, a potom izvođač [11]. Rizici se mogu smanjiti jasnim pravilima pristupa, zaštite i integriteta podataka već u ranoj fazi projekta [14], uz pravnu edukaciju sudionika, posebno kada se koristi strana infrastruktura [20].

U mnogim zemljama još uvijek ne postoji jasna pravna infrastruktura za BIM, što dovodi do različitih tumačenja prava i obveza sudionika. Na primjer, u Vijetna-mu je uočena nejasnoća oko toga koji BIM dokumenti trebaju biti dio natječajne i ugovorne dokumentacije [20]. Pravni izazovi dodatno se kompliciraju zbog razlika među nacionalnim zakonodavstvima, primjerice, pitanje intelektualnog vla-sništva i odgovornosti u Nizozemskoj se rješava drukčije nego prema američkoj Spearin doktrini [16].

5 Primjena BIM-a u Republici Hrvatskoj

Razina primjene BIM-a u Republici Hrvatskoj i dalje je niska, što potvrđuju istraži-vanja provedena posljednjih godina. Prema podacima iz 2015. godine, BIM je ko-ristilo između 0 i 25 % poduzeća koja posluju u Hrvatskoj [21]. U razdoblju 2016.-2017. godine, 38.89 % ispitanika nije uopće koristilo BIM, 37.78 % koristilo ga je povremeno, a samo 10 % ga je primjenjivalo redovito [21]. Dodatno, čak 61.15 % sudionika smatra da je BIM tek običan 3D softver, što pokazuje da svijest o cjelo-vitom procesu koji BIM podrazumijeva još uvijek nije dovoljno razvijena [21]. Po-stoje značajne prepreke širem prihvaćanju BIM-a. Istraživanja pokazuju da većina sudionika u građevinskim projektima smatra kako ključni dionici još nisu spremni za njegovu primjenu. Čak 85.65 % ispitanika smatra da izvođači radova nisu spre-mni, 80.26 % navodi isto za nadzor, 76.46 % za dobavljače, 74.94 % za investitore te 69.27 % za projektante [21].

Unatoč slaboj prisutnosti BIM-a u svakodnevnoj praksi, određeni koraci prema njegovoj standardizaciji i regulaciji u Hrvatskoj već su poduzeti. Ministarstvo pro-stornog uređenja, graditeljstva i državne imovine od 2017. godine aktivno sudje-

luje u radu EU BIM Task Grupe te je osnovalo nacionalnu radnu skupinu HR BIM Task Group koja okuplja predstavnike stručnih komora i tijela državne uprave s ciljem poticanja primjene BIM-a [22]. Pri Hrvatskoj komori inženjera građevinarstva osnovan je Stalni odbor za BIM, čiji je zadatak daljnji razvoj BIM pristupa kroz projekte i aktivnosti [23].

Posebno je značajno istaknuti primjer poduzeća Hrvatske ceste, koje je uvelo obaveznu primjenu BIM pristupa u svojim projektima kao javni investitor [23]. U tu svrhu izrađene su nove verzije ključnih dokumenata poput naručiteljevog zahtjeva za informacijama (*eng. Employer's Information Requirements - EIR*) i BEP-a, a BIM je već našao svoju primjenu u složenijim infrastrukturnim projektima, primjerice na cesti DC 403 i obilaznici Omiš [23].

Hrvatska komora inženjera građevinarstva (HKIG) izradila je dva ključna dokumenta koji predstavljaju temelj za standardizaciju: *Opće smjernice za BIM pristup u graditeljstvu* i *Smjernice za BIM pristup u infrastrukturnim projektima* [22]. U *Smjernicama za BIM pristup u infrastrukturnim projektima* HKIG prepoznaje izazove koji se javljaju prilikom ugovaranja BIM projekata. S aspekta implementacije BIM-a, iako manje zastupljen u praksi, DB pristup (*eng. Design-Build*) pokazuje veći potencijal jer potiče ranu suradnju svih sudionika, integralno sagledavanje projekta i omogućuje kvalitetniju razmjenu informacija kroz sve faze projekta [24]. U takvom pristupu izvođač jamči ukupnu cijenu građevine te mu je u interesu što ranije prepoznati i otkloniti moguće probleme, a izrada sveobuhvatnog BIM modela prirodno se uklapa u ovaj proces [24]. Suprotno tome, u praksi više zastupljen DBB pristup (*eng. Design-Bid-Build*) zbog svoje fragmentiranosti otežava kontinuitet BIM modela, što često dovodi do njegove ponovne izrade u fazi izvođenja, čime se gubi princip neprekinutog tijeka informacija [24].

Istraživanja pokazuju da tržište još nije dovoljno zrelo za opću regulaciju BIM-a. Najprije je potrebno je podići razinu svijesti o prednostima BIM-a, osigurati kvalitetnu edukaciju stručnjaka te potaknuti ulaganja u potrebne alate i opremu. Tek kada se dostigne viša razina zrelosti, može se pristupiti izradi i donošenju nacionalnih standarda [21]. U protivnom postoji opasnost da bi uvođenje regulative dovelo do pogrešne i površne primjene BIM-a [21].

Važno je naglasiti kako u Republici Hrvatskoj ne postoje pravne prepreke za primjenu BIM-a, no ugovorni okviri koji bi ga jasno definirali još uvijek nisu razvijeni [22]. Iz tog razloga, uvođenje BIM-a u praksi javnih investitora zasad je neravnomjerno i ovisi o pojedinačnim inicijativama, a ne o propisanim obvezama na razini države [22].

6 Zaključak

U svrhu prilagodbe postojećih praksi ugovaranja primjeni BIM-a razvijeni su standardni ugovorni dodaci koji su najvećem broju koncipirani kao dodatak postojećim ugovorima. Navedene inicijative država i organizacija za standardizacijom ugovora pokazuju važnost standardizacije ugovora za primjenu BIM-a. Međutim, još uvijek postoji određena razina neosviještenosti među dionicima projekata za ovakvim standardiziranim oblicima ugovornih dodataka i nerazumijevanje značenja BIM-a i procesa koji proizlaze iz BIM-a. Isti je problem sa pravnim strukturama država koje su još uvijek neprilagođene BIM-u kao što je to slučaj u Američkoj saveznoj državi Texas. Iako je standardizacija ugovornih praksi i pravnih okvira još u početnim fazama, standardizacija rješava problem prilagodbe postojećih okvira što olakšava primjenu BIM-a u ugovorima.

Tradicionalni modeli ugovaranja, usmjereni na podjelu odgovornosti i strogu hijerarhiju, ne odgovaraju suradničkoj i integriranoj prirodi BIM-a. Ukoliko naručitelj ugovara sa svakim dionikom posebno, potrebno je svakom ugovoru dodati BIM dodatak kojim se definiraju prava i obaveze svakog dionika povezane s BIM-om. S druge strane, suradnički oblici ugovora poput IPD ili Design-build su prikladniji za primjenu BIM-a, no i dalje postoji potreba za predviđanjem BIM dodataka. Ukoliko se prepreke koje su definirane ovim radom ne predvide u ugovorima, postoji rizik od sporova i neuspjeha projekta. Posebno je bitno definirati prava intelektualnog vlasništva između naručitelja i projektanta, zatim obaveze izvođača za pripremu modela za fazu održavanja građevine te ulogu voditelja projekta u BIM okruženju. Potrebna je prilagodba postojećih pravnih i ugovornih okvira kao uvjet uspješne implementacije BIM-a. Brojni problemi potvrđuju ovu tvrdnju, od nejasne pravne hijerarhije BIM modela u odnosu na druge dokumente, preko neriješenih pitanja intelektualnog vlasništva i odgovornosti, do fragmentiranih sustava nabave koji ne podržavaju digitalnu suradnju. Nedostatak regulacije i nesigurnost oko pravnog statusa modela uzrokuju pravne nesuglasice i ograničavaju učinkovitost BIM-a. Bez pravne infrastrukture koja omogućuje jasnu komunikaciju, razmjenu podataka i zaštitu prava, BIM ostaje ograničen na tehničku funkciju, bez integracije u cjelokupni proces upravljanja projektom.

Zaključno, cilj ovoga rada je analiza ovih pravnih i ugovornih prepreka te identifikacija potrebnih izmjena pravnih i ugovornih struktura u svrhu učinkovite primjene BIM-a. Postojeći pravni i ugovorni okviri ne predviđaju probleme koji se javljaju u primjeni BIM-a, a koji proizlaze iz neusklađenosti ove tehnologije sa postojećim okvirima i strukturama. Osnovni razlog iz kojeg navedeni problemi proizlaze je sukob između fragmentarnosti postojećih praksi i kolaboracije na kojoj se BIM temelji. Za rješavanje ovih problema potrebna je standardizacija novih oblika ugovora ili standardni oblik dodatka postojećim ugovorima koji podupiru kolaboraciju

što potiče uspješniju implementaciju BIM-a. Razina primjene BIM-a u Republici Hrvatskoj još je uvijek niska, ali su vidljivi pozitivni pomaci prema široj primjeni, osobito kroz pojedinačne primjere javnih investitora i razvoja smjernica za BIM od strane stručnih organizacija. Uočljivo je da ugovorni okviri za BIM projekte u RH još uvijek nisu razvijeni, što otežava njegovu širu i sustavniju primjenu u praksi. Ipak, stručne organizacije u RH prepoznaju izazove koje je potrebno sagledati prilikom ugovaranja BIM projekata. Kao i u drugim državama svijeta, daljnja standardizacija i razvoj odgovarajućih ugovornih mehanizama ključni su za poticanje i osiguranje pravilne primjene BIM-a u RH. Daljnji razvoj ove teme podrazumijevao bi detaljnu usporedbu postojećih pravnih i ugovornih okvira te postojećih standarda na temelju čega bi se mogle razviti smjernice za odabir ispravnih oblika ugovaranja za uspješnu implementaciju BIM-a.

Literatura

- [1] Lee Yuan Jun, Zul Zakiiuddin Ahmad Rashid, Mohd Hanizun Hanafi, Mohd. Nasrun Mohd Nawi, i Shuaib Muhd Rabi: A Contractual Framework on Legal Obligations for Professional Designers in Building Information Modelling, *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* 33 (2023) 2, pp. 120–137.
- [2] Arrotéia, A.V., Freitas, R.C., i Melhado, S.B.: Barriers to BIM Adoption in Brazil, *Frontiers in Built Environment* 7 (2021), pp. 520154.
- [3] Universiti Teknologi MARA, Syed Alwee, S.N.A., Ismail, N.A.A., Universiti Teknologi MARA, Zolkafli @ Zulkifly, U.K., Universiti Malaya, Salleh, H., Universiti Malaya, Abd. Jamil, A.H., i Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah: Exploring the Legal and Contractual Impediments in BIM-based Application: A Systematic Literature Review, *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology* 15 (2024) 1, pp. 175–193.
- [4] Saad Alotaibi, B., Waqar, A., Radu, D., M.Khan, A., Dodo, Y., Althoey, F., i Almujiabah, H.: Building information modeling (BIM) adoption for enhanced legal and contractual management in construction projects, *Ain Shams Engineering Journal* 15 (2024) 7, pp. 102822.
- [5] Di Giuda, G.M., Villa, V., i Giana, P.E.: COLLABORATIVE CONTRACT WITH BUILDING INFORMATION MODELLING: COMPARISON BETWEEN USA AND EUROPEAN APPROACH, *Proceedings of International Structural Engineering and Construction* 4 (2017) 1
- [6] Eschenbruch, K., i Bodden, J.L.: Integrating BIM in Construction Contracts, *Building Information Modeling* (2018), pp. 303–314.

- [7] Manzanares, F.V., García-Segura, T., i Pellicer, E.: Contract Conditions and BIM Use Effectiveness to Improve Project Performance, *Advances in Civil Engineering 2023* (2023), pp. 1–11.
- [8] Assaad, R., El-adaway, I.H., El Hakea, A.H., Parker, M.J., Henderson, T.I., Salvo, C.R., i Ahmed, M.O.: Contractual Perspective for BIM Utilization in US Construction Projects, *Journal of Construction Engineering and Management* 146 (2020) 12, pp. 04020128.
- [9] Alwash, A., Love, P.E.D., i Olatunji, O.: Impact and Remedy of Legal Uncertainties in Building Information Modeling, *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction* 9 (2017) 3, pp. 04517005.
- [10] Ho, P.H.K.: Mapping out BIM Contract Conditions by Way of a Comparative Study, *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction* 13 (2021) 1, pp. 05020017.
- [11] Nilchian, S., Majrouhi Sardroud, J., Darabpour, M., i Tavousi Tafreshi, S.: Features and Conditions of Building Information Modeling Contracts, *Buildings* 12 (2022) 11, pp. 1839.
- [12] Chong, H.-Y., Fan, S.-L., Sutrisna, M., Hsieh, S.-H., i Tsai, C.-M.: Preliminary Contractual Framework for BIM-Enabled Projects, *Journal of Construction Engineering and Management* 143 (2017) 7, pp. 04017025.
- [13] Hamdi, O., i Leite, F.: Conflicting Side of Building Information Modeling Implementation in the Construction Industry, *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction* 6 (2014) 3, pp. 03013004.
- [14] Erpay, M.Y., i Sertyesilisik, B.: Preliminary checklist proposal for enhancing BIM-based construction project contracts, *Journal of Information Technology in Construction* 26 (2021), pp. 341–365.
- [15] Din, Z.U., Ather, W., i Gibson, G.E.: Strategies of BIM Application with Traditional Project Delivery Method: A Case of Building Construction Industry in Pakistan, *Construction Research Congress 2020* (2020), pp. 613–621.
- [16] Fan, S.-L., Lee, C.-Y., Chong, H.-Y., i Skibniewski, M.J.: A CRITICAL REVIEW OF LEGAL ISSUES AND SOLUTIONS ASSOCIATED WITH BUILDING INFORMATION MODELLING, *Technological and Economic Development of Economy* 24 (2018) 5, pp. 2098–2130.
- [17] Valkova, A.-M.: FIDIC and digital technologies in construction project management. Building information modelling, 18 (2022) 1
- [18] Gibbs, D.-J., Emmitt, S., Lord, W., i Ruikar, K.: BIM and construction contracts – CPC 2013's approach, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law* 168 (2015) 6, pp. 285–293.

- [19] Fan, S.-L., Chong, H.-Y., Liao, P.-C., i Lee, C.-Y.: Latent Provisions for Building Information Modeling (BIM) Contracts: A Social Network Analysis Approach, *KSCE Journal of Civil Engineering* 23(2019) 4, pp. 1427–1435.
- [20] Dao, T.-N., Chen, P.-H., i Nguyen, T.-Q.: Critical Success Factors and a Contractual Framework for Construction Projects Adopting Building Information Modeling in Vietnam, *International Journal of Civil Engineering* 19(2021) 1, pp. 85–102.
- [21] Kolarić, S., Vukomanović, M., i Bogdan, A.: Analysis of the use of BIM in Croatian construction industry, *Grđevinar* 72(2020) 3, pp. 205–214.
- [22] Perić, R., Vukomanović, M., i Krstić, H.: The Importance of Project Management in the Early Stages of a BIM-Led Project: A Case Study of the Construction of Judicial Square in Zagreb, *Proceedings of the 6th IPMA SENET Project Management Conference "Digital Transformation and Sustainable Development in Project Management"* (2023), pp. 303–335.
- [23] Dolaček-Alduk, Z., Šimenić, D., Galić, D., Cerinski, M.P., Andabaka, F., Šolman, H., Ecimović, A., Grošić, M., Džajić, I., Stober, D., i Lovrec, N.D.: Guidelines for BIM approach in infrastructure projects, *7th International Conference on Road and Rail Infrastructure* (2024)
- [24] Andabaka, F., Dolaček-Alduk, Z., Ecimović, A., Galić, D., Grošić, M., Pavlović Cerinski, M., Šimenić, D., i Šolman, H.: Smjernice za BIM pristup u infrastrukturnim projektima, (2021)

Prediktivno održavanje tramvajskih kolosijeka na čvrstoj podlozi primjenom tehnologije digitalnog blizanca

Franka Meštrović¹, izv. prof. dr. sc. **Ivo Haladin²**

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

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

Sažetak

primjenu naprednih metoda upravljanja infrastrukturom, osobito u kontekstu tramvajskih kolosijeka koji su kontinuirano izloženi složenim dinamičkim opterećenjima. Unatoč prednostima kolosijeka na čvrstoj podlozi, poput stabilnosti, dugotrajnosti i smanjenih troškova održavanja, ovi sustavi su podložni degradaciji zbog cikličkih opterećenja i vibracija, što može negativno utjecati na sigurnost i ekonomsku održivost. U tom kontekstu, prediktivno održavanje temeljeno na tehnologiji digitalnog blizanca ističe se kao jedno od mogućih rješenja. Digitalni blizanc predstavlja virtualni model fizičkog sustava koji se u stvarnom vremenu ažurira operativnim podacima prikupljenim pomoću senzora, čime se omogućuje pravovremeno prepoznavanje anomalija, simulacija procesa degradacije i optimizacija aktivnosti održavanja.

Gljučne riječi: digitalni blizanc, tramvajski kolosijek, čvrsta podloga, prediktivno održavanje, dinamički utjecaji

Predictive maintenance of slab tram tracks using digital twin technology

Abstract

The development of sustainable urban transport systems requires the implementation of advanced infrastructure management methods, particularly in the context of tram tracks that are continuously exposed to complex dynamic loads. Despite the advantages of tracks on solid foundations, such as stability, durability, and reduced maintenance costs, these systems remain susceptible to degradation caused by cyclic loads and vibrations, which can negatively impact safety and economic sustainability. In this context, predictive maintenance based on digital twin technology emerges as a potential solution. A digital twin represents a virtual model of a physical system that is updated in real time with operational data collected via sensors, enabling timely anomaly detection, simulation of degradation processes, and optimization of maintenance activities.

Key words: digital twin, tram track, slab track, predictive maintenance, dynamic effects

1 Uvod

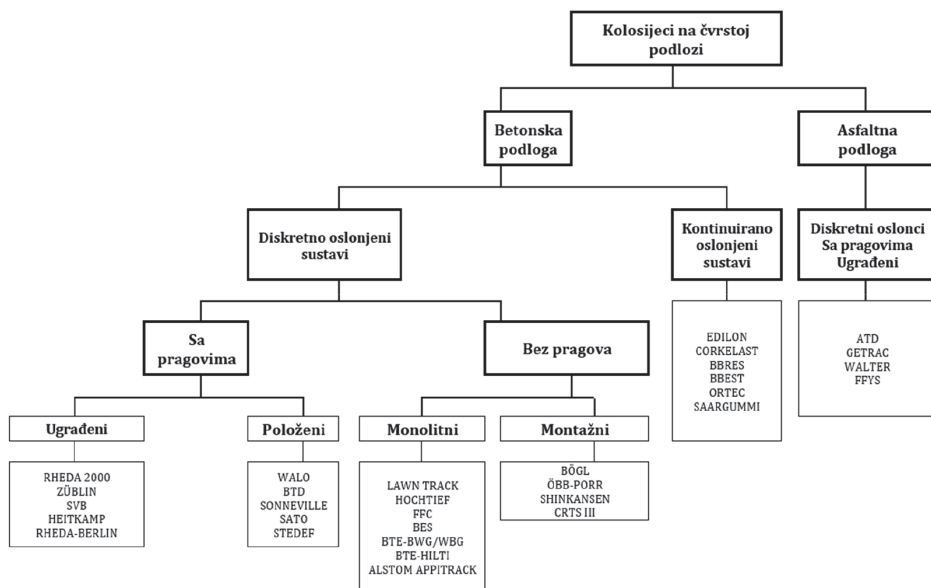
Intenzivna urbanizacija i porast zahtjeva za javnim gradskim prijevozom stavljaju sve veći naglasak na pouzdanost i učinkovitost prometne infrastrukture. Tramvajski kolosijeci, osobito oni izvedeni na čvrstoj podlozi, sve se češće primjenjuju u suvremenim prometnim sustavima zbog svojih prednosti u pogledu stabilnosti, dugotrajnosti i smanjene potrebe za održavanjem. Međutim, unatoč navedenim prednostima, kolosijeci na čvrstoj podlozi izloženi su složenim dinamičkim utjecajima koji uključuju ciklička opterećenja, vibracije i promjene u interakciji kotača i tračnica. Navedeni utjecaji mogu dovesti do degradacije kolosiječne konstrukcije, smanjenja udobnosti vožnje te povećanja troškova održavanja, osobito ukoliko se nedostaci ne uoče na vrijeme. U skladu s time, suvremeni pristupi održavanju željezničke infrastrukture sve se više oslanjaju na napredne digitalne tehnologije. Jedan od perspektivnih pristupa je digitalni blizanac (engl. *digital twin*), tehnologija koja predstavlja virtualni model stvarnoga sustava, čije je ponašanje moguće pratiti u realnom vremenu. Integracijom podataka prikupljenih uređajima i senzorima, numeričkim modeliranjem konstrukcije te primjenom umjetne inteligencije, digitalni blizanac može pratiti ponašanje kolosijeka, analizirati dinamičke utjecaje i predviđati buduće nedostatke konstrukcije. Cilj ovog rada je analizirati dosegnutu razinu istraživanja u području primjene tehnologije digitalnih blizanaca u svrhu praćenja stanja kolosiječnih konstrukcija na čvrstoj podlozi i sustava prediktivnog održavanja.

2 Tramvajski kolosijek na čvrstoj podlozi

Iako se većina željezničkih pruga još uvijek temelji na klasičnim kolosijecima sa zastornom prizmom, sve veća ograničenja takvih sustava u pogledu prometnog kapaciteta, potrebe za održavanjem i ostvarivanjem većih brzina ukazali su na potrebu za alternativnim rješenjima [1]. Posljednjih desetljeća intenzivno se razvijaju kolosijeci na čvrstoj podlozi, pri čemu se zastorna prizma zamjenjuje stabilnijim materijalima poput betona ili asfalta (Slika 1) [2]. Takva rješenja sve se više primjenjuju zbog svojih tehničkih i eksploatacijskih prednosti, poput produženog životnog vijeka i otpornosti na vanjske utjecaje, što izravno smanjuje troškove održavanja i potrebu za intervencijama. Primjena čvrste podloge omogućuje očuvanje geometrijske točnosti kolosijeka, visoku stabilnost konstrukcije te smanjenje deformacija izazvanih dinamičkim opterećenjima i temperaturnim promjenama. Smanjena konstruktivna visina i ukupna masa sustava omogućuju njegovu prilagodbu u ograničenim uvjetima, što ga čini pogodnim za primjenu u urbanim sredinama i na objektima. Također, tehnologija izvedbe s modularnim elementima omogućuje bržu izgradnju i optimizaciju troškova [2, 3].

Tramvajski sustavi predstavljaju važnu sastavnicu funkcionalnih i učinkovitih gradskih prometnih mreža zahvaljujući visokoj frekvenciji prometa, prilagodljivo-
sti urbanim uvjetima i utjecaju na smanjenje prometnih gužvi. Budući da tramvaji
prometuju kroz prostorno ograničene koridore gusto naseljenih gradskih središta
te često dijele prometnu površinu s cestovnim vozilima, nužna su rješenja koja
omogućuju visoku učinkovitost u takvim uvjetima. Obzirom na navedeno, kolosi-
jeci na čvrstoj podlozi predstavljaju povoljno rješenje za modernizaciju tramvaj-
skih sustava i njihov daljnji razvoj, osiguravajući stabilnost te točnost geometrije
kolosijeka i pri visokim ponavljajućim opterećenjima, manjim brzinama i krivina-
ma manjih polumjera.

Također, smanjena je potreba za čestim održavanjem, što je ključno za minimali-
zaciju zastoja u prometno opterećenim područjima [4].



Slika 1. Podjela kolosijeka na čvrstoj podlozi [1,2]

Dinamički utjecaji na željeznički kolosijek prvenstveno proizlaze iz prometnog op-
teretjenja, gdje kombinacija statičkih i dinamičkih sila uzrokuje složene interakcije
s kolosiječnom konstrukcijom i temeljnim tlom. Drugi značajan aspekt je interak-
cija između kotača i tračnice. Neravnine na voznoj površini tračnica i geometrija
glave tračnice, oblik kotača i ispusta vijenca kotača, konusni oblik tramvajskih ko-
tača te geometrijska odstupanja kolosijeka po visini i smjeru, uključujući varijacije
u osnom razmaku ležajeva, mogu uzrokovati pojavu dinamičkih udara i vibracija
većih od dopuštenih vrijednosti [5].

Unatoč brojnim prednostima, kolosijeci na čvrstoj podlozi suočavaju se s određenim ograničenjima. Oštećenja elemenata konstrukcije uslijed složenih dinamičkih utjecaja, nedostatna automatizacija procesa izgradnje te složenost i trošak održavanja predstavljaju ključne izazove. Dinamički utjecaji mogu uzrokovati mehaničke degradacije: oštećenja nosive betonske podloge i sustava pričvršćenja uslijed zamora, pojavu pukotina na mjestu prijelaza između različitih kolosiječnih sustava, ubrzano trošenje tračnica i kotača te gubitak elastičnih svojstava pojedinih elemenata kolosiječne konstrukcije [5]. Uslijed oštećenja, te povećane krutosti sustava zbog zamjene zastorne prizme sa čvrstom podlogom, povećan je prijenos vibracija i buke prema okolini [6]. Nadalje, izazov predstavlja osjetljivost kolosijeka na slijeganja tla, budući da prekoračenje graničnih vrijednosti tijekom uporabnog vijeka može dovesti do narušavanja geometrije kolosijeka te zahtijevati složene intervencije [7]. Također, prisutna fragmentacija tržišta, uzrokovana velikim brojem različitih tipova konstrukcija (Slika 1), dodatno pridonosi složenosti aktivnosti izvedbe i održavanja [2,8].

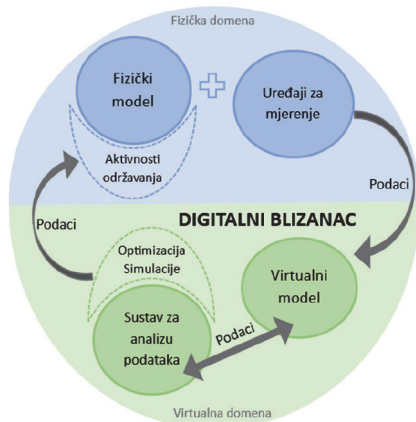
Upravo u kontekstu navedenih izazova, primjena tehnologije digitalnog blizanca pokazuje veliki potencijal. Implementacijom digitalnog blizanca moguće je u stvarnom vremenu pratiti stanje kolosiječne konstrukcije, analizirati opterećenja i utjecaje iz okoline te optimizirati raspored i aktivnosti održavanja na temelju stvarnih podataka. Time se povećava učinkovitost upravljanja infrastrukturom i dugoročno se smanjuju operativni troškovi uz povećanje razine sigurnost sustava [9].

3 Prediktivno održavanje željezničkih kolosijeka primjenom digitalnog blizanca

Digitalni blizanac je izvor podataka u obliku virtualnog modela fizičkog sustava koji omogućuje optimizaciju elemenata u fazi projektiranja, praćenje i analizu stanja (elemenata) sustava tijekom perioda eksploatacije te provođenje simulacija scenarija [10]. Korištenje digitalnih blizanaca u kombinaciji s drugim informacijskim i komunikacijskim tehnologijama, osobito umjetnom inteligencijom, 5G mrežom te strojnim i dubinskim učenjem, može unaprijediti upravljanje sustavima i omogućiti pravovremeno planiranje aktivnosti održavanja sustava [11].

Tehnologija digitalnog blizanca može se promatrati u fizičkoj i digitalnoj domeni (Slika 2), dok su komponente unutar i između domena povezane, čime je osigurana funkcionalnost digitalnog blizanca [12]. Fizičku domenu čini stvarna konstrukcija za koju se izrađuje digitalni blizanac te skup mjernih uređaja i senzora kojima se diskretno ili kontinuirano mjere fizikalne veličine od značaja za pojedinu analizu. U virtualnoj domeni izrađuje se numerički model koji služi za provođenje statičke i dinamičke analize, analitička ispitivanja te optimizaciju i parametriza-

ciju pojedinih geometrijskih ili karakteristika materijala. Vrijednosti zabilježene u fizičkoj domeni obrađuju se putem sustava za analizu podataka u virtualnoj domeni. Pomoću podataka prikupljenih kontinuiranim praćenjem stanja i diskretnim mjerenjima te korištenjem naprednih algoritama za obradu podataka, moguće je procijeniti trenutno i buduće stanje konstrukcije, detektirati anomalije te predvidjeti potencijalna oštećenja, čime se osigurava pravovremeno donošenje odluka i optimizacija aktivnosti održavanja [12].

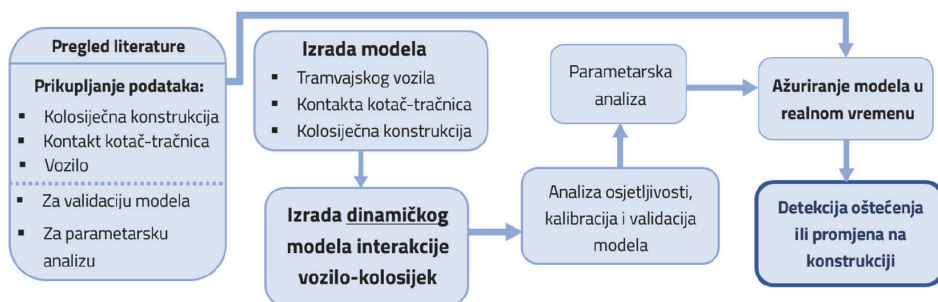


Slika 2. Fizička i virtualna domena koje čine izvor informacija – digitalni blizanci

S obzirom na složenost željezničkih sustava, možemo ih podijeliti na infrastrukturni i funkcionalni podsustav, sa daljnjom podjelom infrastrukturnog sustava na građevinski, elektroenergetski, prometno-upravljački i signalno-sigurnosni podsustav na kolosijeku i vozilu. Tijekom posljednjih godina napravljeni su značajni iskoraci u primjeni tehnologije digitalnog blizanca na razini navedenih podsustava, te se iz tog razloga istraživanje za ovaj rad fokusiralo na primjenu u građevinskom podsustavu. Tako je istražena primjena digitalnog blizanca na razvoj kolosiječnih konstrukcija [13-16], dok se najveći dio preostalih studija odnosi na razvoj digitalnih blizanaca za praćenje stanja građevinskih konstrukcija [17-19], kao što su mostovi i tuneli.

Tema ovog istraživanja odvija se u sklopu projekta URITMIS [20] kojem je u cilju uspostaviti sustav za prediktivno održavanje tramvajske infrastrukture, pri čemu se temeljna metodologija oslanja na analizu vibro-akustičkih signala prikupljenih putem senzora integriranih na okviru voznog postolja tramvaja koji sudjeluje u redovitom prometu [21]. Praćenje stanja kolosijeka pomoću mjernih željezničkih vozila predstavlja značajnu aktivnost suvremenih strategija održavanja, uz sve češću primjenu vozila koja sudjeluju u redovitom prometu [22,23]. Osim prikupljanja podataka u operativnim uvjetima, provode se i diskretne mjerne kampanje.

Ova dva komplementarna pristupa omogućuju cjelovitu procjenu stanja kolosije-ka: operativna mjerenja pružaju podatke o ponašanju pruge tijekom eksploataci-je, dok diskretna mjerenja omogućuju lokalizirano praćenje stanja kolosiječne konstrukcije [24]. U aktualnoj fazi istraživanja, naglasak je na eksperimentalnoj validaciji razvijene metodologije. Dinamičko ponašanje vozila ispituje se anali-zom transfer funkcija između kotača i okvira voznog postolja, čime se omogućuje identifikacija i kvantifikacija geometrijskih nepravilnosti tračnica na temelju sig-nala ubrzanja prikupljenih tijekom eksploatacije. Algoritmi za detekciju nedosta-taka razvijaju se primjenom naprednih metoda obrade signala i tehnika strojnog učenja, s naglaskom na automatiziranu procjenu kvalitete zavarenih spojeva i identifikaciju lokaliziranih oštećenja [20]. U skladu sa dosegnutom razinom is-traživanja na projektu, sljedeća faza uključuje razvoj numeričkog modela radi detaljne analize utjecaja pojedinih parametara i vanjskih dinamičkih utjecaja na ukupni dinamički odaziv sustava (Slika 3).



Slika 3. Tijek razvoja numeričkog modela tramvajske kolosiječne konstrukcije

Podaci se prikupljaju kontinuirano u fizičkoj domeni te se u stvarnom vremenu prenose u virtualnu, gdje se koriste za kalibraciju i validaciju dinamičkog modela interakcije vozilo–kolosijek. Tako prikupljeni podaci omogućuju detaljnu analizu utjecaja pojedinih parametara na dinamički odaziv konstrukcije te služe kao temelj za sustavno praćenje stanja infrastrukture u realnim eksploatacijskim uvje-tima.

Naime, zabilježeni podaci obrađuju se i analiziraju kako bi se kroz razvoj mode-la degradacije konstrukcije tijekom vremena, uz primjenu umjetne inteligencije i naprednih algoritama strojnog učenja, identificirali obrasci ponašanja te pred-vidjeli vremenski okviri mogućih oštećenja. Na temelju tih predikcija donose se konkretne operativne odluke o načinu, mjestu i vremenu intervencije, uz procjenu očekivanih tehničkih i ekonomskih učinaka izostanka održavanja [24].

Za napredak u području istraživanja prediktivnog održavanja, tijekom posljednjih par godina intenzivno se istražuje primjena digitalnog blizanca [25–27], obzirom da navedena tehnologija koristi podatke, kontinuirano i diskretno prikupljene

uređajima u stvarnom vremenu, kako bi se oštećenja predvidjela prije pojave te omogućilo proaktivno planiranje popravaka ili zamjene dotrajalih komponenti [28]. Napredak je ostvaren prvenstveno zahvaljujući primjeni naprednih tehnologija poput interneta stvari (engl. *Internet of Things, IoT*), umjetne inteligencije, dostupnosti velikih skupova podataka i povećanoj računalnoj snazi [11, 29].

Usprkos nizu navedenih prednosti, implementacija tehnologije digitalnog blizanca za prediktivno održavanje željezničkih kolosijeka suočava se s nizom izazova koji znatno usporavaju njezinu širu primjenu. Visoki inicijalni troškovi, vezani uz nabavu opreme i mjernih uređaja te uspostava infrastrukture za kontinuirano prikupljanje i obradu podataka, predstavljaju značajan izazov. Nadalje, podaci prikupljeni praćenjem željezničke infrastrukture imaju velik prostorno-vremenski obuhvat zbog linijskog karaktera željeznice i kontinuiranog prikupljanja podataka u stvarnom vremenu, provode se različitim metodama i uređajima, neujednačeni su (pretežno podaci o "standardnom" stanju naspram odstupanja/oštećenja) te sadrže izraženu razinu šuma prisutnog u rezultatima uzrokovanu raznolikim uvjetima okoline duž trase (teren, klima i performanse senzora) [24]. Održavanje digitalnog blizanca zahtijeva kontinuirano ažuriranje softvera, usklađivanje s promjenama u stvarnom sustavu i održavanje točnosti modela, što podrazumijeva potrebu za stalnim razvojem tehničkih znanja i vještina [11]. Mnogi algoritmi koji se koriste za obradu podataka i donošenje odluka zahtijevaju velike količine podataka za pouzdane rezultate kako bi se dosegla potrebna razina pouzdanosti, što je problematično obzirom da se rijetko dostigne slom (elementa) konstrukcije. Nadalje, modeli temeljeni na fizičkim zakonitostima izrazito su složeni, što ih čini vrlo zahtjevnima u pogledu resursa i stručnosti potrebne za njihovu izradu. Takvi modeli često imaju ograničenu mogućnost generalizacije jer su uglavnom prilagođeni za specifične konstrukcije. Također, integracija velikog broja uređaja i izvora podataka zahtijeva robusnu i standardiziranu digitalnu platformu što dovodi do složenosti i visokih troškova implementacije sustava i održavanja digitalne infrastrukture. Uz sve navedeno, pitanje zaštite podataka i kibernetičke sigurnosti postaje sve važnije [30].

Zbog složenosti željezničkih sustava, u održavanju infrastrukture od iznimne je važnosti pravodobno uvesti sustave kontinuiranog praćenja i prediktivnog održavanja te osigurati njihovu široku primjenu. S obzirom na planiranu primjenu ovdje predstavljene tehnologije na tramvajskim kolosijecima s čvrstom podlogom, prediktivno održavanje dobiva na dodatnoj važnosti zbog složenosti sustava i visokih troškova održavanja. Za razliku od klasičnih kolosijeka, zahvati na kolosijecima na čvrstoj podlozi su složeniji stoga je od značaja pravovremeno predvidjeti oštećenja i spriječiti otkazivanje elemenata konstrukcije [24].

4 Zaključak

Kroz provedeni pregled literature vidljivo je kako se primjena digitalnog blizanca u području željezničke infrastrukture, posebice kod kolosijeka na čvrstoj podlozi, sve više nameće kao važna tehnologija za povećanje učinkovitosti, sigurnosti i trajnosti sustava. Istraživanja su pokazala da digitalni blizanci omogućuju realno i detaljno praćenje stvarnog stanja (dijelova) infrastrukturnog sustava, te precizne simulacije opterećenja i ponašanja sustava u različitim uvjetima eksploatacije. Time se otvara mogućnost za daljnje razvijanje prediktivnog održavanja, koje znatno smanjuje operativne troškove i povećava pouzdanost sustava.

Većina istraživanja fokusira se na sustave brze željeznice te klasične željezničke kolosijeke, dok je primjena tehnologije digitalnog blizanca za specifičnosti tramvajskih kolosijeka, poput krivina manjih radijusa, čestih aktivnosti zaustavljanja/pokretanja te prolaska kroz urbane zone, slabije istražena. Implementacija digitalnih blizanaca u održavanje tramvajske infrastrukture, posebice u urbanim sredinama gdje su ciklička opterećenja značajna, a prometni zastoji imaju važan ekonomski i društveni utjecaj, predstavlja važan korak prema digitalnoj transformaciji održavanja infrastrukture javnog prijevoza. Korištenjem stvarnih podataka i naprednih numeričkih modela moguće je detaljnije razumjeti interakciju između željezničkih vozila, kolosiječne konstrukcije i podloge, što doprinosi donošenju informiranih odluka temeljenih na analizi u realnom vremenu. Osim toga, sustavi digitalnih blizanaca omogućuju simulaciju scenarija koji bi u stvarnosti bili ekonomski zahtjevniji ili kompleksniji za provođenje, čime se dodatno podiže razina sigurnosti i otpornosti sustava.

U konačnici, digitalni blizanci ne predstavljaju samo alat za tehničku analizu, već i temelj za razvoj pametne, održive i otporne prometne infrastrukture. Njihova uloga u modernizaciji željezničke infrastrukture biti će sve značajnija kako se tehnologije senzora, umjetne inteligencije i analiza velike količine podataka budu dalje razvijale. Buduća istraživanja i razvoj trebaju se usmjeriti na razvoj detaljnih numeričkih modela kolosiječne konstrukcije, razvoj sustava za praćenje i mjerenje te daljnju integraciju opisane tehnologije u svakodnevno upravljanje i održavanje infrastrukture.

Zahvala

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekta "URITMIS – Sustav prediktivnog održavanja urbane željezničke infrastrukture temeljen na praćenju vibroakustičnih svojstava kolosijeka" NPOO.C3.2.R2-I1.06.0001, koji se financira kao dio potpora za istraživanje i razvoj iz Nacionalnog plana oporavka i otpornosti, uz financiranje Europske komisije.

Literatura

- [1] S. Lakušić and M. Vajdić, "Kolosijeci na čvrstoj podlozi," in *Dani prometnica* 2008, Tehnički, ekonomski i ekološki aspekti, 2008, pp. 259–309.
- [2] M. Younos, "From Ballast to Slab: Transforming Rail Infrastructure for the Future," *American Journal of Construction and Building Materials*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2025, doi: 10.11648/j.ajcbm.20250901.11.
- [3] S. Lakušić and M. Vajdić, "Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama," 2011.
- [4] Coenraad. Esveld, *Modern railway track*. MRT-Productions, 2001.
- [5] Y. Bezin, D. Farrington, C. Penny, B. Temple, and S. Iwnicki, "The dynamic response of slab track constructions and their benefit with respect to conventional ballasted track," in *Vehicle System Dynamics*, 2010, pp. 175–193. doi: 10.1080/00423111003693201.
- [6] E. Ntotsios, D. J. Thompson, and M. F. M. Hussein, "A comparison of ground vibration due to ballasted and slab tracks," *Transportation Geotechnics*, vol. 21, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.trgeo.2019.100256.
- [7] A. Ramos et al., "Influence of track foundation on the performance of ballast and concrete slab tracks under cyclic loading: Physical modelling and numerical model calibration," *Constr Build Mater*, vol. 277, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122245.
- [8] I. Gailiene and A. Laurinavičius, "The need and benefit of slab track: Case of Lithuania," 2017, Union of Croatian Civil Engineers and Technicians. doi: 10.14256/JCE.1776.2016.
- [9] L. Rocha and G. Gonçalves, "Digital Twins as Enablers of Predictive Maintenance in Rail Transport Services," *International Journal on Advances in Software*, vol. 17, no. 3 & 4, pp. 153–164, 2024, [Online]. Available: www.iaria.org
- [10] B. Yan et al., "Digital twin in transportation infrastructure management: a systematic review," 2023, Oxford University Press. doi: 10.1093/iti/liad024.
- [11] W. Wang et al., "Digital Twins in Operation and Maintenance," in *Digital Twin Technologies in Transportation Infrastructure Management*, Springer Nature Singapore, 2024, pp. 179–203. doi: 10.1007/978-981-99-5804-7_6.
- [12] F. Sanfilippo, R. T. Thorstensen, A. Jha, Z. Jiang, and K. G. Robbersmyr, "A Perspective Review on Digital Twins for Roads, Bridges, and Civil Infrastructures," in *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988693.

- [13] M. Fernando Ariyachandra and A. Mrmf, "Understanding the challenge of digitally twinning the geometry of existing rail infrastructure," pp. 25–32, 2019, doi: 10.17863/CAM.47494.
- [14] S. Kaewunruen and Q. Lian, "Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems," *J Clean Prod*, vol. 228, pp. 1537–1551, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.156.
- [15] A. Kampczyk and K. Dybeł, "The fundamental approach of the digital twin application in railway turnouts with innovative monitoring of weather conditions," *Sensors*, vol. 21, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/s21175757.
- [16] Y. Tchana, G. Ducellier, and S. Remy, "Designing a Unique Digital Twin for Linear Infrastructures Lifecycle Management," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019, pp. 545–549. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.176.
- [17] M. R. M. F. Ariyachandra and I. Brilakis, "Application of railway topology for the automated generation of geometric digital twins of railway masts," in *ECPPM 2021 – eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, CRC Press, 2021, pp. 373–380. doi: 10.1201/9781003191476-52.
- [18] C. Ye et al., "A digital twin of bridges for structural health monitoring," in *Structural Health Monitoring 2019: Enabling Intelligent Life-Cycle Health Management for Industry Internet of Things (IIOT) - Proceedings of the 12th International Workshop on Structural Health Monitoring*, DEStech Publications Inc., 2019, pp. 1619–1626. doi: 10.12783/shm2019/32287.
- [19] E. Febrianto, L. Butler, M. Girolami, and F. Cirak, "Digital twinning of self-sensing structures using the statistical finite element method," *Data-Centric Engineering*, vol. 3, no. 3, Oct. 2022, doi: 10.1017/dce.2022.28.
- [20] I. Haladin, K. Burnač, M. Baniček, K. Vranešić, and N. Trifunović, "The possibility of using machine learning for network-wide predictive maintenance on urban railway tracks - URITMIS project overview," in *8th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, May 2024. doi: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2024.1510>.
- [21] I. Haladin, K. Vranešić, and K. Burnač, "Monitoring stanja tračničke infrastrukture na temelju podataka prikupljenih konvencionalnim tračničkim vozilima," *Dani HKIG*, Opatija, 2023.
- [22] Á. Vinkó and P. Bocz, "Experimental investigation on condition monitoring opportunities of tramway tracks," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 62, no. 1, pp. 180–190, 2018, doi: 10.3311/PPci.10541.
- [23] Y. T. Mulyadi, M. Rifqi, R. Putra, Y. Yunazwin Nazaruddin, and M. I. Mandasari, "Digital Twin Model Development for Autonomous Tram Localization," 2022.

- [24] G. Bianchi, C. Fanelli, F. Freddi, F. Giuliani, and A. La Placa, "Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance," Jan. 01, 2025, SAGE Publications Inc. doi: 10.1177/16878132241285631.
- [25] G. D. Doubell, A. H. Basson, K. Kruger, and P. D. F. Conradie, "A Digital Twin System for Railway Infrastructure," R&D Journal, Aug. 2023, doi: 10.17159/2309-8988/2023/v39a3.
- [26] M. H. Le-Nguyen, F. Turgis, P. E. Fayemi, and A. Bifet, "Real-time learning for real-time data: online machine learning for predictive maintenance of railway systems," in Transportation Research Procedia, Elsevier B.V., 2023, pp. 171–178. doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.391.
- [27] L. De Donato et al., "Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture," J Reliab Intell Environ, vol. 9, no. 3, pp. 303–317, Sep. 2023, doi: 10.1007/s40860-023-00208-6.
- [28] S. Ma, K. A. Flanagan, and M. Bergés, "State-of-the-Art Review: The Use of Digital Twins to Support Artificial Intelligence-Guided Predictive Maintenance," Jun. 2024, doi: 10.48550/arXiv.2406.13117.
- [29] O. Serradilla, E. Zugasti, J. Rodriguez, and U. Zurutuza, "Deep learning models for predictive maintenance: a survey, comparison, challenges and prospects," Applied Intelligence, vol. 52, no. 10, pp. 10934–10964, Aug. 2022, doi: 10.1007/s10489-021-03004-y.
- [30] W. A. Ali, M. Roccotelli, and M. P. Fanti, "Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review," in 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 576–581. doi: 10.1109/CoDIT55151.2022.9804017.

Evaluating Soil Liquefaction Susceptibility Using CPT Data: A Case Study from Brest Pokupski

Antonia Mirčeta¹, izv. prof. dr. sc. **Lovorka Librić²**, izv. prof. dr. sc. **Mario Bačić³**,
prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević⁴**

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, antonia.mirceta@grad.unizg.hr

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

³Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mario.bacic@grad.unizg.hr

⁴Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

Abstract

This paper presents a method for assessing the probability of liquefaction based on results from the Cone Penetration Test (CPT). The procedure is based on comparing the cyclic shear stress induced by an earthquake with the soil's resistance to liquefaction. All required steps and corrections are described in detail, and an example is provided for evaluating liquefaction potential in the village of Brest Pokupski following the 2020 earthquake near the town of Petrinja.

Key words: liquefaction, CPT, cone penetration test, cyclic shear stress, CRR, CSR, factor of safety

Korištenje CPT metode za procjenu podložnosti tla na likvefakciju: primjer Bresta Pokupskog

Sažetak

U radu je prikazana metoda procjene vjerojatnosti pojave likvefakcije temeljem rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT). Postupak se temelji na usporedbi cikličkog posmičnog naprezanja uzrokovnog potresom i otpornosti tla na likvefakciju. Detaljno su opisani svi potrebni koraci i korekcije, a prikazan je i primjer određivanja potencijala likvefakcije u naselju Brest Pokupski nakon potresa koji je 2020. godine pogodio područje Petrinje.

Ključne riječi: likvefakcija, CPT, statički penetracijski pokus, cikličko posmično naprezanje, CRR, CSR, faktor sigurnosti

1 Introduction

Liquefaction is a phenomenon involving the loss of bearing capacity in saturated, loose soils due to cyclic loading, most commonly caused by earthquakes. It results in a significant reduction in the soil's shear strength, which can lead to severe damage to building foundations, roads, and other infrastructure. The assessment of liquefaction potential is based on comparing the seismic demand, expressed as cyclic shear stress, with the soil's resistance to such loading. Various methods are used for this purpose, the most common being the Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT), geophysical shear wave - based techniques, and the Becker Penetration Test (BPT).

As noted by Bačić et al. [1], although laboratory testing methods provide the most accurate assessments, in practice in-situ tests are more commonly employed due to their efficiency, lower cost, and repeatability. Among them, the Cone Penetration Test (CPT) stands out for its ability to provide continuous profiling without disturbing the soil structure and for its strong empirical correlations with liquefaction occurrence. During a CPT, an instrumented cone is pushed into the ground at a constant rate, while measurements are taken of the cone tip resistance q_c , sleeve friction f_s , and pore water pressure u_2 . From these measurements, additional parameters are derived, such as the soil behavior type index SBT and the normalized clean sand equivalent resistance q_{c1Ncs} , which are then used to calculate the factor of safety and the probability of liquefaction triggering.

For a comprehensive assessment, it is also necessary to determine the soil stratigraphy, bulk unit weight, and fines content, as these parameters significantly influence the soil's resistance to cyclic loading. In this study, all of these parameters are estimated based on correlations with CPT data. The soil layering is identified using an algorithm for vertical profiling [2], the bulk unit weight is estimated using regression models tailored for northern Croatia [3] and the fines content is evaluated using artificial neural networks and analytical expressions developed to correlate CPT measurements with fines content [4].

In the following sections, the application of a CPT-based liquefaction evaluation method is presented using a case study from Brest Pokupski, a village located near the epicenter of the 2020 Petrinja earthquake ($M_w = 6.4$). The area experienced intense ground shaking, with recorded peak ground acceleration (PGA) values reaching up to 0.77 g, which contributed to widespread ground damage and manifestations of liquefaction. The analysis follows the procedure developed by Boulanger and Idriss [5].

2 Methodology for Evaluating Liquefaction Potential

To evaluate the probability of soil liquefaction under seismic loading conditions, this study employs a method based on Cone Penetration Test (CPT) data [5]. The seismic demand is quantified using the Cyclic Stress Ratio CSR , while the soil resistance to liquefaction is expressed as the Cyclic Resistance Ratio CRR . The assessment is based on comparing these two parameters, with additional empirical correction factors applied to account for site-specific conditions and earthquake characteristics.

At the beginning of the analysis, CPT measurements are collected: cone tip resistance q_c , sleeve friction f_s and pore water pressure u_2 . These are supplemented by seismic input parameters, including the peak ground acceleration PGA expressed in units of gravity (a_{max}/g) and the moment magnitude M of the earthquake. The groundwater level GWL must also be defined to distinguish between saturated and unsaturated soil layers.

The bulk unit weight of soil γ is estimated using empirical correlations [3], allowing the calculation of the total vertical stress σ_v . The pore water pressure u_0 is computed assuming hydrostatic conditions, depending on the depth below the groundwater level GWL . Above the groundwater table, the pore water pressure is assumed to be zero; in saturated zones, it increases linearly with depth. The effective vertical stress σ'_v is then obtained by subtracting the in-situ pore water pressure: $\sigma'_v = \sigma_v - u_0$. These stress values enable the calculation of the Cyclic Stress Ratio (CSR), which represents the seismic demand in the soil:

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (1)$$

where r_d is the depth reduction factor, which varies with depth and earthquake magnitude.

Further, a correction of the cone tip resistance for overburden stress is applied using the expression:

$$q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_c}{P_a} \quad (2)$$

where C_N is the correction factor calculated as a function of the effective vertical stress σ'_v , and P_a is the reference atmospheric pressure. This yields the normalized cone resistance, allowing for comparison between soil layers at different depths. The vertical soil profile is derived based on the Soil Behavior Type Index SBT , which is computed from CPT data. This index enables soil classification and identification of layers susceptible to liquefaction. The profiling procedure follows the

methodology presented in [2], which allows for automated vertical stratification using continuous CPT records.

The normalized resistance is then further corrected to a clean sand equivalent to eliminate the influence of fines content, resulting in the clean sand adjusted cone resistance q_{c1Ncs} . In this study, the fines content is estimated using empirical correlations with CPT parameters developed specifically for soils in Croatia [4]. This correction is essential for evaluating liquefaction resistance using empirical charts developed for clean sands or sands with low fines content.

Finally, based on the corrected resistance q_{c1Ncs} , the cyclic resistance ratio under standard reference conditions ($CRR_{M=7.5, \sigma'v=1 \text{ atm}}$) is determined using the empirical correlations proposed in [5]:

$$CRR = \exp \left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right) \quad (3)$$

The obtained cyclic resistance ratio (CRR) is then corrected for magnitude effects using the Magnitude Scaling Factor (MSF) and for effective stress effects using the K_σ factor, according to the following expression:

$$CRR = CRR_{M=7.5, \sigma'v=1 \text{ atm}} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (4)$$

The MSF is used to adjust the liquefaction resistance of the soil for earthquakes of different magnitudes. Since the empirical CRR correlations are derived for a reference magnitude of $M = 7.5$, scaling is required for other magnitudes. Larger earthquakes involve a greater number of loading cycles and therefore pose a higher risk of liquefaction, which results in $MSF < 1$ for $M > 7.5$, and $MSF > 1$ for $M < 7.5$. The K_σ factor accounts for the influence of effective vertical stress on the liquefaction resistance. This factor typically ranges between 0.8 and 1.2, and is also determined using empirical correlations.

By comparing the corrected values of CRR and CSR , the factor of safety FS against liquefaction is calculated:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (5)$$

A factor of safety FS less than 1.0 indicates a potential for liquefaction, while values greater than 1.0 suggest that the soil's resistance exceeds the imposed seismic demand. For the purpose of quantitative risk assessment, a probabilistic model proposed by Juang et al. [6] is used, in which the probability of liquefaction occurrence with depth (PL) is calculated as:

$$PL = \frac{1}{(1 + FS)^{3.3}} \quad (6)$$

3 Evaluation of Liquefaction Potential in Brest Pokupski After the 2020 Earthquake

On 29 December 2020, a destructive earthquake with a moment magnitude M_w of 6.4 struck central Croatia. The epicenter was located approximately 3 km southwest of the town of Petrinja, at a depth of about 10 km. The earthquake caused widespread material damage, including severe structural failures and building collapses in Petrinja, Glina, Sisak, and nearby settlements. Tragically, the event resulted in 7 fatalities and more than 20 people injured, while thousands were displaced from their homes.

One of the most severely affected locations was the village of Brest Pokupski, situated approximately 3.2 km southwest of central Petrinja, while the epicenter was just 3.3 km from the village. According to the United States Geological Survey (USGS), the mainshock generated a peak ground acceleration PGA of 0.77 g, indicating extremely strong ground shaking in the affected area.

This unusually high PGA value helps explain the extent and severity of structural damage, as well as the occurrence of multiple geotechnical failures in Brest Pokupski, including widespread ground deformations, sand boils, and lateral spreading – all of which are characteristic indicators of soil liquefaction. An example of sand ejecta with visible surface cracks is shown in Figure 1a, while saturated sand deposits, sampled during investigation work campaign, are shown in Figure 1b.



Figure 1. Evidence of soil liquefaction in the village of Brest Pokupski: a) sand ejecta and surface cracks, b) saturated sand deposits

For the purpose of assessing liquefaction potential, extensive geotechnical investigations were carried out, including borehole drilling with continuous coring and Standard Penetration Tests (SPT), Cone Penetration Tests (CPT), laboratory testing of soil samples, and geophysical surveys using seismic refraction and Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). The locations of the CPT soundings are shown in Figure 2.

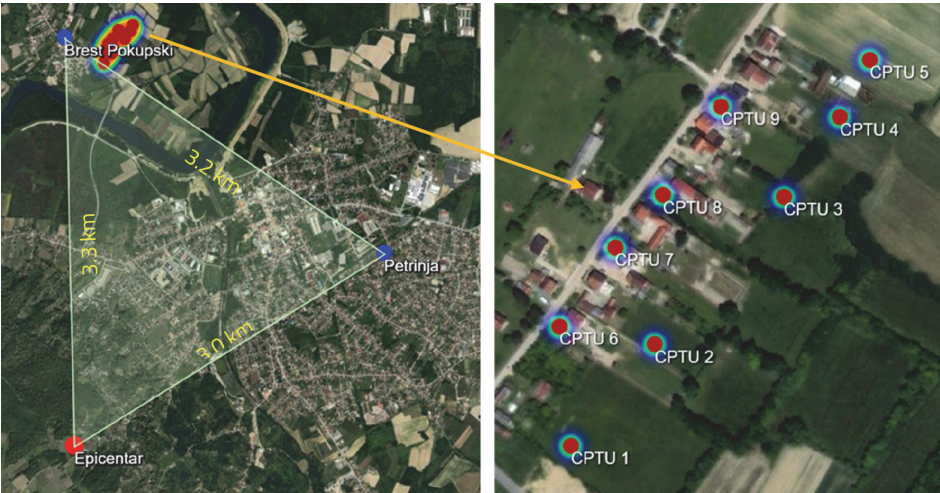


Figure 2. Spatial distribution of CPT investigation points in Brest Pokupski

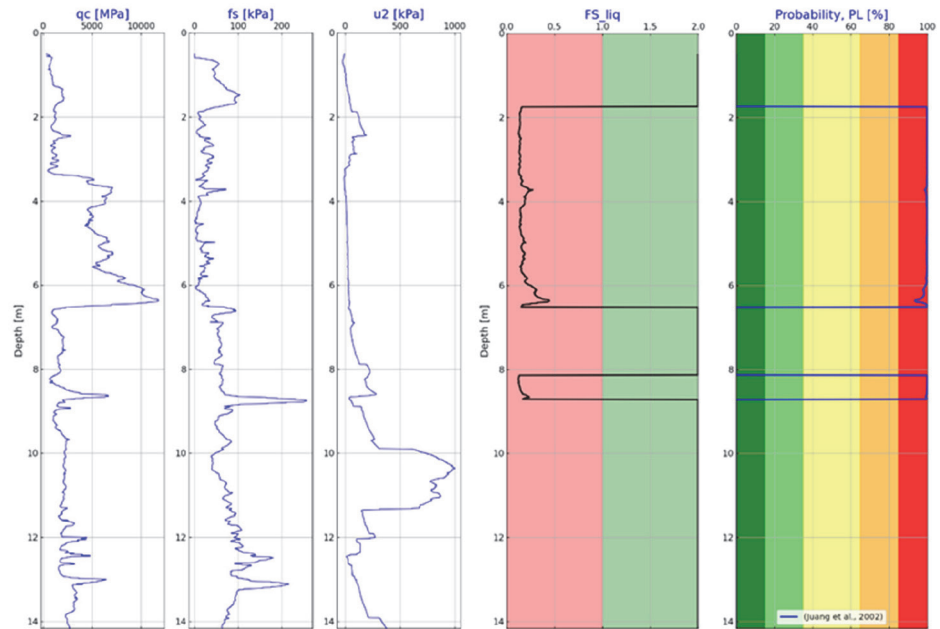


Figure 3. CPT results and liquefaction probability assessment at sounding location CPT 5

As an example, Figure 3 presents the results from one of the CPTs (CPT5), including measured values of cone tip resistance q_c , sleeve friction f_s , and pore water pressure u_2 , as well as the computed factor of safety FS against liquefaction and the probability of liquefaction PL with depth. Depth intervals with an increased risk of liquefaction are highlighted, with the most critical layer identified between 1.8 and 6.5 meters, where a very low safety factor ($FS \approx 0.21$) and a high liquefaction probability ($PL \approx 98.95\%$) were observed. Figure 4 shows the liquefaction triggering chart with data from Brest Pokupski included ($a_{\max} = 0.77$ g, $M = 6.4$).

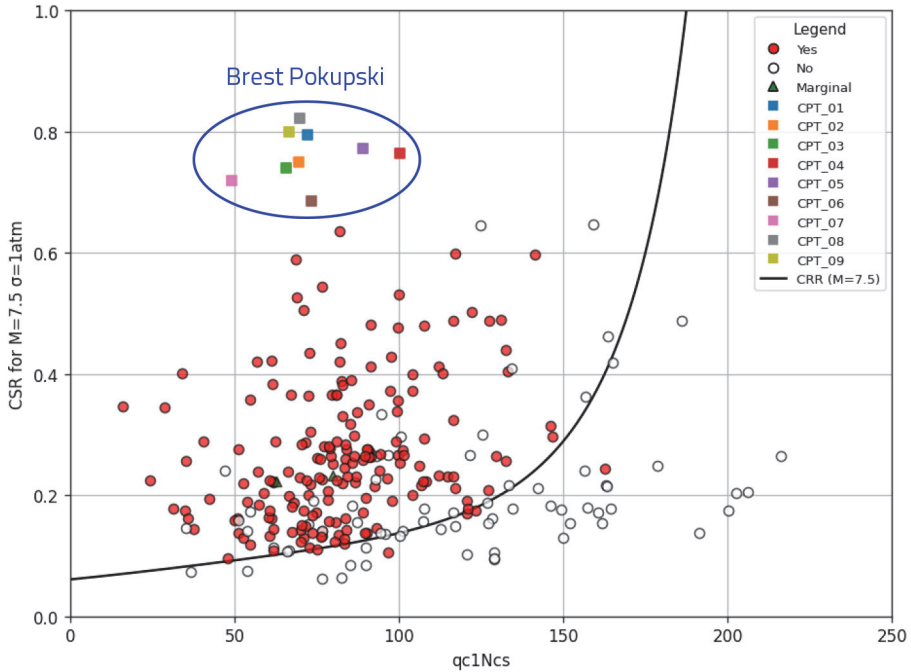


Figure 4. Liquefaction triggering chart with data from Brest Pokupski

The chart in Figure 4 shows the critical soil layers identified from nine CPT profiles, defined as the shallowest saturated layers thicker than 1 meter, in which the factor of safety FS remains consistently below 1.0. These layers were selected as the most representative in terms of liquefaction risk. The data points are color-coded, corresponding to different CPT locations, and represent zones with a high potential for liquefaction triggering under seismic loading.

In the background of the chart, the deterministic liquefaction resistance boundary (CRR line) is shown, as defined by Equation (3). This curve was developed based on the extensive empirical database compiled by Boulanger and Idriss [5], which includes more than 210 well-documented CPT case histories from 30

sites worldwide, covering a range of soil types, seismic intensities, and ground conditions. Each case was carefully evaluated to confirm whether liquefaction had occurred or not, and all data were normalized to reference conditions of $M = 7.5$ and $\sigma'_v = 1$ atm, ensuring consistency and comparability across sites.

In the $CSR-q_{c1Ncs}$ space, points plotted above the CRR line correspond to conditions under which liquefaction was observed, while those below the line are associated with non-liquefied cases. The data from Brest Pokupski are positioned entirely above the CRR line, and in many cases well beyond the upper boundary of the reference database, occupying a domain that suggests extreme seismic loading. This is primarily attributed to the peak ground acceleration PGA of 0.77 g, recorded very close to the epicenter, despite the moderate moment magnitude $M = 6.4$.

The concentration of data in this extreme region confirms both the exceptionally high seismic demand imposed on the site and the pronounced liquefaction susceptibility of the local soils. It also supports the robustness and sensitivity of the applied CPT-based evaluation method in identifying critical conditions. Furthermore, the consistency between observed surface manifestations (e.g., sand boils and lateral spreading) and calculated triggering conditions reinforces the validity of the methodology for use in post-earthquake forensic analysis and forward-looking hazard assessments.

4 Conclusion

This study presents the application of a CPT-based method for evaluating liquefaction potential, following the approach proposed by Boulanger and Idriss (2014), using the example of soils in the village of Brest Pokupski affected by the 2020 Petrinja earthquake. Analysis of nine CPT profiles revealed saturated soil layers thicker than 1 meter with consistently low factors of safety ($FS < 1.0$), where the probability of liquefaction reached up to 99%.

In the $CSR-q_{c1Ncs}$ chart, all data points from Brest Pokupski lie above the empirical CRR line, within the region of the reference database corresponding to confirmed liquefaction cases. This positioning is a consequence of the exceptionally high peak ground acceleration ($PGA = 0.77$ g) recorded near the epicenter, despite the earthquake's moderate magnitude ($M = 6.4$).

The method has proven to be reliable, effective, and applicable in practice, especially at sites where laboratory data are limited. Its application enables rapid and quantitatively grounded assessment of seismic soil vulnerability, although it remains sensitive to the accuracy of local groundwater depth estimations and to correlations used for fines content evaluation.

Acknowledgment

The part of this research was funded by Croatian Science Foundation (HRZZ), GA no° IP–2022–10-7608, project LeveeLiq (Mapping of the spatial variability of liquefaction potential below the levees and modelling of optimal mitigation techniques).

Literature

- [1] Bačić, M., Kovačević, M.S., Rossi, N., Librić, L. (2024): Assessing the Soil Liquefaction Susceptibility: A Comparative Study of CPT and MASW Techniques in the Aftermath of Road Failure. *In Proceedings of Road and Rail Infrastructure VIII (CETRA 2024)*. Lakušić, S. (ed.), Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024, 783-790, doi: 10.5592/CO/CETRA 2024.
- [2] Kovačević, M.S., Bačić, M., Librić, L., Žužul, P., Gavin, K., Reale, C: A novel algorithm for vertical soil layering by utilizing the CPT data, *6th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2020*, Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2020, pp. 327-334.
- [3] Kovačević, M.S., Gavin, K.G., Reale, C., Librić, L.: The use of neural networks to develop CPT correlations for soils in northern Croatia, *4th International Symposium on Cone Penetration testing*, Delft, The Netherlands: CRC Press, 2018. pp. 377-382.
- [4] Kovačević, M.S., Gavin, K., Reale, C., Librić, L., Jurić Kačunić, D: Developing correlations between the soil fines content and CPT results using neural networks, *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019*, Reykjavik 2019.244, 8.
- [5] Boulanger, R.W., Idriss, I.M.: *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, No. UCD/CGM-14/01, University of California, Davis, California, 2014.
- [6] Juang, C.H., Jiang, T., Andrus, R.D: Assessing probability-based methods for liquefaction evaluation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (2002)7, pp. 580-589.

IZVJEŠĆA O PROVEDENOM DODATNOM OBRAZOVANJU I USAVRŠAVANJU ZAPOSLENIKA

rujan 2024. - srpanj 2025.

Usavršavanje “Using Project Excellence Baseline (PEB) and Individual Competence Baseline (ICB) for the assessment of the project management excellence” u Cape Town-u

Kristijan Robert Prebanić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kristijan.robert.prebanic@grad.unizg.hr

Sažetak

Cilj dodatnog usavršavanja „Using Project Excellence Baseline (PEB) and Individual Competence Baseline (ICB) for the assessment of the project management excellence” u Cape Town-u je pružanje uvida u PEB i ICB model i način kako koristiti ove modele za ocjenu kvalitete projekata odnosno kvalitete upravljanja projektom. Model PEB često se koristi za ocjenjivanje velikih građevinskih infrastrukturnih projekata, a temelji se na tri stupa: ljudi i svrha, procesi i resursi te rezultati projekta. Svako od temeljnih područja koja se ocjenjuju sadrže niz indikatora, a sam pristup vrednovanju osigurava relativno veliku objektivnost (detaljni sustavi bodovanja). Model ICB jedan je od svjetski poznatijih modela za procjenu kompetencija voditelja projekta, a trenutno važeći ICB4 model naglasak stavlja na tri domene: kompetencije perspektive (kontekst), prakse (tehničke kompetencije) te kompetencije ljudi (biheviorističke kompetencije). Kompetentan voditelj (građevinskog) projekta je onaj koji sustavno primjenjuje razne kompetencije (iz svake od domena) odnosno onaj koji može prikazati znanje, vještine i sposobnost u ključnim trenucima u projektu i time aktivno utjecati na postizanje njegovog uspjeha.

Ključne riječi: modeli za ocjenjivanje, upravljanje projektima, procesi, kompetencije, voditelji projekata

Training “Using Project Excellence Baseline (PEB) and Individual Competence Baseline (ICB) for the assessment of the project management excellence” in Cape Town

Abstract

The goal of the additional training “Using Project Excellence Baseline (PEB) and Individual Competence Baseline (ICB) for the assessment of the project management excellence” in Cape Town is to provide insight into the PEB and ICB model and how to use these models to assess the quality of projects and the quality of project management. The PEB model is often used to evaluate large construction infrastructure projects, and is based on three pillars: people and purpose, processes and resources, and project results. Each of the fundamental areas that are evaluated contain a number of indicators, and the evaluation approach itself ensures relatively high objectivity (detailed scoring systems). The ICB model is one of the world’s most well-known models for assessing project manager competences, and the currently valid ICB4 model emphasizes three domains: perspective competences (context), practice (technical competences), and people competencies (behavioral competences). A competent manager of a (construction) project is one who systematically applies various competences (from each of the domains), that is, one who can demonstrate knowledge, skills and abilities at key moments in the project and thus actively influence its success.

Key words: assessment models, project management, projects, processes, competencies, project managers

Usavršavanje u SUSTAIN laboratoriju na Rosenstiel School of Marine, Atmospheric, and Earth Science u Miamiu, Floridi

Hanna Miličević

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet

Sažetak

Stručno usavršavanje provedeno na Rosenstiel School of Marine, Atmospheric, and Earth Science na Sveučilištu u Miamiu omogućilo je neposredan uvid u rad jednog od najnaprednijih laboratorija za simulaciju ekstremnih morskih uvjeta – SUSTAIN laboratorija. Tijekom boravka sudjelovalo se u istraživačkim aktivnostima vezanima uz ponašanje valne energije pri prolasku preko obalnih prepreka u uvjetima visokih brzina vjetra, koje se u ovom laboratoriju mogu generirati do 250 km/h. Uz praktičan rad i razmjenu znanja s lokalnim istraživačkim timom, ostvarena je i prilika za predstavljanje teme doktorskog istraživanja kroz stručno izlaganje. Usavršavanje je pridonijelo razvoju stručnih kompetencija i uspostavi međunarodne znanstvene suradnje, s naglaskom na povezivanje metodoloških pristupa i zajednički rad na budućim istraživačkim publikacijama.

Gljučne riječi: valna energija, SUSTAIN laboratorij, ekstremni valni uvjeti, vjetrovni valovi

Training at the SUSTAIN Laboratory, Rosenstiel School of Marine, Atmospheric, and Earth Science, Miami, Florida

Abstract

Professional training conducted at the Rosenstiel School of Marine, Atmospheric, and Earth Science at the University of Miami provided direct insight into the work of one of the most advanced laboratories for simulating extreme ocean conditions – the SUSTAIN laboratory. During the stay, participation in research activities focused on the behavior of wave energy as it interacts with coastal barriers under high wind speeds, which can be simulated in this laboratory up to 250 km/h. In addition to hands-on work and knowledge exchange with the local research team, the training also included the opportunity to present the topic of the doctoral research through a professional seminar. This experience contributed to the development of professional competencies and the establishment of international scientific cooperation, with an emphasis on methodological integration and collaborative work on future research publications.

Key words: wave energy, SUSTAIN laboratory, extreme wave conditions, wind-generated waves

Usavršavanje “9th International Course on Seismic Analysis of Structures using OpenSees: Finite Element-based Framework and Civil Engineering Applications” na Švicarskom saveznom tehnološkom institutu u Lausannei (EPFL)

dr. sc. Maja Baniček, Katarina Jajčević, Sara Vaing

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, maja.banicek@grad.unizg.hr, katarina.jajcevic@grad.unizg.hr, sara.vaing@grad.unizg.hr

Sažetak

Proljetna škola “9th International Course on Seismic Analysis of Structures using OpenSees” održana je od 5. do 7. ožujka 2025. na EPFL-u u Lausannei. Tečaj je fokusiran na korištenje softvera otvorenog koda OpenSees za seizmičku analizu konstrukcija, s naglaskom na nelinearne analize. Polaznici su kroz uvodne lekcije upoznati s osnovama OpenSees-a, njegovom Python implementacijom (OpenSeesPy) te osnovama programiranja u Pythonu i TCL-u. Praktični dio uključivao je modeliranje linearnih i složenijih konstrukcija, statičku i dinamičku analizu te metode koncentrirane i raspodijeljene plastičnosti. Predstavljena su dva grafička sučelja za modeliranje u OpenSees-u: STKO, napredni alat za profesionalnu primjenu, te SAMUEL, jednostavnije sučelje razvijeno za edukaciju i nelinearne analize. Tečaj je uključivao i radionice o naprednim materijalnim modelima, parametrizaciji i geotehničkom modeliranju. Sudjelovanje vodećih stručnjaka iz Švicarske, Italije i Kine dodatno je obogatilo edukaciju, pružajući korisne primjere prilagodbe OpenSees-a specifičnim inženjerskim potrebama.

Ključne riječi: OpenSees, nelinearne analize, programski jezici, modeliranje konstrukcija, grafička sučelja

“9th International Course on Seismic Analysis of Structures using OpenSees: Finite Element-based Framework and Civil Engineering Applications” at Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL)

Abstract

The Spring School “9th International Course on Seismic Analysis of Structures using OpenSees” was held from March 5 to 7, 2025, at EPFL in Lausanne. The course focused on using the open-source software OpenSees for seismic structural analysis, emphasizing nonlinear analyses. Participants were introduced to the basics of OpenSees, its Python implementation (OpenSeesPy), and programming fundamentals in Python and TCL. The practical part included modeling linear and more complex structures, static and dynamic analyses, and methods of concentrated and distributed plasticity. Two graphical user interfaces for modeling in OpenSees were presented: STKO, an advanced tool for professional use, and SAMUEL, a simpler interface developed for education and nonlinear analyses. The course also covered advanced material models, parameterization, and geotechnical modeling. Participation of leading experts from Switzerland, Italy, and China enriched the training by providing valuable examples of adapting OpenSees to specific engineering needs.

Key words: OpenSees, nonlinear analysis, programming languages, structural modeling, graphical interfaces

Usavršavanje „Railway Engineering: Track and Train Interaction“ i „Railway Engineering: Performance over Time“ na Tehničkom sveučilištu Delft

Franka Meštrović

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, franka.mestrovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Usavršavanje „Railway Engineering: Track and Train Interaction“ i „Railway Engineering: Performance over Time“ pod organizacijom Tehničkog sveučilišta u Delftu predstavlja ciklus on-line radionica posvećen proučavanju najnovijih saznanja u području željezničkog inženjerstva. Radionice nude pregled najnovijih postignuća u analizi interakcije vozila i kolosijeka, dinamičkih sila, buke, vibracija te utjecaja navedenih faktora na trajnost željezničke infrastrukture. Poseban naglasak stavljen je na sistematski pristup optimizaciji i održavanju, uključujući primjenu inovativnih metoda prediktivnog i preventivnog održavanja temeljenog na praćenju realnog stanja sustava. Sudionicima se kroz praktičan rad omogućuje analiza složenih studija slučaja i razvoj optimalnih rješenja održavanja, oslanjajući se na integraciju najvažnijih pokazatelja učinkovitosti sustava. Polaznici stječu stručna znanja i vještine primjenjive u znanstveno-istraživačkom radu i nastavi, s ciljem unapređenja razumijevanja i implementacije inovativnih rješenja u području održavanja i optimizacije željezničkih sustava.

Ključne riječi: željeznička infrastruktura, prediktivno održavanje, dinamičke sile, kontakt tračnica-kotač

Training “Railway Engineering: Track and Train Interaction” and “Railway Engineering: Performance over Time” at Delft University of Technology

Abstract

The training programs “Railway Engineering: Track and Train Interaction” and “Railway Engineering: Performance over Time”, organized by the Delft University of Technology, constitute a series of online workshops dedicated to exploring the latest knowledge in the field of railway engineering. The workshops offer an overview of recent advancements in the analysis of vehicle-track interaction, dynamic forces, noise, vibrations, and the impact of these factors on the durability of railway infrastructure. Special emphasis is placed on a systematic approach to optimization and maintenance, including the application of innovative methods for predictive and preventive maintenance based on real-time condition monitoring. Through hands-on work, participants engage in the analysis of complex case studies and the development of optimal maintenance strategies, relying on the integration of key system performance indicators. Participants acquire expert knowledge and skills applicable in scientific research and teaching, with the goal of enhancing the understanding and implementation of innovative solutions in the maintenance and optimization of railway systems.

Key words: railway infrastructure, predictive maintenance, dynamic forces, wheel-rail contact

SAŽECI OBRANJENIH DOKTORSKIH RADOVA

rujan 2023. - srpanj 2024.

Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju srpanj 2024. – srpanj 2025.

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
2024. godina	
Upravljanje rizicima prouzročenima informacijskom asimetrijom u građevinskim projektima dr. sc. Ivona Ivić	151
Karakterizacija i modeliranje aditivno proizvedenih polimernih TPMS rešetki za primjenu u konstrukcijama dr. sc. Lucija Stepinac	152
Utjecaj mineralnih dodataka na trajnost kalcij aluminatnoga cementa pri različitim temperaturama njegovanja dr. sc. Alma-Dina Bašić	153
Kvantifikacija vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju kolničke konstrukcije primjenom georadara dr. sc. Šime Bezina	154
Krutost i čvrstoća zagrebačke gline poboljšane raznim vezivima dr. sc. Željko Lebo	155
2025. godina	
Prijenos sila kroz zrnati materijal na pragu cikličke posmične deformacije dr. sc. Vedran Pavlić	156
Standardiziranje djelatnosti upravljanja projektima gradnje unutar sustava javne nabave u Republici Hrvatskoj dr. sc. Romano Perić	157
Razvoj betona uobičajene namjene sa smanjenim ekološkim otiskom dr. sc. Matea Flegar	158
Utjecaj crvenoga mulja na korozijska svojstva čelika u cementnim i alkalno aktiviranim mortovima dr. sc. Ivana Vladić Kancir	159
Ekspeditivna metoda procjene potresne oštećljivosti postojećih zidanih nearmiranih zgrada dr. sc. Karlo Ožić	160
Razvoj eksperimentalno zasnovanoga računskog modela za analizu potresne otpornosti hibridnoga panela sastavljenoga od CLT okvira i lameliranoga nosivog stakla dr. sc. Jure Barbalić	161

dr. sc. Ivona Ivić

Životopis

Rođena je 1995. u Koprivnici. Diplomirala je 2018. godine na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Od 2018. godine radi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a trenutno je zaposlena na radnom mjestu više asistentice na Zavodu za organizaciju, tehnologiju i menadžment. Područja interesa su joj upravljanje rizicima u projektima, održavanje građevina te upravljanje ljudskim potencijalima u građevinarstvu. Trenutačno, glavni dio istraživanja je usmjeren na komunikacijske rizike uzrokovane informacijskom asimetrijom među sudionicima projekta. U koautorstvu je objavila dvadesetak znanstvenih radova. Redovito sudjeluje na međunarodnim i domaćim znanstvenim skupovima.

Mentorica: prof. dr. sc. **Anita Cerić**

Datum obrane: 16.7. 2024.

Naslov dokorskog rada

Upravljanje rizicima prouzročenima informacijskom asimetrijom u građevinskim projektima

Sažetak

Odnose među sudionicima građevinskog projekta može se opisati agencijskom teorijom, prema kojoj postoji informacijska asimetrija između onoga koji upošljava (principala) i onoga koji obavlja posao (agenta). U literaturi je pokazano da rizici koji se pojavljuju pod utjecajem informacijske asimetrije mogu ugroziti ostvarivanje ciljeva projekta zbog ograničenja u dijeljenju informacija između principala i agenta. Cilj je ovog dokorskog rada identificirati i klasificirati ključne rizike prouzročene informacijskom asimetrijom u građevinskim projektima te predložiti odgovore za ovakav tip rizika. Istraživanje uključuje sistematični pregled znanstvene literature, intervju i anketna istraživanja s uključenim stručnjacima iz područja upravljanja građevinskim projektima. Istraživanje je rezultiralo identifikacijom 20 ključnih rizika prouzročenih informacijskom asimetrijom između investitora i izvođača u građevinskim projektima, 7 posljedica te 15 mogućih mjera za ublažavanje predmetnih rizika. Identificirani rizici, posljedice i mjere analizirani su i poredani po prioritetima, za investitore i izvođače, u javnim i privatnim građevinskim projektima. Značaj ovog istraživanja manifestira se kroz unaprjeđenje procesa upravljanja rizicima u građevinskim projektima, a samim time utječe se na uspješnije postizanje zadanih ciljeva projekata.

dr. sc. Lucija Stepinac

Životopis

Rođena je 1990. godine u Livnu, Bosna i Hercegovina. Diplomirala je 2014. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje je 2024. godine obranila doktorsku disertaciju. Zaposlena je na Arhitektonskom fakultetu u Zagrebu kao viši asistent na Katedri za arhitektonske konstrukcije i zgradarstvo, na Kabinetu za nosive konstrukcije. Dobitnica je stipendije Švicarske vlade za izvrsnost, u sklopu koje će godinu dana provesti na sveučilištu EPFL, radeći na projektu aditivno proizvedenih fasada. Kao autorica ili koautorica objavila je više znanstvenih radova te je sudjelovala na brojnim konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentori: izv. prof. dr. sc. **Ana Skender**
prof. dr. sc. **Josip Galić**

Datum obrane: 18.7. 2024.

Naslov doktorskog rada

Karakterizacija i modeliranje aditivno proizvedenih polimernih TPMS rešetki za primjenu u konstrukcijama

Sažetak

Razvoj suvremenih načina brzog prototipiziranja i računalnog projektiranja olakšao je i ubrzao istraživanje biološki inspiriranih struktura za konstruktivnu primjenu. Tako je, promatrajući mnoge prirodne modele, otkriveno da trostruko periodične minimalne plohe (TPMS) predstavljaju optimalnu geometriju koja omogućuje ispunjavanje prostora strukturama minimalne površine. Ovaj biološki nadahnut princip ugrađen je u postupke za topološku optimizaciju konstrukcijskih elemenata kojom se postiže minimalna potrošnja materijala potrebna za zadana opterećenja. Korištenjem TPMS geometrija u projektiranju konstrukcija mogu se istovremeno postići poboljšana mehanička svojstva i poželjno oblikovanje. Združivanje principa topološke optimizacije s tehnikama aditivne proizvodnje (eng. additive manufacturing - AM) omogućit će kontrolirani proces oblikovanja i proizvodnje konstrukcija uz očekivano smanjenje potrebnog vremena i troškova. Istraživanje opisano u ovom radu provedeno je u nekoliko koraka. Prvo je provedeno preliminarno istraživanje na kompozitnim kolničkim konstrukcijama s rešetkastom ravninskom i prostornom ispunom. Zatim je provedena mehanička karakterizacija 3D ispisanih uzoraka, nakon čega je provedeno parametarsko projektiranje te eksperimentalna i numerička analiza na: 1) uzorcima pet različitih morfologija TPMS jedinica u dvije izvedbe (s 20 % i 40 %-tnom ispunom), 2) uzorku sendvič panela s topološki optimiziranom 3D ispisanom ispunom ugrađenom između staklenih ploča te 3) uzorku sendvič panela s topološki optimiziranom 3D ispisanom ispunom ugrađenom između dvije ploče od polimera ojačanih vlaknima (eng. glass fibre reinforced polymer - GFRP). Nadalje, istražene su i ispitane prikladne metode proračuna složenih TPMS geometrija izvedivih jedino u tehnici 3D ispisa. Koristeći metodu homogenizacije za analizu konačnih elemenata (eng. finite element analysis - FEA) u računalnim programima Abaqus i nTopology, pomoću Hookeovog zakona dobivene su vrijednosti za mehanička svojstva TPMS struktura kao materijala te su za njih predloženi analitički izrazi. Ti izrazi su poslužili kao ulazni parametri za programski algoritam za preliminarnu procjenu krutosti na savijanje greda i ploča od polimera s TPMS ispunom. Analiza loma u računalnom programu Abaqus provedena je za modele nekoliko TPMS jedinica i dva sendvič sustava sa zadanim elasto-plastičnim ponašanjem materijala. Na kraju, predložene su napredne numeričke metode za detaljnu analizu loma i termodinamičku analizu za računalne programe Abaqus i GENOA.

dr. sc. Alma-Dina Bašić

Životopis

Rođena je 13. rujna 1995. g. u Zagrebu, u Republici Hrvatskoj. Godine 2014. upisuje Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirala je 2020. g. završivši Sveučilišni diplomski studij, usmjerenje Materijali te stekla naziv diplomirani inženjer građevinarstva. Na istom fakultetu 2024. obranila je doktorski rad. U periodu od 2020. do 2024. bila je zaposlena na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu na znanstvenom projektu „Razvoj novog inovativnog ECO₂Flex proizvoda“ u suradnji sa tvrtkom Calucem d.o.o. U travnju 2025. počinje raditi u projektantkom uredu Hudec plan d.o.o. u kojem je i trenutno zaposlena.

Mentorica: izv. prof. dr. sc. **Marijana Serdar**

Datum obrane: 18. 10. 2024.

Naslov dokorskog rada

Utjecaj mineralnih dodataka na trajnost kalcij aluminatnoga cementa pri različitim temperaturama njegovanja

Sažetak

Cementna industrija suočava se s izazovima okolišnog zagađenja, posebno zbog visokih emisija CO₂ tijekom proizvodnje cementa. Jedno od rješenja je djelomična zamjena cementa mineralnim dodacima, poput industrijskih nusproizvoda ili prirodnih materijala. Kalcij-aluminatni cement (CAC) koristi se više od stoljeća za specijalne namjene, osobito u agresivnim uvjetima, no njegova šira primjena je ograničena pojavom konverzije, procesa koji povećava poroznost i smanjuje mehanička svojstva. Dosadašnja istraživanja pokazala su da dodaci poput zgure visokih peći mogu ublažiti taj proces, ali zbog ograničene dostupnosti zgure, istraživanje je usmjereno na alternative poput kalcinirane gline. U ovoj disertaciji istražen je utjecaj kalcinirane gline (srednjeg sadržaja kaolina) i zgure na svojstva CAC sustava. U prvoj fazi ispitana su mehanička svojstva i mikrostruktura uzoraka njegovanim na 20 °C i 38 °C. Utvrđeno je da kalcinirana glina, poput zgure, smanjuje utjecaj konverzije, a stvara i stratlingit koji dodatno smanjuje poroznost. U drugoj fazi istražena je trajnost (karbonatizacija, prodor klorida, djelovanje kiselina i sulfata). Iako dodaci smanjuju otpornost na okolišne utjecaje u ne-konvertiranom stanju, nakon konverzije oni značajno poboljšavaju stabilnost u odnosu na čisti CAC. Zaključno, i zgura i kalcinirana glina mogu zamijeniti do 30 % CAC cementa, poboljšati mehanička i trajnosna svojstva te omogućiti širu i ekološki prihvatljiviju primjenu ovog cementnog sustava.

dr. sc. Šime Bezina

Životopis

Rođen je 1988. u Splitu. Diplomirao je 2014. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Na istom je fakultetu 2024. obranio doktorski rad. U periodu od 2015. do 2024. bio je zaposlen na Zavodu za prometnice matičnog fakulteta. Sudjelovao je u održavanju nastave, radu laboratorija te istraživačkim i stručnim projektima iz područja cesta i kolničkih konstrukcija. Specijalizirao se za primjenu georadara na cestovnoj infrastrukturi. Trenutačno je zaposlenik tvrtke TPA održavanje kvaliteta i inovacija d.o.o. Fokusiran je na projektiranje, ugradnju i kontrolu bitumenskih mješavina te razvoj inovativnih metoda za ocjenu stanja kolnika. U koautorstvu je objavio dvadesetak znanstvenih radova. Prisustvovao je na brojnim konferencijama i skupovima u zemlji i inozemstvu.

Mentorica: izv. prof. dr. sc. **Josipa Domitrović**

Datum obrane: 18. 12. 2024.

Naslov doktorskog rada

Kvantifikacija vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju kolničke konstrukcije primjenom georadara

Sažetak

Sigurno i nesmetano odvijanje prometa, odnosno zadržavanje propisane tehničke i uporabne razine ceste, zahtjeva pravovremeno te redovito provođenje postupaka i mjera održavanja. Jedan od glavnih uzroka površinskih oštećenja kolničke konstrukcije je promjena svojstva mehanički zbijenog nosivog sloja uslijed povećanja udjela vlage i sitnih zrna. Dosadašnja istraživanja pokazuju tendenciju da spomenuta povećanja utječu na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti koju je moguće detektirati elektromagnetskim metodama, među kojima se ističe metoda koja koristi georadar. Cilj rada bio je razvoj novog postupka za određivanje udjela vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju kolničke konstrukcije učinkovitom analizom vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti utvrđene georadarom s air-coupled antenama. Za ostvarivanje ovog cilja provedena su opsežna laboratorijska ispitivanja i terenska istraživanja. Analizom rezultata dobivena su nova saznanja o utjecaju udjela vlage i sitnih zrna na vrijednost relativne dielektrične permitivnosti. Jedan od glavnih doprinosa istraživanja je razvoj modela za određivanje vrijednosti relativne dielektrične permitivnosti temeljem udjela vlage i sitnih zrna. Također, predložen je postupak za kvalitativnu ocjenu i kvantifikaciju udjela vlage i sitnih zrna u mehanički zbijenom nosivom sloju primjenom georadara. Daljnjim poboljšanjima predloženog postupka omogućilo bi se lociranje kritičnih dionica te osigurala podloga za donošenje odluka o provedbi odgovarajućih postupaka sanacije.

dr. sc. Željko Lebo

Životopis

Željko Lebo rođen je 28.10.1966. godine u Mostaru u Republici Bosni i Hercegovini. Osnovnu i srednju građevinsku tehničku školu pohađao je u Posušju do 1985. godine kada se upisuje na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 1993. godine na Građevinskom fakultetu sveučilišta u Zagrebu. U ljeto 1997. godine zapošljava se kao stručni suradnik na Zavodu za geotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu gdje radi do 2003. kada prelazi u radni odnos na Graditeljski odjel Tehničkog veleučilišta u Zagrebu na kojemu do danas radi kao viši predavač. Godine 2011. magistrirao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom prof.dr.sc. Antun Szavits Nosann-a s temom „Usporedba krutosti tala pri malim deformacijama“.

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

Datum obrane: 19. 12. 2024.

Naslov dokorskog rada

Krutost i čvrstoća zagrebačke gline poboljšane raznim vezivima

Sažetak

Poboljšanje tla predstavlja kontroliranu promjenu stanja, svojstava ili ponašanja tla radi postizanja planiranih i zadovoljavajućih rezultata postojećih ili predviđenih inženjerskih zahvata. Tehnologija dubinskog miješanja koristi mehaničke strojeve za razbijanje strukture tla, dok se vezivno sredstvo unosi u tlo kako bi se stvorili elementi različitih oblika i konfiguracija. Krajnji rezultat ovog postupka je povećana krutost i čvrstoća mekih tala. Veliki potencijal za primjenu industrijskih otpadnih materijala u dubinskom miješanju tla imaju zgura i leteći pepeo. Smanjenje upotrebe cementa i vapna doprinosi smanjenju emisije CO₂. Ovaj doktorski rad pruža uvid u krutost i čvrstoću zagrebačke gline poboljšane upotrebom veziva poput letećeg pepela, zgure i cementa. Rad detaljno opisuje postupak poboljšanja proveden u laboratorijskim uvjetima, kao i varijacije rezultata ispitivanja jednoosne čvrstoće i modula elastičnosti na uzorcima pripremljenim s različitim udjelima pojedinih komponenata veziva i zagrebačke gline.

dr. sc. Vedran Pavlič

Životopis

Rođen je 1983. u Rijeci. Diplomirao je 2007. na Sveučilištu u Rijeci, na Građevinskom fakultetu. Nakon završenog studija zaposlio se u Institutu građevinarstva Hrvatske. Tijekom sedam godina rada na velikim projektima, susreo se s različitim problemima vezanima uz geofizička i laboratorijska ispitivanja, uspostavu sustava mjerenja i opažanja te numeričke modele. U području dinamike tla usavršava se 2011. godine izvođeci ispitivanja u laboratoriju i pohađajući nastavu na Sveučilištu u Kaliforniji, u Los Angelesu. Doktorirao je 2025. na Sveučilištu u Zagrebu, na Građevinskom fakultetu. Objavio je više znanstvenih i stručnih radova.

Mentor: dr. sc. **Tomislav Ivšić**

Datum obrane: 10. 1. 2025.

Naslov doktorskog rada

Prijenos sila kroz zrnati materijal na pragu cikličke posmične deformacije

Sažetak

Zrnati materijal podvrgnut cikličkom opterećenju karakteriziraju promjene modula posmika, pornih tlakova i volumena. Do promjene dolazi kada amplituda cikličke posmične deformacije prijeđe određenu vrijednost tzv. prag cikličke posmične deformacije. Posljedice prelaska praga se odražavaju kao ciklički fenomeni: slijeganja, nagomilavanja pornih tlakova, ojačanja i degradacije čvrstoće. Kako bi se istražili ciklički fenomeni potrebno je modelirati prijenos sila u sustavu zrna i šupljina (pijesku), ovisno o amplitudi deformacije. Osnovni alat istraživanja je numerička metoda diskretnih elemenata. Pomoću trodimenzionalnog numeričkog modela simulira se laboratorijski pokus jednostavni direktni posmik. Numerički model sastoji se od velikog broja zrna, a kalibriran je na osnovu tri krivulje (krivulja redukcije, krivulja nagomilavanja pornih pritisaka vode, histerezna krivulja). Izvlačenje i analiza podataka iz numeričkog modela odvija se na nekoliko razina. Lanci sila imaju ključnu ulogu kao mehanizam prijenosa sile u zrnatom materijalu i određuju mehanička svojstva materijala: stabilnost, elastičnost i protočnost. Više lanaca sila čini jaku mrežu, čija stabilnost, a time i stabilnost sustava je određena na osnovu promjene: broja lanaca sila, mehaničkog koordinatnog broja i raspodjele veličina kontaktnih sila. Za opis cikličkog ponašanja zrnatog materijala predlažu se dva praga. Prag akumulacije $\gamma_t = 4 \cdot 10^{-5}$ i prag stabilnosti $\gamma_t = 3 \cdot 10^{-4}$.

dr. sc. Romano Perić

Životopis

Romano Perić rođen je 28. ožujka 1973.g. u Varaždinu (Republika Hrvatska). Osnovnu školu i Gimnaziju završava u Varaždinu. Na sveučilišnom diplomskom studiju na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu je diplomirao 1998.g. Državni stručni ispit je položio 2000.g., a od 2005.godine je ovlašten inženjer građevinarstva. Sveučilišni poslijediplomski studij Poslovno upravljanje u graditeljstvu (MBA in Construction) Sveučilišta u Zagrebu završava 2019.g. IPMA B Viši voditelj projekta postaje 2017.godine. Doktorski rad obranio je 15.01.2025.g. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Ima više od 20 godina rada u struci na različitim pozicijama. Trenutno je vlasnik i direktor BIM projekta d.o.o. i bavi se konzultantskim poslovima.

Mentor: prof. dr. sc. **Mladen Vukomanović**

Datum obrane: 15. 1. 2025.

Naslov dokorskog rada

Standardiziranje djelatnosti upravljanja projektima gradnje unutar sustava javne nabave u Republici Hrvatskoj

Sažetak

Za razliku od propisa koji detaljno i jednoznačno uređuju obavljanje djelatnosti i poslova projektiranja i stručnog nadzora građenja, posebice u provedbenom djelu, pravnu prirodu DUPG-a definira različitost pravnih obilježja koja proizlaze iz različitosti pravnih propisa koji čine platformu za provedbu DUPG-a. Stanje područja primjene DUPG-a, iako u primjeni devetu godinu nije rezultiralo ujednačenim pristupom javnih i sektorskih naručitelja pri čemu postoji disparitet u odnosu na međunarodne standarde. Upravljanje javnim projektima gradnje u RH određeno je sa svojim specifičnostima koje se realiziraju unutar reguliranoga zakonodavnog konteksta, no propisi ne uređuju proces donošenja projektnih odluka, već je to zadaća projektnih procedura. Kod DUPG-a kao zakonskoj kategoriji projektne procedure i odluke podređene su prisilnoj naravi odlučivanja, dok je prihvaćanje moralnih društvenih normi očekivano dispozitivno. Stoga je cilj ovog istraživanja stvaranje pretpostavki i pozicioniranje bitnih smjernica za standardiziranje DUPG-a kojima će se jednoznačno provedbeno odrediti projektna procedura za DUPG i ujednačiti pristup investitora obveznika javne nabave, odnosno harmonizirati institucionalno regulatorni okvir za DUPG unutar normativnog dijela propisa, uvažavajući etičke standarde primjenjive na struku.

dr. sc. Matea Flegar

Životopis

Matea Flegar rođena 25. lipnja 1991. u Zagrebu, Hrvatska, završava Sveučilišni diplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2018. godine. Iste je godine diplomirala je i na Tehničkom sveučilištu u Beču. Tijekom i nakon studija obavlja stručne poslove, kao praktikantica na gradilištu. U travnju 2019. zapošljava se kao asistentica na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu, gdje sudjeluje na znanstvenom projektu "ACT – Advanced low CO₂ cementitious materials", u suradnji s Federalnim tehnološkim institutom u Lausannei, Švicarska (EPFL). Tamo odrađuje znanstveni boravak u trajanju od ukupno tri mjeseca. Poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu upisuje u rujnu 2019. godine.

Mentori: izv. prof. dr. sc. **Marijana Serdar**
prof. dr. sc. **Karen Scrivener**

Datum obrane: 28. 4. 2025.

Naslov doktorskog rada

Razvoj betona uobičajene namjene sa smanjenim ekološkim otiskom

Sažetak

komponente betona, godišnje iznosi 4,3 milijarde tona, što premašuje godišnju potrošnju hrane po glavi stanovnika. Lokalno dostupni prirodni materijali i industrijski nusproizvodi predstavljaju potencijal koji može zadovoljiti rastuću potrošnju betona, ujedno i potrebu za održivom izgradnjom. Cilj ovog istraživanja bio je provesti sveobuhvatno ispitivanje alternativnih cementnih dodataka (engl. supplementary cementitious materials, SCM) s područja jugoistočne Europe u svrhu ocjene primjenjivosti takvih materijala u cementnoj industriji. Istraživanje je provedeno u pet faza. U prvoj fazi analizirani su mogući lokalni resursi, u drugoj fazi ti su materijali podvrgnuti detaljnoj analizi naprednim metodama. Treća faza uključivala je ispitivanje utjecaja odabranih binarnih i tercijarnih mješavina cementa s letećim pepelom i kalciniranom glinom na mikrostrukтуру cementnih pasti. U četvrtoj fazi analizirana su i uspoređena osnovna svojstva trajnosti betona s ovih mješavina, dok je završna faza istraživanja bila je simulacija realne proizvodnje LC3 cementa u potpuno elektrificiranom postrojenju. Mjerenjem utroška energije i emisijskih plinova dokazano je smanjenje ekološkog otiska za više od 40 % u odnosu na uobičajenu proizvodnju cementa. Istraživanje je potvrdilo potencijal lokalnih resursa za održivu proizvodnju betona i značajno smanjenje ekološkog otiska cementne industrije.

dr. sc. Ivana Vladić Kancir

Životopis

Ivana Vladić Kancir rođena je 1992. u Zagrebu. Osnovnu školu i Gimnaziju završila je u Pregradi. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, usmjerenje Materijali završila je 2019. g. te stekla naziv magistra inženjerka građevinarstva. Poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu upisala je 2020. godine, a doktorirala je 2025. godine. Od siječnja 2020. do kolovoza 2024. radila je kao asistentica na Zavodu za Materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu na znanstvenom projektu "Alternativna veziva za beton – ABC" financiranom od hrvatske zaklade za znanost. U prosincu 2024. godine počinje raditi u projektantskom uredu Dalekovod – Projekt u kojem je i trenutno zaposlena.

Mentorica: izv. prof. dr. sc. **Marijana Serdar**

Datum obrane: 30. 4. 2025.

Naslov dokorskog rada

Utjecaj crvenoga mulja na korozijska svojstva čelika u cementnim i alkalno aktiviranim mortovima

Sažetak

Svake se godine u svijetu proizvede četiri milijarde metričkih tona cementa. Cementna industrija jedna je od najvećih svjetskih industrija, ali i jedan od najvećih emitera stakleničkih plinova koja proizvodi 8 % svih svjetskih stakleničkih plinova. Procjenjuje se da će do 2050. cementna industrija proizvoditi i do 24% globalnog CO₂. Trenutačno je fokus na "zelenijim" proizvodima poput cementa s niskom emisijom CO₂ za izgradnju učinkovitijih i održivijih zgrada. Jedan od najvećih troškova održavanja i popravaka armirano betonskih konstrukcija je korozija armaturnog čelika. Kako bi se ublažio ekološki otisak i veliki troškovi, postoji hitna potreba za novim materijalima koji mogu zadovoljiti te zahtjeve. Kao novi mineralni dodatak, sve veću pozornost dobiva otpad aluminijske industrije koji se dobiva preradom boksitne rude Bayerovim postupkom i naziva se boksitni ostatak ili crveni mulj. Crveni mulj je visoko alkalni, glinasti materijal koji predstavlja veliku opasnost za okoliš u blizini jer se skladišti na otvorenom velikom odlagalištu. Svake godine se tone ovog proizvoda ispumpaju na odlagališta što prijeti već postojećim odlagalištima jer se može prelići ili izazvati pukotine u zidovima brana. S druge strane, zbog kemijskog sastava, vrlo sitnih čestica i velike dostupnosti, crveni mulj se u posljednje vrijeme istražuje kao novi potencijalni mineralni dodatak cementima. Cilj ovog istraživanja je ispitivanje utjecaja crvenog mulja na mikrostrukturu, tlačnu čvrstoću, otpornost na prodor kloridnih iona i korozijsko ponašanje čelične armature u cementnim i alkalno aktiviranim mortovima.

dr. sc. Karlo Ožić

Životopis

Ivana Vladić Kancir rođena je 1992. u Zagrebu. Osnovnu školu i Gimnaziju završila je u Pregradi. Rođen 17. kolovoza 1993. g. u Zagrebu. Diplomirao je 2017. g. na Sveučilištu u Zagrebu, na Građevinskom fakultetu. U svojoj karijeri je radio kao pomoćnik voditelja gradilišta i projektant suradnik a od studenog 2020. radi kao asistent na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. U sklopu znanstvenog projekta Ares je sudjelovao u organizaciji dvije trening škole, u izradi stručnih poslova te je objavio dva znanstvena rada kao autor i tri kao koautor. Uz to, sudjelovao je sa 10 radova na 8 konferencija kao autor ili koautor. Uz sudjelovanje na dvije međunarodne trening škole, u okviru natječaja „Odlazna mobilnost asistenata” ostvario je pravo na stipendiju Hrvatske zaklade za znanost, kojom je financirao stručni boravak u Madridu radi usavršavanja tijekom doktorskog studija.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Mislav Stepinac**

Datum obrane: 9. 5. 2025.

Naslov doktorskog rada

Ekspeditivna metoda procjene potresne oštećljivosti postojećih zidanih nearmiranih zgrada

Sažetak

Nedavni potresi u Hrvatskoj, povećali su svijest o važnosti potresne otpornosti postojećeg građevinskog fonda. To je potaknulo akademsku zajednicu na postavljenje temelja za razvoj novih metoda procjene oštećljivosti građevina. Pregled literature pokazao je da se oštećljivost značajno razlikuje ovisno o tipologiji gradnje i geografskoj lokaciji, što upućuje na potrebu za razvojem metode specifične za zagrebačku tipologiju zgrada. Stoga je u ovom istraživanju korištena baza podataka prikupljena iz potresa 2020. godine, koja uključuje podatke za 300 oštećenih zgrada te dodatnih 10 zgrada proračunatih numeričkim modeliranjem. Prikupljeni su podaci kojima su identificirani parametri koji su potencijalno najutjecajni na ponašanje zgrada u potresu. Analiza tih podataka provedena je pomoću različitih statističkih metoda, pri čemu se linearnom regresijom dobila najznačajnija analiza koja je izdvojila 9 najutjecajnijih parametara na ponašanje zgrada. Na temelju rezultata definirani su težinski faktori za svaki parametar te je formirana metoda za određivanje indeksa oštećljivosti zgrada. Polazeći od toga, razvijena je brza metoda za procjenu potresne oštećljivosti, prilagođena stvarnim uvjetima i umjerenim potresima tipičnim za ovo područje. Na kraju, predstavljena je analiza vrijednosti podataka koja prikazuje postupak donošenja odluka temeljen na procesu obnove zgrada oštećenih u potresu. Ova procedura, provedena pomoću stabla odluke, potvrđuje dugoročne prednosti prikupljanja dodatnih informacija u obnovi zgrada različitih veličina.

dr. sc. Jure Barbačić

Životopis

Jure Barbačić rođen je 1988. u Splitu. Diplomirao je 2013. na Sveučilištu u Zagrebu, Građevinskom fakultetu, a na kojem je 2025. obranio i doktorsku disertaciju. Od 2014. zaposlen je na istom, na Zavodu za konstrukcije, Katedri za drvene konstrukcije, gdje je radio najprije kao asistent, a zatim kao stručni suradnik i suradnik u nastavi. Kroz dvomjesečni boravak usavršavao se na fakultetima u Sloveniji i Danskoj. Sudjelovao je u radu više europskih COST akcija, proHolz međunarodnim projektima te u dva europska i četiri domaća projekta. Uključen je u rad tehničkog pododbora pri HZN-u, a povremeno i u rad europske normizacijske radne grupe. U koautorstvu je do sada objavio više znanstvenih i stručnih radova u časopisima te na konferencijama, kao i jedno poglavlje u knjizi.

Mentorica: prof. dr. sc. **Vlatka Rajčić**

Datum obrane: 18. 6. 2025.

Naslov dokorskog rada

Razvoj eksperimentalno zasnovanoga računskog modela za analizu potresne otpornosti hibridnoga panela sastavljenoga od CLT okvira i lameliranoga nosivog stakla

Sažetak

Suvremena arhitektura teži transparentnim pročeljima, što često vodi ka problemu prijenosa opterećenja na rubnim bridovima građevine, posebice pri lateralnim djelovanjima. Tehnološka rješenja napredovala su toliko da staklo, osim sekundarne uloge u ovojnici zgrade, može ujedno dobiti i nosivu ulogu. Nosivo staklo u kombinaciji s drvenim okvirom predstavlja hibridni sustav s dobrim predispozicijama, odnosno, sustav s dobrim karakteristikama nosivosti na vertikalno opterećenje u ravnini i horizontalno van ravnine, a istovremeno estetski zanimljiv, energetske efikasan, ekološki prihvatljiv te financijski konkurentan sustav. Prototip nove generacije hibridnih panela, čiji su autori Rajčić i Žarnić, ističe se izuzetnom razinom duktilnosti i trošenja seizmičke energije, uz osiguranje dostatne razine nosivosti i uporabivosti. Nastavno na istraživanja koja su proveli Antolinc i Stepinac te istraživanja u sklopu projekta HRZZ-a IP-2016-06-3811, cilj ove disertacije je putem eksperimentalnih istraživanja unaprijediti spoznaje o nosivim hibridnim panelima drvo – nosivo staklo te na temelju zaključaka, definirati računski model za analizu panela pod seizmičkim djelovanjima. U svrhu definiranja svih parametara koji utječu na ponašanje panela, provedena su eksperimentalna istraživanja. Ona su podloga za provedbu računskih analiza. Na temelju dobivenih rezultata omogućeno je donijeti univerzalne analitičke izraze i utemeljene uvjete nužne za projektiranje gradnje i sanacija građevina u potresnom okruženju korištenjem ovog tipa konstrukcijskog elementa.

