



20
25

Z
T

9.-12.
srpnja 2025.

RIJEKA

Zajednički Temelji 2025. - GradRi

XI. skup mladih istraživača iz područja
građevinarstva i srodnih tehničkih
znanosti

ZBORNIK RADOVA

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet

**20
25 ZAJEDNIČKI
 TEMELJI**

Zbornik radova 11. skupa mladih istraživača iz područja
građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, 9. - 12. srpnja
2025., Rijeka

Izdavač

Sveučilište u Rijeci,
Građevinski fakultet
Radmile Matejčić 3

Urednici

Damjan Jurković
Tea Sulovsky

Elektroničko izdanje

ISBN: 978-953-6953-68-4

DOI: <https://doi.org/10.32762/ZT.2025>

Rijeka, 9.-12. srpnja 2025

Predsjedništvo organizacijskog odbora

prof. dr. sc. Leo Škec

Katarina Tutić, univ. mag. ing. aedif.

Damjan Jurković, univ. mag. ing. aedif.

Članovi organizacijskog odbora

Marta Marija Gržić, univ. mag. ing. aedif.

Josipa Mihaljević, univ. mag. ing. aedif.

Marija Bogdanić, univ. mag. ing. aedif.

Tea Sulovsky, univ. mag. ing. aedif.

Ivona Petković, univ. mag. ing. aedif.

Davor Marušić, mag. inž. geol.

Napomena:

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

Podrška organizaciji skupa

Zlatni sponsor



Broncani sponzori



Sponzor

SV/N.G. - projekt d.o.o.

Donator



Institucionalna podrška



Predgovor

Veliko mi je zadovoljstvo, u ime Organizacijskog odbora i Građevinskog fakulteta u Rijeci, predstaviti zbornik radova 11. skupa mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti – Zajednički temelji 2025. Ovaj skup, koji se kontinuirano održava više od desetljeća, izrastao je u prepoznatljivu platformu za otvorenu znanstvenu raspravu, razmjenu znanja i iskustava te uspostavu suradničkih veza među mladim istraživačima.

Zajednički temelji pokrenuti su 2013. godine na inicijativu Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu te Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta, unutar koje se i danas organizira. Kroz godine su se u ulozi organizatora izmjenjivale sve članice Udruge, okupljajući doktorande, poslijedoktorande i mlade istraživače koji svojim radom aktivno doprinose razvoju struke i znanstvene izvrsnosti. Posebno nas veseli što je upravo Građevinski fakultet u Rijeci, nakon što je već bio domaćin 2014. i 2019. godine, ponovno imao priliku ugostiti skup i sudionike iz cijele Hrvatske, ali i šire regije.

Brza tehnološka evolucija i sve dublja stručna usmjerenost znanstvenika nameću potrebu za otvorenim dijalogom među disciplinama, jer samo kroz suradnju nastaju cjelovita i održiva istraživačka rješenja. Upravo tu leži važnost ovog skupa: on pruža priliku za predstavljanje vlastitih istraživanja, dobivanje konstruktivnih povratnih informacija, uspostavljanje novih suradnji i stvaranje prijateljstava koja često prerastaju u dugoročne profesionalne veze. Razmjena ideja u ranoj fazi istraživanja neprocjenjiva je, jer omogućuje oblikovanje jasnijeg i učinkovitijeg znanstvenog puta.

Tijekom dosadašnjih izdanja, skup se pokazao kao učinkovita platforma za rano uključivanje mladih istraživača u znanstvenu i stručnu zajednicu. Brojni bivši sudionici danas su priznati znanstvenici i stručnjaci, među kojima su mnogi aktivni kao voditelji laboratorijskih, ustrojbenih jedinica, istraživačkih timova te nositelji upravljačkih funkcija na svojim institucijama. Uvjeren sam da će i sudionici ovogodišnjeg skupa u budućnosti preuzeti uloge ključnih aktera u razvoju znanosti i struke, te da će Zajednički temelji i nadalje služiti kao mjesto stručnog profiliranja, umrežavanja i međuinsticunalne suradnje.

Program ovogodišnjeg skupa oblikovan je tako da omogući kvalitetnu i tematski raznoliku znanstvenu razmjenu među sudionicima. Tijekom dva dana izlaganja, održano je pet tematskih sekcija: Konstrukcije i seizmičko inženjerstvo, Arhitektura, Mehanika i materijali, Hidrotehnika i geotehnika te Budućnost građevinarstva. U sklopu tih sekcija predstavljena su ukupno 28 recenzirana rada, a program je dodatno obogaćen s dvama pozvanim predavanjima, stručnim obilaskom laboratorijskog fakulteta Građevinskog fakulteta u Rijeci i prigodnim društvenim sadržajima.

Zastupljene teme pokrivaju širok spektar aktualnih istraživačkih izazova, od naprednog modeliranja konstrukcija, analize materijala i urbanističkih pitanja, preko inovativnih pristupa u hidrotehnici i održivom razvoju, pa sve do integracije novih tehnologija poput umjetne inteligencije u građevinskoj praksi. Takav programski raspon potvrđuje ne samo multidisciplinarnu prirodu struke, već i znanstvenu zrelost i istraživačku motivaciju sudionika. Zahvaljujem svim autorima, recenzentima, predavačima i sudionicima na uloženom trudu, kvalitetnim doprinosima i entuzijazmu kojim su obilježili ovogodišnje izdanje skupa. Posebnu zahvalnost upućujem članicama i članovima Organizacijskog odbora, čiji je predani rad bio ključan za uspješnu pripremu i provedbu svih aktivnosti. Zahvaljujem i Upravi Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci na pruženoj institucionalnoj podršci, kao i Udrizi hrvatskih

građevinskih fakulteta na dugogodišnjoj predanosti razvoju ove inicijative. Također, iskreno zahvaljujemo sponzorima i donatorima koji su svojim doprinosom omogućili održavanje skupa na visokoj organizacijskoj i sadržajnoj razini.

Uvjeren sam da će Zajednički temelji 2025 ostati zapamćeni kao značajan korak u oblikovanju stručnog i znanstvenog identiteta svojih sudionika, ali i kao primjer dobre prakse u poticanju suradnje koja nadilazi institucionalne, tematske i nacionalne okvire. Upravo takvi susreti grade temelje zajednice sposobne nositi se s budućim izazovima struke i znanosti.

U Rijeci, srpanj 2025.



Prodekan za znanost
prof. dr. sc. Leo Škec

Sadržaj

Predgovor	5
Sadržaj.....	7
Sezonska dinamika intruzije morske vode u rijeci Neretvi: integracija monitoring aktivnosti i numeričkog modeliranja	
Iva Aljinović, Veljko Srzić, Jadran Čarija.....	9
Reološki model aluminijskih legura pri visokim temperaturama	
Domagoj Bendić, Neno Torić, Ivica Boko	15
Nastanak i razvoj R&D laboratorija	
Marija Džapo, Silvio Bašić.....	21
Eksperimentalno i teorijsko ispitivanje ploča s kružnom rupom pod jednoosnim vlačnim opterećenjem u linearnoj analizi	
Laura Grbac, Gordan Jelenić	27
Je li uklanjanje nanosa rješenje za smanjenje poplavnog rizika na rijeci Kupi?	
Marta Marija Gržić, Nevenka Ožanić, Nino Krvavica	33
Kriteriji za projektiranje bioklimatske stambene arhitekture prema vernakularnim primjerima dinarskog područja: metodološki okvir	
Haris Handžić.....	39
Urbanistički kriteriji kategorizacije riječnih obala gradova	
Dora Ivančan, Sanja Gašparović	45
Mehanizmi otkazivanja zidova izvan ravnine – pregled normi i primjena na građevine kulturne baštine	
Katarina Jajčević, Marija Demšić	52
Komparativna analiza životnih ciklusa aluminijskog i čeličnog okvira	
Emanuel Krupa-Jurić, Davor Skejić, Ivan Lukačević	58
Uloga obrazovanja u promicanju održivosti u građevinarstvu: primjer kolegija Zelena gradnja	
Viktor Kolčić, Ivana Carević, Marijana Serdar	64
Slijeganje temelja na ojačanom tlu (cement, staklo)	
Matej Lozančić, Maja Prskalo	70
Razvoj numeričkog modela tramvajske kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT	
Franka Meštrović, Ivo Haladin.....	79

Kalibracija parametara transporta sedimenta u numeričkom modelu XBeach-G na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče	87
Hanna Miličević, Dalibor Carević, Damjan Bujak	87
Višekriterijska procjena podložnosti poplavama metodom AHP u Primorsko-goranskoj županiji	
Ivona Petković, Nevenka Ožanić, Nino Kravica	92
Vrednovanje urbanističko-arhitektonskih obilježja povijesnih perivojnih paviljona	
Mina Plančić.....	98
Procjena ponašanja tipske Krupno-panelne zgrade iz 1960-ih pod potresnim opterećenjem	
Romano Jevtić Rundek, Mario Uroš	105
Održivi parkirni sustavi u smanjenju prometnih gužvi i zagađenja	
Caterina Simonelli, Marijana Cuculić, Sanja Dugonjić Jovančević.....	111
Promjena slike obale grada Poreča na primjeru turističke zone Pical od 1968. do 2023. godine	
Emil Srblijanin, Ana Mrđa.....	124
Određivanje činitelja oporavka narušenih krajolika	
Ria Tursan, Ana Mrđa	133
Slobodno lJuljanje krutog bloka na elastičnoj gredi	
Katarina Tutić, Teo Mudrić, Nina Čeh, Martin Arnold.....	139
Utjecaj spojeva konstrukcijskih elemenata na seizmički odziv tradicijskih zidanih zgrada u blokovima	
Sara Vainig, Maja Baniček, Igor Tomić, Josip Atalić.....	146
Stohastički pristup pri modeliranju lijepljenih lameliranih greda od lokalnih listača	
Jelena Lovrić Vranković, Ivana Uzelac Glavinić, Ivica Boko.....	154
Tlačna i savojna čvrstoća mehanički recikliranog EPS-a	
Jelena Vukadin.....	161
Usporedba prirodnih kompozita sa sintetičkim kompozitnim rješenjima u suvremenoj sanaciji i numerička analiza ojačanih zidanih konstrukcija	
Mario Žigo, Nikola Grgić.....	168
Dinamika Plaže u Brovinju: Istraživanje Erozije i Stabilnosti Kosina	
Matea Zupičić, Igor Ružić, Čedomir Benac	174

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.1>

Sezonska dinamika intruzije morske vode u rijeci Neretvi: integracija monitoring aktivnosti i numeričkog modeliranja

Seasonal dynamics of seawater intrusion in the River Neretva: integration of monitoring activities and numerical modeling

Iva Aljinović¹, Veljko Srzić¹, Jadran Čarija¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, iva.matic@gradst.hr

Sažetak

Područje doline rijeke Neretve suočava se s izraženom intruzijom morske vode, osobito tijekom sušnog perioda godine. Ova pojava predstavlja značajnu prijetnju za poljoprivrednu proizvodnju, opskrbu pitkom vodom i očuvanje ekološke ravnoteže područja. Sustavno praćenje hidroloških parametara i parametara stanja voda na području vodonosnog sustava delte rijeke Neretve te na profilima duž rijeke, ukazuje na intezivan prodor morske vode kroz samo korito rijeke. Uspostava numeričkog modela postojećeg stanja naglašava sezonske razlike režima slanosti i intezitet intruzije morske vode kroz korito rijeke Neretve. Ovaj rad prikazuje rezultate podataka prikupljenih monitoring aktivnostima i korištenih u analizirama numeričkim modelom te predlaže tehnička i operativna poboljšanja za unaprjeđenje upravljanja vodnim resursima u području delte.

Ključne riječi: intruzija, zaslanjivanje, SEAWAT, klimatske promjene

Abstract

The Neretva River delta is under significant influence of seawater intrusion, especially during the dry season. This phenomenon poses a serious threat to agricultural production, water supply, and the preservation of the area's ecological balance. Systematic monitoring of hydrological parameters and water quality indicators in the River Neretva aquifer and at profiles along the river, reveals an enhanced intrusion of seawater through the riverbed itself. The establishment of a numerical model of the current state highlights seasonal variations in salinity regimes and the intensity of seawater intrusion through the River Neretva riverbed. This paper highlights results of data observed through monitoring activities, analyzed by using a numerical model, and proposes improvements for the improvement of water resources management in the delta.

Keywords: intrusion, salinization, SEAWAT, climate change

1. Uvod i definiranje problema istraživanja

Prodor morske vode u obalne vodonosnike složen je proces koji ima dugoročne posljedice na kvalitetu podzemnih i površinskih voda. Negativni utjecaji posebno su izraženi u područjima s naglašenom poljoprivrednom proizvodnjom, složenom ekološkom mrežom te područjima pod velikim utjecajem klimatskih promjena. Proučavanje intruzije morske vode zahtijeva multidisciplinarni pristup koji obuhvaća terenska mjerjenja, laboratorijske analize, statističku obradu podataka te primjenu numeričkih modela. Terenska mjerjenja, poput praćenja razine vode, električne vodljivosti, saliniteta i temperature, pružaju izravne informacije o dinamici intruzije. Numerički modeli omogućavaju predviđanje ponašanja sustava u različitim uvjetima, dok analiza prostornih i vremenskih trendova doprinosi razumijevanju dugoročnih promjena u vodonosniku. [1]

Delta rijeke Neretve nizom je infrastrukturnih mjera od 1960-ih godina na ovomo iz močvarnog područja pretvorena u područje intezivne poljoprivredne proizvodnje. Spuštanjem razine podzemnih voda ispod pedološkog sloja sustavnom melioracijom, došlo je do povećanja gradijenta između podzemnih voda i razine mora te su stvorenii uvjet za aktivnu intruziju morske vode [2]. Istraživanjem prodora intruzije morske vode u područje delte rijeke Neretve definirani su glavi smjerovi intruzije, kroz nasip Digu, razdjelnici Jadranskog mora i područja doline te kroz korito rijeke Neretve [3]. Intruzija morske vode kroz korito rijeke Neretve definirana je na profilu Metković most za protoke svježe vode od cca $180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što je česta pojava u sušnom dijelu godine [4]. Kako prisustvo slanoga kлина u rijeci Neretvi značajno doprinosi ukupnoj količini morske vode koja prodire u područje doline, unaprijeđenje monitoring aktivnosti koje bi preciznije definirale poziciju i dinamiku slanoga kлина unutar korita rijeke Neretve od velike su važnosti za definiranje učinkovitih mjera upravljanja vodnim resursima cijelog područja.

2. Metodologija

2.1. Monitoring aktivnosti

Za bolje razumijevanje dinamičke prirode intruzije morske vode u područje doline rijeke Neretve, uspostavljen je monitoring stanja voda na području doline. Monitoring aktivnosti koje se provode moguće je podijeliti na sustav kontinuiranog i povremenog monitoringa stanja voda. Sustav kontinuiranog monitoringa implementiran je za podzemne i površinske vode te mjeri razinu vodnog lica [m], električnu vodljivost [mS cm^{-1}] i temperaturu [$^{\circ}\text{C}$]. Podzemne vode kontinuirano se prate u piezometrima u vodonosniku sa slobodnim vodnim licem te u vodonosniku pod tlakom. Površinske vode se prate u kanalu Jasenska te bazenima crpne stanice Modrič i crpne stanice Prag.

Razina Jadranskog mora kontinuirano se prati na mareografu postavljenom pokraj ušća Male Neretve, dok se razina rijeke, u sklopu ovoga rada, Neretve prati na limnigrafu u Opuzenu. Protok rijeke Neretve procjenjuje se na temelju brzine mjerene pomoću tri horizontalna ADCP uređaja, poprečnog presjeka definiranog iz geometrije korita te razine vode promatrane na limnografskoj postaji na Metković mostu.

Sustav povremenog monitoringa stanja voda uključuje profiliranje i uzorkovanje voda na lokacijama dubokih i plitkih piezometara, u rijeci Neretvi te na Maloj Neretvi. Lokalno

profiliranje vodnog stupca provodi se nekoliko puta godišnje, uglavnom tijekom sušnog razdoblja, na profilima Komin i Opuzen, 9 i 12 km uzvodno od ušća Neretve. Profiliranjem se prikupljaju podaci o električnoj vodljivosti [$\mu\text{S cm}^{-1}$], temperaturi [$^{\circ}\text{C}$], salinitetu [g l^{-1}], gustoći [kg m^{-3}] i pH po visini vodnog stupca te se definira položaj tranzicijske zone slanog klina i svježe vode.

2.2. Numeričko modeliranje

Dinamička svojstava slanosti na području doline rijeke Neretve simulirana su SEAWAT numeričkim modelom [4]. SEAWAT je 3D numerički model koji koristi MODFLOW za izračun tečenja podzemne vode promjenjive gustoće u vodonosniku i MT3DMS za izračun transporta otopljenih tvari. Osnovne jednadžbe dane su izrazima (1) i (2).

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

ρ_0 – gustoća fluida za određenu

$S_{s,0}$ – specifična zapremnina, definirana kao

konzentraciju i temperaturu [kg m^{-3}],

količina vode koja se ispušta iz zapremnine

μ – dinamička viskoznost [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$],

po jedinici volumena po padu h_0 [m^{-1}],

K_0 – tenzor hidrauličke vodljivosti materijala

t – vrijeme [s],

zasićenog referentnom tekućinom [kg s^{-1}],

θ – poroznost [-],

h_0 – hidraulički tlak mјeren u odnosu na

C – koncentracija soli [kg m^{-3}],

referentni fluid određene koncentracije i

q'_s – izvor ili ponor fluida s gustoćom ρ_s [s^{-1}]

temperature [m]

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

ρ_b – gustoća obujma (masa krutih tvari podijeljena s ukupnim volumenom) [kg m^{-3}],

D – tenzor koeficijenta hidrodinamičke disperzije [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],

K_d^k – distribucija koeficijenta otopljene tvari k

q – specifično otpuštanje [m s^{-1}],

k [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$],

C_s^k – koncentracija izvora ili ponora [kg m^{-3}]

C^k – koncentracija otopljene tvari k [kg m^{-3}],

otopljene tvari k.

Numeričkim modelom obuhvaćeno je područje ušća rijeke Neretve, podsustavi Opuzen ušće, Luke i Vidrice. Karakteristike geoloških slojeva definirane su temeljem rezultata raspoloživih i provedenih istražnih radova [5]. Početni i rubni uvjeti implementirani su u skladu sa stanjem na terenu te zasebno definirani za tečenje i za transport otopljenih tvari.

Osnovna stijena predstavlja nepropusni rubni uvjet na cijeloj domeni modela. Duž obalne linije, morski rubni uvjet definiran je očitanjem mareografa te konstantnom vrijednosti koncentracije mora od 36 g l^{-1} . Razina vodnog lica na limnigrafu u Opuzenu definira rubni uvjet tečenja u rijeci Neretvi dok je rubni uvjet transporta definiran odvojeno za sušni (36 g l^{-1} po cijeloj visini vodnoga stupca) i kišni period (0 g l^{-1} po cijeloj visini vodnoga stupca). Rubni uvjeti tečenja za Malu Neretvu i kanale obuhvaćene modelom definirani su režimom rada crnih stanica Modrič i Prag. Rubni uvjet tečenja na području Opuzena koji predstavlja granicu modela, definiran je protokom procjeđivanja podzemnih voda. Rubni uvjet transporta na rubu domene modela, Male Neretve i implementiranih kanala je $dC/dx \neq 0$ i $dC/dz \neq 0$. Početni uvjeti modela za tečenje i transport tvari odgovaraju rasporedu piezometarskih stanja i vrijednostima koncentracije dobivenim za stacionarno stanje modela.

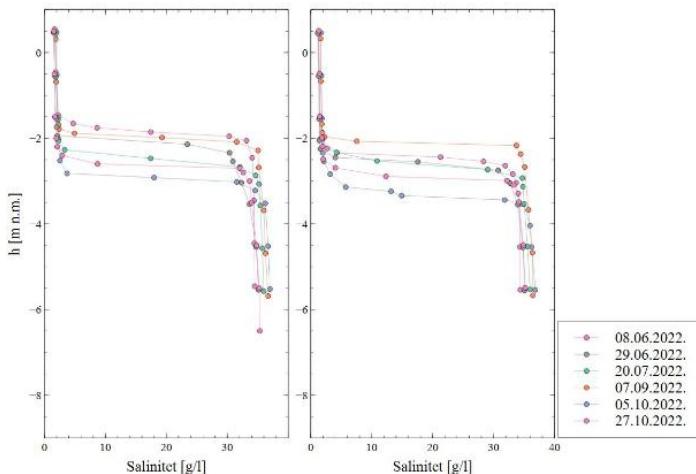
Modelskim simulacijama odvojeno su obrađeni sušni i kišni period godine. Nakon kalibracije i verifikacije modela postojećeg stanja, modelom su simulirane promjene u režimu slanosti podzemnih voda uslijed očekivanih klimatskih promjena. Modelom su simulirani scenariji porasta srednje razine mora (SLR) za 0.43 i 0.84 m i pad kumulativne godišnje količine oborina za 10% i 20%, sve prema [5].

3. Rezultati

3.1. Monitoring aktivnosti

Kontinuiranim monitoringom stanja voda prikupljeni su podaci za definiranje rubnih uvjeta te kalibraciju i verifikaciju numeričkog modela. Vremenske serije razine i saliniteta korištene su pri definiranju rubnih uvjeta za nestacionarno stanje dok su srednje vrijednosti navedenih podataka korištene za stacionarna stanja.

Profiliranja provedena na rijeci Neretvi u sušnom dijelu godine ukazuju na značajnu stratifikaciju vodnog stupca te prisustvo slanoga klina. Vrijednosti saliniteta u površinskom sloju su do 5.0 g l^{-1} dok su vrijednosti u pridnenom sloju između 32.0 i 37.0 g l^{-1} , s jako uskom tranzicijskom zonom (Slika 1.).



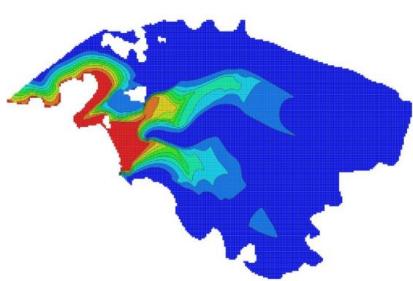
Slika 1. Raspodjela saliniteta po vodnom stupcu na profilima Komin (lijevo) i Opuzen (desno) za profiliranja u 2022. godini

Profiliranjima provedenim u 2022. godini slani klin na profilu Komin pozicioniran je na dubini od 1.7-3.0 m n.m., dok je slani klin na profilu Opuzen na dubini od 2.0-3.2 m n.m..

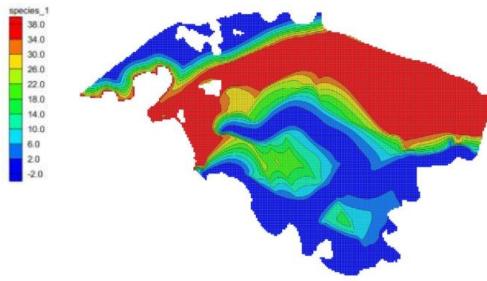
3.2. Numeričko modeliranje

Prva faza numeričkog modeliranja je uspostava modela postojećeg stanja. Procesom kalibracije i validacije utvrđeno je značajna podudarnost modelskih vrijednosti piezometarske razine i saliniteta na lokacijama piezometara, kako u vodonosniku sa slobodnim vodnim licem tako i u vodonosniku pod tlakom. Slike 3 i 4 prikazuju raspored koncentracije soli u površinskom sloju za kišni i sušni period godine. Razlike u vrijednostima

i rasporedu koncentracije soli ukazuju na značajnu razliku u intezitetu intruzije morske vode u dva navedena scenarija.



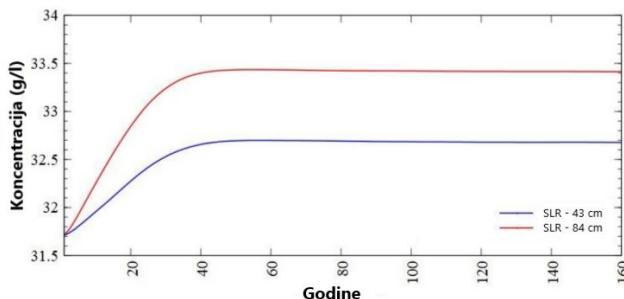
Slika 2. Raspored koncentracije soli u površinskom sloju za kišni period



Slika 3. Raspored koncentracije soli u površinskom sloju za sušni period

U kišnom periodu, protok rijeke Neretve eliminira intruziju morske vode u područje delte te se zaslanjenje odvija kroz obalni nasip Diga. U sušnom periodu, prisustvo slanoga klina detektirano je do profila Metković most te sama rijeka Neretva doprinosi salinizaciji područja. Rezultati numeričkog modela pokazuju opsežnije zaslanjenje cijelog područja doline. Kanali Crepina i Mala Neretva pružaju osvježenje melioracijskim podpodručjima Vidrice i dijelu Opuzen ušća.

Po provedbi kalibracije modela postojećeg stanja, testirani su scenariji klimatskih promjena. Rezultati numeričkog modela ukazuju na povećanje slanosti za sve analizirane scenarije klimatskih promjena i dodatno zaslanjenje cijelog područja delte Neretve. Predviđeni porast koncentracije slanosti na područje lijeve obale rijeke Neretve do kanala Jasenska prikazan je na Slici 4.



Slika 4. Promjena vrijednosti koncentracije uslijed porasta srednje razine mora na lokaciji piezometra P2 (kanal Jasenska)

4. Diskusija i zaključci

Rezultati uspostavljenog modela potvrđuju dominantne smjerove intruzije morske vode u vodonosnik rijeke Neretve. Značajna varijacija intruzije morske vode u kišnom i sušnom

periodu naglašava ulogu rijeke Neretve kao izvora zaslanjenja. Analiza rezultata dobivenih za testirane scenarije klimatskih promjena ukazuje na potrebu za mjerama koje bi smanjile intezitet intruzije morske vode te sačuvale kvalitetu površinskih i podzemnih voda.

Za detaljniju analizu prodora slanosti iz rijeke Neretve u vodonosnik doline potrebna je definicija rubnih uvijeta koja će implementirati stratifikaciju vodnog stupca rijeke. Stratifikaciju vodnog stupca moguće je definirati dodatnim monitoring aktivnostima koje bi osigurale kontinuirani uvid u promjenu indikatora slanosti na profilu Metković most.

Dodatni piezometar na području lijeve obale rijeke Neretve, na području između postojećeg piezometra P2 i obalne linije, dao bi uvid u odgovor vodonosnika na promjenu dinamike slanoga klina u rijeci Neretvi. S piezometrom postavljenim na ovoj lokaciji bilo bi moguće definirati i promjene slanosti u vodonosniku u prijelaznom periodu godine, u kojem slani klin iščezava iz rijeke Neretve. Detaljnija razrada scenarija klimatskih promjena jedan je od nužnih smjerova budućeg istraživanja salinizacije ovoga područja.

Navedene mjere unaprijeđenja monitoring sustava detaljnije bi definirale dinamiku i intezitet intruzije morske vode u područje delte rijeke Neretve te bi dale potpuniji uvid za definiranje mjera obrane od zaslanjenja i cijelovito upravljanje vodnim resursima ovoga područja.

Literatura

- [1] Werner, A. et al.: Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges, *Advances in Water Resources*, 51, 2013, 3-26, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>
- [2] Badaruddin, S., Werner, A.D., Morgan, L.K.: Characteristics of active seawater intrusion, *Journal of Hydrology*, 551, 2017, 632-647, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.031>
- [3] Lovrinović, I., et al: Groundwater Monitoring Systems to Understand SeaWater Intrusion Dynamics in the Mediterranean: The Neretva Valley and the Southern Venice Coastal Aquifers Case Studies, *Water*, 2021, <https://doi.org/10.3390/w13040561>
- [4] Ljubenkov, I., Vranješ, M.: Numerical model of stratified flow – case study of the Neretva riverbed salination (2004), *Gradevinar*, 2, 2012, <https://doi.org/10.14256/JCE.639.2011>
- [5] Geokon-Zagreb d.d, 2022. Field and laboratory research service in the Lower Neretva area for the needs of the Project „Monitoring Sea-water intrusion in coastal aquifers and Testing pilot projects for its mitigation. Zagreb.
- [6] Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W.: SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, 2007, <https://doi.org/10.3133/tm6A22>
- [7] IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.2>

Reološki model aluminijskih legura pri visokim temperaturama

Rheological model of aluminium alloys at high temperatures

Domagoj Bendić¹, Neno Torić¹, Ivica Boko¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, dbendic@gradst.hr,
ntoric@gradst.hr, iboko@gradst.hr

Sažetak

U radu je sadržan pregled istraživanja aluminijskih legura i njihovih primjena u vidu nosivih dijelova konstrukcije. Naglašene su prednosti i mogući nedostatci korištenja elemenata izrađenih od aluminijskih legura naspram čelika kao primarnog metala u građevinskoj industriji, s ciljem njegove učestalije upotrebe. Poseban fokus je na radovima o eksperimentalnom ispitivanju mehaničkih svojstava aluminijskih legura pri visokim temperaturama odnosno potencijalnoj procjeni njihovih reduciranih svojstava, osobito o vremenski ovisnim deformacijama - puzanju. Sagledani su dostupni reološki modeli i mogućnosti adekvatne prilagodbe i primjene na aluminijске legure. U planu je razviti poopćen model puzanja prikladan svim aluminijskim legurama za konstrukcijsku namjenu odnosno reološki model s ciljem predikcije mehaničkih svojstava nakon požara.

Ključne riječi: *aluminij, aluminijске legure, požar, mehanička svojstva, konstitutivno ponašanje, puzanje, reološki model*

Abstract

The paper presents an overview of research on aluminium alloys and their applications as load-bearing structural components. It highlights the advantages and potential deficiencies of using elements made of aluminium alloys compared to steel, which remains the primary metal material in the construction industry, with the aim of encouraging more widespread use of aluminium. Particular attention is given to studies involving experimental testing of the mechanical properties of aluminium alloys at elevated temperatures, with a focus on the assessment of their reduced properties, especially time-dependent deformations - creep. Available rheological models are reviewed, including possibilities for their adequate adaptation and application to aluminium alloys. The intention is to develop a generalised creep model applicable to all aluminium alloys for structural purposes, also rheological model aimed at predicting mechanical properties following fire exposure.

Keywords: *aluminium, aluminium alloys, fire, mechanical properties, constitutive behaviour, creep, rheological model*

1. Uvod

Aluminij, iako treći najzastupljeniji element u Zemljinoj kori, relativno je nov materijal čija je upotreba u nosivim konstrukcijama omogućena razvojem odgovarajućih legura. Danas je, uz čelik, jedan od najvažnijih metala u građevinskoj industriji. Neke od prednosti su niska gustoća (oko trećine gustoće čelika), otpornost na koroziju bez dodatnih zaštita, nemagnetičnost te zadržavanje dobre duktilnosti, za razliku od čelika koji je sklon krtom lomu, pri niskim temperaturama. Visoko je reciklabilan, što ga čini održivim materijalom – procjene govore da će 70-98% današnjih aluminijskih konstrukcija biti reciklirano [1]. Legure prikladne za konstruktivne svrhe, iz serije 6xxx, su EN AW-6082, 6061, 6005A, 6106, 6063 i 6060 [2]. Međutim, aluminij ima i značajnih nedostataka. Niže talište i brža degradacija mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama čine ga manje otpornim na požar u odnosu na čelik. Degradacije su primjetne već iznad 100°C, a iznad 200°C mogu postati značajne. Zbog visokog koeficijenta toplinske vodljivosti, toplina se brže širi kroz aluminijске elemente, što je otegovna okolnost u otpornosti konstrukcije na požar. Nadalje, ponašanje aluminijskih legura zbog mikrostrukture oblika kristalne rešetke čije praznine omogućavaju difuzijsko gibanje atoma karakteriziraju vremenski ovisne deformacije kod dugotrajnog opterećenja materijala – puzanje, posebno pri izlaganju povišenim temperaturama.

2. Pregled istraživanja

2.1. Eksperimentalno određivanje svojstava aluminijskih legura

Brojne studije usmjerenе su na analizu materijalnih karakteristika i ponašanje aluminijskih legura pri sobnim temperaturama. Međutim, svojstva i reducirana nosivost nakon izlaganja povišenim temperaturama još su uvijek nedovoljno istraženi.

Eksperimentalna ispitivanja s ciljem određivanja odnosa naprezanja i deformacija aluminijskih legura pri povišenim temperaturama proveli su Maljaars et al. [3], pri čemu su posebnu pažnju posvetili utjecaju puzanja. Oblik krivulje odnosa naprezanja i deformacija ovisi o vrsti aluminijске legure, dodatno, ista legura nema jednak oblik krivulje naprezanje-deformacija pri sobnoj temperaturi u odnosu na onu pri povišenim temperaturama [4, 5]. Torić et al. [6] proveli su dva različita tipa ispitivanja kako bi odredili deformacije uzrokovanе naprezanjem te one povezane s puzanjem – stacionarni test puzanja. Predlažu analitički model prikidan za interpretaciju rezultata ispitivanja deformacija, uključujući sve tri faze puzanja. Na legurama 6063-T5 i 6061-T6, Su et al. [7], vrše stacionarne i nestacionarne testove pri temperaturama do 600°C. Liu et al. [8] provode detaljnu analizu stacionarnim vlačnim ispitivanjima uzoraka legure 6082-T6 zagrijanih od 100°C do 550°C, nakon čega su pred testove podvrgnuti prirodnom hlađenju ili hlađenju vodom. Na aluminijskoj leguri 6063-T5 s ispitivanjima do 550°C, Sun et al. [9], potvrdili su izražen utjecaj povišenih temperatura na mehanička svojstva, osobito iznad 200°C, uz prijedlog niza modela za procjenu postpožarnih svojstava navedene aluminijске legure. Megalingam et al. [10] provode ispitivanja aluminijске legure 7075 pri stalnoj temperaturi od 250°C i konstantnom visokom razinom naprezanja kako bi analizirali njeno ponašanje pri puzanju u uvjetima dugotrajnog toplinskog opterećenja.

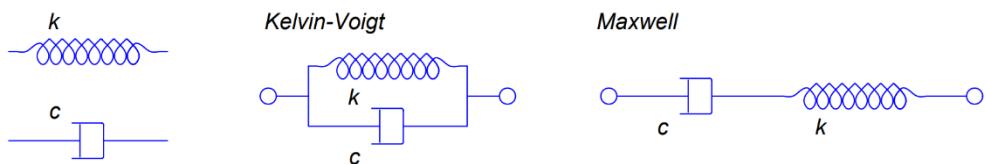
2.2. Procjena svojstava aluminijskih legura

Suzuki et al. [11] proveli su ispitivanja stupova i greda od aluminijskih legura pri požarnom opterećenju s ciljem određivanja odnosa naprezanja i kritične temperature. Temeljem dobivenih rezultata razvili su numeričke jednadžbe za predviđanje porasta temperature i jednadžbu procjene kritične temperature elemenata izloženih zagrijavanju. Ne uvažavajući učinak početnih imperfekcija i puzanja, Fogle et al. [12], razvijaju jednostavan analitički model za predikciju otkazivanja u požaru. Maljaars et al. [13] naglašavaju ograničenja konstitutivnog modela Harmathyja [14], osobito u kontekstu aluminijskih legura serije 6xxx koje pokazuju rani razvoj tercijarne faze puzanja. Razvijaju numerički model baziran na metodi konačnih elemenata zbog verifikacije konstitutivnog modela aluminijskih legura u požaru. Predlažu proširenje Dornovog odnosno Harmathyjevog modela odnosa naprezanja i deformacija u nestacionarnom režimu za aluminijске legure izložene požaru [15]. Maljaarovo proširenje modela, prilagodbom parametara specifičnih legurama, koristi i Soyal [16], koji ga validira kroz nestacionarne testove s rastućom temperaturom i konstantnim ili varijabilnim opterećenjem. Nadogradnjom Maaljarovog modela dodatnim parametrima, Kandare et al. [17], omogućili su procjenu otkazivanja tlačno opterećenih aluminijskih elemenata u požarnim uvjetima. Torić et al. [18] istražuju fenomen deformacija puzanja aluminija izloženog visokim temperaturama. Ključnim mehanizmom puzanja pri povišenim temperaturama smatraju dislokaciju uspona prema susjednoj ravnini klizanja te razvijaju reološki model koji obuhvaća sve tri faze puzanja. Model je uz radom definirana ograničenja primjenjiv na sve metale podložne puzanju na visokim temperaturama, a radom je kalibriran za čelik klase S275 odnosno aluminijsku leguru 6082-T6. Zheng i Zhang [19] istražuju ponašanje aluminijskih greda – legure 5083-H112 i 6060-T66, sa i bez zaštite, pri sobnim i povišenim temperaturama. Na temelju dobivenih rezultata i izrađenih modela ukazuju na konzervativnost pristupa kritičnoj temperaturi prema Eurokodu 9 te predlažu pojednostavljene formule za prirast temperature i proračun kritične temperature ovisno o vrsti legure. Pod različitim toplinskim i mehaničkim uvjetima, Li et al. [20] razvili su skup konstitutivnih modela za leguru 7050 definiranjem odnosa deformacije puzanja i očvršćivanja starenjem. Ovi modeli omogućuju pouzdano predviđanje svojstava materijala neovisno o početnim stanjima i povijesti opterećenja. Ispitivanjima legure 7075-T6, Sun et al. [21], odredili su koeficijente redukcije materijalnih svojstava u temperaturnom rasponu od 20°C do 550°C odnosno predložen je niz modela za procjenu krutosti i čvrstoće aluminijskih legura visoke čvrstoće tijekom i nakon požara. Kako bi obuhvatili cijeli spektar ponašanja aluminijskih legura pri povišenim temperaturama, autori su prilagodili modificirani dvostupanjski Ramberg-Osgood model prethodno predložen od Yun et al. [22] temeljen na opsežnoj bazi podataka s više od 700 krivulja naprezanje-deformacija pri sobnoj temperaturi. Spigarelli i Sandström [23] razvijaju model za procjenu razine puzanja čistog aluminija, a za kojeg je potrebno eksperimentalno utvrditi kemijski sastav, naprezanje i temperaturu.

3. Reološki model aluminija

Postojeći modeli opisani u prethodnom poglavlju, modeli predviđanja pojedinih materijalnih karakteristika, velika su karika u definiranju reološkog modela aluminija. Prvi reološki model razvijen je sedamdesetih godina 20. stoljeća, opisan Kelvinovim modelom sastavljenim od

opruge i prigušivača s pripadajućim konstantama, s ciljem procjene nelinearnih deformacija i otkazivanja nosivosti u betonu [24]. Za prezentiranje viskoelastičnih odgovora u čeliku, Chindam et al. [25], primjenjuju Kelvin-Voigtove i Maxwellove modele – paralelnu odnosno serijsku vezu opruge i prigušivača (**Slika 1.**). Analizirajući utjecaj topline na materijal tijekom cikličkih ispitivanja, kao bolje rješenje za prikaz mehaničkih i termomehaničkih ponašanja polikristalnih materijala u elastičnom režimu dan je Kelvin-Voigtov model što potiče njegovu primjenu na aluminij. Postoje modeli više serijski spojenih Kelvin-Voigt elemenata od kojih svaki opisuje određeni tip deformacijskog odgovora. Primjerice, reološki model dva serijski povezana elementa, razvijen od Torić i Burgess [26], gdje prvi element opisuje mehaničku, a drugi viskoznu komponentu deformacije uzrokovano puzanjem, dok je termalna deformacija ovisna samo o temperaturi izostavljena. Verifikacija svakog od modela konstitutivnih komponenti kao i modela u cijelini provedeni su eksperimentalnim podacima iz različitih izvora studija [27] te na vlastitim ispitivanjima čelika klase S275 u rasponu 400°C-600°C odnosno ispitivanjima na aluminijskoj leguri 6082-T6 pri rasponu 200°C-300°C [18, 27]. Uz odgovarajuću kalibraciju, model se smatra primjenjivim na bilo koju gradaciju ugljičnih čelika, S235-S355, te se može smatrati kao baza univerzalnog reološkog modela metala koje karakterizira puzanje pri povišenim temperaturama.



Slika 1. Sheme opruge, prigušivača, Kelvin-Voigtovog i Maxwellovog modela

4. Zaključak

Posljednjih desetljeća, aluminij se sve češće primjenjuje u inženjerskim područjima, posebno zbog omjera nosivosti i vlastite težine te izvrsne otpornosti na koroziju. S obzirom na benefite aluminija, cilj rada je potaknuti učestaliju upotrebu u građevinarstvu. Aluminij predstavlja skupine legure različitih svojstava i ponašanja, s dodatnim razlikama legura unutar skupina. Zbog mnogobrojnih razlika aluminijskih legura, uz istraživanja pojedine legure potrebno je izvršiti i komparativne analize. Kako bi se reducirao nedostatak bitnih informacija za nosive elemente, provest će se analiza puzanja u elementima od aluminijskih legura. Uz jasno naglašenu problematiku požarne otpornosti, poseban fokus bit će na takvim analizama. S ciljem redukcije skupih i složenih eksperimentalnih ispitivanja, ključne parametre je potrebno istražiti numeričkim analizama. Dan pregled motivira razvoj univerzalnog reološkog modela za aluminijске konstrukcije izložene ekstremnim uvjetima, uključujući sve vremenski ovisne komponente deformacije. Potrebno je odrediti i uzeti u obzir sve ključne termomehaničke varijable poput temperature i njenog prirasta, naprezanja i brzinu deformacije. Nakon eksperimentalne analize ponašanja legura na visokim temperaturama, razvijat će se modeli puzanja prikladni tim legurama i popravljen model svim aluminijskim legurama korištenim u građevinarstvu odnosno bit će definiran reološki model za procjenu opsega oštećenja i preostalih mehaničkih svojstava aluminijskih elemenata nakon izlaganja požaru.

Literatura

- [1] Aluminium - The Green Metal, 2012. Hazlemere, (<https://www.hazlemerecommercial.co.uk/blog/aluminium-the-green-metal/2012/04/>), pristupljeno: 12.5.2025.
- [2] EN 1999-1-1 (2007) (English): Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- [3] Maljaars, J., Soetens, F., Snijder, H. H.: Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests, Thin-Walled Structures, 47-11, 2009, (1404–1417), DOI: [10.1016/j.tws.2009.02.008](https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.02.008)
- [4] Maljaars, J., Soetens, F., Katgerman, L.: Constitutive model for aluminum alloys exposed to fire conditions, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 39A-4, 2008, (778–789), DOI: [10.1007/s11661-008-9470-0](https://doi.org/10.1007/s11661-008-9470-0)
- [5] Sun, Y., Fu, Z., Song, Y., Xia, J.: Cross-Sectional Behavior of Aluminum Alloy Channel Section Stub Columns after Exposure to Fire, Journal of Structural Engineering, 149-7, 2023, DOI: [10.1061/jsendh.steng-12383](https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-12383)
- [6] Jiang, S., Xiong, Z., Guo, X., He, Z.: Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions, Thin-Walled Structures, 124, 2018, (523–537), DOI: [10.1016/j.tws.2017.12.035](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.035)
- [7] Su, M. N., Young, B.: Material properties of normal and high strength aluminium alloys at elevated temperatures, Thin-Walled Structures, 137, 2019, (463–471), DOI: [10.1016/j.tws.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.012)
- [8] Liu, Y., Liu, H., Chen, Z.: Post-fire mechanical properties of aluminum alloy 6082-T6, Construction and Building Materials, 196, 2019, (256–266), DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237)
- [9] Sun, Y., Zhang, K., Gong, G.: Material properties of structural aluminium alloys after exposure to fire, Structures, 55, 2023, (2105–2111), DOI: [10.1016/j.istruc.2023.07.027](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.07.027)
- [10] Megalingam, A., Ahmad, A. H., Alang, N. A., Alias, J., Naher, S.: Creep Behaviour of Aluminium 7075 Feedstock Billet Globular Microstructure at High Processing Temperature, Journal of Failure Analysis and Prevention, 24-3, 2024, (1324–1332), DOI: [10.1007/s11668-024-01917-7](https://doi.org/10.1007/s11668-024-01917-7)
- [11] Suzuki, J., Ohmiya, Y., Kohno, M., Yusa, S., Harada, K., Wakamatsu, T.: Evaluation of fire resistance for aluminum alloy members, AIJ Journal of Technology and Design, 16, 2002, (151-156), DOI: [10.3130/aijt.8.151_2](https://doi.org/10.3130/aijt.8.151_2)
- [12] Fogle, E. J., Lattimer, B. Y., Feih, S., Kandare, E., Mouritz, A. P., Case, S. W., Lattimer, B. Y.: Compression Load Failure of Aluminum Plates due to Fire, Engineering Structures Journal, 34, 2011, (155-162), DOI: [10.1016/j.engstruct.2011.09.014](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.014)
- [13] Maljaars, J., Soetens, F., Snijder, H. H.: Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 2: Finite element models, Thin-Walled Structures, 47-11, 2009, (1418–1428), DOI: [10.1016/j.tws.2008.06.003](https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.06.003)

- [14] Harmathy, T.Z.: A comprehensive creep model, *Journal of Basic Engineering*, 89-3, 1967, (496-502), DOI: [10.4224/40001531](https://doi.org/10.4224/40001531)
- [15] Maljaars, L., Twilt, L., Fellinger, J. H. H., Snijder H. H., Soetens, F.: Aluminium structures exposed to fire conditions-an overview, *Heron*, 55-2, 2010, (85-122)
- [16] Soyal, Z.: Creep of aluminum alloys exposed to fire conditions, *University of technology Eindhoven - Master thesis*, 2016.
- [17] Kandare, E., Feih, S., Kootsookos, A., Mathys, Z., Lattimer, B. Y., Mouritz, A. P.: Creep-based life prediction modelling of aluminium in fire, *Materials Science and Engineering: A*, 527-4-5, 2010, (1185–1193), DOI: [10.1016/j.msea.2009.10.010](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.010)
- [18] Torić, N., Glavinić, I. U., Burgess, I. W.: Development of a rheological model for creep strain evolution in steel and aluminium at high temperature, *Fire and Materials*, 42-8, 2018, (879–888), DOI: [10.1002/fam.2643](https://doi.org/10.1002/fam.2643)
- [19] Zheng, Y. Q., Zhang, Z.: The fire performance and fire-resistance design of aluminium alloy I-beams, *Fire and Materials*, 40-1, 2016, (141–157), DOI: [10.1002/fam.2275](https://doi.org/10.1002/fam.2275)
- [20] Li, Y., Hou, T., Huang, X., Gao, Y., Zeng, Y., Li, D.: Constitutive modelling of coupled creep deformation and age hardening behavior of aluminum alloys under various thermal and mechanical loadings, *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 2023, (333–353), DOI: [10.1016/j.jmrt.2023.05.183](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.183)
- [21] Sun, Y., Cheng, W., Chen, K.: Experimental study of in-fire and post-fire material response of high-strength aluminium alloys, *Journal of Building Engineering*, 91, 2024, DOI: [10.1016/j.jobe.2024.109581](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109581)
- [22] Yun, X., Wang, Z., Gardner, L.: Full-Range Stress–Strain Curves for Aluminum Alloys, *Journal of Structural Engineering*, 147-6, 2021, DOI: [10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002999](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002999)
- [23] Spigarelli, S., Sandström, R.: Basic creep modelling of aluminium, *Materials Science and Engineering: A* 711, 2018, (343–349), DOI: [10.1016/j.msea.2017.11.053](https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.053)
- [24] Helman, H., Creus, G. J.: A NON-LINEAR RHEOLOGICAL MODEL DESCRIBING TIME-DEPENDENT DEFORMATIONS AND FAILURE, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 10, 1975, (167-172), DOI: [10.1016/0020-7462\(75\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0020-7462(75)90034-7)
- [25] Chindam, C., Venkata, K. C., Balasubramaniam, K., Prakash, R. V.; Thermomechanical response of metals: Maxwell vs. Kelvin-Voigt models, *Materials Science and Engineering: A* 560, 2013, (54–61), DOI: [10.1016/j.msea.2012.08.152](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.152)
- [26] Torić, N., Burgess, I. W.: A unified rheological model for modelling steel behaviour in fire conditions, *Journal of Constructional Steel Research*, 127, 2016, (221–230), DOI: [10.1016/j.jcsr.2016.07.031](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.031)
- [27] Torić, N., Burgess, I.: Rheological modelling of high-temperature stationary creep tests of Grade S275JR steel, *ce/papers*, 4, 2021, (546-550), doi: [10.1002/cepa](https://doi.org/10.1002/cepa)

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.3>

Nastanak i razvoj R&D laboratorija

The emergence and development of R&D laboratories

Marija Džapo¹, Silvio Bašić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mdzapo@grad.hr, sbasic@grad.hr

Sažetak

Cilj rada je s arhitektonskog gledišta istražiti povijesni razvoj laboratorija za istraživanje i razvoj (R&D lab), njegov karakter i aktivnosti koje može obuhvatiti, odnos istraživanja i razvoja, te sam program koji definira funkcionalno-organizacijsku shemu laboratorija i laboratorijske zgrade.

Laboratorije za istraživanje i razvoj će se promatrati s aspekta aktivnosti koje su podloga za određivanje projektnog programa i istražiti će se specifična obilježja po kojima se razlikuju u odnosu na laboratorije obuhvaćene podjelom prema načinu korištenja (nastavni, istraživački, analitički, razvojni laboratorij). Rezultati će pomoći u razumijevanju interakcije istraživanja i razvoja i drugih zahtjeva koji se stavlaju pred laboratorije (npr. trendovi razvoja) prilikom izrade projektnih programa i projektiranja suvremenih laboratorija.

Istraživanje je nastalo u sklopu doktorskog studija na Arhitektonском fakultetu na temu kriterija za programiranje znanstveno-istraživačkih sadržaja.

Ključne riječi: istraživanje i razvoj, programiranje laboratorija, industrijski laboratorij

Abstract

The aim of the paper is to research, from an architectural point of view, the historical overview of the research and development laboratory (R&D lab), its character and the activities it can encompass, as well as the interaction between research and development and the program that defines the functional scheme of the laboratory and the laboratory building.

Research and development laboratories will be observed from the perspective of activities that determine the design program and will explore specific characteristics that distinguish them from laboratories included in classification according to the type of use (teaching, research, analytical, development laboratory). The results will help to understand the interaction of research and development and other requirements placed before laboratories (e.g. development trends) when creating design programs and designing modern laboratories.

This research is a part of the doctoral study at the Faculty of Architecture on the topic of criteria for programming scientific and research facilities.

Keywords: research and development, laboratory programming, industrial laboratory

1. Uvod

Pojam laboratorij predstavlja funkcionalno-organizacijsku cjelinu opremljenu i uređenu za provedbu eksperimenata i istraživanje. Početkom 19.st na sveučilištima se osnivaju prvi laboratorijski prirodnih znanosti [1], a na prijelazu u 20. st. osim znanstvenih i istraživačkih laboratorijskih pojavi se veliki broj „industrijskih laboratorijskih“ [2] čija istraživanja su fokusirana na otkrića koja mogu polučiti komercijalnu vrijednost.

U literaturi nalazimo sljedeću podjelu laboratorijskih prema načinu korištenja:

- nastavni (praktikumi i nastavni laboratorijski),
- istraživački (temeljna i primjenjena istraživanja),
- analitički / dijagnostički,
- razvojni [3]

Razlike u načinu korištenja, a ovisno o grani znanosti, podrazumijevaju različite programske zahtjeve i prostorno-funkcionalnu organizaciju.

Osim ovih laboratorijskih, koje razlikujemo prema načinu korištenja, postoje i laboratorijski kod kojih dolazi do preklapanja funkcija i sadržaja, kao što je to slučaj kod laboratorijskih za istraživanje i razvoj (research and development - R&D lab). To su laboratorijski usmjereni na istraživanje novih tehnologija, proizvoda, procesa ili rješenja, odnosno cilj im je unaprjeđenje znanstvenih spoznaja i stvaranje inovativnih proizvoda i usluga [4]. Razvili su se iz industrijskih istraživačkih laboratorijskih, a predstavljaju odgovor na dinamično kompetitivno gospodarsko okruženje u kojem se želi objediniti ciljane dijelove istraživačkih i razvojnih laboratorijskih kako bi se minimiziralo vrijeme razvoja proizvoda.

2. Pojmovi i definiranje istraživanja i razvoja

Istraživanje i razvoj obuhvaća niz aktivnosti kojima je cilj proširenje postojećeg i osmišljavanja novih primjena dostupnog znanja [5]. Na temelju provedenog istraživanja i analize literature predlaže se sljedeća sistematizacija aktivnosti u laboratorijskim za istraživanje i razvoj:

- Temeljno istraživanje
- Primjenjeno istraživanje
- Eksperimentalni razvoj
- Istraživanje i razvoj
- Razvoj

Temeljno istraživanje je istraživački (ili teorijski rad) poduzet s ciljem stjecanja novih znanja o vidljivim činjenicama i temeljima neke pojave, bez neke određene primjene ili upotrebe. Istraživanja mogu biti usmjerena prema nekom širokom području od općeg interesa, s nizom mogućih primjena u budućnosti. [5]

Primjenjeno istraživanje je istraživački rad poduzet s ciljem stjecanja novih znanja i prvenstveno je usmjereno prema specifičnom, praktičnom cilju (ili objektu). [5]

Eksperimentalni razvoj predstavlja moguću fazu u procesu razvoja proizvoda. [5] Može obuhvaćati ispitivanje osnovnih fizikalnih mogućnosti ili nekog novog principa djelovanja mehanizma za neku konkretnu namjenu, ali nije nužno direktno vezano uz neki proizvod ili se samo provodi radi validacije, a nakon toga slijedi korak konkretnog prenošenja tih saznanja na razvoj proizvoda.

Istraživanje i razvoj, može obuhvaćati eksperimentalni razvoj i/ili razvoj uz testiranje ili razvoj nekog manjeg detalja. Tradicionalni modeli istraživanja i razvoja slijede linearni proces sličan fazama razvoja novih proizvoda. [4]

Razvoj koristi postojeće tehnologije i znanja da bi došli do proizvoda ili do neke nove kombinacije proizvoda; usmjeren je na praktičnu primjenu ideja nastalih tijekom istraživanja i razvoja. Ova faza uključuje stvaranje i usavršavanje proizvoda, sustava ili procesa na temelju rezultata istraživanja.

3. Povijesni razvoj R&D laboratorija

Povijesni razvoj može se promatrati kroz razvoj industrijskih istraživačkih laboratorija, a u novije vrijeme kroz razvoj istraživačkih centara koji ide prema povezivanju u veće prostorne cjeline koje nazivamo tehnološkim parkovima.

3.1. Razvoj industrijskih istraživačkih laboratorija

Krajem 18. i početkom 19. stoljeća industrijske kompanije rastu i osnivaju odjele za različite djelatnosti: proizvodnja, distribucija, financije, te istraživanje i razvoj. [6] Laboratoriji su u početku bili hibridnog karaktera: vršili su ispitivanja i mjerena za osiguranje kvalitete, rješavali su probleme koji su se javili u proizvodnji, a bilo je i istraživanja izravno povezanih s poboljšanjem postojećih i/ili daljnjim razvojem novih proizvoda. [6]

Proučavajući povijest industrijskih istraživačkih laboratorija primjećuje se da su svi laboratoriji prošli kroz slične promjene. U nastavku je, na primjeru Philipsovog Naturkindig Laboratorium-a (Nat.Lab-a), istražen razvoj (i sadašnje stanje) jednog relevantnog R&D laboratorija. Ovaj, izvorno laboratorij za fiziku, osnovan je 1914. god. i u njemu su vršena temeljna istraživanja s ciljem poboljšanja postojećih proizvoda. [6]

U prvom dijelu povijesti (1923.-1946.) glavni cilj Nat.Lab-a je razvoj novog znanja kroz temeljna istraživanja kako bi se postigla željena diverzifikacija proizvoda (uprava tvrtke je odlučivala o uvođenju novih proizvoda). [6]

Laboratorij je ubrzano počeo rasti nakon što se preselio u četvrt Strijp u Eindhovenu. Tlocrtna površina se povećala od 2.700 m² 1924. godine na 17.700 m² 1930. [6] Laboratorij je vršio mjerena za ispitivanje kvalitete žarulje (jedni proizvod tvrtke Philips u to vrijeme) i proučavao je prirodne fenomene žarulja s ciljem poboljšanja istih. Daljnjim proširenjem assortimenta proizvoda laboratorij kreće u istraživanja vezana uz ta područja. [6]

U drugom dijelu povijesti (1946.-1972.) cilj Nat.Lab.-a je razumijevanje prirodnih pojava (temeljna istraživanja) koje bi kasnije mogle biti korisna za razvoj novih i poboljšanje postojećih proizvoda. [6] Veličina laboratorija je također narasla u ovom periodu. Do 1944. tlocrtna površina Nat.Lab-a u četvrti Strijp, u Eindhovenu, je bila 20.000 m², a od 1952. do 1955. tlocrtna površina je narasla s 25.620 m² na 27.920 m². Laboratorij 1963. godine seli u nove prostore u Waalre (predgrađe južno do Eindhovena). [6] Osnivaju se odjeli za nove proizvode-New Product Division (PD) od kojih je svatko imao svoje razvojne laboratorije. [6]

U trećem dijelu povijesti (1972.-1994.) ciljevi Nat.Lab-a polako se usmjeravaju prema potrebama Product Divisiona (PD-a) umjesto odražavanja vlastitih ideja o razvoju novih proizvoda (postojala je stroža selekcija poduzimanja novih istraživanja). Istraživanja su više usmjerena prema zadovoljavanju potreba tržišta, a sredstva Nat.Lab-a su postala ograničena. [6]

Razlog ovih promjena u strategiji industrijskih istraživačkih laboratorija nalazimo u gospodarskim i društvenim promjenama druge polovice 20. stoljeća. Završava razbolje gospodarskog rasta, raste svijest o negativnim učincima tehnološkog razvoja i tvrtke si više ne mogu priuštiti iznošenje bilo kakvog novog proizvoda na tržiste. [6]

Krajem 1990-ih, aktivnosti istraživanja i razvoja tvrtke Philips su bile raširene po cijelom Eindhovenu. Upravni odbor tvrtke 1999. god. je odlučio uspostaviti Philips High Tech Campus, u kompleksu NatLab-a, kako bi svi razvojni odjeli bili centralizirani. [7] Philips je 2003. godine otvorio kampus drugim tvrtkama (preimenujući ga u High Tech Campus Eindhoven) s ciljem poticanja interakcije među istraživačima s različitim tehničkim predznanjem. U ožujku 2012. kampus je prodan privatnom investitoru, Philips ostaje u kampusu, ali se njegov status promjenio iz vlasnika i upravitelja u rezidenta. [7]

3.2. Razvoj tehnoloških parkova

Tehnološki park je urbanizirana cjelina sa specijaliziranim sadržajima visoke tehnologije namijenjene istraživanju, razvoju i proizvodnji. Karakterizira ih suradnja između industrije, akademiske zajednice i vlada, a osnovna zadaća im je podupiranje inovativnih aktivnosti i komercijalizacija rezultata znanstvenih istraživanja. [8]

Pojavili 50-ih god. 20.st. s uspostavom Stanford Research Parka, a razvoj doživljavaju 1980.-ih god.

Ono što je u planerskom / organizacijskom smislu prepoznato kao drugačije i inovativno jest to da tehnološki parkovi zahtijevaju okruženje koje djeluje inspirativno i podupiruće za one koji razvijaju nove tehnologije. [9] Obično se smještaju na rubnim dijelovima grada ili uz sveučilišta i istraživačke institute, a funkcija parka nije ograničena samo na stvaranje i prijenos znanja, već kao inovativni urbani element ima utjecaj na lokalno i regionalno okruženje. Neke od glavnih prostornih obilježja tehnološko-istraživačkih parkova su:

smještaj uz centre znanja, dostupnost (dobra prometna povezanost), prepoznatljivost sadržaji unutar parka uz istraživačke i razvojne centre (administrativni i javni, poslovni, uslužni, stambeni, sportsko-rekreacijski, zabavni), oblikovanje prirodnog krajolika. [10]

Privukli su pozornost zato što su uspješno spojili poticajno okruženje, gospodarstvo i primjenjuju tehnologiju, a sveučilišta, vlade i privatni sektor iskoristili su ovu novu urbanu tipologiju kako bi potaknuli inovacije i razvoj. [9]

4. Budućnost i trendovi razvoja

U vrijeme globalizacije inovacija je osnovni preduvjet za gospodarski razvoj i očuvanje konkurentnosti. Pojam inovacije uključuje nova tehnološka, ekonomski, organizacijska i društvena rješenja. [11] Tijekom posljednjih desetljeća koncept inovacije postepeno se promijenio od linearog procesa do sustava s velikim brojem različitih elemenata, pa se sada pojavljuju potpuno nove inovacije poput štedljivih inovacija ili organskih inovacija. [11] Sukladno ovim trendovima istraživanje i razvoj prolazi kroz značajne promjene kao odgovor na pritise da se postigne više s manje resursa i bržim tempom. Trend u nastajanju, vidljiv u korporacijama, je upotreba partnerstva, suradnje i outsourcinga kao zamjena za unutarnje istraživanje i razvoj. Sukladno tome pojavljuje se pojam otvorene inovacije koji označava situaciju u kojoj se organizacija ne oslanja samo na vlastito interno znanje, izvore i resurse

za inovacije već koristi više vanjskih izvora kao što su povratne informacije od kupaca, objavljeni patentni, konkurentni, vanjske agencije za poticanje inovacija. [12]

Danas korisnik igra ključnu ulogu u procesu inovacija, naglašena je važnost otvorenosti, suradnje i pristupa usmjerenih na korisnike budućih inovacija. [13]

Akademска zajednica je svjesna potrebe premošćivanja temeljnih istraživanja i stvarnog života te stvaranja novih oblika i formata laboratorijskih, poput živih laboratorijskih. [13] Živi laboratorijski povezuju dionike iz javnog i privatnog sektora, od tvrtki, agencija, sveučilišta, instituta i korisnika koji surađuju u stvaranju, izradi prototipova, testiranju nove tehnologije, usluga, proizvoda i sustava u stvarnom okruženju. [14]

Inovacije se sele iz istraživačkih parkova i sveučilišnih kampusa do urbanih inovacijskih četvrti – gdje urbana sredina može postati poligon za istraživanje i razvoj i eksperimentiranje (npr. testiranje pametne urbane infrastrukture); gradske četvrti mogu postati živi laboratorijski za istraživanje tehnologije koja ima društvenu ili prostornu dimenziju, posebno u području robotike, strojnog učenja i automatizirane tehnologije. [15]

5. Zaključak

Analiza laboratorijskih za istraživanje i razvoj u socioekonomskom kontekstu pokazuje ovisnost političkih i tržišnih utjecaja i različitih modela istraživanja i razvoja, a posljedično i istraživačkog procesa i programa laboratorijskih. Trenovi razvoja dovode do preklapanja funkcija i sadržaja, a laboratorijski za istraživanje i razvoj predstavljaju odgovor na kompetitivno gospodarsko okruženje u kojem se želi objediniti ciljane dijelove istraživačkih i razvojnih laboratorijskih kako bi se minimiziralo vrijeme razvoja proizvoda, što program čini istovremeno kompleksnijim. S arhitektonskog gledišta mogu imati kompleksnu prostorno-funkcionalnu organizaciju upravo zbog dinamičnog odnosa istraživanja i razvoja s jedne strane te političkih i tržišnih utjecaja s druge strane. Dodatno, osim što su mesta znanstvenih otkrića i razvoja novih proizvoda njihovo planirano grupiranje može biti generator gospodarskog tako i prostornog razvoja bez obzira jesu li smješteni unutar urbanog gradskog tkiva ili u sklopu tehničkih parkova.

Ovdje su analizirani odnosi istraživanja i razvoja, sam karakter laboratorijskih za istraživanje i razvoj i aktivnosti koje mogu obuhvatiti takvi laboratorijski, nastanak i razvoj industrijskih istraživačkih laboratorijskih, te novi formati budućih laboratorijskih koji govore o modernizaciji laboratorijske infrastrukture i pojavi novih načina razmišljanja i kulture inovacija.

Provedeno istraživanje pokazalo je da su laboratorijski za istraživanje i razvoj bili hibridnog karaktera od svojih početaka do danas, a evoluirali su od industrijskih istraživačkih laboratorijskih uz tvornice, preko laboratorijskih orijentiranih na proizvode i razvoj istraživačkih centara koji se povezuju u veće prostorne cjeline, do živih laboratorijskih integriranih u urbanu tkivo. Istraživanje će pomoći u boljem razumijevanju suvremenih koncepcija istraživanja i razvoja, a sukladno s tim i potreba laboratorijskih što je nužno za njihovo kvalitetno programiranje. Analiza laboratorijskih za istraživanje i razvoj s arhitektonskog gledišta ukazuje na promjenjive karakteristike programa koji su posljedica različitih aktivnosti i veza što može doprinijeti dalnjem istraživanju kriterija za programiranje laboratorijskih za istraživanje i razvoj.

Literatura

- [1] Kohler, R. E.: Lab History: Reflections, Isis, Vol. 99 No. 4, 2008. pp. 761–768. DOI: <https://doi.org/10.1086/595769>
- [2] De Vries, M. J.: Industrial Research and Development Labs: How They Inform Science and Technolgy Curicula, The Journal of Technolgy Studies, Vol. 26 No.1, 2000., pp. 64–70. DOI: <doi: 10.21061/jots.v26i1.a.10>
- [3] Dittrich, E.: *The Sustainable Laboratory Handbook: Design, Equipment, Operation.* Weinheim, 2015., Wiley-VCH Verlag GmbH&Co, DOI: 10.1002/9783527337095
- [4] ResearchGate,
(https://www.researchgate.net/publication/374165839_Research_and_Development#full-text) pristupljeno: 25.03.2025.]
- [5] Frascati Manual: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Development, 2015., OECD Publishing
DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264239012-en>
- [6] De Vries, M.J.: 80 Years of Research at the Philips Natuurkundig Laboratorium 1914.-1994., 1st ed., 2005., Amsterdam: Pallas Publications
- [7] Romme, A.G.L.: Toward the Blueprint of Campus-Based Ecosystems for Innovation, Engineering Management Research, Vol. 6 No.1, 2017.,([10.5539/emr.v6n1p84](https://doi.org/10.5539/emr.v6n1p84)), pristupljeno: 17.04.2025
- [8] Brusko, Z.: Tehnološki parkovi i njihova uloga u gospodarskom razvoju, Ekonomski miso i praksa, Vol. 4 No.2, 1995. pp.321-334, DOI: <https://hrcak.srce.hr/222060>
- [9] Bašić, S., Vezilić Strmo, N., Sladoljev, M.: Pametni gradovi i zgrade, Građevinar, Vol. 71 No.10, 2019., pp. 949-964, DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.2733.2019>
- [10] Almaamory A.T., Slik G.A.: Science and Technology Park as an Urban Element Towards Society Scientific Innovation Evolution, ICEST 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021.
(<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1090/1/012119/pdf>), pristupljeno: 17.04.2025.]
- [11] Kostemir, M., Meissner, D.: Conceptualizing the innovation process – trends and outlook, Munich Higer School of Economics Research Papers, 2013. (<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/46504/>), pristupljeno: 27.03.2025.
- [12] Chesbrough, H.: Open Innovation, Research Technology Management, Vol. 55 No.4, 2012., pp. 20-27, (<https://www.jstor.org/stable/26586624?seq=1>), pristupljeno: 17.04.2025.
- [13] Paice, A., Malakhatka, E.: Future Labs: Making the Future Tangible Today, Inventing the Almost Impssible., Springer, pp. 81-94, 2023., DOI: [10.1007/978-3-031-36224-8_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36224-8_8)
- [14] Herth, A., Verburg, R., Blok, K.: The Innovation Power of Living Labs to Enable Sustainability Transitions: Challenges and Opportunities of On-Campus Initiatives', Creativity and Innovation Management, Vol. 39 No.2, 2024.
DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/caim.12649> , pristup: 27.03.2025.
- [15] Schemel, S; Carreau, M; DiMambro, J; Uerz, G: Future of Labs – Elements of a Future Scientific Research Ecosystem, London: Arup, 2020.
(<https://www.arup.com/insights/future-of-labs/>), pristupljeno: 27.03.2025.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.4>

Eksperimentalno i teorijsko ispitivanje ploča s kružnom rupom pod jednoosnim vlačnim opterećenjem u linearnoj analizi

*Experimental and theoretical investigation of plates with circular hole
under uniaxial tension in linear analysis*

Laura Grbac¹, Gordan Jelenić¹

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, laura.grbac@uniri.hr, gordan.jelenic@uniri.hr

Sažetak

Na temelju dostupne literature uočeno je da klasična teorija elastičnosti ne može s dovoljnom preciznošću opisati koncentraciju naprezanja u jednoosnoj rastegnutoj ploči s kružnom rupom, čak ni u linearnoj analizi homogenih uzoraka. Cilj ovog rada je istražiti razloge uočenih odstupanja i provjeriti može li klasična teorija adekvatno opisati razmatrani problem. U tu svrhu provedena su laboratorijska vlačna ispitivanja aluminijskih uzoraka s različitim promjerima kružnih rupa, pri čemu su deformacije praćene uz pomoć tenzometara. Prikazana je usporedba s analitičkim (Howlandovo rješenje) i numeričkim modelima. Dobivena odstupanja ukazuju na potrebu za dalnjim istraživanjem alternativnih pristupa.

Ključne riječi: koncentracija naprezanja, gradijent deformacije, tenzometarska mjerenja, eksperimentalna validacija.

Abstract

A review of the available literature reveals that the classical theory of elasticity does not describe stress concentration in a uniaxially loaded plate with a central circular hole with sufficient accuracy, even within the framework of linear analysis for homogeneous specimens. The main aim of this study is to explore the causes of these discrepancies and to assess whether the classical theory can adequately capture the problem under consideration. To this end, tensile tests were conducted on aluminium specimens with varying hole diameters, using strain gauges for strain measurements. A comparison is presented against both analytical predictions (Howland's solution) and numerical models. The observed gaps highlight the need for further investigation into alternative modelling approaches.

Keywords: stress concentration, strain gradient, strain gauge measurements, experimental validation.

1. Uvod

U konstrukcijskim elementima se nerijetko javljaju diskontinuiteti (poput rupa, zareza, naglih suženja i sl.), što uzrokuje lokalno povećanje naprezanja – poznato kao koncentracija naprezanja, koja se kvantificira faktorom koncentracije naprezanja, definiranim kao omjer maksimalnog naprezanja na rubu diskontinuiteta i nominalnog naprezanja.

Za inženjere je od iznimne važnosti točno predvidjeti vrijednost koncentracije naprezanja, jer se upravo na tim mjestima mogu pojavit prva oštećenja. Stoga nije iznenadujuće da se ovaj problem već dugi niz godina analizira u različitim geometrijskim i materijalnim varijantama [1].

U literaturi se ističe razlika između teorijskih predviđanja i eksperimentalnih rezultata kod problema gdje se pojavljuju veliki gradjeni deformacije [2], npr. kod jednoosnog rastezanja ploče s kružnom rupom - u nelinearnom (plastičnom) režimu [3], ali ponekad i u linearnoj analizi [4].

1.1. Motivacija: zašto je vrijednost faktora koncentracije naprezanja bazirana na klasičnoj teoriji diskutabilna?

Ako se fokusiramo na problem s jednom kružnom rupom u simetričnoj izotopnoj elastičnoj ploči podvrgnutoj jednoosnom vlačnom naprezanju, složenost analitičkog rješenja znatno se razlikuje ovisno o tome razmatra li se ploča konačne širine (Howlandovo rješenje [5]) ili "beskonačne" širine (Kirschovo rješenje [6]). Kirschovo rješenje ne uzima u obzir omjer širine ploče d i promjera rupe w te predviđa konstantni faktor koncentracije naprezanja jednak 3. Međutim, u eksperimentalnim uvjetima ograničeni smo na ploče konačnih dimenzija, zbog čega je praktičnije eksperimentalno validirati Howlandovo rješenje (posebno kod uskih uzoraka) i predviđa nešto niže vrijednosti faktora koncentracije naprezanja u odnosu na Kirschovo rješenje.

U [4] je prikazan eksperiment na uskim uzorcima od kompozitnog materijala, uz korištenje beskontaktne metode ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) te su rezultati uspoređeni s analitičkim rješenjem u linearnoj analizi za beskonačnu ploču (generalizirano za kompozitne materijale) i sa numeričkim rezultatima gdje su eksperimentalni rezultati u prosjeku manji od analitičkog rješenja za 60% a od numeričkih rezultata za oko 48%. Razlika je u radu pripisana isključivo nepreciznosti mjerne metode.

U [7] su provedena istraživanja broja i veličina rupa u izotropnim i ortotropnim pločama podvrgnutima jednoosnom rastezanju u okviru linearne analize gdje su deformacije mjerene uz pomoć tenzometra, a rezultati uspoređeni s numeričkim vrijednostima. Autori su pokazali da su najveće prosječno odstupanje upravo dobili za slučaj ploče s jednom kružnom rupom u izotropnoj ploči gdje su eksperimentalna mjerena u prosjeku za 40% manja od numeričkog izračuna. S obzirom da u radu nedostaje opis metodologije usporedbe rezultata (npr. točna pozicija tenzometara na uzorku) teško je ustavoviti koji je uzrok te razlike.

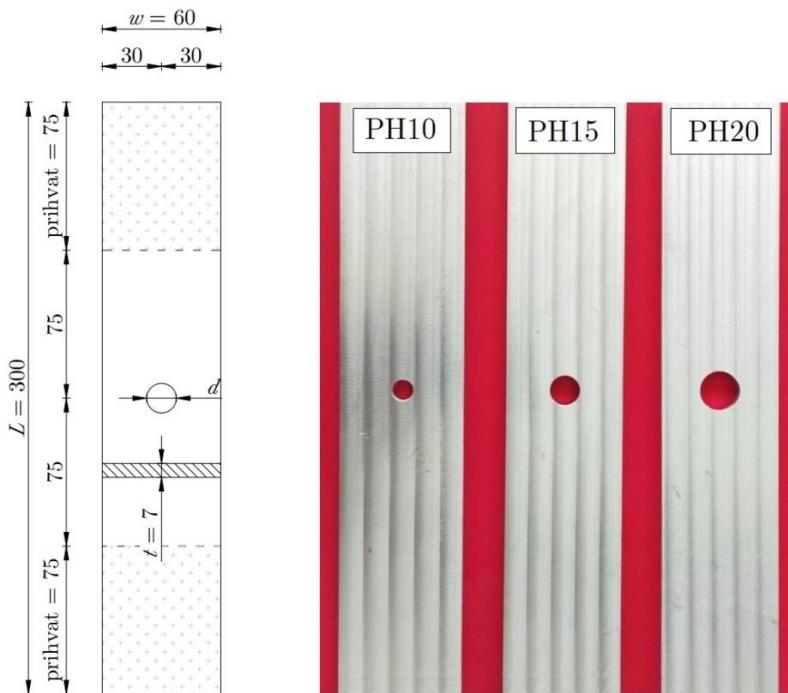
Manje vrijednosti koncentracije naprezanja dobivene eksperimentalno (oko manje 6% od numeričke linearne analize) prikazane su u [8], gdje autori ističu kako je vrlo teško precizno provesti mjerena u području velikog gradijenta deformacije. Neki autori posebno naglašavaju da se odstupanja između klasične teorije elastičnosti i eksperimentalnih

rezultata javljaju upravo u problemima u kojima dolazi do velikih gradijenata deformacije [9], [10].

Literatura nam stoga pokazuje da su evidentirane manje vrijednosti naprezanja na rubu rupe te da je i krivulja raspodjele naprezanja u blizini rupe nešto drugačija od teorijskog predviđanja [2], [4], [7], [9]. Ipak, u radu [11], izneseno je da se eksperimentalni rezultati dobro podudaraju s teorijom u elastičnom rangu što nije slučaj kod plastičnog ponašanja, gdje je razlika u rezultatima pripisana isključivo nelinearnim efektima. Ova dva suprotstavljena pogleda motiviraju ovo istraživanje u kojem želimo pronaći odgovor na pitanje *Može li klasična linearna teorija elastičnosti dovoljno precizno opisati razmatrani problem i koja je metodologija primjerena za eksperimentalnu validaciju?*

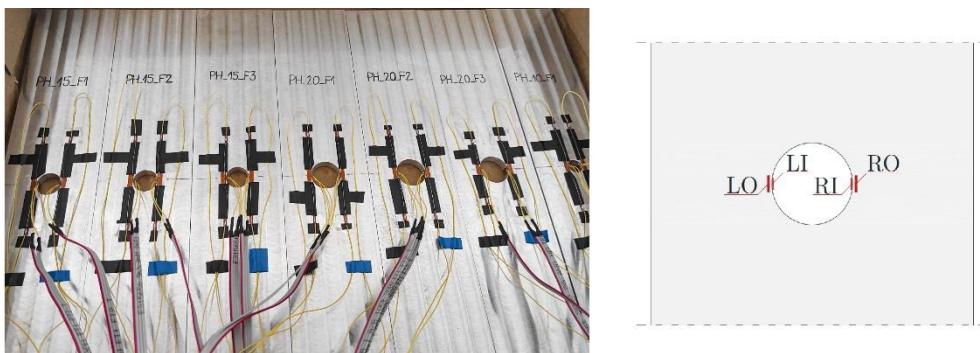
2. Metodologija laboratorijskog ispitivanja

Provreda su laboratorijska ispitivanja na skupu pravokutnih uzorka od aluminijске legure EN-AW 6060 t66 s definiranim geometrijskim karakteristikama: duljina $L = 300$ mm, širina $w = 60$ mm i debljina $t = 7$ mm (Slika 1). Promjeri rupa po pojedinom tipu uzorka su $d = 10, 15$ i 20 mm, a uzorci su u skladu s promjerima označeni kao PH10- i , PH15- i te PH20- i , pri čemu $i = 1, 2, 3$ predstavlja redni broj pojedinog uzorka (tri komada za svaki tip uzorka). Modul elastičnosti $E = 67\ 050.55$ MPa i Poissonov omjer $n = 0.3$ određeni su vlačnim ispitivanjem na epruvetama prema EN ISO 6892-1 normi.



Slika 1. Geometrijske karakteristike uzorka (lijevo) i reprezentativni primjeri svakog tipa uzorka (desno).

U svrhu mjerjenja longitudinalne deformacije, na svaki očišćeni uzorak zaliđili su se tenzometri najmanje dostupne mjerne površine i to pod dva tenzometra (simetrično) na unutrašnjem obodu rupe (unutarnji tenzometri) i dva na površini uzorka neposredno pored mjesa najveće koncentracije deformacije (prosječna udaljenost od sredine vanjskih tenzometra i ruba rupe je 0.64 mm). Svi devet uzoraka podvrgnuto je jednoosnom vlačnom ispitivanju na Zwick/Roell Z600 kidalici hidraulične čeljusti. Maksimalna nanesena sila $F = 20$ kN je određena za sve uzorke kao sila koja neće proizvesti nikakvo plastično deformiranje uzorka u točkama najveće koncentracije naprezanja. Pomaci na površini uzorka dodatno su praćeni optičkim mjerjenjem pomoću kamera, a snimke su obrađene u programu GOM Aramis Professional 2020 primjenom metode digitalne korelacije slike (DIC). Ipak, dobiveni rasap rezultata bio je prevelik za željenu razinu preciznosti, osobito u ovom slučaju vrlo malih linearno-elastičnih deformacija, zbog čega se rezultati za pomake u daljnjoj analizi ne razmatraju [13].



Slika 2. Uzorci pripremljeni za ispitivanje (lijevo) i pozicije tenzometara na uzorku (desno) – lijevi tenzometri LO (vanjski) i LI (unutarnji) te desni RO (vanjski) i RI (unutarnji).

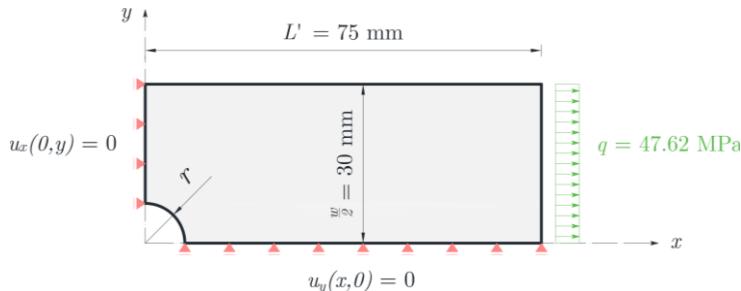
3. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata

Istovremeno je proveden i virtualni eksperiment gdje je geometrija uzorka definirana u programu GMSH 3.0.5. i diskretizirana vrlo gustom mrežom ravninskih konačnih elemenata. Budući da uzorci imaju dvije osi simetrije, u analizi je razmatrana samo jedna četrtina ukupnog modela (Slika 3). Tako generirane mreže konačnih elemenata unesene su u program FEAP, zajedno s odgovarajućim rubnim uvjetima, materijalnim svojstvima i ravnomjerno raspodijeljenim opterećenjem. U numeričkoj analizi problem je modeliran kao ravninsko stanje naprezanja, uz korištenje standardnih Lagrangeovih četveročvornih konačnih elemenata (linearna interpolacija pomaka - Q4) te dodatni model uz primjenu konačnih elemenata s 9 čvorova (kvadratna interpolacija pomaka - Q9) temeljenih na klasičnoj teoriji elastičnosti. Za validaciju numeričkog modela, vrijednosti faktora koncentracije naprezanja u čvoru na rubu rupe uspoređene su s analitičkim rješenjima prema Howlandu [5] za sva tri tipa uzorka, pri čemu su pogreške bile manje od 0.1 % pri korištenju oba tipa konačnog elementa.

Zbog velikog gradijenta deformacije, vrlo je bitno pažljivo usporediti dobivene rezultate. Stoga se u numeričkom modelu računa srednja vrijednost deformacija iz svih Gaussova

točaka unutar površine na modelu koja odgovara stvarnoj poziciji i mjernoj površini tenzometara na uzorku.

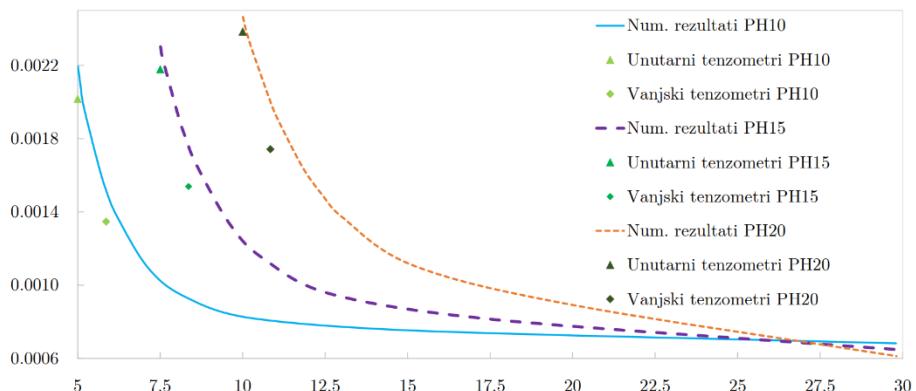
Rezultati su prikazani na Slici 4, gdje krivulje predstavljaju numeričke vrijednosti duž profila uzorka od ruba rupe do ruba uzorka. Prosječna tenzometarska mjerena pokazuju nešto manje vrijednosti deformacija od numerički dobivenih, sa razlikom do 6.7% za deformacije na mjestu unutarnjih tenzometara i razlike do 12.19% za deformacije na mjestu vanjskih tenzometara [12], [13]. Dvostruka veća razlika kod rezultata za vanjske tenzometre, u odnosu na unutarnje, može se pripisati činjenici da je numerički model ravninski (ravninsko stanje naprezanja) te da je raspodjela deformacija pod debljinu uzorka parabolična (najveće naprezanje je u sredini uzorka te se ono smanjuje prema površini), što bi 3D model mogao korigirati [13].



Slika 3. Četvrtina modela ploče s kružnom rupom podvrgnuta jednoosnom vlaku.

Eksperimentalni i numerički rezultati

$$\varepsilon [\%] - x [mm]$$



Slika 4. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za sva tri tipa uzoraka, pri čemu apscisa (x) predstavlja udaljenost od središta rupe uzorka duž transverzalnog profila raspodjelje deformacija [13].

4. Diskusija i zaključak

Vidljivo je da postoji razlika u eksperimentalnim i numeričkim rezultatima, unatoč pokušaju provedbe što preciznije metodologije pri njihovoj usporedbi. Rezultati aludiraju na to da ravninski numerički model baziran na klasičnoj teoriji elastičnosti ne može u potpunosti

točno opisati razmatrani problem, unatoč činjenici da je razmatrani uzorak homogen. U budućem radu je potrebno provjeriti može li isti takav, ali 3D model bolje opisati eksperimentalne rezultate. Ukoliko to ne bude slučaj, potrebno je razmotriti primjenu alternativnih teorija.

Zahvale

Prezentirano istraživanje je financirala Hrvatska zaklada za znanost u sklopu rada na projektima (HRZZ-IP-2018-1732, HRZZ-DOK-2018-09-8806 i HRZZ-IP-2024-05-9904) te je dodatno materijalno podržano potporom Sveučilišta u Rijeci uniri-tehnic-18-248 1415.

Literatura

- [1] Pilkey, W.D., Pilkey, D.F.: Peterson's Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, DOI: 10.1002/9781119532552
- [2] Nowacki, W.K.: Theory of Asymmetric Elasticity, Pergamon Press, Warszawa, 1985.
- [3] Gao, X.L.: Analytical solution of a borehole problem using strain gradient plasticity, J. Eng. Mater. Technol., vol. 124, 2002, (365 – 370), DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1480408>
- [4] Toubal, L., Karama, M., Lorrain, B.: Stress concentration in a circular hole in composite plate, Compos. Struct., vol. 68, 2005, (31 – 36), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.02.016>
- [5] Howland, R.C.J.: On the stresses in the neighbourhood of a circular hole in a strip under tension, Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A, vol. 229, 1930, (49 – 86), DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1930.0002>
- [6] Žiković, L., Crnković, B.: Analiza Kirschovog problema klasičnom i mikropolarnom teorijom elastičnosti, Zbornik radova (Gradevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci), vol. XXV, br. 1, 2022, (247 - 262), <https://doi.org/10.32762/zr.25.1.16>.
- [7] Aradhye, V.G., Kulkarni, S.S.: Experimental Investigation of Stress Concentration Factor in an Isotropic and Orthotropic Plate with Multiple Circular Holes, Int. J. Sci. Eng. Technol. Res., vol. 4, 2015, (3780 – 3784), DOI: N/A
- [8] Momčilović, N., Motok, M., Maneski, T.: Stress concentration on the contour of a plate opening: Analytical, numerical and experimental approach, J. Theor. Appl. Mech., vol. 51, 2013, (1003 – 1012), DOI: N/A
- [9] Anderson, W.B., Lakes, R.S.: Size effects due to Cosserat elasticity and surface damage in closed-cell polymethacrylimide foam, J. Mater. Sci., vol. 29, 2004, (6413 – 6419), DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00353997>
- [10] Eremeyev, V.A., Skrzat, A., Vinakurava, A.: Application of the Micropolar Theory to the Strength Analysis of Bioceramic Materials for Bone Reconstruction, Strength Mater., vol. 48, 2016, (573 – 582), DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9800-1>
- [11] Griffit, G. E.: Experimental investigation of the effects of plastic flow in a tension panel with a circular hole, NACA, 1948.
- [12] Grbac, L.: Finite Elements for Linear Analysis of Micropolar Continuum and the Relationship between the Linked Interpolation and Interpolations on Lie Groups in Linear Form, disertacija, Gradevinski fakultet u Rijeci, 2024, urn:nbn:hr:157:519227
- [13] Grbac, L., Jelenić G., Čeh, N.: Axially loaded strip with circular hole - assessment of predictive capacity of micropolar continuum theory, u preparaciji, 2025.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.5>

Je li uklanjanje nanosa rješenje za smanjenje poplavnog rizika na rijeci Kupi?

Is Sediment Removal the Solution for Reducing Flood Risk on the Kupa River?

Marta Marija Gržić¹, Nevenka Ožanić¹, Nino Krvavica¹

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmila Matejčić 3, 51000 Rijeka,
mmgrzic@gradri.uniri.hr, nozanic@uniri.hr, nino.krvavica@uniri.hr

Sažetak

Sprudovi u rijekama nastaju kao rezultat složenih interakcija između toka vode, transporta sedimenta i morfologije korita. Zbog promjena u meteorološkim, hidrološkim te morfološkim procesima u slivu rijeke Kupe, nužno je evaluirati njihov utjecaj na povećanje opasnosti i rizika od poplava. Kroz ovo istraživanje, provedena je procjena utjecaja uklanjanja nanosa na hidrauličke karakteristike rijeke Kupe i pojavu poplava na tri lokacije: ušće Čabranke u Kupu, ušće Velike Belice u Kupu, ušće Kupice u Kupu. Analiziran je utjecaj uklanjanja nanosa za tri geometrije korita: postojeće stanje, djelomično uklanjanje nanosa (gornji sloj debljine 1m) i potpuno uklanjanje nanosa. Modeliranje je provedeno pomoću 2D hidrauličkog modela nestacionarnog toka vode, odnosno računalnog modela HEC-RAS 6.6. Rezultati analize su pokazali da uklanjanje nanosa ima minimalan utjecaj na smanjenje razine vode te obuhvat poplava, odnosno na smanjenje poplavnog rizika na navedenim lokacijama.

Ključne riječi: rijeka Kupa, uklanjanje nanosa, opasnost od poplava, rizik od poplava

Abstract

Bars in rivers form as a result of complex interactions between water flow, sediment transport, and channel morphology. Due to changes in meteorological, hydrological, and morphological processes in the Kupa catchment, it is necessary to assess their impact on the increase of flood hazard and risk. In this study, the impact of sediment removal on the hydraulic properties of the Kupa River and the occurrence of floods was investigated at three locations (confluences): the Čabranka with the Kupa, the Velika Belica with the Kupa and the Kupica with the Kupa. The impact of sediment removal was analyzed for three channel geometries: current state, partial sediment removal (upper layer thickness of 1m) and complete sediment removal. The HEC-RAS 6.6 software was deployed as a 2D hydraulic model for unsteady water flow. The results of this analysis show that sediment removal has a minimal impact on water levels, flood extent and flood risk reduction.

Keywords: Kupa river, sediment removal, flood hazard, flood risk

1. Uvod

Riječni sprud je nakupina pijeska, šljunka ili drugog riječnog materijala koji se stvara u koritu rijeke uslijed taloženja nanosa [1]. Oni su dinamični geomorfološki oblici nastali složenim interakcijama toka vode i pronosa nanosa [2]. Pojava i razvoj sprudova ovise o hidrološkim, meteorološkim i morfološkim utjecajima. Oni smanjuju dubinu dna rijeke te na taj način mogu biti jedan od uzroka izljevanja vode iz korita tijekom velikih voda. Primjer takve pojave je prisutan u gornjem toku rijeke Kupe. U posljednjih nekoliko godina zabilježeni su rekordni vodostaji i intenzivne oborine u slivu rijeke Kupe, što je dovelo do povećanog pronosa i taloženja nanosa u koritu, posebno na lokacijama ušća rijeke Kupe i pritoka Čabranke, Velike Belice i Kupice [3]. Na tim lokacijama se nalaze veći sprudovi u koritu te je opravdana pretpostavka da bi uklanjanje nataloženog nanosa iz korita moglo doprinijeti smanjenju opasnosti i rizika od poplava. Cilj ovoga rada je istražiti kakav utjecaj imaju sprudovi na pojavu poplava na navedenim lokacijama pomoću hidrauličkog modela toka rijeke Kupe.

2. Područje istraživanja

Rijeka Kupa je granična rijeka koja protječe kroz Republiku Hrvatsku i Republiku Sloveniju [4]. Prema prethodno provedenoj studiji [3], najkritičnije lokacije na uzvodnom toku rijeke Kupe su ušće pritoka Čabranke, Velike Belice i Kupice te su one predmet ovog istraživanja (slika 1).



Slika 1. Lokacije obuhvaćene istraživanjem: ušće Čabranke u Kupu (Hrvatsko), ušće Velike Belice u Kupu (Kuželj) te ušće Kupice u Kupu (Brod na Kupi).

Na tri navedene lokacije, identificirani su veći sprudovi u koritu. Na lokaciji ušća Čabranke u Kupu identificirana su dva spruda, dok je na lokacijama ušća Velike Belice u Kupu i ušća Kupice u Kupu identificiran po jedan sprud.

3. Hidrološki podaci

Podaci o protocima rijeke Kupe su preuzeti kao mjerodavni iz prethodnih studija [3]. Ulagani protoci definirani su za sve tri promatrane lokacije na temelju vršnih protoka za povratno razdoblje od 100 godina tako da su raspodijeljeni na uzvodni protok rijeke Kupe i protok pojedinog pritoka (Čabranke, Velike Belice i Kupice). U tablici 1 su prikazane usvojene vrijednosti koje su korištene kao rubni uvjeti u matematičkim modelima (poglavlje 3.3.).

Tablica 1. Usvojene vrijednosti protoka 100-godišnjeg povratnog perioda na promatranim lokacijama.

Ušće	Pritok Q_{100g} (m ³ /s)	Kupa (prije ušća) Q_{100g} (m ³ /s)	Kupa (nakon ušća) Q_{100g} (m ³ /s)
Čabranka – Kupa (Hrvatsko)	157	216	373
Velika Belica – Kupa (Kuželj)	108	368	476
Kupica – Kupa (Brod na Kupi)	81	432	513

4. Prostorne podloge

4.1. Digitalni model terena (DMT)

Digitalni model terena (DMT) generiran je integriranjem digitalnog modela reljefa razlučivosti 1 m izrađenim iz LiDAR snimaka Republike Slovenije (<https://gis.arso.gov.si/>), digitalnog modela reljefa razlučivosti 1 m izrađenim iz LiDAR snimaka Republike Hrvatske (<https://dgu.gov.hr/>) i geodetskog snimka dna korita na tri lokacije koje su predmet ovog istraživanja.

Kako bi se ocijenio utjecaj uklanjanja sprudova na obuhvat poplave, izrađeni su i dodatni modificirani modeli terena. Za djelomično uklanjanje sprudova usvojena je pretpostavka o uklanjanju nanosa s vrha sprudova, odnosno sloja nanosa u debljini od 1 m (glezano od najviše točke spruda), dok je za potpuno uklanjanje spruda usvojena pretpostavka o uklanjanju nanosa na način da se korito izravna po visinama izvan obuhvata sprudova. Treba napomenuti da su za lokaciju ušća Čabranke u Kupu provedene dodatne kombinacije s obzirom da su prisutna dva spruda (pojedinačno i zajedničko uklanjanje oba spruda). Dakle, za svaku lokaciju su generirana tri DMT-a, osim za ušće Čabranke u Kupu gdje ih je generirano pet.

4.2. Model zemljavišnog pokrova

Model zemljavišnog pokrova za riparijske zone (eng. *Riparian Zones*) preuzet je iz baze *Copernicus Land Monitoring Service* (<https://land.copernicus.eu>). Riparijske zone (RZ) predstavljaju prijelazna područja između kopnenih i vodnih ekosustava. RZ karta pokrova zemljavišta pokriva usku područja uz vodene tokove te pruža visoku prostornu rezoluciju (5–10 m) i detaljne informacije o različitim klasama korištenja zemljavišta i pokrova tla. RZ se temelji na satelitskim podacima Sentinel-2 i uključuje 55 klase pokrova tla, od čega se 11 nalazi u

promatranim područjima. Originalni podaci su preuzeti u vektorskom obliku, a potom su pretvoreni u rasterski oblik rezolucije 1 m zbog usklađenja s DMT-om.

4.3. Model hrapavosti podloge

Budući da ne postoje unificirane i opće prihvaćene vrijednosti hrapavosti podloge za različite klase zemljишnog pokrova, preuzete su vrijednosti iz studije [5] u kojoj je uspostavljena metodologija procjene opasnosti i rizika od poplava koristeći slične tipove prostornih podloga. Pri tome je primijenjen najšire korišteni Manningov koeficijent hrapavosti n [6].

5. Matematički model

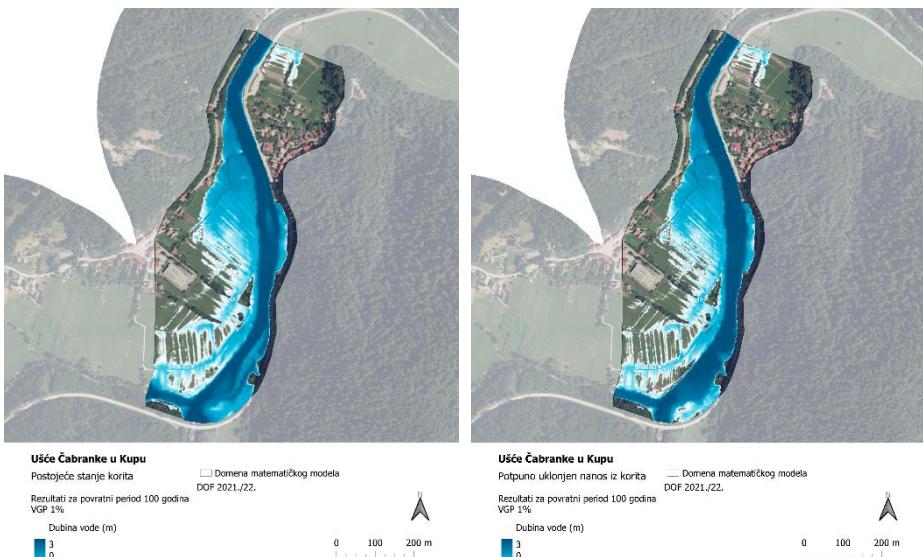
Analiza opasnosti od poplava zasniva se hidrauličkim simulacijama površinskog toka. U tu svrhu korišten je model HEC-RAS 6.6, računalni program za hidrauličke proračune koji omogućava proračun jednodimenzijskog (1D) i dvodimenzijskog (2D) stacionarnog i nestacionarnog toka površinskih voda. Na sve tri lokacije, radi se o vrlo malom obuhvatu te specifičnim uvjetima strujanja na ušćima rijeke Kupe i njenih pritoka zbog čega je korišten 2D nestacionarni tok kako bi se što realnije opisali fizikalni procesi strujanja oko i iznad sprudova te generiranja plavljenja inundacijskog područja.

Prostorna domena modela uvjetovana je obuhvatom geodetskog snimka korita te je proširena izvan samog korita na poplavne zone. Proračunska mreža je djelomično strukturirana, pri čemu se za područje izvan korita koristila mreža prosječne veličine 5 m, a unutar korita je mreža proglašena na 2 m kako bi se što detaljnije obuhvatila promjena geometrije terena na mjestima sprudova te je ista usklađena s dominantnim smjerom toka vode.

Zadano je više različitih tipova rubnih uvjeta za svaki model: na uzvodnim rubovima domene unutar korita, na nizvodnom rubu domene unutar korita te izvan korita. Na uzvodnim rubovima domene unutar korita zadani su sintetski hidrogrami trajanja 12 sati s vršnjim protokom koji odgovara protocima 100-godišnjeg povratnog perioda. Na nizvodnom rubu domene unutar korita zadani je uvjet normalnog toka s nagibom energetske linije koja odgovara uprosječenom nagibu dna korita. Izvan korita, također je zadani uvjet normalnog toka s vrlo malim nagibom energetske linije (0,001). Korišten je nestacionarni 2D proračun te sustav jednadžbi plitkih voda (eng. Shallow Water Equations), konkretno model SWE-ELM, uz vremenski promjenljiv vremenski korak. Za implicitni proračun korišten je parametar $\theta=1,0$, a za rješavanje matrica korišten je PARDISO algoritam. Vremenski korak se računa s obzirom na CFL broj koji je u rasponu od 0,8 do 2,0.

6. Rezultati

Karte opasnosti od poplava, za svaku promatraniu lokaciju, prikazuju dubine i obuhvat poplavljenog područja za vodni val povratnog perioda od 100 godina za različite geometrije korita (postojeće stanje – slika 2 lijevo, nakon uklanjanja sprudova - slika 2 desno). Za svaku lokaciju su također izrađeni poprečni i uzdužni profili na kojima je prikazana usporedba razina vode za različite geometrije korita pri vodnom valu povratnog perioda od 100 godina.



Slika 2. Karta opasnosti od poplava na ušću Čabranke u Kupu (dubina vode) za povrtni period 100 godina za postojeće stanje korita (lijevo) i nakon uklanjanja sprudova (desno).

6.1. Ušće Čabranke u Kupu

Provedena analiza pokazuje da uklanjanje uzvodnog spruda ima povoljniji učinak na smanjenje vodostaja nego uklanjanje nizvodnog spruda. Nakon djelomičnog uklanjanja uzvodnog spruda, maksimalno smanjenje vodostaja iznosi oko 10 cm, dok potpuno uklanjanje rezultira smanjenjem oko 20 cm. No, razlike u obuhvatu poplave su minimalne. S obzirom na to da su razlike u vodostajima i obuhvatu poplave prije i nakon uklanjanja sprudova minimalne, a poplave pogađaju samo poljoprivredne površine (što rezultira malim štetama), te imajući u vidu da sprudovi predstavljaju ugrožene i/ili rijetke stanišne tipove od nacionalnog i europskog značaja, može se zaključiti da uklanjanje sprudova nije opravdano na ovom području.

6.2. Ušće Velike Belice u Kupu

U naselju Kuželj razlike u vodostaju, dubini i obuhvatu poplava su vrlo malene. Vodostaj na sprudu je niži za samo nekoliko centimetara, dok na ušću ostaje gotovo nepromijenjen (1 cm). Duž korita je varijabilnost razine vode također vrlo mala, te se može zaključiti da su razlike u vodostajima i obuhvatu poplave prije i nakon uklanjanja spruda zanemarive. Zbog toga, ni na ovoj lokaciji uklanjanje sprudova nije opravdano.

6.3. Ušće Kupice u Kupu

U naselju Brod na Kupi, razlike u vodostaju i obuhvatu poplava su također zanemarive – manje od 10 centimetara. Iako je učinak uklanjanja sprudova povoljniji za vodostaj Kupice nego Kupe, razlike su samo nekoliko centimetara. S obzirom na to da su razlike u

vodostajima i obuhvatu poplave prije i nakon uklanjanja sprudova zanemarive, a poplave također pogađaju samo poljoprivredne površine, uklanjanje sprudova nije opravdano ni na ovom području.

7. Zaključak

Rezultati numeričkih modela pokazali su koliki utjecaj na smanjenje razine vode te na dubine i obuhvat poplava imaju dva prijedloga potencijalnih mjera (djelomično i potpuno uklanjanje nanosa) u odnosu na postojeće stanje. Rezultati ovog istraživanja sugeriraju da prisutnost sprudova na promatrane tri lokacije ima minimalan ili zanemariv utjecaj na posljedice ekstremnih poplavnih događaja. Iako nanos može smanjiti profil korita na određenim dionicama, a njegovo uklanjanje može poboljšati protočnost tijekom visokih vodostaja, učinak je ograničen zbog toga što poplavlvi valovi 100-godišnjeg povratnog perioda znatno nadmašuju kapacitet korita, bez obzira na prisutnost sprudova. Stoga je zaključeno da uklanjanje sprudova kao mjera ublažavanja poplava nije opravdana na promatranim lokacijama.

Zahvala

Ovaj rad je sufinanciralo Sveučilište u Rijeci projektom uniri-iskusni-tehnic-23-74 i uniri-iskusni-tehnic-23-83 te Hrvatska zaklada za znanost projektom IP-2022-10-7598.

Literatura

- [1] A. Crosato i E. Mosselman, „An Integrated Review of River Bars for Engineering, Management and Transdisciplinary Research“, *Water*, sv. 12, izd. 2, Art. izd. 2, velj. 2020, doi: 10.3390/w12020596.
- [2] Z. Li, Z. Wang, B. Pan, H. Zhu, i W. Li, „The development mechanism of gravel bars in rivers“, *Quaternary International*, sv. 336, str. 73–79, lip. 2014, doi: 10.1016/j.quaint.2013.12.039.
- [3] VPB d.d., „Studija o prekogranično usklađenom upravljanju rizicima od poplava na slivu rijeke Kupe“. 2018.
- [4] „Kupa – rijeka tirkiznog izvora koja izvire u nacionalnom parku | Hrvatske vode“. Pristupljeno: 07. svibanj 2025. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.voda.hr/hr/novost/kupa-rijeka-tirkiznog-izvora-koja-izvire-u-nacionalnom-parku>
- [5] GFRI, VPB d.d., i DHMZ, „Studija procjene opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora“. Interreg projekt STREAM, 2022.
- [6] V. T. Chow, D. R. Maidment, i L. W. Mays, *Applied hydrology*. u McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. New York: McGraw-Hill, 1988.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.6>

Kriteriji za projektiranje bioklimatske stambene arhitekture prema vernakularnim primjerima dinarskog područja: metodološki okvir

*Criteria for Designing Bioclimatic Residential Architecture
Based on Vernacular Examples of the Dinaric Region:
Methodological Framework*

Haris Handžić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, Zagreb, hhandzic@arhitekt.hr

Sažetak

Ovo istraživanje analizira bioklimatska načela sadržana u vernakularnoj stambenoj arhitekturi dinarskog područja, s ciljem razvoja smjernica održivog projektiranja suvremenog stanovanja. Polazeći od spoznaje o značajnoj ulozi arhitekture u globalnim emisijama CO₂, istraživanje se usredotočuje na pasivne, niskotehnološke strategije temeljene na tradicijskim graditeljskim praksama kao alternativi visokotehnološkim rješenjima u kontekstu izazova održivosti. Cilj je ispitati mogućnosti prilagodbe vernakularnih metoda suvremenim kontekstima, uz procjenu njihova potencijala za poboljšanje energetske učinkovitosti i ekološke osjetljivosti. Primjenom multidisciplinarnog pristupa, istraživanje objedinjuje kvalitativnu analizu povijesnih tipologija s kvantitativnim metodama, poput simulacija energetskih svojstava zgrada i računalne dinamike fluida (CFD), radi evaluacije bioklimatske učinkovitosti. Rezultati će pridonijeti teorijskom i praktičnom diskursu o održivoj arhitekturi identificiranjem projektantskih načela koja smanjuju klimatski utjecaj, a istodobno čuvaju kulturnu baštinu. U konačnici, ovo istraživanje nastoji povezati tradicijsku graditeljsku mudrost sa suvremenim zahtjevima održivosti, nudeći izvediva, kontekstualno osjetljiva rješenja za energetski učinkovitu stambenu arhitekturu.

Ključne riječi: metodologija istraživanja, bioklimatsko projektiranje, vernakularna arhitektura, energetska učinkovitost

Abstract

This study investigates the bioclimatic principles embedded in the vernacular residential architecture of the Dinaric region, aiming to develop sustainable design guidelines for contemporary housing. Recognizing architecture's significant role in global CO₂ emissions, the research explores passive, low-tech strategies derived from traditional building practices as an alternative to high-tech solutions in addressing sustainability challenges. The study is aiming to examine the adaptability of vernacular methodologies to modern contexts, assessing their potential to enhance energy efficiency and environmental responsiveness. Employing a multidisciplinary approach, the research integrates qualitative analysis of historical typologies with quantitative methods such as building performance simulations and computational fluid dynamics (CFD) to evaluate bioclimatic effectiveness. The findings will contribute to the theoretical and practical discourse on sustainable architecture by identifying design principles that mitigate climate impact while preserving cultural heritage. Ultimately, this research seeks to bridge the gap between traditional wisdom and contemporary sustainability demands, offering viable, context-sensitive solutions for energy-efficient residential architecture.

Keywords: Research Methodology, Bioclimatic Design, Vernacular Architecture, Energy Efficiency

1. Uvod

Na početku ovog rada predstavljam svoju trenutačnu poziciju unutar istraživačkog procesa: temu istraživanja, metodologiju, hipoteze, ciljeve i očekivane rezultate. Istraživanje se obavlja u sklopu Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom prof. dr. Kristine Careve. Međutim, istraživanje se trenutno nalazi u prvoj fazi te još nisu dobiveni konačni rezultati. Fokus je na razvoju preciznog metodološkog okvira koji će voditi cijeli istraživački proces. Ovo istraživanje ispituje alternativna rješenja utemeljena na vernakularnim metodologijama proizašlim iz tradicijske arhitekture, s naglaskom na niskotehnološke, kontekstualno utemeljene pristupe kao odgovor na izazove održivosti, umjesto oslanjanja na napredne tehnologije.

2. Kontekst

Pojam antropocena definira se kao trenutačna geološka epoha koju obilježava značajan i štetan utjecaj čovjeka na ekosustave i klimu Zemlje [1]. Jedan od najočitijih načina na koji čovječanstvo utječe na klimatske promjene jest kroz arhitekturu, pri čemu stambena izgradnja sudjeluje s 17 % u globalnim emisijama CO₂ [2]. Arhitektonsko projektiranje izravno utječe na potrošnju energije, emisije stakleničkih plinova i kvalitetu okoliša.

Kako bi se odgovorilo na ove izazove, Evropska unija uvela je niz direktiva, uključujući Direktivu o energetskoj učinkovitosti iz 2023. godine te Direktivu o energetskim svojstvima zgrada (EPBD) iz 2018. [3,4]. Potonja uvodi standarde gotovo nulte potrošnje energije

(nZEB), koji uključuju moderne tehnologije poput sustava visoke učinkovitosti i obnovljivih izvora energije. Međutim, ovo istraživanje razmatra postizanje sličnih ciljeva kroz proučavanje vernakularne arhitekture i njezinih bioklimatskih načela.

Bioklimatsko projektiranje prilagođava zgrade lokalnoj klimi koristeći pasivne strategije za optimizaciju unutarnje okolišne kvalitete uz minimalnu potrošnju energije [5]. Fokusira se na stvaranje ugodnih unutarnjih uvjeta oslanjajući se na prirodne sile, umjesto na umjetne sustave. Pioniri poput Victora i Aladara Olgaya još su 1950-ih godina proučavali principe energetski učinkovitog projektiranja [6]. Čime su postavili teorijske temelje bioklimatske arhitekture. U suvremenoj praksi, tehnička rješenja često se implementiraju tek u kasnijim fazama projektiranja, vođena regulatornim zahtjevima. Takav pristup uglavnom tretira ekološka pitanja kroz tehnologiju, umjesto da se promišlja dizajn iz klimatski svjesne perspektive. No, raste interes za prostorne koncepte koji potiču energetsku učinkovitost. U 21. stoljeću arhitekti poput Philippea Rahma usmjeravaju se na "nevidljive parametre" poput temperature i vlage kao pokretače održivog projektiranja [7]. Taj se pristup nadovezuje na obnovljeni interes za vernakularnu arhitekturu koja nudi rješenja otporna na klimatske promjene i prilagođena okolišu. Istraživač Mitja Košir predlaže dva pristupa bioklimatskom projektiranju: analitički, koji se temelji na klimatskim podacima i proaktivnom dizajnu, te simptomatski, koji replicira obrasce vernakularne arhitekture tretirajući prilagodbu klimi kao priordan odgovor na okoliš [8].

Vernakularna arhitektura označava regionalne graditeljske stilove oblikovane geografijom, materijalima, klimom, tradicijom i kulturnim praksama. Građena od strane neprofesionalaca, ova arhitektura odgovara na potrebu za pristupačnim, energetski učinkovitim stanovanjem [9]. Takve su strukture prilagođene lokalnim resursima i okolišnim uvjetima. Ipak, porast "međunarodnog stila" u 20. stoljeću, sa svojim univerzalnim projektantskim pravilima, doveo je do smanjenog priznanja vrijednosti vernakularne arhitekture, zanemarujući lokalne klimatske i društveno-ekonomске faktore.

Ovo se istraživanje usredotočuje na dinarsku regiju, koja obuhvaća različite klimatske zone, od mediteranske do kontinentalne. Vernakularna arhitektura ovog područja razvijala se pod utjecajem brojnih činitelja, koji su oblikovali arhitektonске forme i metode gradnje. Početkom 20. stoljeća, pojedini su znanstvenici počeli klasificirati ruralne kuće prema antropogeografskim i kulturno-povijesnim kriterijima. Iako postoji obilna literatura o regionalnoj arhitekturi i zaštiti graditeljske baštine, još uvjek postoji jaz između teorijskog priznanja vernakularnih načela i njihove primjene u održivom, bioklimatskom projektiranju.

3. Cilj i hipoteza istraživanja

Cilj ovog istraživanja jest otkriti bioklimatska načela ugrađena u vernakularnu stambenu arhitekturu dinarskog područja, s namjerom razvoja smjernica za održivo projektiranje suvremenog stanovanja. U središtu studije nalaze se pitanja o prilagodljivosti tradicijskih arhitektonskih praksi suvremenim kontekstima, potencijalu pasivnih i niskotehnoloških

rješenja da nadmaše novije arhitektonске pristupe te o ulozi digitalnih alata u njihovom usavršavanju.

Hipoteza polazi od pretpostavke da dinarska vernakularna arhitektura u svojoj srži odražava bioklimatske strategije te da se analizom povijesnih primjera može identificirati i obnoviti okvir relevantnih projektantskih načela. Ovaj bi proces mogao smanjiti ovisnost o visokotehnološkim rješenjima i potaknuti održiviji pristup u arhitekturi.

Također se očekuje da će integracija digitalnih simulacija pridonijeti optimizaciji tih načela za širu primjenu, čime će se dodatno potvrditi njihova aktualnost u suvremenoj praksi arhitektonskog projektiranja. U konačnici, istraživanje teži premostiti jaz između tradicijske graditeljske mudrosti i suvremenih zahtjeva održivosti, nudeći izvedive, niskotehnološke alternative za energetski učinkovitu stambenu arhitekturu.

4. Metodologija

Plan istraživanja strukturiran je u osam dijelova, kako slijedi:

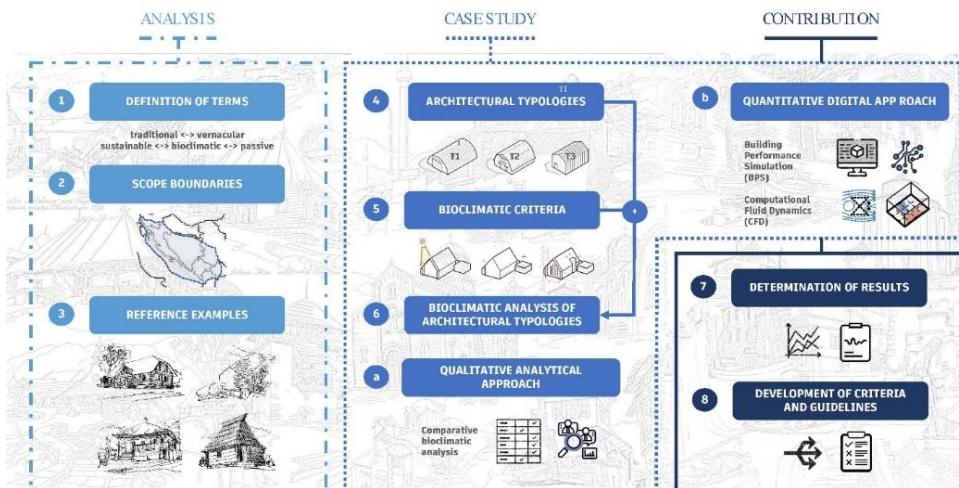
- Istraživanje započinje konceptualnim definiranjem ključnih pojmove koji imaju slična ili dvosmislena značenja. Pregledom literature razlučit će se razlike između termina poput „tradicionalno“ i „vernacularno“ te „održivo“ i „bioklimatsko“. Zatim će se definirati granice dinarskog područja te identificirati regionalne podjele na temelju klimatoloških, geoloških, kulturnih i antropoloških čimbenika, oslanjajući se na postojeća istraživanja o Balkanu.
- Sljedeći korak obuhvaća analizu reprezentativnih primjera vernakularne stambene arhitekture u području Dinarida, s naglaskom na one koje uključuju bioklimatska i održiva načela. Kao glavni izvori koristit će se literatura iz 20. stoljeća, s obzirom na gubitak vernakularne arhitekture uslijed uvođenja novih materijala i globaliziranih stilova.
- Arhitektonske tipologije vernakularnih primjera bit će definirane na temelju postojećih klasifikacija. Na osnovi arhivske dokumentacije i literature izraditi će se kataloški obrasci, s ciljem prepoznavanja prostornih karakteristika i kvaliteta specifičnih za dinarsku arhitekturu.
- U nastavku će se pregledom literature definirati bioklimatski kriteriji za vrednovanje tradicijske arhitekture Dinarida. U ovom poglavlju koristit će se recentni radovi istraživača poput Mitje Košira i Philippea Rahma, s obzirom na to da još ne postoji univerzalno prihvaćena definicija tih kriterija.
- Slijedi faza bioklimatske analize arhitektonskih tipologija korištenjem kvalitativnih i kvantitativnih metoda:
 - a) Kvalitativna analiza usporediti će bioklimatske značajke vernakularnih i nevernakularnih primjera.
 - b) Kvanticativna analiza uključivat će simulacije energetskih svojstava zgrada (BPS) te računalnu dinamiku fluida (CFD) radi procjene održivosti.

- Na temelju dobivenih rezultata identificirat će se projektantska načela koja najbolje odgovaraju suvremenim klimatskim i društvenim zahtjevima stambene arhitekture.
- U završnoj fazi istraživanja izradit će se smjernice za primjenu bioklimatskih načela u projektiranju novih stambenih zgrada na području Dinarida.

5. Očekivani znanstveni doprinos

Ovo istraživanje ima za cilj dati značajan znanstveni doprinos bavljenjem ključnim aspektima vernakularne arhitekture na području Dinarida, kroz sveobuhvatnu analizu njezinih bioklimatskih načela i strategija održivog projektiranja. Poseban naglasak stavlja se na razjašnjenje temeljnih pojmove koji se često pogrešno koriste u arhitektonskom diskursu (npr. održivo, bioklimatsko, pasivno), kako bi se uspostavio precizan konceptualni okvir i osigurala analitička točnost.

Izradom detaljne karte koja prikazuje raspodjelu vernakularnih arhitektonskih tipologija unutar dinarskog prostora, vizualni prikaz poslužit će kao temeljni alat za razumijevanje regionalnih varijacija arhitektonskih formi oblikovanih lokalnom klimom, geografijom i kulturom.



Slika 1. Metodološki okvir istraživanja

Osim toga, istraživanje će se usredotočiti na definiranje bioklimatskih kriterija radi razvoja mjerila za vrednovanje održivog arhitektonskog projektiranja. Analizom utjecaja projektantskih odluka na održivost, pasivnost i bioklimatsku učinkovitost, istraživanje će istaknuti kako vernakularnost prirodno odgovara na okolišne uvjete, nudeći vrijedne spoznaje za suvremenu praksu.

Na temelju toga, cilj je razviti praktične smjernice za optimizaciju suvremene stambene arhitekture, koristeći uvide stečene iz vernakularnih metoda. Identifikacija obnovljivih i održivih rješenja obogatit će širi diskurs o održivom razvoju, naglašavajući važnost

povijesnog znanja u oblikovanju budućih arhitektonskih praksi – osobito u klimatskim područjima koja će, uslijed klimatskih promjena, postajati sve sličnija.

Literatura

- [1] National Geographic Education: Anthropocene, www.education.nationalgeographic.org/resource/anthropocene/, pristupljeno: 11. 1. 2025.
- [2] United Nations Environment Programme: 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, UNEP, 2022, str. 41.
- [3] Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council on energy efficiency of 13 September 2023 amending Regulation (EU) 2023/955: Official Journal of the European Union, www.eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj, pristupljeno: 2. 4. 2024.
- [4] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency: Official Journal of the European Union, <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>, pristupljeno: 2. 4. 2024.
- [5] Bugenings, L.A., Kamari, A.: Bioclimatic Architecture Strategies in Denmark: A Review of Current and Future Directions, Buildings, vol. 12, 2022, str. 224, DOI:10.3390/buildings12020224
- [6] Clark, N.K.: Sustainable community planning in Office of Arid Lands Studies, u: Desert Architecture III: Building a Sustainable Future, The Arid Lands Newsletter, The University of Arizona, Tucson, 1994.
- [7] Rahm, P.: Climatic Architecture, Actar Publishers, Barcelona, 2023, DOI:10.1080/02513625.2023.2323830
- [8] Košir, M.: Climate Adaptability of Buildings: Bioclimatic Design in the Light of Climate Change, Springer, Cham, 2019, DOI:10.1007/978-3-030-18456-8
- [9] Fuentes Pardo, J.M.: Challenges and Current Research Trends for Vernacular Architecture in a Global World: A Literature Review, Buildings, vol. 13, 2023, str. 162, DOI:10.3390/buildings13010162

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.7>

Urbanistički kriteriji kategorizacije riječnih obala gradova

Urban planning criteria for riverfront categorization

Dora Ivančan¹, Sanja Gašparović²

(1) Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, divancan@arhitekt.hr,
sgasparovic@arhitekt.hr

Sažetak

Preobrazba obale gradova prepoznata je kao vrijedan alat u planiranju grada. Ovim radom utvrđuju se kriteriji za kategorizaciju urbanih obalnih područja na temelju prethodnih istraživanja. Kriteriji se sistematiziraju i kategoriziraju prema mjerilima promatrana na 1. globalnu razinu, 2.razinu grada, 3.riječne obale i 4. obalne linije. Kriteriji koji su uspostavljeni na razini grada i obale koristit će se u dalnjem istraživanju kako bi se utvrdio potencijal preobrazbe hrvatskih kontinentalnih gradova temeljem preobrazbe njihove obale.

Ključne riječi: odnos grada i rijeke, plavi urbani prostori, riverfront

Abstract

Riverfront transformation is recognized as a valuable tool in urban planning. This paper establishes criteria for the categorization of riverfronts based on previous research. The criteria are structured and categorized according to four scales: (1) global, (2) city, (3) riverfront, and (4) waterline. Criteria categorized at the city and riverfront scales will be used in future research to determine the transformation potential of Croatian inland cities through riverfront transformation.

Keywords: river – city relationship, blue urban space, riverfront

1. Uvod

Obale gradova (*riverfront*), definirane kao granično područje / prijelazne zone između urbanog tkiva i vode [1], prepoznate su kao „iskra urbanog razvoja“ [2]. Svojom preobrazbom mogu utjecati na ekonomske, ekološke, estetske i socijalne prilike cijelog grada [1,3]. Njihova revitalizacija jedan je od najraširenijih urbanih fenomena [4] i glavnih alata u planiranju grada od 1970-ih godina koji ima potencijal stvoriti novu sliku grada, privući investicije i sprječiti propadanje prostora [5]. Fenomen urbane obnove koji započinje preobrazbom američkih postindustrijskih gradova proširio se na sve kontinente, obuhvatio gradove različitih veličina i značaja, gradove na moru i one na kontinentu [6]. Preobrazba riječnih obala globalni je fenomen koji je u mnogim gradovima pozitivno utjecao na razvoj cijelog grada. Popularnost takvih projekata i želja za ponavljanjem njihovog uspjeha u mnogim je slučajevima potaknula preobrazbe koje u pogledu odabira lokacije, proračuna, programa, vremena i vrste preobrazbe nisu odgovarajuće zbog čega rezultiraju neuspješnom preobrazbom [7].

Ovim radom utvrđuju se kriteriji za kategorizaciju urbanih obalnih područja temeljem pregleda prethodnih istraživanja. Literatura je odabrana pregledom znanstvenih baza Web of Science i Scopus na temelju ključnih riječi ("waterfront" OR "riverfront" OR "urban blue space") AND (classification OR typology OR categorization) u područjima urbane znanosti (WOS) te tehničke znanosti, socijalne znanosti te umjetnost i humanizam (Scopus). Pregled baza limitiran je na radove na engleskom jeziku s otvorenim pristupom što je rezultiralo s ukupno 26 radova. Od navedenih 26 radova izdvojeno je 10 radova koji navode kategorizaciju urbanih obalnih područja i to 8 znanstvenih radova, 1 članak iz zbornika znanstvenog skupa i 1 knjiga. Kriteriji definirani u navedenoj literaturi analiziraju se, sistematiziraju i kategoriziraju kako bi se istaknuli urbanistički relevantni za obalne preobrazbe. Utvrđeni kriteriji su u funkciji nastavka istraživanja - uspostavljanju metode vrednovanja potencijala za urbanističku preobrazbu obalnih područja riječnih gradova Hrvatske.

2. Pregled istraživanja kriterija za kategorizaciju obala gradova

Dosadašnja istraživanja bavila su se kriterijima kategorizacije obala gradova s različitim motrišta i različitim mjerila. Petrtýlová i Jaššo u svojoj kategorizaciji urbanih obala među kriterijima ističu specifična obilježja grada i rijeke [8] (Tablica 1). Ukazuju na relevantne aspekte kao što su veličina grada (status i površina grada te broj stanovnika) i veličine rijeke (međuodnos površine grada i širine rijeke, hidrološki značaj vodotoka te način korištenja rijeke) kao važan pokazatelj stupnja urbanizacije i karaktera prostora.

Kako bi se kategorizirao međuodnos grada i rijeke uspostavljen je niz kriterija. Gradovi se kategoriziraju prema položaju grada u odnosu na vodenu površinu (grad podijeljen rijekom, grad na obali rijeke, grad podijeljen s više rijeka i pritoka, grad močvara, obalni grad podijeljen s rijekom, obalni grad uz rijeku, planinski grad uz rijeku, grad na jezeru podijeljen s rijekom) [8,9] i značaju grada uz obalu (naselje uz obalu, prigradska priobalna naselja, mali i srednji obalni grad, obalni grad, regionalno središte na obali) [9]. Položaj rijeke unutar

grada kategoriziran je prema smještaju grada u odnosu na obalu, položaju građevnog područja u odnosu na rijeku i položaju rijeke u odnosu na povijesni centar [8].

Tablica 1. Kriteriji za kategorizaciju prema općim prostornim obilježjima grada i rijeke

kriterij	izvor kriterija	kategorizacija
Status grada	[8]	glavni grad, sjedište županije, veliki grad, grad
Površina grada	[8]	-
Broj stanovnika	[8]	-
Širina rijeke u području najbližem centru grada	[8]	-
Omjer širine rijeke i veličine grada	[8]	<1, 1, >1
Veličine rijeke u odnosu na grad	[8]	rijeka veličinom nije značajna za grad, odnos grada i rijeke je u ravnoteži, veličina rijeke premašuje značaj grada
Hidrološki značaj vode	[8]	I.red 1. međudržavne vode; I.red 2. priobalne vode; I.red 3. drugi veći vodotoci; I.red 4. bujične vode veće snage; II. red
Korištenje rijeke	[8]	proizvodnja električne energije i pogon, uzgoj slatkovodnih riba i drugih vodenih organizama, plovvidba; splavarenje, rafting, vožnja kanua i drugih plovila; postavljanje plutajućih ili plovečih objekata

Tablica 2. Kriteriji za kategorizaciju u mjerilu grada

kriterij	izvor kriterija	kategorizacija
Tip grada u odnosu na rijeku	[8,9,19]	grad podijeljen rijekom, grad na obali rijeke, grad podijeljen s više rijeka i pritoka, grad močvara, obalni grad podijeljen s rijekom, obalni grad uz rijeku, planinski grad uz rijeku, grad na jezeru podijeljen s rijekom
Značaj grada uz obalu	[9]	naselje uz obalu, prigradska priobalna naselja, mali i srednji obalni grad, obalni grad, regionalno središte na obali
Položaj grada u odnosu na rijeku	[8]	lijeva obala, desna obala, obje obale
Položaj izgrađenog dijela grada i rijeke	[8]	rijeka unutar ili izvan građevnog područja
Položaj povijesnog centra u odnosu na rijeku	[8]	rijeka prolazi kroz centar, centar na obali rijeke, centar udaljen od rijeke

Na razini obalnog područja istraživanja su se bavila kategorizacijom obala prema namjeni [8–12], karakteru i morfologiji [13], kategorizacijom javnih otvorenih površina – parkova, šetnica i rekreacije [1,14] te brownfield područjima [15]. Breen i Rigby obale su kategorizirali prema urbanističkim namjenama (komercijalne, kulturne, edukacijske, ekološke, zabavne, industrijske, poslovne, stambene namjene i povjesne luke) [16] dok Vallega dodaje kategorije koje pobliže opisuju njihovo korištenje poput uživanja u ekosustavu, ribolova, kongresa, medija, prometa i plovidbe, istraživanja te obrazovanja i osposobljavanja [10]. Breš i Krošnicka u kategorizaciji već naglasak stavlaju na prostor rijeke pri čemu dijele namjenu na prirodnji okoliš, urbani okoliš za stanovanje (promet, infrastruktura, stanovanje, kultura, edukacija, komercijalni i rekreacijski prostor) i urbani okoliš za industriju i infrastrukturu (obrana, luka, industrija, promet, infrastruktura, proizvodnja energije i zbrinjavanje otpada) [17]. Uz namjenu, obalu karakterizira njen morfološki oblik kojeg Aouissi i dr. dijele na konveksne, konkavne i linearne [13] te karakter obalnog područja definiran ljudskim utjecajem (prirodan, uređen i izgrađen) [1,8]. Lyu i dr. kategoriziraju urbane obalne parkove prema krajobraznom karakteru - livade s tipom šumskog prostora, trgovi, rekreacijski prostori i promenade uz obalu[14]. Duran Vian, Pons Izquierdo i Serrano Martinez uspostavljaju kriterije za kategorizaciju javnih otvorenih prostora uz obalu koji se temelje na dostupnosti i poziciji u odnosu na rijeku. Prema dostupnosti razlikuju fizičku i vizualnu dostupnost koja može biti stalna, segmentna, povremena ili izostaje u potpunosti. Utvrđuju da na smještaj i dostupnost javnih prostora uvelike utječe morfologija rječne doline i obale (uspravna strma obala i poplavna ravnica, velika široka poplavna ravnica, terasasta poplavna ravnica, široka razgranata rijeka, blago nagnuta dolina u obliku slova V) te uspostavljaju kategorizaciju javnih otvorenih prostora u odnosu na rječnu dolinu i obalu (nasip, povišeni rječni pojas, rječna terasa, rječna obala) [1]. Brownfield područja, koja su često na samoj obali rijeke te na područjima koja su vrlo atraktivna i vrijedna u kontekstu cijelog grada, važan su element u kategorizaciji obalnog područja. Rey, Laprise i Lufkin navode kategorizacije brownfielda prema lokaciji, korištenju, vlasništvu, veličini obuhvata, razini kontaminacije te primarnoj namjeni [15].

Breš i Krošnicka postavljaju kriterije za kategorizaciju urbanog plavog prostora - područja koje obuhvaća vodu te barem jedan rub između vode i kopna. Kao važan element urbanog plavog prostora ističu njegov rub, tj. obalnu liniju koju kategoriziraju prema količini (jedan, dva, više, kompleksni rub) i vrsti (fiksni – zid, istak, kompleksni – blag nagib, strm nagib, stepenice, plutanje). Međudnos urbanog plavog prostora i obalne linije kategoriziraju kriterijem povezanosti (nije povezan s obalom, povezan s obalom, povezan s više obala) [17] i permeabilnosti (blizu vode, na vodi, u vodi) [18]. Element ruba promatran je i kroz kriterij zaštite od poplave gdje su prepoznate kategorije prirodni rub, protupoplavni zid, ojačana obala, nasip, nasuta obala i potporni zid nasipa [1].

Iz provedene analize i sistematizacije prethodnih istraživanja može se zaključiti da je kriterije za kategorizaciju urbanih obala moguće podijeliti u 4 osnovne skupine prema mjerilima promatrana (Tablica 2):

1. Opća prostorna obilježja grada i rijeke – kvantitativna obilježja koja mogu imati utjecaj na kategorizaciju obala - globalno promatrana
2. Odnos položaja grada i rijeke promatran u mjerilu grada
3. Obilježja pristupačnosti te korištenja i namjene promatrane u mjerilu obalnog područja
4. Obilježja neposrednog kontaktog ruba grad/voda – promatrana u mjerilu obalne linije.

Tablica 3. Kriteriji za kategorizaciju u mjerilu obalnog područja

kriterij	izvor kriterija	kategorizacija
Namjena obale	[8,10,17]	komercijalna, kulturna, edukacijska, ekološka, zabavna, industrijska, poslovna, stambena i povijesna luke
Korištenje obale	[10]	uživanje u ekosustavu, ribolov, turizam, rekreacija, zabava, kongresi, mediji, promet i plovidba, trgovina i financije, istraživačka područja, obrazovanje i osposobljavanje, kulturna baština
Morfološki oblik obale	[13]	konveksni, konkavni, linearni
Morfološki oblik rječne doline	[1]	uspravna strma obala i poplavna ravnica, velika široka poplavna ravnica, terasasta poplavna ravnica, široka razgranata rijeka, blago nagnuta dolina u obliku slova V
Položaj javnih prostora u odnosu na rijeku	[1]	nasip, povišeni rječni pojas, rječna terasa, rječna obala
Fizička i vizualna dostupnost	[1]	stalna, segmentna, povremena, izostaje
Tip brownfielda prema položaju	[15]	urbani, prigradski, ruralni
Tip brownfielda prema korištenju	[15]	nedovoljno korištena, prazna, zapuštena, opasna
Tip brownfielda prema vlasništvu	[15]	jedan ili više vlasnika privatno ili javno vlasništvo
Veličina brownfield područja	[15]	-
Razina kontaminacije	[15]	-
Primarna namjena brownfield područja	[15]	industrijski, željeznički, vojni, obalni, institucionalni, komercijalni, energetski, raznolik

Tablica 4. Kriteriji za kategorizaciju u mjerilu obalne linije

kriterij	izvor kriterija	kategorizacija
Broj i tipovi obalnih linija	[17]	jedan, dva, više rubova, kompleksni rub fiksni ili fleksibilni
Odnos urbanog plavog prostora i obalne linije	[17]	nije povezano, povezan s obalno, povezan s više obala
Obalna linija prema permeabilnosti	[1,18]	blizu rijeke, na rijeci, u rijeci
Obalna linija prema zaštiti od poplave	[1]	prirodni rub, protupoplavni zid, ojačana obala, nasip, nasuta obala, potporni zid nasipa

U nastavku istraživanja skupine kriterija 2 i 3 mogu imati značajniji utjecaj na urbanističko motrište istraživanja (najviše se odnose na odnos obalnog područja i okolnog grada).

3. Polazišta za istraživanje obala gradova u Hrvatskoj

U svim hrvatskim kontinentalnim gradovima moguće je naći vodotoke različitih vrsta, značaja i karaktera. Primjeri uspješne preobrazbe grada temeljene na revitalizaciji njihove obale sugeriraju da bi se isti alat mogao koristiti i u kontekstu hrvatskih gradova. Kako bi se odabrali gradovi s najvećim potencijalom preobrazbi i upotrijebile metode preobrazbe koje najbolje odgovaraju pojedinim gradovima potrebno je provesti sustavno istraživanje međuodnosa grada i rijeke s urbanističkog motrišta. Za takvo istraživanje koristit će se kriteriji sistematizirani na temelju prethodnih istraživanja u mjerilu grada i obalnog područja. Primjenom tih kriterija potrebno je provjeriti da li je postavljenom kategorizacijom moguće obuhvatiti sve hrvatske kontinentalne gradove i eventualno dopuniti kategorizaciju na temelju uočenih nedostataka. Uz to, potrebno je implementirati kriterije koji se odnose na razinu zaštite prostora i kulturnog nasljeđa koji nije zastavljen u istraženim radovima, a ima veliki utjecaj na potencijal preobrazbe grada. Također, bitan element grada na obali je plovnost rijeke, postojanje luka i njezin značaj koji u pregledanoj literaturi nisu bili razmatrani.

4. Zaključak

Pregledom i sintezom prethodnih istraživanja utvrđeni su kriteriji za kategorizacija riječnih obalnih područja koji su analizirani i sistematizirani u 4 osnovne skupine prema mjerilima promatranja. Mjerilo grada kojim se kategorizira odnos položaja grada i rijeke te mjerilo obalnog područja kojim se utvrđuju kategorije namjene i pristupačnosti prepoznate su ovim istraživanjem kao najrelevantnije za utvrđivanje potencijala preobrazbe grada koji se temelji na revitalizaciji njegove obale. Dalnjim istraživanjem potrebno je utvrđene kriterije dopuniti temama koje nisu bile razmatrane dosadašnjim istraživanjima, a koji se odnose na zaštitu prirode i nasljeđa te značaj luke u gradu.

Literatura

- [1] Durán-Vian, F., Pons-Izquierdo, J.J., Serrano-Martínez, M.: River-city recreational interaction: a classification of urban riverfront parks and walks, *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 59, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127042>
- [2] Carta, M.: *The Fluid City Paradigm: A Deeper Innovation, The Fluid City Paradigm: Waterfront Regeneration as an Urban Renewal Strategy*, Springer, 1-10, 2016, https://doi.org/10.1007/978-3-319-28004-2_1
- [3] Breen, A., Rigby, D.: *Urban Values: A new appreciation*, *Waterfronts: Cities reclaim their edge*, McGraw-Hill, 1-8, 1994
- [4] Giovinazzi, O., Moretti, M.: (2010). Port Cities and Urban Waterfront: Transformations and Opportunities, *TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment*, vol. 3., 2009, 57-64, <https://doi.org/10.6092/1970-9870/123>
- [5] Dowey, K.: *Flows, Fluid City*, Routledge, 9-15, 2005

- [6] Sieber, T.: Waterfront Revitalization in Postindustrial Port Cities of North America, *City & Society*, vol. 5, 1991, 120-136, <https://doi.org/10.1525/city.1991.5.2.120>
- [7] Pinto, P.J., Kondolf, G.M.: The fit of urban waterfront interventions: Matters of size, money and function, *Sustainability*, vol. 12, 2020, 1-17, <https://doi.org/10.3390/su12104079>
- [8] Petrýlová, R., Jaššo, M.: Towards a New Typology for Classifying Urban Riverfront Character Sections: Insights from European Cities, *Europa XXI*, vol. 47, 2024, 31-53, <https://doi.org/10.7.7163/Eu21.2024.47.14>
- [9] Aulia, D., Marpaung, B., Zahrah, W.: Typology of livable waterfront settlement and how to manage the community, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 505, Montreal, IOP Publishing, 1-7, 2019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/505/1/012136>
- [10] Vallega, A.: Urban waterfront facing integrated coastal management, *Ocean & Coastal Management*, vol. 44, 2001, 379-410, [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00056-4](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00056-4)
- [11] Keyvanfar, A., Shafaghat, A., Mohamad, S., Abdullahi, M.M., Ahmad, H., Mohd Derus, N.H., Khorami, M.: A Sustainable Historic Waterfront Revitalization Decision Support Tool for Attracting Tourists, *Sustainability*, vol. 10, 2018, 1-23, <https://doi.org/10.3390/su10020215>
- [12] Tolnai, G.: Budapest's fragmented riverfront renewal: Western trends interspersed with post-socialist characteristics, *Belgeo*, vol. 4, 2018, 1-16, <https://doi.org/10.4000/belgeo.21210>
- [13] Aouissi, K.B., Madani, S., Hein, C., Benacer, H.: Morphological Approach for the Typological Classification of Waterfront Revitalization, *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA*, vol. 73, 2023, 109-122, <https://doi.org/10.2298/IJGI2301109A>
- [14] Lyu, M., Wang, S., Shi, J., Sun, D., Cong, K., Tian Y.: Visual Satisfaction of Urban Park Waterfront Environment and Its Landscape Element Characteristics, *Water*, vol 17, 2025, 3-18, <https://doi.org/10.3390/w17060772>
- [15] Rey, E., Laprise, M., Lufkin, S.: Urban Brownfields: Origin, Definition, and Diversity, Neighbourhoods in Transition: Brownfield Regeneration in European Metropolitan Areas, Springer, 7-45, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82208-8>
- [16] Breš, J., Krośnicka, K.A.: Evolution of Edges and Porosity of Urban Blue Spaces: A Case Study of Gdańsk, *Urban Planning*, vol. 6, 2021, 90-104, <https://doi.org/10.17645/up.v6i3.4108>
- [17] Dubinina, A., Wawryńska, A., Krośnicka, K.A.: Permeability of Waterfronts Contemporary Approach in Designing Urban Blue Spaces, *Sustainability*, vol. 14, 2022, 1-16, <https://doi.org/10.3390/su14159357>

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.8>

Mehanizmi otkazivanja zidova izvan ravnine – pregled normi i primjena na građevine kulturne baštine

Out-of-plane failure mechanisms – normative framework and application to cultural heritage buildings

Katarina Jajčević¹, Marija Demšić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, katarina.jajcevic@grad.unizg.hr,
marija.demsic@grad.unizg.hr

Sažetak

Kod analize povijesnih građevina u Hrvatskoj, koje su uglavnom izvedene kao nearmirano zidje, posebno je važno najprije provjeriti moguće lokalne mehanizme otkazivanja, prije nego što se pristupi procjeni globalnog odziva konstrukcije. Budući da u trenutno primjenjivim normama u Hrvatskoj, uključujući Eurokod 1998-3, nisu definirana pravila za analizu mehanizama otkazivanja izvan ravnine, najpraktičniju nit vodilju za njihovu provjeru pružaju talijanske norme NTC 2008 (Norme tecniche per le costruzioni) i njihova novija inačica NTC 2018. U ovom radu daje se pregled postojećih normi te se razmatraju buduće smjernice kroz novu generaciju Eurokoda 1998-3. Osim toga, obrađuje se primjena smjernica za ocjenu i smanjenje seizmičkog rizika kulturne baštine s osvrtom na NTC 2008, osobito za crkve.

Ključne riječi: mehanizmi otkazivanja izvan ravnine, kulturna baština, nearmirano zidje, potresna oštetljivost

Abstract

In the analysis of historical buildings in Croatia, which are predominantly unreinforced masonry structures, it is particularly important to first assess the potential out-of-plane failure mechanisms before evaluating the global structural response. Since the currently applicable standards in Croatia, including the Eurocode 1998-3, do not define rules for the analysis of out-of-plane failure mechanisms, the most practical approach for their assessment is provided by the Italian standards NTC 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) and their more recent version, NTC 2018. This paper presents an overview of existing regulations and considers future guidelines introduced by the new generation of Eurocode 1998-3. In addition, it addresses the application of guidelines for the assessment and reduction of seismic risk to cultural heritage, with reference to NTC 2008, especially in the context of churches.

Keywords: out-of-plane failure mechanisms, cultural heritage, unreinforced masonry, seismic vulnerability

1. Uvod

Nakon dva razorna potresa koja su pogodila Hrvatsku 2020. godine, pregledane su 422 građevine koje nose status nepokretnih kulturnih dobara. Od tog broja, 28% pretrpjelo je teška oštećenja nosivih elemenata, a najveći udio odnosi se na sakralne građevine, poput crkava i kapela [1]. Talijanska direktiva [2] koja se veže na NTC [3] te se odnosi na kulturnu baštinu, sastavljena je s ciljem definiranja postupka stjecanja znanja, procjene razine seizmičke sigurnosti te projektiranja mogućih intervencija u skladu sa zahtjevima i specifičnostima građevina kulturne baštine. Prema toj direktivi [2], procjena seizmičke sigurnosti provodi se na tri razine (*Livelli di valutazione della sicurezza sismica*):

- **LV1:** Kvalitativna analiza i procjena pomoću pojednostavljenih mehaničkih modela
- **LV2:** Procjena pojedinih makroelemenata (kinematička granična analiza lokalnih mehanizama sloma)
- **LV3:** Procjena globalnog seizmičkog odziva građevine

Metodologija se razlikuje ovisno o razini i tipologiji građevine kulturne baštine, pri čemu svaka zahtijeva poseban pristup, koristeći neku od globalnih proračunskih metoda. Razina LV1 predstavlja kvalitativnu metodu koja se temelji na vizualnoj procjeni, dok analiza lokalnih mehanizama otkazivanja odgovara razini LV2. Razina LV3 primjenjuje se kada je potrebna detaljna procjena seizmičke sigurnosti građevine, neovisno o tome planiraju li se intervencijske mjere ili ne.

2. Razrada metodologija

2.1. Razrada metode LV1 za crkve prema smjernicama za ocjenu i smanjenje rizika kulturne baštine s osvrtom na NTC

Razinom LV1 za crkve, mesta molitve i druge građevine s velikim dvoranama, bez međukatnih konstrukcija [2] potresna oštetljivost određuje se indeksom ranjivosti i_v , čija vrijednost varira između 0 i 1. Taj se indeks definira kao ponderirani prosjek ponašanja različitih dijelova građevine prema formuli (1):

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (1)$$

Ova metodologija obuhvaća 28 mehanizama oštećenja navedenih u direktivi [2], povezanih s makroelementima karakterističnima za crkve. Ukoliko neki makroelement nije prisutan u promatranoj građevini, dodjeljuje mu se težinski faktor $\rho_k = 0$. U ostalim slučajevima taj faktor ima vrijednost između 0,5 i 1. Svaki k-ti mehanizam (od ukupno 28) ima pridružene dvije vrijednosti: pokazatelj ranjivosti v_{ki} i pokazatelj konstrukcijskih mjera kojima se smanjuje mogućnost aktivacije tog tipa mehanizma v_{kp} . Nadalje, ovom se metodologijom definira i indeks štete i_d (2), također unutar granica od 0 do 1, koji se računa kao normalizirani prosjek lokalnih oštećenja s obzirom na razinu pretrpljene štete d_k za svaki k-ti mehanizam:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} \quad (2)$$

Odgovarajućom korelacijom omogućen je izračun vrijednosti akceleracije tla koja odgovara stanju ograničenog oštećenja (*Stato Limite di Danno* – SLD) (3) te stanju znatnog oštećenja (*Stato Limite di salvaguardia della Vita* – SLV) (4):

$$a_{SLD}S = 0,025 \cdot 1,8^{2,75-3,44i_v} \quad (3)$$

$$a_{SLV}S = 0,025 \cdot 1,8^{5,1-3,44i_v} \quad (4)$$

U Tablici 1 prikazan je postupak određivanja vrijednosti pokazatelja ranjivosti v_{ki} i pokazatelja učinkovitosti konstrukcijskih mjera koje smanjuju mogućnost aktivacije pripadajućeg tipa mehanizma v_{kp} , za jedan od 28 definiranih mehanizama. Također su prikazani volumni model analizirane crkve, konačna vrijednost indeksa ranjivosti te vrijednosti ubrzanja tla za odgovarajuća granična stanja.

Tablica 1. Primjer proračuna na razini LV1

Mehanizam	ρ_k	v_{ki}	v_{kp}	$\rho_k(v_{ki} - v_{kp})$	Slika
Prevrtanje pročelja	1	1	0	1	
				$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} = 0,6$ $a_{SLD}S = 0,025 \cdot 1,8^{2,75-3,44i_v} = 0,03742 [g]$ $a_{SLV}S = 0,025 \cdot 1,8^{5,1-3,44i_v} = 0,14890 [g]$	

2.2. Razrada metode LV2 sukladno NTC-u [1]

2.2.1. Linearna kinematička analiza

U sklopu linearne analize određuje se faktor aktivacije lokalnog mehanizma α_0 . Provjera nosivosti za zadano granično stanje provodi se usporedbom spektralne akceleracije ili poprečne sile s pripadajućim proračunskim zahtjevom. Faktor aktivacije određuje se primjenom principa virtualnog rada u terminima pomaka, i to pomoću jednadžbe (5) koja izjednačava vanjske i unutarnje sile za virtualni pomak sustava:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{j=1}^n P_j \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi} \quad (5)$$

U ovoj jednadžbi, n predstavlja broj sila težine P_i koje djeluju na blokove mehanizma, dok m predstavlja broj sila težine P_j koje ne djeluju izravno na blokove, ali njihova masa generira horizontalne inercijalne sile na blokove jer se ne mogu učinkovito prenijeti na druge nosive elemente. Broj vanjskih sila F_h koje djeluju na blokove, ali nisu povezane s masama, predstavljen je vrijednošću o . U konačnici, virtualni rad unutarnjih sila zadan je kao L_{fi} . U horizontalnom pravcu predstavljeni su pripadni virtualni pomaci $\delta_{x,i}$ za i -to opterećenje P_i te $\delta_{x,j}$ za j -to opterećenje P_j , pri čemu se pozitivnim smatra smjer koji odgovara pravcu djelovanja potresne sile koja aktivira mehanizam. Pripadni virtualni pomak $\delta_{y,i}$ predstavlja vertikalni virtualni pomak i -tog opterećenja P_i , koji se smatra pozitivnim ako je usmjeren prema gore. U Tablici 3 prikazan je ručni proračun faktora aktivacije α_0 za jedan od mogućih lokalnih mehanizama na modelu crkve iz primjera za razinu potresne opasnosti LV1. Proračun je proveden uzimajući u obzir samo vlastitu težinu mehanizma, dok su dodatna opterećenja, trenje, drobljenje ziđa te ostali povoljni i nepovoljni učinci zanemareni.

Tablica 2. Primjer proračuna faktora aktivacije α_0

Volumen mehanizma [m ³]	Težiste mehanizma [m]	Zapreminska težina [kN/m ³]	Vlastita težina [kN]	Debljina zida [m]
9,16	3,45	18	164,88	0,5
		$\sum \delta W = 0$ $\alpha_0 \cdot G \cdot 3,45 \cdot \delta\varphi - G \cdot 0,25 \cdot \delta\varphi = 0$ $\alpha_0 = 0,072$	$\delta_{G,x} = 3,45\delta\varphi$ $\delta_{G,y} = 0,25\delta\varphi$	

Nadalje se određuje proračunska modalna masa M^* te faktor udjela proračunske modalne mase e^* prema izrazu (6).

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{P_{x,i}})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{P_{x,i}}^2} \rightarrow e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} \quad (6)$$

Spektralno ubrzanje a_0^* pripadnog ekvivalentnog sustava dobije se prema izrazu (7):

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* F C} \quad (7)$$

Faktor pouzdanosti FC koristi se za smanjenje spektralnog ubrzanja koji uzima u obzir nepouzdanost modela. Ako je razina znanja LC1 (*Ograničeno znanje – pretpostavka krutih blokova*), faktor FC iznosi 1,35 te se ta vrijednost najčešće primjenjuje. Ukoliko su

primjenjive više razine znanja LC2 (*Dovoljno znanje*) ili LC3 (*Precizno znanje*), faktor FC može se smanjiti na vrijednost 1,20 za LC2, a 1,00 za LC3. Sada kada imamo vrijednost spektralnog ubrzanja a_0^* , možemo je vrednovati u odnosu na određeno granično stanje. Međutim, ako umjesto spektralnog ubrzanja želimo vrednovati silu, to je moguće uz malu preinaku formule prema izrazu (8):

$$M^* a_0^* = F^* = M^* \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{FC} \quad (8)$$

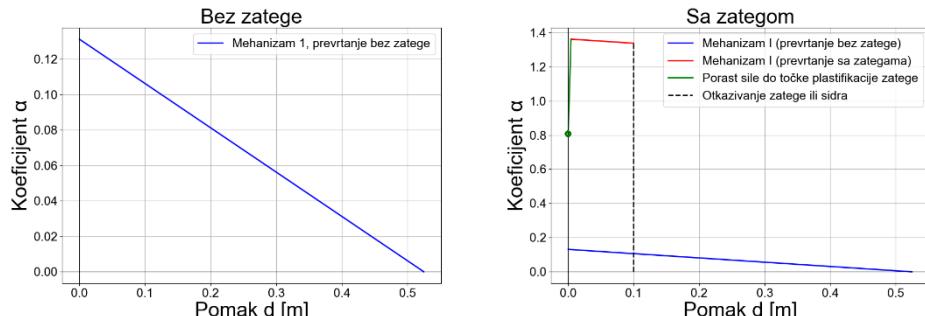
Granične vrijednosti spektralnog ubrzanja definirani su s obzirom na pojedino granično stanje u normi NTC [3].

2.2.2. Nelinearna kinematička analiza

Faktor aktivacije α_0 odgovara kritičnoj vrijednosti za aktivaciju kinematičkog lanca. Ako dalje promatramo razvoj tog faktora kroz pomake mehanizma opisanog pomakom kontrolne točke d_k , prelazimo u područje nelinarme kinematičke analize. Analiza se provodi sve do konfiguracije u kojoj se α_0 poništava, odnosno do krajnjeg pomaka $d_{k,0}$. Razvoj vrijednosti faktora α može se odrediti primjenom linearne kinematičke analizu uz kontinuiranu promjenu geometrije sustava. Međutim, ako se djelovanja na blokove tijekom razvoja kinematičkog lanca održavaju konstantnima, krivulja razvoja faktora α poprima gotovo linearan oblik te se može odrediti izrazom (9):

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{d_k}{d_{k,0}} \right) \quad (9)$$

Ukoliko tijekom razvoja kinematičkog lanca dolazi do postupne promjene vanjskih sila – primjerice produljenja zatege ili smanjenja stupnja zazidanosti između dvaju zidova – krivulja se može smatrati linearnom po dijelovima. U tom se slučaju procjenjuje prema pomacima pri kojima se javljaju znatne promjene, poput tečenja ili pucanja zatege, naglog gubitka zazidanosti između zidova i slično, prema pristupu prikazanom na Slici 1 i opisanom u [4].



Slika 1. Kvalitativni prikaz nelinearnih krivulja kapaciteta mehanizma s jednim blokom bez zatege (lijevo) te sa zategom (desno)

Nakon što je poznata promjena koeficijenta α , može se definirati krivulja kapaciteta ekivalentnog oscilatora kao odnos između ubrzanja a^* i pomaka d^* . Potrebna je masa M^* , koja sudjeluje u kretanju sustava, a može se procijeniti iz virtualnih pomaka točaka na kojima su primjenjene težine, promatrajući ih kao pripadni oblik gibanja. Zatim se spektralno

ubrzanje a^* dobije pomoću koeficijenta α te udjela mase M^* koji sudjeluje u kinematičkom lancu. Taj proces prikazan je izrazom (10).

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} \rightarrow a_0^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* FC} = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} \rightarrow a^* = a_0^* \left(1 - \frac{d^*}{d_0^*}\right) \quad (10)$$

Spektralni pomak d^* ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode računa se kao srednji pomak različitih točaka na koje su primjenjene sile P_i , pri čemu se za svaku točku uzima u obzir veličina sile P_i . Poznavajući pomak kontrolne točke d_k , moguće je definirati d^* prema izrazu (11) s obzirom na virtualne pomake procijenjene u početnoj konfiguraciji.

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}} \quad (11)$$

Sukladno određenim graničnim vrijednostima za spektralno ubrzanje u normi [3] za linearu kinematičku analizu, definirane su i granične vrijednosti spektralnog pomaka s obzirom na promatrana granična stanja za nelinearnu kinematičku analizu.

3. Zaključak

Zbog učestalih razornih potresa i bogate kulturne baštine, u Italiji se razvio snažan interes za proučavanje ponašanja zidanih zgrada tijekom potresa, što je ujedno i jedan od razloga zašto Italija prednjači u području potresnog inženjerstva u Europi. Talijanske su norme među prvima definirale postupak provjere lokalnih mehanizama otkazivanja, prije nego što će takav pristup postati dio europskih smjernica. Ipak, nova generacija Eurokoda 1998-3 donijet će smjernice za takve proračune, u temeljima vrlo slične talijanskom pristupu, ali uz izmjenu parcijalnih sigurnosnih faktora te proračun koji se temelji na sili umjesto na ubrzaju. U svakom slučaju, ključno je da inženjerska struka prepozna važnost ovakvog proračuna, jer lokalni mehanizmi otkazivanja, osim što su česta pojавa pri jakim potresima kod postojećih građevina od nearmiranog zida, predstavljaju izravnu prijetnju ljudskom životu — što im daje dodatnu težinu i opravdava potrebu za pažljivom analizom i jasnim normativnim okvirom.

Literatura

- [1] Croatia December 2020 Earthquake - Rapid Damage and Needs Assessment. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.36346.21443.
- [2] Segretariato Generale. Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle Norme tecniche per le costruzioni (d.m. 14 gennaio 2008). Circolare n. 26/2010. Rim; 2010.
- [3] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. NTC, Istruzioni per l'applicazione della Nuove norme tecniche per la contruzioni, Rim; 2008.
- [4] Demšić M., Uroš M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Baniček M.: Otkazivanje zidova izvan ravnine, Potresno inženjerstvo, obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, (193–206) U: J. Atalić, M. Todorić, M. Uroš, M. Šavor Novak, M. Crnogorac, S. Lakušić (ur.), 2021.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.9>

Komparativna analiza životnih ciklusa aluminijskog i čeličnog okvira

Comparative life cycle analysis of aluminium and steel frames

Emanuel Krupa-Jurić¹, Davor Skejić¹, Ivan Lukačević¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, emanuel.krupa.juric@grad.unizg.hr,
davor.skejic@grad.unizg.hr, ivan.lukacevic@grad.unizg.hr

Sažetak

Zagađenje okoliša je jedan od značajnijih problema današnjice. S obzirom na to da je građevinska industrija jedan od najvećih zagađivača potrebno je u fazi projektiranja, osim konstrukcijski učinkovitim, težiti rješenjima s manjim utjecajem na okoliš. U radu su analizirani čelični i aluminijski okviri istih dimenzija. U prvom koraku provedena je statička analiza i dimenzioniranje gdje su određeni profili i ukupna masa za pojedini okvir. U drugom koraku, s ciljem pronaleta optimalnog rješenja i u pogledu utjecaja na okoliš provedena je komparativna analiza životnih ciklusa. Komparativna analiza životnih ciklusa 'cradle to grave' čeličnog i aluminijskog okvira provedena je upotrebom računalnog programa openLCA. U analizi su identificirane faze s najznačajnijim utjecajem na okoliš te je utvrđeno kako je aluminijска varijanta okvira konkurentna čeličnom u pogledu utjecaja na okoliš.

Ključne riječi: analiza životnog ciklusa, aluminiji, čelik, okvirni sustav, utjecaj na okoliš, komparativna analiza

Abstract

Environmental pollution is one of the most significant problems today. As the construction industry is among the largest polluters, it is essential to pursue solutions that minimise environmental impact during the design phase and enhance structural efficiency. This paper analyses steel and aluminium frames of identical span and height. In the first step, a static analysis and dimensioning were carried out, determining the profiles and total mass of each frame. In the second step, a comparative life cycle analysis was performed to identify the optimal solution regarding environmental impact. A cradle-to-grave life cycle analysis of steel and aluminium frames was conducted using the openLCA computer programme. The analysis pinpointed the phases with the most considerable environmental impact and concluded that the aluminium frame variant is competitive with the steel frame in terms of environmental impact.

Keywords: life cycle analysis, aluminium frame, steel frame, environmental impact, comparative analysis

1. Uvod

Jedan od najvećih izazova današnjice je problem zagađenja okoliša. Opći napredak u tehnologiji, zbog manjka znanja i svijesti, ima ozbiljne posljedice kao što su globalno zatopljenje, oštećenje ozonskog omotača, akumulacije otpada itd. Građevinska industrija ima veliki doprinos u potrošnji resursa i emisiji štetnih plinova [1]. Učinak građevinske industrije najbolje predočuju činjenice da koristi 50% resursa i generira 35% ukupne količine otpada u EU [2]. Iako utjecaj građevine na okoliš nije prioritet u projektiranju, osvješćivanjem ekoloških problema, postaje sve bitnija stavka u procesu projektiranja [3]. Projektiranjem održivih građevina moguće je značajno umanjiti negativni utjecaj na okoliš.

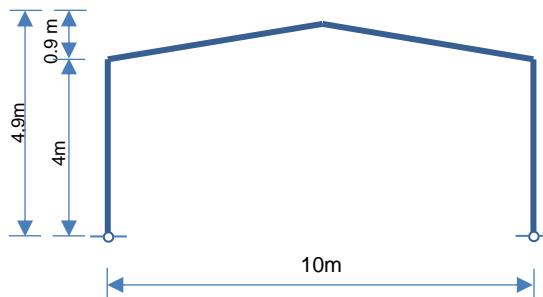
Kako bi se dobila ispravna slika o utjecaju na okoliš, u odabiru materijala potrebno je razmotriti ugrađenu energiju konstrukcijskog elementa, odnosno svu energiju utrošenu tijekom svih procesa proizvodnje, izvedbe te demontaže i recikliranja ili odlaganja na kraju životnog vijeka [4].

U slučaju industrijskih hala i skladišta, čelik je idealan s ekonomskog i konstruktivnog, ali i iz aspekta održivosti. Da je čelik izrazito povoljan iz aspekta održivosti potvrđuje činjenica da se može gotovo beskonačno puta reciklirati. Iako čelik ima energetski vrlo intenzivnu primarnu proizvodnju, analizom '*cradle to cradle*' pokazano je kako se ti gubici nadoknade u ostalim fazama životnog vijeka [5]. Za spomenutu namjenu, aluminij je potencijalni konkurent čeliku. Konkurentnost proizlazi iz povoljnih karakteristika aluminija kao što su mala vlastita težina, otpornost na koroziju, velike oblikovne mogućnosti poprečnih presjeka [6,7]. Također, kao i čelik, aluminij se može reciklirati beskonačno puta, a sekundarna proizvodnja aluminija konzumira samo 5% ukupne energije potrebne za primarnu proizvodnju i proizvodi 5% ukupne količine CO₂ primarne proizvodnje [8].

Kako bi se pronašlo optimalno rješenje i u pogledu održivosti, nakon provedene statičke analize i dimenzioniranja čeličnog i aluminijskog okvira gdje su određeni profili i mase pojedinog okvira provedena je komparativna analiza životnih ciklusa. S obzirom na to da su takvi konstrukcijski sustavi često primjenjivi u praksi, bitno je odrediti njihov utjecaj na okoliš. Analizom životnog ciklusa određeno je ekološki prihvatljivije rješenje, ali i pojedine faze životnog ciklusa s najnegativnijim utjecajem na okoliš.

2. Funkcijske jedinice

Dimenziije aluminijске i čelične hale su jednake kako bi se mogla napraviti usporedba. Tlocrte dimenzije su 40 m x 10 m. Glavni nosivi sustav hale je dvozglobni okvir s dimenzijama prikazanim na slici 1. Okviri su postavljeni na razmaku od 4 m. Lokacija hale je Zagreb, na 160 m.n.v. Analiza opterećenja provedena je sukladno normama HRN EN 1991-1-1 [9], HRN EN 1991-1-3 [10] i HRN EN 1991-1-4 [11]. Ukupno dodatno stalno opterećenje sastoji se od pokrova, podrožnica i instalacija što iznosi 0,6 kN/m². Karakteristično opterećenje snijegom na tlu iznosi 1,25 kN/m². Opterećenje vjetrom određeno je za kategoriju terena III s osnovnom brzinom vjetra od 20 m/s. Provedena je analiza prvog unutarnjeg okvira za obje hale. Čelični i aluminijski okviri su dimenzionirani sukladno normama HRN EN 1993-1-1 [12] i HRN EN 1999-1-1 [13]. Primijenjeni razred čelika je S235 dok je primijenjena aluminijска legura EN-AW 6082 T6.



Slika 1. Geometrija čeličnog i aluminijskog okvira

Usvojeni profili za čelični okvir su sljedeći: IPE 270 za stupove i IPE 240 za prečku. Ukupna masa čeličnog okvira je 601 kg. Usvojeni profil za stupove i prečku aluminijskog okvira je IPE 330. Ukupna masa aluminijskog okvira je 307 kg.

3. Analiza životnog ciklusa

Provedena analiza životnog ciklusa '*cradle to grave*' predstavlja utjecaje na okoliš čeličnog i aluminijskog okvira. Faze životnih ciklusa određene su sukladno normi EN 15804 [14]. Razmatrane su faze proizvodnje (A1, A2, A3) i 'End of life' faza (C1, C2, C3, C4) zajedno s potencijalnim negativnim ili pozitivnim utjecajima (D). Faza održavanja (B2) se razmatra samo za čelični okvir jer aluminijski okvir nije potrebno antikorozivno zaštiti, odnosno održavati.

Analiza životnog ciklusa provedena je upotrebom računalnog programa openLCA [15]. Faze životnog ciklusa pojedinog okvira su modelirane sa procesima iz baze podataka 'ecoinvent 3.11 EN15804GD Unit-Processes 2025-04-04'. Procesi kojima su modelirane faze životnog ciklusa čeličnog okvira su prikazani u tablici 1. Za aluminijski okvir razmatrane su primarna i sekundarna proizvodnja aluminija pri čemu su razmatrani udjeli recikliranog aluminija od 25%, 50%, 75% i 100%. Procesi kojima su modelirane faze životnog ciklusa aluminijskog okvira prikazani su u tablici 2.

Tablica 1. Faze životnog ciklusa čeličnog okvira [15]

LCS ¹	Procesi						
Proizvodnja	'hot rolling'	'iron ore'	'iron scrap'	'coke'	'limestone'	'alkyd paint'	'lorry ³ '
Montaža	'lorry ³ '						
Održavanje	'alkyd paint'						
EOL ²	'market for waste steel'						

¹Faze životnog ciklusa, ²Kraj životnog ciklusa, ³freight lorry, 7.5-15 tons, diesel, EURO 6

Tablica 2. Faze životnog ciklusa aluminijskog okvira [15]

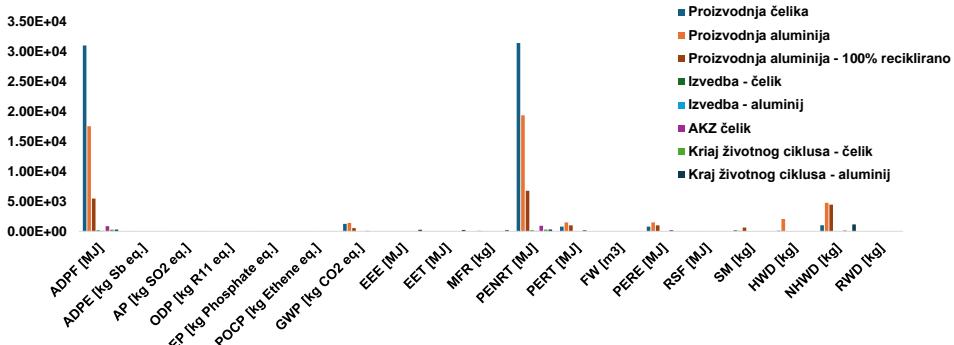
LCS ¹	Procesi					
1 ^o Proizvodnja	'extrusion ¹ '	'NaOH'	'AlF ₃ '	'cryolite'	'Al ₂ O ₃ '	'water'
2 ^o Proizvodnja	'aluminium scrap'	'extrusion ⁴ '				
Montaža	'lorry ³ '					
EOL ²	'market for waste aluminium'					

¹Faze životnog ciklusa, ²Kraj životnog ciklusa, ³freight lorry, 7.5-15 tons, diesel, EURO 6,

⁴impact extrusion of aluminium, 1 stroke

4. Rezultati analize životnog ciklusa

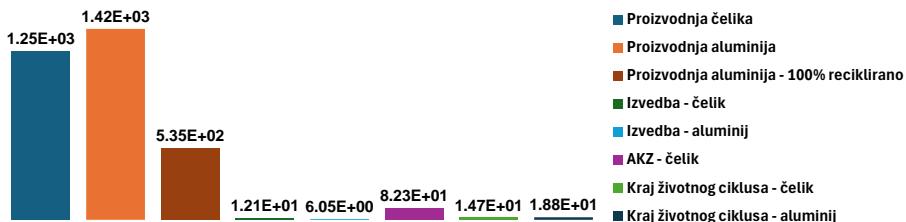
Na slici 2 prikazani su rezultati pojedine faze životnog ciklusa za pojedinu kategoriju utjecaja na okoliš. Očito je kako su najveće vrijednosti kategorija utjecaja na okoliš postignute u fazi proizvodnje čelika i aluminija što je bilo očekivano. Čelik ima do dva puta veće vrijednosti potencijala abiotičkog iscrpljivanja fosilnih goriva (ADPF) i ukupne upotrebe neobnovljivih primarnih izvora energije (PENRT) u odnosu na aluminij. S druge strane, aluminij ima nešto veće vrijednosti potencijala globalnog zatopljenja (GWP) i značajno veće vrijednosti u kategoriji odlaganja neštetnog otpada (NHWD).



Slika 2. Kategorije utjecaja na okoliš

Ako se detaljnije analizira ukupna količina emitiranog CO₂e kroz cijeli životni ciklus, slika 3, odnosno vrijednosti potencijala globalnog zatopljenja (GWP) kao jedne od značajnih kategorija utjecaja na okoliš, može se vidjeti razlika od 5,93% više CO₂e u odnosu na čelični okvir. Iako aluminij ima dva do tri puta veće vrijednosti emitiranog CO₂e po 1 kg u odnosu na čelik razlika za cijelokupni životni vijek je znatno manja. Razlog tomu je činjenica što je težina aluminijskog okvira dvostruko manja i što za aluminijski okvir nije potrebna antikorozivna zaštita. Također, ukoliko bi se u analizi životnog ciklusa kao sirovina koristi 100% reciklirani aluminij vrijednosti emitiranog CO₂e po 1 kg u fazi proizvodnje prema [16] bile bi jednake što bi za cijeli životni ciklus rezultiralo s 58,8% manjim emisijama CO₂e u korist aluminija. U slučaju udjela recikliranog aluminija od 25%, 50% i 75% izračunate su

manje emisije CO₂e u korist aluminija od 3,6%, 21% i 38,6%. Objasnjenja ostalih kategorija utjecaja dana su u [17].



Slika 3. Potencijal globalnog zatopljenja (GWP)

5. Zaključak

U radu je prikazana komparativna analiza životnih ciklusa čeličnog i aluminijskog okvira. Funkcione jedinice su čelični i aluminijski okviri jednake visine, raspona i opterećenja. Prvo su dimenzioniranjem definirani profili za pojedini okvir te su određene ukupne mase okvira. Ukupna masa čeličnog okvira je 601 kg dok je masa aluminijskog okvira 301 kg. Na temelju dobivenih masa pojedinog okvira provedena je analiza životnog ciklusa pojedinog okvira te su uspoređeni rezultati. Razmatrane su faze životnog ciklusa od proizvodnje pa do kraja životnog ciklusa. Analizom životnog ciklusa je utvrđeno kako najveći utjecaj na okoliš ima faza proizvodnje profila za obje varijante okvira. Usporedbom rezultata zaključeno je kako je, iz aspekta utjecaja na okoliš, aluminij dobra alternativa čeliku s obzirom na to da je masa aluminijskog okvira dvostruko manja i zbog toga što nije potrebna antikorozivna zaštita. Iako primarna proizvodnja čelika i aluminija ima veliki utjecaj na okoliš, čelik i aluminij se opravdano smatraju održivim materijalima zbog malog utjecaja na okoliš u drugim fazama životnog ciklusa, vrlo dugog životnog vijeka i velikog reciklažnog potencijala. U slučaju 100% recikliranog materijala dobivaju se puno povoljniji rezultati u korist aluminija, a naročito u odnosu na druge građevinske materijale koji se ne mogu reciklirati beskonačno mnogo puta kao u slučaju ova dva konstrukcijska metala.

Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektima: IP-2022-10-9298, Pouzdane metode za proračun aluminijskih konstrukcija koje odgovaraju zahtjevima budućnosti (REAL-fit), voditelj Davor Skejić i UIP-2020-02-2964, Inovativna lagana međukatna konstrukcija – spregnuti sustav hladno oblikovani čelik i beton (LWT-FLOOR), voditelj Ivan Lukačević.

Literatura

- [1] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 29:394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>.

- [2] Mrežna stranica Europske unije, link (https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en), pristupljeno: 14.05.2025.
- [3] Guggemos AA, Horvath A. Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of Infrastructure Systems* 2005;11:93–101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(93)).
- [4] Dixit MK, Fernández-Solís JL, Lavy S, Culp CH. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:3730–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021>.
- [5] Lukačević I, Rajić A, Ungureanu V, Buzatu R. A comparative life-cycle assessment of structural composite steel-concrete floor systems – A case study. In: Biondini F, Frangopol DM, editors. *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*, London: Taylor & Francis; 2023, p. 751–8.
- [6] Ivica Boko, Davor Skejić, Neno Torić. Aluminijске konstrukcije. Split: Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije; 2017.
- [7] Skejić D, Boko I, Torić N. Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers* 2015;67:1075–85. <https://doi.org/10.14256/JCE.1395.2015>.
- [8] Dokšanović T, Farkaš M, Njegovanović N. Tržišna prihvatljivost građevinskog materijala s malim udjelom ugljika. *Elektronički Časopis Građevinskog Fakulteta Osijek - e-GFOS* 2012;3:1–20.
- [9] HRN EN 1991-1-1:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-1: Opća djelovanja -- Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada (EN 1991-1-1:2002+AC:2009)
- [10] HRN EN 1993-1-3:2024, Eurokod 3 -- Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-3: Hladno oblikovani elementi i limovi (EN 1993-1-3:2024)
- [11] HRN EN 1991-1-4:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-4: Opća djelovanja -- Djelovanja vjetra (EN 1991-1-4:2005+AC:2010+A1:2010)
- [12] HRN EN 1993-1-1:2014, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2005+AC:2009)
- [13] HRN EN 1999-1-1:2015, Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila (EN 1999-1-1:2007+A1:2009+A2:2013)
- [14] Održivost građevina - Izjave o utjecaju proizvoda na okoliš - Osnovna pravila za kategorizaciju građevinskih proizvoda (EN 15804:2012+A2.2019/AC:2021) 2021.
- [15] Green Delta GmbH, 2025, openLCA (2.4.0.).
- [16] Mrežna stranica: Sustamize, link (<https://www.sustamize.com/blog/how-much-co2-is-saved-when-an-aluminum-automobile-frame-is-used-instead-of-a-steel-one>), pristupljeno: 16.05.2025.
- [17] Rigueiro, Constança: SBRI+ Valorizacija spoznaja o održivosti spregnutih mostova u izgrađenom okolišu - Priručnik za projektiranje I: Opće informacije i riješeni primjeri, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2018

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.10>

Uloga obrazovanja u promicanju održivosti u građevinarstvu: primjer kolegija Zelena gradnja

*Role of education in promoting sustainability in the construction
sector: A case study of the Green Building course*

Viktor Kolčić¹, Ivana Carević¹, Marijana Serdar¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, viktor.kolcic@grad.unizg.hr,
ivana.carevic@grad.unizg.hr, marijana.serdar@grad.unizg.hr

Sažetak

S obzirom na značajan utjecaj građevinskog sektora i potrebu za zelenom transformacijom, obrazovanje ima ključnu ulogu. Ovaj rad opisuje ulogu obrazovanja u promicanju održivosti. Kolegij Zelena gradnja, uspostavljen unutar EU projekta GREENCO, predstavljen je kao primjer dobre prakse. Projekt GREENCO uskladjuje obrazovne programe s tržišnim potrebama (održivost, digitalizacija). Rad detaljno prikazuje sadržaj i metodologiju kolegija, uključujući projektno učenje i rezultate ankete studenata. Anketa je potvrdila interes za održivost unatoč nedostatku adekvatne pripreme kroz kurikulum. Kolegij Zelena gradnja uspješno integrira održivost u visoko obrazovanje, fokusirajući se na razvoj zelenih vještina.

Ključne riječi: održivost u građevinarstvu, obrazovanje, zelena gradnja, visoko obrazovanje

Abstract

Given the significant impact of the construction sector and the need for green transformation, education plays a crucial role. This paper describes the role of education in promoting sustainability. The Green Building course, established within the EU GREENCO project, is presented as an example of good practice. The GREENCO project aligns educational programs with market needs (sustainability, digitalization). The paper describes the content and methodology of the Green Building course, including project-based learning in collaboration with industry and the analysis of survey results conducted among students. The survey results confirmed students' interest in sustainability, but also the lack of adequate preparation through the existing curriculum. The Green Building course represents successful incorporation of sustainability into the higher education program, emphasizing the development of green skills.

Keywords: sustainability in construction, education, green building, high education

1. Uvod

Građevinski sektor, unatoč svojoj ključnoj ulozi u gospodarskom razvoju, prepoznat je kao jedan od najvećih globalnih zagađivača i potrošača resursa. Odgovoran je za približno 37 % emisija CO₂ povezanih s energijom te za značajan udio u ukupnoj količini otpada [1]. Posebno se ističe građevinski otpad i otpad od rušenja (*Construction & Demolition Waste – CDW*), koji čini više od trećine ukupnog otpada generiranog u Europskoj uniji [2]. Suočen s izazovima klimatskih promjena i iscrpljivanjem prirodnih resursa, građevinski sektor mora provesti hitnu i dubinsku zelenu transformaciju, obuhvaćajući sve faze životnog ciklusa građevina – od projektiranja i građenja do korištenja i uklanjanja.

U ovom kontekstu, obrazovanje ima ključnu ulogu u pripremi budućih inženjera [3]. Ipak, postoji izražen nesrazmjer između aktualnih obrazovnih programa i rastuće potražnje tržišta rada za "zelenim" vještinama [4]. Europska inicijativa *Construction Blueprint* prepoznaje ovaj nedostatak kompetencija kao jednu od glavnih prepreka održivom razvoju sektora, ističući sve veći broj novih radnih mjeseta koja zahtijevaju specifična znanja vezana uz održivost [5]. Stoga, sustav visokog obrazovanja mora proaktivno osposobljavati inženjere specifičnim znanjima i vještinama koje će im omogućiti učinkovito suočavanje s kompleksnim zahtjevima zelene i digitalne tranzicije [6].

Potrebu za promjenom dodatno naglašava postupno uvođenje ekoloških kriterija u javnoj nabavi, poznatih kao Zelena javna nabava (*Green Public Procurement – GPP*). Europska komisija aktivno promiče GPP, uključujući posebne kriterije za zgrade, s ciljem poticanja kupnje proizvoda i usluga s manjim utjecajem na okoliš. Time se stvaraju poticaji za uvođenje održivih praksi tijekom cijelog životnog ciklusa građevina [7]. Za objektivno određivanje i kvantificiranje tih utjecaja ključna je analiza životnog ciklusa (*Life Cycle Assessment – LCA*), standardizirana normama ISO 14040 [8] i ISO 14044 [9]. Razumijevanje i primjena LCA, uz razvoj inovativnih građevinskih rješenja i materijala te integraciju digitalnih tehnologija radi unaprjeđenja održivosti, ključni su koraci prema transformaciji sektora u skladu s principima kružnog gospodarstva.

Cilj ovog rada je prikazati trenutačno stanje u području edukacije za održivost u građevinarstvu te, kroz detaljan prikaz kolegija Zelena gradnja na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, predstaviti primjer dobre prakse uvođenja i izvođenja kolegija koji izravno doprinosi razvoju ključnih zelenih vještina i kompetencija za buduće inženjere.

2. Analiza potrebnih vještina

Transformacija građevinskog sektora prema načelima održivosti i digitalizacije zahtijeva značajnu prilagodbu postojećih obrazovnih programa i razvoj novih kompetencija. Razumijevanje vještina koje nedostaju na tržištu rada, kao i percepција tih potreba među samim studentima, ključno je za učinkovito usmjeravanje obrazovnih inicijativa. Ovo poglavlje analizira potrebe tržišta rada za zelenim i digitalnim vještinama u građevinarstvu te predstavlja analizu percepције studenata o vlastitoj spremnosti za ove izazove, temeljenu na provedenim anketama.

2.1. Potrebe tržišta

Suvremeno tržište rada u građevinarstvu prolazi kroz značajne promjene, potaknute potrebom za održivijim praksama. Kao što je navedeno u uvodu, postoji evidentan nesklad između vještina koje nudi obrazovni sustav i onih koje su tražene od strane industrije.

U kontekstu prepoznavanja i sustavnog uređenja potrebnih vještina, Hrvatski kvalifikacijski okvir (HKO) predstavlja reformski instrument kojim se uređuje cjelokupni sustav kvalifikacija na svim obrazovnim razinama u Republici Hrvatskoj kroz standarde kvalifikacija temeljene na ishodima učenja i usklađene s potrebama tržišta rada, pojedinca i društva u cjelini [10].

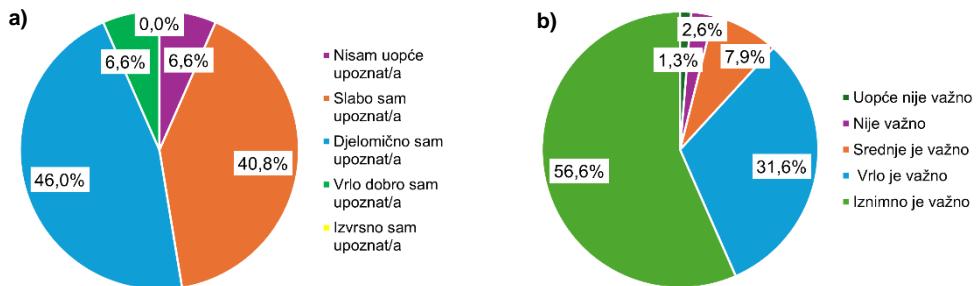
Unutar HKO-a, prepoznate su i imenovane dvije kvalifikacije koje su izravno povezane s tematikom održivosti u građevinarstvu i koje su predložene od strane Hrvatske udruge poslodavaca (HUP):

1. Upravitelj/upraviteljica održivošću: Ovo zanimanje podrazumijeva stručnjaka koji je sposobljen za planiranje, implementaciju, praćenje i izvještavanje o strategijama održivosti unutar organizacije ili projekta. Ključne aktivnosti uključuju analizu utjecaja na okoliš, primjenu standarda održivosti, optimizaciju resursa, te promicanje etičkih i društveno odgovornih praksi. U građevinarstvu, upravitelj održivošću osigurava da projekti budu usklađeni s principima zelene gradnje kroz cijeli životni ciklus [11].
2. Certifikator/certifikatorica zelene gradnje: Ovo zanimanje obuhvaća stručnjaka koji je ovlašten i sposobljen za provedbu postupaka certifikacije zgrada prema različitim sustavima zelene gradnje (npr. LEED, DGNB, BREEAM). Njihove kompetencije uključuju poznavanje kriterija i metodologija ocjenjivanja održivosti, prikupljanje i analizu relevantnih podataka, te izdavanje preporuka za poboljšanje energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti objekata. Ova uloga je ključna za verifikaciju i promicanje održivosti u izgrađenom okolišu [12].

Postojanje ovih kvalifikacija unutar HKO-a naglašava potrebu industrije za specifičnim vještinama u području održivosti i zelene gradnje, naglašavajući smjer u kojem se obrazovanje mora razvijati kako bi odgovorilo na zahtjeve tržišta.

2.2. Potrebe studenata

Za prilagodbu obrazovnih programa, ključno je razumijevanje percepcije i znanja studenata o održivosti u građevinarstvu. Stoga je u sklopu projekta GREENCO [13] provedena anketa među studentima diplomskog studija Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta, procjenjujući njihovu pripremljenost i stavove o zelenoj gradnji. Pitanja su obuhvatila važnost, samoprocjenu znanja i kvalitetu studijske pripreme. Rezultati pokazuju da više od 90% ispitanika ima ograničeno poznavanje koncepta zelene gradnje (**Slika 2. a**). Iako više od 85% ispitanika prepoznaže iznimnu važnost poznavanja načela održivosti i procjene utjecaja na okoliš (**Slika 2. b**), nezadovoljni su razinom pripremljenosti studijem za primjenu tih načela. Nadalje, navode ograničeno teorijsko znanje, a nijedan student nema dovoljno teorijskog i praktičnog znanja, naglašavajući važnost praktičnog aspekta **Slika 3**.



Slika 2. Rezultati ankete za pitanja: a) Ocijenite svoje trenutno znanje o pojmu i principima zelene (održive) gradnje; b) Smatrate li važno za inženjera građevinarstva znanje o principima održivosti i procjeni utjecaja gradnje na okoliš?



Slika 3. Rezultati ankete za pitanje: Procijenite koliko Vas je dosadašnji studij pripremio na primjenu principa zelene i održive gradnje

3. Iskustvo uvođenja kolegija Zelena gradnja

Razvoj kolegija Zelena gradnja na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu izravan je odgovor na prepoznate potrebe tržišta rada i izazove zelene transformacije građevinskog sektora. Temeljem detaljne analize vještina i rezultata studentske ankete, odlučeno je uvesti formalni kolegij za studente diplomskog studija. Ishodi učenja za ovaj kolegij, razvijeni u suradnji s Tehničkim sveučilištem u Danskoj (za srodne kolegije Održivost i procjena životnog ciklusa u izgrađenom okruženju te Kružna gradnja), temeljili su se na analizi Hrvatskog kvalifikacijskog okvira i percepcijama studenata.

3.1. Ishodi učenja i sadržaj kolegija

Kolegij Zelena gradnja studente diplomskog studija osposobljava za duboko razumijevanje pravnih okvira koji reguliraju certifikaciju održivosti, s posebnim naglaskom na proizvode i zgrade, te ih uči kritički vrednovati regulatorne aspekte održivih praksi. Studenti razvijaju sveobuhvatno razumijevanje okvira održivosti, razmišljanja o životnom ciklusu, koncepata zelene gradnje (uključujući sustave kao što su EPD, BREEAM, Level(s), DGNB i LEED) te načela kružnog gospodarstva (poput obrnute piramide i metoda gospodarenja otpadom). Naglasak je na primjeni ovih okvira u donošenju održivih odluka tijekom cijelog životnog ciklusa projekta.

Nadalje, studenti stječu napredna znanja o procjeni utjecaja na okoliš u kontekstu zelene gradnje, te se upoznaju s ključnim shemama certificiranja održivosti. Ospozobljavaju se za kreiranje i tumačenje okolišnih deklaracija proizvoda (EPD), čime pridonose informiranim odabiru materijala. Postaju stručni u održivom gospodarenju otpadom, razumijevajući koncepte ponovne uporabe, recikliranja i oporabe. Razumijevanje koncepta održive gradnje proširuje se na inovativne pristupe poput adaptivne i modularne gradnje te ponovnog korištenja postojećih zgrada, uz primjenu načela kružnog gospodarstva. Kolegij također potiče kritičku evaluaciju različitih održivih pristupa, procjenjujući njihove okolišne i ekonomske utjecaje te predlažući strategije za poboljšanje i inovacije.

3.2. Metodologija izvođenja nastave

Metodologija kolegija Zelena gradnja temelji se na aktivnom i primijenjenom učenju, s ciljem razvoja praktičnih vještina i kritičkog razmišljanja.

Projektno učenje je u središtu praktičnog dijela nastave. Studenti izrađuju modele procjene životnog ciklusa na razini proizvoda i zgrade, identificiraju žarišne točke i predlažu poboljšanja. Kroz vježbe kritičkog razmišljanja i scenarije rješavanja problema, studenti analiziraju izazove, predlažu rješenja i brane svoje odluke. Predstavljanje rezultata pred predstavnicima industrije osigurava vrijednu povratnu informaciju iz industrijskog okruženja, pripremajući studente za stvarne izazove u budućim karijerama.

Gostujuća predavanja stručnjaka iz industrije pružaju studentima izravan uvid u trenutne prakse, izazove i inovacije u industriji s održivog i kružnog stajališta. Praktični zadaci često se provode u suradnji s industrijom, što potiče umrežavanje i razumijevanje industrijskih standarda te doprinosi razvoju praktičnog razumijevanja održivih praksi.

Posjeti gradilištu i rad na terenu ključni su za stjecanje praktičnog iskustva. Organiziraju se posjeti projektima održive gradnje, objektima za gospodarenje otpadom, zgradama sa zelenim certifikatima i tvornicama. Ovi posjeti omogućuju studentima dublje razumijevanje proizvodnih procesa i primjene stečenog znanja u stvarnom svijetu, kao i uvid u stvarnu industrijsku praksu.

Kontinuirano ocjenjivanje i povratne informacije provode se putem interaktivnih prezentacija i aktivnih diskusija, čime se osigurava stalan angažman studenata i sustavno praćenje njihovog napretka. Primjena razmišljanja o životnom ciklusu kroz vizualne primjere i poticajna pitanja stimulira samostalno istraživanje. Kroz prezentacije kolegama dodatno se razvijaju komunikacijske i prezentacijske vještine, čime se stvara dinamično okruženje za učenje.

4. Zaključak

Kolegij Zelena gradnja uveden je kao odgovor na jasno prepoznate potrebe tržišta rada i interes studenata za održivost u građevinarstvu. Analiza rezultata ankete pokazuje da studenti smatraju ovu temu vrlo važnom, ali da dosadašnji studijski programi ne pružaju dovoljno znanja i praktičnih vještina iz tog područja. Kroz Erasmus+ projekt GREENCO teorijska i praktična znanja o održivosti u građevinarstvu uvode se na više razina obrazovanja – od 4 do 8 prema HKO-u. Edukacija se provodi kroz konkretne projekte, suradnju s industrijom, gostujuća predavanja i terenske posjete. Ovakav pristup obrazovanju pomaže boljoj pripremi budućih inženjera za izazove zelene tranzicije.

Zahvala

Prvi autor zahvaljuje na finansijskoj podršci Hrvatskoj zakladi za znanost u sklopu projekta Razvoj karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti (NPOO_DOK_2023_10). Autori zahvaljuju na podršci Erasmus+ projektu Education for GREEN transformation of CONstruction sector – GREENCO (šifra projekta: 101111694), te projektu Active storage of captured CO₂ in net zero construction products – ASCCENT, koji je financiran sredstvima programa Europske unije Obzor Europa (šifra projekta: 101159895).

Literatura

- [1] UNEP i GABC: Not just another brick in the wall: The solutions exist - Scaling them will build on progress and cut emissions fast. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025, Pariz, 2025, <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/47214>
- [2] Construction and demolition waste - European Commission, https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en, pristupljeno: 05. lipanj 2025.
- [3] K. M. Siddiqi, D. Chatman, i G. Cook: Role of education and industry towards more sustainable construction, 2008, <https://doi.org/10.1504/IJETM.2008.017336>
- [4] T. Akyazi, I. Alvarez, E. Alberdi, A. Oyarbide-Zubillaga, A. Goti, i F. Bayon: Skills needs of the civil engineering sector in the european union countries: Current situation and future trends, Applied Sciences (Switzerland), sv. 10, izd. 20, str. 1–24, lis. 2020, <https://doi.org/10.3390/app10207226>
- [5] Home - Construction Blueprint, <https://constructionblueprint.eu/> pristupljeno: 05. lipanj 2025.
- [6] Switzer, C., Volles, N., Provenzano, G., Boitard, R.: Integrating green skills into higher education teaching and research, 2024, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15164.35209>
- [7] GPP Criteria and Requirements - European Commission, https://green-forum.ec.europa.eu/green-public-procurement/gpp-criteria-and-requirements_en, pristupljeno: 05. lipanj 2025.
- [8] ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, <https://www.iso.org/standard/37456.html>, pristupljeno: 05. lipanj 2025.
- [9] ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, <https://www.iso.org/standard/38498.html>, pristupljeno: 05. lipanj 2025.
- [10] Hrvatski kvalifikacijski okvir, <https://www.kvalifikacije.hr/hr>, pristupljeno: 04. lipanj 2025.
- [11] Registrar HKO: Upravitelj/upraviteljica održivošću, <https://hko.srce.hr/registrovani/standard-zanimanja/detalji/371>, pristupljeno: 05. lipanj 2025.
- [12] Registrar HKO: Certifikator/certifikatorica zelene gradnje, <https://hko.srce.hr/registrovani/standard-zanimanja/detalji/370>, pristupljeno: 05. lipanj 2025.
- [13] GREENCO, <https://www.greenco.grad.hr/>, pristupljeno: 05. lipanj 2025.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.11>

Slijeganje temelja na ojačanom tlu (cement, staklo)

Settlement of foundations on reinforced soil (cement, glass)

Matej Lozančić¹, Maja Prskalo¹

(1) Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Mostaru, Bosna i Hercegovina, matej.lozanic@fgag.sum.ba, maja.prskalo@fgag.sum.ba

Sažetak

U radu su razmatrana trenutna i konsolidacijska slijeganja kvadratnog temelja za dvije različite geomehaničke sredine. Prvi slučaj je pjeskovito tlo ispod kojeg se nalazi sloj gline, a druga geomehanička sredina je pjeskovito tlo u mješavini sa šljunkom te ojačano cementnim prahom (30%) i staklenim vlaknima (1%) ispod kojeg se nalazi glina. Dobiveni rezultati slijeganja pokazuju dobru stabilizaciju tla i povoljne geomehaničke karakteristike ojačanog tla koji se ogledaju u manjoj vrijednosti ukupnog slijeganja temelja koja zadovoljava maksimalnu dopuštenu vrijednost definiranu Eurocode-om. U radu su prikazana slijeganja kroz vremensko razdoblje od 120 dana, prikazano je konačno, dugoročno slijeganje ispod temelja kao i diferencijalni omjer (δ/L) slijeganja temelja. Proračun trenutnog slijeganja vršen je prema teoriji elastičnosti odnosno konsolidacijsko slijeganje prema Terzaghi-ju.

Ključne riječi: slijeganje, Terzaghi, pijesak, cementni prah, staklena vlakna, glina, diferencijalno slijeganje

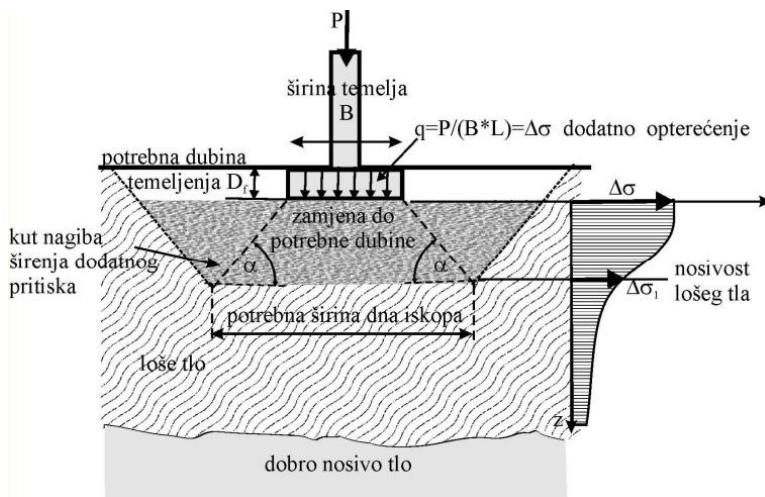
Abstract

The paper considers the instantaneous and consolidated settlements of a square foundation for two different environments. The first case is sandy soil with a layer of clay underneath, and the second environment is sandy soil mixed with gravel and reinforced with cement powder (30%) and glass fibers (1%) with clay underneath. The obtained settlement results show good soil stabilization and favorable geomechanical characteristics of the reinforced soil, which are reflected in a lower value of the total settlement of the foundation, which meets the maximum allowable value defined by Eurocode. The paper presents settlements over a time period of 120 days, shows the final, long-term settlement under the foundation, as well as the differential ratio (δ/L) of the foundation settlement. The calculation of instantaneous settlement was performed according to the theory of elasticity, i.e. consolidation settlement according to Terzaghi.

Keywords: settlement, Terzaghi, sand, cement dust/powder, glass fiber, clay, differential settlement

1. Uvod

Poboljšana, stabilizirana tla imaju sve veću primjenu u današnjem vremenu. Korištenje ojačanog, stabiliziranog odnosno armiranog tla prvi je definirao Francuz H. Vidal 1966. godine za potrebe izgradnje potpornih zidova koristeći sustav u kojem se koristi armatura čeličnim trakama. Ova metoda se uspješno koristila u različitim područjima, a najviše za potporne zidove, brane, upornjake mosta [1] [2]. Klasičan pristup poboljšanju podtemeljnog tla i najstariji poznati način jeste zamjena materijala. Važno je razlikovati postupke zamjene, kada je razina podzemne vode duboko ispod temeljne plohe i postupak kada je razina podzemne vode neposredno ispod temeljne plohe, a može biti i na površini terena. Prikazana analiza obuhvaćena radom proučava slijeganje temelja na prostoru koji naliježe na pijesak i šljunak, što je karakteristika područja Mostara. Na slici 1. prikazano je slabo nosivo tlo koje je potrebno zamijeniti boljim materijalom, ali ne u cijelosti nego samo do određene dubine [2].



Slika 1. Zamjena nasipom tražene zbijenosti iznad razine podzemne vode [2]

U današnje vrijeme armiranje tla se vrši geosintetikom koja povećava vlačnu čvrstoću i nosivost na smicanje, a za cilj ima i smanjenje deformacija konstrukcije. Diljem svijeta mnogi znanstvenici proučavali su tla ojačana prirodnim ili sintetičkim vlaknima kao i poboljšanja nosivosti koristeći šljunak ili cementni prah. Jedni od mnogih koji su se bavili stabilizacijom tla jesu Santoni, Tingle, Webster (2001), Tallapragada, Sharma, Meshram (2009), Attom, Al-Tamimi (2010), Chegenizadeh, Nikraz (2012), Mali, Singh (2013), Singh, Bagra (2013), Rabindra, Pradhan, Naik (2014), Kumar, Shanmuga, Kalyan Kumar (2015), [1] [3] [4]. Danas je u svijetu široko rasprostranjena tehnika ojačanja tla staklenim vlaknima [5]. Staklena vlakna imaju dugi vijek trajanja i u poređenju s prirodnim vlaknima nisu biološki razgradiva. U ovom radu prikazat će se i proučiti ponašanje pješčano-šljunčanog tla ojačanog sa 30% cementnog praha i 1% staklenih vlakana [6].

2. Korišteni materijali

Staklena vlakna (GF) i prašina iz cementne peći (CKD) korišteni su kao materijal koji se miješa s različitim vrstama tla. Staklena vlakna se koriste kao sredstvo za ojačanje zbog svoje visoke čvrstoće, krutosti, visokog omjera površine i težine te dimenzijske stabilnosti [6]. Karakteristike koje su navedene u studijama [7] [8] [9] [10] [11] o tlima ojačanim vlaknima pokazale su povećanje čvrstoće materijala. Prašina iz cementne peći jedan je od otpada koji nastaje tijekom procesa kalcinacije u peći kao sekundarni proizvod u proizvodnji portland cementa.

U usporedbi s neojačanim tlom, korištenje cementnog praha (CKD) u stabilizaciji tla s različitim postocima poboljšava zbijenost, čvrstoću i početnu krutost [12]. Provedena je eksperimentalna studija [6] kako bi se pokazao utjecaj cementnog praha i staklenih vlakana (Slika 2.) na svojstva mješavine sačinjene od pjesaka i šljunka (SG) u omjeru 1:2. U smjesu su dodavani cementni prah s udjelom 30%, 40 % i 50 % te staklena vlakna s udjelom 1%, 2% i 3% od težine suhe mješavine pjeska i šljunka.



Slika 2. Staklena vlakna [1]

3. Eksperiment

Ispitivanje se vršilo na lokalnim uzorcima pjeska koji su definirani u [6], na osnovu čega je izvršena klasifikacija te popisana njegova geomehanička svojstva [6]. Takav pjesak je pomiješan sa finim drobljenim šljunkom 2,36-10 mm te staklenim vlaknima (staklo tipa E) promjera 0,013 mm izrezanim na duljine od 18 mm. Tlo je pomiješano sa cementnom prašinom dobivenom iz tvornice cementa.

Cilj istraživanja je ponuditi jasne eksperimentalne dokaze ponašanja pjeskovito-šljunčanog tla kroz primjenu testova zbijanja (Proctorov pokus) u pet slojeva, 25 udaraca za svaki sloj kako bi se dobila maksimalna specifična gustoća tla (γ) i optimalni sadržaj vlage. Također istražena je tlačna čvrstoća za mješavinu pjesak-šljunak (SG) – cementna prašina (CKD) – staklena vlakna (GF). Rezultati Proctorovog testa (tablica 1) pokazali su da je najbolje

ponašanje tla za udio staklenih vlakana (GF) 1% i udio cementne prašine (CKD) 30 % jer se tada povećala suha gustoća tvari (MDD), a smanjio se sadržaj vlage (OMC).

Tablica 1. Parametri zbijanja za mješavinu SG – CKD - GF [6]

SG (%)	CKD (%)	GF (%)	OMC (%)	MDD (kN/m ³)
70	30	1	8. 18	21. 6
		3	9. 48	21. 1

Ispitivanje tlačne čvrstoće (q_u) vršilo se na kockama dimenzija 7x7x7 cm korištenjem univerzalnog hidrauličnog ispitnog stroja [6]. Rezultati (tablica 2) pokazuju da je maksimalna tlačna čvrstoća za SG – 30 % CKD bila na 56 dana. Dodavanje staklenih vlakana (GF) povećava se tlačna čvrstoća, a maksimalna vrijednost dostiže se nakon 90 dana.

Tablica 2. Tlačna čvrstoća (q_u) [6]

SG (%)	CKD (%)	GF (%)	q_u (kN/m ²)					$q_{u \max}$
			7 dana	14 dana	28 dana	56 dana	90 dana	
70	30	0	4073	4976	5858	9409	8774	15321
		1	4770	6373	9984	11280	15321	

Pored svih dobivenih vrijednosti za naš rad najvažniji su Young-ov modul elastičnosti, specifična težina [6].

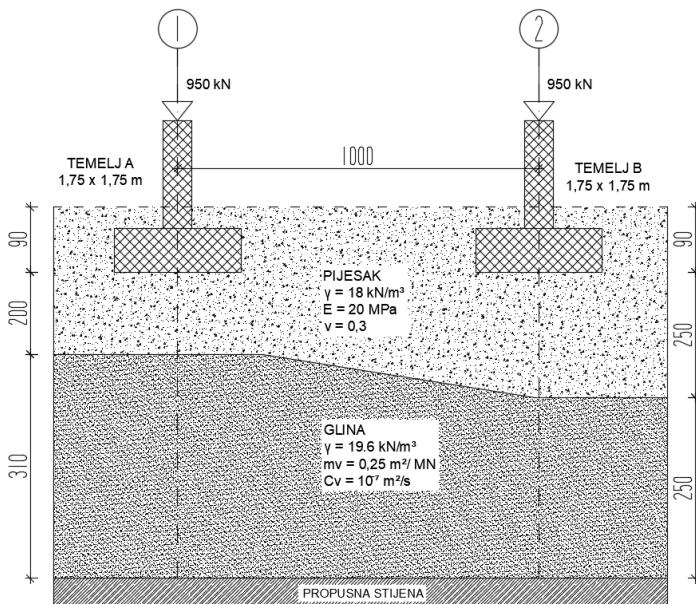
Tablica 3. Mehaničke karakteristike smjese [6]

SMJESA	SPEC. TEŽINA γ (kN/m ³)	TLAČNA ČVRSTOĆA q_u (kN/m ²)	YOUNG-ov MODUL E (kN/m ²)	KOHEZIJA $C=0,5*q_u$ (kN/m ²)
SG + 30% CKD	21.6	9409	$1,36 * 10^7$	4705
SG+30% CKD+1%GF	21.6	15321	$1,73 * 10^7$	7661

Za analizu problema slijeganja ojačanog tla uzet će se mehaničke karakteristike smjese pijesak i šljunak pomiješane s 30% cementnog praha i 1% staklenih vlakana.

4. Analitičko rješavanje problema

Promatrana su dva temelja samca (slika 3. temelj A i temelj B) koja se nalaze na udaljenosti od 10 m. Dubina temeljenja iznosi 0,90 m, temelji su kvadratni, dimenzija 1,75 x 1,75 m. Opterećeni su koncentriranom tlačnom silom u iznosu od 950 kN. Geomehaničke karakteristike gornjeg sloja pjeska, i donjeg sloja gline (tipična meka, srednje stišljiva glina [12] [13]) prikazane su na slici 3. Odredit će se trenutno slijeganje, konsolidacijsko slijeganje, konsolidacijsko slijeganje nakon 120 dana te dugoročno ukupno slijeganje temelja. Dakle, promatrat će se gornji sloj pjeska koji će se ojačati, a donji sloj gline ostaje nepromijenjen u oba slučaja. Kotirane dimenzije na slici 3. dane su u centimetrima.



Slika 3. Prikaz temelja – neojačano tlo

U nastavku će se prikazati proračun slijeganja za temelj A na neojačanom tlu, zatim će proračun za temelj B kao i proračuni na ojačanom tlu za temelj A i temelj B biti prikazani tablično.

Temelj A – trenutno slijeganje na pjeskovitom tlu odredit će se prema teoriji elastičnosti [14]:

$$S_i = q \cdot B \cdot \left[\frac{1 - v^2}{E} \right] \cdot I_f \quad (1)$$

gdje je [15]:

q – intenzitet opterećenja temelja

$$q = \frac{F}{A} = \frac{950}{1,75 \cdot 1,75} = 310,20 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

B – širina temelja, B = 1, 75 m

v – Poissonov koeficijent, v = 0, 30

E – Modul elastičnosti tla, E = 20 MPa = 20 000 kN/m²

I_f – faktor oblika temelja, B/L=1,0 → I_f = 1,12 [14]

Uvrštanjem u jednadžbu (1) dobit će se trenutno slijeganje S_i = 0, 0276 m = 27, 60 mm

Prosječno ukupno slijeganje (konsolidacijsko) krutog temelja zbog sloja gline dano je izrazom:

$$S_c = m_v \cdot H \cdot \Delta\sigma \quad (3)$$

gdje je:

m_v = koeficijent promjene volumena (za srednje stišljivu glinu → 0, 25 · 10⁻³ m²/kN)

H – debljina sloja tla, H = 3, 10 m

Δσ – povećanje vertikalnog naprezanja u sredini sloja gline

$$\Delta\sigma = \frac{F}{(B + 2 \cdot n \cdot z)^2} = \frac{950}{(1,75 + 2 \cdot 0,5 \cdot 3,55)^2} = 33,82 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

Prepostavljena raspodjela naprezanja 2:1 pa je n = ½ = 0,5

Udaljenost od dna temelja do središta sloja gline, z = 2 + (3,1/2) = 3, 55 m

Uvrštanjem u jednadžbu (3) dobit će se ukupno konsolidacijsko slijeganje S_c = 26, 21 mm

Konsolidacijsko slijeganje nakon 120 dana određuje se preko vremenskog faktora:

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{D^2} \quad (5)$$

gdje je:

C_v – koeficijent konsolidacije (za meke gline, tipično C_v = 10⁻⁷ m²/s)

D – put drenaže (za jednosmernu odvodnju dubina sloja, H=3, 10 m)

t – vrijeme u sekundama, t = 120 · 24 · 60 · 60 = 10 368 000 s

Uvrštanjem u jednadžbu (5) dobije se vremenski faktor T_v = 0, 1079

Preko vremenskog faktora određujemo stupanj konsolidacije U za koji vrijedi:

$$T_v = \frac{\pi}{4} \cdot U^2 \quad (6)$$

Za izračunati vremenski faktor preko (6) dobije se stupanj konsolidacije U = 37, 06 % za koji konsolidacijsko slijeganje nakon 120 dana iznosi:

$$S_{c,120} = 0,3706 \cdot 26,21 = 9,71 \text{ mm} \quad (7)$$

Ukupno slijeganje temelja A nakon 120 dana:

$$S_{tA,120} = S_i + S_{c,120} = 27,60 + 9,71 = 37,31 \text{ mm} \quad (8)$$

Ukupno slijeganje temelja A dugoročno nakon gradnje:

$$S_{tA} = S_i + S_c = 27,60 + 26,21 = 53,81 \text{ mm} > s_{max} = 50 \text{ mm} \quad (9)$$

Eurocode-om 7 [16] definirano je najveće prihvatljivo slijeganje s_{max} = 50 mm [17], koje se odnosi na obične konstrukcije temeljene na temeljima samcima ili trakama. Stoga, može se zaključiti da slijeganje ne zadovoljava granično stanje uporabljivosti i može se izvršiti

ojačanje tla pomoću cementa i stakla i provesti proračun. Prije toga u tablici 4. prikazat će se rezultati za temelj B u neojačanom tlu.

Tablica 4. Temelj B, prikaz rezultata proračuna

Temelj B (neojačano tlo)								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
27, 60 mm	310, 20 kN/m ²	19, 62 mm	31, 40 kN/m ²	0,166	45, 97 %	9, 02 mm	36, 68 mm	47, 28 mm

Oznake (1),(2)...(9) u tablici predstavljaju matematičke izraze po kojima je račun vršen. Ukupno slijeganje temelja B dugoročno nakon gradnje iznosi 47, 28 mm < s_{max} = 50 mm.

U nastavku je dan proračun temelja A i temelja B za ojačano tlo. Prvi sloj je ojačan, a čini ga mješavina pijesak i šljunak uz dodatak 30 % cementnog praha i 1 % staklenih vlakana, drugi sloj je glina i njezine geomehaničke karakteristike se nisu mijenjale (tipična meka, srednje stišljiva glina). Karakteristike prvog sloja (ojačanog) dobivene su eksperimentalno [6] i iznose E = 17 300 MPa, γ_{tla} = 21,6 kN/m³, v = 0, 29.

Tablica 5. Temelj A, prikaz rezultata proračuna

Temelj A (ojačano tlo)								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0, 032 mm	310, 20 kN/m ²	26, 21 mm	33, 82 kN/m ²	0,1079	37, 06 %	9, 71 mm	9, 742 mm	26, 24 mm

Tablica 6. Temelj B, prikaz rezultata proračuna

Temelj B (ojačano tlo)								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0, 032 mm	310, 20 kN/m ²	19, 62 mm	31, 40 kN/m ²	0,166	45, 97 %	9, 02 mm	9, 052 mm	19, 65 mm

U tablici 5. za temelj A i tablici 6. za temelj B vidi se izrazito malo slijeganje (1) u prvom (ojačanom) sloju i prisutno konsolidacijsko slijeganje (3) u glini. U konačnici stabilizacijom prvog sloja smanjili smo konačno dugoročno slijeganje koje je za temelj A dano u tablici 5. i iznosi 26, 24 mm (9), a što je manje od najvećeg prihvatljivog slijeganja s_{max} = 50 mm [18].

Za prikazane temelje u ojačanom tlu diferencijalno slijeganje za 120 dana iznosi:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{S_{tA,120} - S_{tB,120}}{L} = \frac{9,742 - 9,052}{10\ 000} = \frac{0,69\ mm}{10\ 000\ mm} = \frac{1}{14492,75} \quad (10)$$

Za prikazane temelje u ojačanom tlu dugoročno diferencijalno slijeganje iznosi:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{S_{tA} - S_{tB}}{L} = \frac{26,24 - 19,65}{10\ 000} = \frac{6,59\ mm}{10\ 000\ mm} = \frac{1}{1517,45} \quad (11)$$

5. Zaključak

Na osnovu svega može se reći da je ojačanje tla prirodnim ili sintetičkim vlaknima sve prisutnija pojava u svijetu. Mnoga ispitivanja dala su odgovor o optimalnom postotku udjela različitih vrsta vlakana u smjesama i geomehaničkim karakteristikama koje ta tla razvijaju [19] [20] [21] [22]. Razmatrani problem prekomjernog slijeganja riješen je ojačanjem tla pomoću cementnog praha i staklenih vlakana, što je rezultiralo povećanjem modula elastičnosti i direktno utjecalo na smanjenje trenutnog slijeganja u pjeskovitom tlu. Ukupno dugoročno slijeganje temelja A je 53, 81 mm za neojačano tlo, kada smo tlo ojačali ukupno dugoročno slijeganje smanjilo se na 26, 24 mm. Smanjenje slijeganja je 51, 23 %. Jasno je da važnu ulogu ima cementni prah sa svojim udjelom 30 % od težine mješavine pjeska i šljunka. Na kraju su izvršene provjere za dugoročno diferencijalno slijeganje ojačanog tla (11) gdje se može uočiti razlika slijeganja između dva temelja od 6, 59 mm kao i rotacija u smjeru suprotnom od kazaljke na satu.

Literatura

- [1] Chib, S., V., Pathak, R.: Evaluation of Stiffness Modulus of Soil Reinforced with Glass Fiber, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 8 Issue 09, 2019., 29 str.-34. str.
- [2] Roje-Bonacci, T.: Potporne građevine i građevne jame, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2005.
- [3] E. Jalal, F., Zahid, A., Iqbal, M., Nassem, A., Nabil, M.: Sustainable use of soda lime glass powder (SLGP) in expansive soil stabilization, Case Studies in Construction Materials 17, 2022., <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01559>
- [4] Pourabbas Bilondi, M., Mohsen Toufigh, M., Toufigh, V.: Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, Construction and Building Materials, 2018., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049>
- [5] Bilgen, G.: Utilization of Powdered Glass as an Additive in Clayey Soils, Geotech Geol Eng, 2020., <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>
- [6] Mohamed, Mowafy, Y., Rushdy, Towfeek, A., Kamal, Mohamed, A.: Effect of glass fiber on sand – Gravel soil mixture stabilized by cement dust, International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering, 2017.
- [7] J.A. Baldovino, J., L.S. Izzo, R., L. Rose, J., D.I. Domingos, M.: Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization, Construction and Building Materials 271, 2021., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121874>

- [8] Nategh, M., Ekinci, A., Iravanian, A., Fahrioglu, M.: Enhancing Clay Soil's Geotechnical Properties Utilizing Sintered Gypsum and Glass Powder, Applied Sciences, MDPI, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14124961>
- [9] Rose, Benny, J., Jolly K., J., Mareena, Sebastian, J., Thomas, M.: Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 6 Issue 05, 2017., 228. str.-231. str.
- [10] Arrieta, Baldovino, J., J., Santos, Izzo, R., Lundgren, Rose, J., Angelica, Avanci, M.: Geopolymers Based on Recycled Glass Powder for Soil Stabilization, Geotechnical and Geological Engineering, 2020., <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01274-w>
- [11] Kumar, Rai, A., Singh, G., Kumar, Tiwari, A.: Comparative study of soil stabilization with glass powder, plastic and e-waste: A review, Materials Today: Proceedings, 2020., <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.570>
- [12] Siyab, Khan, M., Tufail, M., Mateeullah: Effects of Waste Glass Powder on the Geotechnical Properties of Loose Subsoils, Civil Engineering Journal, Vol. 4, No. 9, 2018., <http://dx.doi.org/10.28991/cej-03091137>
- [13] Sokolić, I.: Primijenjena mehanika tla, Predavanja, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [14] Winterkorn, F., Fang, H.-Y.: Foundation Engineering Handbook, 2nd Ed. Wan Nostrand Reinhod, New York, 1991.
- [15] Roje-Bonacci, T.: Mehanika tla, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2017.
- [16] EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General Rules
- [17] Szavits-Nossan, A.: Temeljenje - Plitki temelji, Predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 10.-11., 2012.
- [18] Akmadžić, V., Lozančić, M., Primorac, M.: 'Hercule Poirot and supports settlement', e-Zbornik, elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, vol. 15 br. 29, 2025., str. 30-42., <https://doi.org/10.47960/2232-9080.2025.29.15.30>
- [19] AbdulZahra, Mahdi, Z., S, Al-Hassnawi, N.: Assessment of subgrade soil improvement by waste glass powder, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET), Volume 9, Issue 10., 2018.
- [20] Oluwobobi, J., Ogundolu, A., Michael, B., Aderinlewo, O.: Clay soil stabilisation using powdered glass, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 9, No. 5, 541 - 558 str., 2014.
- [21] A. Blayi, R., Far, H.Sherwani, A., Hashim, Ibrahim, H., H. Faraj, R., Daraei, A.: Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder, Case Studies in Construction Materials, 2020., <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427>
- [22] Mariakova, D., Vlach, T., Pavlu, T.: Glass waste powder utilization in high performance concrete, Acta Polytechnica CTU Proceedings 21:24–27, 2019., <https://doi.org/10.14311/APP.2019.21.0024>

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.12>

Razvoj numeričkog modela tramvajske kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT

*Development of a Numerical Model of the Slab Tram Track Structure
Zagreb 21-STT*

Franka Meštrović¹, Ivo Haladin¹

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, fmeistrovic@grad.hr, ihaladin@grad.hr

Sažetak

Razvoj prometne infrastrukture predstavlja ključni preduvjet za održivu mobilnost u urbanim sredinama, pri čemu željeznički sustavi zauzimaju sve važniju ulogu uslijed energetske učinkovitosti i kapaciteta. U tom kontekstu ističe se potreba za naprednim pristupima održavanju, među kojima se prediktivno održavanje ističe kao jedno od najperspektivnijih rješenja. Primjenom tehnologije digitalnog blizanca - virtualnog modela stvarnog sustava koji se kontinuirano ažurira operativnim podacima - moguće je unaprijed identificirati znakove degradacije, smanjiti broj iznenadnih kvarova i optimizirati troškove održavanja. Ključni preduvjet za razvoj takvog sustava je uspostava pouzdanog numeričkog modela. U tijeku je razvoj numeričkog modela kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT, koji će omogućiti analizu dinamičkog odziva konstrukcije i poslužiti kao osnova za daljnja istraživanja u smjeru integracije tehnologije digitalnog blizanca i implementacije prediktivnog održavanja.

Ključne riječi: tramvajski kolosijek, numerički model, kolosijeci na čvrstoj podlozi, digitalni blizanac, prediktivno održavanje

Abstract

The development of transport infrastructure is a key prerequisite for sustainable mobility in urban environments, with railway systems playing an increasingly important role due to their energy efficiency and capacity. In this context, the need for advanced maintenance approaches is highlighted, among which predictive maintenance stands out as one of the most promising solutions. By applying digital twin technology - a virtual model of a real system continuously updated with operational data - it is possible to identify signs of degradation in advance, reduce the number of unexpected failures, and optimize maintenance costs. A crucial prerequisite for the development of such a system is the establishment of a reliable numerical model. Currently, a numerical model of the Zagreb 21-STT slab track structure is being developed, which will enable the analysis of the dynamic response of the structure and serve as a basis for further research in the direction of integrating digital twin technology and implementing predictive maintenance.

Keywords: tram track, numerical model, slab track, digital twin, predictive maintenance

1. Uvod

Kontinuirani rast prometnog opterećenja u urbanim sredinama tijekom posljednjih nekoliko desetljeća rezultirao je produljenjem vremena putovanja, smanjenja dostupnosti parkirnih mjeseta te povećanjem nezadovoljstva građana. Kao jedno od mogućih rješenja za navedene izazove, potrebno je prioritizirati razvoj javnog gradskog prijevoza. Tramvajski sustav predstavlja ključnu komponentu javnog gradskog prijevoza u Gradu Zagrebu. Tijekom 2025. godine započela je realizacija projekta rekonstrukcije Sarajevske ulice, u sklopu kojeg je predviđeno prvo proširenje tramvajske mreže nakon 20 godina. Uz proširenje tramvajske mreže, paralelno se provodi obnova vozognog parka Zagrebačkog električnog tramvaja (ZET). U sklopu modernizacije, aktualna je isporuka najnovijih modela potpuno niskopodnih tramvaja TMK2400, koje proizvodi tvrtka Končar. Vozilo TMK2400 (Slika 1) u pogledu koncepta, rasporeda i razmaka između postolja te dimenzija sanduka potpuno odgovara tramvajskom vozilu TMK2300.

Tijekom radobrja od 2005. - 2010. godine, tvrtka Končar u suradnji sa ZET-om isporučila je 142 potpuno niskopodna tramvajska vozila [1]. Modernizacijom tadašnjeg vozognog parka, implementacija modela TMK2200 i TMK2300 uzrokovala je niz promjena na tramvajskoj infrastrukturi. Na razini djelovanja na kolosiječnu konstrukciju, glavne promjene uključivale su povećanje i promjenu distribucije osovinskog opterećenja na konstrukciju, te izmjenu tipa kotača tramvajskih vozila, što je uzrokovalo promjenu u geometriji kontaktne površine kotača i tračnice. Navedeno je rezultiralo učestalim oštećenjima sustava pričvršćenja, ubrzanim degradacijom kolosiječne geometrije i povećanjem istrošenosti tračnica, što je zahtijevalo revalorizaciju parametara kolosiječne konstrukcije [2].



Slika 1. Tramvajsko vozilo TMK2400

Obzirom na navedene izazove, kroz suradnju Fakulteta građevinarstva Sveučilišta u Zagrebu i ZET-a d.o.o. razvijeni su novi kolosiječni sustavi, koristeći iskustva stečena na prethodnim projektima unaprjeđenja vibro-akustičkih svojstava i trajnosti kolosijeka [2]. Između razvijanih sustava odabrana su 2 za daljnja ispitivanja: Zagreb 21-CTT i Zagreb 21-STT kolosiječni sustavi. Ključni izazovi pri projektiranju uključivali su smanjenje razina vibracija i dinamičkih opterećenja na kolosijek te smanjenje razina buke u urbanim područjima. Kako bi se osigurala funkcionalnost razvijenih inovativnih rješenja u uvjetima

eksploatacije, izvedena je ispitna dionica, na kojoj su provedena kontinuirana mjerena geometrije kolosijeka, naprezanja i deformacija te vibracija i akustičkih parametara. Uz navedeno, redovito se provodio vizualni pregled stanja ključnih elemenata kolosijeka kako bi se osigurala pravovremena detekcija oštećenja [3]. Rezultati mjerena pokazuju kako sustav Zagreb 21-STT zadovoljava i nalazi se unutar graničnih vrijednosti prema svim promatranim parametrima [4]. Nastavno na izazove uslijed obnove voznog parka, promjena uočenih na infrastrukturi te uspješnu ugradnju i povoljne rezultate monitoringa [3], predviđena je implementacija nove kolosiječne konstrukcije prilikom proširenja tramvajske mreže.

2. Prediktivno održavanje kolosijeka pomoću digitalnog blizanca

Digitalni blizanac predstavlja virtualni model fizičkog sustava koji se kontinuirano ažurira podacima iz stvarnog okruženja. U području željezničkih kolosijeka, digitalni blizanac integrira podatke prikupljene senzorima na konstrukciji i/ili vozilu sa virtualnim numeričkim modelom konstrukcije [5]. Implementacija ovakvog pristupa omogućuje kontinuirano praćenje stanja (elemenata) kolosijeka, pravovremenu identifikaciju potencijalnih oštećenja i znakova degradacije te definiranje optimalnog trenutka za pristup održavanju. Također, važna značajka digitalnog blizanca je mogućnost simulacije scenarija i istraživanja utjecaja parametara geometrije i materijala na ponašanje kolosijeka i predviđanje odziva konstrukcije pri različitim opterećenjima u eksploataciji. Primjena navedene tehnologije u željezničkoj infrastrukturi još je u fazi razvoja, ali brojni primjeri iz literature pokazuju njihov potencijal za unaprjeđenje učinkovitosti održavanja i sigurnosti prometa [5-7].

Implementacija tehnologije digitalnog blizanca u sustave praćenja infrastrukture otvara niz mogućnosti za prediktivno održavanje, koje se temelji na analizi podataka u stvarnom vremenu, korištenju umjetne inteligencije te naprednih analitičkih metoda, kao što su algoritmi strojnog i dubokog učenja [8]. Za razliku od reaktivnog i preventivnog, prediktivno održavanje omogućuje pravovremenu identifikaciju degradacije ili oštećenja, čime se smanjuje rizik od iznenadnih kvarova i optimizira raspored aktivnosti održavanja [9]. Iako su istraživanja primjene navedenih tehnologija za tramvajske kolosiječne sustave još uvijek u povojima, sve veći broj radova temelji se na spoznajama i metodološkim pristupima razvijenima kroz istraživanja na klasičnim željezničkim sustavima [10,11]. Istraživački projekt URITMIS, usmjeren na implementaciju sustava za prediktivno održavanje tramvajske infrastrukture, temelji se na analizi vibro-akustičkih signala prikupljenih senzorima postavljenim na okvir voznog postolja tramvaja koji sudjeluje u redovitom prometu. Navedeno je od posebne važnosti jer se podaci prikupljaju u realnim uvjetima eksploatacije, pri čemu se operativna mjerena kombiniraju s diskretnim mjernim kampanjama, čime se omogućuje sveobuhvatniji uvid u ponašanje kolosiječne konstrukcije. U trenutnoj fazi istraživanja, fokus je na eksperimentalnoj validaciji razvijenih metodologija. Karakterizacija dinamičkog ponašanja vozila provodi se analizom transfer funkcija kotača i okvira postolja, čime se omogućuje identifikacija i kvantifikacija geometrijskih nepravilnosti tračnica na temelju signala ubrzanja prikupljenih tijekom eksploatacije [5,6]. Razvoj algoritama za detekciju temelji se na primjeni naprednih metoda obrade signala i strojnog učenja, s posebnim naglaskom na automatsku evaluaciju kvalitete zavara i detekciju lokalnih oštećenja [7]. Obzirom na navedene aktivnosti, sljedeći korak uključuje razvoj numeričkog

modela tramvajske kolosiječne konstrukcije, kako bi se istražio i analizirao utjecaj pojedinih komponenata sustava i vanjskih djelovanja na dinamički odziv konstrukcije.

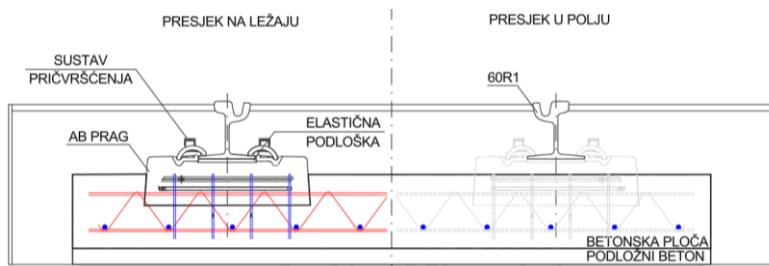
3. Tramvajski kolosijeci na čvrstoj podlozi

Tramvajski sustavi razlikuju se od klasične željeznice po nižim brzinama prometovanja, kraćim međustaničnim udaljenostima koje uvjetuju učestalija zaustavljanja, mogućnosti savladavanja krvina manjeg polumjera zbog povoljnije integracije u urbani prostor te dijeljenjem prometne površine sa cestovnim vozilima. Kolosijeci na čvrstoj podlozi, osobito primjenjeni u tramvajskim sustavima, ističu se kao vrijedno rješenje za modernizaciju gradskih prometnih sustava uslijed svojih tehničko-eksploatacijskih prednosti. Zamjenom klasične zastorne prizme betonskim ili asfaltnim podlogama povećana je stabilnost, točnost geometrije i otpornost na dinamička opterećenja, što smanjuje potrebu za učestalim aktivnostima održavanja. Manja visina i masa konstrukcije olakšavaju integraciju u urbana područja, dok upotreba modularnih elemenata dodatno ubrzava izgradnju i smanjuje troškove. Međutim, uslijed povećanja krutosti sustava, utjecaj buke i vibracija na okolinu i dalje predstavlja značajan izazov. Nadalje, izazovi proizlaze iz osjetljivosti konstrukcije na slijeganje tla, što može uzrokovati narušavanje geometrije kolosijeka i kao posljedicu imati potrebu za tehnički složenim i financijski zahtjevnim sanacijama [12].

4. Kolosiječna konstrukcija Zagreb 21-STT

Zagreb 21-STT (eng. *Slab Tram Track*) je inovativna tramvajska kolosiječna konstrukcija, koja omogućuje brzu i jednostavnu ugradnju pomoću predgotovljenih dvodijelnih armiranobetonskih pragova postavljenih na sloj podložnog betona. Pragovi su povezani armaturnim elementima, dok se između tračnice i praga koriste elastične podloške za prigušenje vibracija. Kolosijek se precizno pozicionira po visini i smjeru pomoću betonskih blokova i provizornih spojnica. Nakon dotjerivanja geometrije, izvodi se nosiva ploča od betona, ojačana vlaknima, uz strogo kontrolirane uvjete ugradnje i zaštite. Slika 2 prikazuje poprečni presjek kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT na ležaju i u polju.

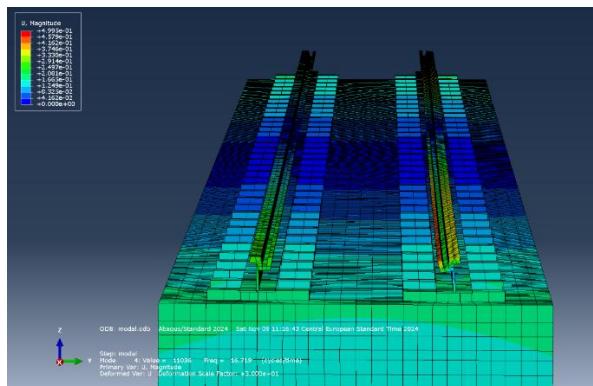
Sustav pričvršćenja Zagreb 21-STT sastoji se od elastične pritiskalice SKL14, kutne pločice Wfp 14K 12, tirfon vijka SS35, podloške ULS7 i tiple SDU 25 tirfon vijka te elastične podtračničke podloške. Za svaki element sustava, osim elastične podloške, koriste se po dvije komponente na svakom pričvrsnom mjestu.



Slika 2. Presjek sustava Zagreb 21-STT na ležaju i u polju

5. Razvoj modela tramvajskog kolosijeka na čvrstoj podlozi

Nastavno na razvoj kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT [2] te na postignutu razinu istraživanja u okviru projekta URITMIS [13], predviđen je daljnji razvoj numeričkog modela kolosijeka s ciljem analize utjecaja parametara i eksploracijskih opterećenja na dinamički odziv i ponašanje konstrukcije. Cilj istraživanja jest uspostava numeričkog modela koji će omogućiti kontinuirano praćenje stanja konstrukcije i razvoj prediktivnog sustava održavanja temeljenog na tehnologiji digitalnog blizanca. Prva faza ovog istraživanja obuhvaća izradu detaljnog numeričkog modela kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT, te se nastavlja na rad [14] u okviru kojeg su provedene numeričke analize modalnih oblika, te proračuni naprezanja i deformacija, primjenom metode konačnih elemenata. Rezultati su pokazali da su naprezanja i deformacije unutar dopuštenih granica, pri čemu elastična podračnička podloška značajno doprinosi smanjenju razina naprezanja [14].



Slika 3. Prikaz rezultata modalne analize kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT [14]

Sljedeća faza istraživanja obuhvaća pojednostavljenje sustava pričvršćenja modeliranjem pomoću sustava opruga (Slika 4), pri čemu se koeficijent elastičnosti opruga definira na temelju vrijednosti dobivenih u prethodnim istraživanjima [15]. Ova aproksimacija opravdana je visokom razinom složenosti koja bi uslijedila modeliranjem detaljne geometrije pojedinih elemenata pričvršćenja, duljinom trajanja numeričkih analiza te ciljanom razinom točnosti koja je dovoljna za planiranu parametrizaciju i karakteristike konstrukcije koje se ispituju.



Slika 4. Modeliranje sustava pričvršćenja

Brojna istraživanja u području tramvajske infrastrukture temelje se na kombinaciji terenskih mjerena i numeričkih modela, čime se omogućuje validacija i kalibracija modela za realne

uvjete. Nastavno, dan je sažet pregled relevantnih istraživanja iz ovog područja kako bi se postavio temelj za buduća terenska ispitivanja i daljnja istraživanja. U recentnoj literaturi uobičajen je pristup u kojem se eksperimentalna mjerena – na vozilu, u laboratoriju ili na realnom kolosijeku – koriste za dobivanje uvida u dinamičko ponašanje sustava, poput vibracija, slijeganja ili interakcije kotača i tračnica. Ti se podaci zatim analiziraju i uspoređuju s rezultatima numeričkog modeliranja kako bi se validirao model, analizirali odabrani parametri kolosijeka ili optimizirala rješenja za prigušenje vibracija. Takav pristup, koji se temelji na korelaciji između izmjerjenih i simuliranih podataka, omogućuje pouzdaniju procjenu stvarnog stanja kolosijeka i precizniju kalibraciju numeričkih modela, te se sve češće koristi u analizi tramvajskih i željezničkih sustava [16-19].

6. Zaključak

U cilju osiguranja održivosti i učinkovitosti tramvajske infrastrukture, te obzirom na porast prometnih opterećenja razvijani su novi sustavi tramvajskih kolosijeka na čvrstoj podlozi, među kojima se ističe sustav Zagreb 21-STT. Primjenom ovog sustava povećana je postojanost geometrije kolosijeka uz istovremeno smanjenje učestalosti održavanja. Temeljem dosadašnjih rezultata ispitivanja i monitoringa kolosijeka, ovaj sustav pokazuje zadovoljavajuće performanse u pogledu dinamičkog odziva i otpornosti na opterećenja, što ga čini pogodnim za daljnju implementaciju.

S ciljem dodatnog unapređenja održavanja infrastrukture, u tijeku je razvoj numeričkog modela kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT, koji će poslužiti kao temelj za implementaciju tehnologije digitalnog blizanca i razvoj strategije prediktivnog održavanja. Ipak, za daljnje unapređenje ovakvih rješenja nužno je usmjeriti istraživanja prema razvoju detaljnog numeričkog modela koji bi obuhvatilo sve relevantne parametre materijala, opterećenja i okoline, kao i njegovoj kalibraciji kroz detaljna terenska mjerena vibracija, deformacija, naprezanja i opterećenja.

Nadalje, potrebno je provesti parametarske analize kako bi se utvrdio utjecaj pojedinačnih varijabli na dugotrajnost i ponašanje konstrukcije, te kontinuirano prikupljati podatke korištenjem sustava senzora za praćenje ponašanja u eksploataciji. Razvoj algoritama za predviđanje oštećenja i optimizaciju aktivnosti održavanja infrastrukture temeljiti će se na primjeni umjetne inteligencije i strojnog učenja, a ostvariti će se kroz interdisciplinarnu suradnju stručnjaka iz područja građevinarstva, prometa i informatike.

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] „Potpisani novi ugovor sa ZET-om o kupoprodaji 20 tramvaja | Končar“. Pristupljeno: 06. svibanj 2025. [Na internetu]. Dostupno na: <https://koncar.hr/hr/vijesti/potpisan-novi-ugovor-sa-zet-om-o-kupoprodaji-20-tramvaja>

- [2] S. Lakušić, I. Haladin, i M. Ahac, „The effect of rail fastening system modifications on tram traffic noise and vibration“, *Shock and Vibration*, sv. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4671302.
- [3] S. Lakušić, I. Haladin, i J. Košćak, „Izvještaj o monitoringu sustava pričvršćenja tramvajskog kolosijeka „Zagreb 21-CTT“ i „Zagreb 21-STT“ na Savskoj cesti u Zagrebu“, 2015.
- [4] I. Haladin, S. Lakušić, J. Košćak, i M. Bartolac, „Monitoring of Dynamic Properties of New Type of Tram Track Fastening Systems Under Traffic Load“, u *4th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2016*, Šibenik: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagreb, svi. 2016, str. 791–799.
- [5] B. Yan i ostali, „Digital twin in transportation infrastructure management: a systematic review“, 2023., *Oxford University Press*. doi: 10.1093/iti/liad024.
- [6] E. Krmac i B. Djordjević, „Digital Twins for Railway Sector: Current State and Future Directions“, *IEEE Access*, sv. 12, str. 108597–108615, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3439471.
- [7] L. Rocha i G. Gonçalves, „Digital Twins as Enablers of Predictive Maintenance in Rail Transport Services“, *International Journal on Advances in Software*, sv. 17, izd. 3 & 4, str. 153–164, 2024, [Na internetu]. Dostupno na: www.aria.org
- [8] J. Sresakoolchai i S. Kaewunruen, „Railway infrastructure maintenance efficiency improvement using deep reinforcement learning integrated with digital twin based on track geometry and component defects“, *Sci Rep*, sv. 13, izd. 1, pros. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29526-8.
- [9] G. Bianchi, C. Fanelli, F. Freddi, F. Giuliani, i A. La Placa, „Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance“, 01. siječanj 2025., *SAGE Publications Inc.* doi: 10.1177/16878132241285631.
- [10] Á. Vinkó i P. Bocz, „Experimental investigation on condition monitoring opportunities of tramway tracks“, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, sv. 62, izd. 1, str. 180–190, 2018, doi: 10.3311/PPci.10541.
- [11] Y. T. Mulyadi, M. Rifqi, R. Putra, Y. Yunazwin Nazaruddin, i M. I. Mandasari, „Digital Twin Model Development for Autonomous Tram Localization“, 2022.
- [12] S. Lakušić i M. Vajdić, „Kolosijeci na čvrstoj podlozi“, u *Dani prometnica 2008, Tehnički, ekonomski i ekološki aspekti*, 2008, str. 259–309.
- [13] I. Haladin, K. Burnać, M. Baniček, K. Vranešić, i N. Trifunović, „The possibility of using machine learning for network-wide predictive maintenance on urban railway tracks - URITMIS project overview“, u *8th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, svi. 2024. doi: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2024.1510>.
- [14] T. Tunjić, „Numerički proračun tramvajske kolosiječne konstrukcije na čvrstoj podlozi“, Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2024.
- [15] M. Baniček, „Utjecaj promjene geometrije pritiskalica za pričvršćenje tračnica na mehaničko ponašanje sustava pričvršćenja“, Doktorska disertacija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2022.
- [16] K. Burnać i I. Haladin, „Experimental analysis of wheel and bogie frame transfer functions for on-board measurements of rail roughness“, *INTER-NOISE and NOISE-*

- CON Congress and Conference Proceedings*, sv. 270, izd. 5, str. 6968–6976, lis. 2024, doi: 10.3397/IN_2024_3894.
- [17] A. Ramos i ostali, „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*, sv. 277, ožu. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122245.
- [18] J. S. Theyssen i ostali, „Calibration and validation of the dynamic response of two slab track models using data from a full-scale test rig“, *Eng Struct*, sv. 234, svi. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.111980.
- [19] C. Kraśkiewicz, M. Urbaniak, i A. Piotrowski, „Experimental Study on the Elastic Support in a Discrete Rail Fastening System Used in Ballastless Tram Track Structures“, *Materials*, sv. 18, izd. 1, sij. 2025, doi: 10.3390/ma18010141.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.13>

Kalibracija parametara transporta sedimenta u numeričkom modelu XBeach-G na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče

Calibration of sediment transport parameters in the XBeach-G numerical model on the artificial gravel beach Ploče

Hanna Miličević¹, Dalibor Carević¹, Damjan Bujak¹

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, hanna.milicevic@grad.unizg.hr,
dalibor.carevic@grad.unizg.hr, damjan.bujak@grad.unizg.hr

Sažetak

Umjetne šljunčane plaže na hrvatskoj obali Jadrana koriste se za rekreaciju i zaštitu, ali su podložne stalnim morfološkim promjenama uslijed djelovanja valova i olujnih udara. Numeričko modeliranje ovih procesa zahtijeva preciznu kalibraciju parametara transporta sedimenta. Ova studija fokusira se na kalibraciju koeficijenta inercije (c_i), kuta sisanja (ϕ) i koeficijenta transporta (γ) u numeričkom modelu XBeach-Gravel kako bi se poboljšala njegova točnost u uvjetima karakterističnim za Jadransko more. Kalibracija modela se temelji na terenskim mjeranjima pomoći fotogrametrije i bespilotnih letjelica, koji omogućuju visoko rezolucijsko praćenje morfodinamičkih promjena. Podešavanjem navedenih parametara, XBeach-G model, izvorno razvijen za visokoenergetske valove, prilagođen je za bolju simulaciju procesa formiranja berme i izdizanja grebena, karakterističnih za šljunčane plaže na Jadranu. Rezultati istraživanja povećavaju pouzdanost modela u predviđanju dinamike transporta sedimenta i služe za poboljšanje strategije održavanja umjetnih šljunčanih plaža u Hrvatskoj.

Ključne riječi: XBeach-Gravel, formiranje berme, umjetne plaže, šljunčane plaže

Abstract

Artificial gravel beaches along the Croatian Adriatic coast are used for recreation and coastal protection but are subject to continuous morphological changes due to wave action and storm impacts. Numerical modeling of these processes requires precise calibration of sediment transport parameters. This study focuses on calibrating the inertia coefficient (c_i), the angle of repose (ϕ), and the transport coefficient (γ) in the XBeach-Gravel numerical model to improve its accuracy under conditions characteristic of the Adriatic Sea. The calibration is based on field measurements using photogrammetry and unmanned aerial vehicles, enabling high-resolution monitoring of morphodynamic changes. By adjusting these parameters, the XBeach-G model, originally developed for high-energy waves, is

adapted to better simulate berm formation and crest elevation processes characteristic of gravel beaches in the Adriatic. The research results enhance the model's reliability in predicting sediment transport dynamics and contribute to improving maintenance strategies for artificial gravel beaches in Croatia.

Keywords: XBeach-Gravel, berm formation, artificial beaches, gravel beaches

1. Uvod

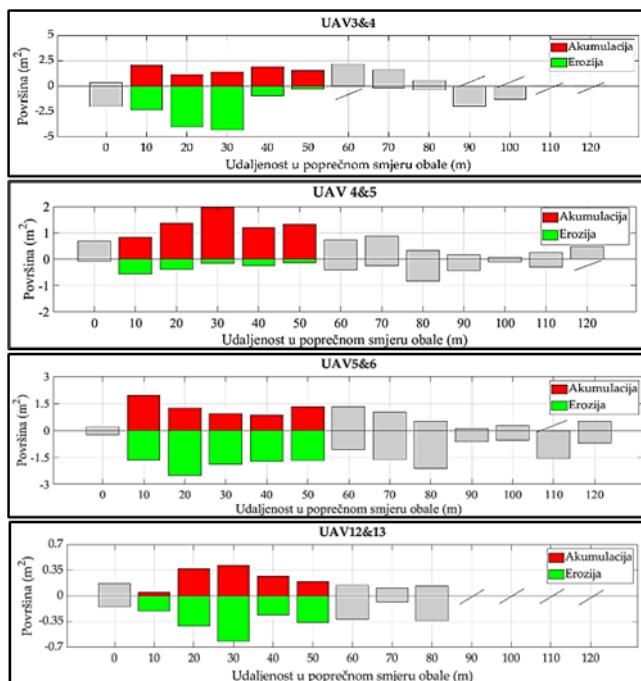
Plaže s krupnim sedimentom, poput šljunka i oblutaka, od velike su važnosti za zaštitu obale od erozijskih procesa i djelovanja olujnih valova. Hrvatska obala je bogata šljunčanim plažama koje mogu biti prirodnog podrijetla ili umjetno oblikovane u svrhu proširenja kapaciteta za turističke potrebe i zaštitu obale. Zbog intenzivnih hidrodinamičkih procesa, umjetne plaže često zahtjevaju kontinuirano održavanje. Praćenje morfodinamičkih promjena šljunčanih plaža ključno je za njihovo dugoročno održavanje i planiranje. Napredne metode poput fotogrametrije primjenom bespilotnih letjelica [1] omogućuje detaljno praćenje promjena plaža. Uz terenska mjerena, numerički modeli poput XBeach modela, sve se više koriste za simulaciju morfodinamike plaža u poprečnom smjeru, pomažući u predviđanju odgovora obale na različite hidrodinamičke uvjete. Iako je razvoj numeričkih modela znatno unaprijedio razumijevanje dinamike pješčanih plaža, istraživanja koja se bave šljunčanim plažama još su uvijek rijetka. Xbeach-G model, prilagođena verzija XBeach modela, razvijen je upravo kako bi bolje simulirao procese vezane uz šljunak [2], a za njegovu preciznost od važnosti su parametri poput koeficijenta inercije (c_i), koeficijenta transporta (γ) i kut sisanja (ϕ). Njihova pravilna kalibracija ključna je za dobivanje točnih rezultata. Dosadašnje studije pokazale su da XBeach-G pouzdano simulira prinos sedimenta u poprečnom smjeru, tj. procese erozije i akumulacije, tijekom olujnih događaja značajne valne visine više od 5 m ($H_s > 5m$)[3], dok su uvjeti karakteristični za Jadransko more tj. valovi s značajnim valnim visinama do maksimalno 3 m i kratkim valnim periodima slabo istraženi. Formacija berme, i izdizanje grebena su najčešći tip odaziva plaže na olujni događaj u Hrvatskoj, upravo zbog malih visina i perioda koji se razvijaju pri olujnim događajima. Cilj ove studije je dodatno poboljšati predikcijsku sposobnost XBeach-G modela za uvjete koji prevladavaju na Jadranu. Analizirati će se utjecaj različitih rubnih uvjeta, poput značajne valne visine, valnog perioda i plime, uz istovremenu optimizaciju prethodno navedenih parametara modela (c_i , γ i ϕ) za realističniji prikaz formiranja bermi i izdizanja grebena.

2. Materijali i metode

2.1. Postavke numeričkog modela XBeach-Gravel

Morfodinamičke promjene na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče u Rijeci, praćene su kroz 19 geodetskih mjerena provedenih između 17.siječnja 2020. i 26.02.2021., a metodologija i rezultati detaljno su opisani u radu [1]. Za simulaciju jednodimenzionalnog modela odabrana su četiri olujna događaja s fiksnim valnim parametrima UAV3&4 ($H_{smax}=1.5$ m, $T_p=4.6$ s, plima=0.32 m), UAV4&5 ($H_{smax}=1.6$ m, $T_p=4.6$ s, plima=0.57 m), UAV5&6 ($H_{smax}=2.1$ m, $T_p=5$ s, plima=0.57 m) i UAV12&13 ($H_{smax}=0.64$ m, $T_p=3.52$ s, plima=0.49 m). S obzirom da se radi o jednodimenzionalnom modelu razvijenom za modeliranje pronašta sedimenta

poprečno obali, odabrani su profili s najmanjim utjecajem dužobalnog transporta (UAV3&4, UAV4&5, UAV5&6 profil 10 i UAV12&13 profil 20), Slika1. Za kalibraciju numeričkog modela Xbeach Gravel varirane su vrijednosti koeficijenta transporta (γ) od 0,5, 1 i 3, koeficijenta inercije (c_i) 0,5,1 i 2, te kuta sisanja (ϕ) 35° , 45° i 55° . Kalibracija je provedena s ciljem postizanja Brierove ocjene modela što bliže vrijednosti 1 (engl. Brier Skill Score, BSS), što označava savršenu podudarnost modeliranih i terenskih izmjerjenih promjena profila plaže. Parametri poput hidrauličke vodljivosti (k_x), srednje veličine zrna (D_{50}) i trajanja simulacije korišteni su prema preporukama i uputama izračuna prethodnih studija [2], [4].



Slika 1. Dijagrami erozije i akumulacije na zapadnoj obali plaže Ploče za odabранe olujne događaje UAV3&4, UAV4&5, UAV5&6 i UAV12&13. Sivi stupci prikazuju profile pod lokalnim utjecajem hidrotehničkih pera i betonskog zida šetnice

3. Rezultati

Ukupno je provedeno 108 simulacija za četiri olujna događaja na zapadnoj obali umjetne šljunčane plaže Ploče u Rijeci. Vrijednosti BSS-a za različite kombinacije koeficijenta inercije, koeficijenta transporta i kuta sisanja prikazane su u tablicama 1, 2 i 3. Najviša prosječna BSS vrijednost od 0,89 postignuta je s parametrima ($\phi = 35^\circ$, $\gamma = 0,5$, $c_i = 0,5$), pri čemu su svi analizirani olujni događaji prema Van Rijnovom kriteriju [2] kategorizirani kao „izvrsni“. Povećanjem koeficijenta transporta na $\gamma = 1$ i $\gamma = 3$, performanse modela su se pogoršale, što je rezultiralo padom prosječnih BSS vrijednosti na 0,87 i 0,38.

Slično, kombinacija ($\phi = 45^\circ$, $\gamma = 0.5$, $ci=0.5$) također je pokazala „izvrsne“ rezultate s BSS vrijednošću od 0.81, dok je povećanje koeficijenta transporta ($\gamma = 1$ i $\gamma = 3$) dovelo do daljnog smanjenja performansi u odnosu na $\phi = 35^\circ$, pri čemu su prosječne BSS vrijednosti pale na 0.67 i -0.46. Najveći pad bilježi se kod $\phi = 55^\circ$ za sve vrijednosti koeficijenta transporta ($\gamma = 0.5$, $\gamma = 1$, $\gamma = 3$), gdje su prosječne BSS vrijednosti iznosile 0.50, -0.05 i -2.23. Dodatno, povećanjem koeficijenta inercije na $ci=1$ i $ci=2$ također je uočen pad prosječnih BSS vrijednosti. Najviša prosječna BSS vrijednost od 0.89 potvrđuje da kombinacija $\phi = 35^\circ$, $\gamma = 0.5$ i $ci=0.5$ omogućuje najprecizniji prikaz promjena profila na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče.

Tablica 1. Vrijednosti Brierove ocjene uspješnosti (Brier skill score) za kalibraciju 7 olujnih događaja za različite vrijednosti kuta sisanja (ϕ), koeficijenta transporta (γ) i koeficijenta inercije (ci) od 0.5

BSS	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 3$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 3$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 3$
UAV3&4	0.86	0.89	0.87	0.91	0.93	0.95	0.81	0.95	0.94
UAV4&5	0.84	0.83	0.51	0.66	0.42	-0.77	-0.06	-1.34	-4.68
UAV5&6	0.92	0.83	-0.83	0.80	0.58	-2.32	0.60	-0.02	-4.60
UAV12&13	0.93	0.96	0.95	0.85	0.73	0.32	0.63	0.20	-0.58
Prosjek	0.89	0.87	0.38	0.81	0.67	-0.46	0.50	-0.05	-2.23

Tablica 2. Vrijednosti Brierove ocjene uspješnosti (Brier skill score) za kalibraciju 7 olujnih događaja za različite vrijednosti kuta sisanja (ϕ), koeficijenta transporta (γ) i koeficijenta inercije (ci) od 1

BSS	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 3$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 3$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 3$
UAV3&4	0.95	0.95	0.89	0.96	0.93	0.81	0.93	0.86	0.62
UAV4&5	0.60	0.51	0.16	-0.13	-0.45	-1.49	-1.26	-1.96	-4.75
UAV5&6	0.38	-0.08	-1.48	-0.20	-0.95	-2.93	-0.72	-2.03	-5.13
UAV12&13	0.91	0.85	0.82	0.74	0.48	0.28	0.36	-0.08	-0.58
Prosjek	0.71	0.56	0.10	0.34	0.00	-0.83	-0.17	-0.80	-2.46

Tablica 3. Vrijednosti Brierove ocjene uspješnosti (Brier skill score) za kalibraciju 7 olujnih događaja za različite vrijednosti kuta sisanja (\emptyset), koeficijenta transporta (γ) i koeficijenta inercije (c_i) od 2

BSS	$\emptyset 35^\circ$, $\gamma 0.5$	$\emptyset 35^\circ$, $\gamma 1$	$\emptyset 35^\circ$, $\gamma 3$	$\emptyset 45^\circ$, $\gamma 0.5$	$\emptyset 45^\circ$, $\gamma 1$	$\emptyset 45^\circ$, $\gamma 3$	$\emptyset 55^\circ$, $\gamma 0.5$	$\emptyset 55^\circ$, $\gamma 1$	$\emptyset 55^\circ$, $\gamma 3$
UAV3&4	0.95	0.94	0.90	0.90	0.91	0.85	0.79	0.83	0.73
UAV4&5	-0.25	-0.28	-0.47	0.66	-1.11	-1.90	-2.05	-2.77	-4.14
UAV5&6	-0.52	-1.01	-1.56	-1.42	-2.02	-3.10	-2.05	-2.90	-4.56
UAV12&13	0.78	0.78	0.88	0.34	0.34	0.34	-0.08	-0.15	-0.35
Proslek	0.24	0.11	-0.06	0.12	-0.47	-0.95	-0.85	-1.25	-2.08

4. Zaključak

Ova studija potvrđuje pouzdanost numeričkog modela XBeach-Gravel u simulaciji morfodinamičkog odgovora umjetnih šljunčanih plaža izloženih umjerenim do slabim valovima, karakterističnim za istočni Jadran. Kalibracija modela provedena je na zapadnoj obali plaže Ploče, pri čemu su analizirana četiri olujna događaja sa značajnim valnim visinama (H_s) između 0.64 m i 2.2 m te vršnim valnim periodima (T_p) u rasponu od 3.5 s do 5.9 s. Najbolja podudarnost između modeliranih i izmjerениh morfoloških promjena postignuta je za kombinaciju parametara koeficijenta inercije (c_i) 0.5, koeficijenta transporta (γ) 0.5 i kuta sisanja (\emptyset) 35° , pri čemu je prosječna vrijednost Brier Skill Score (BSS) iznosila 0.89, što se prema Van Rijnovoj klasifikaciji ocjenjuje kao „izvrsno“. Ovi rezultati potvrđuju sposobnost modela da realistično predvidi ključne procese transporta sedimenta i transformacije profila plaže. Daljnja istraživanja planiraju proširiti analizirani skup olujnih događaja i provesti dodatnu validaciju na istočnoj obali plaže kako bi se povećala robusnost dobivenih zaključaka.

Literatura

- [1] A. Tadić, I. Ružić, N. Krvavica, and S. Ilić, "Post-nourishment changes of an artificial gravel pocket beach using UAV imagery," *J. Mar. Sci. Eng*, vol. 2021, 2021, doi: 10.3390/jmse10030358.
- [2] T. Bogovac, D. Carević, D. Bujak, and H. Miličević, "Application of the XBeach-Gravel Model for the Case of East Adriatic Sea-Wave Conditions," *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/jmse11030680.
- [3] R. T. McCall, G. Masselink, T. G. Poate, J. A. Roelvink, and L. P. Almeida, "Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G," *Coastal Engineering*, vol. 103, pp. 52–66, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.06.002.
- [4] K. A. Powell, 1990. "Predicting short term profile response for shingle beaches," Report SR219. HR Wallingford.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.14>

Višekriterijska procjena podložnosti poplavama metodom AHP u Primorsko-goranskoj županiji

Multicriteria flood susceptibility assessment using the AHP method in Primorje-Gorski Kotar County

Ivana Petković¹, Nevenka Ožanić¹, Nino Krvavica¹

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmila Matejčić 3, 51000 Rijeka,
i.petkovic@uniri.hr, nozanic@uniri.hr, nino.krvavica@uniri.hr

Sažetak

U ovom radu predstavljeni su rezultati procjene podloženosti poplavama na području sedam naselja Primorsko-goranske županije. Analiza je provedena primjenom višekriterijske GIS analize i analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP), uz standardizaciju prostornih (nagib terena, udaljenost od drenažne mreže, tlo, korištenje zemljišta, nadmorska visina terena, gustoća drenažne mreže) i meteoroloških parametara (ekstremne oborine). Rezultati ukazuju na to da su područja visoke podložnosti smještena u priobalnim i visoko urbaniziranim naseljima, osobito onima s nepropusnim pokrovom zemljišta i visokom gustoćom kanalske mreže, kao i područjima koja su izložena jakim oborinama. Predloženi pristup omogućuje identifikaciju zona visoke podložnosti i pruža podlogu za prostorno planiranje i upravljanje rizicima, a primjenjiv je i za analize utjecaja klimatskih promjena.

Ključne riječi: *poplavna podložnost, višekriterijska analiza, AHP, GIS, Primorsko-goranska županija*

Abstract

This paper presents results of a flood susceptibility assessment in seven settlements of the Primorje-Gorski Kotar County. The analysis was conducted using multicriteria GIS analysis and the Analytic Hierarchy Process (AHP), with standardization of spatial (slope, distance from channels, soil type, land use, elevation, drainage density) and meteorological parameters (extreme precipitation). The results indicate that areas of high flood susceptibility are located in coastal and highly urbanized settlements, particularly those with impervious land cover, a dense drainage network, and exposure to intense rainfall. The proposed approach enables the identification of high-susceptibility zones and provides a basis for spatial planning and risk management, and it is also applicable for analyzing the impacts of climate change.

Keywords: *flood susceptibility, multicriteria analysis, AHP, GIS, Primorje-Gorski Kotar County*

1. Uvod

Poplave su jedan od najznačajnijih prirodnih rizika u urbaniziranim i obalnim područjima, a njihova učestalost i intenzitet rastu pod utjecajem klimatskih promjena. Procjena podložnosti poplavama iziskuje integraciju prostornih i meteoroloških čimbenika, a regionalna razina istraživanja se najčešće provodi pomoću suvremenih GIS i višekriterijskih metoda [1].

Ovaj rad ima za cilj istražiti potencijal i mogućnosti primjene višekriterijskih analiza, primjenom analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP) i GIS alata, za prostornu procjenu podložnosti poplavama na području sedam naselja u širem slivu Rječine u Primorsko-goranskoj županiji. Ključni geomorfološki, pedološki i meteorološki parametri klasificirani su odvojeno te integrirani u izradu konačne karte podložnosti. Predloženi pristup omogućuje prepoznavanje kritičnih područja i služi kao temelj za učinkovito upravljanje rizicima od poplava.

2. Materijali i metode

2.1. Područje istraživanja

Istraživano područje obuhvaća sedam naselja unutar Primorsko-goranske županije na širem području sliva Rječine (Čavle, Jelenje, Kastav, Klana, Kostrena, Rijeka i Viškovo). Područje se proteže uz obalu Rječinskog zaljeva, omeđeno grebenom Učke na zapadu te rubnim planinama Gorskog kotara na sjeveru i sjeveroistoku. Ovakav spoj brdskog reljefa, uskog obalnog pojasa i visoke urbanizacije grada Rijeke povećava ranjivost područja na ekstremne hidrološke događaje. Također, gusta i razgranata hidrološka mreža s brojnim manjim vodotocima koji imaju izražene sezonske varijacije dodatno pridonosi složenosti procjene poplavnog rizika u istraživanom području.

2.2. Kriteriji procjene podložnosti

Sve prostorne podloge korištene u ovom istraživanju standardizirane su u raster format s prostornom rezolucijom od 10 m te analizirani u računalnom programu QGIS. Za određivanje klasifikacijskih granica korištena je metoda prirodnih prekida (Jenksova metoda), dok je za prostornu interpolaciju primijenjena Kriging metoda, pri čemu je korišten programski jezik Python.

Nagib terena izravno utječe na dinamiku površinskog otjecanja te određuje količinu vode koja će se infiltrirati ili zadržati na površini. Područja blažeg nagiba karakterizira veći potencijal akumulacije oborinske vode i posljedično veća podložnost poplavama, dok se na strmijim površinama ubrzava površinsko otjecanje, što lokalno smanjuje rizik od zadržavanja vode i nastanka poplava. Raster nagiba terena generiran je iz digitalnog modela reljefa (DMR) u QGIS-u, a vrijednosti su prema [1] razvrstane u pet klasa (tablica 1).

Temeljna prepostavka je da se rizik od poplava smanjuje s udaljenošću od vodotoka. Zone bliže vodotocima i drenažnoj mreži podložnije su poplavama zbog izravne izloženosti prelijevanju korita i kanala tijekom ekstremnih hidroloških događaja. U ovoj studiji udaljenost od kanala drenažne mreže modelirana je u QGIS-u definiranjem koncentričnih pojaseva čije su granice određene udaljenostima iz tablice 1.

Hidrološke grupe tla svrstane su prema metodologiji [2] u četiri glavne kategorije (A, B, C, D) ovisno o infiltracijskom kapacitetu i potencijalu površinskog otjecanja odražavaju sposobnost tla za zadržavanje vode. Podaci o pripadnosti tla hidrološkim grupama preuzeti su iz baze ORNL DAAC [2] te su klasifikacijske vrijednosti prikazane u tablici 1.

Dreniranost tla određuje infiltracijski kapacitet i intenzitet površinskog otjecanja. Na temelju pedološke karte Republike Hrvatske te relevantnih izvora [3, 4], tipovima tla dodijeljene su ocjene dreniranja, objedinjene u pet razreda (tablica 1). Viši razredi označavaju slabiju infiltraciju i veću sklonost otjecanju. Urbana područja, zbog nepropusnosti, svrstana su u najviši razred te predstavljaju najrizičnije zone za lokalne poplave.

Način korištenja i pokrov zemljišta izravno utječe na infiltraciju, evapotranspiraciju i dinamiku površinskog otjecanja. U ovom istraživanju korištena je baza Corine Land Cover 2000 [5], čiji su elementi svrstani u pet klase: stambena područja, prometnice, vodene površine, vegetacijska područja i pašnjaci (tablica 1).

Digitalni model reljefa (DMR) predstavlja prostornu podlogu za analizu nadmorskih visina te identifikaciju reljefnih depresija sklonih akumulaciji oborinske vode. U ovoj studiji korišten je DMR dobiven obradom LiDAR podataka [6]. Visinske vrijednosti klasificirane su metodom prirodnih prekida u pet razreda (tablica 1), pri čemu su niže visine terena povezani s većom opasnosti od poplava zbog potencijalno veće uzvodne površine sliva.

Gustoća drenažne mreže kvantificira razgranatost hidrografske mreže i utjecaj na površinsko otjecanje. U ovom radu, izračunata je kao omjer ukupne duljine vodotoka, dobivenih iz DMR-a i površine analiziranog područja. Vrijednosti su klasificirane metodom prirodnih prekida u pet klase, čime se omogućuje prostorna analiza gustoće kanala i njihove uloge u distribuciji otjecanja (tablica 1).

Za procjenu ekstremnih oborina korišten je podataka o 90. percentilu dnevnih količina oborina iz CERRA-Land regionalne reanalize za razdoblje 1984.-2024. [7]. Podaci su prostorno interpolirani Kriging metodom te su klasificirani u pet razreda (tablica 1). Viši razredi označavaju područja s izraženijim intenzitetom ekstremnih oborina, što upućuje na povećanu opasnost od poplava.

2.3. Višekriterijska analiza i određivanje težinskih koeficijenata

Za utvrđivanje težinskih koeficijenata prethodno navedenih podloga primijenjen je analitički hijerarhijski proces (AHP), kojim se složeni problem podložnosti poplavama razlaže na međusobno povezane kriterije i organizira ih unutar hijerarhijske strukture. Relativna važnost pojedinih kriterija određuje se izradom matrice usporednih parova. Za usporedbu kriterija dodjeljuju se vrijednosti u rasponu od 1 do 9, koji kvantificiraju koliko je jedan kriterij značajniji u odnosu na drugi kriterij. Takvim sustavnim vrednovanjem metoda generira hijerarhijski poredak kriterija, koji precizno odražava njihov doprinos konačnom rezultatu. Konzistentnost matrice parnih usporedbi provjerena je izračunom omjera konzistentnosti (CR). Ukoliko je vrijednost CR manja od 10%, matrica se smatra usklađenom. Nakon postizanja prihvatljive razine konzistentnosti, dobiveni težinski koeficijenti mogu se koristiti kao pouzdani ulazni parametri u daljnjoj višekriterijskoj analizi prostornih slojeva [1].

Na temelju dobivenih težinskih koeficijenata, izrađena je karta podložnosti poplavama koja integrira prostorne kriterije kao što su nagib, udaljenost od drenažne mreže, hidrografske i pedološke karakteristike, korištenje zemljišta, nadmorska visina i gustoća drenažne mreže.

Meteorološki podaci, odnosno sloj 90. percentila ekstremnih oborina, analizirani su odvojeno od prostornih podloga. Takav pristup omogućio je precizno vrednovanje prostornih obilježja promatranog područja kao i specifičnog doprinosa ekstremnih oborina na podložnost poplavama, s obzirom na njihovu vremensku i dinamičku varijabilnost.

U završnoj fazi analize, rezultati dobiveni višekriterijskom analizom prostornih podloga povezani su s meteorološkim slojem oborina korištenjem dodatnih težinskih koeficijenata, čime je omogućena integracija svih relevantnih kriterija u izradu konačne karte podložnosti poplavama. Dobivene vrijednosti su potom podijeljene u pet razreda podložnosti, koristeći standardizirane vrijednosti od 1 do 5, gdje viši razredi odražavaju viši stupanj podložnosti poplavama. Na taj način, dobivena je detaljna prostorna procjena distribucije poplavne podložnosti na području istraživanja.

3. Rezultati

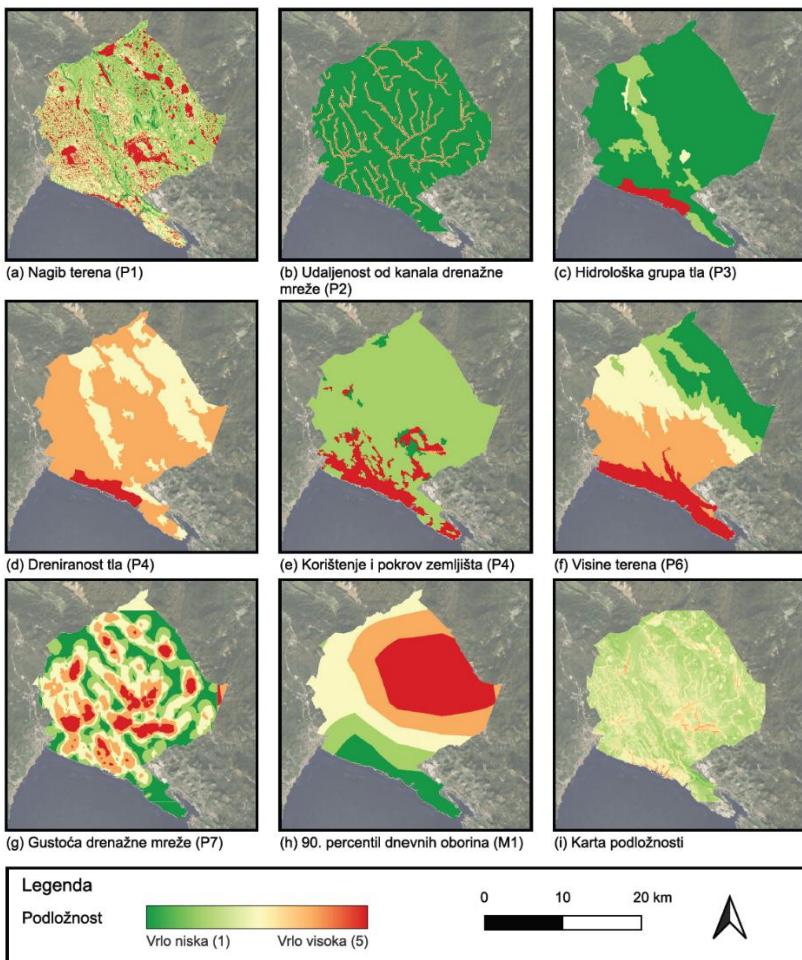
Za potrebe analize svi kriteriji – nagib terena (P1), udaljenost od kanala drenažne mreže (P2), hidrološka grupa tla (P3), dreniranost tla (P4), korištenje i pokrov zemljišta (P5), nadmorska visina terena (P6), gustoća drenažne mreže (P7) i 90. percentil dnevnih oborina (M1) – standardizirani su na kategoričke vrijednosti od 1 (vrlo niska podložnost) do 5 (vrlo visoka podložnost). Granice pojedinih klasifikacijskih razreda prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Granice klasifikacijskih razreda kriterija podložnosti poplavama

Kriterij	Vrlo niska (1)	Niska (2)	Umjerena (3)	Visoka (4)	Vrlo visoka (5)
P1	> 32°	12 – 32°	5 – 12°	2 – 5°	< 2°
P2	> 100 m	75 – 100 m	50 – 75 m	25 – 50 m	< 25 m
P3	A	B	C	D	Urbani prostori
P4	< 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5
P5	Pašnjaci	Vegetacijsko područje	Vodene površine	Prometnice	Stambeno područje
P6	> 1081 m	793 – 1081 m	497 – 793 m	243 – 497 m	< 243 m
P7	< 0.29 km/km ²	0.29 – 0.65 km/km ²	0.65 - 1.03 km/km ²	1.03 – 1.49 km/km ²	> 1.49 km/km ²
M1	< 23 mm	23 – 26 mm	26 – 29 mm	29 – 32 mm	> 32 mm

Prostorne podloge integrirane su primjenom AHP metode, pri čemu je dobiveni omjer konzistentnosti iznosio 7 %, što potvrđuje prihvatljivu razinu dosljednosti u procjeni (tablica 2).

U završnoj fazi, karta podložnosti (dobiven na temelju prostornih obilježja P1 – P7) povezala se s meteorološkom podlogom oborina (M1), s udjelom prostorne komponente od 85 % i meteorološke od 15 %. Ovakav omjer daje prednost prostorno stabilnim čimbenicima, dok ekstremne oborine imaju dodatni utjecaj s obzirom na svoju varijabilnost. Konačna karta podložnosti podijeljena je u pet klasa, omogućujući identifikaciju područja visoke podložnosti



Slika 1. Karte korištenih podloga klasificirane prema podložnosti (a – h) te konačna karta podložnosti (i).

Tablica 2. Težinski koeficijenti prema AHP-u.

Kriterij	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Težina %
P1	1	2	3	3	3	4	3	29.75
P2	1/2	1	2	2	3	4	3	21.24
P3	1/3	1/3	1	1	2	4	3	14.08
P4	1/3	1/3	1	1	2	4	3	14.08
P5	1/3	1/3	1/2	1/2	1	4	3	10.38
P6	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1	3	5.62
P7	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	4.84

poplavama. Slika 1 prikazuje prostornu distribuciju vrijednosti svih analiziranih podloga prema klasama podložnosti, kao i konačnu kartu podložnosti dobivenu višekriterijskom analizom.

4. Zaključak

U ovome radu provedena je procjena podložnosti poplavama na odabranom području u Primorsko-goranskoj županiji, koristeći višekriterijsku analizu u GIS okruženju primjenom analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP). Standardizacija i klasifikacija prostornih i meteoroloških podloga omogućila je izradu detaljne karte podložnosti rezolucije 10 m, koja identificira zone visoke podložnosti na promatranom području. Rezultati ukazuju na to da su područja visoke podložnosti smještena u priobalnim i visoko urbaniziranim naseljima, osobito onima s nepropusnim pokrovom zemljišta i visokom gustoćom kanalske mreže, kao i područjima koja su izložena jakim oborinama. U budućem radu istražit će se mogućnost uključivanja dodatnih prostornih podloga generiranih u okviru hidrološke analize sliva u GIS okruženju te javno dostupnih prostornih podloga iz Copernicus programa, kao što je gustoća nepropusnih površina i prostorna raspodjela vegetacije. Pored toga, uz karte podložnosti izradit će se i karte opasnosti generiranjem oborinskih podloga u kojim je intenzitet oborine povezan s vjerojatnosti pojave te karata rizika kombiniranjem opasnosti od poplava s potencijalnim štetama na izloženoj infrastrukturi i objektima.

Literatura

- [1] Vujović, F. i dr.: A Comparison of the AHP and BWM Models for the Flash Flood Susceptibility Assessment: A Case Study of the Ibar River Basin in Montenegro, Water, vol. 17, 2025, 844, <https://doi.org/10.3390/w17060844>
- [2] Ross, C.W. i dr.: Global Hydrologic Soil Groups (HYSGOs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling, ORNL DAAC, USA, 2018, <https://doi.org/10.3334/ORNLDaac/1566>
- [3] Pedologija – Interaktivna pedološka karta RH na podlozi Google Earth, https://pedologija.com.hr/Zem_resursi.html, pristupljeno: 13.05.2025.
- [4] Ruralni razvoj – Studija određivanja područja pod utjecajem prirodnih i specifičnih ograničenja u poljoprivredi s kalkulacijama, <https://ruralnirazvoj.hr/>, pristupljeno: 13.05.2025.
- [5] CORINE Land Cover 2000 (raster 100 m), Europe, 6-yearly – version 2020_20u1, May 2020, <https://land.copernicus.eu/>, pristupljeno: 07.05.2025.
- [6] Državna geodetska uprava – Digitalni model reljefa (DMR) dobiven obradom LiDAR podataka, <https://dgu.gov.hr/>, pristupljeno: 14.01.2025.
- [7] Copernicus Climate Data Store – CERRA-Land sub-daily regional reanalysis data for Europe from 1984 to present, <https://cds.climate.copernicus.eu/>, pristupljeno: 24.02.2025.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.15>

Vrednovanje urbanističko-arhitektonskih obilježja povijesnih perivojnih paviljona

Evaluation of urban-architectural features of historic park pavilions

Mina Plančić¹

(1) *Arhitektonski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Doktorski studij Arhitektura i urbanizam*
mplancic@arhitekt.hr

Sažetak

Hrvatski povijesni paviljoni izgrađeni su u razdoblju od sredine 19. sredine 20. st. u arboretumima, javnim gradskim i lječilišnim perivojima, kao mesta za odmor i okupljanja. U postojećem stanju paviljoni su obnovljeni, zapušteni ili uklonjeni. Cilj istraživanja je odrediti i vrednovati urbanističko-arhitektonска obilježja, i utvrditi tipove paviljona i principe uspostavljanja međuodnosa paviljona i prostornog konteksta kao poticaj za njihovu obnovu, zaštitu i unapređenje. Cilj ovog rada je prezentirati kako će se istraživanje provesti temeljem pregleda obilježja hrvatskih primjera paviljona dobivenim pregledom literature, kataloškom obradom, usporedbenim prostornim analizama, anketama i intervjuima. Doprinos istraživanja je uspostava sistematizacije povijesnih paviljona u Hrvatskoj te višekriterijsko vrednovanje obilježja s ciljem vrednovanja, zaštite i unaprjeđenja postojećeg stanja i načina korištenja.

Ključne riječi: *povijesni paviljoni, parkovna arhitektura, glazbeni paviljon, sjenica, vidikovac*

Abstract

Croatian historical park pavilions were built between the mid-19th and mid-20th centuries in arboreta, public parks, and gardens as places for rest and gatherings. In their current condition, pavilions are either restored, neglected, or removed. The research aims to evaluate urban and architectural features and identify pavilion types and the principles of achieving a relationship between the pavilion and its spatial context, as an incentive for their restoration, protection, and improvement. The investigation of the characteristics of Croatian examples of historical park pavilions will be conducted through a literature review, catalogue, comparative spatial analyses, questionnaires, and interviews. The research contribution will establish an overview and systematization of historical pavilions in Croatia, and a multi-criteria evaluation of their features to assess, protect, and enhance their current condition and usage.

Keywords: *historical pavilions. park architecture, bandstand, gazebo, belvedere*

1. Uvod

Otvoreni i poloutvoreni povijesni javni perivojni paviljoni izgrađeni su u Hrvatskoj u periodu od polovice 19. do polovice 20. st. Povodi njihovog nastanka na području Hrvatske vezani su poglavito uz kulturu nastanka javnih gradskih perivoja i parkova tijekom 18. st. u kojima su paviljoni rijetki primjeri arhitekture, ali i uz pojedine događaje i projekte poput Jubilarne šumarsko-gospodarske izložbe u Zagrebu 1891. g. U postojećem stanju su uklonjeni, obnovljeni, ili zapušteni. Cilj doktorskog istraživanja je uspostaviti sustavan pregled, te utvrditi urbanističko-arkitektonска obilježja povijesnih paviljona u javnim gradskim perivojima u Hrvatskoj, poglavito njihove suvremene uloge, načine korištenja i sadržaje koje nude u javnom gradskom životu, a u kontekstu poticanja unaprjeđenja njihove zaštite i obnove, te ponovnog korištenja sukladno suvremenim potrebama. Cilj ovoga rada je prezentirati metode i alate kojima će se navedeno doktorsko istraživanje provesti, a usmjereni je na pregled dosadašnjih istraživanja s utvrđivanjem teorijskih polazišta.

2. Znanstveni problem, polazišta i pregled dosadašnjih istraživanja

Povijesni perivojni paviljoni Hrvatske nisu sustavno istraživani s arhitektonskog, urbanističkog, niti pejsažnog motrišta. Jedan od ciljeva doktorskog istraživanja je usporedbom primjera odrediti obilježja i čimbenike kojima se može utvrditi potencijal paviljona u suvremenom kontekstu. Cilj je također istražiti potencijal njihovih suvremenih društvenih doprinosa (uloge u gradu i inovativni načini korištenja) kao i prostorno-perivojna obilježja paviljona (odnos paviljona i šireg perivojnog konteksta).

Dva polazišta za istraživanje su: 1. utvrđen značajan broj povijesnih paviljona u Hrvatskoj i njihov raznoliki tretman (uz značajan broj nestalih i uklonjenih), te činjenica da su neki primjeri zaštićena kulturna dobra; 2. brojna publicirana građa o perivojima i parkovima, koja je osnova za metodologiju istraživanja paviljona u javnim gradskim perivojima.

Parkovi i perivojni paviljoni kontinuirano su prisutni u svijetu i Hrvatskoj kao mjesta za odmor, sklanjanje i okupljanja, a uvidom u literaturu i terenskim istraživanjem uočen je i društveni doprinos paviljona pripadajućem perivoju i parku [1,2,3,4,5]. Nakon česte izgradnje paviljona u 19. te do sredine 20.st., od sredine 20. st. popularnost izgradnje u svijetu slabi [5], a pojam „paviljon“ razvija se i veže za izložbene građevine sajmova. Nakon 2000. g. aktualizira se arhitektonska i društvena uloga i povijesnih i suvremenih realizacija paviljona, i to realizacijom novih na ranijem mjestu povijesnih ili obnovom povijesnih primjera. Uočeni novi sadržaji i oblikovanja perivojnih paviljona te obnova i analize potencijalne obnove paviljona nakon 2000. g. [2,3], potvrđuju potrebu sustavnog i usporedbenog sagledavanja teme povijesnih perivojnih paviljona u suvremenom društveno-prostornom kontekstu. Svjetski i hrvatski primjeri, koji potvrđuju problematiku, su: glazbeni paviljon u Brightonu, UK (obalni kontekst plaže, izgrađen 1887., adaptiran 1970.-ih, restauriran 2009.), glazbeni paviljon u Sarajevu, BiH (gradski perivoj, izgrađen 1913., uklonjen 1950., rekonstruiran 2010.), glazbeni paviljon u Karlovcu (gradsko šetalište, izgrađen u 19. st., rekonstruiran 1917.) i Sakuntala paviljon u Osijeku (gradski perivoj, rekonstruiran 2018.). Preliminarnim pregledom literature [6-15] i djelomično provedenim terenskim istraživanjem utvrđeno je do sada 47 povijesnih paviljona u Hrvatskoj, izgrađenih u arboretumima, gradskim i lječilišnim perivojima, od kojih je 25 opstalo.

Osnovni podaci o postojanju povijesnih parkovnih paviljona u Hrvatskoj pronađeni su u publikacijama o povijesnom razvoju javnih gradskih perivoja i parkova od 18. do 20. st. [6-14]. Dio podataka o njima nalaze se u rijetkoj građi o pojedinim projektima obnove paviljona [12] i publikaciji o šumarsko-gospodarskoj izložbi [15]. Suvremene arhitektonske i prostorne uloge parkovnih paviljona obrađuju publikacije o suvremenim projektima parkovnih paviljona [2,4], što uz poimanje o brojnosti suvremenih, ali i zanemarivanju potencijala korištenja povijesnih paviljona, može potaknuti analizu mogućnosti suvremenih realizacija paviljona na mjestima uklonjenih povijesnih primjera, revitalizacijom mjesta i aktivnosti sukladno suvremenim potrebama javnog prostora. Dosadašnja istraživanja tematski se mogu podijeliti na nekoliko grupa izvora istraživanja: o razvoju povijesnih gradskih parkova kao prostornom kontekstu paviljona; o participativnosti u planiranju javnih prostora; o suvremenim paviljonskim strukturama na otvorenom prostoru; o pojedinačnim inozemnim i hrvatskim povijesnim paviljonima; te o očuvanju i zaštiti graditeljske i parkovne baštine. U prvoj vrsti literature [6] daje se pregled povijesnog nastanka vrtova i perivoja Hrvatske, te podaci o paviljonima kao elementima parkovne arhitekture, a važan je i doprinos dosadašnjih istraživanja hrvatske parkovne baštine, gradskih perivoja te njihove zaštite i značaja u europskom kontekstu [7, 8, 9], kao i istraživanja pojedinačnih primjera promenada i perivojnih trgova 19.st. [10, 11], botaničkog vrta [12] i Šumarske gospodarske izložbe iz 1891.g. [15], te istraživanja o zagrebačkim perivojima Tuškanac i Maksimir [13,14]. Navedena povijesna istraživanja postavljaju perivoje u kontekst prostora i vremena navodeći podatke o postojanju paviljonskih građevina, ali bez njihove detaljne analize i usporedbe. Drugom vrstom istraživanja analiziraju se različite urbanističke i arhitektonske intervencije te paviljoni kao elementi perivojne arhitekture, uz pregled raznolikosti sadržaja i načina korištenja paviljona, materijalizacije, položaja i konstrukcija s osvrtom na primjenu suvremenih računalnih modela dizajna i produkcije paviljonskih struktura [2]. Treća grupa suvremenih istraživanja usmjerena je na ulogu sudjelovanja javnosti u procesima planiranja javnih prostora [16] kao i na suvremene funkcije perivojnih paviljona kao inovativnih platformi za propitivanje suvremenih oblikovanja, upotrebe materijala i inovativnih višenamjenskih načina korištenja. Analizom potencijala pojedinih perivojnih elemenata [1] paviljoni se kategoriziraju u grupu pratećih elemenata te su, prema primarnom korištenju, vizualni, pasivni i nepromjenjivi elementi, a prema funkciji mogu, uz rekreacijski potencijal (provođenje slobodnog vremena), biti nositelj i drugih funkcija i doprinosa. Četvrta grupa izvora i istraživanja temelji se na načelima očuvanja i zaštite graditeljske baštine [17-22], obzirom da su pojedini primjeri paviljona zaštićena kulturna dobra ili imaju posebnu arhitektonsku ili urbanističku vrijednost, a poseban doprinos izvora podataka u hrvatskom kontekstu čine dostupne baze zaštićenih kulturnih dobara poput online Registra kulturnih dobara Republike Hrvatske pri Ministarstvu kulture [30]. Podatke o postojanju i vremenu evidentiranja paviljona u izvorima daju ilustrirane povijesne karte [Slika 1., Slika 3.] kao i povijesne turističke razglednice [Slika 2.].

3. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Temeljem istraživačkog problema (nedostatka istraživanja o povijesnim perivojnim paviljonom u Hrvatskoj), određeni su ciljevi doktorskog istraživanja:

- Odrediti, usporediti i vrednovati urbanističko-arhitektonska obilježja povijesnih paviljona gradskih perivoja u Hrvatskoj.
- Utvrditi prostorno-funkcionalni međuodnos između paviljona i parkovnog konteksta.
- Uspostaviti kriterije za urbanističko-arhitektonsko vrednovanje povijesnih paviljona odnosno stanja i korištenja u suvremenom kontekstu. (Tipologija)

Hipoteze istraživanja temeljem postavljenih ciljeva su:

- Usporedbom primjera paviljona moguće je utvrditi čimbenike identiteta i tipološki razvrstaj.
- Klasifikacijom međuodnosa paviljona i šireg perivojnog konteksta moguće je utvrditi utjecaj na stanje i način korištenja paviljona.
- Sintezom rezultata moguće je uspostaviti kriterije za vrednovanje stanja i korištenja paviljona u suvremenom kontekstu.



Slika 1. Opatija, Katastarska karta 1897. [izvor: Vahtar-Jurković, K.: Opatija- urbanistički razvoj i perivojno naslijeđe, Rijeka: Glosa, 2004. (izvornik u Državnom arhivu Rijeka)]



Slika 2. Crikvenica, Kupališni perivoj s glazbenim paviljom 1911.g. [izvor: [8] NSK Zagreb; Razglednica, Grafička Zbirka]



Slika 3. Maksimir, isječak plana iz albuma Park Jurjaves, 1853. [izvor: [8]]

4. Materijali i metodologija

MATERIJALI I ISPITANICI: Istraživati će se **znanstvenu i stručnu literaturu**, analizirati **urbanistički planovi i kartografska građa**, te u kombinaciji s **terenskim i arhivskim istraživanjima**, usmjeriti se na izradu kataloga paviljona. Za kataloško istraživanje pojedinih primjera koristit će se dostupna **arhivska građa** (arhiv, gradski muzeji, konzervatorski odjeli), te podaci dobiveni iščitavanjem ortofoto snimki. Terenskim istraživanjima izraditi će se **fotodokumentacija** paviljona i neposrednog okruženja odabranih primjera, a **anketom korisnika i intervjuiima stručnjaka** prikupiti podaci o suvremenim načinima korištenja paviljona u prostoru perivoja.

METODOLOGIJA: **Kataloški pregled** dat će uvid u osnovne podatke (vrijeme nastanka, smještaj, autori, vlasništvo, stanje zaštite) i urbanističko-arkitektonska obilježja (proporcije, materijali, konstrukcija, stanje; položaj u perivoju, fizička i vizualna dostupnost, namjena, i dr.) uz grafičke priloge. **Usporednom analizom primjera** pojedinih paviljona prema dvije grupe kriterija (arkitektonska i prostorna obilježja), utvrdit će se **tipološki razvrstaj** paviljonskih građevina te provesti njihova **klasifikacija** u odnosu na prostorna obilježja (principi odnosa prema širem perivojnog kontekstu) grafičko analitičkom interpretacijom (vlastite skice, tablice, dijagrami i sl.). Utvrđene kategorije pokazati će zakonitosti u uspostavi međuodnosa paviljon-perivoj te njihov posljedičan utjecaj na stanje i suvremenim način korištenja. **Anketom i polustrukturiranim intervjuom** ispitati će se procjene korisnika perivoja o načinu korištenja paviljona, njihovoј percepciji te aspiracijama u kontekstu suvremenog korištenja. **Strukturiranim intervjuima** utvrdit će se stavovi stručnjaka o mogućnostima unaprjeđenja stanja, statusa zaštite i afirmacije uloge paviljona u suvremenom društvenom kontekstu.

5. Diskusija o očekivanim rezultatima i doprinosu istraživanja

Kao rezultat doktorskog istraživanja očekuje se uspostava sustavnog pregleda i kategorizacije povijesnih paviljona u Hrvatskoj u razdoblju od sredine 19. do sredine 20. st. Planira se preliminarno utvrđeni popis paviljona (ukupno 47 izgrađenih i 25 još postojećih primjera) u Hrvatskoj provjeriti i dopuniti, te utvrditi kriterije za odabir onih primjera na kojima će se provesti detaljnije analize i ostala istraživanja za utvrđivanje kriterija za njihovo vrednovanje i unaprjeđenje. Očekivani doprinosi doktorskog istraživanja su: utvrđivanje kriterija za urbanističko-arhitektonsko vrednovanje obilježja povijesnih perivojnih paviljona u suvremenom kontekstu, te unaprjeđenje metode planiranja i zaštite paviljona, a u funkciji unaprjeđenja postojećeg stanja i načina njihova korištenja.

6. Zaključak

Arhitektonska i prostorna obilježja povijesnih perivojnih paviljona utječu na njihovo suvremeno stanje i načine korištenja. U Hrvatskoj je utvrđena izgradnja 47 primjera koji su u različitom stanju izgrađenosti, te postoji potreba za sustavnim istraživanjem njihovog stanja, načina korištenja, mogućnosti reafirmacije u javnom prostoru, istraživanja sadržaja koje u suvremenom kontekstu javnog prostora mogu nuditi, kao i arhitektonskoj vrijednosti i potrebi njihove zaštite. Kataloški pregled hrvatskih primjera, uz analize prostornih i arhitektonskih obilježja, aspiracija korisnika, te stavova stručnjaka o njihovoj reafirmaciji u suvremenom javnom prostoru mogu poslužiti kao baza za nova istraživanja, ali i za smjernice pri planiranju suvremenih perivojnih građevina javnog prostora.

Literatura

- [1] Pereković, P., Kamenečki, M.: Parkovni elementi kao nositelji rekreativskog potencijala, Prostor, 25(2), 2017., (342-357)
- [2] Angelova, D.: Contemporary Pavilions as Part of the Common Urban Areas, Conference Proceedings of the Second International Conference "Education, Science, Innovations" ESI'2012, Bulgaria, Pernik, (73-81), 2012., <https://doi.org/10.13140/2.1.2635.7446>
- [3] Geng M., Franić T.S., Prpić L.: Paviljon i tri moguća mjesta: Redefiniranje i reafirmacija paviljona 28 Zagrebačkog velesajma, arhitekta Miroslava Begovića, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2020., (CROBI ID 23175)
- [4] Jung, H.; Park, S.: Pavilion as an architecture of new placeness: a case of Serpentine Pavilion project, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 22:1, 2022., (84-95), <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.2024197>
- [5] Rabbitts, P.: Bandstands, Pavilions for music, entertainment and leisure, Historic England, London, 2018., ISBN: 9781848023727
- [6] Kiš, D.: Hrvatski perivoji i vrtovi, Algoritam, Zagreb, 1998.
- [7] Obad Šćitaroci, M.: Hrvatska parkovna baština, zaštita i obnova, Školska knjiga Zagreb, 1992.
- [8] Bojanić Obad Šćitaroci, B., Obad Šćitaroci, M.: Gradske perivoje Hrvatske, Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet Zagreb, 2004.

- [9] Šćitaroci, B., Šćitaroci, M.: Varaždinski perivoji 19. stoljeća u hrvatskom i europskom kontekstu, Radovi Zavoda za znanstveni rad HAZU, Varaždin, Br.24, 2013., (293 – 316),
- [10] Knežević, S.: Zrinjevac 1873-1993., Naklada Prelog, Zagreb. 1993.
- [11] Matijašević, E., Cindrić, I.: Strossmayerovo šetalište u Petrinji-Perivoj na glavnom gradskom trgu, Prostor, 30, 2005., (143-158)
- [12] Perušić, M.: Povijesna arhitektura u Botaničkom vrtu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, Portal-godišnjak restauratorskog zavoda, 9/2018, 2018., <http://doi.org/10.17018/portal.2018.7>
- [13] Gašparović, S., Mrđa, A.: Tuškanac, Hrvatska revija (1330-2493) 10, 4; (78-83), 2010.,
- [14] Ivanković, V.: Objekti perivoja Maksimir, Javna ustanova Maksimir, Zagreb., 2009.
- [15] Gostl, I.: Najsajnija zagrebačka predstava, ABC Naklada, Zagreb, 1996.
- [16] Vukić, J., Careva, K., Lisac, R.: Participacija građana u planiranju i uređivanju javnog prostora - bottom up pristup na primjeru grada Zagreba, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [17] Marasović, T.: Zaštita graditeljskog nasljeđa, Društvo konzervatora Hrvatske - Zagreb, Sveučilište u Splitu - Filozofski fakultet u Zadru, OOUR Split, Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, Postdiplomski studij graditeljskog nasljeđa u Splitu, 1983.
- [18] Sanković-Simčić, V.: Revitalizacija graditeljske baštine, Naša riječ, Sarajevo, 2000.
- [19] *** Venecijanska povelja, Međunarodna povelja o konzervaciji i restauraciji spomenika i spomeničkih cjelina ***, Venecija, 1964., <https://www.icomos.org/en/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/157-the-venice-charter>
- [20] *** Zakon o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara NN 145/24.
- [21] Marić, M.: Zaštita i obnova povijesnih vrtova u Hrvatskoj, Matica Hrvatska, Hrvatska revija 4., Zagreb, 2022.
- [22] ***[], Registrar kulturnih dobara Republike Hrvatske, (<https://register.kulturnadobra.hr/#/>) pristup 10.05.2025.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.16>

Procjena ponašanja tipske Krupno-panelne zgrade iz 1960-ih pod potresnim opterećenjem

Analysis of a typical 1960s Large panel building seismic resistance

Romano Jevtić Rundek¹, Mario Uroš¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, romano.jevtic.rundek@grad.unizg.hr,
mario.uros@grad.unizg.hr

Sažetak

Izgradnja standardiziranih krupno-panelnih zgrada se intenzivirala 1960-ih na području Zagreba. Veliki broj je izgrađen prije prvog ozbiljnijeg seizmičkog propisa (1964). Moderna saznanja pokazuju da su netipični i potencijalno opasni mehanizmi otkazivanja mogući u navedenim krupno-panelnim zgradama. U ovom radu, neke metode za analizu ovakvih građevina su prikazane, uz korištenje programskih paketa ETABS i Abaqus. Detaljni model konstrukcijskih detalja u Abaqusu je korišten za proračun krivulja kapaciteta. Navedene krivulje kapaciteta se onda koriste za kalibraciju jednostavnijeg modela sa plastičnim ponašanjem koncentriranim u čvorovima u ETABS-u. Proces kalibracije je završen usporedbom ponašanja sastavljenih zidova u oba programska paketa radi potvrde točnosti interakcije između krivulja kapaciteta u pojednostavljenom modelu. Rezultat je pojednostavljen numerički model koji može rekreirati relevantne mehanizme loma dovoljno točno.

Ključne riječi: seizmička analiza, krupno panelne zgrade, mehanizam loma, kalibracija numeričkog modela

Abstract

Construction of standardised large panel buildings intensified during the 1960s in the city of Zagreb. Many were built before the first serious seismic code was introduced (1964). Modern understanding shows that non typical and potentially dangerous failure modes are possible in these large panel buildings. In this article, some methods for analysis are presented, using software ETABS and Abaqus. A detailed model of structural details is used to extract their capacity curves in Abaqus. These curves are then used to calibrate a simpler lumped plasticity model in ETABS. And the calibration process is completed by comparative analysis between wall assemblies to confirm appropriate interaction between structural elements. As a result, a numerical model is provided capable of estimating complex failure mechanisms associated with large panel buildings to a reasonable degree.

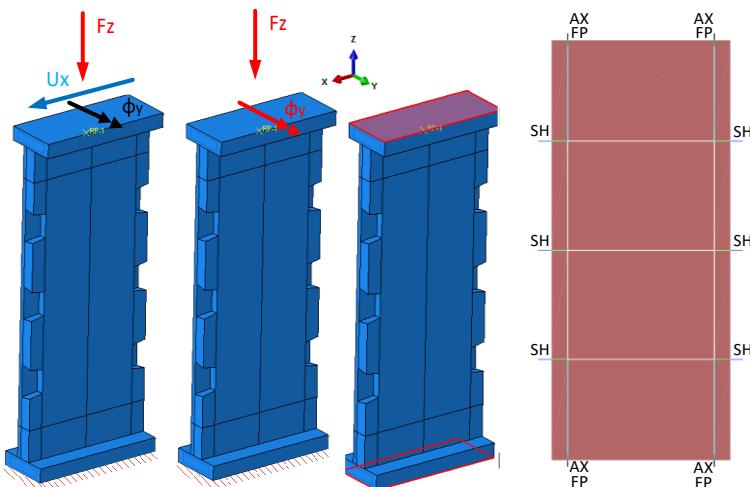
Keywords: seismic analysis, Large panel buildings, Failure mechanism, Numerical model calibration

1. Uvod

Izgradnja standardiziranih krupno-panelnih zgrada se intenzivirala 1960-ih na području Zagreba i Balkana. Prvi ozbiljniji seizmički propis u regiji stupa na snagu 1964-e, nakon izgradnje velikog broja krupno-panelnih zgrada. Krupno panelni sustavi izgrađeni u Zagrebu prije 1964-e imaju karakteristično malu količinu armature, glatku armaturu, manji udio uzdužnih zidova te detalje sklone nestandardnim mehanizmima otkazivanja. Istraživanja seizmičke otpornosti ovakvih građevina su se intenzivirala 1980-ih, sa izvještajem od National Technical Information Service – NTIS (1) gdje su u jedan izvještaj objedinjeni eksperimentalni podaci, inženjerske preporuke i metode za proračun te preporuke za numeričke modele. Od istraživanja na području Balkana izdvaja se magistarski rad profesorice Zamolo (2). Krupno-panelne zgrade su pretežno građene kao polumontažne armirano betonske zgrade, sastavljene od predgotovljenih krupnih armirano betonskih panela. Tipične krupno-panelnih zgrada uključuju slabe i neduktilne veze između elemenata, malu količinu armature, korištenje glatke armature itd. Relevantni mehanizmi otkazivanja se razlikuju između pojedinih građevina, no općenito uključuju otkazivanje smicanjem po horizontalnoj ili vertikalnoj sljubnici krupnog panela, odizanje horizontalne sljubnice panela te drobljenje panela na horizontalnoj sljubnici. Kod proračuna ovakve konstrukcije potrebno je uzeti u obzir nelinearno ponašanje veza elemenata, kako bi se otkrio mjerodavni mehanizam sloma krupno-panelne zgrade. U provedenim istraživanjima, zbog u to vrijeme ograničene snage računala, analize su ograničene na manje modele te 2D analize. U moderno vrijeme postoje napredniji računalni programi kao Abaqus (3) i ETABS (4). U literaturi se mogu naći demonstracije simulacije kinematičkog i plastičnog ponašanja nosivih elemenata i njihove interakcije u Abaqusu (5,6). Također možemo naći primjere nelinearnih modela građevina uz primjenu koncentrirane plastičnosti, korištenih za modernu kvantifikaciju seizmičkog performansa građevine u obliku PSHA odnosno probabilističke analize seizmičkog hazarda (7). Iz navedenog se može zaključiti da bi kvalitetno kalibriran model sa koncentriranim plastičnostima omogućio primjenu PSHA analize na krupno-panelnu zgradu. Nadalje, može se primjetiti da postoje značajne varijacije u obliku i dimenzijama krupno-panelnih elemenata te obliku i dimenzijama samih zgrada. Posljedično, postoje značajne razlike u otpornosti detalja različitih tipova krupno-panelnih zgrada. U ovom radu se opisuje postupak kalibracije numeričkog modela jedne krupnopanelne zgrade. Primjenjuju se precizniji modeli detalja, te pojednostavljeni globalni model koji se kalibira po preciznjem modelu. Time bi se omogućilo dovoljno točno modeliranje cijele građevine na stolnom računalu, zbog značajno manje numeričke kompleksnosti jednostavnijeg modela.

2. Definicije modela

Koriste se dva pristupa modeliranju, jedan precizan i numerički zahtjevan model od volumnih konačnih elemenata, izrađen u programu Abaqus (3), te drugi jednostavniji model baziran na elementima sa koncentriranom plastičnosti, izrađen u programu ETABS (4).



Slika 1. Model jednog panela u Abaqusu (lijevo) i ETABS-u (desno)

Model u Abaqusu (Slika 1 lijevo) izrađen je pomoću volumnih konačnih elemenata koji simuliraju beton te linearnih elemenata koji simuliraju armaturu, definirani kao „embedded elements“. Za konstitutivni model materijala je odabran Concrete Damaged Plasticity (CDP) (8) čija kalibracija je napravljena po odabranom skupu eksperimenata, odgovara tlačnoj čvrstoći betona 20MPa i nije opisana u ovom radu. Za konstitutivni model armature koristi se bilinearni model materijala, ekvivalentan čeliku S235. Interakcija između elemenata modela definirana je trenjem, ili trenjem i kohezijom ovisno o modelu. Faktor trenja je odabran kao 0.7, uz provedenu analizu osjetljivosti.

Model u ETABS-u (Slika 1 desno) izrađen je od shell, frame i link elemenata. Shell i frame elementi formiraju individualne panele koji se ponašaju elastično, dok su linkovi raspoređeni kako je prikazano na ## te simuliraju ponašanje veza sa susjednim elementima. Linkovi imenovani SH simuliraju ponašanje moždanika, linkovi označeni AX simuliraju odizanje panela i drobljenje panela, a linkovi označeni FP simuliraju klizanje panela po horizontalnoj sljubnici. Linkovi AX i SH su definirani kao bilinearni (multilinear plastic) u odgovarajućim stupnjevima slobode, a link FP je definiran kao veza sa koeficijentom trenja, različitim za vlačno i tlačno stanje(T/C friction pendulum).

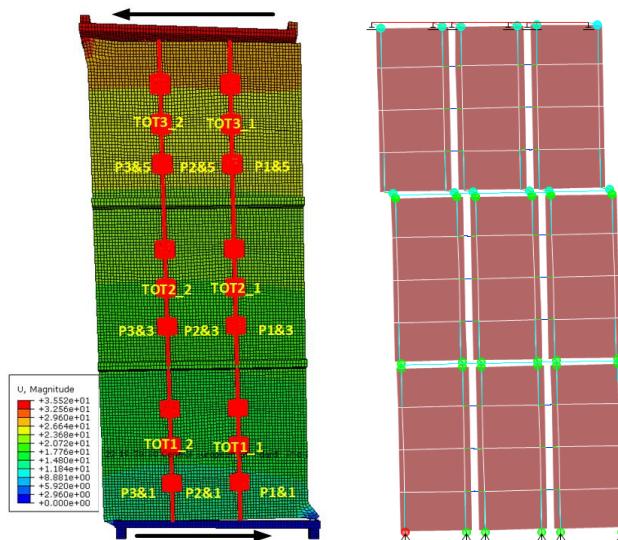
3. Analize

Provode se dvije razine analiza. Prva razina su analize na individualnim elementima, druga razina su analize sastavljenih zidova. Prva razina se koristi za inicijalnu kalibraciju plastičnog ponašanja nelinearnih veza elemenata, dok se druga razina koristi za kontrolu interakcije kalibriranih veza u sastavljenom zidu. Odnosno, prva razina analize obuhvaća analize postupnog guranja jednog AB panela, pri različitim opterećenjima uzdužne sile, te analizu smicanja jednog moždanika. Navedene analize dopuštaju simulaciju svih relevantnih mehanizama otkazivanja dovoljno međusobno neovisno. Ova se analiza provodi u Abaqusu i ETABS-u. Kada se kalibrira ETABS model tako da je ponašanje jednog panela adekvatno,

odnosno dovoljno slično ponašanju po modelu iz Abaqus-a, potrebno je još kontrolirati interakciju panela u sastavljenom zidu. Druga razina se provodi radi kontrole navedene interakcije. Provode se analize postupnog guranja nekoliko konfiguracija zidova, sa variranjem vitkosti zida, čime se izazivaju različiti mehanizmi loma (slom smicanjem, savijanjem). Promatra se usklađenost krivulja postupnog guranja, mehanizma otkazivanja te raspodjеле sila u elementima, sa pretpostavkom da je kompleksniji (Abaqus) model točan, a jednostavniji model (ETABS) se kalibrira da ostvari ekvivalentne rezultate.

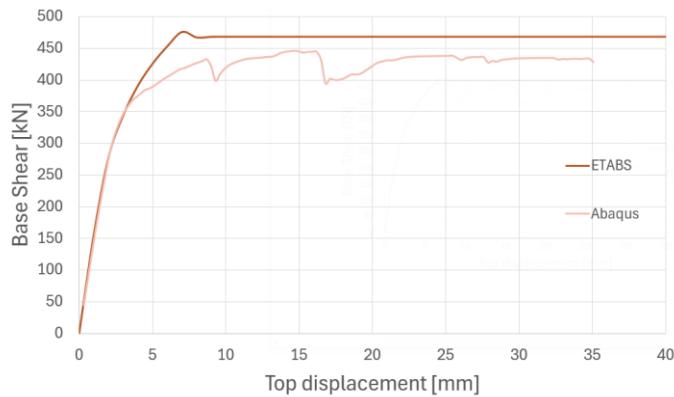
4. Rezultati analize

Prikazuju se rezultati iz analize zida širokog 3 panela i visokog 3 panela, jer se isti pokazao kao granični slučaj između dva mehanizma sloma, odnosno omogućava prikaz sloma smicanjem i savijanjem. Na slici 2 prikazani su model u Abaqusu (lijevo) i ETABS-u (desno), nakon provedene analize postupnog guranja. Na slici 3 su prikazane krivulje postupnog guranja cijelih zidova u oba modela. Nadalje na slici 4 prikazani su dijagrami horizontalnih sila u individualnim panelima tokom analize postupnog guranja za model iz Abaqus-a te na slici 5 za model iz ETABS-a.

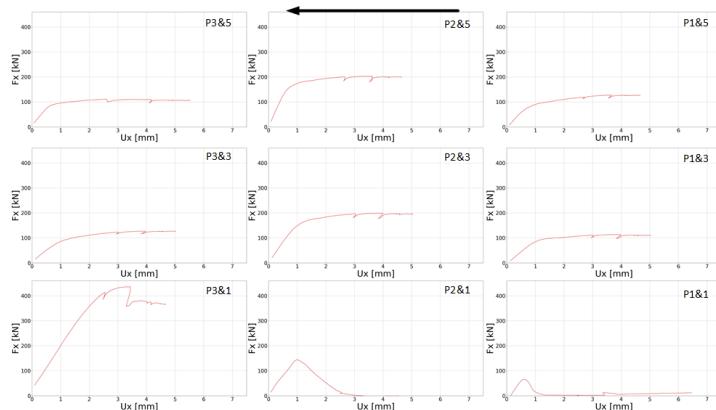


Slika 2. Mehanizam otkazivanja u Abaqusu (lijevo) i ETABS-u (desno)

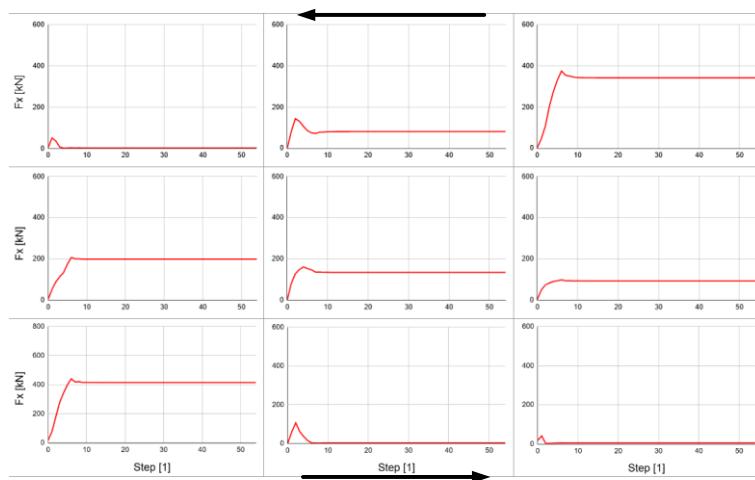
Na krivulji postupnog guranja cijelog zida može se vidjeti dobra usklađenost krutosti i čvrstoće sastavljenog zida. Dakle u najmanju ruku može se očekivati dobre rezultate pomaka katova u globalnom modelu. U nastavku se promatra distribucija sila i oštećenja u individualnim elementima sastavljenog zida. Na slici 2 mogu se primijetiti odizanje zida i smicanje serklaža na oba modela, dok se na ETABS modelu javlja drobljenje betona (dolje lijevo) kojeg u Abaqus modelu nema.



Slika 3. Krivulja postupnog guranja sastavljenog zida



Slika 4. Horizontalne komponente sila u individualnim panelima Abaqus modela



Slika 5. Horizontalne komponente sila u individualnim panelima ETABS modela

Tok unutarnjih sila prikazan je dijagramima horizontalne komponente sile u zidu, sa dijagramima raspoređenim jednako kao i elementi u zidu. Strelice na vrhu i dnu slike naznačuju smjer smicanja.

Usporednom toka sila u Abaqus i ETABS modelu može se primijetiti da je tok sila u donjem redu panela gotovo identičan, no postoji razlika u gornjim slojevima zida. Glavni uzrok razlike proizlazi iz simulacije kohezije u Abaqus modelu, koju ETABS model ne simulira, već se oslanja samo na trenje. Ova razlika nije jako značajna, pošto se očekuje i u Abaqus modelu vidi pucanje veza elemenata prije pucanja elemenata. Dakle glavna odstupanja u modelu se javljaju na lokacijama konstrukcije koja ne sudjeluju u mehanizmu otkazivanja. Sličnost mehanizama otkazivanja podržava ovakav zaključak, no ipak postoje razlike, kao klizanje u ETABS modelu na gornjoj trećini zida koje se ne javlja u Abaqus modelu te drobljenje materijala u ETABS modelu koje se ne javlja u Abaqus modelu.

5. Zaključak

Provoden je set analiza postupnog guranja za razne konfiguracije zidova te je prikazana analiza sa rezultatima na granici između dva mehanizma loma. Može se primijetiti da postoje određene razlike u distribuciji sila i oštećenja između modela, no te razlike su prihvatljive obzirom na pojednostavljenu prirodu ETABS modela. Unatoč simulaciji samo pomoću koeficijenta trenja i bilinearnog ponašanja ETABS modela, može se dovoljno dobro rekreirati kompleksno ponašanje zidova krupnopanelnih zgrada, za PSHA ili sličnu analizu.

Literatura

- [1] Schrieker, V., Powell, GH.: INELASTIC SEISMIC ANALYSIS OF LARGE PANEL BUiLDINGS. 1980.
- [2] Mihaela, Zamolo.: Ponašanje spojeva krupnopanelnih konstrukcija u seizmičkim područjima [Magistarski rad]. [Zagreb]: Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu; 1988.
- [3] Abaqus 2016 Documentation, link (<http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html>), pristupljeno 2025 May 12
- [4] Users Guide ETABS 2016, link (<https://ottegroup.com/wp-content/uploads/2021/02/ETABS2016-Users-Guide.pdf>), pristupljeno 2025 May 12
- [5] She, J., Zou, Y., Liu, Y., Li, ZH., Li, KW.: Nonlinear Numerical Analysis of Precast Concrete Shear Wall, Applied Mechanics and Materials, 1192–6, 2014, 651–653, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.1192
- [6] Henry, RS., Sritharan, S., Ingham, JM.: Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system, Eng Struct., 115:28–41, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.029>
- [7] Paudel, S., Ilham, Maulana, TliM., Prayuda, H.: Seismic Vulnerability Assessment of Regular and Vertically Irregular Residential Buildings in Nepal, Journal of the Civil Engineering Forum, 20;199–208,2024, DOI: 10.22146/jcef.10316
- [8] Michał, S., Andrzej, W.: Calibration of the CDP model parameters in Abaqus, Advances in Structural Engineering and Mechanics, Incheon, Korea, 25-29.8. 2015

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.17>

Održivi parkirni sustavi u smanjenju prometnih gužvi i zagađenja

Sustainable parking systems in reducing traffic congestion and pollution

Caterina Simonelli¹, Marijana Cuculić¹, Sanja Dugonjić Jovančević¹

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, csimonelli@student.uniri.hr, marijana.cuculic@gradri.uniri.hr, sanja.dugonjic@uniri.hr

Sažetak

Rast broja osobnih vozila u urbanim sredinama uzrokuje onečišćenje zraka, prometne gužve i smanjenje zelenih površina. Održivi parkirni sustavi nude rješenja poput propusnih kolnika, zelenih krovova, podzemnih garaža, infrastrukture za bicikle i romobile te pametnih tehnologija za upravljanje parkirnim sustavima. Postavljanje parkirališta uz javni prijevoz potiče intermodalnost i smanjuje ovisnost o automobilima. Time se povećava učinkovitost korištenja prostora, smanjuju emisije stakleničkih plinova i operativni troškovi. Ova tvrdnja bit će dodatno razrađena kroz primjer sustava „Parkiraj i vozi“ i osiguravanje parkirnih mjestâ za bicikle i romobile te analizu njihovog utjecaja na smanjenje prometa u gradskim središtima. Održivim pristupom moguće je unaprijediti mobilnost, zaštiti okoliš i osigurati dugoročni razvoj gradova. Za uspješnu provedbu održivih parkirnih sustava nužni su usklađena urbanistička politika, aktivna podrška javnosti te osiguranje adekvatnog i dostupnog zemljišta.

Ključne riječi: prometne gužve, ekološka rješenja, pametne tehnologije, zelene površine, održivi gradovi

Abstract

The growth of the number of private vehicles in urban areas causes air pollution, traffic congestion and a reduction in green areas. Sustainable parking systems offer solutions such as permeable pavements, green roofs, underground garages, bicycle and scooter infrastructure and smart technologies for managing parking systems. Placing parking lots next to public transport encourages intermodality and reduces dependence on cars. This increases the efficiency of space use, reduces greenhouse gas emissions and operating costs. This claim will be further elaborated through the example of the “Park and Ride” system and the provision of bicycle and scooter parking spaces and the analysis of their impact on reducing

traffic in city centers. A sustainable approach can improve mobility, protect the environment and ensure long-term development of cities. For the successful implementation of sustainable parking systems, a coordinated urban policy, active public support and the provision of adequate and accessible land are necessary.

Keywords: traffic jams, ecological solutions, smart technologies, green spaces, sustainable cities

1. Uvod

Masovna upotreba automobila u današnjim urbanim sredinama značajno narušava održivost gradova, pridonoseći sve većim prometnim gužvama, zagađenju zraka te negativnim utjecajima na zdravlje stanovništva i okoliša [1]. Analizom ispušnih plinova utvrđeno je da oni doprinose klimatskim promjenama te stvaranju fotokemijskog smoga, koji posebno ugrožava zdravlje ljudi i vegetaciju u gradovima [2,3]. Parkiranje je sve veći urbanistički izazov zbog rasta broja automobila i urbanizacije. Povećana potreba za parkiralištima rezultira popločavanjem i stvaranju urbanih toplinskih otoka, što dodatno utječe na mikroklimatske uvjete i povećava rizik od poplava. Osim toga, uklanjanje zelenih površina smanjuje biološku raznolikost [4,5], dok neprikladno planirani parkirni sustavi otežavaju pristup osobama s invaliditetom [6]. Dodatni problem predstavlja neadekvatno iskorištavanje postojećih parkirnih kapaciteta te nedovoljna povezanost javnog prijevoza s parkiralištima, osobito u prigradskim područjima gdje sustavi „parkiraj i vozi“ nisu dovoljno razvijeni. Rezultati istraživanja naglašavaju potrebu za održivijim prometnim rješenjima i poboljšanjem infrastrukture u urbanim sredinama [7,8]. U tom kontekstu, inovativni sustavi poput pametnog parkiranja omogućuju smanjenje vremena traženja slobodnih mesta, smanjenje gužvi i emisiju CO₂, te olakšavaju naplatu i upravljanje putem mobilnih aplikacija i senzorske tehnologije.

U Europskoj Uniji se godišnje izgubi oko 1000 km² tla zbog izgradnje parkirnih površina. Iako se asfalt danas djelomično reciklira, njegova proizvodnja i dalje ima značajan ekološki otisak zbog velike potrošnje energije za zagrijavanje materijala, emisije stakleničkih plinova te korištenje i transport neobnovljivih sirovina, čime se već u fazi proizvodnje pridonosi ukupnom ekološkom otisku. Unatoč razvoju javnog prijevoza, broj vozila u gradovima raste, a tradicionalno ulično parkiranje pogoršava gužve i emisije CO₂. Vozači gube vrijeme tražeći mesta, dok se smanjuje kvaliteta života i dostupnost zelenih površina. Potrebna su pametnija rješenja koja uravnotežuju prometne potrebe i urbani razvoj. Smanjenjem ovisnosti o parkiranju na ulicama te razvojem integriranih mobilnih centara, moguće je potaknuti održivu mobilnost i stvoriti učinkovitiji, ekološki prihvatljiviji gradski prostor, u korist stanovnika i lokalne ekonomije [9].

Cilj ovog rada je analizirati izazove koji predstavljaju postojeći parkirni sustavi u urbanim sredinama i istražiti potencijal za razvoj održivih parkirnih rješenja koja istovremeno zadovoljavaju prometne potrebe, smanjuju negativne utjecaje na okoliš i poboljšavaju kvalitetu života građana. U tom kontekstu održiva parkirna mjesta odnose se na rješenja koja pravedno uzimaju u obzir ekološke, društvene i ekonomske aspekt poput smanjenja emisija i potrošnje resursa, povećanje dostupnosti i sigurnosti te olakšavanje učinkovitog upravljanja prostorom i troškovima.

2. Vrste održivih parkirnih rješenja u smanjenju zagađenja

Održiva parkirališta koriste ekološki prihvatljive materijale i tehnologije kako bi smanjilo negativan utjecaj na okoliš. Uključuju rješenja koja nude alternative za smanjenje zagađenja, omogućavanje bolje infiltracije vode i zaštitu tla, kao što su prenamjena postojećih parkirnih površina i korištenje podzemnih prostora, gradnja propusnih kolnika i povećanje zelenih površina, korištenje parkirališta za proizvodnju energije, korištenje energetski učinkovite rasvjete i osiguravanje mjesta za električna vozila. [10,11].

2.1. Prenamjena postojećih i korištenje podzemnih parkirnih prostora

Pri planiranju novih parkirališta ključno je uskladiti projekte s dugoročnim urbanističkim i razvojnim strategijama kako bi se osigurala održivost i sklad s planovima razvoja grada. Ako je lokacija predviđena za drugu namjenu, trajna parkirališta nisu preporučljiva zbog rizika od većih emisija CO₂, otpada, i rasipanja resursa [12]. Umjesto toga, preporučuje se optimizacija postojećih kapaciteta i detaljna procjena stvarnih potreba za parkirnim mjestima [13]. Često se u urbanim sredinama zanemaruju šire potrebe zajednice jer se prioritet daje parkiranju, čak i na atraktivnim lokacijama u gradskim središtima [14,15]. Podzemne garaže sve su češći element urbanih zgrada jer omogućuju optimalno iskorištanje prostora te oslobođaju površinu tla za zelene površine i javne sadržaje. Time doprinose smanjenju buke i zagađenja, povećanju sigurnosti (kontrolirani pristup) te zaštitu vozila od vremenskih uvjeta. Ovakva rješenja podupiru održivi urbani razvoj jer omogućuju povećanje biološke raznolikosti i smanjuju otjecanje oborinskih voda. Prebacivanjem parkiranja pod zemlju smanjuje se zagušenje ulica i povećava sigurnost pješaka [16]. Integracija automatiziranih sustava parkiranja dodatno smanjuje emisije stakleničkih plinova i optimizira potrošnju energije [17].



Slika 1. Prikaz podzemne garaže sa zelenim površinama u Los Angelesu [18]

2.2. Propusni kolnici i zelene površine

Propusni kolnici predstavljaju inovativno rješenje za upravljanje oborinskim vodama u urbanim sredinama, omogućujući efikasnu infiltraciju vode kroz kolnik i smanjenje rizika od poplava te zaštitu podzemnih vodonosnika. Ovi materijali, uključujući porozni asfalt i beton, doprinose smanjenju urbanih toplinskih otoka i izrađeni su od izdržljivih komponenti koje

podnose raznolike klimatske uvjete [19,20]. Korištenje propusnih kolnika važno je jer smanjuje potrebu za konvencionalnim materijalima, čime se troši manje resursa i smanjuju emisije CO₂. Ova tvrdnja posebno dobiva na značaju kad se uzme u obzir da cementna industrija sudjeluje s oko 8 % u ukupnim globalnim emisijama stakleničkih plinova. Pri odabiru kolničkih materijala važno je pritom razlikovati njihove osnovne karakteristike, primjerice asfaltni kolnici imaju vijek trajanja od oko 20 godina, dok betonski mogu trajati i do 40 godina. Kod propusnih kolnika dodatno se vrednuju svojstva poput poroznosti i infiltracijske sposobnosti, no važno je naglasiti da i oni moraju zadovoljiti propisane mehaničke zahtjeve u skladu s relevantnim normama [21,22,23]. Dodatno, integracija zelenih elemenata, poput drveća i lokalne vegetacije, može poboljšati održivost parkirališta, snižavanjem temperatura i povećanjem infiltracije vode, dok pažljivo odabrani biljni materijali smanjuju rizik od oštećenja infrastrukture uzrokovanih korijenjem. Provedena istraživanja potvrđuju važnost održivih prometnih rješenja, održivog urbanog planiranja i potencijal propusnih kolnika u unapređenju ekološke stabilnosti gradova [11,24,25].



Slika 2. Ideja izgleda parkirnih površina sa propusnim kolnicima i zelenilom [26]

2.3. Solarni paneli

Postavljanje solarnih panela na parkirališta omogućuje proizvodnju čiste energije na licu mjesta i smanjenje operativnih troškova, uz istovremenu zaštitu vozila. Cijene instalacija solarnih sustava pale su za 70 % u posljednjem desetljeću, no unatoč tome, solarna energija i dalje pokriva tek neznatan udio ukupnih energetskih potreba [27]. Solarna nadstrešnica predstavlja dvostruko rješenje te generira energiju i pruža hlad. Između rujna i prosinca 2020. godine, IKEA-in projekt u Baltimoreu pokazao je pad kupovine energije od 84 %, što je rezultiralo s 57 % uštedjene energije i nižim troškovima u samo tri mjeseca [28,29]. Integracija punionica za električna vozila (EV) sa solarnim sustavima dodatno povećava održivost, omogućujući punjenje isključivo solarnom energijom. Komercijalni subjekti mogu ostvariti prihod kroz naplatu punjenja, dok u nekim zemljama, poput Ujedinjenog Kraljevstva, ovakve instalacije postaju zakonski uvjet kao dio tranzicije prema električnoj mobilnosti [10,29].



Slika 3. Ideja izgleda parkirnih površina sa solarnim nadstrešnicama [30]

2.4. Energetski učinkovita rasvjeta

Učinkovita rasvjeta parkirališta ključna je za sigurnost i funkcionalnost. Prvenstveno, učinkovito korištenje energije u dobro osvijetljenim prostorima doprinosi održivosti [31]. LED rasvjeta s automatskim senzorima pokreća osigurava bolju vidljivost, manju potrošnju energije i niže operativne troškove [32]. LED tehnologija ima vijek trajanja do 50.000 sati, ne sadrži štetne tvari poput žive te smanjuje emisije CO₂, toplinsku emisiju i potrebu za održavanjem. Ravnomjerna svjetlosna pokrivenost bez odsjaja dodatno poboljšava sigurnost i udobnost za vozače, pješake, dok istovremeno značajno smanjuje kriminalne aktivnosti (do 39 %) i nesreće [32,33].

2.5. Osiguranje parkirnih mesta za bicikle i romobile

Bicikli, električni bicikli i romobili predstavljaju ekološki prihvatljive alternative automobilima, s potencijalom za smanjenje korištenja vozila s unutarnjim izgaranjem [34]. Evropska biciklistička federacija (ECF) predložila je da nove i obnovljene stambene zgrade osiguraju 1,5 do 2 parkirna mesta za bicikle po stambenoj jedinici, uključujući mesta za veće bicikle i električne romobile [35]. Propisi za parkiranje bicikala u gradovima poboljšavaju dostupnost i sigurnost za mikromobilnost, čime se potiče održiviji gradski prijevoz [36]. Usprkos rastuće popularnosti, prostor za pohranu bicikala i romobila još uvijek predstavlja izazov za lokalne vlasti i poslodavce [37].



Slika 4. Prikaz parkirnih mesta za bicikle i romobile u Parizu [38]

2.6. Ukidanje besplatnih parkirališta i dinamički modeli formiranja cijena

Iako proširenje parkirnih kapaciteta djeluje logično, često rezultira višim troškovima, zagađenjem i smanjenjem kvalitete urbanog prostora. Višak parkirnih mjesta potiče ovisnost o automobilima, doprinosi prometnim gužvama i emisijama CO₂ [39], te pogoršava učinak urbanog toplinskog otoka [40]. Besplatno parkiranje dodatno pogoršava problem, dok naplata parkirnih mjesta potiče korištenje javnog prijevoza i smanjuje broj vozila, prometna zagušenja i onečišćenje, čime doprinosi održivijim gradovima [41,42].

Određivanje cijena parkiranja predstavlja ključnu strategiju u suvremenom upravljanju urbanom mobilnošću, kojom se regulira potražnja i optimizira korištenje dostupnih kapaciteta. Primjenom statičkih i dinamičkih modela formiranja cijena, utemeljenih na razini zauzetosti i vremenskoj potražnji, gradovi mogu učinkovito usmjeravati prometno ponašanje vozača.

3. Inovativne tehnologije za smanjenje stvaranja gužvi

Automatizirani parkirni sustavi predstavljaju visokotehnološko rješenje koje znatno povećava učinkovitost i kapacitet parkiranja, osobito u urbanim sredinama s ograničenim prostorom [43,44]. Korištenjem senzora, AI-a i robotske tehnologije, omogućuju brzo i sigurno parkiranje bez potrebe za traženjem slobodnog mjesta, čime smanjuju gužve i emisije CO₂ [45]. Implementacija pametnih plaćanja putem registarskih oznaka te mobilnih aplikacija za rezervaciju, produženje i upravljanje parkiranjem dodatno unapređuje korisničko iskustvo, optimizira prometne tokove i omogućuje transparentniju i učinkovitiju kontrolu parkiranja [46,47,48].

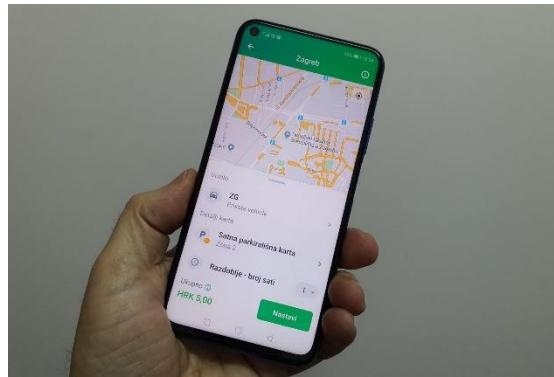
Uvođenje senzora i analitike u stvarnom vremenu omogućuje preciznu prilagodbu cijena, što rezultira smanjenjem vremena traženja parkirnog mjesta, prometnih gužvi i emisija CO₂ [49]. Uspješni primjeri gradova poput Züricha i Amsterdama pokazuju da kombinacija viših cijena parkiranja s kvalitetnim javnim prijevozom doprinosi smanjenju korištenja osobnih automobila, potiče prelazak na održive oblike prijevoza te unaprjeđuje ukupnu kvalitetu života u urbanim sredinama [50].

Rotacijski parkirni sustavi predstavljaju kompaktno i održivo rješenje za parkiranje u urbanim sredinama s ograničenim prostorom. Korištenjem vertikalne rotacije omogućuju parkiranje više vozila na minimalnoj površini, uz brzi pristup i visoku učinkovitost. Idealni su za gusto izgrađene zone, smanjuju potrebu za otvorenim površinama i operativne troškove. Automatizirani sustavi koriste softvere, termalne kamere i mobilne aplikacije za sigurno i jednostavno upravljanje. Energetski su učinkoviti, tihi i sigurni, što ih čini pogodnim i za stambena područja. Povećavaju kapacitete unutar vrlo ograničenih površina, štede prostor i vrijeme [51,52,53,54,55].

Sustavi „Parkiraj i vozi“ i „Kiss & Ride“ nude održiva rješenja za smanjenje prometa u gradskim jezgrama, preusmjeravanjem vozila prema rubnim zonama te poticanjem korištenja javnog prijevoza [56]. Ključ uspješnosti leži u njihovoј blizini stambenim područjima, što omogućuje lakši prijelaz s osobnih vozila na javni prijevoz. Time se smanjuju emisije CO₂, buka i onečišćenje, a povećava kvalitetu života u gradovima. Uz pažljivo planiranje, uključujući očuvanje zelenih površina, ovi sustavi doprinose održivom urbanom razvoju, većoj socijalnoj uključenosti, gospodarskom rastu i prometnoj učinkovitosti [57,58].

Pametni parkirni sustavi su ključni instrumenti u održivoj transformaciji urbanih sredina, obrazovnih institucija i poslovнog sektora, pružajući rješenja koja smanjuju ekološki otisak

prometa. Ova istraživanja pokazuju kako optimizacija pronalaženja parkirnog mjesta smanjuje emisije ispušnih plinova kroz eliminaciju nepotrebnog kruženja i mirovanja vozila, što rezultira uštedom goriva i smanjenjem zagađenja zraka [17,59]. Uz to, moderna parkirna rješenja često uključuju kompaktnu strukturu i integraciju s propusnim i zelenim površinama, čime se smanjuje urbano otjecanje i efekta toplinskih otoka. Integracija s informacijskim sustavima javnog prijevoza dodatno potiče Inter modalnost i smanjuje ovisnost o osobnim vozilima, doprinoseći razvoju ekološki prihvatljivijih prometnih sustava. Osim ekoloških koristi, ova rješenja poboljšavaju prostornu organizaciju gradova, oslobađajući prostor za pješačke zone, biciklističke staze i zelene površine. Ulaganjem u pametne parkirne sustave, gradovi postavljaju temelje za klimatski otpornije, zdravije i uključive urbane zajednice [60,61]. Pametni parkirni sustavi predstavljaju finansijski isplativu i održivu opciju za gradove i investitore, jer omogućuju fleksibilnu naplatu parkiranja ovisno o potražnji, povećavajući prihode u frekventnim zonama. Takvi sustavi također čine gradove tehnološki naprednim i privlače investitore. Osim što smanjuju stres i povećavaju produktivnost zaposlenika, pametni sustavi mogu poboljšati ekonomске uvjete i stvoriti nova radna mjesta [62,63]. Podzemna parkirališta nude estetske prednosti, ali dolaze s višim troškovima gradnje i održavanja, dok nadzemna parkirališta imaju niže troškove, ali zauzimaju veće površine i izložena su vremenskim uvjetima. Ova parkirališta igraju ključnu ulogu u urbanom životu, jer smanjuju gužve i olakšavaju kretanje, no važno je uravnotežiti njihove troškove i ekološke učinke [27]. Prilagodba tradicionalnih parkirnih sustava novim održivim pristupima zahtijeva ulaganja u zelene tehnologije, reciklirane materijale i integraciju s javnim prijevozom, što dugoročno doprinosi održivosti, ali i povećava početne troškove [64,65].



Slika 5. Mobilna aplikacija za plaćanje parkinga [66]

4. Ekonomski aspekti

Provedba održivih parkirnih sustava predstavlja složen izazov unutar šire težnje za urbanom održivošću, jer se suočava s tehničkim, finansijskim i logističkim preprekama. Glavni izazov je početno ulaganje, jer održivi koncepti parkiranja, poput zelenih površina, sustava za zadržavanje oborinskih voda i energetski učinkovitih sustava, zahtijevaju značajna sredstva. U situacijama s ograničenim budžetima, ti sustavi često nisu prioritet, iako dugoročno donose velike koristi. Tehnički izazovi uključuju teškoće integracije parkirnih sustava u gusto izgrađena urbana područja, a zakonodavni i administrativni okviri često ne prate brzinu tehnološkog napretka, što otežava implementaciju. Također, promjena mentaliteta među korisnicima, poput vozača i investitora, nužna je kako bi se prihvatali novi sustavi, poput

dinamičkog upravljanja parkirnim kapacitetima ili integracije s javnim prijevozom. Važno je prepoznati i adresirati ove izazove kroz strateško planiranje, međusektorsku suradnju i promicanje održivog pristupa. Čimbenici, poput dohotka, starosne dobi i udaljenosti od novih parkirnih sustava, utječu na percepciju i prihvaćanje novih rješenja. Pozitivan stav prema održivim parkiralištima postoji, ali je potrebno redovito održavanje, transparentno upravljanje i uključivanje građana u planiranje kako bi sustavi bili funkcionalni i prihvaćeni [67,68].

5. Zaključak

U današnjim urbanim sredinama, održivo upravljanje parkiralištima postaje ključno za očuvanje okoliša, smanjenje prometnih gužvi i unaprjeđenje kvalitete života građana. Tradicionalni pristup parkiranju, koji se oslanjaju na besplatna, ulično smještena parkirališta i nekontrolirano povećanje kapaciteta, sve više pokazuje svoje ograničenosti i štetne posljedice na ekološki, prostorni i društveni razvoj gradova. Istražena održiva rješenja, poput podzemnih parkirališta, propusnih kolnika, solarnih nadstrešnica, energetski učinkovite rasvjete te parkirnih mjesta za mikromobilnost, nude konkretnе načine za smanjenje emisija, očuvanje okoliša i povećanje sigurnosti. Poseban značaj imaju inovativne tehnologije poput automatiziranih sustava parkiranja, pametni senzori, dinamičko formiranje cijena i integracijom s javnim prijevozom koje omogućuju veću učinkovitost i smanjenje negativnog ekološkog otiska. Održivi parkirni sustavi suočavaju se s finansijskim, tehničkim i zakonodavnim izazovima, ali dugoročno nude brojne koristi. Njihova uspješna provedba zahtijeva strateško planiranje, suradnju i uključivanje građana, uz promjenu korisničkog mentaliteta i prilagodbu zakonodavnog okvira. U konačnici, održivi parkirni sustavi predstavljaju važan korak prema inkluzivnim, tehnološki naprednijim i klimatski otpornijim gradovima, u kojima su potrebe građana, okoliša i gospodarstva uravnotežene i uskladene. Preporuka je uvođenje dinamičkih modela naplate parkiranja i integracija pametnih tehnologija koje smanjuju kruženje vozila i prometne gužve. Također, planiranje novih parkirnih kapaciteta trebalo bi uskladiti s razvojem javnog prijevoza i očuvanjem zelenih površina. Uspješna provedba ovih rješenja zahtijeva političku volju, međusektorsku surdanju i kontinuirano uključivanje građana u proces odlučivanja.

Literatura

- [1] Engnovate: The use of personal cars has increased more than ever before but this use of cars causes many problems., <https://engnovate.com/ugc-ielts-writing-task-2-essays/the-use-of-personal-cars-has-increased-more-than-ever-before-but-this-use-of-cars-causes-many-problems-67505a926510a/>, pristup 18.04.2025.
- [2] Washington State Department of Ecology: Reducing air pollution from cars, <https://ecology.wa.gov/ecologys-work-near-you/education-training/what-you-can-do/reducing-car-pollution>, pristup 18.04.2025.
- [3] Mihalić, E. (2021). Smog (Završni rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet., broj stranice (N14), Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:459684>

- [4] Yale School of the Environment: Reimagining parking: Unlikely spaces for climate resilience, <https://environment-review.yale.edu/reimagining-parking-unlikely-spaces-climate-resilience>, pristup 22.04.2025.
- [5] JustPark: Green Parking Solutions: Combating Environmental Challenges With Sustainable Design, <https://www.justpark.com/business/blog/green-parking-solutions/>, pristup 22.04.2025.
- [6] NervGenPharma: The Perks and Pitfalls of Accessible Parking, <https://nervgen.com/the-perks-and-pitfalls-of-accessible-parking/>, pristup 22.04.2025.
- [7] Parklio: 5 Urban Parking Problems and their Smart Solutions, <https://parklio.com/en/blog/5-urban-parking-problems-and-their-smart-solutions>, pristup 22.04.2025.
- [8] The Geography of Transport Systems: Urban Transport Challenges, <https://transportgeography.org/contents/chapter8/urban-transport-challenges/>, pristup 22.04.2025.
- [9] SKIDATA: Creating Cities That Thrive: Reducing Congestion with Smart Parking Solutions, <https://www.skidata.com/skidata-blog/reducing-congestion-with-smart-parking-solutions>, pristup 02.05.2025.
- [10] Sharvy: How to make a sustainable parking space ?, <https://www.sharvy.com/en/blog/how-to-make-a-sustainable-parking-space/>, pristup 24.04.2025.
- [11] Green City Times: Environmentally Friendly Parking Solutions, <https://www.greencitytimes.com/environmentally-friendly-parking-solutions/>, pristup 24.04.2025.
- [12] Intertraffic: Ten sustainable parking innovations for a more sustainable environment, <https://www.intertraffic.com/news/parking/ten-sustainable-parking-innovations-for-a-more-sustainable-environment>, pristup 28.04.2025.
- [13] Malovrh A., Parkiranje u urbanim sredinama kao element turističke ponude, Pomorski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2014.
- [14] ResearchGate: Research on Planning and Management of Urban Parking Lot, https://www.researchgate.net/publication/321133515_Research_on_Planning_and_Management_of_Urban_Parking_Lot-Taking_Hangzhou_as_an_Example, pristup 28.04.2025.
- [15] ITDP: Too Much Urban Space is Used for Parking. What Can We Do About It? <https://itdp.org/2024/09/26/too-much-urban-space-is-used-for-parking/>, pristup 28.04.2025.
- [16] MyParker: Basement vs. Ground Parking: Weighing the Pros & Cons, <https://www.myparker.co.uk/basement-vs-ground-parking-weighing-the-pros-cons/>, pristup 28.04.2025.
- [17] Harding Autopark System: The Benefits of an Underground Parking System, <https://www.hardingaps.com/parking-blog/2023/22/3/the-benefits-of-an-underground-parking-system-zx45f>, pristup 28.04.2025.
- [18] Slika 1. Joe's Auto Parks: The Future Of Parking Is Green, <https://joesautoparks.com/the-future-of-parking-is-green/>, pristup 28.04.2025.

- [19] EVPowered: Sustainable Office Parking Solutions for a Greener Work Environment, <https://evpowered.co.uk/feature/sustainable-office-parking-solutions-for-a-greener-work-environment/>, pristup 25.04.2025.
- [20] Truegrid: 3 Ways to Make Your Parking Lot More Eco-Friendly, <https://www.truegridpaver.com/green-parking-lot/?srsltid=AfmBOopDFc8mPxspVXVk600-m6NtGgQkcXSCU85JDH8AdFEAEHsJILtp>, pristup 25.04.2025.
- [21] Virginia Asphalt Association: Porous Asphalt Parking Lots, <https://vaasphalt.org/pavement-guide/pavement-design-by-use/permeable-parking-lots/>, pristup 27.04.2025.
- [22] Landmark Paving: 4 Parking Lot Maintenance Tips For Porous Asphalt Pavement, <https://landmarkpaving.com/4-parking-lot-maintenance-tips-for-porous-asphalt-pavement/>, pristup 27.04.2025.
- [23] ScienceDirect: Porous Asphalt, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/porous-asphalt>, pristup 27.04.2025.
- [24] Gtechna: What Is the Meaning of “Green Parking Lot”??, <https://www.gtechna.com/blog/green-parking-lots>, pristup 26.04.2025.
- [25] Montgomery County Planning Commission, Green Parking Lots, Montgomery County Court House, Norristown, Pennsylvania, 2011., <https://www.montgomerycountypa.gov/>, pristup 26.04.2025.
- [26] Slika 2. archdaily: Sustainable Parking Space for an Eco-Responsible Generation, <https://www.archdaily.com/927238/sustainable-parking-space-for-an-eco-responsible-generation>, pristup 19.05.2025.
- [27] VPS: How Solar Power Is the Future of Parking Lots, <https://www.vpslp.com/blog/how-solar-power-is-the-future-of-parking-lots/>, pristup 26.04.2025.
- [28] Greenlancer: Solar Carports: Pros & Cons for Installers, <https://www.greenlancer.com/post/solar-carports>, pristup 26.04.2025.
- [29] Renewable Energy Magazine: Four Amazing Benefits of Adding Parking Lot Solar Panel Canopies, <https://www.renewableenergymagazine.com/emily-newton/four-amazing-benefits-of-adding-parking-lot-20221215>, pristup 26.04.2025.
- [30] Slika 3. Duke TODAY: Research Drive Garage Goes Solar, <https://today.duke.edu/2018/03/research-drive-garage-goes-solar>, pristup 26.04.2025.
- [31] CROWN LIGHTING GROUP: Efficient Lighting Solutions for Safer and Greener Parking Lots, <https://crownlightinggroup.com/efficient-lighting-solutions-for-safer-and-greener-parking-lots/>, pristup 29.04.2025.
- [32] Unicronlite: Best lighting for car parks: a comprehensive guide to led car park lights, <https://www.unicronlite.com/info-detail/best-lighting-for-car-parks-a-comprehensive-guide-to-led-car-park-lights>, pristup 29.04.2025.
- [33] StouchLighting: The Benefits of Using LED Area Lights in Parking Lots, <https://www.stouchlighting.com/blog/the-benefits-of-using-led-area-lights-in-parking-lots>, pristup 29.04.2025.

- [34] ITDP: Why We Need E-Bikes As A Climate and Mobility Solution, <https://itdp.org/2024/03/12/why-we-need-e-bikes-as-a-climate-and-mobility-solution/>, pristup 30.04.2025.
- [35] ECF: Mandatory bicycle parking in the Energy Performance of Buildings Directive is great news for cyclists, <https://www.ecf.com/en/news/ecf-analysis-mandatory-bicycle-parking-in-the-energy-performance-of-buildings-directive-is-great-news-for-cyclists/>, pristup 30.04.2025.
- [36] MDPI: Bicycle Parking Requirements in City Building Codes and Their Potential to Promote Sustainability, <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2531>, pristup 30.04.2025.
- [37] ProjektW: PARKING SPACES FOR BICYCLES AND E-BIKES, <https://www.projekt-w.de/en/parking-spaces-for-bicycles-and-e-bikes/>, pristup 30.04.2025.
- [38] Pametni gradovi: Kako je zabrana e-romobila promijenila mobilnost u Parizu, <https://pametni-gradovi.eu/sastavnice-pametnog-grada/promet-i-mobilnost/kako-je-zabrana-e-romobila-promijenila-mobilnost-u-parizu/>, pristup 21.06.2025.
- [39] WORLD BANK BLOGS: Parking: If you build it, will they come?, <https://blogs.worldbank.org/en/transport/fewer-parking-spaces-could-make-cities-more-livable-and-vibrant>, pristup 01.05.2025.
- [40] Route Fifty: One solution to fight climate change? Fewer parking spaces., <https://www.route-fifty.com/infrastructure/2023/11/one-solution-fight-climate-change-fewer-parking-spaces/392225/>, pristup 01.05.2025.
- [41] GEMINI Parking Solutions: Should All Parking Be Free?, <https://www.geminiparkingsolutions.com/blog-post/should-all-parking-be-free/>, 01.05.2025.
- [42] Parking Made Easy: Why Free Parking is Bad for the Environment And What to Do About It, <https://www.parkingmadeeasy.com.au/blog/why-free-parking-bad-environment-and-what-do-about-it>, pristup 01.05.2025.
- [43] Euro Parking Service: Innovative Parking Solutions to Optimise Car Parks, <https://europarkingservices.com/innovative-parking-solutions-to-optimise-car-parks/>, pristup 04.05.2025.
- [44] Parklio: Emerging trends that will determine the future of parking, <https://parklio.com/en/blog/emerging-trends-that-will-determine-the-future-of-parking>, pristup 04.05.2025.
- [45] INTERTRAFFIC: Revolutionising Parking Experiences: The Latest Smart Solutions for Seamless and Efficient Parking, <https://www.intertraffic.com/news/latest-smart-solutions-seamless-efficient-parking>, pristup 04.05.2025.
- [46] Pakeagle: Top 10 Smart Parking innovations to look out for in 2020,

- <https://www.parkeagle.com/2020/01/30/top-10-smart-parking-innovations-2020/>, pristup 04.05.2025.
- [47] JustPark: How Real-Time Parking Availability Transforms Parking Management, <https://www.justpark.com/business/blog/real-time-parking-availability/>, pristup 04.05.2025.
- [48] Euro Parking Service: What is the future of parking technology?, <https://europarkingservices.com/future-of-parking-technology/>, pristup 04.05.2025.
- [49] URBAN MOBILITY: Everything You Need to Know About Dynamic Pricing for Parking, <https://www.preciseparklink.com/parking-industry-insights/everything-you-need-to-know-about-dynamic-pricing-for-parking>, pristup 05.05.2025.
- [50] Parklio: 10 Proven Benefits of Implementing a Parking Pricing Strategy in Your City, <https://parklio.com/en/blog/10-proven-benefits-of-implementing-a-parking-pricing-strategy-in-your-city>, pristup 05.05.2025.
- [51] Građevinar, Inovativno rješenje za optimizaciju parkirališta u urbanim sredinama, <http://www.casopis-gradjevinar.hr/>, pristup 02.05.2025.
- [52] HYRO PARK: What are the advantages of rotary parking?, <https://www.hydropark.com/what-are-the-advantages-of-rotary-parking.html>, pristup 02.05.2025.
- [53] P: Rotary Parking, <https://rp.markoja.hr/hr/>, pristup 02.05.2025
- [54] REMAC MISR: Rotary Parking System: The Ultimate Space-Saving Solution, <https://ramec-misr.com/rotary-parking-system-the-ultimate-space-saving-solution/>, pristup 02.05.2025.
- [55] PARK LAYER: Advantages of the Rotary Parking System, <https://www.parklayer.com/blog/advantages-of-the-rotary-parking-system.php>, pristup 02.05.2025.
- [56] Parklio: Park & Ride Systems - What Are They And How To Implement Them?, <https://parklio.com/en/blog/park-ride-systems-what-are-they-and-how-to-implement-them>, pristup 03.05.2025.
- [57] SanviConsulting: Park and Ride Facilities: An Urban Mobility Solution, <https://www.sanvimobilityconsulting.com/park-and-ride-facilities-an-urban-mobility-solution>, pristup 03.05.2025.
- [58] Euro Parking Service: Park and Ride System: A Complete Overview, <https://europarkingservices.com/park-and-ride-system/>, pristup 03.05.2025.
- [59] FrogParking: The Environmental Benefits of Smart Parking Systems, <https://frogparking.com/environmental-benefits-of-smart-parking/>, pristup 06.05.2025.
- [60] Allerin: 7 Environmental Benefits of Real-Time Parking Availability, <https://www.allerin.com/blog/7-environmental-benefits-of-real-time-parking-availability>, pristup 06.05.2025.
- [61] PARKUP: Eco-Friendly Advantages of Automated Car Parking Systems, <https://parkup.ae/eco-friendly-advantages-of-automated-car-parking-systems/>,

pristup 06.05.2025.

[62] RAMEC MISR: The Economic Benefits of Smart Parking Systems for Businesses and Municipalities

<https://ramec-misr.com/the-economic-benefits-of-smart-parking-systems-for-businesses-and-municipalities/>, pristup 07.05.2025.

[63] FusionPARKING: The Economic Impact of Parking Management on Local Businesses, <https://fusion-parking.com/economic-impact-of-parking-management/>, pristup 07.05.2025.

[64] Steer: Livability and the value of public spaces,

<https://steergroup.com/insights/news/livability-value-public-spaces>, pristup 07.05.2025.

[65] PARANGAT: IoT In Smart Parking Management: Benefits & Challenges,

<https://www.parangat.com/iot-in-smart-parking-management-benefits-challenges/>, pristup 07.05.2025.

[66] Garaža AutoMagazin: Isprobali smo PayDo aplikaciju za povoljnije plaćanje parkinga, <https://autogaraza.hr/techno-garaza/isprobali-smo-paydo-aplikaciju-za-povoljnije-placanje-parkinga/>, pristup 21.06.2025.

[67] StudySmarter: Challenges to Urban Sustainability,

<https://www.studysmarter.co.uk/explanations/human-geography/urban-geography/challenges-to-urban-sustainability/>, pristup 08.05.2025.

[68] ACB Consulting Service LLC: The Main Challenges of Urban Sustainability, <https://www.acbconsultingservices.com/sustainable-construction-project-management/the-main-challenges-of-urban-sustainability/>, pristup 08.05.2025

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.18>

Promjena slike obale grada Poreča na primjeru turističke zone Pical od 1968. do 2023. godine

*Transformation of the Coastal Landscape Image of the City of Poreč:
A Case Study of the Pical Tourist Zone from 1968. to 2023.*

Emil Srbiljanin¹, Ana Mrđa¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, Zagreb, Hrvatska, esrbiljanin@arhitekt.hr,
amrdja@arhitekt.hr

Sažetak

Ubrzani turistički razvoj gradova na jadranskoj obali u drugoj polovici 20. stoljeća promijenio je sliku obale kakva je ranije postojala. On je posljedica kontinuiranog prostorno planskog promišljanja turističke djelatnosti od početaka masovnog turizma do danas. Rad istražuje kako razvoj turističke zone Pical u Poreču utječe na promjenu slike obale. Cilj je analizom čimbenika kvalitete, temeljenih na prilagođenoj Lynchovej teoriji prostora, utvrditi rizike koje turistička izgradnja predstavlja za kvalitetu slike obale. Metoda uključuje usporednu analizu zračnih snimaka iz 1968. i 2023. godine u dva mjerila: grada i turističke zone. Rezultati pokazuju pad udjela neizgrađenog prostora (s 92% na 49% u mjerilu grada, i s 96% na 88% u mjerilu turističke zone), smanjenje poroznosti zone te gubitak prostornih cezura turističke izgradnje. Zaključno, iako su neizgrađeni javni prostori dijelom očuvani, trend zatvaranja i kontinuirane neprekidne dužobalne turističke izgradnje nosi rizike za vizualnu kvalitetu i dostupnost obale.

Ključne riječi: slika prostora, čimbenici kvalitete slike obale, turistička izgradnja, prostorno planiranje turizma

Abstract

The rapid development of tourism along the Adriatic coast since the mid-20th century has significantly transformed its visual identity. This paper examines the impact of the Pical tourist zone on the coastal image of Poreč, using adapted elements of Lynch's spatial theory. The analysis is based on a comparison of orthophoto maps from 1968. and 2023. at urban and zonal scales. Results show a decrease in un-built areas (from 92% to 49% in city scale and from 96% to 8% within tourist zone), reduced porosity, and a loss of green spatial buffers. Although some public green spaces remain, the ongoing trend of continuous coastal development poses risks to both the visual quality and accessibility of the shoreline.

Keywords: spatial image, coastal image quality factors, tourism development, tourism spatial planning.

1. Uvod

Turizam u Istri ima dugu povijest, čiji se počeci mogu pratiti još u razdoblju Rimskog Carstva, kada nastaju prva odredišta za odmor i razonodu, poput amfiteatra u Puli i rimskih villae rusticae na području Brijuna. Suvremenim oblikom turizma oblikuje se početkom 19. stoljeća, u kontekstu razvoja turističke infrastrukture tijekom Austro-Ugarske monarhije, izgradnjom hotela, pansiona i kupališta uzduž istarske obale. Intenzivna faza razvoja zabilježena je krajem 1980-ih godina, kada dolazi do značajne ekspanzije kroz djelovanje velikih turističkih poduzeća, poput Plave lagune, Istraturista i Arenaturista.

U suvremenom kontekstu Istra nastavlja pozitivni trend rasta te bilježi diverzifikaciju turističke ponude. Prema dostupnim podacima, turizam sudjeluje u stvaranju gotovo 90% bruto domaćeg proizvoda Istarske županije, čime postaje ključni gospodarski sektor regije. U 2024. godini zabilježeno je ukupno 20,2 milijuna dolazaka i 93,7 milijuna noćenja, što predstavlja porast od 3,9% u dolascima i 1,4% u noćenjima u odnosu na prethodnu godinu (HNB, 2024.).

Navedeni podaci svjedoče o kontinuiranom rastu turističke djelatnosti, no istovremeno otvaraju pitanje odnosa turizma i prostora, pri čemu prostor predstavlja temeljni resurs turističke proizvodnje (Kušen, 2001). Turistički razvoj, iako planski usmjeren, nepovratno mijenja fizičku i perceptivnu sliku obale. Transformacija jadranskog priobalja, uzrokovanja suprastrukturnim i infrastrukturnim turističkim intervencijama te promjenom funkcionalnosti prostora, postaje sve očitija.

U okviru ovoga rada istražuje se utjecaj turističkog razvoja na vizualno-prostornu transformaciju obale, s posebnim naglaskom na turističku zonu Pical, smještenu sjeverno od Poreča. Odabir lokacije opravдан je njenom dugogodišnjom planskom izgradnjom te neposrednom urbanom povezanošću s gradskim tkivom.

Analiza promjena u prostornoj slici turističke zone temelji se na teorijskom modelu Kevina Lynch (1960.), prema kojemu fizičku sliku prostora konstituiraju pet osnovnih elemenata: putovi, rubovi, čvorovi, područja i orientirni. Djelomično preuzimajući i prilagođujući ovaj model specifičnostima obalnog turističkog razvoja, provedena je prostorna analiza odabranog područja.

Za potrebe istraživanja korišteni su digitalni ortofoto zapisi iz 1968. i 2023. godine. Analiza je provedena u dvjema prostornim razinama: odnosu zone prema urbanom prostoru Poreča te unutarnjoj strukturi same turističke zone. Preklapanjem analiziranih kartografskih prikaza identificirani su ključni problemi i/ili prostorni rizici koji su nastali kao posljedica turističke izgradnje, a koji utječu na kvalitetu i identitet obalne slike prostora.

Rezultati istraživanja pružaju uvid u načine na koje planski turistički razvoj transformira fizičku strukturu obale, pri čemu dolazi do izmjene osnovnih komponenti prostorne slike. Time se postavlja pitanje dugoročne održivosti takvog modela razvoja i potrebe za redefiniranjem prostornog planiranja u funkciji očuvanja identiteta obale.

2. Prostorno planiranje turizma i slika obale u Istri

2.1. Razdoblje masovnog turizma

Pojava masovnog turizma nakon Drugoga svjetskog rata dovela je do ubrzanog razvoja obalnih gradova, pri čemu je došlo do značajnih promjena u njihovoј prostornoj strukturi i vizualnoj percepciji. Izgradnja i formiranje novih turističkih zona nisu samo pridonijeli gospodarskoj ekspanziji, već su ujedno transformirali dotadašnju sliku obale, koja se do tada odlikovala prirodnim, nenarušenim krajobrazom.

Proces turističke urbanizacije provodio se planski, u skladu s tadašnjim prostorno-planskim pristupima. Tijekom 1960-ih godina stručnjaci razvijaju metodu izrade prostornih planova temeljenih na kvantitativnoj procjeni prostornog kapaciteta dijelova obale za prihvat turističkih sadržaja (Mattioni, 2003). Ova metoda omogućila je strukturirano i kontrolirano prostorno upravljanje, čime se nastojalo spriječiti prekomjerno opterećenje prirodnog prostora.

Na području Istre, planski dokumenti predviđali su realizaciju smještajnih kapaciteta u novim turističkim zonama, primarno izgradnjom hotela i apartmanskih kompleksa. Posebnost prostorne organizacije očituje se u njihovoј pozicioniranosti – turistički objekti nisu smještani neposredno uz obalu, već su postavljeni u pozadinu, ostavljajući obalne zone slobodnima za uređenje pejzažnih i rekreativskih površina. Takva prostorna koncepcija omogućila je oblikovanje šetnica i javnih prostora, koji su činili integralni dio turističke ponude, ali i služili lokalnoj zajednici kao prostor za rekreaciju i društvena okupljanja.

U razdoblju intenzivnog razvoja masovnog turizma u Istri je izgrađeno 56,7% planiranih turističkih smještajnih kapaciteta, a u općini Poreč 98,4% (Hrvatin, 2015). Ovi pokazatelji jasno ilustriraju učinkovitost i intenzitet provedbe planskih rješenja, ali i ukazuju na dubok i trajan utjecaj prostorno-urbanističkog planiranja na transformaciju vizualnog i funkcionalnog identiteta istarske obale u drugoj polovici 20. stoljeća, posebice u zoni grada Poreča.

Prostorno planiranje tijekom razdoblja masovnog turizma odigralo je ključnu ulogu u definiranju obalnog krajolika, istovremeno balansirajući između gospodarskih potreba i očuvanja obalnog prostora. Promjene koje su nastale kao rezultat tog procesa i danas oblikuju identitet i upotrebu priobalja, te predstavljaju temelj za daljnja istraživanja održivosti turističkog razvoja u kontekstu zaštite prostora.

2.2. Razdoblje „novog“ turizma

Nakon razdoblja intenzivnog masovnog turizma tijekom 1980-ih godina, vizualna i funkcionalna slika jadranske obale nastavlja se mijenjati pod utjecajem novih turističkih trendova. Ti trendovi javljaju se kao odgovor na negativne prostorne, ekološke i društvene učinke prethodnog modela razvoja turizma (Kušen, 2002). U fokusu novih koncepcija razvoja jest odmak od isključive orientacije na primarni turistički resurs – obalu i plažu – prema diversificiranim oblicima turističke ponude, uključujući ruralni, nautički, kulturni, enogastronomski i selektivne oblike turizma.

Raspadom Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije i osamostaljenjem Republike Hrvatske, dolazi do značajnih administrativno-prostornih promjena. Istarska obala se fragmentira na veći broj manjih jedinica lokalne samouprave, što ima izravan utjecaj na

prostorno planiranje i upravljanje turističkim razvojem. Novonastale općine i gradovi donose vlastite prostorne planove, često s naglaskom na uspostavu manjih turističkih zona.

U kontekstu Republike Hrvatske, Istarska županija zadržava vodeću poziciju po intenzitetu turističke aktivnosti. Prema podacima Ministarstva turizma (2023), upravo Istarska županija ostvaruje najveći broj noćenja među svim županijama tijekom posljednje dvije godine, što potvrđuje kontinuitet rasta turističke potražnje i aktivnosti, bez obzira na smanjenje intenziteta masovnog turizma u tradicionalnom smislu.

Ovi trendovi ukazuju na dugoročnu stabilnost i privlačnost regije kao turističke destinacije, ali istovremeno otvaraju pitanja o održivosti daljnje prostorne izgradnje i kapacitiranosti prostora za prihvat sve zahtjevnijih oblika turizma.

Postmasovni turizam u Istri obilježen je administrativnom decentralizacijom, prostornom fragmentacijom i nastavkom turističke valorizacije prostora. Unatoč promjeni paradigme s kvantitativnog na kvalitativni razvoj turizma, prostorni pritisci na obalu i dalje su izraženi. Potrebno je preispitati dugoročnu održivost postojećih razvojnih praksi i uvesti integrirane pristupe planiranju koji će uskladiti gospodarski razvoj s očuvanjem prostorne kvalitete i identiteta obale.

3. Čimbenici slike turističke zone

Kevin Lynch, u svom seminalnom djelu *The Image of the City* (1960.), postavlja temelje za razumijevanje načina na koji pojedinci percipiraju i interpretiraju urbani prostor. Polazeći od prepostavke da je percepcija grada oblikovana nizom mentalnih slika, Lynch identificira pet ključnih elemenata fizičke strukture prostora koji zajedno oblikuju njegovu prepoznatljivu sliku: putovi (*paths*), rubovi (*edges*), područja (*districts*), čvorovi (*nodes*) i reperi (*landmarks*). Ova analiza urbanih struktura, usmjerenja na subjektivnu percepciju korisnika prostora, ostaje do danas jedno od najutjecajnijih teorijskih polazišta za istraživanje slike prostora, budući da nije razvijena sveobuhvatnija teorija sličnog dosega nakon njezina objavljivanja.

Za potrebe istraživanja slike obale, Lynchov teorijski model djelomično je preuzet i prilagođen specifičnostima promatrano prostora. Od izvornih pet elemenata, u ovom istraživanju primjenjeni su čimbenici puta, ruba i područja, dok su čvor i reper izostavljeni zbog relativno uskog prostornog mjerila i ograničene vidljivosti tih elemenata u analiziranoj zoni.

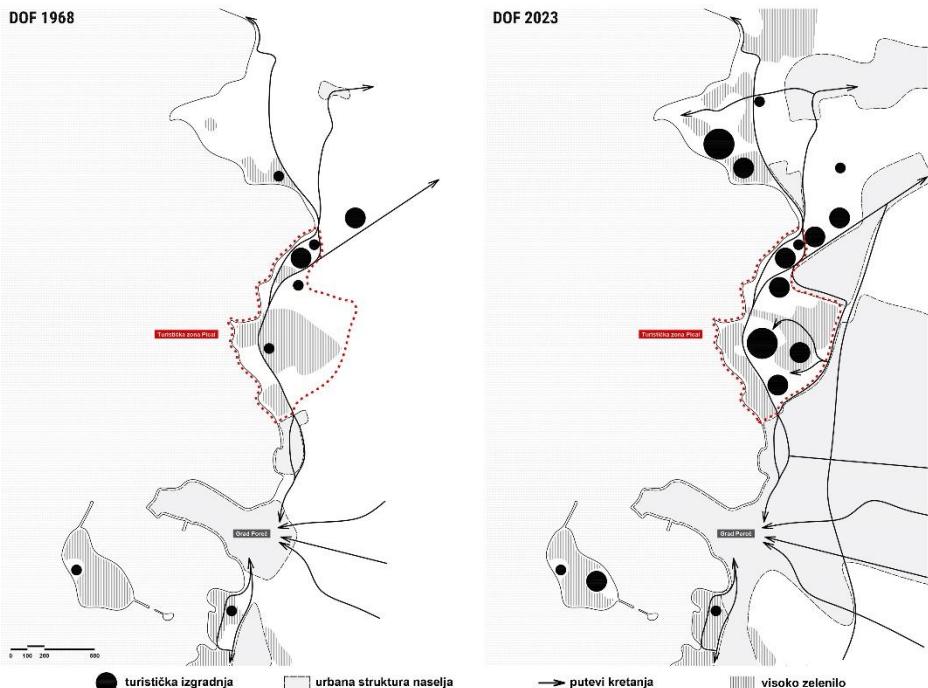
- Put se promatra u dva prostorna mjerila: u širem gradskom kontekstu, gdje se ispituje razina prostorne povezanosti turističke zone s urbanim tkivom Poreča, te unutar same turističke zone, s fokusom na unutarnje prometne i pješačke veze.
- Rub se definira kao granica između izgrađenih i neizgrađenih prostora, s posebnim naglaskom na njegovu poroznost, odnosno propusnost – sposobnost vizualnog i funkcionalnog prožimanja različitih prostornih jedinica.
- Područje obuhvaća obalne prostore različitih ambijenata, uključujući otvorene neizgrađene površine, visoko zelenilo, turističke objekte i urbanu strukturu grada. Analizira se međudobos i ritam izmjene ovih elemenata s ciljem identifikacije promjena u prostornoj kvaliteti.

Analiza slike prostora provodi se u dva mjerila. Prvo, mjerilo grada, koje obuhvaća širi kontaktni obalni prostor oko turističke zone Pical te užu gradsku jezgru Poreča. Drugo, mjerilo zone, definirano granicama obuhvata Urbanističkog plana uređenja Peškera–Pical–Špadići (2018.), fokusira se na unutarnju strukturu i morfološke karakteristike promatrane turističke zone.

Promjene u identificiranim čimbenicima slike prostora analiziraju se na temelju komparativne analize digitaliziranih ortofoto snimaka iz 1968. i 2023. godine. Cilj analize je utvrditi kako kontinuirani turistički razvoj utječe na transformaciju slike obale te identificirati potencijalne probleme i/ili prostorne rizike koji proizlaze iz dugotrajnog procesa prostorne intervencije.

Korištenje modificiranog Lynchevog modela omoguće višedimenzionalnu prostornu analizu s naglaskom na perceptivne, morfološke i funkcionalne aspekte prostora. Istraživanje pruža osnovu za vrednovanje učinaka turističkog razvoja na vizualni identitet i prostornu kvalitetu obalnog područja.

3.1. Slika obale turističke zone Pical u mjerilu grada Poreča



Slika 1. Čimbenici slike obale turističke zone Pical prema zračnim snimkama – mjerilo grada

Analizom zračne snimke iz 1968. godine, u gradskom mjerilu moguće je uočiti postojanje jedne dominantne prostorne osi – glavnog obalnog puta – koji uspostavlja fizičku vezu između tadašnje turističke zone Pical i urbanog središta Poreča. Ova komunikacijska linija slobodno se razvija kroz izrazito slabo izgrađeno područje obale, pri čemu čak 92% analiziranog prostora ostaje neizgrađeno (Tablica 1). Turistička izgradnja u tom razdoblju

pojavljuje se sporadično, najčešće integrirana unutar zona visokog zelenila, čime se održava prirodni ambijent prostora.

Prostorna organizacija ambijenata uočljivo je ritmizirana: između različitih tipova izgradnje postoje prostorne cezure, odnosno vizualne i funkcionalne prijelazne zone. Posebno je značajna prostorna separacija između gradskog tkiva i turističkog područja, koja se ostvaruje potezom visokog zelenila koji dopire do samog obalnog ruba (Slika 1).

Usporedba sa zračnom snimkom iz 2023. godine otkriva značajnu transformaciju prostorne strukture. Udio neizgrađenih površina smanjuje se na 49% analiziranog prostora (Tablica 1), što upućuje na snažan prostorni pritisak i intenzivnu urbanizaciju tijekom proteklih desetljeća. Grad se proširio u smjeru turističke zone te formirao jasan morfološki i vizualni rub prema njoj, čime se narušava prethodna otvorenost prostora.

Turistička izgradnja postaje sve izraženija i sve više dominira u prostornoj slici, dok se ritam izmjene prostornih ambijenata gubi – kontinuirana izgradnja narušava logiku prostorne artikulacije zabilježene 1968. godine. Iako prostorna cezura između grada i turističke zone, definirana visokim zelenilom, ostaje djelomično očuvana, njezina funkcija u sjevernom dijelu zone značajno je oslabljena zbog novijih intervencija u prostoru (Slika 1). Istovremeno, proširuje se mreža prometnih i pješačkih putova prema turističkoj zoni, čime se dodatno povećava njezina povezanost i dostupnost.

Komparativna analiza dvaju vremenskih presjeka pokazuje jasnu tendenciju intenzivne izgradnje i prostorne transformacije u smjeru smanjenja udjela prirodnih, neizgrađenih površina, pri čemu dolazi do redefinicije odnosa između grada i turističke zone. Iako su određeni elementi prostorne strukture (npr. cezura visokog zelenila) djelomično očuvani, njihov integritet je narušen, što upućuje na potrebu za preciznijim planiranjem usmjerenim na očuvanje kvalitete slike obale.

Tablica 1. Čimbenici kvalitete slike obale u mjerilu grada

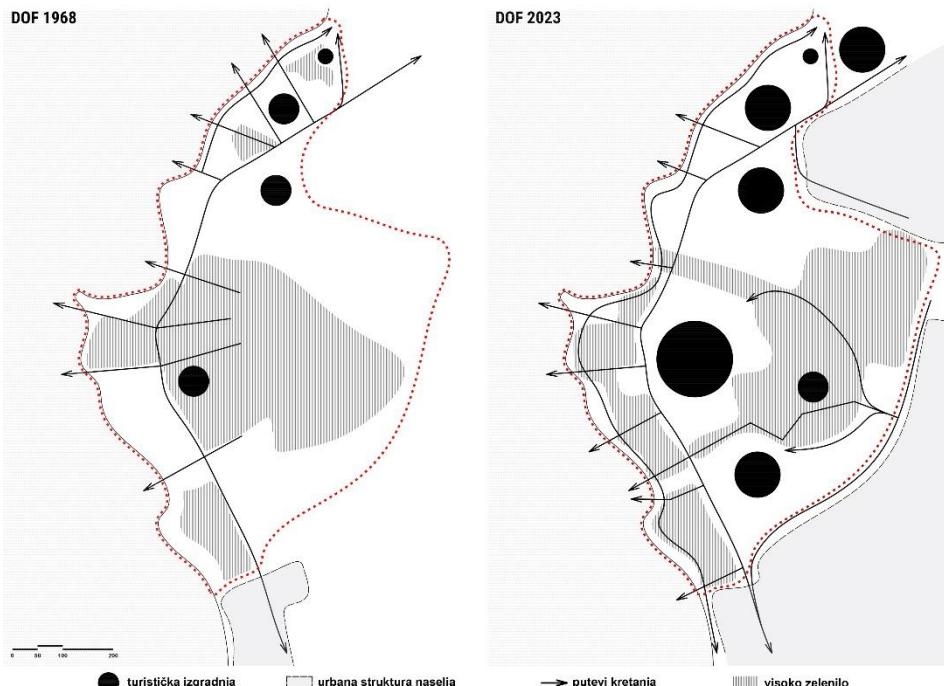
Čimbenik	Put (broj)	DOF 1968	2	DOF 2023	5
			porozan		neporozan
	Područje (udio neizgrađenog prostora)		92%		49%

3.2. Slika obale turističke zone Pical u mjerilu zone

U prostornom mjerilu same turističke zone, analiza zračne snimke iz 1968. godine otkriva strukturu u kojoj dominira jedan glavni uzdužni obalni put. Sekundarna prometna mreža razvijena je isključivo u sjevernom dijelu zone, neposredno uz postojeću hotelsku izgradnju, dok ostatak obale ne posjeduje uređenu komunikaciju neposredno uz morski rub. Rub zone u tom razdoblju karakterizira visoka razina poroznosti, što omogućuje uspostavu više poprečnih putova prema obali, čime se ostvaruje funkcionalna i vizualna povezanost unutrašnjosti zone s obalnim pojasom.

Prostorom turističke zone u 1968. godini dominira otvoreni, neizgrađeni prostor koji čini čak 96 % ukupne površine (Tablica 2). Turistička izgradnja prisutna je u ograničenom broju i mjerilu, te je prostorno fragmentirana. Između pojedinih građevinskih sklopova formirane su prostorne cezure koje osiguravaju ritam izmjene i jasnou separaciju između različitih funkcionalnih jedinica – kako unutar same turističke zone, tako i u odnosu prema gradskom području (Slika 2).

Na snimci iz 2023. godine vidljiva je značajna prostorna transformacija. Glavni uzdužni obalni put i dalje je prisutan, no uz njega se razvija i sekundarna obalna prometnica, čime se dodatno povećava dostupnost i intenzitet korištenja obalnog prostora. Broj poprečnih putova koji povezuju unutrašnjost zone s morem se povećava, no njihova dubina prodiranja u prostor ostaje ograničena. Rubovi između turističke zone i gradskog prostora postaju izraženiji, gubeći prijašnju propusnost, što ukazuje na proces morfološke zatvorenosti i stvaranja rigidnih granica (Slika 2).



Slika 2. Čimbenici slike obale turističke zone Pical prema zračnim snimkama – mjerilo turističke zone Pical

Usporedbom dvaju vremenskih presjeka vidljivo je povećanje udjela izgrađenih turističkih kapaciteta, što rezultira smanjenjem udjela otvorenog, neizgrađenog prostora s 96% na 88% ukupne površine zone (Tablica 2). Površine visokog zelenila zadržavaju se kao značajne prostorne cezure koje osiguravaju vizualnu i funkcionalnu distancu između obale i turističkih građevina. Međutim, prostorne cezure između pojedinih zona hotelske izgradnje postaju djelomično reducirane, što upućuje na trend povećane kompaktizacije izgrađenih struktura i gubitak prethodno prisutnog ritma prostorne izmjene.

Rezultati analize ukazuju na proces postupne, ali intenzivne transformacije turističke zone Pical u smjeru povećanja izgrađenosti, smanjenja poroznosti rubova i redefinicije prostorne povezanosti. Iako se određeni elementi poput zelenih cezura zadržavaju, njihov kapacitet za očuvanje otvorenosti prostora je sve više ograničen, što implicira potrebu za redefiniranjem planerskih kriterija usmjerenih na očuvanje prostorne kvalitete i identiteta obalnih turističkih zona.

Tablica 2. Čimbenici kvalitete slike obale u mjerilu turističke zone

Čimbenik	Put (broj)	DOF 1968	10	DOF 2023	14
	Rub (vrsta)		porozan		neporozan
	Područje (udio neizgrađenog prostora)		96%		88%

4. Zaključak

Praćenjem promjena odabralih čimbenika slike obale na primjeru turističke zone Pical u razdoblju od 55 godina moguće je jasno uočiti učinke planskog turističkog razvoja na fizičku transformaciju obalnog prostora. U početnoj fazi turističke aktivnosti, prostor karakterizira izrazito niska razina izgrađenosti. Dominiraju prostorne cenzure otvorenog, neizgrađenog prostora – visoko i nisko zelenilo – koje vizualno i funkcionalno odvajaju različite zone unutar prostora te očuvanje ruralnog karaktera obale. Komunikacijska infrastruktura u toj fazi je slabo razvijena, a obala još uvijek zadržava predturističku prostornu strukturu.

Tijekom više od pola stoljeća planskog turističkog razvoja, prostor doživljava značajne promjene. Povećava se broj i volumen hotelskih građevina, a ukupna izgrađenost prostora se značajno povećava. Analiza u dva prostorna mjerila potvrđuje ovaj trend: u gradskom mjerilu udio neizgrađenog prostora opada s 92 % na 49 %, dok u mjerilu same turističke zone taj udio pada s 96 % na 88 %. Ovaj proces ukazuje na sve izraženiji prostorni pritisak i postupnu kompaktnost izgrađenih struktura.

Istovremeno se razvija i mreža puteva, pri čemu se posebno ističe povećanje broja poprečnih komunikacija između uzdužne šetnice i obale, čime se unapređuje pristupačnost obalnog pojasa. Međutim, istovremeno dolazi do formiranja sve izraženijeg, nepropusnog ruba turističke zone prema gradskom prostoru, što dugoročno predstavlja potencijalni rizik za dostupnost obale lokalnom stanovništvu.

Prostorne cenzure, koje su u ranoj fazi razvoja imale funkciju očuvanja otvorenosti i vizualne protočnosti prostora, zadržane su između šetnice i morske obale. Međutim, cenzure između pojedinih hotelskih struktura vidljivo su reducirane, što upućuje na proces kontinuiranog prostornog spajanja turističkih zona, s posljedičnim negativnim učinkom na kvalitetu vizualne slike obale.

Neizgrađeni javni prostori obale predstavljaju ključan čimbenik očuvanja prostorne kvalitete i identiteta obalnog krajobraza. Njihova vrijednost ogleda se u očuvanju prirodnih karakteristika prostora te u osiguravanju pristupačnosti obale široj javnosti putem mreže javnih puteva. Stoga je njihovo pažljivo planiranje i dugoročna zaštita od izgradnje nužna komponenta održivog razvoja turističkih zona. Osiguravanje ravnoteže između turističke eksploatacije i dostupnosti obale lokalnoj zajednici ključan je izazov suvremenog prostornog planiranja u priobalnim područjima.

Literatura

- [1] Global and regional tourism performance, <https://www.unwto.org/tourism-data/global-and-regional-tourism-performance>, pristupljeno: 13.05.2025.
- [2] HNB Eurosustav: Prihodi od turizma u 2023., <https://www.hnb.hr/-/prihodi-od-turizma-u-2023-veci-za-11-4-posto>, pristupljeno: 13.05.2025.

- [3] Kušen, E.: Turizam i prostor Klasifikacija turističkih atrakcija, Prostor, vol. 9, 2001., 1(21) stranica (1-12), <https://doi.org/10.31522/p>
- [4] Lynch, K.: The image of the city, 4, MIT Press, 1960.
- [5] Hrvatin, D.: Urbanistički pokazatelji izgradnje turističkih zona – primjer priobalja zapadne Istre, 1, Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, 2015.
- [6] Mattioni, V.: Jadranski projekti: projekti južnog i gornjeg Jadrana: 1967.-1972, 1, Urbanistički institut Hrvatske, 2003.
- [7] Kušen, E.: Turistička atrakcijska osnova, 1, Institut za turizam, 2002.
- [8] Ministarstvo za turizam: Turizam u brojkama 2023., <https://www.htz.hr/hr-HR/informacije-o-trzistima/analize-s-područja-turizma/turizam-u-brojkama>, pristupljeno: 13.05.2025.
- [9] Grad Poreč-Parenzo: UPU Peškera - Pical - Špadići (UPU-26), <https://www.porec.hr/prva.aspx?stranica=35091&pid=5>, pristupljeno: 13.05.2025.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.19>

Određivanje činitelja oporavka narušenih krajolika

Factors of landscape regeneration

Ria Tursan¹, Ana Mrda¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, rtursan@arhitekt.hr, amrdja@arhitekt.hr

Sažetak

Istraživanje se bavi suvremenim pristupima oporavku narušenih vangradskih krajolika kroz integraciju biljaka, životinja, tehnologije, umjetnosti i arhitekture. Cilj je ispitati potencijal potpomognutih krajolika i ulogu interdisciplinarnosti u pejzažnom planiranju. Metodom usporedbene analize četiri realizirana projekta koji uključuju više činitelja oporavka utvrđeno je da tehnologija ima ključnu ulogu, dok arhitekti djeluju kao posrednici između prirode, znanosti i zajednice. Rad potvrđuje potrebu za novim modelima planiranja i arhitekture koji krajolik tretiraju kao dinamičan sustav oporavka, a prostorno planiranje kao alat ekološke i društvene transformacije.

Ključne riječi: oporavak narušenih krajolika, potpomognuti krajolik, posthumanistički krajolik, more-than-human principi

Abstract

Research explores contemporary approaches to the regeneration of degraded non-urban landscapes through the integration of plants, animal species, technology, art, and architecture. The aim is to examine the potential of assisted landscapes and the role of interdisciplinarity in landscape planning. Using a comparative analysis of four completed projects that incorporate multiple agents of recovery, the study identifies technology as a key driver, while positioning architects as mediators between nature, science, and the community. The findings underscore a need for new planning and architectural concepts that conceive of the landscape as a dynamic system of recovery and spatial planning as a tool for ecological and social transformation.

Keywords: degraded landscapes regeneration, assisted landscape, posthuman landscape, more-than-human design

1. Uvod

Suvremeni izazovi degradacije krajolika klimatskim promjenama, gubitkom bioraznolikosti i ekološkim poremećajima zahtijevaju nova prostorna rješenja koja nadilaze tradicionalne urbanističke i arhitektonske pristupe. U tom kontekstu, javlja se potreba za oporavkom narušenih krajolika te mogućnosti stvaranja tzv. potpomognutih krajolika. Osim što fizički obnavljaju prostor, oni omogućuju nove uloge i logike korištenja, uz primjenu interdisciplinarnih pristupa. U istraživanjima iz područja ekologije i obnove krajolika pojam potpomognuti krajolik (eng. *assisted landscape*) označava krajolik čiji se razvoj, obnova ili funkcija odvija uz svjesnu ljudsku intervenciju. Veže se najčešće uz dva tipa obnove kojima je cilj vratiti krajolik izmijenjen ljudskom aktivnošću u zdravo stanje. Vraćanje u stanje divljine (*rewilding*) štiti krajolik od ljudske intervencije i omogućuje prirodi da se njen rast odvija neovisno, dok kod potpomognute restauracije (*assisted restoration*) čovjek olakšava ili ubrzava prirodne procese obnove.

Prethodno provedena istraživanja konkretnih primjera [1] definirala su oporavak krajolika kao alat za promjene [2], uspostavila pregled tzv. *more-than-human* principa u oblikovanju [3] te istražila mogućnosti spajanja biljnog svijeta s tehnologijom i umjetnom inteligencijom u stvaranju novih prostora krajolika ili perivoja [4,5].

Pregledom i usporedbom primjera oporavka narušenih krajolika, ovim će se radom utvrditi načini integracije različitih činitelja u procesima oporavka. Naglasak istraživanja je na utjecaju biljnih i životinjskih vrsta, tehnologije te novih oblika *more-than-human* principa - suživota koji podrazumijevaju pristup koji nadilazi čovjeka. Odnosi se na suvremeni teorijski i praktični pristup koji propituje antropocentrične paradigme te nastoji uključiti ne-ljudske činitelje (poput životinja, biljaka, mikroorganizama, tehnologije i umjetne inteligencije) kao ravnopravne sudionike u prostornim procesima. Ovaj pristup proizlazi iz posthumanističkih, ekoloških i interdisciplinarnih istraživanja te se temelji na spoznaji da su ljudi samo jedan od mnogih međusobno ovisnih činitelja u kompleksnim mrežama.

2. Teorijski okvir istraživanja

Rad istražuje temu iz urbanističkog i arhitektonskog motrišta, a propituje procese na razmeđi prirodnih i antropogenih. Teorijski okvir istraživanja se temelji na suvremenim istraživačkim konceptima koji krajolik promatraju kao dinamičnu, višeslojnu ekološko - prostornu mrežu. Među relevantnim pristupima ističu se *weak urbanism* [6], *transspecies urban theory* [7], *human-animal studies* [8], koncept *non-human actors* [9] te posthumanističke teorije [10]. Rad se smješta između teorijskih paradigma i njihove praktične urbanističko - arhitektonske primjene, pri čemu je težište na oporavku narušenih krajolika kroz integraciju raznolikih ljudskih i ne-ljudskih činitelja oporavka. Ispituju se interdisciplinarni metodološki pristupi koji redefiniraju ulogu urbanista i arhitekata kao aktivnih sudionika u procesima prostorne transformacije, u skladu s novim etičko - ekološkim zahtjevima.

3. Metoda istraživanja

Istraživanje se temelji na sustavnom pregledu i usporedbenoj analizi primjera oporavka narušenih krajolika odabranih temeljem utvrđenih kriterija. Putem njihovog pregleda i usporedbe utvrđuju se tipovi zahvata u krajolik temeljem implementiranja i integriranja različitih činitelja oporavka. U istraživanje je uključeno četiri (4) recentnih primjera realiziranih projekata oporavka narušenih vangradskih krajolika nastalih nakon 2000. godine, a koji su publicirani u znanstvenoj ili stručnoj literaturi ili su nagrađivani primjeri.

4. Pregled analiziranih primjera oporavka narušenih krajolika

Climavore, eksploatacija mineralnih sirovina, okolica Istanbula, Turska, 2015.

Na periferiji Istanbula, napuštene poplavljene rudničke jame nastanjuju stočari i lutajući vodeni bivoli, koji njeguju bogati močvarni ekosustav na ruševinama nekadašnjih miniranih i nedavno ponovno upotrijebljenih krajolika. Višegodišnji proces mapiranja bivših i sadašnjih kretanja bivila i popratne bioraznolikosti pridonio je političkim pregovorima za njihovo trajno zadržavanje u krajoliku. Okvir pod kojim djeluju od 2015. naziva se Climavore, dugogodišnji, interdisciplinarni projekt putem kojeg se istražuje kako se prehrambeni sustavi mogu prilagoditi klimatskim promjenama izazvanima ljudskim djelovanjem. Projekt od 2023. započinje sa znanstvenim istraživanjima na Royal College of Art u Londonu koja vode arhitekti. [11]

Jade Eco Park, napuštena zračna luka, okolica Taichunga, Tajvan, 2016.

Park u Taichungu, u Tajvanu, preobražava bivšu zračnu luku u javni prostor otporan na klimatske promjene. Park od 68 hektara koristi znanstvene podatke za mapiranje mikroklima, oblikujući tri glavne staze (hladnu, suhu i čistu), od kojih je svaka prilagođena biljkama i uređajima za poboljšanje udobnosti i kvalitete zraka. Arhitekt je u planiranju i projektiranju parka primijenio sva dostupna znanja o klimi navedenog prostora. Umjesto da oponaša prirodu, park funkcioniра kao urbani ekosustav, upravljajući toplinom, zagađenjem i oborinskim vodama. S više od 10000 stabala i 300 klimatskih uređaja, oporavlja okoliš kroz koncept utemeljen na fizici, održivosti i taoističkoj filozofiji. [12]

Art Biotope Water Garden, potencijalna sječa šumskog područja, regija Nasu, Japan, 2019.

Primjer predstavlja oblik oporavka krajolika koji se temelji na simboličkoj obnovi kroz arhitektonsko i perivojno oblikovanje. Drveće, izmješteno iz svog izvornog konteksta, ponovno je postavljeno u precizno orkestrirani umjetni krajolik, pozivajući se na estetiku tradicionalnog japanskog vrta čime prekida funkcionalne veze s ekosustavima iz kojih potječu. Projekt utjelovljuje oblik estetskog oporavka, budući da je tijekom pripremnih radova za izgradnju obližnjeg hotela planirana sječa šume koja se nalazila na lokaciji. Umjesto potpunog uklanjanja vegetacije, očuvan je postojeći ekosustav i kontinuitet lokalne flore, za što su korištena znanja iz arborikulture, hidrologije, ekologije, geodezije, kao i suvremene tehnologije, gdje je arhitekt koordinirao navedena znanja. [13]

Pixel farming, intenzivna poljoprivredna proizvodnja, okolica Amsterdama, Nizozemska, 2022.

Pejzažni projekt nudi oporavljuajuću alternativu intenzivnoj industrijskoj poljoprivredi dijeleći polja na male, različite parcele ("piksele") koji podržavaju međusjeve, biološku raznolikost i prirodnu kontrolu štetočina. Umjesto prilagođavanja prirode strojevima, zamišlja nove alate za složene, samoregulirajuće ekosustave. Proučavan je pojas od 12x3 km ruralne Nizozemske, sjeverno od Amsterdama. Korišten je softver koji pretvara krajolike u okruženja vođena podacima. Pixel farming spaja ekologiju, tehnologiju i korištenje zemljišta u novu vrstu krajolika koji je digitalno informiran, ekološki osviješten i funkcionalno raznolik. [14]

5. Rezultati

Rezultati provedene analize pokazuju pet različitih činitelja koji su aktivno integrirani u navedene primjere oporavka narušenih krajolika: životinje, biljke, tehnologija, umjetnost te arhitektura/urbanizam (Tablica 1).

Tablica 1. Pregled primjera i aktivnih činitelja obnove

naziv projekta	godina	prvotno korištenje	činitelj oporavka krajolika					novi korištenje
			životinje	biljke	tehnologija	umjetnost	planiranje / arhitektura	
Climavore	2015.	eksploatacija mineralnih sirovina	+		+		+	ekstenzivno stočarstvo
Jade Eco Park	2016.	napuštena zračna luka		+	+		+	javni klimatski park
Art Biotope Water Garden	2019.	potencijalna sjeća šumskog područja		+	+	+	+	javni šumski park
Pixel farming	2022.	intenzivna poljoprivredna proizvodnja	+		+		+	ekološka poljoprivreda

Navedeni primjeri potvrđuju tezu o potrebi interdisciplinarnosti. Uključene su različite struke i područja znanosti. Projekt *Climavore* uključuje biologiju, antropologiju, ekologiju, zoologiju, geografiju, pedologiju, gastronomiju, politiku i agronomiju te se ovdje urbanizam i arhitektura promatraju kao alat za ekološku i političku intervenciju, a arhitekt kao posrednik između prirode, zajednice i politike. Projekt *Jade Eco Park* uključuje klimatologiju, meteorologiju, krajobraznu arhitekturu, ekologiju, znanost o okolišu i filozofiju. Projekt koristi znanstvene metode i filozofske principe za planiranje i projektiranje prostora koji ne samo da je funkcionalan, već i ekološki aktivan i kulturno ukorijenjen. Projekt *Art Biotope Water Garden*

uključuje povijest umjetnosti, botaniku, hidrologiju, filozofiju i ekologiju te je ovdje arhitekt posrednik između umjetnosti, prirode i očuvanja. Projekt dobiva i kritički karakter time što osporava planirano uništenje prirode i nudi alternativu kroz estetski oporavak prostora. Projekt *Pixel farming* uključuje agronomiju, ekologiju, digitalne tehnologije, geoinformatiku i podatkovnu znanost. Projekt pokazuje kako se tehnologija i ekologija putem urbanističkih smjernica spajaju u novi oblik produktivnog krajolika koji istodobno oporavlja prirodu i koristi digitalne alate za upravljanje.

6. Zaključak

Na temelju analize recentnih primjera vangradskih oporavljenih krajolika, zaključuje se da postoji pet (5) različitih činitelja koji, kao aktivni nositelji promjena, mogu utjecati na oporavak narušenih krajolika. Za razliku od tradicionalno uvriježenih metoda biološkog oporavka biljnim materijalom, navedeni primjeri ukazuju na mogućnosti primjene različitih višestrukih činitelja oporavka. Usporedbom je potvrđena primjena tehnologije u svim analiziranim slučajevima što ukazuje na konceptualni preokret i inoviranje promišljanja modela preobrazbe suvremenih krajolika. Pritom je važno istaknuti doprinose opravaka koji se temelje i na uvođenju novih načina korištenja.

Projekti jasno ilustriraju interdisciplinarni karakter suvremenog pejzažnog planiranja i arhitekture, gdje su prirodne i društvene znanosti, tehnologija, umjetnost i filozofija jasno povezane. U svakom od primjera, arhitekt ne djeluje samo kao projektant prostora, već i kao istraživač, aktivist, posrednik i ekolog. Iz navedenih primjera je vidljivo da ova prostorna rješenja nadilaze tradicionalne planerske i arhitektonске pristupe, na način da demonstriraju transdisciplinarni i integrativni karakter suvremenih praksi. Umjesto jednodimenzionalnog planiranja korištenja prostora, ovi projekti razvijaju integralni/sustavni pristup temeljen na ekologiji, tehnologiji, filozofiji, umjetnosti i društvenim odnosima. Time planiranje i arhitektura postaju oblik brige, pregovora i oporavka, čime nadilaze svoje tradicionalne pristupe.

Zaključno, navedeni primjeri oporavka krajolika otvaraju mogućnost stvaranja potpomognutih krajolika, prostorne sustave oblikovane uz aktivnu upotrebu tehnologije, znanosti, umjetnosti i međuvrsnih odnosa. Oni predstavljaju nova gledišta u kojima krajolik nije samo scenografija ili resurs, već aktivan, hibridan sustav oblikovan međuvisnošću prirodnog, tehnološkog i kulturnog. U planerskoj i arhitektonskoj praksi predstavljaju jedan od mogućih odgovora na ekološke izazove 21. stoljeća.

U nastavku istraživanja utvrdit će se kriteriji za utvrđivanje narušenih krajolika u Hrvatskoj, poput primjerice zapuštenih poljoprivrednih područja, koji imaju potencijal oporavka po modelu potpomognutih krajolika.

Literatura

- [1] Barbanente, A., Grassini, L.: Landscape regeneration and place-based development in marginal areas: learning from an Integrated Project in Southern Salento, City Territ Archit 11, 26, 2024., DOI: <https://doi.org/10.1186/s40410-024-00247-3>
- [2] Smithwick, E. A. H., Baka, J., Bird, D., Blaszczak-Boxe, C., Cole, C. A., Fuentes, J. D., Gergel, S. E., Glenna, L. L., Grady, C., Hunt, C. A., Iulo, L. D., Kaye, J., i Keller, K.:

Regenerative landscape design: an integrative framework to enhance sustainability planning, *Ecology and Society*, 28(4), Article 5., 2023., DOI: <https://doi.org/10.5751/ES-14483-280405>

- [3] Vacanti, A., Burlando, F., Nevoso, I., i Menichinelli, M.: The More-Than-Human Trend in Design Research: A Literature Review. *Diid — Disegno Industriale Industrial Design*, (DSI 1), 2023., DOI: <https://doi.org/10.30682/diiddsi23t1s>
- [4] Hamann, H., Divband Soorati, M., Heinrich, M.K., Hofstadler, D.N., Kuksin, I., Veenstra, F., Wahby, M., Nielsen, S.A., Risi, S., Skrzypczak, T., Zahadat, P., Wojtaszek, P., Støy, K., Schmickl, T., Kernbach, S., i Ayres, P.: Flora robotica - An Architectural System Combining Living Natural Plants and Distributed Robots, 2017., DOI: ArXiv, abs/1709.04291.
- [5] Xing, Y., Gan, W. i Chen, Q.: Artificial intelligence in landscape architecture: a survey, *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.*, 2025., DOI: <https://doi.org/10.1007/s13042-025-02536-w>
- [6] Branzi, A.: The Weak Metropolis, str. 108 – 117 iz Mostafavi, M. i Doherty, G., *Ecological Urbanism*, Zurich: Lars Muller Publishers, 2016., ISBN 978-3-03778-467-9
- [7] Wolch, J. R., West, K., i Gaines, T. E.: Transspecies Urban Theory, *Sage Journals*, Volume 13, Issue 6, 1995., DOI: <https://doi.org/10.1068/d130735>
- [8] Haraway, D.: When Species Meet, Minneapolis: University of Minnesota Press, 2017., ISBN 978-0-8166-5046-0
- [9] Tsing, A. L.: *The Mushroom at the End of the World: On the Possibility of Life in Capitalist Ruins*, Princeton: Princeton University Press, 2015., DOI: 10.2307/j.ctvc77bcc
- [10] Braidotti, R.: Posthuman Feminism, Cambridge: Polity Press, 2021., ISBN 978-1-5095-1807-4
- [11] Archis, Volume 66: The guide to designing with animals, plants and other critters, Archis Foundation, 2024., ISBN-13: 978-90-77966-98-3
- [12] King, G. K.: Building with heat, humidity and light: Jade Eco Park in Taichung by Philippe Rahm, *The Architectural Review* (2017, June), *Water* (Issue 1437), 2017., ISSN: 0003-861X
- [13] Yoneda, K.: Arboreal artifice: Art Biotop Water Garden by Junya Ishigami + Associates, *The Architectural Review*, (2021, February), *Garden* (Issue 1478), 2021., ISSN: 0003-861X
- [14] Koolhaas, R., OMA, AMO, Harvard Graduate School of Design i Guggenheim Museum: *Countryside*, a report, Taschen, 2020., ISBN-13: 978-3-8365-8439-5

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.20>

Slobodno lJuljanje krutog bloka na elastičnoj gredi

Free rocking of a rigid block on the elastic beam

Katarina Tutić¹, Teo Mudrić¹, Nina Čeh¹, Martin Arnold²

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmila Matejčić 3, 51000 Rijeka, Hrvatska

(2) Institute of Mathematics, Martin Luther University Halle-Wittenberg, Theodor-Lieser-Street 5, 06120 Halle (Saale), Germany

Sažetak

Rad predstavlja numerički model slobodnog lJuljanja krutog aluminijskog bloka na Euler-Bernoullijevoj elastičnoj gredi, razvijen u Pythonu. Model kombinira metodu konačnih elemenata za gredu i pristup ne-glatke kontaktne dinamike (NSCD) za opis normalnog i tangencijalnog kontakta, uz zadovoljenje Signorini-Coulombovih uvjeta. Vremenska integracija provodi se Jean–Moreau θ shemom, što omogućuje stabilno rješavanje diskontinuiteta brzina. Za provjeru točnosti izведен je eksperiment u kojem se rotacijski pomaci bloka prate sustavom ZEISS Aramis pri 165 slika/s. Eksperimentalnom validacijom uspoređene su numeričke i eksperimentalne veličine kuta zaokreta i kutne brzine, čime je potvrđena vjerodostojnost prikazanog numeričkog postupka.

Ključne riječi: ne-glatka kontaktna dinamika (NSCD), metoda konačnih elemenata (FEM), Jean–Moreau θ metoda

Abstract

The study presents a numerical model of the free rocking of a rigid aluminium block on an Euler–Bernoulli elastic beam, implemented in Python. The model combines a finite-element formulation for the beam with a non-smooth contact dynamics (NSCD) approach to capture normal and tangential contact while strictly enforcing the Signorini–Coulomb conditions. Time integration is performed with the Jean–Moreau θ scheme, enabling stable treatment of velocity discontinuities. To verify accuracy, an experiment was conducted in which the block's rotational displacements were tracked with a ZEISS Aramis system at 165 fps. Experimental validation compared simulated and measured rotation angles and angular velocities, thereby confirming the reliability of the proposed numerical procedure.

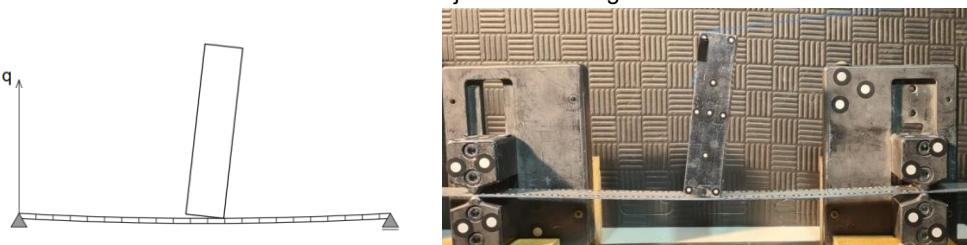
Keywords: non-smooth contact dynamics (NSCD), finite element method (FEM), Jean–Moreau θ method

1. Uvod

Problem lJuljanja krutog bloka na elastičnoj gredi karakterizira ne-glatko dinamičko ponašanje zbog učestalih promjena kontaktnog stanja između bloka i grede. Takva pojava ima široke inženjerske primjene, od stabilnosti suhozidnih konstrukcija bez veziva do dizajna pasivnih sustava disipacije seizmičke energije. Klasične glatke metode vremenske integracije ne mogu pouzdano simulirati nagle diskontinuitete brzina i impulsa, pa se u literaturi kao robusno rješenje nameću (NSCD) time-stepping metode [1] s konstantnim korakom. Cilj ovoga rada jest proširiti metodološki okvir predstavljen u Mudrić et al. [2] kroz eksperimentalnu validaciju lJuljanja krutog bloka na elastičnoj gredi. U tu svrhu primjenjujemo Jean-Moreau metodu [3] i uspoređujemo numeričke rezultate s eksperimentalno izmjerenim kutevima zaokreta bloka, kako bismo ocijenili konvergenciju NSCD pristupa u problemu modeliranja kontakta krutog i deformabilnog tijela.

2. Opis modela

Na Slici 1. prikazan je dvodimenzionalni model slobodnog lJuljanja krutog bloka na elastičnoj slobodno oslonjenoj gredi. Kruti blok je u početnom položaju naslonjen na gredu u jednoj točki, odakle je pušten da se slobodno kreće pod djelovanjem gravitacije. Kontaktna interakcija između bloka i grede ograničena je isključivo na rubne točke bloka, a greda je modelirana kao kontinuirana Euler–Bernoullijeva elastična greda.



Slika 1. Model krutog bloka na elastičnoj gredi

2.1. Modeliranje grede

Deformacija grede opisana je Euler–Bernoullijevom parcijalnom diferencijalnom jednadžbom [4]:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + c \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = f(x,t) \quad (1)$$

gdje je EI krutost, c koeficijent prigušenja, ρA masa po jedinici duljine, a $f(x,t)$ vanjsko opterećenje. Za numeričko rješavanje (1) greda se diskretizira na niz konačnih elemenata [5]. U svakom elementu pomak $w(x,t)$ aproksimira se kubnim polinomom, što omogućuje određivanje pomaka i zaokreta u svim točkama elemenata. Na temelju odabranih funkcijskih oblika izvode se lokalne matrice krutosti, koje se zatim sastavljaju u globalne matrice uz primjenu odgovarajućih rubnih uvjeta. Time se dobiva sustav običnih diferencijalnih jednadžbi drugog reda:

$$M_{be} \ddot{q}_{be}(t) + C_{be} \dot{q}_{be}(t) + K_{be} q_{be}(t) = P_{be}(t) + r_{be}(t) \quad (2)$$

gdje je q_{be} vektor pomaka čvorova, P_{be} vektor vanjskih sila, a r_{be} vektor kontaktnih sila.

2.2. Modeliranje bloka

Blok se modelira kao potpuno kruto tijelo, pri čemu su moguća mjesta kontakta definirana na četiri rubne točke. Svaka od tih točaka ima tri stupnja slobode. Jednadžba gibanja drugog reda stoga glasi:

$$M_{bl}\ddot{q}_{bl}(t) = F_{bl}(t) + r_{bl}(t) \quad (3)$$

gdje je:

$$M_{bl} = \begin{bmatrix} m_{bl} & 0 & 0 \\ 0 & m_{bl} & 0 \\ 0 & 0 & I_{bl} \end{bmatrix}, \quad \ddot{q}_{bl}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{X}_{bl}(t) \\ \ddot{Y}_{bl}(t) \\ \ddot{\varphi}_{bl}(t) \end{bmatrix}, \quad F_{bl}(t) = \begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \\ M_{bl}(t) \end{bmatrix}, \quad r_{bl}(t) = \begin{bmatrix} r_{x,bl}(t) \\ r_{y,bl}(t) \\ M_r(t) \end{bmatrix}$$

gdje su m_{bl} masa bloka, I_{bl} njegov moment tromosti, $F_{bl}(t)$ vektor vanjskih sila i momenata, a $r_{bl}(t)$ vektor kontaktnih sila i momenata.

2.3. Kontaktni uvjeti

Za potpun, fizikalno konzistentan opis gibanja bloka na elastičnoj gredi potrebno je u jednadžbe gibanja uvesti komplementarne uvjete koji sprječavaju penetraciju i pravilno modeliraju trenje u kontaktu. Signorinijeva relacija (4) osigurava da vrh bloka nikada ne prodire kroz površinu grede. Dok god postoji razmak između bloka i grede, normalna kontaktna sila ostaje jednaka nuli, a tek kada se razmak potpuno zatvori razvija se pozitivna reakcija koja sprječava daljnju penetraciju. Coulombov zakon trenja (5) ograničava tangencijalnu silu na vrijednost jednaku umnošku normalne sile i koeficijenta trenja te blok ostaje nepomičan dok ta granica nije dosegnuta. Nakon što se prag poveće započinje relativno klizanje pri čemu trenje uvijek djeluje suprotno smjeru pomaka.

$$U_n^+(t) \geq 0, \quad R_n(t) \geq 0, \quad U_n^+(t)R_n(t) = 0 \quad (4)$$

$$\|R_t\| \leq \mu R_n, \text{ a ako je } U_t^+ \neq 0, \quad R_t \leq -\mu R_n \frac{U_t^+}{\|U_t^+\|} \quad (5)$$

3. Jean–Moreau θ time stepping metoda

Jean–Moreau θ metoda [3] predstavlja neglatku time–stepping metodu osmišljenu za stabilnu integraciju dinamičkih sustava u kojima Signorini–Coulombovi kontaktni uvjeti uvode diskontinuitete brzina i sile. U svakom koraku, metoda simultano rješava diskretizirane jednadžbe gibanja i pripadajući linearno komplementarni problem kontakta, čime se zadovoljavaju zahtjevi nepenetracije i trenja. Parametar θ određuje stupanj implicitnosti: kod $\theta = 0$ dobivamo eksplicitnu shemu, kod $\theta = 1$ potpuno implicitnu shemu. Tijekom vremenskog intervala $h = t^{i+1} - t^i$ jednadžbu gibanja integrira se tako da u idućem vremenskom koraku dobijemo:

$$\dot{q}^{i+1} = \dot{q}^i + hWF^{i+1} + hWr^{i+1} \quad (6)$$

$$q^{i+1} = q^i + h(\theta\dot{q}^{i+1} + (1-\theta)\dot{q}^i) \quad (7)$$

Globalni pomaci, brzine, te vanjske i unutarnje sile grupirane su u vektorima:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_{bl} \\ \dot{q}_{be} \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} q_{bl} \\ q_{be} \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} r_{bl} \\ r_{be} \end{bmatrix}, \quad F^{i+1} = \begin{bmatrix} \Delta t \theta F_{bl}^{i+1} + \Delta t(1-\theta)F_{bl}^i \\ -K_{be}(h\theta\dot{q}_{be}^i + q_{be}^i) - C_{be}\dot{q}_{be}^i + \theta P_{be}^{i+1} + (1-\theta)P_{be}^i \end{bmatrix}$$

pri čemu prvi blok komponenata odgovara gibanju krutog bloka, a drugi elastičnoj gredi.

Matrica W iz jednadžbe (6) definirana je kao:

$$W = \begin{bmatrix} M_{bl}^{-1} & 0 \\ 0 & W_{be} \end{bmatrix}, \quad W_{be} = (M_{be} + h\theta C_{be} + h^2\theta^2 K_{be})^{-1}$$

gdje M_{bl}^{-1} predstavlja inverznu masu krutog bloka, dok matrica W_{be} , formirana kombiniranjem parametara mase, krutosti i prigušenja grede, čini njenu efektivnu inverznu matricu i osigurava uravnoteženo modeliranje elastičnog i viskoznog odziva sustava u svakom koraku integracije. Naposljetku, brzina u idućem vremenskom koraku (7) zapisuje se kao zbroj komponente neovisne o kontaktu i komponente ovisne o kontaktnoj interakciji:

$$\dot{q}^{i+1} = \dot{q}^{free} + hWr^{i+1} \quad (8)$$

3.1. Modeliranje kontakta

Prilikom time-stepping integracije detekciju kontakta provodimo u svakom koraku kroz evaluaciju funkcije razmaka, koja mjeri udaljenost između parova kontaktnih točaka. Kontakt se smatra uspostavljenim kada funkcija razmaka dosegne vrijednost nula. Zatim globalne brzine \dot{q} i kontaktne sile r transformiramo u lokalni referentni sustav pomoću ortonormirane matrice Q :

$$U = Q\dot{q}^{i+1}, R_{i+1} = Qr_{i+1} \quad (9)$$

gdje su $U = [U_n, U_t]^T$ i $R = [R_n, R_t]^T$ normalne i tangentne komponente relativne brzine, odnosno impulsne sile kontaktne sile. U lokalnom koordinatnom sustavu diskretizirana jednadžba gibanja (8) poprima oblik:

$$U_{i+1} = U_{free} + HhR_{i+1}, \quad H = QWQ^T \quad (10)$$

pri čemu je U_{free} relativna brzina koja bi se ostvarila bez reakcija, dok operator H povezuje impulse i brzine uzimajući u obzir inverznu masu bloka i efektivnu matricu grede W_{be} . Kontaktne impulse određujemo rješenjem Signorini–Coulombova uvjeta:

$$U_{n,i+1} \geq 0, \quad R_{n,i+1} \geq 0, \quad U_{n,i+1}R_{n,i+1} = 0 \quad (11)$$

$$\|R_t\| \leq \mu R_n, \quad \text{a ako je } U_{t,i+1} \neq 0, \quad R_t \leq \mu R_n \frac{U_{t,i+1}}{\|U_{t,i+1}\|} \quad (12)$$

Kada je aktivan samo jedan par točaka, sustav (10) zajedno s uvjetima (11)–(12) daje izraz za R_{i+1} . Kada je istodobno aktivno više od jednog kontaktne sile, za svaki se par c konstruira vlastita ortonormirana matrica Q^c . Relacija između relativne brzine i impulsa u tom paru tada više ne ovisi samo o njegovu vlastitom impulsu, nego i o impulsima svih ostalih parova:

$$U_{i+1}^c = U_{free} + \sum_{d \neq c} H^{cd} h R_{i+1}^d + H^{cc} h R_{i+1}^c \quad (13)$$

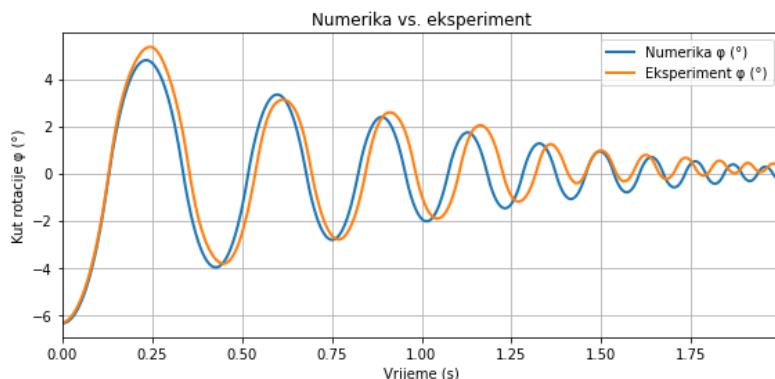
Budući da je impuls R_{i+1}^c svakoga para izravno ovisan o nepoznatim impulsima ostalih parova, sustav se rješava iteracijskim postupkom koji započinje nul-vektorom impulsa. U svakoj iteraciji ažurira se impuls jednoga kontaktne sile pri čemu se u (13) uvrštavaju procjene preostalih impulsova, a novi se impuls određuje iz Signorini–Coulombovih komplementarnih uvjeta. Iteracije se nastavljaju sve dok se razlika impulsova dvaju uzastopnih koraka ne spusti ispod propisane tolerancije ili dok se ne dosegne najveći dopušteni broj koraka. Po konvergenciji impulsi se transformiraju natrag u globalni sustav koordinata i uključuju u jednadžbe gibanja bloka i pridruženih čvorova grede.

4. Eksperimentalna ispitivanja

U ovom eksperimentu slobodnog lJuljanja aluminijski se blok najprije postavi na aluminijsku gredu pri definiranom kutu rotacije i privremeno fiksira tankom, zapaljivom niti. Nakon izgaranja niti, blok se oslobađa bez dodavanja ikakvog vanjskog impulsa, čime se uspostavlja gotovo idealno slobodno gibanje. Tijekom cijelog eksperimenta njegovo se kretanje bilježi ZEISS Aramis 4M kamerama velike brzine pri 165 slike/s. Dobiveni podatci učitavaju se u ZEISS Aramis softver, gdje se primjenom metode referentnih točaka automatski detektiraju i prate optički markeri naneseni na blok. Ovaj pristup omogućuje vrlo precizno određivanje trodimenzionalnih translacijskih i rotacijskih pomaka, čiji se rezultati koriste za validaciju numeričkih modela. Serija eksperimentalnih ispitivanja provedena je za više početnih kutova i različite geometrijske konfiguracije grede, a u ovom su radu prikazani rezultati samo jednoga reprezentativnog pokusa. Postav sa Slike 1. obuhvaća elastičnu aluminijsku gredu krutosti 69 GPa te širine 3 cm, debljine 0,15 cm i raspona između oslonaca 36 cm, te kruti aluminijski blok dimenzija 13,5x3x3 cm.

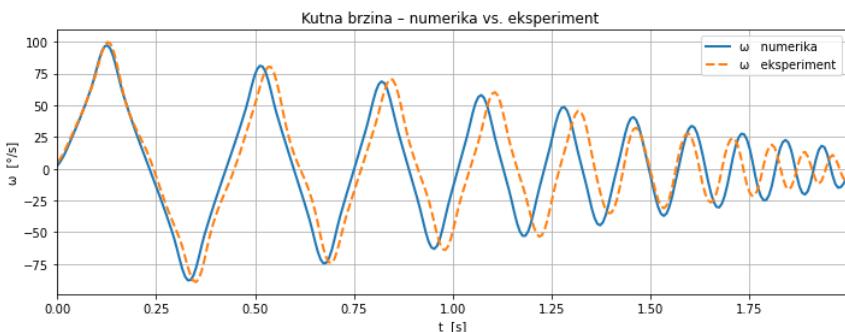
5. Validacija numeričkog modela

Usporedba numerički simulirane i eksperimentalno izmjerene rotacije bloka pokazuje vrlo visok stupanj podudarnosti (Slika 2). Tijekom početnih oscilacija, numerička krivulja kuta zaokreta gotovo se u potpunosti poklapa s eksperimentalnom, što znači da model vjerno reproducira inicijalnu dinamiku sustava. U kasnijim fazama gibanja vidljiva su manja odstupanja – simulacija blago podcjenjuje amplitudu osciliranja te nešto ranije predviđa trenutke uspostave kontakta u odnosu na eksperiment.



Slika 2. Usporedba numeričkog i eksperimentalnog kuta zaokreta bloka

Kutna brzina bloka dobivena modelom jednako tako dobro prati izmjerenu brzinu iz eksperimenta (Slika 3.). Na početku gibanja krivulje se gotovo preklapaju, dok se nakon nekoliko poluoscilacija počinje opažati blago razilaženje. Daljnja analiza grafova otkriva da se s vremenom postupno povećavaju razlike u amplitudama kutne brzine, a istovremeno se pojavljuje fazni pomak budući da se maksimalne vrijednosti brzine u numeričkom modelu javljaju nešto ranije nego u eksperimentu.



Slika 3. Usporedba numeričke i eksperimentalne brzine kuta zaokretu bloka

6. Zaključak

U ovom je radu razvijen i eksperimentalno validiran dvodimenzionalni NSCD model slobodnog lJuljanja krutog bloka na Euler–Bernoullijevoj elastičnoj gredi. Dobiveni rezultati pokazuju da odabrana shema vremenske integracije pouzdano zahvaća glavne dinamičke značajke sustava. Time se model potvrđuje kao dobra osnova za daljnju parametarsku analizu i preciznija numerička istraživanja. U kasnijim fazama gibanja ipak su uočena ograničenja koja proizlaze iz pojednostavljenog opisa kontakta, pa se bilježe primjetna odstupanja u amplitudi. Buduća istraživanja bit će usmjerena na uvođenje realističnijeg kontaktog zakona s koeficijentom restitucije većim od nule, kako bi se poopćio kontaktni model te što vjernije opisalo trajanje kontakta i mehanizam disipacije energije.

Zahvale

- Projekt razvoja karijere mladih istraživača – osposobljavanje novih doktora znanosti, financiran od Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ)
- Projekt MZO-DAAD 2024/2025 pod naslovom „Metode vremenske integracije s fiksnim vremenskim korakom za ne-glatke dinamičke sustave s kontaktom i trenjem“, financiran od Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske
- Projekt Sveučilišta u Rijeci: „Dinamička karakterizacija krutih blokova s kohezijskim kontaktima“ (referentni broj: uniri-iskusni-tehnici-23-2803274)
- Program mobilnosti MOBDOK 2023, financiran od Hrvatske zaklade za znanost

Literatura

- [1] Acary, V.: Projected event-capturing time-stepping schemes for nonsmooth mechanical systems with unilateral contact and Coulomb's friction, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 256, 2013, pp. 224–250, DOI: 10.1016/j.cma.2012.12.012.
- [2] Mudrić, T., Čeh, N., Hante, S., Arnold, M.: Free rocking of a rigid block on a flexible structure with non-smooth contact dynamics, Applied Sciences, vol. 14, br. 15, 2024, art. 6483, DOI: 10.3390/app14156483.

- [3] J. J. Moreau. Numerical aspects of the sweeping process. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 177(3-4):329349, 1999.
- [4] R. W. (Ray W.) Clough and Joseph Penzien. Dynamics of structures. CBS Publishers & Distributors Pvt Ltd, India, 2nd editio edition, 2015.
- [5] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L.: The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics, 6. izd., Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.21>

Utjecaj spojeva konstrukcijskih elemenata na seizmički odziv tradicijskih zidanih zgrada u blokovima

*Influence of connections between structural elements on seismic
response of traditional masonry aggregates*

Sara Vaing¹, Maja Baniček¹, Igor Tomić², Josip Atalić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, svaing@grad.hr, mbanicek@grad.hr,
josip.atalic@grad.unizg.hr

(2) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Švicarska, igor.tomic@epfl.ch

Sažetak

Nedavni potresi u Hrvatskoj istaknuli su ranjivost povjesne jezgre Zagreba koju karakteriziraju zidane zgrade, uglavnom povezane u blokovima. Procjena štete iz 2020. godine pokazala je često otkazivanje zidanih elemenata izvan ravnine, što je primarno uvjetovano kvalitetom spojeva konstrukcijskih elemenata. Međudjelovanje zgrada u nizovima vrlo je složeno i nedovoljno istraženo. Ovaj rad numerički istražuje utjecaj linearnih i nelinearnih spojeva zida sa zidom (zid-zid) i međukatne konstrukcije i zida (pod-zid) na seizmički odgovor dviju susjednih zidanih zgrada pri dinamičkom opterećenju. Primjenjuje se pristup modeliranja ekvivalentnim okvirom uz posebno razvijen makroelement koji obuhvaća ponašanje zidova u ravnini i izvan nje. Cilj je unaprijediti strategije modeliranja i analize za procjenu seizmičke otpornosti postojećih zidanih konstrukcija.

Ključne riječi: nearmirano zidje, blokovi, nelinearne veze, otkazivanje van ravnine

Abstract

Recent earthquakes in Croatia highlighted the vulnerability of Zagreb's historic center, characterized by unreinforced masonry buildings (URM), mainly arranged in aggregates. Damage assessments from 2020 revealed common out-of-plane failures, primarily influenced by the effectiveness of connections between structural elements. In relation to aggregates, interaction of structures is very complex and currently under-researched. This paper numerically investigates the influence of linear and nonlinear wall-to-wall and floor-to-wall connections, on a seismic response of two adjacent URM buildings under dynamic loading. Equivalent frame modeling approach is considered with a macroelement formulated to capture both in-plane and out-of-plane behaviour of masonry elements. The aim of this research is to advance modeling and analysis strategies for the seismic assessment of existing unreinforced masonry structures.

Keywords: unreinforced masonry, aggregates, nonlinear connections, out-of-plane response

1. Uvod

Nedavni potresi na području Hrvatske istaknuli su ranjivost Zagrebačke povijesne jezgre koju karakteriziraju zidane zgrade uglavnom građene kao dio bloka. Većina zgrada u donjem dijelu Zagreba građene su nakon Velikog potresa u Zagrebu iz 1880. godine kada započinje razvoj grada pod Austro-ugarskim utjecajem [1].

Procjena štete nakon potresa iz 2020. godine pokazala je da su najviše oštećene bile tradicionalne zidane zgrade čije nosive zidove povezuju međukatne konstrukcije drvenih grednika. Iako su zidovi dosegнуli svoju nosivost na smicanje u ravnini, najveća oštećenja takvih građevina prouzročena su mehanizmom otkazivanja van ravnine nekonstrukcijskih elemenata poput dimnjaka, krovista, lastavica, konzolnih elemenata itd. U nekim slučajevima zabilježena su otkazivanja zabatnih zidova ne samo na razini krovista već po cijeloj visini građevine, a primjećena su i otkazivanja fasadnih zidova van ravnine [2]. Neki od slučajeva prikazani su na slici 1. Mehanizam otkazivanja elemenata van ravnine u slučaju zidanih zgrada uvjetovan je prije svega kvalitetom spoja između konstrukcijskih elemenata. Ovdje se primarno misli na kontakt između zidova te kontakt između horizontalnih elemenata sa zidovima. U slučaju zidanih zgrada u Zagrebu, međukatna konstrukcija nosiva je u jednom smjeru, najčešće okomito na fasadne zidove, gdje su grede naslonjene na zid, a zabatni zidovi su ne pridržani. Kvaliteta spojeva greda i zidova temelji se na trenju te veza često nije dostatna u slučaju srednjih ili jačih potresa [3]. Osim što ovakav mehanizam otkazivanja utječe na globalnu stabilnost građevine, iznimno je opasan jer može dovesti u opasnost ljudske živote te doprinosi ukupnom riziku od potresa a često se ne uzima u obzir radi nedostatka alata koji bi u proračunu konstrukcija uzimali u obzir i otkazivanje unutar i otkazivanje elemenata izvan ravnine [4].

Zbog velikog broja postojećih zidanih građevina u svijetu koje su potencijalno izrazito ranjive na potrese, nužno je unaprijediti razumijevanje njihova seizmičkog ponašanja te razviti pouzdane analitičke i numeričke modele za njihovu procjenu. Pouzdanost takvih modela ključna je ne samo u projektiranju novih zgrada, već osobito u procjeni i ojačavanju postojećih konstrukcija [5]. Interakcija zgrada u blokovima nije dovoljno istražena zbog nedostatka eksperimentalnih ispitivanja. Iz tog razloga niti propisi ne daju jasne smjernice za modeliranje interakcije a u inženjerskoj praksi često se takve zgrade modeliraju kao samostojecće.

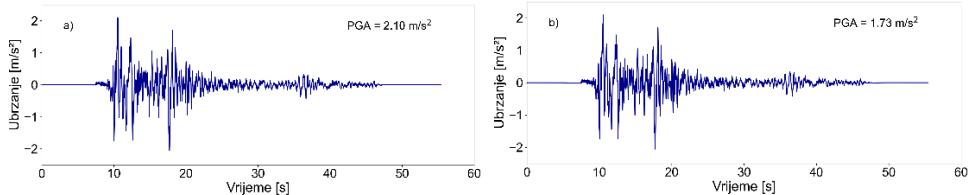


Slika 4 Otkazivanje zidova van ravnine u zagrebačkom potresu 2020. godine [4]

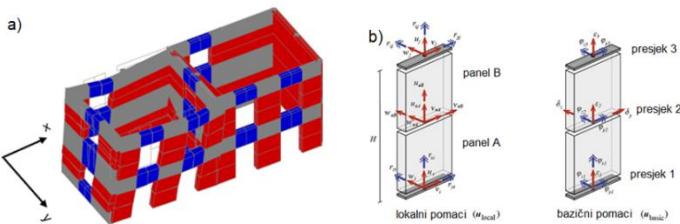
2. Numerički model bloka

Model dviju zgrada u nizu temeljen je na metodi ekvivalentnih okvira [6] koja se često koristi za izradu numeričkih modela zidanih zgrada, primjenjiva je u inženjerskoj praksi te se preporuča i u nekim propisima [7, 8]. Ovakav pristup modeliranju idealizira zidove kao okvire diskretizirane na tri tipa elemenata: zidovi (eng. *piers*) i nadvoji (eng. *spandrels*) koji su deformabilni, te krute zone (eng. *rigid nodal panels*). 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 koje spajaju krute zone. Postojeće metode s ekvivalentnim okvirima koriste elemente koji mogu opisati ponašanje samo unutar ravnine, a mehanizam otkazivanja izvan ravnine potrebno je uzeti u obzir zasebnim proračunima [9].

Numerički model predstavlja dvije zidane zgrade u bloku. Zgrade su istih tlocrta i geometrije a glavna razlika je u spojevima konstrukcijskih elemenata između zidova te podova i zidova, što je detaljno opisano u poglavljju 2.1.. Zgrade su pravilne u smislu geometrije, visine i otvora. Stropne konstrukcije su definirane kao ortotropne elastične membrane [10] nosive u smjeru okomito na fasadne zidove. Model je izrađen u programu otvorenog koda OpenSees (eng. *Open System for Earthquake Engineering Simulations*) koji je namijenjen prvenstveno seizmičkoj analizi konstrukcija [11]. Provedena je nelinearna dinamička analiza a korišten je potresni zapis Montenegro Albatros 1979 [12], te je potres zadan u dva međusobno okomita smjera: u x smjeru zadan je potresni zapis koji odgovara horizontalnoj komponenti potresa istok-zapad ($PGA = 2.10 \text{ m/s}^2$), a u y smjeru sjever-jug ($PGA = 1.73 \text{ m/s}^2$), slika 2. Analiza zgrada temelji se na utjecaju idealno krutih i nelinearnih spojeva na seizmički odziv elemenata van ravnine. Spojevi koji se promatraju su zid-zid, ploča-zid te zgrada-zgrada, kao i slučaj kada nije zadan kontakt između jedinica u nizu. Za elemente zidova i nadvoja korišten je makroelement koji uzima u obzir odziv zidanog elementa u ravnini i zvan nje [13]. Makroelement je formuliran kao jednodimenzionalni element definiran s tri čvora u trodimenzionalnom prostoru. Dva čvora predstavljaju početak i kraj elementa dok treći predstavlja sredinu. Odgovor unutar ravnine temeljen je na formulaciji makroelementa od Penna et al [14] koji se koristi u programima poput TREMURI, te je nadograđen ponašanjem izvan ravnine P-Δ formulacijom uz proširenje odgovora svakog presjeka da obuhvaća rotaciju u dva smjera. Definicija elementa kao i deformacije prikazane su na slici 3. Element je primijenjen u programskom paketu OpenSEES [10].



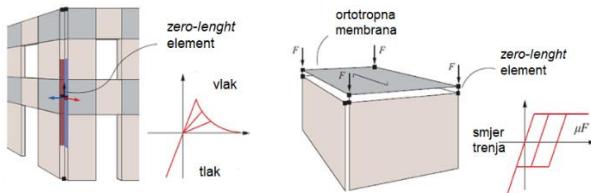
Slika 5 Horizontalne komponente potresnog zapisa zadanih u a) x smjeru, b) y smjeru



Slika 6 a) numerički model dvije zgrade u nizu, b) definicija makroelementa [10]

2.1. Spojevi između konstrukcijskih elemenata

U inženjerskoj praksi često se spojevi između konstrukcijskih elemenata modeliraju kao idealno kruti što nije realno za slučaj zidanih zgrada. Treba naglasiti da je materijal tradicijskih zgrada dotrajao s vremenom, te nema zadovoljavajuća mehanička svojstva [15]. U ovom radu navedeni spojevi zadaju se na dva načina: kao idealno kruti i nelinearni, te bez spoja u slučaju kontakta između jedinica. Kruti spojevi zadaju se pomoću tzv. equalDOF naredbe u OpenSees-u koja predstavlja kruto ograničenje ponašanja čvorova, to jest zadaju se „master“ i „slave“ čvorovi te se „slave“ čvoru zadaju isti pomaci kao „master“ čvoru. Nelinearni spojevi definiraju se pomoću tzv. Zero-Length elementa koji je zadan pomoću dva čvora na istoj lokaciji. Nelinearnost se postiže pridruživanjem materijalnog modela ponašanja elementu odnosom sile i deformacije. U slučaju spoja između poda i zidova, glavni izvor nelinearnog ponašanja može biti proklizavanje drvenih greda ili eventualno otkazivanje spoja. Trenje raste do granične vrijednosti, nakon čega dolazi do klizanja i povećanja pomaka. Moguća nelinearnost spoja između zidova može se javiti otvaranjem vertikalnih pukotina, što može dovesti do gubitka stabilnosti zida izvan njegove ravnine. Takvi spojevi se mogu modelirati dodjeljivanjem elemenata rubnim čvorovima zidova, uz pridruživanje odgovarajućih vlačnih svojstava. Maksimalna sila koju spoj može prenijeti u vlačnom smjeru može se odrediti integriranjem vlačnih sila i trenja između zidova, dok se ponašanje u tlaku smatra linearnim [16]. Nelinearni kontakt između zgrada također je moguće zadati, ali to područje za zgrade u blokovima u Zagrebu nije još istraženo te će biti tema daljnog istraživanja.



Slika 4 Definicija nelinearne veze zid-zid i ploča-zid [15]

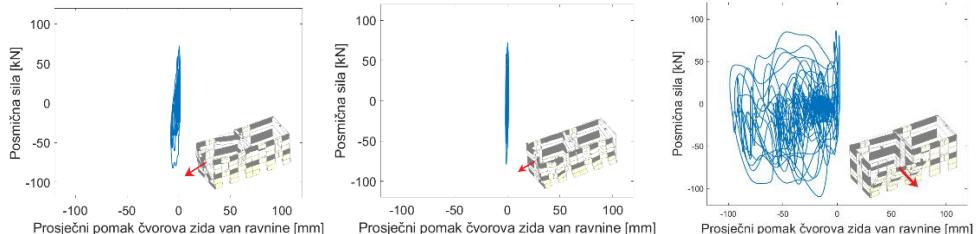
3. Rezultati

Premda je u analizi uzeto u obzir ponašanje elemenata u ravnini i izvan nje, analizirani su prosječni pomaci najkritičnijih zidanih elemenata isključivo izvan ravnine dviju zgrada u nizu te međusobno uspoređeni za slučaj kada se zgrade promatraju kao zasebne jedinice i slučaj kada je spoj između njih zadan kao idealno kruti. Unutar tih slučajeva promatra se utjecaj

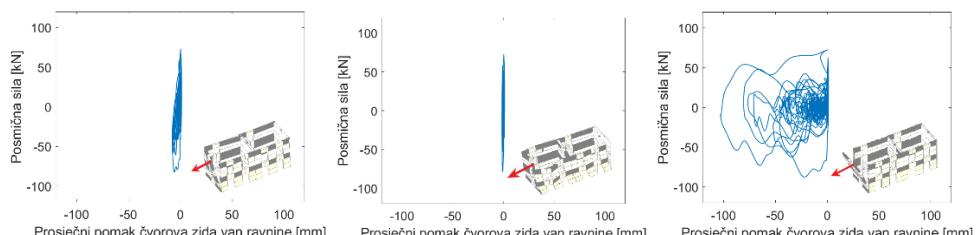
spojeva između zidova te spojeva poda i zida. Varijante nelinearnih spojeva prikazane su u tablici 1. U prvoj varijanti zgrade su promatrane kao zasebne, bez kontakta između njih, te su za desnu zgradu veze zid-zid i pod-zid zadani kao idealno kruti dok su za lijevu zgradu promatrani pomaci kada je spoj zid-zid zadan kao nelinearan a ostali spojevi idealno kruti, spoj pod-zid nelinearan a ostali spojevi idealno kruti te za kombinaciju zid-zid i pod-zid nelinearni. Istim principom analizirane su zgrade s idealno krutim spojem između jedinica. Na slikama 5 i 6 prikazani su odnosi posmične sile i prosječnog pomaka čvorova kritičnih zidova za svaku varijantu idealno krutih i nelinearnih spojeva. Vidljivo je kako za svaku od kombinacija otkazuje različiti element. Kod slučaja nelinearnih spojeva zid-zid vidljivo je otvaranje vertikalne pukotine na spoju fasadnog i zabatnog zida te otkazivanje elementa u x smjeru. U slučaju nelinearnih spojeva pod-zid pomaci ne dosežu otkazivanje van ravnine, a najveći utjecaj na otkazivanje elemenata izvan ravnine ima kombinacija kada su spojevi pod-zid i zid-zid zadani kao nelinearni. U slučaju samostojećih zgrada izvan ravnine otkazuje fasadni zid u y smjeru, dok za povezane zgrade otkazuje zabatni u x smjeru. Slike 7 i 8 prikazuju prosječne pomake kritičnih elemenata u vremenu po smjerovima otkazivanja.

Tablica 1 Kombinacije nelinearnih spojeva lijeve zgrade u nizu

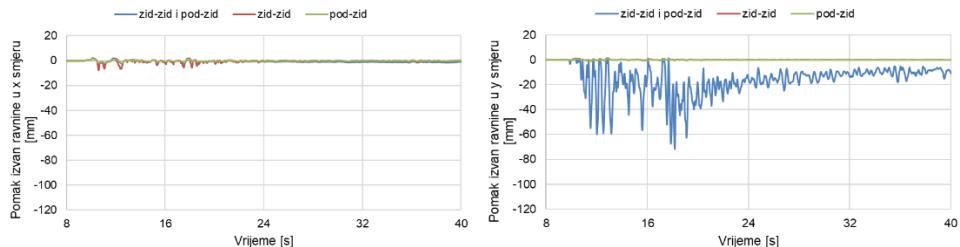
spoj	Zgrade bez spoja		Zgrade spojene krutim spojem	
	zid-zid	pod-zid	zid-zid	pod-zid
1	X			X
2		X		X
3	X	X	X	X



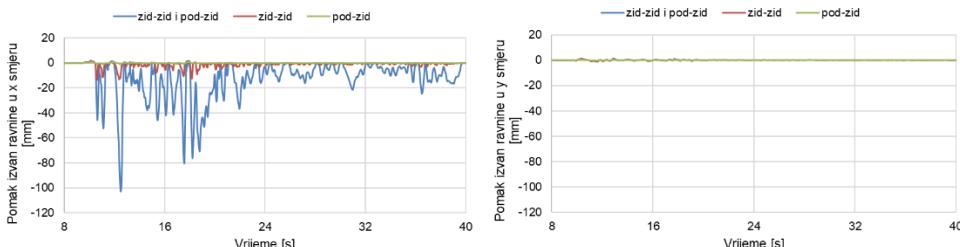
Slika 5 Odnosi posmične sile i prosječnog pomaka elemenata izvan ravnine za slučaj nepovezanih zgrada za kombinacije redom 1, 2 i 3



Slika 6 Odnosi posmične sile i prosječnog pomaka elemenata izvan ravnine za slučaj povezanih zgrada idealno krutim spojem za kombinacije redom 1, 2 i 3



Slika 7 Pomaci izvan ravnine u vremenu za slučaj odvojenih zgrada



Slika 8 Pomaci izvan ravnine u vremenu za slučaj povezanih zgrada

4. Zaključak

U ovom radu analiziran je utjecaj nelinearnih i krutih spojeva između konstrukcijskih elemenata, kao i idealno krutih ili nepostojećih spojeva između zgrada u nizu, na njihovo seizmičko ponašanje s naglaskom na otkazivanje elemenata izvan ravnine. Dobiveni rezultati ukazuju na značajnu ovisnost procjene mehanizma otkazivanja o načinu modeliranja tih spojeva. Pokazalo se da kod postojećih zidanih zgrada spoj između podova i zidova, spoj među zidovima te kontakt između susjednih zgrada ne bi trebalo u svim slučajevima smatrati idealno krutima. Stvarno stanje spoja postojećih zidanih zgrada trebalo bi se uzeti u obzir te po potrebi, vrlo ih je važno modelirati kao nelinearne. Najveći utjecaj na ponašanje konstrukcije uočen je kod kombinacije u kojoj su spojevi zid–zid i pod–zid modelirani kao nelinearni, a zgrade povezane kruto. U slučaju postojećih zgrada u blokovima, vrlo je teško eksperimentalno ispitati mehaničke karakteristike spojeva, te to područje u slučaju zagrebačkih blokova trenutno nije dovoljno istraženo. S obzirom da modeliranje spoja između zgrada kao idealno kruto nije uvijek primjenjivo, za buduća istraživanja zgrada u blokovima na području Zagreba preporučuje se uključivanje nelinearnog kontakta. Zanemarivanje utjecaja nelinearnih spojeva na rezultate može rezultirati netočnom procjenom seizmičke otpornosti zgrade i krivom procjenom mehanizma oštećenja, što je osobito važno pri projektiranju mjera za pojačanje konstrukcije. U radu je predstavljen idealiziran slučaj u pogledu geometrije zgrada, te se za buduće istraživanje planiraju uzeti u obzir geometrijski parametri poput različitog broja etaža, različitih visina etaža, te različitih tlocrtnih oblika i dimenzija susjednih zgrada, za koje se očekuje da imaju utjecaj na otkazivanje elemenata van ravnine.

Literatura

- [1] Simović, V. (2000). 'Potresi na zagrebačkom području', *Građevinar*, 52(11.), str. 637-645. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/13067> (Datum pristupa: 01.05.2025.)
- [2] Šavor Novak, M., Uroš, M., Atalić, J., Herak, M., Demšić, M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorović, M. (2020). Zagreb earthquake of 22 March 2020 – preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings, *GRAĐEVINAR*, 72 (10), 843-867, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>
- [3] Šavor Novak, M., Uroš, M., Demšić, M., Jevtić Rundek, R., Pilipović, A. and Atalić, J., 2024. Detailed structural typology of existing substandard masonry and reinforced concrete buildings in the city of Zagreb, Croatia. *Buildings*, 14(11), p.3644. <https://doi.org/10.3390/buildings14113644>
- [4] Crnogorac M. Izvorni i stečeni nedostatci konstrukcija zgrada. U: Uroš M., Todorović 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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].
- [9] 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.
- [10] EESD-EPGL Github Repository, <https://github.com/orgs/eesd-epfl/repositories>
- [11] OPENSEES, <https://opensees.berkeley.edu/>
- [12] Luzi, L., Lanzano, G., Felicetta, C., D'Amico, M. C., Russo, E., Sgobba, S., ... ORFEUS Working Group 5. (2020, July 10). Engineering Strong Motion Database (ESM), version 2.0 (Version 2.0). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/ESM.2>

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Perić, L. and Matorić, I., 2020. *Reliability of traditional timber-floor masonry buildings to seismic action.* Građevinar, 72(10), pp.881–892. <https://doi.org/10.14256/JCE.2965.2020>
- [16] 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>.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.22>

Stohastički pristup pri modeliranju lijepljenih lameliranih greda od lokalnih listača

*A stochastic approach for modelling glued laminated timber beams
made from local hardwoods*

Jelena Lovrić Vranković¹, Ivana Uzelac Glavinić², Ivica Boko³

(1) *Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Hrvatska, jlovric@gradst.hr;
iuzelac@gradst.hr; iboko@gradst.hr*

Sažetak

U ovom radu prikazan je stohastički model za predviđanje čvrstoće na savijanje lijepljenih lameliranih greda od graba (*Carpinus betulus L.*) iz hrvatskih šuma. Model se temelji na 2D numeričkoj simulaciji koja kombinira softverske alate ANSYS i Matlab, s ciljem generiranja varijabilnih mehaničkih svojstava duž pojedinačnih lamela i cijelog nosača. Pri generiranju globalnih mehaničkih svojstava lamela korištene su vrijednosti dobivene vlačnim ispitivanjem lamela. Za modeliranje lokalne varijabilnosti duž lamele primijenjen je autoregresijski model prvog reda, pri čemu je uzeta u obzir kros-korelacija između modula elastičnosti i vlačne čvrstoće. Ovaj model simulira ispitivanje na savijanje lijepljenih lameliranih nosača prema normi EN 408 i pokazuje određivanje 5% fraktila čvrstoće na savijanje, a koja predstavlja karakterističnu vrijednost.

Ključne riječi: stohastički pristup, grab, metoda konačnih elemenata, čvrstoća na savijanje, lijepljene lamelirane grede

Abstract

This paper presents a stochastic model for predicting the bending strength of glued laminated beams made of European hornbeam (*Carpinus betulus L.*) sourced from Croatian forests. The model is based on a 2D numerical simulation that combines the ANSYS and Matlab software platforms, intending to generate spatially variable mechanical properties along individual lamellae and the entire beam. For the generation of global mechanical properties of the lamellae, values obtained from tensile tests were used. To model the local variability along each lamella, a first-order autoregressive model was applied, taking into account the cross-correlation between the modulus of elasticity and tensile strength. The model simulates a bending test of glued laminated timber beams in accordance with EN 408 and enables the determination of the 5th percentile of bending strength, which represents the characteristic strength according to structural design standards.

Keywords: stochastic approach, European hornbeam, finite element method, bending strength, glued laminated beams

1. Uvod

Drvo je obnovljiv materijal i jedan je od najvažnijih prirodnih materijala. Lijepljeni lamelirani nosači (LLN), kao proizvodi na bazi drva, imaju veći potencijal u pogledu čvrstoće i krutosti u odnosu na nosače od punog drva, zahvaljujući efektu homogenosti. Jedno od bitnih svojstava LLN-a je *lamination effect* na temelju kojeg se može zaključiti kako je čvrstoća na savijanje LLN-a veća od čvrstoće na savijanje pojedinačne lamele s obzirom da su slabije mehaničke karakteristike lamele u nosaču kompenzirane boljim mehaničkim svojstvima susjedne lamele. Provedeno je mnogo istraživanja na temu veze između vlačne čvrstoće lamela i zupčastih spojeva u odnosu na mehanički potencijal LLN-a. Dio istraživanja bio je usmjeren na eksperimentalna ispitivanja lamela i lijepljениh lameliranih nosača, dok je drugi dio istraživanja usmjeren na modeliranje LLN-a koristeći stohastiku s ciljem određivanja veze između 5% fraktila vlačne čvrstoće lamele i 5% fraktila čvrstoće na savijanje LLN-a.

Korištenje stohastike u metodi konačnih elemenata datira još od 1980-ih [1]. 1985. godine razvijen je *Karlsruher Rechenmodel* temeljen na opsežnom istraživanju varijabilnosti mehaničkih karakteristika lamela i zupčastih spojeva smreke (*Picea abies* L.) [2]. Razmak između zupčastih spojeva generiran je slučajnim odabirom iz statističke distribucije [3], a elementima koji spajaju dvije lamele zadana je vlačna čvrstoća zupčastih spojeva kao funkcija niže vrijednosti gustoće dviju spojenih lamela. Nekoliko godina kasnije provedeni su dodatni testovi savijanja LLN-a različitih visina na temelju kojih su razvijene nove jednadžbe korelacije između mehaničkih karakteristika [4] te je implementirana poboljšana distribucija kvrgi i njihovog položaja. Nakon dugog procesa kalibriranja, definirane su jednadžbe (1) i (2) koje povezuju čvrstoću na savijanje LLN-a sa čvrstoćom zupčastih spojeva i lamela, a koja je implementirana u europski standard EN 14080 [5]:

$$f_{m,g,k} = -2.2 + 2.5 f_{t,o,k}^{0.75} + 1.5 \cdot \left(\frac{f_{m,j,k}}{1.4} - f_{t,o,k} + 6 \right)^{0.65} \quad (1)$$

$$1.4 \cdot f_{t,o,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1.4 \cdot f_{t,o,k} + 12 \quad (2)$$

gdje $f_{m,g,k}$ predstavlja karakterističnu čvrstoću na savijanje LLN-a, $f_{m,j,k}$ je karakteristična čvrstoća na savijanje zupčastog spoja, dok je $f_{t,o,k}$ karakteristična vlačna čvrstoća lamele. 1989. Govindarajoo je implementirao metodu efektivnog poprečnog presjeka za proračun nosivosti grede [6]. 1992. godine Hernandez i dr. razvili su PROLAM model, a koji se za razliku od dotadašnjih modela zasniva na pristupu s efektivnom krutostti [7]. Ovakav proračun bio je efikasniji u usporedbi s metodom konačnih elemenata, ali jedan od nedostataka je zasebna analiza svakog segmenta bez utjecaja karakteristika susjednih segmenata. U posljednje vrijeme globalni porast temperature i ekstremni vremenski fenomeni te klimatske promjene općenito utječu na širenje šuma listača (hrast, bukva, grab), a koje pokazuju bolje mehaničke karakteristike u odnosu na šume četinjača (bor, smreka). Sukladno navedenim promjenama, opsežna istraživanja proizvoda na bazi tvrdih drva kao nosivih elemenata odvijaju se u posljednjih 20 godina, a europska drvna industrija prepoznala je potencijal tvrdih drva i uvrštava sve više proizvoda na bazi tvrdog drva u svoje propise. U ovom kontekstu 2017.g. pokrenut je projekt "European hardwoods for the building sector" (EU Hardwoods) od strane Holzforschung Austria, Sveučilišta u Ljubljani,

MPA Stuttgart i FCBA Simonin Sas [8]. Također, uočene su određene promjene u numeričkom modeliranju proizvoda na bazi tvrdih drva. Blass [9] je razvio prvu verziju "Karlsruher Rechenmodel" primjenjivu na bukvu i kombinirani LLN od mekog i tvrdog drva [10]. Promjene u odnosu na prethodne modele su napravljene u vidu uvođenja novih regresijskih jednažbi materijalnih karakteristika. 2014. god. Fink je razvio model koristeći Matlab i probabilitički pristup, a koji se u mnogo aspekata razlikuje od prethodnih modela [11]. Indikatori mehaničkih karakteristika, poput dimenzija kvrgi i dinamičkog modula elastičnosti, određeni su strojnom klasifikacijom. Numerički rezultati validirani su na LLN-ima s poznatim lokalnim varijabilnostima i njihovom precizno definiranom pozicijom što dosad nije bio slučaj. Varijabilnost duž grede ogledala se u prisutnosti kvrgi dok je materijal između kvrgi imao nepromjenjiva svojstva ("clear wood"). Ovaj model je proširen istraživanjem [12] uključujući mehaniku loma koristeći energiju loma i koncept razmazanih pukotina. 2017. god. Kandler i Fussl predstavili su model koji generira MOE preko Karhunen-Loeve teorema i uz pomoć laserskih skenera definira nagib vlakanaca, ali ne uzima u obzir zupčaste spojeve prilikom modeliranja [13]. Tapia je razvio model s konačnim elementima za predviđanje čvrstoće na savijanje ("Stuttgart Stochastic Strength Glulam Model S3GluM") [14]. Također, koristio je XFEM metodu kako bi simulirao početak i propagaciju jedne diskretne pukotine u svakom segmentu grede. Vida [15] je istraživao grede različite klase i veličine koristeći efektivnu krutost. U odnosu na prethodne modele, prvi put je korišten 3D model u koji su implementirana dva tipa diskretnih pukotina preko kohezivnih površina i to vertikalna pukotina unutar lamele i horizontalna pukotina između lamele (*traction-separation law*), a koje omogućavaju formiranje kontinuirane pukotine. U 2021. godini Europska organizacija za tehnička dopuštenja (EOTA) izdala je dokument EAD 130320-00-0304 *Glued laminated timber made of solid hardwood* [16], a koji pokriva lijepljeno lamelirano drvo od određenih vrsta tvrdog drva. EAD sadrži osnovne principe za modeliranje LLN-a od tvrdog drva izloženog savijanju, a koji uključuju 2D model s konačnim elementima pri čemu se globalne karakteristike pridružuju svakoj lameli iskazane preko eksperimentalno dobivenih statističkih distribucija. Svaka lamela dijeli se na segmente širine cca 100 mm s različitim čvrstoćama i krutosti na način da se karakteristike pojedinog segmenta lamele (vlačna i tlačna čvrstoća, MOE paralelno s vlakancima) generiraju kroskorelacijskom i autokorelacijskom analizom. Također, svaka lamela sadrži posebne zone za modeliranje zupčastih spojeva čije se karakteristike generiraju na osnovu postojećih distribucija dobivenih eksperimentalno. Prepostavlja se ortotropno ponašanje materijala uzimajući u obzir nelinearnost i prikladni model otkazivanja. Osnovni principi uključuju provođenje Monte-Carlo simulacija na način da se za svaki set stohastički zadanih parametara računa čvrstoća na savijanje, a ponavljanjem proračuna s različitim vrijednostima parametara dobije se distribucija čvrstoće na savijanje LLN-a. Sukladno točki 2.2.1.3 EAD [16], čvrstoća na savijanje lijepljenog lameliranog drva $f_{m,g,flat,k}$ određuje se preko vlačne čvrstoće lamela $f_{t,0,l,k}$ i zupčastih spojeva $f_{t,0,j,k}$ prema izrazu (3):

$$f_{m,g,flat,k} = a_1 + a_2 f_{t,0,l,k}^{e1} + a_3 (f_{t,0,j,k} - f_{t,0,l,k} + a_4)^{e2} \quad (3)$$

Parametri a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , e_1 i e_2 iz prethodne jednadžbe određuju se iz modela temeljenog na metodi konačnih elemenata i Monte Carlo simulacijama stohastičkih karakteristika lamela. U

ovom radu biti će predstavljen numerički model s primjenom Monte Carlo simulacija za određivanje karakteristične čvrstoće na savijanje LLN-a.

2. Numerički model

2.1. Generiranje globalnih mehaničkih karakteristika

Prvi korak predstavlja generiranje globalnih karakteristika lamela i to vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima $f_{t,0}$, tlačne čvrstoće paralelno s vlakancima $f_{c,0}$ i modula elastičnosti paralelno s vlakancima E_0 . Distribucije za vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti paralelno s vlakancima preuzete su iz rezultata vlačnih testova na lamelama graba (*Carpinus betulus L.*) [17], dok su podaci za tlačnu čvrstoću paralelno s vlakancima $f_{c,0,k}$ preuzeti iz literature [18] i definirani izrazom (4):

$$f_{c,0,k} = 11,54 + 4,41 f_{t,0,k}^{0,5} \quad (4)$$

Duljine lamela generirane su koristeći lognormalnu distribuciju. Prethodno navedeno uključuje generiranje uzoraka iz standardne normalne distribucije, potom primjenu Cholesky dekompozicije kako bi se dobile korelirane varijable i konačno transformacija svake varijable u stvarnu distribuciju - lognormalnu.

2.2. Generiranje lokalnih mehaničkih karakteristika segmenata lamela

Lamele su podijeljene na segmente duljine 100 mm. Krutosti segmenata svake pojedine lamele generirane su korištenjem autoregresivnog modela, a nakon čega su dobivene vrijednosti korigirane zbog prilagodbe lokalnih krutosti segmenata vrijednostima globalnih krutosti lamela (prema [19]). Za generiranje čvrstoća duž lamela korišten je vektorski autoregresijski model uz primjenu kros-korelacije.

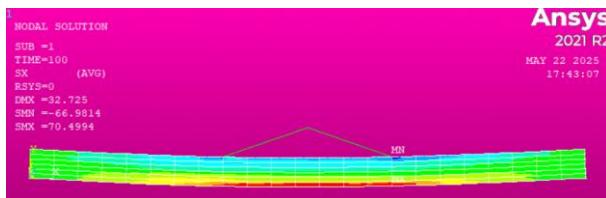
2.3. Metoda konačnih elemenata

Za implementaciju modela korišten je Ansys 2021 R2 [20]. Jednostavno oslonjena lijepljena lamelirana greda sadrži lamele od kojih je svaka podijeljena na segmente duljine 100 mm. Korišteni su 2D elementi (PLANE 183). Rubni uvjeti odgovaraju uvjetima definiranim u normi EN 408 [21] za ispitivanje na savijanje u 4 točke, a opterećenje se definira u režimu kontroliranog prirasta pomaka. Stohastička raspodjela mehaničkih svojstava uzrokuje neuravnoteženo opterećenje između dviju točki, a što je riješeno uvođenjem referentne kontrolne točke i vezanih pomaka između čvorova prema [19]. Proračun se provodi iterativno pri čemu se u svakom koraku pomak povećava, a prekida se kada maksimalna sila padne više od 2%.

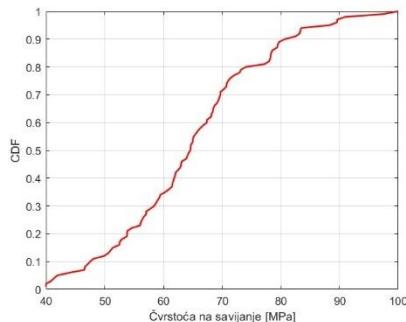
3. Rezultati

Ukupna sila primijenjena na gredu i njezina geometrija koriste se za izračun čvrstoće na savijanje. Slika 1. prikazuje naprezanja u odabranoj lijepljenoj lameliranoj gredi. Monte-Carlo simulacije provode se na način da se za svaki set stohastički zadanih parametara računa čvrstoća na savijanje, a ponavljanjem proračuna s različitim vrijednostima parametara dobije se distribucija čvrstoće na savijanje LLN-a. Nakon provođenja svih analiza izračunata je

kumulativna funkcija distribucije čvrstoće na savijanje (Slika 2.), a na osnovu koje je definiran 5% fraktil čvrstoće na savijanje.



Slika 1. Rezultati naprezanja pri savijanju u 4 točke za odabranu gredu



Slika 2. Kumulativna funkcija distribucije čvrstoće na savijanje za odabranu gredu

4. Zaključak

S obzirom da eksperimentalna ispitivanja zahtijevaju visoke finansijske troškove, posljednja istraživanja ukazuju na potencijal razvoja proračunskih modela i mogućnost procjene mehaničkih karakteristika LLN-a korištenjem istih. Tijekom posljednjeg desetljeća, nekoliko numeričkih modela je predloženo za opisivanje ponašanja lijepljenih lameliranih nosača od mekog i tvrdog drva. Numerički 2D model opisan u ovom radu kombinira softvere ANSYS i Matlab u svrhu generiranja varijabilnih mehaničkih svojstava duž geometrije grede. Ovaj model numerički simulira ispitivanje na savijanje lijepljenih lameliranih nosača prema normi EN 408 i konačno pokazuje određivanje 5% fraktila čvrstoće na savijanje, a koja predstavlja karakterističnu vrijednost. Potrebno je provesti dodatna eksperimentalna istraživanja koja će uključiti mjerjenje nepravilnosti u drvu kako bi se iste mogle implementirati u numerički model i time postići preciznost prilikom određivanja karakteristične vrijednosti čvrstoće na savijanje.

Zahvala

Autori zahvaljuju Tehničkom sveučilištu u Grazu na podršci i stručnom vodstvu tijekom provođenja vlačnih testova. Ovo istraživanje je djelomično podržano kroz projekte IRI-2 KK.01.2.1.02.0330 i KK.01.1.1.02.0027.

Literatura

- [1] Foschi R. O., Barrett J. D.: Glued-laminated beam strength: A model., ASCE J. Struct. Div. 106, pp. 1735–1754, 1980, <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.00054>

- [2] Ehlbeck J., Colling F., Görlacher R.: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern, Holz als Roh- und Werkstoff 43,8, pp. 333–337, 1985, doi: 10.1007/ "02607817
- [3] Larsen, H. J.: Strength of glued laminated beams, Part 5. Report No. 8004, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1980
- [4] Ehlbeck, J., F. Colling: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elsatizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie von der Trägerhöhe. Tech. Rep. Karlsruhe, Germany: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1987
- [5] EN 14080 Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2013.
- [6] Govindarajoo, R.: Simulation modeling and analyses of straight horizontally laminated glulam timber beams, Ph.D. dissertation, Civil Engineering Dept., Purdue University, West Lafayette, IN., 1989
- [7] Hernandez, R., Bender D. A., Richburg B. A., Kline K. S.: Probabilistic Modeling of Glued-Laminated Timber Beams, Wood and Fiber Sciences 24 (3), pp. 294–306, 1992
- [8] Linsenmann, P.: EU Hardwoods, European Hardwoods for the Building Sector, Reality of today – possibilities for tomorrow, Holzforschung Austria, 2016
- [9] Blaß, H. J., Frese M., Glos P., Linsenmann P., Denzler J.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche, German. Tech. rep. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 141, 2005, doi: 10.5445/8ZS/1000001371
- [10] Blaß, H. J., Frese M.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern mit Randallemellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz. German. Tech. rep. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 55, 2006, doi: 10.5445/ 8ZS/1000005148
- [11] Fink, G.: Influence of varying material properties on the load-bearing capacity of glued laminated timber, PhD thesis, ETH Zürich, 2014, doi: 10.3929/ethq-a-010108864
- [12] Blank, L., Fink, G., Jockwer R., Frangi A.: Quasi-brittle fracture and size effect of glued laminated timber beams, European Journal of Wood and Wood Products, pp. 667–681, 2017, doi: 10.1007/s00107- 017-1156-0
- [13] Kandler, G., Fussl, J., Eberhardsteiner, J.: Stochastic finite element approaches for wood-based products: theoretical framework and review of methods, Wood Science and Technology, 49, p.p. 1055–1097, 2015
- [14] Tapia Camu C.: Variation of mechanical properties in oak boards and its effect on glued laminated timber, PhD thesis, Cuvillier Verlag Gottingen, Universität Stuttgart, 2022
- [15] Vida, C., Lukacevic, M., Eberhardsteiner, J., Fussl, J.: Modelling approach to estimate the bending strength and failure mechanisms of glued laminated timber beams, Engineering Structures, 255, 2022
- [16] EAD 130320-00-0304 Glued Laminated Timber made of solid hardwood, European Organisation for Technical Assessment (EOTA), June 2018.
- [17] Lovrić Vranković, J., Uzelac Glavinić, I., Boko, I., Torić N.: An experimental investigation on the tensile properties parallel to the grain of European hornbeam (*Carpinus betulus L.*) boards, Eur. J. Wood Prod. 83, 130, 2025, <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02286-0>
- [18] Kovryga A., Stapel P., van de Kuilen J. W. G: Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and

beech, Wood Material Science & Engineering, 15(5), 289-302, 2019, DOI: 10.1080/17480272.2019.1596158

- [19] Tapia Camu C., Aicher S.: A Stochastic Finite Element Model for Glulam Beams of Hardwoods, Proceedings of the World Conference for Timber Engineering (WCTE), Seoul, Republic of Korea, 20–23 August 2018
- [20] ANSYS, Inc., Release 2021 R2, Canonsburg, PA, USA, 2021
- [21] EN 408 Timber structures -- Structural timber and glued laminated timber -- Determination of some physical and mechanical properties; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2012

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.23>

Tlačna i savojna čvrstoća mehanički recikliranog EPS-a

Compressive and bending strength of mechanically recycled EPS

Jelena Vukadin¹

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, jelena.vukadin@grad.unizg.hr

Sažetak

Ekspandirani polistiren ima, zahvaljujući širokoj primjeni, masovnoj proizvodnji i niskoj biorazgradivosti, visok potencijal za recikliranje. Ispitana su mehanička svojstava recikliranog EPS-a s ciljem procjene primjenjivosti istog u građevinskoj industriji. Prikazane su tlačna čvrstoća pri 10% deformaciji i savojna čvrstoća na uzorcima s udjelima 5%, 10%, 25% i 50% reciklata, koji su uspoređeni s referentnim uzorcima EPS-a s 0% reciklata. Reciklat je dobiven trenutno ekološki i ekonomski najprihvatljivijom metodom recikliranja (mehaničkim recikliranjem) čistog građevinskog otpada i poljoprivredne ambalaže. Ispitan je utjecaj različitih gustoća EPS-a na promatrana svojstva – za nazivne gustoće ploča s EPS-om 20 kg/m³ i 25 kg/m³. Dobiveni rezultati doprinose boljem razumijevanju ponašanja recikliranog EPS-a, identificiranju ograničenja i mogućnosti primjene te pružaju temelje za daljnja istraživanja i razvoj održivih rješenja u području energetski učinkovite gradnje.

Ključne riječi: *reciklirani EPS, mehaničko recikliranje, tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, gustoća, EPS otpad, potencijal za recikliranje*

Abstract

Expanded polystyrene (EPS), due to its widespread use, mass production, and low biodegradability, has a high potential for recycling. The mechanical properties of recycled EPS were tested to assess its applicability in the construction industry. The compressive strength at 10% deformation and bending strength were evaluated on samples containing 5%, 10%, 25%, and 50% recycled content and compared to reference samples made of virgin EPS (0% recycled content). The recycled material was obtained through mechanical recycling – the currently most environmentally and economically acceptable method – from clean construction waste and agricultural packaging. The influence of different EPS densities on the observed properties was examined – for nominal densities of panels with EPS of 20 kg/m³ and 25 kg/m³. The obtained results contribute to a better understanding of recycled EPS behavior, help identify its limitations and potential applications, and provide a foundation for further research and the development of sustainable solutions in energy-efficient construction.

Keywords: *recycled EPS, mechanical recycling, compressive strength, bending strength, density, EPS waste, recycling potential*

1. Uvod

Globalno društvo suočava se s ozbiljnim izazovima vezanima uz gospodarenje otpadom i potrebom za prijelazom na kružno gospodarstvo. Otpriklike 12% plastičnog otpada u svijetu se reciklira. Veći dio (25%) se spaljuje, dok većina (oko 60%) završava u okolišu – na odlagalištima, neuređenim mjestima za otpad ili kao otpad raspršen po kopnu, rijekama i oceanima. [1] Značajna količina plastičnog otpada prikuplja se za recikliranje, no čak polovica tog otpada šalje se u razvijenije strane zemlje izvan EU zbog nedostatka kapaciteta, tehnologije ili resursa za lokalnu obradu. Procjenjuje se da se čak 95% vrijednosti plastične ambalaže izgubi zbog kratkotrajne, jednokratne uporabe. [2] Ekspandirani polistiren ima, zahvaljujući širokoj primjeni, masovnoj proizvodnji i niskoj biorazgradivosti, visok potencijal za recikliranje. Lako ga je prepoznati i odvojiti od ostatka otpada. Iako je niska gustoća prednost EPS-a, istovremeno predstavlja izazov za isplativost recikliranja zbog potencijalno značajnog negativnog utjecaja prijevoza na okoliš. Mehaničko recikliranje EPS-a trenutno predstavlja ekonomski i ekološki najprihvativiju metodu recikliranja. Podrazumijeva prikupljanje otpada, razdvajanje, čišćenje, drobljenje, granuliranje za potrebnu konverziju i ponovnu preradu, što rezultira proizvodnjom novih proizvoda bez promjene kemijskog sastava materijala. [3] Tijekom procesa drobljenja, dolazi do fizičkog oštećenja kuglica, čime se gubi optimalan oblik istih što uzrokuje pad konačne gustoće. Svako mehaničko recikliranje narušava u određenoj mjeri svojstva EPS-a i dovodi do heterogenosti materijala. [4]

2. Eksperimentalna analiza

Ispitano je ukupno 432 uzorka iz šest serija, a analizirani su prema gustoći, tlačnoj čvrstoći pri 10% deformacije i savojnoj čvrstoći. Sva su mjerenja provedena u skladu s europskim normama Europskog odbora za normizaciju (CEN) [5], [6], [7]. Predmet eksperimentalne analize je EPS s reciklatom, dobiven miješanjem EPS-a i recikliranog sadržaja u različitim omjerima. Reciklirani sadržaj rezultat je mehaničkog recikliranja EPS-a iz dva različita izvora: građevinskog EPS-a (S1) i ambalažnog EPS-a iz poljoprivredne upotrebe (S2). Građevinski EPS uključuje otpad nastao kao nusproekt proizvodnje toplinske izolacije u proizvodnom pogonu te neugrađenu toplinsku izolaciju. Za razliku od ambalažnog otpada, nije kontaminiran niti su njegova svojstva narušena starenjem, vremenskim ili uvjetima primjene. EPS iz izvora (S1) i (S2), prosječne gustoće $15\text{--}17 \text{ kg/m}^3$, miješan je s novim (djevičanskim) EPS-om nominalnih gustoća 20 kg/m^3 i 25 kg/m^3 . Reciklirani EPS uspoređen je s kontrolnim uzorcima EPS-a odgovarajuće nominalne gustoće. Ukupno je proizvedeno 18 EPS blokova nominalnih dimenzija $2600\text{×}1300\text{×}1050 \text{ mm}$: dva bloka od čistog novog EPS-a i 16 blokova s različitim omjerima recikliranog i novog EPS-a. EPS blokovi su proizvedeni standardnim postupkom parnog ekspanzijskog oblikovanja, a reciklirani EPS je ravnomjerno pomiješan s prethodno ekspandiranim kuglicama novog EPS-a prije oblikovanja. Međutim, zbog nepravilnog oblika i oštećene strukture recikliranih kuglica, povećanje udjela recikliranog materijala dovelo je do smanjene kohezije i stoga niže nasipne gustoće, što je zauzvrat utjecalo na mehaničke i toplinske performanse. Ova međuvisnost otežava izoliranje učinka morfologije EPS-a od učinka same nasipne gustoće.

Iz svakog bloka izrezana su 24 uzorka pomoću tople žice, što ukupno čini 432 uzorka, od kojih je 270 ispitano na tlačnu čvrstoću pri 10 % deformacije, a 162 na savojnu čvrstoću. Radi lakošć prikaza rezultata, uzorci su podijeljeni u serije. Serija 0-20 odnosi se na uzorce novog EPS-a nominalne gustoće 20 kg/m^3 . Serija 0-25 obuhvaća uzorce novog EPS-a nominalne gustoće 25 kg/m^3 . Serija S1-20 podrazumijeva uzorce dobivene miješanjem reciklata iz izvora S1 s EPS-om nominalne gustoće 20 kg/m^3 u različitim omjerima (5%, 10%, 25% i 50% recikliranog udjela). Ostale serije su analogne seriji S1-20.

Tablica 1. Detalji testiranih serija uzoraka

Serija	Sadržaj			Udio reciklata	Mjerena gustoća	Broj analiziranih uzoraka	
	Izvor	ρ_{nom}	[% vol]			σ_{10}	σ_{bs}
0-20	vEPS	20	0		20,2	15	9
0-25	vEPS	25	0		25,9	15	9
S1-20	rEPS	S1	+	vEPS	20	5, 10, 25, 50	17,9 - 20,0
S2-20	rEPS	S2	+	vEPS	20	5, 10, 25, 50	18,0 - 20,5
S1-25	rEPS	S1	+	vEPS	25	5, 10, 25, 50	21,2 - 25,4
S2-25	rEPS	S2	+	vEPS	25	5, 10, 25, 50	19,5 - 25,4
					Σ	270	162



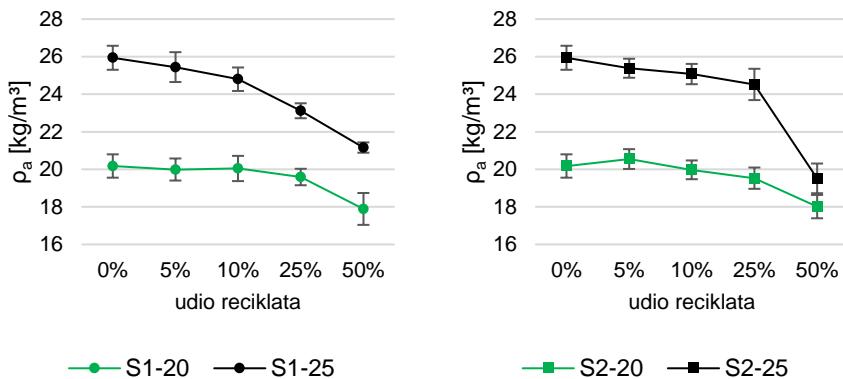
Slika 7. Prikaz strukture proizvedenog materijala (novi EPS lijevo, 25% reciklata sredina, 50% reciklata desno)

3. Eksperimentalni rezultati

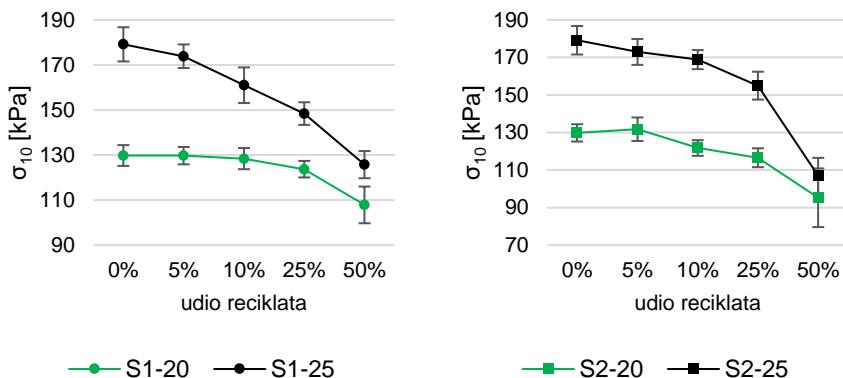
Prikazani su ključni rezultati ispitivanja koji daju uvid u ponašanje i kvalitetu recikliranog EPS-a ovisno o udjelu reciklata. Dijagrami prikazuju promjene srednjih vrijednosti promatranih svojstava za oba izvora reciklata, S1 i S2 (**Slika 8**, **Slika 9**, **Slika 10**). Za svako svojstvo prikazana je i standardna devijacija.

Veći udio reciklata generalno smanjuje gustoću bloka. Serija S1-25 počinje s većom početnom čvrstoćom od S1-20, ali bilježi strmiji pad s povećanjem reciklata, dok S1-20 ima

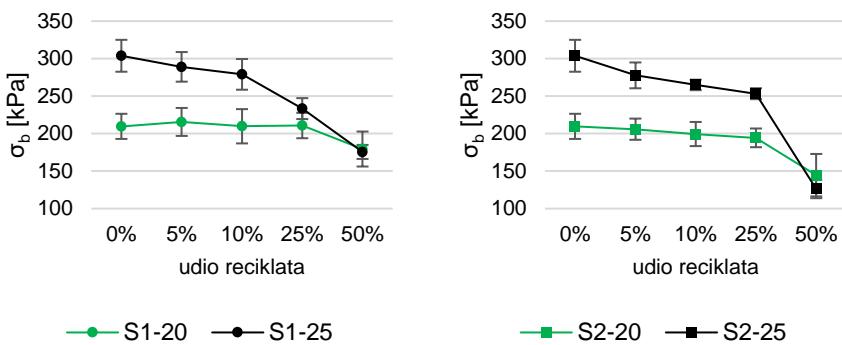
niže, ali stabilnije vrijednosti, tj. opada postupnije. Najveća standardna devijacija opeža se pri najvišem udjelu reciklata, što ukazuje na veću varijabilnost svojstava. Slično vrijedi i za serije S2-25 i S2-20.



Slika 8. Promjena gustoće s obzirom na udio reciklata (S1 lijevo, S2 desno)



Slika 9. Tlačna čvrstoća pri 10% deformaciji sa standardnom devijacijom s obzirom na udio reciklata (S1 lijevo, S2 desno)

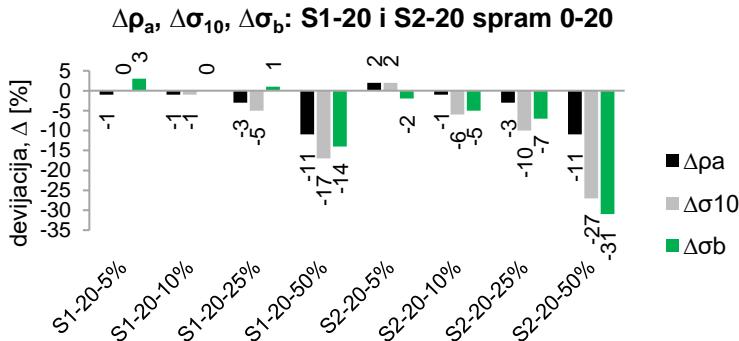


Slika 10. Savojna čvrstoća sa standardnom devijacijom s obzirom na udio reciklata (S1 lijevo, S2 desno)

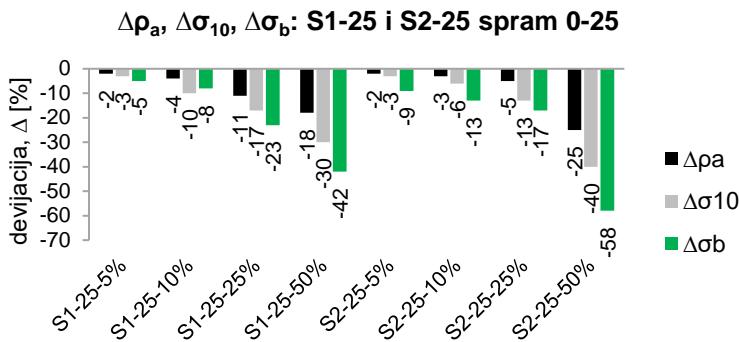
U usporedbi serija uzoraka prema izvoru recikliranog materijala vidljivo je da materijal dobiven mehaničkim recikliranjem građevinskog otpada (S1) pokazuje manji pad čvrstoće s porastom udjela reciklata u odnosu na materijal dobiven recikliranjem poljoprivredne ambalaže (S2), što ukazuje na veću kvalitetu materijala s reciklatom S1. Navedeno se najjasnije vidi kod uzorka s 50% reciklata – serije uzoraka S2-20 i S2-25 bilježe znatno veći pad čvrstoće pri prijelazu s 25% na 50% reciklata u usporedbi sa serijama S1-20 i S1-25.

Prema izračunatoj standardnoj devijaciji, koeficijent varijacije ne prelazi 5%, odnosno 9% za tlačnu čvrstoću pri 10% deformacije, što ukazuje na relativno stabilne i predvidljive rezultate. Iznimka je serija S2-20 s 50% reciklata, kod koje je koeficijent varijacije značajan: 16,4% za tlačnu i 19,6% za savojnu čvrstoću.

Dijagrami u nastavku (**Slika 11** i **Slika 12**) prikazuju promjene promatranih svojstava uzorka s različitim udjelima reciklata u usporedbi sa svojstvima novog EPS-a odgovarajuće nazivne gustoće. Negativna vrijednost na dijagramu označava smanjenje u odnosu na vrijednost novog EPS-a, a pozitivna povećanje.



Slika 11. Devijacija svojstava serija S1-20 i S2-20 spram novog EPS-a 0-20



Slika 12. Devijacija svojstava serija S1-25 i S2-25 spram novog EPS-a 0-25

Lakši EPS ($\rho_{nom} = 20 \text{ kg/m}^3$) ima veću početnu poroznost i općenito je slabije kvalitete u odnosu na gušći EPS ($\rho_{nom} = 25 \text{ kg/m}^3$), pa dodatak reciklata manje utječe na ukupnu kvalitetu materijala (Slika 11). S druge strane, gušći EPS ima kompaktniju i homogeniju strukturu, pa ugradnja reciklata (koji je često nepravilniji i slabije kvalitete) više narušava njegova svojstva (Slika 12).

Uočavaju se također nešto lošija svojstva kod serija koje sadrže reciklat iz izvora S2. EPS iz poljoprivredne ambalaže (S2) je tijekom prethodne uporabe vjerojatno bio izložen UV zračenju, vlazi ili kemikalijama, dok čisti građevinski otpad (S1) prije reciklaže nije bio značajno oštećen.

4. Zaključak

Provedeno istraživanje ispituje utjecaj mehanički recikliranog EPS-a na svojstva konačnog materijala. Mehanički recikliran EPS iz dvaju izvora dodavan je u udjelima 5–50% EPS-u gustoće 20 kg/m^3 i 25 kg/m^3 . Analizirana su gustoća, tlačna čvrstoća pri 10% deformaciji i savojna čvrstoća.

Povećanjem udjela reciklata bilježi se pad gustoće, a s njom i tlačne čvrstoće, osim u seriji S1-20 s 5% reciklata, gdje čvrstoća ostaje nepromijenjena unatoč padu gustoće. Sličan trend vrijedi i za savojnu čvrstoću, međutim samo kvalitativno, obzirom da ne postoji točna veza između gustoće i savojne čvrstoće.

EPS manje gustoće bolje podnosi dodatak reciklata, odnosno ima manji pad svojstava u odnosu na djevičanski materijal, za razliku od gušćeg EPS-a. Nadalje, materijal koji sadrži reciklat dobiven mehaničkim recikliranjem poljoprivredne ambalaže pokazao je nešto lošija svojstva u odnosu na onaj s reciklatom građevinskog otpada. Manja standardna devijacija također ukazuje na veću kvalitetu sirovine – u ovom slučaju građevinskog otpada.

Svi EPS proizvodi, osim onih koji se ne koriste za nosive primjene, moraju zadovoljiti dva kriterija vezana uz tlačnu čvrstoću pri 10% deformacije i savojnu čvrstoću (Tablica C.1, Prilog C [8]) kako bi se osigurala odgovarajuća funkcionalnost. Sve ispitane serije zadovoljavaju propisane uvjete za nenosive primjene ($\sigma_b \geq 50 \text{ kPa}$). Međutim, EPS serija S2-25 s 50% reciklata (EPS 25 kg/m^3 pomiješan s reciklatom iz poljoprivredne ambalaže) ne može se koristiti za nosive primjene. Ostale serije zadovoljavaju kriterije, iako su sve s 50% reciklata na granici primjenjivosti.

Literatura

- [1] J.-P. Lange, "Managing Plastic Waste—Sorting, Recycling, Disposal, and Product Redesign," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 9, no. 47, pp. 15722–15738, Nov. 2021, doi: 10.1021/acssuschemeng.1c05013.
- [2] E. Cornago, P. Boerkey, and A. Brown, "Preventing single-use plastic waste: Implications of different policy approaches," Oct. 2021. doi: 10.1787/c62069e7-en.
- [3] K. Hamad, M. Kaseem, and F. Deri, "Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works," *Polym Degrad Stab*, vol. 98, no. 12, pp. 2801–2812, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025.
- [4] C. Lindener, J. Hein, and E. Fischer, "Waste Management of HBCD-Containing EPS/XPSWaste in Europe and Forecast Model up to 2050.," 2020.
- [5] European Committee for Standardization (CEN), "EN ISO 845:2009, Cellular plastics and rubbers - Determination of apparent density," Brussels, 2009.
- [6] European Committee for Standardization (CEN), "EN ISO 29469:2022, Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour," Brussels, 2022.
- [7] European Committee for Standardization (CEN), "EN 12089:2013, Thermal insulating products for building applications - Determination of bending behaviour," Brussels, 2013.
- [8] European Committee for Standardization (CEN), "EN 13163:2012+A2:2016, Thermal insulation products for buildings - Factory made expanded polystyrene (EPS) products - Specification," Brussels, 2016.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.24>

Usporedba prirodnih kompozita sa sintetičkim kompozitnim rješenjima u suvremenoj sanaciji i numerička analiza ojačanih zidanih konstrukcija

Comparison of Natural Composites with Synthetic Composite Solutions in Modern Rehabilitation and Numerical Analysis of Reinforced Masonry Structures

Mario Žigo¹, Nikola Grgić²

(1) Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, mzigo@gradst.hr

(2) Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, nrgvic@gradst.hr

Sažetak

Kompozitni materijali imaju ključnu ulogu u suvremenim sanacijama pri čemu, zbog svoje čvrstoće i izdržljivosti, dominiraju umjetni kompoziti od stakla, karbona, čelika i plastike. Ipak, rast svijesti o utjecaju tih materijala na zdravlje i okoliš, uz rast zahtjeva održivosti, potaknuo je istraživanja prirodnih alternativa. Materijali poput lana, viskoze i konoplje pokazali su se održivim rješenjima zahvaljujući dobrim mehaničkim svojstvima, kompatibilnosti s tradicionalnim konstrukcijama i ekološkoj prihvatljivosti. Ovaj rad, kao dio šireg istraživanja [1], donosi pregled mehaničkih svojstava prirodnih i umjetnih kompozita. Nadalje, prikazana je usporedba očekivanog ponašanja i načina otkazivanja uzoraka zida ojačanih mrežicom od prirodnih i staklenih vlakana podvrgnutih izravnom posmičnom opterećenju.

Ključne riječi: Sanacija, Ojačanje, Prirodni kompoziti, Zidane konstrukcije

Abstract

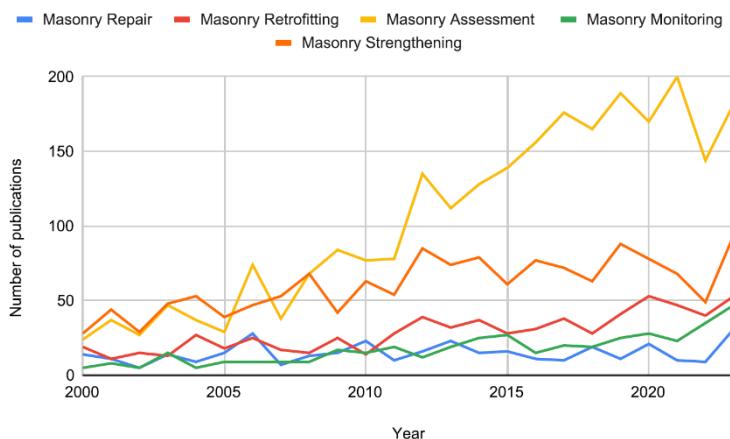
Composite materials have a crucial role in modern structural rehabilitation. Synthetic composites based on glass, carbon, steel and plastic are widely used due to their high strength and durability. However, growing awareness of the potential impact on human health and the environment, as well as increasing sustainability requirements, has led to an increase in research into natural alternatives. Materials such as flax, viscose and hemp have emerged as sustainable solutions that offer favorable mechanical properties, compatibility with traditional structures and environmental benefits. This paper is part of a broader study [1] that provides an overview of the mechanical properties of natural and synthetic composites. It also presents a comparative analysis of the expected behavior and failure modes of masonry specimens reinforced with natural and glass fiber meshes under direct shear loading.

Keywords: Retrofitting, Reinforcement, Natural composites, Masonry structures

1. Uvod

Zahtjevi suvremene gradnje temelje se na inovativnosti, održivosti i ekološkoj prihvatljivosti uz istovremene visoke zahtjeve očuvanja izvorne vrijednosti konstrukcije. Slijedom navedenog javila se potreba za istraživanjem novih tehnika i materijala u području građevinarstva.

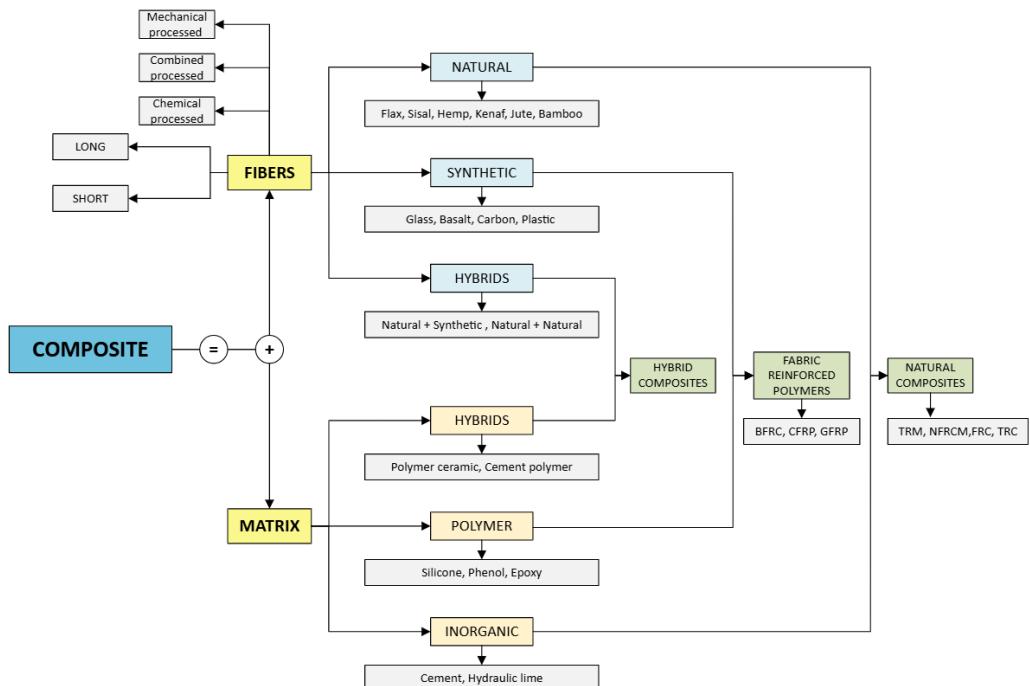
Republika Hrvatska, kao i mnoga druga područja svijeta, nalazi se na izrazito seizmički aktivnom području, stoga je od velike važnosti slijediti suvremene principe i standarde gradnje. Potreba za intenzivnim podizanjem svijesti o važnosti pregleda i ojačanja postojećih konstrukcija najviše se ogleda u posljedicama koje proizlaze uslijed izvanrednih opterećenja poput potresa. Mianmar i Tajland 2025, Turska i Sirija 2023, Japan 2011, Haiti 2010 su samo neki od brojnih zabilježenih slučaja katastrofa proizašlih iz urušavanja građevinskih konstrukcija. Povijesne građevine su često pravilnog tlocrtog oblika, malih raspona, masivnih stupova i zidova izloženih „povolnjom“ tlačnom gravitacijskom djelovanju, međutim izgradnja od prirodnih materijala poput kamena ili opeke često bez uporabe čvrstog vezivnog sredstva čini ih čestim predmetom u rekonstrukcijama. U posljednjih 40 godina razvijene su brojne tehnike rekonstrukcije i ojačanja uz iskorak u razvoju materijala poput mrežica, vlakana, mikro armiranih mortova i sličnih kompozitnih rješenja. Slika 13 prikazuje graf koji svjedoči porastu interesa za sanacijom i ojačanjem konstrukcija. Štoviše, može se zaključiti da su konstruktivna ojačanja aktualna tema u građevinarstvu te da i dalje postoji potreba za dodatnim istraživanjima usmjerenima na razvoj novih materijala i tehnika ojačanja konstrukcija.



Slika 13. Prikaz zastupljenosti radova objavljenih od 2000. do 2023. koji u naslovu sadrže riječi „Obnova zida“, „Sanacija zida“, „Procjena zida“, „Praćenje stanja zida“ i „Ojačanje zida“ [2]

2. Kompoziti u građevinarstvu

Kompoziti su cjeline sastavljene od matrice i vlakana. Matrice, naročito one na bazi cementa ili hidrauličnog vapna, su vrlo krte te pri nastanku inicijalne pukotine unutar neojačane matrice ona propagira kroz cijelu matricu. Kako bi se zaustavila propagacija u matricu se dodaju vlakna koja svojom visokom vlačnom čvrstoćom doprinose nastavku prijenosa opterećenja. Postoje različite podjele kompozita no načelno se mogu podijeliti prema Slika 14.



Slika 14. Podjela kompozita [1]

Prirodna vlakna odlikuje mala masa, visoka vlačna čvrstoća i vodoupojnost koja u konačnici rezultira degradacijom površine što za posljedicu ima smanjenu prionjivost s matricom [3]. Geometrijska nepravilnost iz koje proizlaze nejednolika mehanička svojstva u različitim smjerovima karakteristična je za prirodna vlakana. S druge strane, sintetička vlakna s obzirom na kontrolirani proizvodni proces dosežu visoke čvrstoće i uz pravilnu geometriju imaju vrlo dobru prionjivost s polimernim matricama što ih čini široko zastupljenim u kompozitima današnjice. Vlačna čvrstoća prirodnih vlakana varira od 400 do 1700 MPa u ovisnosti o podrijetlu vlakana, dok sintetička vlakna poput staklenih dosežu 3400 MPa, a karbonska 4800 MPa [4]. Nadalje, pad čvrstoće prirodnih vlakana može biti uzrokovan različitim faktorima poput biodegradacije uslijed prirodnog nametnika, temperaturnog djelovanja i UV degradacije. Izloženost visokim temperaturama dovodi do oslobađanja vode iz vlakana uslijed čega dolazi do degradacije celuloznih i neceluloznih tvari koja rezultira smanjenjem njihovih mehaničkih svojstava [5]. Nasuprot tome, sintetički kompoziti pri nižim

temperaturama nisu izloženi značajnoj degradaciji, međutim pri dosegu temperature staklastog prijelaza polimerna matrica postaje gumasta što uzrokuje puzanje te pad čvrstoće i krutosti [6].

Brojna kompozitna rješenja i tehnike primjene su razvijene kombinacijom različitih vrsta matrica i vlakana. Jedna od takvih podjela, na sustave ojačanja vlažnog nanošenja (wet lay-up), prefabricirane i specijalizirane sustave, dana je u [7]. Polimerni kompoziti ojačani vlaknima (FRP) dalje se dijele na polimere ojačane staklenim vlaknima (GFRP) i polimere ojačane karbonskim vlaknima (CFRP), koji su obično homogeni kompoziti s kratkim vlaknima ugrađenim u polimernu matricu. Osim toga, mortovi ojačani tekstilom (TRM) najčešće su sustavi sastavljeni od anorganske matrice (npr. cementa ili hidrauličnog vapna) ojačane pletenom mrežom od prirodnih vlakana. Moderni prirodni kompoziti uključuju tekstilom ojačani beton (TRC), mortove ojačane tekstilom (TRM), cementne matrice ojačane vlaknima (FRCM) i cementne matrice ojačane prirodnim vlaknima (NFRCM). Osnovna razlika između FRP i TRM sustava je kontrola raspodjele i orientacije vlakana koja je ključna jer značajno utječe na mehaničko ponašanje i obrasce loma kompozita.

Iz svega što je navedeno za zaključiti je da učinkoviti kompozit predstavlja produkt iterativnog optimizacijskog procesa vlakana i matrice potkrijepljenog kvalitetnim istraživačkim radom u vidu eksperimentalnog dokazivanja mehaničkih svojstava.

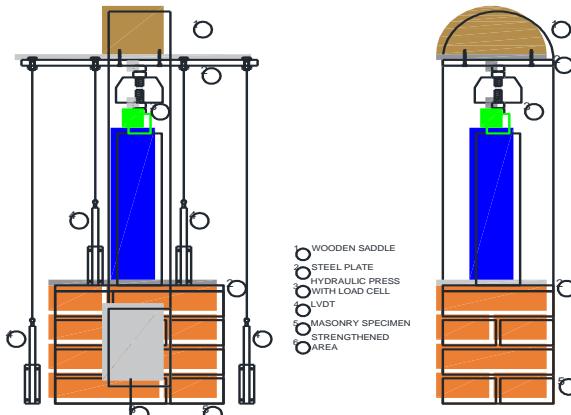
2.1. Eksperimentalna ispitivanja i numerička analiza otkazivanja kompozita

Kompozitna ojačanja mogu otkazati unutar strukture kompozita, na dodirnoj plohi ojačanja i konstrukcije koja se ojačava te pucanjem osnovnog materijala konstrukcije. Način otkazivanja ovisi o mehaničkim svojstvima kompozita i kvaliteti prionjivosti između osnovnog materijala i ojačanja. Eksperimentalnim metodama na dovoljnom broju uzoraka prema standardiziranim procesima i pod različitim opterećenjima moguće je odrediti doprinos pojedinog kompozita na nosivost i stabilnost konstrukcije. U sklopu šireg ispitivanja doprinosa kompozitnih ojačanja, na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, bit će proveden niz ispitivanja i analiza u svrhu dokazivanja mogućnosti njihove primjene u suvremenim sanacijama.

Eksperimenti će se provoditi na ziđu izgrađenog od opeke standardnog formata, a varirat će se tri vrste morta na bazi hidrauličkog vapna s nultom emisijom CO₂ kao i dvije vrste ojačanja. Mehaničke karakteristike korištenih mrežica su deklarirane u tehničkom listu proizvođača. Usaporedit će se doprinos mrežice od staklenog vlakna vlačne čvrstoće 40 kN/m' i širinom oka mrežice 25 mm x 25 mm s mrežicom od prirodnih vlakna impregniranih epoxy smolom čvrstoće 22 kN/m' i širinom oka mrežice 12.7 mm x 12.7 mm. Prvi set ispitivanja će se odnositi na ispitivanje čvrstoće prionjivosti na osnovni materijal ojačanja i evidentiranje tipova otkazivanja pomoću direktnog posmičnog testa Slika 15.

Za parametre materijala iz Tablica 2 provedena je numerička analiza u svrhu odabira veličine ojačane plohe kako bi se postigli različiti načina otkazivanja. Budući da se količina vlakana mrežice, koji sudjeluju u prijenosu opterećenja, mijenja u ovisnosti o širini ojačane plohe, a nosivost na dodirnoj plohi osnovnog materijala i ojačanja ovisi o cjelokupnoj lijepljenoj površini moguća je pojava različitih vrsta otkazivanja. Odabrana širina ojačane plohe iznosi 14 cm i nije promjenjiva. U slučaju kada duljina lijepljene plohe, koja je varijabilna, iznosi 10 cm maksimalna sila koja se može pojaviti u staklenim vlaknima je 5.0 kN, a posmična otpornost morta je produkt maksimalnog posmičnog naprezanja propisanog

tehničkim listom proizvoda (0,15 MPa) i površine lijepljenja. Zaključeno je da ako je sila u vlaknima mrežice veća od posmične sile u mortu otkazivanje će se dogoditi preko morta, dok s druge strane ako se poveća duljina lijepljene plohe na 25 cm sila u mrežici će biti manja od sile u mortu te će se otkazivanje dogoditi rupturom vlakana mrežice.



Slika 15. Set-up direktni pomicni test

Rezultati analize koji su prikazani za mrežicu od staklenih (Tablica 3) i prirodnih vlakana (Tablica 4) predstavljaju važan korak u planiranju budućeg eksperimentalnog dijela istraživanja.

Tablica 2. Parametri mrežica

Mrežica	Sila u mrežici kn/m'	Širina oka mrežice cm	Broj vlakana na m'	Sila u jednom vlaknu mrežice kn
Staklo	40	2,5	40	1
Lan	22	1,27	78	0,28

Tablica 3. Očekivani načini otkazivanja za mrežicu od staklenih vlakana

Uzorak	Širina [cm]	Duljina [cm]	Broj vlakana	Nosivost vlakana [kN]	Posmična sila u mortu [kN]	Način otkazivanja
1	14	10	5	5	2,21	Mort
2	14	22	5	5	4,85	Mort
3	14	25	5	5	5,51	Mrežica

Tablica 4. Očekivani načini otkazivanja za mrežicu od lanenih vlakana

Uzorak	Širina [cm]	Duljina [cm]	Broj vlakana	Nosivost vlakana [kN]	Posmična sila u mortu [kN]	Način otkazivanja
1	14	10	11	3,10	2,21	Mort
2	14	15	11	3,10	3,31	Mort
3	14	25	11	3,10	5,51	Mrežica

3. Zaključak

Analizom dosadašnjih spoznaja može se zaključiti da kompoziti sastavljeni od prirodnih vlakana imaju potencijal za upotrebu u građevinarstvu s obzirom na njihove visoke mehaničke karakteristike, ubrzanu i ekološki prihvatljivu razgradivost nakon završetka uporabnog vijeka. Najveći prostor za unapređenje kompozita s prirodnim vlknima se može pronaći u poboljšanju interakcije matrice i vlakna, otpornosti na vatru i atmosferilije kao i razvoj sustava sa sidrenjem u osnovni materijal. Mehanička svojstva kompozita od prirodnih vlakana potrebno je dodatno istražiti prema standardiziranim testovima i smjernicama u normama kako bi oni mogli postati adekvatna zamjena za kompozite od umjetnih materijala. Provedena je numerička analiza kao inicijalni korak za buduća eksperimentalna ispitivanja. Na temelju rezultata bit će izrađeno 18 uzoraka ziđa na kojima će se provesti direktni posmični test i donijeti zaključci o čvrstoći prionjivosti kompozita na osnovni materijal.

Literatura

- [1] M. Žigo, M. Nikolić, M. Smilović Zulim, and N. Grgić, "Overview Of The Development, Application And Challenges Of Natural Fiber Reinforced Cementitious Matrix (Nfrcm)." doi: DOI:10.5592/CO/3CroCEE.2025.49.
- [2] A. Keshmiry, S. Hassani, U. Dackermann, and J. Li, "Assessment, repair, and retrofitting of masonry structures: A comprehensive review," Sep. 06, 2024, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137380.
- [3] A. Gholampour and T. Ozbakkaloglu, "A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications," Jan. 01, 2020, Springer New York LLC. doi: 10.1007/s10853-019-03990-y.
- [4] A. Bismarck, S. Mishra, and T. Lampke, "Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites," in *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, CRC Press, 2005. doi: 10.1201/9780203508206.ch2.
- [5] K. Van De Velde and E. Baetens, "Thermal and Mechanical Properties of Flax Fibres as Potential Composite Reinforcement."
- [6] M. Bazli and M. Abolfazli, "Mechanical properties of fibre reinforced polymers under elevated temperatures: An overview," Nov. 01, 2020, MDPI AG. doi: 10.3390/polym12112600.
- [7] T. Kišiček, M. Stepinac, T. Renić, I. Hafner, and L. Lulić, "Strengthening of masonry walls with FRP or TRM," 2020, Union of Croatian Civil Engineers and Technicians. doi: 10.14256/JCE.2983.2020.

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.25>

Dinamika plaže u Brovinju: istraživanje erozije i stabilnosti kosina

Beach Dynamics in Brovinje: A Study of Erosion and Slope Stability

Matea Zupičić¹, Igor Ružić¹, Čedomir Benac¹

(1) Građevinski fakultet Rijeka, matea.zupicic@uniri.hr, iruzic@uniri.hr, cbenac@gradri.uniri.hr

Sažetak

U sklopu Interreg projekta RESONANCE provode se istraživanja obalne erozije i nestabilnosti padina na obalama Jadrana. Ovi geomorfološki procesi su značajan rizik za sigurnost ljudi, infrastrukturu i gospodarske djelatnosti. Jedna od lokacija istraživanja je plaža Brovinje u Raškom zaljevu. Obala i плитки dio morskog dna na istraženoj lokaciji oblikovani su u fliškoj stijenskoj masi koja je podložna ubrzanim raspadanju. To je potvrđeno terenskim mjeranjima. Metodologija istraživanja uključuje višekratna UAV snimanja i LiDAR skeniranja, kojima se prate promjene reljefa i kvantificira intenzitet geomorfoloških procesa. Rezultati također ukazuju na intenzivno premještanje sedimenta okomito i paralelno u odnosu na obalu i pomicanje berme tijela žala prema obalnoj liniji. Istraživanje potvrđuje važnost sustavnog praćenja obalnih procesa u svrhu procjene geoloških hazarda.

Ključne riječi: obalna erozija, morfološke promjene, stabilnost kosina, valna energija, fliš

Abstract

As part of the Interreg RESONANCE project, research is being conducted on coastal erosion and slope stability along the Adriatic coast. These geomorphological processes are a significant risk to human safety, infrastructure, and economics. One of the study sites is Brovinje Beach in Raša Bay. The coast and shallow part of sea bottom are formed in flysch rock mass, which is subject to weathering. This is confirmed by field surveying. The research methodology includes repeated UAV surveys and LiDAR scanning to monitor terrain changes and quantify the intensity of geomorphological processes. The results also indicate intense sediment redistribution in both cross-shore and longshore directions, as well as the seaward shift of the berm. The study confirms the importance of coastal monitoring for the assessment of geological hazards.

Keywords: coastal erosion, morphological changes, slope stability, wave energy, flysch

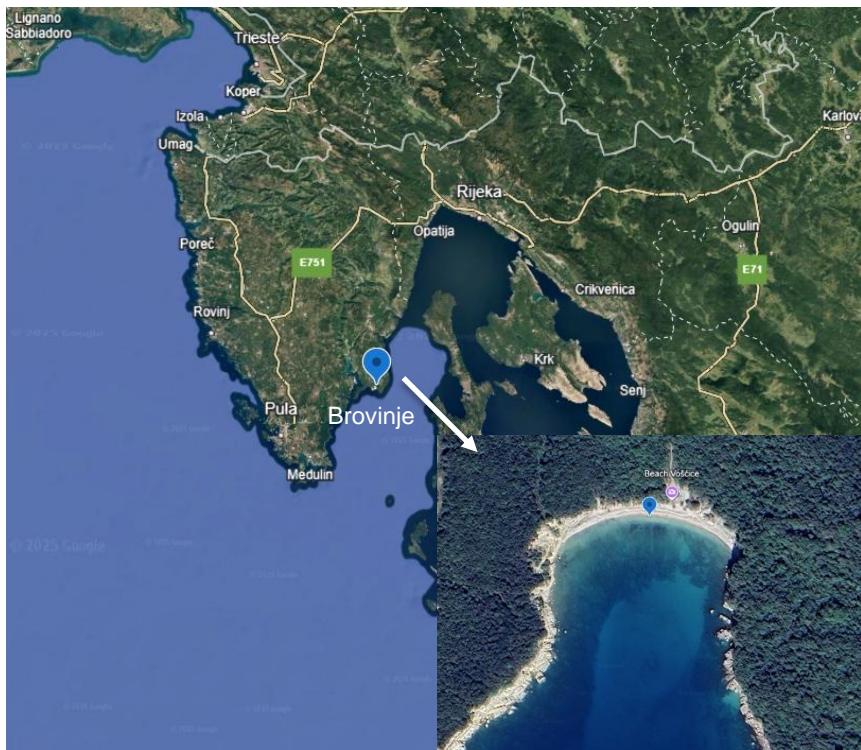
1. Uvod

Hrvatska obala Jadranskog mora sve je ranjivija na utjecaje klimatskih promjena, uključujući porast razine mora, obalnu eroziju i promjene u količini oborina koje dodatno povećavaju rizik od odrona. Predviđa se rast razine mora približno +0,53 mm godišnje u kvarnerskom području, što dugoročno predstavlja izazov za infrastrukturu, ekosustave i lokalne zajednice [1]. Uz to obalna područja duž sjevernog Jadrana pokazuju izražene desetogodišnje trendove porasta oborina, s povećanjima do 0,2 mm/dan po desetljeću što može imati ozbiljne posljedice na učestalost i prostornu raspodjelu odrona [2], [3], [4]. Erozija i obalni geološki hazardi na području Kvarnera dokumentirani su u više znanstvenih radova [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Ipak, unatoč njihovoj važnosti, postojeća istraživanja ostaju prostorno ograničena na pojedine lokacije. S obzirom na gospodarsku i ekološku važnost hrvatske jadranske obale, postoji jasna potreba za sustavnijim, regionalno obuhvatnim pristupom analizi obalne ranjivosti i geoloških hazarda [9], [12]. Cilj ovog istraživanja usmjerjen je na praćenje dinamike žala i klizišta u području Brovinja koja je izložena djelovanju valova, oborina i povišenih razina mora, u skladu s projektom RESONANCE, u sklopu kojeg je ova lokacija prepoznata kao jedna od ključnih za analizu. Projekt teži smanjenju rizika za ljude i infrastrukturu kroz bolje razumijevanje čimbenika koji utječu na nestabilnost padina i marinsku eroziju u jadranskom području. Preliminarni rezultati ovog istraživanja posebno su usmjereni na utjecaj umjerenog jakog juga na morfološke promjene žala, ukazujući na značajnu redistribuciju sedimenta. Time se postavljaju temelji za precizniju procjenu obalne ranjivosti i učinkovitije upravljanje obalnim prostorom u uvjetima sve izraženijih klimatskih promjena.

2. Područje i metode istraživanja

2.1. Područje istraživanja

Plaža Brovinje smještena je u uvali Vošćice, u naselju Brovinje pokraj Koromačna u Raškom zaljevu na istočnoj obali istarskog poluotoka (Slika 1). To je prirodno šljunčano žalo duljine oko 180 metara, koja se ističe svojom geomorfološkom i geološkom kompleksnošću. Osnovu podloge čine siliciklastične stijene paleogenske starosti, poznate kao fliš koji se sastoji pretežno od kalcitičnih laporanih s proslojcima vapnovitih pješčenjaka (kalarenita). Zbog djelovanja marinske erozije u fliškoj stijenskoj masi oblikovan je klif, a u njegovom podnožju marinska terasa. Fliška stijena je zahvaćena trošenjem na površini zbog čega se događa stalno osipanje s kosina oko tijela žala. Međutim, u prihrani tijela žala sudjeluju samo odlomci nastali od vapnovitih pješčenjaka, dok se laporii posve raspadaju u morskoj vodi. Tijelo žala sastoji se od poluzaoobljenih odlomaka veličine šljunka. Porijeklom su iz spomenutih vapnenačkih pješčenjaka vidljivih u kosini klifa. Moguće je da je dio tih sedimenata transportiran s viših predjela. Tijelo žala samo djelomično pokriva morsko dno pa je fliška stijenska masa vidljiva i na tim mjestima (Slika 17).



Slika 16. Područje istraživanja.

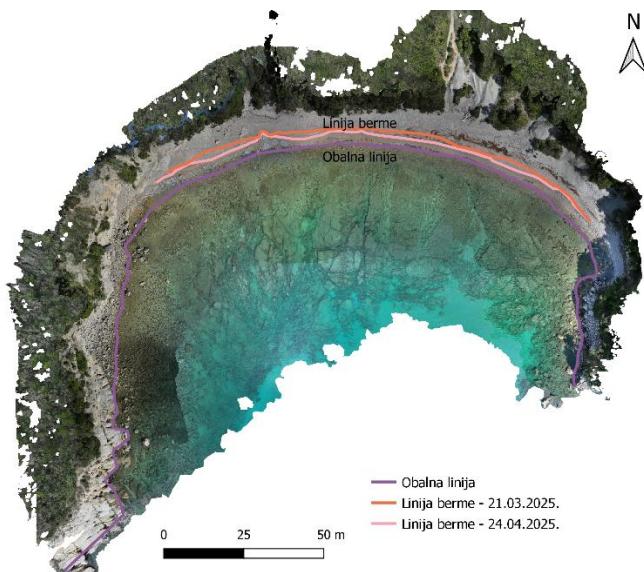
2.2. Izvor podataka i mjerna oprema

Prikupljanje podataka počelo je u studenom 2024. godine korištenjem UAV Dji Mavic 3 Pro bespilotne letjelice za snimanje visoko rezolucijskih zračnih snimki i LiGrip 01 Lite RTK skenera koji kombinira LiDAR tehnologiju s integriranim kamerom za realne korekcije lokacijskih podataka te visoko precizni LAS oblak točaka u stvarnim bojama. Do sada su provedena četiri snimanja, a u ovom radu analiziraju se dva najrelevantnija, ona iz 21. ožujka i 24. travnja 2025., koja prikazuju morfološke promjene žala nastale tijekom jednog djelovanjem olujnog juga.

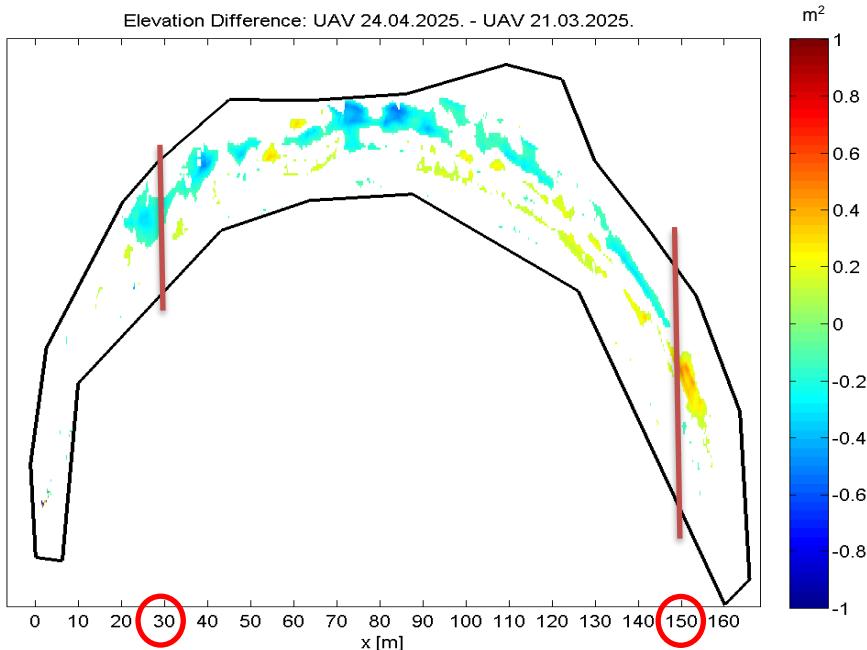
3. Rezultati

Ovaj dio istraživanja usmjeren je na praćenje promjena u morfolojiji žala nakon djelovanja umjereno jakog juga (5 Beauforta, brzina vjetra oko 35 km/h). Pretpostavlja se da tijekom olujnih uvjeta, pod utjecajem valova određene energije, dolazi do dodatnog podlokovanja baze kosine oblikovane u fliškoj stijenskoj masi, čime se ubrzava proces njegove destabilizacije. Ova je hipoteza potvrđena terenskim opažanjima koja su ukazala na aktivno trošenje stijene upravo uslijed navedenih uvjeta.

Značajne promjene u morfolojiji žala zabilježene su neposredno nakon udara juga. Te promjene uključuju premještanje šljunka kako u smjeru okomitom na obalu (cross-shore), tako i duž obalne linije (longshore). Na Slika 17 prikazana je plaža Brovinje s ucrtanim položajem obalne linije, gdje je vidljivo pomicanje pozicije berme između dvaju snimanja gotovo duž cijelog žala (21.03.2025. i 24.04.2025.). Prije juga, berma je bila smještena na višoj koti, osobito na srednjem i zapadnom dijelu žala. Međutim, uslijed djelovanja valova i premještanja sedimenta prema moru, došlo je do njenog pomaka. Analiza visinskih promjena žala dodatno potvrđuje ovu dinamiku jer su uočene mjerljive promjene koje ukazuju na aktivno premještanje ru sedimenta uzrokovano valnom energijom. Na Slika 18 prikazana je razlika visina između dva snimanja terena gdje je jasno vidljiva erozija gornjeg dijela žala duž većine plaže osim na istoku gdje se zapaža akumulacija šljunka. Povučeni šljunak nakuplja se bliže obalnoj liniji te dolazi do formiranja nove berme.

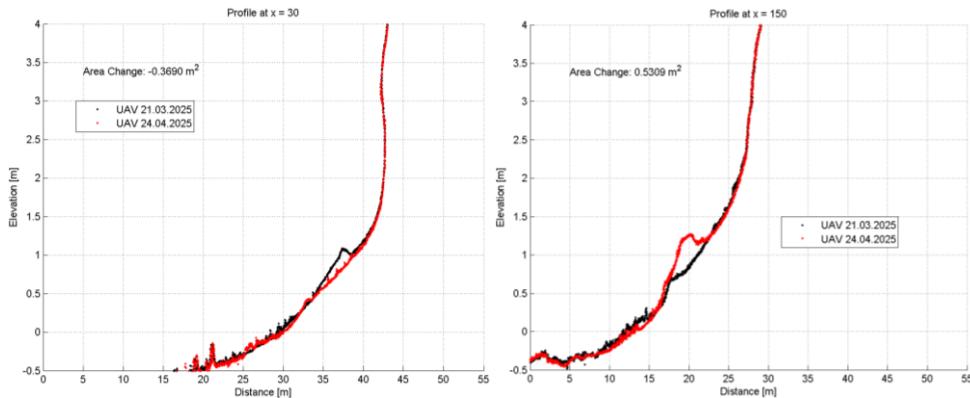


Slika 17. UAV ortofoto prikaz plaže Brovinje (21.03.2025.) s ucrtanim linijama položaja obalne berme snimljenima u različitim vremenskim razdobljima koje jasno prikazuju promjenu položaja berme uslijed djelovanja juga.



Slika 18. Visinska razlika površine žala Brovinje između dvaju snimanja (21.03.2025. i 24.04.2025.).

Na Slika 19 prikazane su promjene u morfološkim profilima, između dvaju snimanja, zapadnog i istočnog dijela plaže Brovinje. Lijeva slika prikazuje profil žala na zapadnom dijelu ($x = 30$), gdje je evidentan negativna bilanca promjene površine, točnije smanjenje od $-0,37 \text{ m}^2$. Ova razlika između profila ukazuje na sveukupnu eroziju duž profila, odnosno povlačenje materijala s viših dijelova žala prema obalnoj liniji. Nasuprot tome, desni graf prikazuje profil na istočnom dijelu žala ($x = 150$), gdje je zabilježena pozitivna promjena površine od $0,50 \text{ m}^2$. Ovdje se vidi nakupljanje materijala i kreiranje berme na višoj koti. Usporedba ovih dvaju profila potvrđuje intenzivnu cross-shore i longshore redistribuciju sedimenta.



Slika 19. Usporedba morfoloških profila plaže Brovinje između dvaju razdoblja snimanja (21.03.2025. i 24.04.2025.). Lijevi graf prikazuje promjene na zapadnom dijelu plaže (profil $x = 30$), dok desni graf prikazuje istočni dio plaže (profil $x = 150$).

4. Zaključak

ovom radu prikazana su početne rezultate Istraživanja na plaži Brovinje unutar okvira Interreg RESONANCE projekta. Rezultati ukazuju na izraženu osjetljivost obalnog sustava na kratkotrajne, ali intenzivne atmosferske pojave poput juga. Kombinacijom UAV snimanja i LiDAR tehnologije dobiveni su podaci koji omogućuju kvantitativnu analizu promjena u morfologiji žala. Rezultati jasno potvrđuju značajno premještanje sedimenta tijela žala u cross-shore i longshore smjerovima, pomicanje berme žala prema obalnoj liniji te eroziju viših dijelova žala tijekom jednog analiziranog olujnog utjecaja. Terenska opažanja također su potvrdila ubrzano trošenje stijenske mase na kosini klifa zbog dodatnog podlokavanja, čime raste rizik od pojave nestabilnosti. Rezultati ovih istraživanja naglašavaju važnost sustavnog praćenja dinamike obalnih obalnih procesa radi bolje procjene geoloških hazarda i planiranja prilagodbe klimatskim promjenama. Primijenjena metodologija pokazala se učinkovitom u detekciji promjena na mikro lokaciji te predstavlja vrijednu osnovu za buduće regionalne analize obalne ranjivosti.

Zahvale

Ovo istraživanje provedeno je u sklopu projekta Interreg RESONANCE, kojem zahvaljujemo na finansijskoj i organizacijskoj podršci. Također zahvaljujemo Laboratoriju za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci na ustupljenoj opremi i tehničkoj podršci tijekom provođenja terenskih aktivnosti.

Literatura

- [1] A. Baric, B. Grbec, and D. Bogner, "Potential implications of sea-level rise for Croatia," *J. Coast. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 299–305, 2008, doi: 10.2112/07A-0004.1.
- [2] I. Tojčić, C. Denamiel, and I. Vilibić, "Kilometer-scale trends, variability, and extremes of the Adriatic far-future climate (RCP 8.5, 2070- 2100)," *Front. Mar. Sci.*, vol. 11, p. 1329020, 2024, doi: 10.3389/fmars.2024.1329020.
- [3] IPCC, "Climate change 2014 synthesis report," *IPCC Geneva, Szwitzerl.*, pp. 1059–1072, 2014.
- [4] S. Seneviratne *et al.*, "Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment," 2012, doi: 10.1017/CBO9781139177245.006.
- [5] Č. Benac, "Recentni geomorfološki procesi i oblici u području Riječkog zaljeva," *Hrvat. Geogr. Glas.*, vol. 54, no. 1., pp. 1–17, 1992.
- [6] Č. Benac, I. Ružić, and E. Žic, "Ranjivost obala u području Kvarnera," *Pomor. Zb.*, vol. 44, no. 1, pp. 201–214, 2006.
- [7] Č. Benac, M. Oštarić, and S. Dugonjić Jovančević, "Geotechnical properties in relation to grain-size and mineral composition: case study landslide in the Rječina Valley (Croatia)," *Geol. Croat.*, vol. 67, no. 2, pp. 127–136, 2014, doi: 10.4154/gc.2014.09.
- [8] M. Juračić, Č. Benac, K. Pikelj, and S. Ilić, "Comparison of the vulnerability of limestone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia)," *Geomorphology*, vol. 107, no. 1–2, pp. 90–99, 2009, doi: 10.1016/j.geomorph.2007.05.020.
- [9] K. Pikelj, I. Ružić, S. Ilić, M. R. James, and B. Kordić, "Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia," *Ocean & Coast. Manag.*, vol. 156, pp. 223–238, 2018, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.11.019.
- [10] I. Ružić, I. Marović, Č. Benac, and S. Ilić, "Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia," *Geo-marine Lett.*, vol. 34, pp. 555–565, 2014, doi: 10.1007/s00367-014-0380-4.
- [11] I. Ružić and Č. Benac, "Ranjivost obala otoka Raba zbog rasta razine mora," *Hrvat. vode*, vol. 24, no. 97, pp. 203–214, 2016.
- [12] I. Ružić, S. Dugonjić Jovančević, Č. Benac, and N. Kravica, "Assessment of the coastal vulnerability index in an area of complex geological conditions on the Krk Island, Northeast Adriatic Sea," *Geosciences*, vol. 9, no. 5, p. 219, 2019, doi: 10.3390/geosciences9050219.