

Hidrotehnika i geotehnika: sinergija, otpornost i održivost

Zbornik proširenih sažetaka

1. regionalne konferencije

HIDROTEHNIKA I GEOTEHNIKA (H&G 2026)

Urednici:

Meho Saša Kovačević

Dražan Vouk

Danijela Jurić Kaćunić

Mario Bačić

Lovorka Librić

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet

Zagreb, 2026.

Water Management and Geotechnics: Synergy, Resilience and Sustainability

Book of Extended Abstracts
of the 1st Regional Conference

WATER MANAGEMENT AND GEOTECHNICS (H&G 2026)

Editors:

Meho Saša Kovačević

Dražen Vouk

Danijela Jurić Kaćunić

Mario Bačić

Lovorka Librić

University of Zagreb Faculty of Civil Engineering
Zagreb, 2026.

Izdavač:

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb, Hrvatska

Urednici:

Meho Saša Kovačević, Dražen Vouk, Danijela Jurić Kaćunić, Mario Bačić, Lovorka Librić

Konferencija:

1. regionalna konferencija HIDROTEHNIKA I GEOTEHNIKA

Datum i lokacija:

15.-18. travanj 2026, Šibenik, Hrvatska

Organizatori:

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet

Centar građevinskog fakulteta d.o.o.

Suorganizatori:

Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Hrvatski geološki institut

Sveučilište Sjever

Institut za vode „Josip Juraj Strossmayer”

Hrvatsko društvo za odvodnju i navodnjavanje

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet

Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet

Hrvatsko hidrološko društvo

Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Hrvatsko geotehničko društvo

Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa

Hrvatsko društvo za zaštitu voda

Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet

Univerzitet „Sv. Ćirila i Metodija” u Skoplju, Građevinski fakultet

Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Publisher:

University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb, Croatia

Editors:

Meho Saša Kovačević, Dražen Vouk, Danijela Jurić Kačunić, Mario Bačić, Lovorka Librić

Conference:

1st Regional Conference WATER MANAGEMENT AND GEOTECHNICS

Date and location:

15.-18. April 2026, Šibenik, Croatia

Organizers:

University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Center of Faculty of Civil Engineering ltd

Co-organizers:

University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Croatian Geological Survey

University North

Josip Juraj Strossmayer Water Institute

Croatian Society for Irrigation and Drainage

University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering

University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering

Croatian Hydrological Society

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Croatian Geotechnical Society

Croatian Society of Chemical Engineers and Technologists

Croatian Water Pollution Control Society

University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology

University of Sarajevo, Faculty of Civil Engineering

Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Faculty of Civil Engineering

University of Mostar, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy

ORGANIZACIJA / ORGANIZATION

PREDSJEDNICI / CHAIRMANS

Dražen Vouk

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Danijela Jurić Kaćunić

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

ORGANIZACIJSKI ODBOR / ORGANIZATION COMMITTEE

Domagoj Nakić

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Dalibor Carević

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Gordon Gilja

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Lovorka Librić

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Mario Bačić

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Diana Dražić Lalić

Center of Faculty of Civil Engineering ltd, Zagreb

Ana Škrtić

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet / University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering

Danko Holjević

*Sveučilište u Rijeci, Medicinski fakultet; Hrvatske vode; Hrvatska komora inženjera građevinarstva /
University of Rijeka, Faculty of Medicine; Croatian Waters; Croatian Chamber of Civil Engineers*

Predgovor

Zadovoljstvo nam je predstaviti zbornik proširenih sažetaka prve znanstveno-stručne regionalne konferencije Hidrotehnika i geotehnika: sinergija, otpornost i održivost (H&G 2026), koja se održava u Šibeniku, u travnju 2026. godine. Konferencija okuplja stručnjake, istraživače i inženjere iz regije i šire s ciljem razmjene znanja, iskustava i primjera dobre prakse, te jačanja suradnje između teorije i inženjerske prakse u područjima hidrotehnike i geotehnike. U vremenu sve izraženijih klimatskih promjena i rastućih zahtjeva prema infrastrukturnim sustavima, upravo sinergija hidrotehničkih i geotehničkih pristupa predstavlja ključ za razvoj otpornijih i održivijih rješenja. Interdisciplinarni pristup ove konferencije omogućuje cjelovitije sagledavanje izazova u projektiranju, izvedbi i održavanju hidrotehničkih i geotehničkih objekata, uz naglasak na inovativna i primjenjiva rješenja. Tematska područja konferencije obuhvaćaju istražne radove i monitoring u hidrotehnici i geotehnici, vodoopskrbne sustave, sustave javne odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda, uređenje vodotoka i sustave obrane od poplava, tehničke mjere smanjenja rizika od urbanih poplava, pomorsku hidrotehniku, temeljenje i zaštitu građevnih jama kod hidrotehničkih i geotehničkih objekata, upravljanje rizicima od geotehničkih i hidroloških opasnosti, mjernu opremu u hidrotehnici i geotehnici te materijale u hidrotehnici i geotehnici.

Prošireni sažeci objedinjeni u ovom zborniku odražavaju aktualnost i raznolikost obrađenih tema te doprinose razmjeni znanja i daljnjem razvoju struke. Nadamo se da će zbornik poslužiti kao poticaj za nova istraživanja, razmjenu iskustava i jačanje suradnje među sudionicima, u cilju razvoja sigurnijih, otpornijih i održivijih hidrotehničkih i geotehničkih sustava.

Zagreb, travanj 2026.

Urednici

Foreword

It is our pleasure to present the book of extended abstracts of the first scientific and professional regional conference Water Management and Geotechnics: Synergy, Resilience and Sustainability (H&G 2026), held in Šibenik, in April 2026. The conference brings together experts, researchers, and engineers from the region and beyond, with the aim of exchanging knowledge, experiences, and examples of good practice, as well as strengthening the collaboration between theory and engineering practice in the fields of water management and geotechnics. In a time of increasingly pronounced climate change and growing demands on infrastructure systems, the synergy between water management and geotechnical approaches represents a key factor in developing more resilient and sustainable solutions. The interdisciplinary nature of this conference enables a more comprehensive understanding of the challenges in the design, execution, and maintenance of water management and geotechnical structures, with an emphasis on innovative and applicable solutions. The thematic areas of the conference include investigative works and monitoring in water management and geotechnics, water supply systems, public wastewater collection and treatment systems, river engineering and flood protection systems, technical measures for reducing urban flood risks, marine hydrotechnics, foundation engineering and excavation support for water management and geotechnical structures, risk management of geotechnical and hydrological hazards, measurement equipment in water management and geotechnics, and materials in water management and geotechnics.

The extended abstracts collected in this book reflect the relevance and diversity of the topics addressed and contribute to the exchange of knowledge and the further development of the profession. We hope that this book will serve as an incentive for new research, the exchange of experiences, and the strengthening of cooperation among participants, with the goal of developing safer, more resilient, and more sustainable water management and geotechnical systems.

Zagreb, April 2026.

Editors

Sadržaj / Content

<i>Gorana Ćosić-Flajsig, Ivan Vučković, Barbara Karleuša, Filip Kalinić</i> MOGUĆNOSTI UNAPRJEĐENJA MONITORINGA ABIOTIČKIH ČIMBENIKA RADI ODREĐIVANJA OKOLIŠNO PRIHVATLJIVOG PROTOKA (E-FLOW).....	1
<i>Želimir Veinović, Galla Uroić, Helena Vučenović, Ana Ljubić</i> MATERIJALI ZA IZRADU ZAŠTITNIH SLOJEVA ODLAGALIŠTA ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA.....	3
<i>Dubravko Domitrović, Tomislav Korman, Mario Klanfar, Vjekoslav Herceg</i> EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KUTA SIPANJA ZA KALIBRACIJU DEM MODELA GRANULIRANIH MATERIJALA	5
<i>Helena Vučenović, Želimir Veinović, Dubravko Domitrović</i> UTJECAJ PROMJENE SASTAVA OTPADA NA STABILNOST ODLAGALIŠTA	7
<i>Kemal Edip, Nikola Hrnčić, Davor Stanko, Julijana Bojadjieva, Radmila Salic Makreska, Vlatko Sheshov</i> ANALIZA SEIZMIČKE STABILNOSTI KOSINE UZ RAZMATRANJE UTJECAJA GIBANJA TLA U ZEMLJANOJ BRANI	9
<i>Gordon Gilja, Marko Antonije Vukadin, Antonija Harasti, Igor Tadić</i> PRORAČUN FUNKCIONALNOSTI NEUKORIJENJENIH PERA NA MORFODINAMIČKE PROMJENE U KORITU DRAVE.....	13
<i>Kemal Edip, Vlatko Sheshov, Julijana Bojadjieva, Zoran Rakicevic, Aleksandra Bogdanovic</i> ADVANCED SIMULATION OF PARTIAL CONSOLIDATION	15
<i>Dejan Ivanovski, Kemal Edip, Toni Kitanovski, Vlatko Sheshov, Julijana Bojadjieva</i> DESIGN OF RETAINING STRUCTURE FOR DEEP CONSTRUCTION PIT	19
<i>Goran Volf, Ivana Sušanj Čule, Vanja Travaš, Bruno Kostelić</i> MIKROPLASTIKA I UREĐAJI ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA	23
<i>Marta Marija Gržić, Igor Ružić, Nino Krvavica, Barbara Karleuša, Bojana Horvat, Nevenka Ožanić, Goran Volf, Ivona Petković, Iva Mrak</i> HIDROTEHNIČKI ASPEKT KLIMATSKI OTPORNOG PLANIRANJA OBALNOG PODRUČJA JADRANA – DIO CRESCO ADRIA PROJEKTA.....	25
<i>Igor Ružić, Filip Trinajstić, Ivan Marović, Čedomir Benac</i> ODRŽIVA IZGRADNJA I ODRŽAVANJE LUKOBRANA U KONTEKSTU KLIMATSKIH PROMJENA	27
<i>Nino Krvavica, Marta Marija Gržić, Lovre Panda, Ivona Petković, Ante Šiljeg</i> PROCJENA OPASNOSTI I RIZIKA OD POPLAVA USLIJED JAKIH OBORINA – ISKUSTVA IZ HRVATSKIH PRIOBALNIH GRADOVA	29
<i>Marta Marija Gržić, Nino Krvavica</i> KADA NANOS UKLONITI, A KADA ZADRŽATI? LEKCIJE S KUPE I RJEČINE	31

<i>Ivana Sušanj Čule, Goran Volf, Nevenka Ožanić, Barbara Karleuša</i> OCJENA STANJA KVALITETE VODA MALIH VODNIH RESURSA UPOTREBOM FUZZY -WQI MODELA.....	33
<i>Sanja Dugonjić Jovančević, Igor Ružić, Josip Peranić, Martina Vivoda Prodan, Čedomir Benac</i> KORIŠTENJE DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA I SFM METODOLOGIJE U PRAKTIČNE SVRHE U GEOTEHNICI – PRIMJENA U ANALIZI STABILNOSTI STIJENSKIH POKOSA.....	35
<i>Dalibor Carević, Damjan Bujak, Dalibor Crnac</i> ANALIZA VELIČINE KAMENE OBLOGE OBALOUTVRDE PJEŠAČKO BICIKLISTIČKE STAZE DUILOVO-STOBREČ (SPLIT).....	37
<i>Ivana Lovrić, Filip Kalinić, Mario Medven</i> ULOGA DMA ZONA PRI DETEKCIJI GUBITAKA I UPRAVLJANJU VODOOPSKRBNIM SUSTAVOM GRADA ZAGREBA	39
<i>Veljko Srzić, Marin Milin, Marko Džaja, Iva Aljinović</i> MONITORING PROTOKA I ZASLANJENJA VODNOG STUPCA U IZRAZITO USLOJENIM UVJETIMA ESTUARIJA.....	41
<i>Antonia Mirčeta, Stjepan Matić, Danijela Jurić Kačunić, Mladen Cvetković</i> UREĐENJE I STABILIZACIJA LIJEVE OBALE RIJEKE BOSUT U VINKOVcima OD RKM 92+253 DO RKM 92+953.....	43
<i>Martina Pavlović, Ivan Vujić, Marko Mance</i> REKONSTRUKCIJA LIJEVOG UNSKOG NASIPA U NASELJU UŠTICA	45
<i>Dajana Kučić Grgić, Marinko Markić, Matija Cvetnić, Petar Kassal, Šime Ukić, Dražen Vouk, Marin Vuković, Mario Kušek, Ornella Host, Nina Šimunić Briški, Gordan Lauc, Magdalena Ujević Bošnjak, Tomislav Bolanča</i> SUSTAV RANOG UPOZORAVANJA TEMELJEN NA UMJETNOJ INTELIGENCIJI ZA SIGURNU, OTPORNU I ODRŽIVU VODOOPSKRBU (AQUAGUARDIAN).....	47
<i>Ivan Kosović, Marco Pola, Josip Terzić, Staša Borović, Ivan Tot, Kosta Urumović</i> HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION AND GROUNDWATER MONITORING WITHIN THE RETFOR PROJECT: CASE STUDY OF THE SPAČVA-BOSUT BASIN	49
<i>Dražen Vouk, Domagoj Nakić, Matija Kirhmajer, Josip Marić, Hana Posavčić</i> MATEMATIČKI MODELI KAO NEIZOSTAVAN ALAT PRI PROJEKTIRANJU SUSTAVA ODVODNJE.....	51
<i>Srđan Draganović</i> VAKUUMSKA KANALIZACIJA IDEALNO REŠENJE ODVODNJE OTPADNIH VODA ZA MALA NASELJA I TURISTIČKA SREDIŠTA	53

MOGUĆNOSTI UNAPRJEĐENJA MONITORINGA ABIOTIČKIH ČIMBENIKA RADI ODREĐIVANJA OKOLIŠNO PRIHVATLJIVOG PROTOKA (E-FLOW)

GORANA ĆOSIĆ-FLAJSIG¹, IVAN VUČKOVIĆ^{1,2}, BARBARA KARLEUŠA³, FILIP KALINIĆ¹

¹ Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, Hrvatska

² Elektropjekt d.d., Hrvatska

³ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

Uvod

Jedan od najvažnijih alata upravljanja kakvoćom voda riječnog sliva je monitoring kakvoće površinskih voda. Postojeći monitoring kakvoće površinskih voda u Hrvatskoj uspostavljen je prije nekoliko desetljeća s različitim ciljevima, te još uvijek postoji prostor za unaprjeđenje u skladu sa zahtjevima Okvirne direktive o vodama EU-a (ODV EU), vodiča monitoringa (European Communities, 2003) i metodologije monitoringa (Hrvatske vode, 2016). Na primjeru prekograničnog ruralnog sliva rijeke Sutle (Hrvatske i Slovenije) rezultati monitoringa dobiveni od Hrvatskih voda korišteni su u svrhu određivanja okolišno prihvatljivog protoka (Environmental flow, E-flow) za sadašnji scenarij kao i za buduće scenarije koji uključuju utjecaj klimatskih promjena. No modeliranje utjecaja klimatskih promjena prate izazovi povezivanja količine i kakvoće površinskih voda radi nedovoljne međusobne usklađenosti hidrološkog monitoringa i monitoringa kakvoće površinskih voda, koji uključuje abiotičke čimbenike bitne za očuvanje pojedine indikatorske vrste riba u vrijeme mrijesta. Navedene činjenice rezultiraju nedostatkom kvalitetnih podataka za korištenje matematičkih modela, stoga i nedostatkom odgovarajućih informacija za upravljanje kakvoćom voda. Cilj ovog rada je ukazati na problematiku i mogućnosti unaprjeđenja monitoringa abiotičkih čimbenika radi određivanja okolišno prihvatljivog protoka.

Metode

U ovom radu, na primjeru prekograničnog ruralnog sliva rijeke Sutle, nizvodno od brane Vonarje, prikazat će se analiza dostupnih podataka postojećeg monitoringa kakvoće površinskih voda, hidrološkog monitoringa, podataka dobivenih iz klimatoloških modela, podataka dobivenih modeliranjem budućih scenarija pod utjecajem klimatskih promjena korištenjem matematičkog modela SWAT (Soil and Water Assessment Tool), te potreba za njegovim unaprjeđenjem. Na mjernoj postaji Zelenjak, koja je referentna za vodno tijelo nizvodno od brane Vonarje za koju se određuje okolišno prihvatljivi protok, mjeri se temperatura vode ($^{\circ}\text{C}$) i otopljeni kisik ($\text{mg O}_2/\text{l}$). Nisu raspoloživi podaci o brzini vode, a proračun visine vodnog stupca pri dnu do vrijednosti koja je značajna za indikatorsku vrstu nije dovoljno precizan. Za potrebe analize korišteni su podaci poprečnog presjeka profila Zelenjak i vodomjerenja, temeljem kojih je izračunata visina vodnog stupca i brzina. Ograničenja vezana uz aproksimaciju za sadašnji scenarij i buduće scenarije pod utjecajem klimatskih promjena, bit će detaljno obrazloženi u radu. Za buduće scenarije je korištenjem SWAT modela dobivena količina otopljenog kisika, izražena u $\text{mg O}_2/\text{l}$. Temperatura zraka postoji kao ulazni podatak za SWAT model dobiven iz klimatoloških modela, ali ne i temperatura vode koja je ključna za indikatorsku vrstu riba. Stoga, je za određivanje temperature vode bilo potrebno pronaći adekvatan način modeliranja. U tu svrhu korišten je alat strojnog učenja.

Ključni podaci i koraci cjelokupne metodologije određivanja okolišno prihvatljivog protoka su:

1. Primjena SWAT modela - ulazni podaci za SWAT model: temperatura zraka za buduće scenarije + podaci iz postojećeg hidrološkog monitoringa i monitoringa kakvoće voda; izlazni podaci SWAT modela za buduće scenarije: Q (m^3/s), U_N (kg), U_P (kg), sediment (kg) i otopljeni kisik (mg/l).
2. Izbor scenarija - odabrana su dva umjerena buduća scenarija za period 2020-2050 i 2070-2100.
3. Definiranje ključnih abiotičkih čimbenika važnih za riblje zajednice, odnosno odabranu indikatorsku vrstu - indikatorska vrsta ribe za predmetno vodno tijelo površinskih voda je potočna mrena, a u Tablici 1 navedeni su abiotički čimbenici s obzirom na razvojne faze te indikatorske vrste.
4. Korištenje modela strojnog učenja - temeljem postojećeg monitoringa voda modeliraju se podaci o temperaturi vode, dubini vode i brzini vode za buduće scenarije (Ghobadi i Kang, 2023).

5. Procjena prihvatljivih vrijednosti okolišno prihvatljivog protoka za buduće scenarije pod utjecajem klimatskih promjena, na lokaciji Zelenjak za vodno tijelo nizvodno od brane Vonarje, u odnosu na izračunati okolišno prihvatljiv protok za sadašnji scenarij (Ćosić-Flajsig i dr., 2024).

Tablica 1. Prikaz temeljnih ekoloških zahtjeva odabrane indikatorske vrste

Ključni abiotički čimbenici važni za riblje zajednice					
Biogeografsko područje	Životni vijek	Dubina vode (cm)	Brzina vode (m/s)	Temperatura vode (°C)	Otopljeni kisik (mg/l)
<i>Barbus balcanicus</i> – potočna mrena	mrijest	veće od visine tijela 20 – 45	0,35 – 0,5	4 - 17 (14) *	iznad 6
	< mlada riba	oko 30	0,06 – 0,2	(15) *	iznad 6
	odrasla riba	veće od visine tijela 20 – 45	0,35 – 0,5	4 - 20	iznad 6

*Brojke u zagradama () = optimalne vrijednosti

Rezultati

U nedostatku mjerenih podataka, izračunati su abiotički čimbenici (hidrološki čimbenici – dubina i brzina vode) koji su u direktnoj ovisnosti s poprečnim profilom i protokom, a koji su ključni za indikatorsku vrstu riba. Mjereni poprečni profil ima atipičan oblik (nije trapezni), a geodetska mjerenja provedena su u jednogodišnjim ili rjeđim intervalima. Na temelju dostupnih podataka i obrade u AutoCAD-u izračunate su protočne površine u odnosu na promjenu vodostaja, pri čemu su dobivene jednadžbe ovisnosti protočne površine i vodostaja. Iz tih jednadžbi i mjerenih protoka proračunate su brzine. Izračunati podatci korišteni su umjesto mjerenih podataka monitoringa. Iz rezultata klimatskih modela korišteni su podatci o temperaturi zraka, no temperatura vode koja je ključna za indikatorsku vrstu riba, izračunata je putem strojnog učenja. Model strojnog učenja povezoao je podatke postojećeg monitoringa/izračunate podatke, te izračunao podatke za buduće scenarije uslijed klimatskih promjena, koji su ocijenjeni kao zadovoljavajući što ukazuje na mogućnost njihovog daljnjeg korištenja.

Zaključak

Stoga, u unaprjeđenom hidrološkom monitoringu predlaže se koristiti hidrometrijsko krilo za mjerenje brzine, kao i preciznije očitavanje dubine voda instrumentom na profilu na kojem se mjeri protok radi iznimno malih vrijednosti. Unaprjeđeni monitoring i češća geodetska snimanja korita omogućila bi precizniju procjenu brzina i dubinu vode. Također, u izračune prilikom korištenja klimatskih modela preporuča se uključivanje temperature vode. Navedena analiza predstavlja dobru podlogu za definiranje budućih monitoring programa koji uključuju interdisciplinarni pristup, posebno u odnosu na promijenjene abiotičke čimbenike, te uvjete u vodnim ekosustavima uslijed sve izraženijih klimatskih promjena. Predložena metodologija, kroz korake unaprjeđenja postojećeg monitoringa, vodi ka uspostavljanju monitoringa kakvoće površinskih voda „po mjeri“ (engl: tailor - made) riječnog sliva, a sve sukladno načelima ODV-a.

Literatura

European Communities (2003) *Guidance Document No 7 Monitoring under the Water Framework Directive*. Produced by Working Group 2.7.

Hrvatske vode (2016) *Metodologija monitoringa i ocjenjivanja hidromorfoloških pokazatelja*.

Ghobadi, F. and Kang, D. (2023) 'Application of Machine Learning in Water Resources Management: A Systematic Literature Review', *Water*, 15, 620.

Ćosić-Flajsig G. et al. (2024) 'E-flow holistic assessment in data-limited river basin under climate change impact', in *Proceedings of the 18th International Symposium Water Management & Hydraulic Engineering - WHME 2024*, Štrbské Pleso, Slovakia, 10 – 14 September 2024.

Zahvala: Istraživanje i objavljivanje ovoga rada sufinancirano je sredstvima Sveučilišta u Rijeci kroz projekt "Upravljanje vodnim resursima i otpornost na klimatske promjene" (šifra projekta: uniri-iz-25-27).

MATERIJALI ZA IZRADU ZAŠTITNIH SLOJEVA ODLAGALIŠTA ISKORIŠTENOG NUKLEARNOG GORIVA

ŽELIMIR VEINOVIĆ¹, GALLA UROIĆ¹, HELENA VUČENOVIĆ¹, ANA LJUBIĆ¹

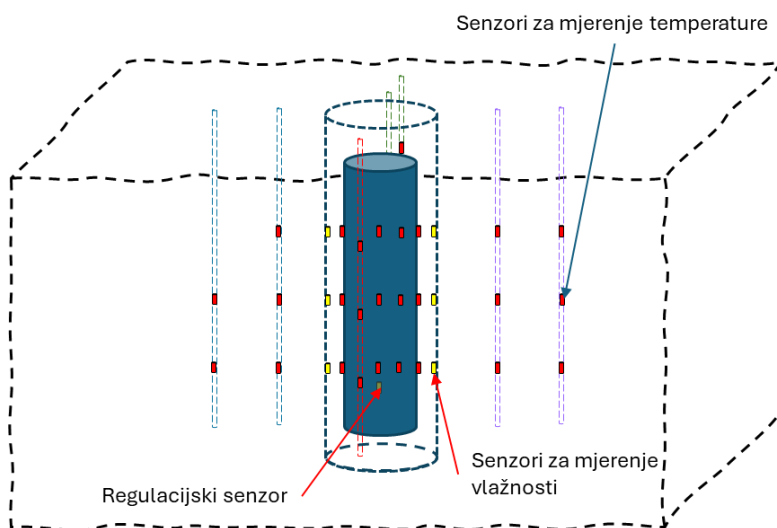
¹ Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Hrvatska

Uvod

Zaštitni slojevi odlagališta iskorištenog nuklearnog goriva (ING) i spremnici u kojima se ING nalazi predstavljaju inženjerske barijere koje moraju zadržati svojstva inhibicije radionuklida i korozijskih produkata te omogućiti sigurnost odlagališta na period od 100 000 godina. Programi istraživanja, razvoja i uspostave odlagališta (Programi IRUO) ING-a razlikuju se od države do države zavisno o geologiji države, odabranom konceptu odlaganja i sl. (IAEA, 2022; Larva et al., 2024), ali svi uključuju ekstenzivna istraživanja kako stijene domaćina, tako i materijala od kojih su izrađene inženjerske barijere (Åkesson et al., 2012; Ichikawa et al., 2004). Materijal koji se uz bakar kao vanjski materijal spremnika, planira koristiti kao inženjerska barijera u većini Programa IRUO-a je Na-bentonit. On treba osigurati nisku plinu i vodopropusnost pa se u Programima IRUO-a se zahtijeva detaljno istraživanje svojstava bentonita i njihovih promjena tijekom vremena te izrada sigurnosne studije koja u kontekst stavlja materijal, tražena svojstva i promjene tijekom vremena, uz procjenu rizika i potencijalni utjecaj na biotu. U svrhu razvoja hrvatskog Programa IRUO-a za ING proveden je niz istraživanja bentonita, od kojih su ovdje predstavljena in situ istraživanje termo-hidro-mehaničko-kemijskih (THMK) efekata na modelu spremnika ugrađenog u stijenu i određivanje difuzije tricija iz tricirane vode kroz bentonit.

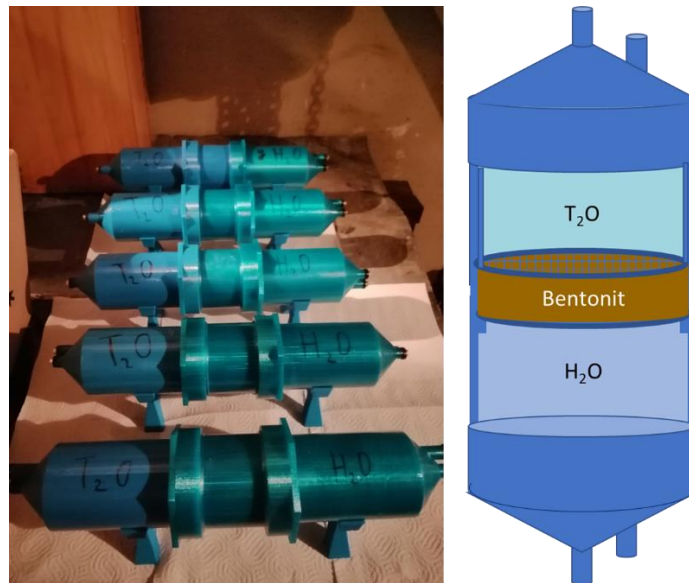
Metode

Istraživanja THMK uvjeta u stijeni i materijalu ispune (bentonit) provedena su ugradnjom osjetila za mjerenje temperature i vlažnosti u stijeni i bentonitu (**Slika 1**) i mjerenjima tijekom perioda od dvije godine, odnosno prestanka rada senzora radi korozije. Eksperiment postavljen kao na **Slici 1** simulira utjecaj topline koju otpušta ING na stijenu i inženjerske barijere, a spremnik je simuliran korištenjem grijaćeg tijela od bakrenog cilindra ispunjenog kvarenim pijeskom i termo uljem sa strujnim grijačem. Nakon provođenja in situ eksperimenta uzorci bentonita i bakreno grijaće tijelo analizirani su po pitanju promjena koje su nastale tijekom eksperimenta.



Slika 1. Postav eksperimenta za in situ mjerenje THMK efekata.

Određivanje difuzije tricija, promjene aktivnosti, na uzorku bentonita provedeno je uređajem prikazanim na **Slici 2**, tijekom perioda od pet mjeseci. Početne vrijednosti mjerenja koncentracije tricija u čeliji s ugrađenim uzorkom bentonita su: uzorak Voda bez tricija aktivnosti 4518 ± 60 TU, odnosno 533 ± 7 Bq/L; uzorak tricirane vode aktivnosti 38227 ± 172 TU, odnosno 4510 ± 20 Bq/L. Mjerenja koncentracije aktivnosti rađena su u tekućinskom scintilacijskom brojaču Quantulus 1220 (Institut Ruđer Bošković), jednom u dva tjedna.



Slika 2. Postav eksperimenta za određivanje difuzije tricija na uzorku bentonita.

Rezultati

In situ mjerenja THMK efekata pokazuju da Na-bentonit predstavlja materijal niske termičke provodljivosti te kod standardnog rasporeda spremnika ING-a u stijeni neće doći do pregrijavanja stijene niti inženjerskih barijera. Produkti korozije bakra kemijski su reagirali s bentonitom, a korozija je bila značajna obzirom na trajanje eksperimenta i čistoću bakra (99,97 %). Promjena koncentracije tricija dobro je korelirala s numeričkom simulacijom u programima SEEP/W i CTRAN/W (Geostudio) i od početne aktivnosti u netriciranoj vodi, 533 ± 31 TU, nakon 5 mjeseci gotovo eksponencijalnog porasta prosječna aktivnost iznosila je 12800 ± 3430 TU.

Zaključak

Kod korištenja Na-bentonita kao inženjerske barijere na odlagalištima ING-a za očekivati je relativno brza korozija barenog spremnika i značajan transport radionuklida difuzijom što će se odraziti i na ukupnu trajnost odlagališta.

Literatura

Åkesson, M., Malmberg, D., Boergesson, L., Hernelind, J., Ledesma, A. and Jacinto, A. (2012) *Temperature Buffer Test. Final THM modelling*. Report for Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm (Sweden).

IAEA (2022) *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14 (Rev. 1), IAEA, Vienna.

Larva, O., Veinović, Ž., Špelić, M., Budić, M., Mišur, I., Kurečić, T., Horvat, M., Maslač, J., Perković, D., Parlov, J., Pek Drapal, D., Drevenšek, M., Fifer Bizjak, K., Lenart, S., Žvanut, P., Geršak, A., Atanackov, J., Mencin Gale, E., Novak, A., Hrdličková, K., Hanžl, P., Cígler, V. and Urik, J. (2024) *RD&D Program for joint spent nuclear fuel and high level waste disposal in deep geological repository in the Republic of Croatia or in the Republic of Slovenia*. Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenoga nuklearnog goriva Nuklearne elektrane Krško, Zagreb, Hrvatska, 2024.

Ichikawa, Y., Kawamura, K., Fujii, N. and Kitayama, K. (2004) *Microstructure and micro/macro-diffusion behavior of tritium in bentonite*. Applied Clay Science, 26, pp. 75-90.

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KUTA SIPANJA ZA KALIBRACIJU DEM MODELA GRANULIRANIH MATERIJALA

DUBRAVKO DOMITROVIĆ¹, TOMISLAV KORMAN¹, MARIO KLANFAR¹, VJEKOSLAV HERCEG¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, Hrvatska.

Uvod

Metoda diskretnih elemenata (DEM) predstavlja numerički pristup za simulaciju ponašanja sustava neovisnih čestica, poput granuliranih (nekoherentnih) materijala, prahova, poljoprivrednih proizvoda te molekularnih sustava. U kontekstu geotehničkog inženjerstva i rudarstva, primjena DEM-a omogućuje detaljnu analizu kompleksnih interakcija unutar diskretnih medija, čime se poboljšava razumijevanje njihovih mehaničkih karakteristika. Ključna prednost DEM-a leži u modeliranju materijala kao skupa diskretnih čestica koje međusobno djeluju putem kontaktnih sila. Svaka čestica može imati različit oblik, veličinu i slobodu kretanja, što omogućuje precizno predviđanje lokalnih interakcija. Takav pristup je osobito koristan pri analizi ponašanja tla, stijena i drugih granuliranih materijala. DEM omogućuje simulaciju čestica u različitim fizikalnim stanjima, uključujući interakcije s fluidima (tekućinama i plinovima), korištenjem naprednih kontaktnih modela ili integracijom s drugim numeričkim metodama, poput računalne dinamike fluida (CFD) i metode konačnih elemenata (FEM).

U geotehničkom inženjerstvu, primjena DEM-a omogućuje primjerice analizu stabilnosti kosina, temelja, potpornih konstrukcija poput zidova i nasipa, a posebno je perspektivno područje primjene kod interakcije tla s geotehničkim strukturama poput geotekstila, armaturnih traka, pilota, sidara i sl.

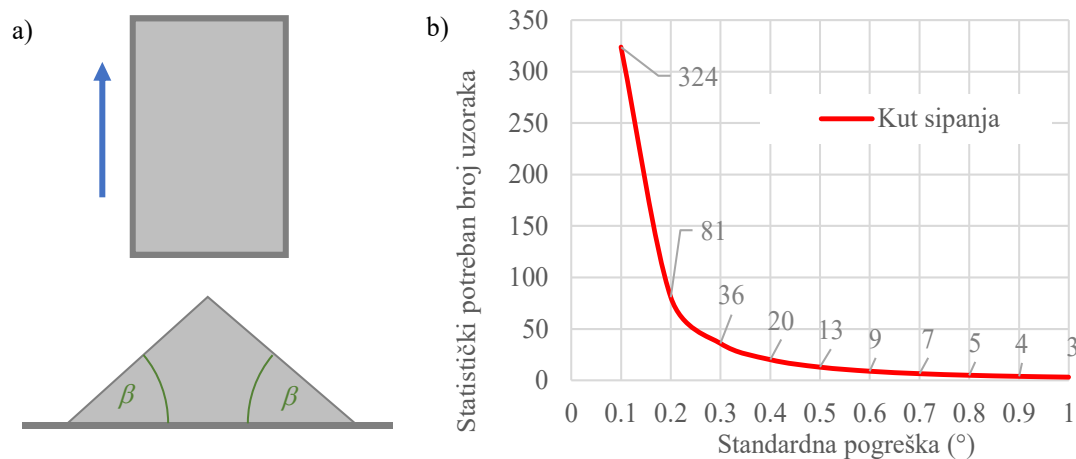
Za razliku od FEM-a, gdje se većina ulaznih parametara može izmjeriti izravno putem terenskih ili laboratorijskih ispitivanja (npr. kut unutarnjeg trenja, kohezija, gustoća čestica), DEM zahtijeva kalibraciju ulaznih parametara na mikrorazini (Coetzee i Nel, 2014) – uključujući kontaktna svojstva, koheziju i prigušenje između čestica – koji se ne mogu izravno izmjeriti. Jedan od eksperimentalnih postupaka koji se koristi za kalibraciju DEM modela granuliranih materijala je određivanje kuta sipanja (slika 1a, b). U ovom radu prikazani su rezultati određivanja kuta sipanja metodom cilindra za nekoliko vrsta granuliranih materijala, s ciljem izrade pouzdanog DEM modela za simulaciju rada strojeva s granuliranim materijalima te interakcije armaturnih traka s istima.

Metode

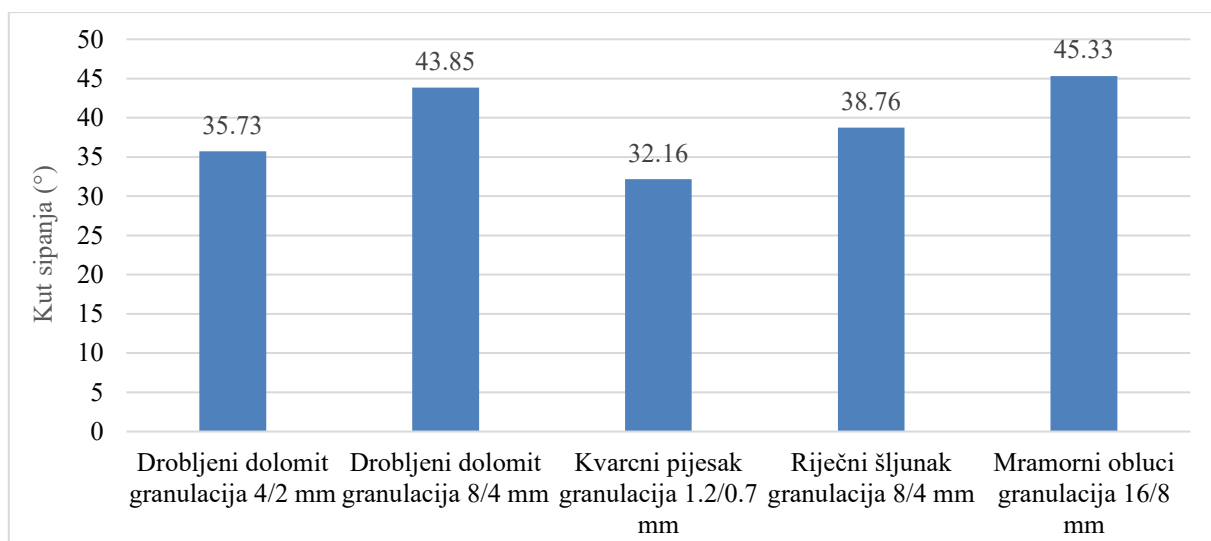
U okviru ovog istraživanja, formiranje hrpe granuliranog materijala provedeno je na posebno konstruiranom ispitnom uređaju primjenom metode podiznog cilindra (Slika 1a; Klanfar i dr., 2025). Za potrebe ispitivanja korišteni su uzorci drobljenog dolomita granulacije 4/2 mm i 8/4 mm, kvarcni pijesak granulacije 1,2/0,7 mm, riječni šljunak granulacije 8/4 mm i mramorni obluci granulacije 16/8 mm. Uzorak drobljenog dolomita granulacije 4/2 mm prije ispitivanja je opran i osušen. Nakon formiranja hrpa, kut sipanja i geometrija površine hrpe određeni su primjenom 3D fotogrametrijske metode, koja uključuje konverziju fotografija u oblake točaka te naknadnu obradu površine dobivenog digitalnog modela.

Rezultati

Rezultati mjerenja kuta sipanja mogu pokazivati značajne varijacije (Rousé, 2014). Povećanjem broja ponavljanja ispitivanja moguće je postići veću točnost rezultata. Na slici 1b prikazano je da za postizanje standardne pogreške od $\pm 0,4^\circ$ potrebno je provesti najmanje 20 ponavljanja mjerenja (Klanfar i dr., 2021). Slika 2 prikazuje prosječne vrijednosti kuta sipanja za različite vrste ispitivanih granuliranih materijala. Uzorak drobljenog dolomita granulacije 4/2 mm pokazao je prosječan kut sipanja od $35,73^\circ$. Uzorak drobljenog dolomita granulacije 8/4 mm imao je prosječnu vrijednost kuta sipanja od $43,85^\circ$ dok je kvarcni pijesak granulacije 1,2/0,7 mm pokazao vrijednost od $32,16^\circ$. Riječni šljunak granulacije 8/4 mm imao je prosječan kut sipanja od $38,76^\circ$ a mramorni obluci granulacije 16/8 mm pokazali su najveću prosječnu vrijednost kuta sipanja od $45,33^\circ$.



Slika 1. Shema metode podiznog cilindra (a) i statistički određena ovisnost potrebnog broja ponavljanja i standardne pogreške kod mjerenja kuta sipanja (Klanfar i dr., 2021) (b).



Slika 2. Prosječne vrijednosti kuta sipanja za različite vrste ispitivanih granuliranih materijala.

Zaključak

Metoda određivanja kuta sipanja pomoću podiznog cilindra, u kombinaciji s 3D fotogrametrijskom analizom, predstavlja pouzdan eksperimentalni postupak za kalibraciju DEM modela granuliranih materijala. Uočen je značajan utjecaj granulacije i oblika čestica na vrijednosti kuta sipanja, pri čemu su najveće vrijednosti zabilježene kod mramornih oblutaka, a najniže kod kvarcnog pijeska. Preciznost mjerenja značajno se povećava s brojem ponavljanja, što je također ključno za validaciju numeričkih simulacija. Dobiveni podaci predstavljaju temelj za daljnji razvoj DEM modela u kontekstu simulacije rada strojeva s granuliranim materijalima i interakcije tla s geotehničkim strukturama.

Literatura

- Coetzee, C. J. and Nel, R. G. (2014) 'Calibration of discrete element properties and the modelling of packed rock beds', *Powder Technology*, 264, pp 332–342.
- Rousé, P. (2014) 'Comparison of Methods for the Measurement of the Angle of Repose of Granular Materials', *Geotechnical Testing Journal*, 37 (1), pp. 164-168.
- Klanfar, M., Korman, T., Domitrović, D. and Herceg, V. (2025) '2D and 3D Scans of Granular Rock Material Heaps and Calibration Models', *Scientific Data* 12, 513.
- Klanfar, M., Korman, T., Domitrović, D., and Herceg, V. (2021) 'Testing the novel method for angle of repose measurement based on area-weighted average slope of a triangular mesh', *Powder Technology*, 387, 396–405.

UTJECAJ PROMJENE SASTAVA OTPADA NA STABILNOST ODLAGALIŠTA

HELENA VUČENOVIĆ¹, ŽELIMIR VEINOVIĆ¹, DUBRAVKO DOMITROVIĆ¹

¹ Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska

Uvod

U posljednjim desetljećima svijet se suočava s velikim globalnim promjenama koje su oblikovale način na koji živimo, proizvodimo i trošimo. Urbanizacija, gospodarski i industrijski razvoj, porast potrošačkog društva te ubrzani tehnološki napredak uvelike su pridonijeli značajnom povećanju količina otpada. Unatoč uvođenju zakona o održivom gospodarenju otpadom te uvođenje obveze odvojenog prikupljanja otpada i dalje postoji velika potreba za odlagalištima komunalnog otpada. Odlagališta omogućuju kontrolirano i sigurno zbrinjavanje otpada, čime se smanjuje rizik od onečišćenja okoliša, širenja bolesti i negativnog utjecaja na zdravlje ljudi. Poticanjem politika za odvojeno prikupljanja otpada dolazi do izdvajanja određenih komponenti iz miješanog komunalnog otpada, kao što su papir, plastika, metal i biootpad. Zbog izdvajanja određenih komponenti iz miješanog komunalnog otpada, došlo je i do promjene sastava otpada koji se odlaže na odlagalištima. Ove promjene u sastavu otpada izravno utječu na njegova fizikalna, mehanička i kemijska svojstva. Prema tome, ukoliko je došlo do promjene u fizikalnim i mehaničkim svojstvima otpada, mijenjaju se i parametri čvrstoće otpada, što izravno utječe na stabilnost tijela odlagališta. U ovom radu je opisano kako promjena sastava otpada utječe na promjenu mehaničkih svojstava otpada te kako ta promjena utječe na stabilnost odlagališta.

Metode

Kod izrade numeričkog modela i predviđanja stabilnosti jedna od najbitnijih stavki je odabir odgovarajućih parametara materijala. Komunalni otpad je kompozitni materijal velikog raspona promjera čestica, od sitnog i srednjeg zrna, koje čine osnovnu strukturu, pa do vlaknastih sastavnica, koje čine ojačavajuću strukturu (armaturu). Takvu vlaknastu strukturu otpada, koja ujedno doprinosi prividnoj koheziji, daju plastika, papir, karton, tekstil i drvo (Ivšić i dr., 2004). Međutim kod otpada se u obzir mora uzeti i činjenica da se materijali u krutom otpadu kontinuirano razgrađuju i njihovi se parametri mijenjaju s vremenom zbog različitih kemijskih i bioloških procesa, dok se svojstva određenih materijala ne mijenjaju (Machado et al., 2002). Prema tome se smatra da posmična čvrstoća komunalnog otpada ovisi o sastavu i tipu njegovih sastavnica. Odvajanjem otpada i promjenom postotka određenih sastavnica u komunalnom otpadu najveći postotak čini kuhinjski otpad koji je zapravo prerađeni otpad od hrane, a ne odlaže se u biootpad. Prema tome pretpostavlja se da takve promjene sastava otpada koje su nastale odvajanjem otpada utječu na stabilnost odlagališta.

Numerička analiza provedena je u dva programa, Plaxis 2D programu i Geostudio programskom paket SLOPE/W. Parametri koji opisuju tlo odnosno brtvene i drenažne slojeve na odlagalištu preuzeti su iz literature iz prethodnih istraživanja (Petrović et al., 2016). S ciljem da se provede analiza utjecaja količine kuhinjskog otpada parametri za otpad se mijenjaju ovisno o količini kuhinjskog otpada u ukupnom otpadu i preuzeti su iz studije koja je ispitala analizu utjecaja količine kuhinjskog otpada na parametre posmične čvrstoće otpada (Cho et al., 2011). Svojstva tla i otpadnog materijala modelirana su pomoću Mohr-Coulombovog modela. Kako bi se utvrdio utjecaj udjela prerađenog otpada od hrane u sloju otpada, analiza je provedena za tri različita udjela kuhinjskog otpada u komunalnom otpadu: 10%, 30% i 60%. Rezultati analize stabilnosti odlagališta prikazani su grafičkom i numeričkom obliku. Grafički oblik je klizna površina, koja je odabrana kao kritična klizna površina, a označava najmanji faktor sigurnosti (slika 1). Numerička analiza provedena je tri puta u svakom programu. Za svaki pojedinačni izračun korišten je isti model sa slojevima na odlagalištu i pripadajućim parametrima, dok su se za sloj otpada svaki put uzimali parametri za odgovarajuću količinu kuhinjskog otpada.

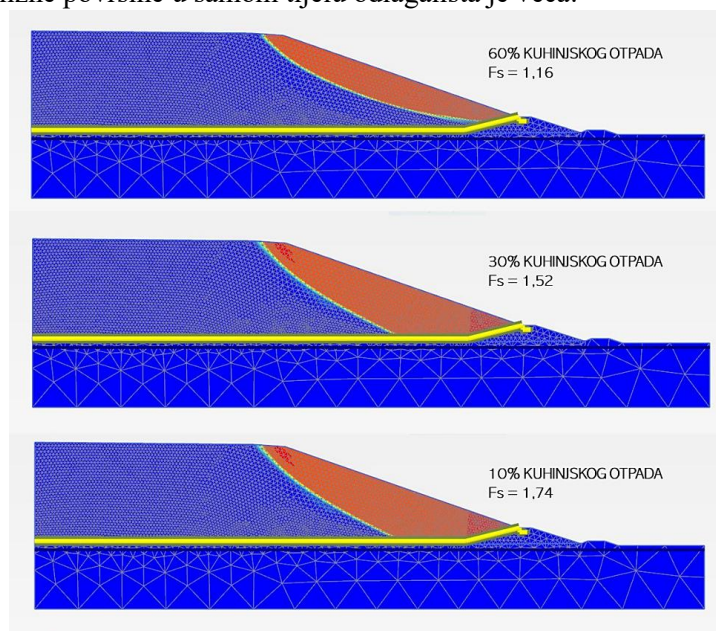
Rezultati

Rezultati analize stabilnosti izraženi preko faktora sigurnosti u Plaxis 2D i Geostudio programu prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Faktori sigurnosti za različite udjele kuhinjskog otpada

Rizik	Faktor sigurnosti PLAXIS 2D	Faktor sigurnosti GEOSTUDIO
10% kuhinjskog otpada	1,74	1,80
30% kuhinjskog otpada	1,52	1,45
60% kuhinjskog otpada	1,16	1,04

Rezultati numeričke analize pokazuju da se s povećanjem udjela prerađenog kuhinjskog otpada faktor sigurnosti smanjuje, a klizna površina je plića, kao što je prikazano na slici 1. U modelu u kojem sloj otpada sadrži nizak udio kuhinjskog otpada, slojevi u donjem brtvenom sloju imaju veći utjecaj, a klizna površina se javlja uglavnom na kontaktnim točkama tih slojeva. Za otpad s većim udjelom prerađenog otpada od hrane, vjerojatnost stvaranja klizne površine u samom tijelu odlagališta je veća.

**Slika 1.** Promjena faktora sigurnosti zbog promjene udjela kuhinjskog otpada u tijelu odlagališta

Zaključak

Rezultati numeričke analize provedene u Plaxisu i Geostudio programu pokazuju da promjena u sastavu otpada značajno utječe na smanjenje faktora sigurnosti, a time i na stabilnost nagiba odlagališta. Prema tome može se zaključiti da uz već postojeća saznanja o uzrocima nestabilnosti na odlagalištima treba u obzir uzeti i sastav otpada te kontinuirano prikupljati podatke o sastavu otpada kao i sve ostale podatke koji se kontinuirano bilježe s ciljem održavanja stabilnosti odlagališta.

Literatura

- Cho, Y. M., Ko, J. H., Chi, L., and Townsend, T. G. (2011) 'Food waste impact on municipal solid waste angle of internal friction', *Waste Management.*, 31(1), 26–32.
- Ivšić, T., Petrović, I. and Verić, F. (2004) 'Overview of parameters for stability analysis on waste disposal sites', *Građevinar*, 56 (11).
- Machado, S.L., Carvalho M.F. and Vilar O.M. (2002) 'Constitutive Model for Municipal Solid Waste', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 128, Issue 11.
- Petrović, I., Hip, I. and Fredlund, M (2016) 'Application of continuous normal–lognormal bivariate density functions in a sensitivity analysis of municipal solid waste landfill', *Waste management*, 55, 41–153.

ANALIZA SEIZMIČKE STABILNOSTI KOSINE UZ RAZMATRANJE UTJECAJA GIBANJA TLA U ZEMLJANOJ BRANI

KEMAL EDIP¹, NIKOLA HRNČIĆ², DAVOR STANKO³, JULIJANA BOJADJEVA⁴, RADMILA SALIC MAKRESKA⁵ AND VLATKO SHESHOV⁶

¹ Prof.dr.sc., Sveučilište Sv. Ćiril i Metod Skoplje, Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju - IZIIS, kemal@iziis.ukim.edu.mk

² Dr.sc., Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hrvatska, nhrncic@gfv.unizg.hr

³ Doc.dr.sc., Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hrvatska, dstanko@gfv.hr

⁴ Prof.dr.sc., Sveučilište Sv. Ćiril i Metod Skoplje, Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju - IZIIS, jule@iziis.ukim.edu.mk

⁵ Prof.dr.sc., Sveučilište Sv. Ćiril i Metod Skoplje, Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju - IZIIS, r_salic@iziis.ukim.edu.mk

⁶ Prof.dr.sc., Sveučilište Sv. Ćiril i Metod Skoplje, Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju - IZIIS, vlatko@iziis.ukim.edu.mk

Uvod

Seizmička ubrzanja tijekom velikih potresa uzrokuju pomake koji utječu na frikcijsku čvrstoću podloge tla u nasipnim branama, pri čemu je ukupni pomak pod utjecajem i magnitude i frekvencije seizmičkog događaja. Kumulativni pomak kosih masa tla u nasipnim branama izloženim seizmičkom opterećenju fundamentalno je upravljan karakteristikama magnitude i frekvencije seizmičke pobude. (Zienkiewicz, 1999) Ova korelacija zahtijeva opsežne numeričke simulacije koje uključuju različite vremenske povijesti ubrzanja kako bi se uhvatila cjelokupna paleta potencijalnih seizmičkih odgovora.

Ovo istraživanje ispituje odgovor kosine zemljane brane uslijed seizmički inducirane nestabilnosti za različite potresne scenarije i karakteristikama magnitude-frekvencije. Točno modeliranje gibanja tla je posebno kritično u situacijama gdje se događa dinamičko generiranje pornog tlaka unutar matrice tla. Spregnuti numerički pristup razvijen u ovom istraživanju konceptualizira element tla kao trofazni medij sastavljen od zrna tla, porne vode i pornog zraka.

Za matematički opis spregnutog pristupa koristi se teorija mješavine, uključujući koncept volumnih udjela. Pri primjeni modela, ponašanje kosine tla se numerički simulira. Simulacija počinje sa specificiranim početnim stupnjem saturacije vode u tijelu tla, koji proizlazi iz padalina. (Edip, 2013, Edip et al., 2018)

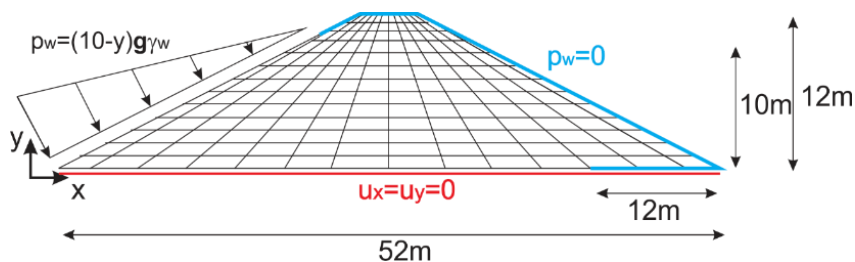
Simulacija uzima u obzir nelinearno ponašanje s obzirom na krivulje zadržavanja vode i materijalni model za čvrsto stanje, a analiza se izvodi pomoću programa PLAXIS. Pretpostavlja se da tlak zraka ostaje atmosferski tijekom kalkulacije, a matrična sukucija jednaka je negativnoj vrijednosti hidrostatskog naprezanja u tlaku vode. Spregnuti model omogućava uzimanje u obzir deformacija skeleta tla i istovremeno razmatra promjenu pornog tlaka vode tijekom potresne pobude. Seizmičko ponašanje kosine daje zanimljive rezultate uzimajući u obzir i deformaciju i razvoj pornog tlaka vode.

Metode numeričke simulacije

U posljednjim desetljećima potresi su pokazali važnost intenziteta gibanja tla u procjeni kosina tla tijekom seizmičkih događaja. Godine 1985. veliki potres magnitude $M_w=8,1$ koji se dogodio u meksičkoj subdukcijskoj zoni dokazao je da su se učinci potresa povećali u područjima mekog tla. Potres u Zagrebu, Hrvatska također je pokazao da se pojačanju odgovora lokacije treba dati važnost (Markušić et al., 2020), (Atalić et al., 2021). U numeričkim simulacijama heterogenih materijala, od velikog je interesa da se medij simulira kao višefazni medij (Edip, 2013, Edip et al., 2018, Edip et al., 2021, Oettl et al., 2004, Khoei and Mohammadnejad, 2011). U simulaciji hidromehaničkog ponašanja tijela brane, višefazni tok igra važnu ulogu u simulaciji zbog nelinearne prirode toka fluida u porama. U simulaciji poroznih medija poput tla, ponašanje je uvelike upravljano interakcijom čvrstog skeleta s vodom i/ili zrakom u porama. Napredak u računalnim mogućnostima omogućio je sofisticiranije pristupe modeliranja koji mogu bolje uhvatiti složene interakcije između seizmičkih sila, razvoja pornog tlaka i strukturne deformacije

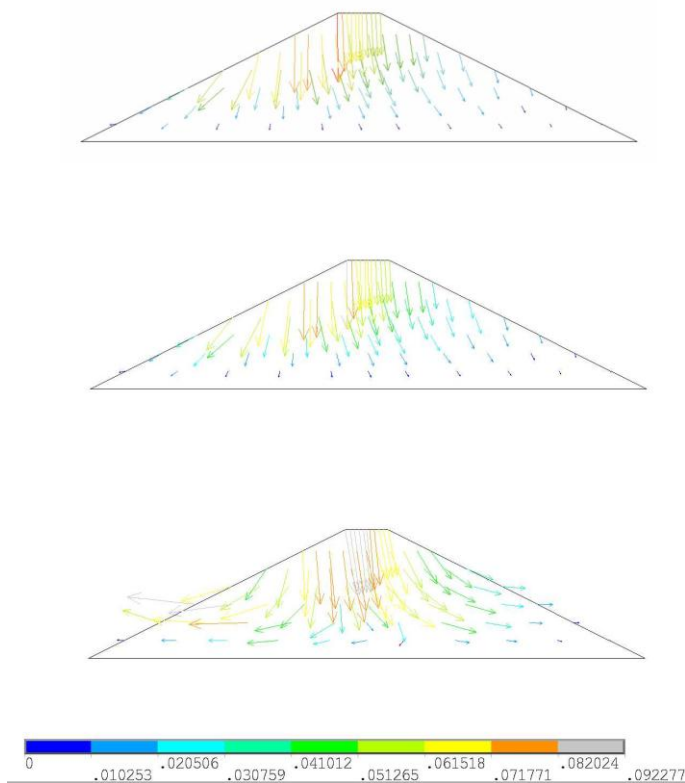
Rezultati

U ovom radu demonstrira se implementacija predloženog numeričkog modela u djelomično saturiranom tlu kroz simulaciju zbijene nasipne brane duljine 52 m i visine 12 m kao što je prikazano na Slici 1 sa nagib kosine od 33° stepeni.



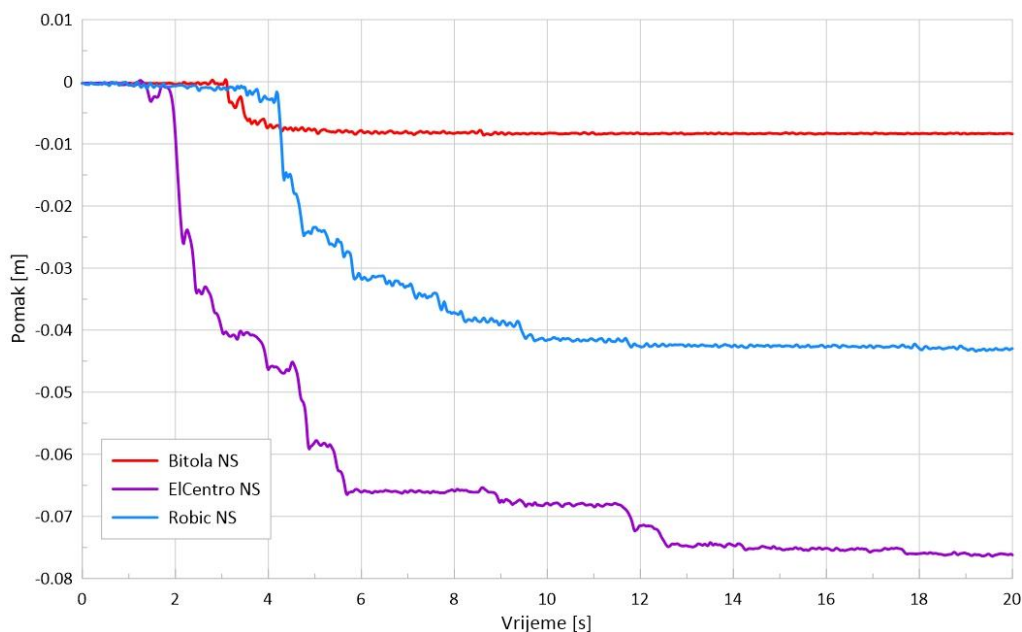
Slika 1. Model nasipne brane

Nadalje, korištena su tri zapisa akceleracija potresa, El Centro N-S, SAD, 1940. godine, magnitude $M=6,7$; Robic N-S, zabilježeno tijekom potresa u Furlaniji (Italija) 15.09.1976. godine magnitude $M=6,1$. i Bitola N-S, zabilježena 01.09.1994. godine magnitude $M=5,2-5,4$, kako bi se analiziralo ponašanje tijela brane uslijed potresne pobude. Ulazni zapisi akceleracija skalirani su na vrijednost $0,25g$ i koriste se kao ulazna ubrzanja na bazi tijela brane za analize u svrhu procjene dinamičkog odziva tijela brane uslijed jakih potresa.



Slika 2. Rezultati pomaka od potresa Robic NS (gore), Bitola NS (sredina) i El Centro NS (dolje)

Pomaci prikazani na Slici 2 pokazuju da su u slučaju potresa El Centro najveći, što sugerira kolaps tijela brane. Na Slici 3 je prikazan pomak na vrhu tijela brane. Kao što se može vidjeti iz Slike 3, pomak razvijen na prednjoj strani brane odražava dinamičko ponašanje konstrukcije pod djelovanjem vanjskih sila. Opažanje pokazuje da povećani razvoj porednog tlaka na prednjoj strani (uzvodna kosina) tijela brane korelira s većim pomacima koji nastoje učiniti tijelo brane nestabilnim.



Slika 3. Razvoj horizontalnog pomaka na vrhu tijela brane.

Zaključak

Učinci potresa doprinijeli su značajnim pomacima tijela brane, osobito na uzvodnoj strani. Pomaci su se značajno povećali nakon što je završila vršna točka potresa zbog frekventnog sadržaja ulaznih potresa. Razmotrena je parametrijska analiza kako bi se istražili učinci različitih vremenskih zapisa ubrzanja na ponašanje tijela brane. Rezultati ukazuju na to da veliki horizontalni rezidualni pomaci na uzvodnom dijelu tijela brane mogu ugroziti ukupnu stabilnost konstrukcije i dovesti do progresivnog sloma.

Zahvala

Ovaj rad djelomično je potpomognut od strane Hrvatske zaklade za znanost u okviru projekta "Pojačanje seizmičkog gibanja tla inducirano topografskim nepravilnostima u sjevernoj Hrvatskoj" [HRZZ-IP-2022-10-1296]

Literatura

- ATALIĆ, J., UROŠ, M., ŠAVOR NOVAK, M., DEMŠIĆ, M. & NASTEV, M. 2021. The Mw5. 4 Zagreb (Croatia) earthquake of March 22, 2020: impacts and response. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 3461-3489.
- EDIP, K. 2013. *Development of three phase model with finite and infinite elements for dynamic analysis of soil media*. PhD, Ss. Cyril and Methodius.
- EDIP, K., SESOV, V., BUTENWEG, C. & BOJADJIEVA, J. 2018. Development of coupled numerical model for simulation of multiphase soil. *Computers and Geotechnics*, 96, 118-131.
- EDIP, K., SHESHOV, V., WU, W. & BOJADJIEVA, J. 2021. Numerical modelling of saturated boundless media with infinite elements. *Acta Geotechnica*, 16, 2683-2692.
- KHOEI, A. R. & MOHAMMADNEJAD, T. 2011. Numerical modeling of multiphase fluid flow in deforming porous media: A comparison between two- and three-phase models for seismic analysis of earth and rockfill dams. *Computers and Geotechnics*, 38, 142-166.
- MARKUŠIĆ, S., STANKO, D., KORBAR, T., BELIĆ, N., PENAVA, D. & KORDIĆ, B. 2020. The Zagreb (Croatia) M5. 5 Earthquake on 22 March 2020. *Geosciences*, 10, 252.
- OETTL, G., STARK, R. F. & HOFSTETTER, G. 2004. Numerical simulation of geotechnical problems based on a multi-phase finite element approach. *Computers and Geotechnics*, 31, 643-664.
- ZIENKIEWICZ, O. C. 1999. *Computational Geomechanics*.

PRORAČUN FUNKCIONALNOSTI NEUKORIJENJENIH PERA NA MORFODINAMIČKE PROMJENE U KORITU DRAVE

GORDON GILJA ¹, MARKO ANTONIJE VUKADIN ², ANTONIJA HARASTI ³, IGOR TADIĆ ⁴

¹ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, Laboratorij za riječnu dinamiku i pronos nanosa, Hrvatska

² Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska

³ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, Laboratorij za riječnu dinamiku i pronos nanosa, Hrvatska

⁴ Hidroing d.o.o., Hrvatska

Uvod

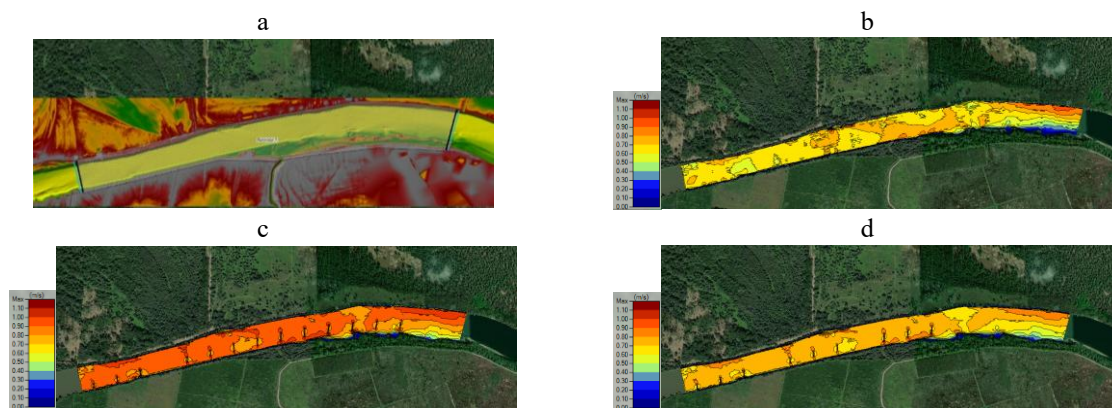
Regulacijska pera su hidrotehničke građevine korištene za održavanje uvjeta plovnosti u rijekama uz podržavanje riječnih ekosustava na način da nemaju čvrstu vezu s riječnim obalama. Ove građevine utječu na polje brzine vode i pronos nanosa koji su ključni za morfološke promjene u koritu kroz procese erozije i zasipanja. Gradnjom pera u koritu rijeke utječe lokalno na povećanje brzine vode i posmičnih naprezanja u plovnom putu te posljedično izazivaju eroziju korita (Constantinescu et al., 2008). Za kvantifikaciju utjecaja pera na brzinu vode i pronos nanosa najčešće se koriste dvodimenzionalni numerički modeli kojima se optimizira funkcionalnost pera s obzirom na njihov položaj, geometrijske karakteristike i međusobni razmak (Krishna Prasad et al., 2016). Cilj optimizacije je izazvati lokalne promjene u koritu, na način da se ne izazove prevelika erozija te da se ne naruši globalna ravnoteža nanosa u koritu (Choufu et al., 2019). Neukorijenjena pera su podvrsta pera namijenjena podržavanju riječnih ekosustava na način da nemaju čvrstu vezu s riječnim obalama. Ona omogućavaju paralelni tok vode rukavcem između građevine i obale kojim se fizički odvaja sprud nastao taloženjem nanosa i postojeće obale (Zaid, 2017). Cilj ovog istraživanja je ispitati učinkovitost polja neukorijenjenih pera na polje brzine vode s fokusom na njihovu duljinu, kut u odnosu na obalu i međusobni razmak.

Metode

Kao studija slučaja odabrana je dionica rijeke Drave koja je dio međunarodnog plovnog puta, na potezu do međunarodne luke Osijek (od rkm 0 do rkm 12). Na ovoj dionici rijeka Drava je kanalizirana, na način da su na dijelovima obale izgrađene obaloutvrde ili pera. Ova dionica zbog svoje izuzetne biološke i krajobrazne raznolikosti čini ili se nalazi unutar brojnih zaštićenih područja te je potrebno ove faktore razmotriti plikom izrade planova gospodarenja rijekom. Za ocjenu funkcionalnosti pera korišten je numerički model HEC-RAS, uspostavljen na prethodno snimljenoj batimetriji korita. Rubni uvjeti odabrani su u skladu sa zahtjevima funkcionalnosti, tj. simulacije obuhvaćaju karakteristične uvjete malih voda (niski plovni vodostaj – NPV) i srednjih voda (SV). Numerički model izrađen je u dvoje razine detaljnosti: jednodimenzionalni model od ušća do vodomjerne postaje Osijek kojim su izračunani vodostaji duž cijele dionice te detaljni dvodimenzionalni model kojim je jednodimenzionalni model particioniran na manje segmente u okolini građevina.

Rezultati

Predmetnu dionicu (slika 1a) karakterizira prijelaz iz lijevog u desni zavoja, pri čemu je prijelazna dionica između dva zavoja kratka. U nizvodnom zavoju postoji izgrađeno polje pera na desnoj obali koje odbacuje maticu toka prema lijevoj obali i dugoročno se nalazi u stabilnom režimu. Lokacije plitkih dijelova nalaze se upravo na prijelazu između dva zavoja, bliže nizvodnom (desnom) zavoju. Pri uvjetima NPV (slika 1b) brzina vode na cijeloj dionici ne prelazi 0,9 m/s, a najveće brzine se javljaju u tjemenu nizvodnog zavoja gdje postoji dovoljna dubina korita. Na plitkim dijelovima brzina vode kreće se između 0,55 i 0,75 m/s.



Slika 1. Predmetna dionica: domena 2D modela (a); polje brzine vode pri uvjetima NPV za: postojeće stanje (b), varijantu građevina 1 (c) i), varijantu građevina 2 (d)

Za varijantu građevina 1 (slika 1c) brzina vode na cijeloj dionici povećana je u odnosu na postojeće stanje i unutar plovnog puta prelazi 0,70 m/s, a na mjestima gdje se nalaze pera brzina vode prelazi 0,80 m/s. Najveće brzine na dionici javljaju se u tjemenu nizvodnog zavoja ($>0,9$ m/s), dok je na ostatku dionice ujednačeno tečenje s lokalnim ubrzanjima na mjestima glave pera. Na temelju analize rezultata varijantnog rješenja 1, u varijanti 2 postavljeno je 9 pera uz desnu obalu, u 3 polja po 3 pera. U odnosu na varijantu 1 izostavljena su tri najnižvodnija pera i četvrto pero u drugom polju. Usporedbom rezultata pri uvjetima NPV (slika 1d) vidljivo je da varijanta 2 ispunjava u potpunosti zadane kriterije, odnosno da je postavljeni broj građevina optimiziran u odnosu na varijantu 1. Izostavljanje četvrtog pera u drugom polju nije se odrazilo na smanjenje brzine u tom dijelu korita, dok je izostavljanje 3 najnižvodnija pera značajno utjecalo na smanjenje brzine na cijeloj dionici. Brzina vode na cijeloj dionici povećana je u odnosu na postojeće stanje i unutar plovnog puta prelazi 0,70 m/s, a na mjestima gdje se nalaze pera brzina vode prelazi 0,85 m/s. Na cijeloj dionici postignuto je ujednačeno tečenje.

Zaključak

Numeričkim modelom moguće je simulirati utjecaj građevina na polje brzine vode i predvidjeti obrasce morfodinamičkih procesa te na taj način optimizirati građevine u koncepcijskoj fazi projektiranja. Za povećanje pouzdanosti rezultata neophodno je model nadopuniti modulom pronosa nanosa, kalibriranim na temelju terenskih mjerenja. Njim se može simulirati razvoj korita kroz dulji vijek korištenja građevine i optimizirati utjecaj na morfološki razvoj korita i posljedično riječni ekosustav.

Literatura

- Choufu, L., Abbasi, S., Pourshahbaz, H., Taghvaei, P., and Tfwala, S.S. (2019) 'Investigation of Flow, Erosion, and Sedimentation Pattern around Varied Groynes under Different Hydraulic and Geometric Conditions: A Numerical Study'. *Water*, 11, pp. 235.
- Constantinescu, G., Koken, M., and McCoy, A. (2008) 'A Large Eddy Simulation Study of the Bed Shear Stress Distributions Around Isolated and Multiple Groynes', in *Proceedings of the 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Enschede, The Netherlands, 17–21 September 2007. London: CRC Press.
- Krishna Prasad, S., Indulekha, K.P., Balan, K. (2016) 'Analysis of Groyne Placement on Minimising River Bank Erosion', *Procedia Technology*, 24, pp. 47-53.
- Zaid, B.A. (2017) *Development of Design Guidelines for Shallow Groynes*. PhD thesis. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, Germany.

ADVANCED SIMULATION OF PARTIAL CONSOLIDATION

KEMAL EDIP ¹, VLATKO SHESHOV ², JULIJANA BOJADJIEVA ³, ZORAN RAKICEVIC ⁴
ALEKSANDRA BOGDANOVIC ⁵

¹ Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, kemal@iziis.ukim.edu.mk

² Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, vlatko@iziis.ukim.edu.mk

³ Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, jule@iziis.ukim.edu.mk

⁴ Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, zoran_r@iziis.ukim.edu.mk

⁵ Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, saska@iziis.ukim.edu.mk

Introduction

This paper presents a comprehensive coupled multiphase model for analyzing partial consolidation in unsaturated soils, incorporating both non-linear water retention characteristics and solid state deformation behavior. The complexity of partially saturated soil systems requires advanced modeling approaches that can simultaneously account for the interactions between solid, liquid, and gas phases while capturing the inherent non-linearities in material behavior. Modeling based on the porous media theory in which an average macroscopic continuum is considered has proved to be useful to better understand coupled phenomena such as flow and deformation processes. An important contribution of the paper is that it demonstrates that the numerical framework is able to consider non-linearities in simulation of both flow and deformation. Modern formulations based on multiphase mixture theories were developed in the last decade as described in details in the monograph of de Boer (Svanadze and De Boer, 2005). In order to present an introductory review of the developed theories, the Terzaghi theory (Terzaghi, 1943) can be referred as the first study of deformable porous media which dealt with the one-dimensional consolidation theory on the basis of the effective stress concept. This research addresses these limitations by developing a robust coupled multiphase framework that captures the essential physics of partially saturated soil behavior.

Numerical Method Implementation

The proposed model treats the soil system as a three-phase medium consisting of solid particles, water, and air phases. The model employs solid displacements, water pressure, and air pressure as the primary unknowns, providing a comprehensive description of the system state. The framework incorporates realistic water retention curves that capture the hysteretic and non-linear relationship between suction and degree of saturation, which are essential for accurate prediction of water movement in porous medium (Edip et al., 2017).

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_w & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_g & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{sw}^T & \mathbf{P}_{ww} & \mathbf{C}_{wa} \\ \mathbf{C}_{sa}^T & \mathbf{C}_{aw} & \mathbf{P}_{aa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}}_w \\ \dot{\mathbf{p}}_a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{C}_{sw} & -\mathbf{C}_{sa} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_{ww} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{aa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{u}} \\ \bar{\mathbf{p}}_w \\ \bar{\mathbf{p}}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_u \\ \mathbf{f}_w \\ \mathbf{f}_a \end{pmatrix} \quad (1)$$

The governing differential equations are discretized using the finite element method, enabling the solution of complex boundary value problems with irregular geometries and heterogeneous material properties. The nodal degrees of freedom for displacement, water and air pressure are taken into consideration as $\mathbf{u}$, $\mathbf{p}_w$ and $\mathbf{p}_a$. Their first and second time derivative of solid phase complete the system of equations. The different matrices of the system of equations describe different properties of the numerical model. The indices provide information about the nature and function of the matrix, which can be interpreted as follows. The coupling matrices $\mathbf{C}_{sw}$, $\mathbf{C}_{sa}$ describe the interaction of the solid phase with water and air phases. The mutual influence of the fluids with each are represented by $\mathbf{C}_{wa}$. The compressibility of the various phases and their effects on the entire media is considered by compressibility matrix $\mathbf{P}_{ww}$. The Permeability matrix $\mathbf{H}_{ww}$ on the other hand, concerns the flow behaviour.

Results

To validate the proposed coupled numerical method, this example simulates the partially saturated consolidation behavior of a one-meter tall vertical soil column. The objective is to verify the numerical model's

accuracy by comparing computational results against those reported by Khoei (Khoei and Mohammadnejad, 2011) as reference values.

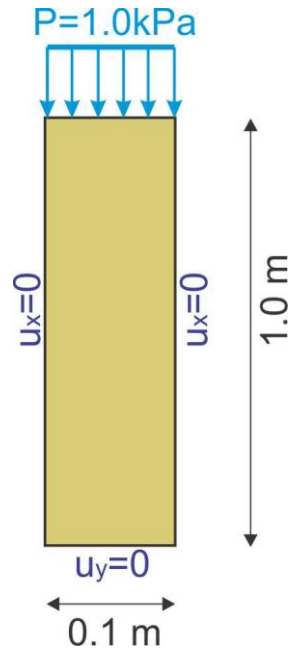


Fig 1. Model of soil layer

The analysis considers a vertical soil column measuring 1 m in height and 0.1 m in width, initially subjected to a surface loading of 1 kPa (as illustrated in Fig. 1). The soil column begins in a partially saturated state with an initial water saturation of 52% and an initial pore water pressure of 280 kPa. The loading scenario involves an instantaneous change in pore water pressure at the top surface from 280 kPa to 420 kPa, while maintaining exposure to atmospheric pressure.

Regarding boundary conditions, the soil column is configured as impermeable to both water and air flow along all surfaces except the top, which features drained boundary conditions. Mechanically, vertical displacement is constrained at the base, while horizontal displacement is restricted along both lateral sides of the column. The porous medium's material properties are specified in Table 1.

Table 1. Material parameters

Parameter	Symbol	Value	Units
Young's modulus of elasticity	E	6	MPa
Poisson's ratio	ν	0.4	-
Solid grain density	ρ_s	2000	kg/m ³
Bulk modulus of solid grains	K_s	1.4×10^9	Pa
Bulk modulus of water	K_w	4.3×10^{12}	Pa
Bulk modulus of air	K_a	1.0×10^5	Pa
Water density	ρ_w	1000	kg/m ³
Air density	ρ_a	1.22	kg/m ³
Initial porosity	n	0.3	-
Intrinsic permeability	k	4.6×10^{-12}	m ²
Water viscosity	μ_w	1.0×10^{-3}	Pa·s

For numerical analysis, the relationships between water saturation and capillary pressure, as well as the relative permeabilities for both water and air phases, follow the formulations established by Brooks and Corey (RN and AT., 1966). The simulation results are given in Fig. 2 below.

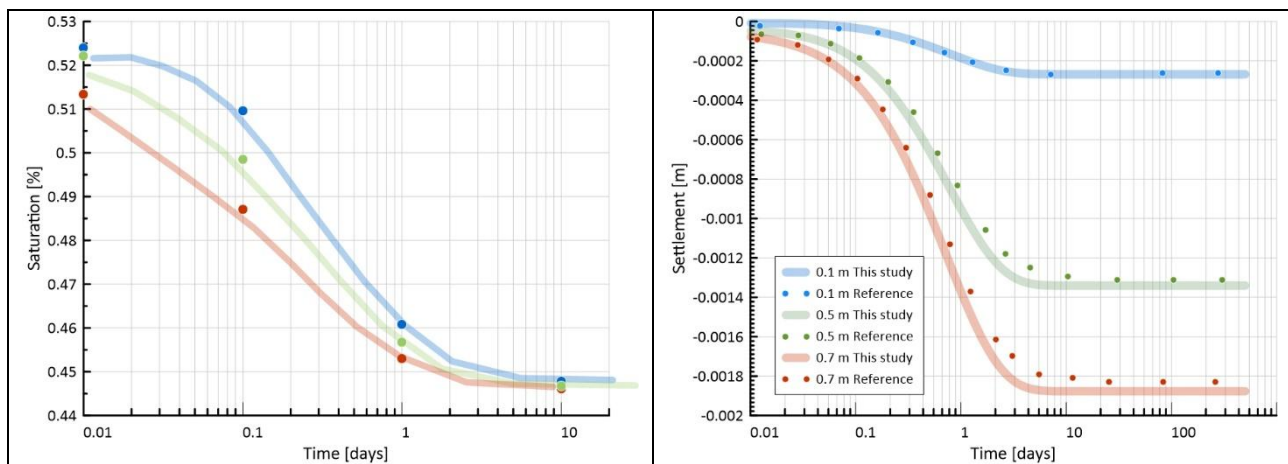


Fig 2. Results from simulations Saturation (left) and Settlement (right)

As shown in Fig. 2, the computed distributions of water saturation and settlement along the soil column closely match the numerical results of reference values. These results confirm that the developed model accurately simulates the coupling between water and air phases. As can be seen from the figure above the numerical values tend to differ in case of settlements because of the discretization of the geometry although the differences are small.

Conclusions

In conclusion, this study presents a coupled multiphase numerical model for simulating partial consolidation in unsaturated soils, integrating both non-linear water retention and solid deformation characteristics. The model is validated with reference solutions and effectively captures the coupled behavior of water and air phases as well as the associated settlements demonstrating good agreement with reference results. Minor difference primarily in settlement predictions are observed and can be attributed to geometrical discretization. Overall, the developed multiphase model offers a reliable tool for analyzing complex hydro-mechanical interactions in variably saturated soils with possible applications in hydro-geotechnical engineering practice.

Literature

- EDIP, K., SESOV, V., BUTENWEG, C. & BOJADJIEVA, J. 2017. Development of coupled numerical model for simulation of multiphase soil. *Computers and Geotechnics*.
- KHOEI, A. R. & MOHAMMADNEJAD, T. 2011. Numerical modeling of multiphase fluid flow in deforming porous media: A comparison between two- and three-phase models for seismic analysis of earth and rockfill dams. *Computers and Geotechnics*, 38, 142-166.
- RN, B. & AT., C. 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. *J Irrigat Drain Div Am Soc Civil Eng* 92, 61-68.
- SVANADZE, M. & DE BOER, R. 2005. On the representations of solutions in the theory of fluid-saturated porous media. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 58, 551-562.
- TERZAGHI, K. 1943. Theoretical soil mechanics.

DESIGN OF RETAINING STRUCTURE FOR DEEP CONSTRUCTION PIT

DEJAN IVANOVSKI ¹, KEMAL EDIP ², TONI KITANOVSKI ³, VLATKO SHESHOV ⁴,
JULIJANA BOJADJEVA ⁵

¹ Research assistant, PhD Candidate, Ss. Cyril and Methodius University, Institute of earthquake engineering and engineering seismology-IZIIS, Skopje, North Macedonia, ivanovski@iziis.ukim.edu.mk

² Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, kemal@iziis.ukim.edu.mk

³ Asiss.Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, tonik@iziis.ukim.edu.mk

⁴ Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, vlatko@iziis.ukim.edu.mk

⁵ Prof.dr.sc., Univ.Ss.Cyril and Methodius in Skopje, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIIS, jule@iziis.ukim.edu.mk

Introduction

This paper presents a comprehensive methodology for the design and analysis of retaining structure system for deep excavations, where the construction pit does not allow wider and sloped excavation which is a common case in dense urban areas [1]. These types of structures are temporary structures, whose role ceases to be important after the construction of the facility to the ground level, so they are analysed with lower safety factor and only for static loads (permanent and variable), while the seismic actions (accidental) are not included in the analyses. The analysed retaining structure is consisted of bored RC piles additionally stabilized with two rows of passive anchors [2-4]. The final solution is adopted after an iterative process taking into account the phased construction method, which involves progressive excavation depths and sequential installation of anchors. It assures the most accurate and optimal dimensioning of the piles and the anchors to be achieved. With the iterative analysis, the evolving stress states and deformation patterns throughout the construction process can be captured, depending on which, the most suitable anchor type can be adopted. An additional problem arises when the soil layers are very diverse along the length of the pit, which is also taken as a case in this paper, and it is shown the influence on geomechanical parameters of the retained soil on the design of the retaining structure. Validation of numerical models against real-world performance data still remains challenging due to uncertainties in soil parameters, construction method and speed of building and the tolerances of errors on the field.

Numerical Method Implementation

The numerical simulation of the problem uses the GEO5 software [5] in which the Coulomb method for active earth pressure calculations and the Mononobe-Okabe methodology [6, 7] for seismic analysis is employed. The analysis implements a staged construction approach, where each phase (initial excavation for a working plateau, subsequent excavation levels for anchor installation until the final depth) is solved sequentially, with updated stress states transferred between stages as shown in Fig.1.

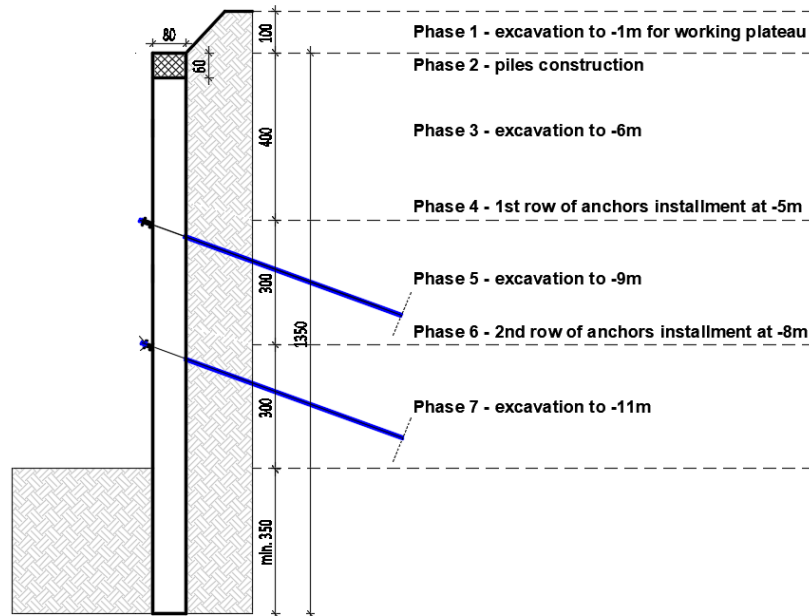


Fig 1. Phases of the staged construction

Critical to the accuracy of results is the proper modeling of anchor behavior through pull-out resistance calculations based on effective stress principles, combined with verification of internal stability using safety factor methodologies that account for the geometric configuration of multiple anchor rows.

Results on height and length

As stated before, because the soil layers vary a lot along the profile length (Fig 2), two characteristic soil models for the analyses are defined (Fig. 3). The numerical analysis show that the Model 2 is weaker, i.e. more critical for the stability of the retaining structure. Therefore, the following solution is adopted:

Piles with length of 13.5m and 2 rows of anchors, where the first row is placed 4m below the top of the pile, and second row, 7m below the top, for the whole perimeter of the pit. The anchors, however, differ according to the soil layers defined in Model 1 and Model 2, with the following characteristics:

For Model 1 (Fig. 4):

- Anchor type 1: $F_{min}=440$ kN, $D_{min}=90$ mm, $d_{tube}=8$ mm, $L=18$ m, $\lambda=1.6$ m
- Anchor type 2: $F_{min}=300$ kN, $D_{min}=90$ mm, $d_{tube}=5$ mm, $L=12$ m, $\lambda=1.6$ m

For Model 2 (Fig. 5):

- Anchor type 1: $F_{min}=440$ kN, $D_{min}=90$ mm, $d_{tube}=8$ mm, $L=18$ m, $\lambda=1.6$ m
- Anchor type 2: $F_{min}=300$ kN, $D_{min}=90$ mm, $d_{tube}=5$ mm, $L=12$ m, $\lambda=1.6$ m

The maximum horizontal displacement is limited to 1% of the height [8] and it reached 86.8 mm at the final excavation stage for Model 1 and 103.4 mm for Model 2.. The critical bending moment in the piles occurs in phase 5, during the transition from 5m to 8m excavation depth, where the second row of anchors are still not installed.

Despite the similar geotechnical parameters, the slope stability factor of safety between Model 1 and Model 2 altered indicating that variations in soil layering can have pronounced effects on overall system performance.

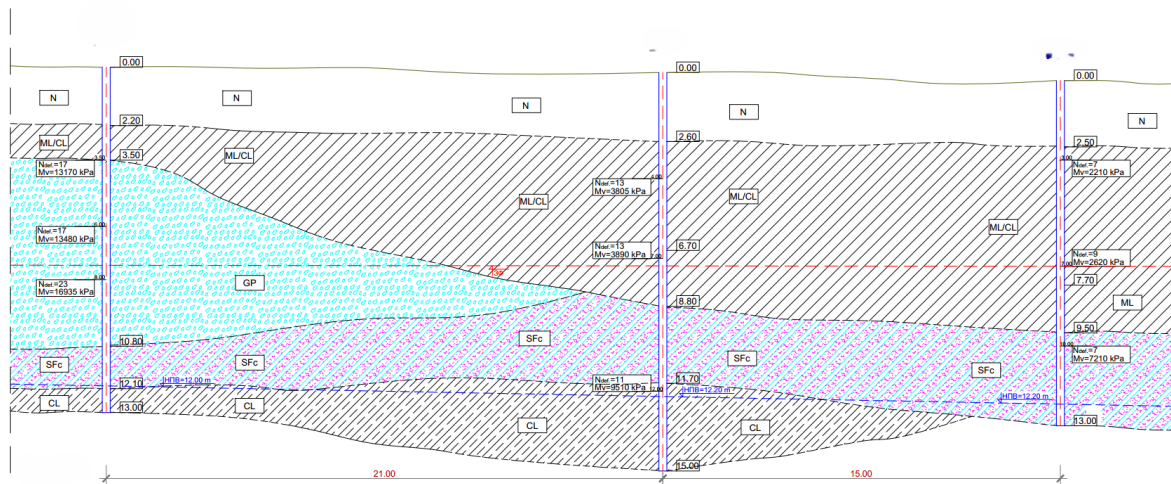


Fig 2. Soil layers variation along the profile

Model 1			Model 2		
2.5m	$\gamma=16.0 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=25.0^\circ$ $c=10 \text{ kPa}$	N Humus	2.5m	$\gamma=16.0 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=25.0^\circ$ $c=10 \text{ kPa}$	N Humus
1.0m	$\gamma=18.6 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=18.0^\circ$ $c=9.5 \text{ kPa}$	ML/CL dusty clay	6.5m	$\gamma=18.6 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=18.0^\circ$ $c=9.5 \text{ kPa}$	ML/CL dusty clay
7.0m	$\gamma=19.6 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=32.0^\circ$ $c=0 \text{ kPa}$	GP gravel and sand	3.0m	$\gamma=22.0 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=27.5^\circ$ $c=5 \text{ kPa}$	SFC dusty sand
1.5m	$\gamma=22.0 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=27.5^\circ$ $c=5 \text{ kPa}$	SFC dusty sand	3.0m	$\gamma=21.5 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=20.5^\circ$ $c=12 \text{ kPa}$	CL clay
3.0m	$\gamma=21.5 \text{ kN/m}^3$ $\varphi=20.5^\circ$ $c=12 \text{ kPa}$	CL clay			

Fig 3. Characteristic soil models

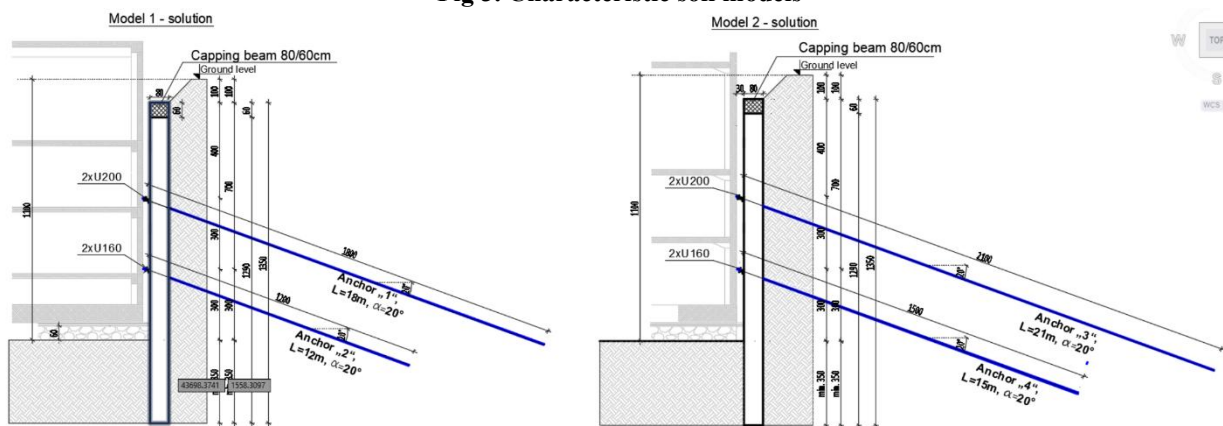


Fig 4. Anchor types for Model 1 and 2

Conclusions

This study demonstrates that retaining wall simulation requires careful consideration of soil variability and construction sequencing, as evidenced by the narrow safety margins observed in the anchor system verification. Differences in soil stratification may have significant influence on the retaining solution, because large differences occur in the active pressure, hence in the required structural measurements to stabilize the retained soil. Therefore, it underscores the critical importance of comprehensive site investigations. Furthermore, obtaining the optimal structural solution, requires iterative process of analyses, especially for the chosen anchors, so the best position, type, and length is achieved.

Literature

- [1] Roje-Bonacci T. (2005). Potporne gradjevine i gradjevne jame, Gradjevinsko-ArHITEKTONSKI Fakultet Sveucilista u Splitu (in Croatian);

- [2] J. Alam et al. (2014) A parametric study of anchored earth wall by finite element method, KSCE J. Civ. Eng.
- [3] K. Prasad Kallada, A. Mandal, M. Dass Goel, S. Kadam, G. Singh Chauhan, Y. Singh (2025) Design of deep excavation with secant pile wall: a case study on performance of structure, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering,
- [4] Ivanovski D. (2022). Comparative analysis and design of retaining structures according to the current practice and Eurocodes, M.Sc thesis, SS. Cyril and Methodius, Skopje.
- [5] GEO 5, Fine software, Cantilever wall program, Spread Footing program, Czech Republic;
- [6] Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929) On the Determination of Earth Pressure during Earthquakes. Proceedings of the World Engineering Conference, 9, 176;
- [7] Okabe S., (1926) General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan 12 (1);
- [8] J. Maleki, A. Pak, M. Yousefi, N. Aghakhani (2021) A Comprehensive FE Study for Design of Anchored Wall Systems for Soil-Anchor Walls Considering Allowable Deformations.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Elsevier.

MIKROPLASTIKA I UREĐAJI ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

GORAN VOLF¹, IVANA SUŠANJ ČULE¹, VANJA TRAVAŠ¹, BRUNO KOSTELIĆ²

¹ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Katedra za hidrotehniku, Hrvatska

² Istarska županija, Upravni odjel za održivi razvoj, Odsjek za zaštitu prirode i okoliša, Hrvatska

Uvod

Uređaji za pročišćavanje otpadnih voda (UPOVi), ovisno o tehnologiji pročišćavanja, mogu ispuštati znatne količine mikroplastike (MP) u okoliš. Naime, danas nije rijetko da milijuni čestica MP prolaze kroz UPOVe, a njihove karakteristike uglavnom zavise o lokalnim poljoprivrednim, urbanim i industrijskim aktivnostima. Sva MP koja se ne zadrži unutar UPOVa dospijeva u okoliš (Cristaldi i sur., 2020). UPOVi su prvenstveno namijenjeni za prikupljanje i obradu otpadnih voda sa ciljem uklanjanja anorganskih i organskih tvari iz vode kako bi se voda mikrobiološki obradila i ispuštala u prijemni okoliš. Kako UPOVi nisu posebno dizajnirani za uklanjanje MP, iako se čini da do uklanjanja dolazi s visokom učinkovitošću, milijuni čestica MP svakodnevno se ispuštaju iz UPOVa u okoliš. Štoviše, ne samo efluent, već i mulj iz UPOVa uzrokuju ispuštanje MP u okoliš. Osim navedenoga, velike količine MP (različitih polimernih tipova, oblika i veličina), nakupljaju se u mulju primarnih i sekundarnih taložnika, te membranskom mulju (Acarer, 2023). Razina onečišćenja UPOVa MP detaljno je istražena u smislu koncentracije čestica, koja se u dotoku najčešće kreće od 1 do 18.285 čestica MP/l, a u pročišćenom efluentu od 0 do 447 čestica MP/l ovisno o razini pročišćavanja (Xu i sur., 2023). Ovisno o vrsti pročišćavanja otpadne vode (primarna, sekundarna ili tercijarna), UPOVi imaju visoku učinkovitost uklanjanja MP, no ipak predstavljaju izvorišnu točku onečišćenja. Općenito, primarni i sekundarni tretman pokazuju najveću sposobnost uklanjanja MP, s vrijednostima u rasponu od 78% do čak 98%, odnosno od 7% do 20%. Tercijarni tretman, u usporedbi sa primarnim i sekundarnim, ne pokazuje značajniji učinak u smanjenju koncentracije MP. Što se tiče predtretmanskog procesa, maksimalna učinkovitost uklanjanja MP može postići tijekom procesa uklanjanja pijeska i masnoća (Cristaldi i sur., 2020). Prema drugim istraživanjima, sekundarnim pročišćavanjem (uz primarni) može se ukloniti više od 88% MP, dok se primjenom tercijarnog pročišćavanja, poput membranskih bioreaktora (MBR) i tehnologije filtracije pijeskom, može postići učinkovitost uklanjanja više od 97% MP (Xu i sur., 2023). Na UPOVima, uz primarni i sekundarni tretman, potrebno je primijeniti i tercijarne tehnologije pročišćavanja kako bi se osigurala veća učinkovitost uklanjanja MP. Međutim, na UPOVima nije moguće postići 100% učinkovitost uklanjanja MP, pa milijuni čestica MP dospijevaju u prijemni okoliš, ovisno o kapacitetu UPOVa. Stoga, nakon što se detaljno utvrdi vrsta polimera, veličina i oblik čestica MP koje je planirano ukloniti iz UPOVa, i dalje postoji značajna potreba za određivanjem i razvojem najučinkovitijih metoda i tehnologija za njihovo uklanjanje (Acarer, 2023).

Efikasnost uklanjanja MP na UPOV-ima te količina ispuštene MP u okoliš

Čak i kada je učinkovitost uklanjanja MP na UPOVima visoka i/ili je koncentracija MP u efluentu niska, zbog velikog kapaciteta obrade, u vodeni okoliš se ispuštaju vrlo velike količine otpadne vode koja sadrži MP, pri čemu dolazi do njezinog nakupljanja (Acarer, 2023). Murphy i sur. (2016) navode da je na UPOVu sa tehnologijom aktivnog mulja, te kapaciteta 260.954 m³/dan otpadna voda sadržavala 15,7 MP/l, te da je nakon pročišćavanja količina smanjena na 0,25 MP/l uz 98,41% učinkovitosti uklanjanja, ali je unatoč tome 65×10⁶ MP dnevno ispušteno u vodeni okoliš. Ziajahromi i sur. (2017) izvijestili su da je na UPOVu kapaciteta 308 Ml/dan s primarnim tretmanom obrade otpadna voda sadržavala 1,5 MP/l, a da se u recipijent dnevno ispusti 4,6×10⁸ čestica MP. Conley i sur. (2019) izvijestili su da se, čak i uz učinkovitost uklanjanja MP od 97,6% na UPOVu s tehnologijom aktivnog mulja te dezinfekcijom NaOCl, kapaciteta 136×10⁶ l/dan, u recipijent dnevno ispusti 291-596×10⁶ čestica MP. Lv i sur. (2019) na UPOVu kapaciteta 70.000 m³/dan s primarnim, sekundarnim (A2O), te tercijarnim stupnjem pročišćavanja (MBR), te učinkovitošću uklanjanja MP od čak 99,5% u okoliš ispusti 3,5×10⁶ MP/dan, odnosno 1,96 kgMP/dan. Prema tome, čak i kada se na UPOVu nakon primarne i sekundarne, provodi tercijarna obrada, u okoliš dospijevaju milijuni čestica MP, čime se predstavlja prijetnja za recipijent (Acarer, 2023).

Strategije uklanjanja mikroplastike na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda

Za MP u okolišu ne postoje trenutno zakonski propisane granične vrijednosti, a dodatni problem predstavljaju ograničenja i u eksperimentalnom praćenju. Standardizirani postupci za izdvajanje i analizu čestica MP nisu jasno definirani, te se istraživači suočavaju s brojnim poteškoćama u svojim eksperimentalnim pristupima. Nova Direktiva EU o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda (2024/3019) ne propisuje obvezu uklanjanja MP, ali zahtijeva sustavno praćenje na ulazima i izlazima većih UPOVa, te u mulju, pri čemu bi se trebala uspostaviti standardizirana metodologija i omogućiti prikupljanje podataka za razumijevanje razmjera problema koje će poduprijeti buduće aktivnosti i potencijalno naprednija rješenja obrade, kao i ona koja obuhvaćaju napredne tretmane, za mikrozagađivala poput MP (Murphy i sur., 2016, Ahmed i sur., 2024). Strategije upravljanja MP potrebno je razmatrati paralelno sa strategijama uklanjanja, kako bi se ograničila količina MP koja ulazi u vodene sustave. Nakon što se identificiraju glavni izvori, moguće je oblikovati odgovarajuće strategije upravljanja. Također je nužno razviti nove tehnologije obrade za bolje upravljanje MP na UPOVima, ili uvesti bolja rješenja koja će omogućiti veće uklanjanje sekvencijalnom primjenom postojećih tehnologija (Acarer, 2023).

Zahvala

Istraživanje je rezultat rada u okviru EU projekta 'WASTEREDUCE-Integrated waste reduction strategies and solutions in protected and Natura 2000 areas', financiranog iz Programa prekogranične suradnje Italija-Hrvatska (INTERREG VI-A Italy-Croatia), i UNIRI Institucionalnog istraživačkog projekta 'Izazovi upravljanja vodnim resursima u vrijeme klimatskih promjena s obzirom na proizvodnju pitke vode' (uniri-iz-25-18) odobrenog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i mladih (Financira Europska unija-NextGenerationEU).

Literatura

- Ahmed, S.F., Islam, N., Tasannum, N., Mehjabin, A. i sur. (2024) 'Microplastic removal and management strategies for wastewater treatment plants', *Chemosphere*, 347, 140648.
- Acarer, S. (2023) 'Microplastics in wastewater treatment plants: Sources, properties, removal efficiency, removal mechanisms, and interactions with pollutants', *Water Science and Technology*, 87 (3), 685.
- Conley, K., Clum, A., Deepe, J., Lane, H., Beckingham, B. (2019) 'Wastewater treatment plants as a source of microplastics to an urban estuary: removal efficiencies and loading per capita over one year', *Water Research X*, 3, 100030.
- Cristaldi, A., Fiore, M., Zuccarello, P., Oliveri Conti, G. i sur. (2020) 'Efficiency of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) for microplastic removal: A Systematic Review', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 8014.
- Lv, X., Dong, Q., Zuo, Z., Liu, Y., Huang, X., Wu, W.M. (2019) 'Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies', *Journal of Cleaner Production*, 225, pp. 579-586.
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., Quinn, B. (2016) 'Wastewater treatment works (WWTW) as a source of microplastics in the aquatic environment', *Environmental Science and Technology*, 50, pp. 5800-5808.
- Xu, Y., Ou, Q., Wang, X., Hou, F., Li, P., i sur. (2023). 'Assessing the Mass Concentration of Microplastics and Nanoplastics in Wastewater Treatment Plants by Pyrolysis Gas Chromatography-Mass Spectrometry', *Environmental Science and Technology*, 57, pp. 3114-3123.
- Ziajahromi, S., Neale, P.A., Rintoul, L., Leusch, F.D.L. (2017) 'Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics', *Water Research*, 112, pp. 93-99.

HIDROTEHNIČKI ASPEKT KLIMATSKI OTPORNOG PLANIRANJA OBALNOG PODRUČJA JADRANA – DIO CRESCO ADRIA PROJEKTA

MARTA Marija GRŽIĆ, IGOR RUŽIĆ, NINO KRVAVICA, BARBARA KARLEUŠA, BOJANA HORVAT, NEVENKA OŽANIĆ, GORAN VOLF, IVONA PETKOVIĆ, IVA MRAK

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

Uvod

Projekt *Klimatski otporno planiranje obalnog područja Jadrana / Climate RESiliEnt COastal planning in Adriatic - CRESCO* Adria provodi se u okviru Programa INTERREG IT-HR 2021-2027. Provedba projekta započela je 1. travnja 2024. godine. Trajanje projekta je 30 mjeseci. Ukupna vrijednost projekta iznosi 1.928.010,59 € od čega Europski fond za regionalni razvoj (European Regional Development Fund – ERDF) sufinancira 80%. Cilj je projekta unaprijediti kapacitete urbanih i obalnih zajednica na Jadranu za prilagodbu klimatskim promjenama utemeljeno na EU i nacionalnim dokumentima koji se bave prilagodbom na klimatske promjene i upravljanjem obalnim područjima. Očekivani rezultati su: strateške smjernice za klimatski otporno prostorno planiranje; visokoobrazovni kurikulum za klimatsku tranziciju i planovi prilagodbe za odabrana područja. Koordinator projekta je Sveučilište u Rijeci, Ekonomski fakultet, a partneri su Zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije, Građevinski fakultet u Rijeci, Općina Sali, Grad Crikvenica, te s talijanske strane Regija Abruzzo i Sveučilište Camerino. Kao podloge za klimatski otporno planiranje obalnih područja neophodno je sa hidrotehničkog aspekta sagledati opasnosti (hazarda) od pluvijalnih poplava i vrednovati ranjivost priobalnog područja od obalnih poplava.

Metode

Na području Primorsko-goranske županije, identificirane su lokacije od posebnog značaja za koje su provedene analize opasnosti od pluvijalnih poplava te je analizirana ranjivost priobalnog područja.

Za područje Vinodolske općine i Grada Novog Vinodolskog provedena je analiza opasnosti od pluvijalnih poplava te analiza izloženosti zgrada i prometnica tim poplavama. Opasnost od poplava procijenjena je hidrološko-hidrauličkim simulacijama površinskog otjecanja oborinskih voda za tri scenarija vjerojatnosti: poplavu velike vjerojatnosti (povratni period 5 godina), poplavu srednje vjerojatnosti (povratni period 25 godina) i poplavu male vjerojatnosti (povratni period 100 godina) (Krvavica i sur., 2023).

Na području grada Crikvenice provedena je analiza ranjivosti obalnog područja (Ružić i sur., 2022). Analiza je temeljena na povijesnim promjenama obalne linije, nasipavanju i numeričkim simulacijama valovanja i obalnog plavljenja. Korištenjem povijesnih karti i suvremenih geodetskih podloga analizirano je pomicanje obalne linije od 1850. godine do danas te utvrđeno da je nasipavanjem formirano oko 140.000 m² novih površina. Te površine uglavnom nisu izgrađene, već su uređene kao javne šetnice, parkovi, plaže i trgovi koji danas imaju važnu ulogu u zaštiti od obalnog plavljenja te doprinose poboljšanju mikroklima. Na temelju LiDAR modela terena provedene su simulacije obalnog plavljenja za tri scenarija porasta razine mora (1,20 m, 1,60 m i 1,80 m), uz istodobne simulacije valovanja u modelu SWAN.

Rezultati

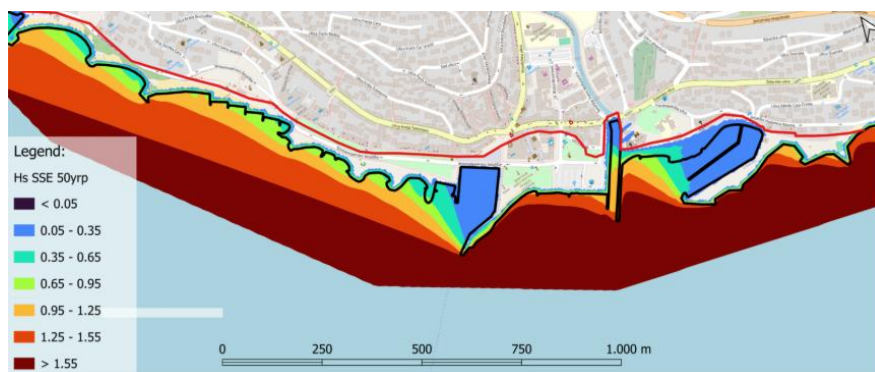
Rezultat analiza pluvijalnih poplava za područje Vinodolske općine i Grada Novog Vinodolskog su karte opasnosti od poplava na kojima je prikazana prostorna raspodjela dubina i brzina vode, kao i razine opasnosti od poplava za svaku promatranu vjerojatnost (slika 1.), a rezultat analize izloženosti su karte izloženosti za svaku kategoriju receptora. Iako na većem dijelu područja Vinodolske općine i Grada Novog Vinodolskog nema značajnijeg površinskog otjecanja, izraženo plavljenje javlja se u slivu rijeke Ričine, u urbanim središtima te uz manje bujične tokove u priobalju. Analiza izloženosti pokazala je jasan trend porasta izloženosti receptora sa smanjenjem vjerojatnosti pojave poplavnog događaja. Tom su analizom identificirane kritične infrastrukturne i stambene zone, čime je osigurana prostorna osnova za određivanje prioriteta mjera prilagodbe te unaprjeđenje planiranja u slučaju izvanrednih situacija.

Dobiveni rezultati analize ranjivosti obalnog područja na području grada Crikvenice prikazani su na karti kombiniranog obalnog hazarda, koja prikazuje rasprostranjenost plavljenih područja i raspodjelu značajnih valnih visina (Hs) (slika 2.). Rezultati su pokazali da Crikvenica nema značajnih problema s obalnim plavljenjem ni u nepovoljnim scenarijima porasta razine mora. Potencijalna plavljenja javljaju se lokalno na

plažama i mogu se jednostavno sanirati tehničkim mjerama. Valovi ne prelaze povijesnu obalnu liniju, što potvrđuje da su nasipavanja i planirani obalni odmak ključni u smanjenju ranjivosti i očuvanju funkcionalnosti obale.



Slika 1. Karta opasnosti (hazarda) od pluvijalnih poplava male vjerojatnosti (povratni period 100 godina) s prikazanim dubinama vode (m) na području Grada Novog Vinodolskog.



Slika 2. Kombinirana karta obalnog hazarda Crikvenice s prikazom plavljenih područja i značajnih valnih visina (Hs) dobivenih SWAN simulacijama za scenarije razine mora 1,60 m. Prikazane su današnja (crna) i povijesna (1850.) obalna linija.

Zaključak

Provedenim analizama dobivena je osnova za upravljanje rizicima od pluvijalnih i obalnih poplava, što čini temelj za klimatski otporno prostorno planiranje obalnog područja. Na primjeru Novog Vinodolskog identificirane su kritične infrastrukturne i stambene zone, čime je osigurana prostorna osnova za određivanje prioriteta mjera prilagodbe te unaprjeđenje planiranja u slučaju izvanrednih situacija pluvijalnih poplava, dok je na primjeru Crikvenice, zahvaljujući planski provedenom obalnom odmaku koji je započeo u 19. stoljeću, kao i kvalitetnim urbanističkim rješenjima kojima su uz obalu formirane javne, neizgrađene površine, zaključeno da je ona i danas znatno manje izložena rizicima obalnog plavljenja i djelovanja mora, te je stoga otporna na klimatske promjene.

Literatura

- Krvavica, N., Šiljeg, A., Horvat, B., and Panda, L. (2023) 'Pluvial Flash Flood Hazard and Risk Mapping in Croatia: Case Study in the Gospić Catchment' *Sustainability*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su15021197>
- Ružić, I., Benac, Č., Tadić, A., Krvavica, N., Petrović, V., Ljubičić, G. and Jakupović, D. (2022) *Analysis of the Vulnerability of the Coastal Zone of Primorje-Gorski Kotar County due to Sea Level Rise*. Rijeka: Spatial Planning Institute of Primorje-Gorski Kotar County.

Zahvala: Istraživanje prikazano u ovom radu je financirano sredstvima EU kroz INTERREG projekt Climate RESiliEnt COastal planning in Adriatic (ITHR0200245 CRESCO Adria).

ODRŽIVA IZGRADNJA I ODRŽAVANJE LUKOBRANA U KONTEKSTU KLIMATSKIH PROMJENA

IGOR RUŽIĆ¹, FILIP TRINAJSTIĆ¹, IVAN MAROVIĆ¹, ČEDOMIR BENAC¹

¹ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

Uvod

Klimatske promjene i prognozirani ubrzani rast razine mora uzrokuju nove izazove u projektiranju i održavanju obalne infrastrukture, osobito komunalnih luka i pripadajućih lukobrana. Sve učestalija olujna nevremena i ekstremne plime zahtijevaju tehnički, okolišno i ekonomski održiv pristup u projektiranju i održavanju obalnih građevina. Cilj rada je analizirati mogućnosti održive izgradnje i dugoročnog održavanja nasutih lukobrana u kontekstu klimatskih promjena, s posebnim naglaskom na primjeru planiranja luke u uvali Žurkovo na sjevernoj obali Riječkog zaljeva. Pri tome je potrebno provoditi detaljne analize prije projektiranja: sustavno prikupiti i obraditi relevantne podatke kao što su vjetrovalna klima, pasoš obale te reljef, geološka građa i geotehničke obale i morskog dna. Također je potrebno kvantificirati količine materijala, te detaljno sagledati troškove izgradnje, osobito troškove temeljenja u zahtjevnim geotehničkim uvjetima, kao i očekivane troškove održavanja kroz eksploatacijski vijek obalne građevine.

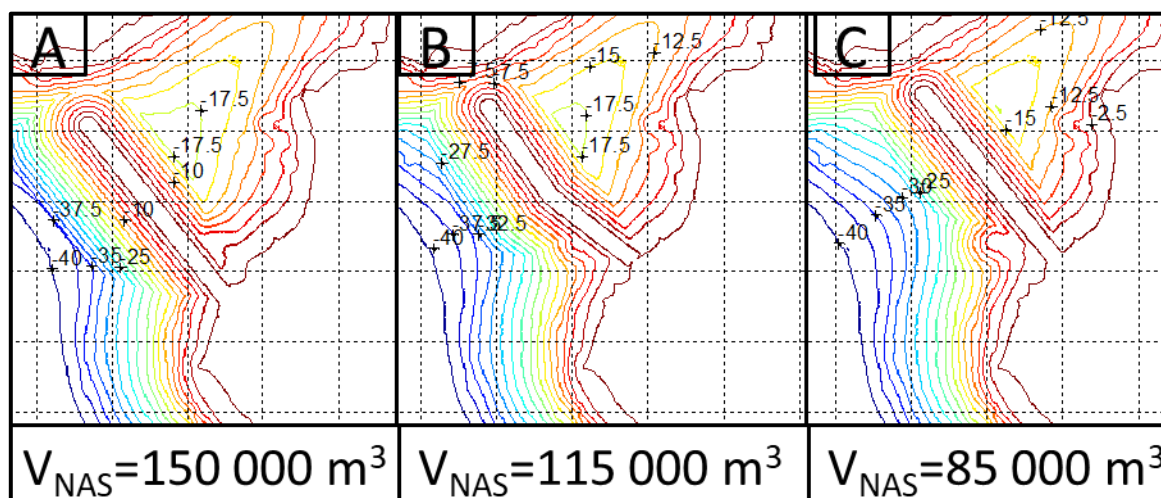
Metode

Metodologija istraživanja obuhvatila je kombinaciju terenskih, analitičkih i računalnih postupaka. Obavljena je inženjerskogeološka prospekcija morskog dna i obalnog rube uvale Žurkovo. Ustanovljeno je da ta lokacija ima složenu geološku građu i posljedično vrlo različite geotehničke značajke. To je potopljena krška jaruga i zbog toga su na obalnom rubu i podmorskim padinama vidljivi izdanci osnove karbonate stijene. Dno uvale je pokriveno rahlim pijeskom ispod koga se nalazi šljunčani nanos višemetarske debljine. Također je obavljeno mjerenje dubina morskog dna i provjereno stanje postojećih obalnih građevina. Na taj način je provjerena pouzdanost ulaznih podataka i izvršena validacija numeričkih procjena. Analizirana je količina potrebnog nasipa pomoću algoritama razvijenih u MATLAB-u, čime je omogućena brza i točna usporedba različitih trasa lukobrana. Izrađeni su 3D modeli terena postojećeg i projektiranog stanja na temelju batimetrijskih podataka. U analizi su korištene GIS i CAD tehnologije.

Rezultati

Analiza je provedena na tri varijante nasipanog tipa lukobrana: tri izvan uvale Žurkovo (trase A, B, C) te četvrta varijanta unutar te uvale. Položaji analiziranih varijanti međusobno su udaljene od 15 do 20 m. Različit reljef dna a prouzročio je i znatne razlike u potrebnim količinama nasipa. Procijenjene ukupne količine materijala: za trasu A 150 000 m³, za trasu B 115 000 m³, za trasu C 85 000 m³, dok alternativno rješenje unutar uvale treba svega 40 000 m³ nasipa. Analizirani su i valni uvjeti (značajne visine valova $\approx 3,4$ m, smjer SW), refleksija valova, stabilnost konstrukcije te je procijenjen mogući negativan utjecaj na okoliš. Također je izvršena usporedba troškova izgradnje i održavanja tijekom eksploatacijskog vijeka građevine.

Na Slici 1 prikazani su 3D modeli terena s odgovarajućim količinama materijala za izgradnju jednostavnog lukobrana tipa nasip za tri analizirane varijante (A, B, C). Rezultati pokazuju da već i male razlike u trasiranju lukobrana na strmim podmorskim padinama mogu prouzročiti velike razlike u količini nasipa i složenosti izgradnje. Vanjske trase (A, B, C) omogućuju dobru razinu zaštite akvatorija od negativnog utjecaja valova, ali uz veće troškove, povećani zahvat u prostor i izraženiju refleksiju valova. Alternativno rješenje unutar uvale daje manji broj vezova, ali se pokazalo znatno povoljnijim jer zahtijeva manju količinu materijala, omogućuje jednostavniju i jeftiniju izgradnju, povoljnije održavanje te ima manji negativni utjecaj na akvatorij i okoliš.



Slika 1. 3D modeli terena s prikazom količina materijala za izgradnju jednostavnog lukobrana tipa nasip za tri analizirane varijante (A, B, C).

Zaključak

Komunalne luke i lukobrani su izuzetno skupe građevine. Njihovo projektiranje zahtijeva vrlo detaljnu analizu valnih uvjeta, reljefa dna i izbor temeljenja, kao i posljedično potrebne količine materijala već u ranoj fazi planiranja. Odabir pozicije lukobrana i njegovog tipa konstrukcije mora biti usklađen s dugoročnim troškovima gradnje i održavanja. Dosadašnja inženjerska iskustva su pokazala da bez detaljnih analiza vjetrovalne klime na lokaciji planiranoj za građene, kao i detaljnih geotehničkih istraživanja (inženjerskogeoloških, geofizičkih i geomehaničkih) nije moguće obaviti racionalno projektiranje i građenje takovih građevina. Također se pokazalo da zbog niskih pristojbi i ograničenih proračuna, prilikom projektiranja komunalnih luka, prioritet trebaju imati jednostavnije konstrukcije čije je održavanje jeftinije. Preglednik ranjivosti obalnog područja Primorsko-goranske županije pokazao se kao koristan alat u fazi planiranja, jer omogućuje uvid u osnovne podatke o djelovanju valova, obalnom plavljenju, geološkoj građi te potencijalnom riziku od odrona. Integracijom takvih podataka u ranoj fazi planiranja moguće je donijeti kvalitetnije odluke o lokaciji i tipu konstrukcije te smanjiti rizike i troškove budućih zahvata.

Zahvala

Istraživanje je provedeno uz potporu projekta Sveučilišta u Rijeci IPROM-OG (Istraživanje i Prilagodba Obalnih građevina klimatskim promjenama - Metodološki okvir).

Literatura

CIRIA, CUR, CETMEF (2007) *The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683. London: CIRIA.

Županijski zavod za prostorno uređenje Primorsko-goranske županije (2021) *Preglednik ranjivosti obalnog područja Primorsko-goranske županije*. Rijeka: Županijski zavod za prostorno uređenje PGŽ. https://gisportal.pgz.hr/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=8b96f9ed8bb24595bb1aab7d1603e16b&page=page_0

PROCJENA OPASNOSTI I RIZIKA OD POPLAVA USLIJED JAKIH OBORINA – ISKUSTVA IZ HRVATSKIH PRIOBALNIH GRADOVA

NINO KRVAVICA ¹, MARTA MARIJA GRŽIĆ ¹, LOVRE PANĐA ², IVONA PETKOVIĆ ¹, ANTE ŠILJEG ²

¹ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

² Sveučilište u Zadru, Centar za geoprostorne tehnologije, Hrvatska

Uvod

Učestalost i štete od pluvijalnih poplava u urbanim područjima Hrvatske u porastu su kao posljedica urbanizacije, ograničenog kapaciteta sustava oborinske odvodnje i klimatskih promjena. Iako su uzroci poznati, metodologija procjene opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u praksi se razlikuje – od planskih analiza na razini jedinica lokalne samouprave (JLS) do detaljnih analiza za pojedine podslivove ili podsustave odvodnje. U ovome radu predstavljena su višegodišnja iskustva provedbe analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava na području nekoliko priobalnih gradova, s naglaskom na utjecaj razine detaljnosti i preciznosti podloga na kvalitetu i uporabnu vrijednost izlaznih rezultata. Cilj rada je usporediti prednosti i ograničenja različitih razina analize te prikazati kako odabrani pristup utječe na mogućnost donošenja odluka u prostornom planiranju, upravljanju rizicima od poplava i projektiranju sustava oborinske odvodnje.

Metode

Navedene analize su provedene na više razina detaljnosti koje se razlikuju prema obuhvatu, preciznosti dostupnih i korištenih podloga te postavkama modelskih pristupa, koji su detaljno razrađeni kroz prethodne radove (Horvat i Krvavica, 2023; Krvavica i Rubinić 2020; Krvavica i sur., 2023; Šiljeg i sur., 2023). Na razini JLS-a obuhvaćeno je cijelo administrativno područje grada ili općine, koje obično uključuje više slivova. Modeliranje se najčešće provodi koristeći digitalni model reljefa (DMR) i karte pokrova zemljišta srednje do visoke rezolucije (10–5 m), dok se sustav odvodnje u pravilu ne uključuje u analize. Na razini sliva analiza se provodi unutar topografskih granica sliva, čija veličina može varirati od nekoliko stotina kvadratnih kilometara do vrlo malih priobalnih slivova. Na ovoj razini koristi se DMR visoke rezolucije (LiDAR 1–2 m) i vremenski promjenjiva oborina. Sustav odvodnje se ne modelira hidraulički, već se konceptualno uključuje kroz infiltracijsku sposobnost prometnica i drugih javnih površina, uvažavajući njihove projektirane kapacitete. Na razini podsliva, koja predstavlja najvišu razinu detaljnosti, obuhvaćen je jedan ili više urbanih podslivova. Koriste se LiDAR podloge visoke točnosti ($\leq 1,0$ m) i detaljni modeli pokrova zemljišta dobiveni iz satelitskih snimaka, a uzima se u obzir i utjecaj sustava odvodnje. Sustav odvodnje se može uključiti na sličan način kao i na razini sliva (konceptualno), ili kroz kombinirani 1D/2D model s dvosmjernom vezom između površinskog otjecanja i toka vode u cijevnim sustavima.

Rezultati

U radu su prikazani primjeri provedenih analiza i izrađenih karata opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava za gradove Poreč, Vodnjan, Novi Vinodolski, Biograd na Moru i Zadar, koji ilustriraju različite razine detaljnosti i mogućnosti njihove praktične primjene. Razina analize izravno određuje ograničenja i mogućnost interpretacije, odnosno korištenja rezultata. Na razini JLS-a dobivaju se prostorno pregledne, ali generalizirane karte koje često precjenjuju ili podcjenjuju opseg plavljenja i ne uzimaju u obzir učinak sustava odvodnje. One su, međutim, vrlo korisne u strateškom planiranju i pri izradi dokumenata prostornog uređenja jer omogućuju identifikaciju zona podložnih plavljenju bez potrebe za kompleksnim modeliranjem i detaljnim podlogama. Na razini sliva rezultati su znatno realniji zahvaljujući preciznijim podlogama i višoj razini detaljnosti. Ova razina omogućuje prepoznavanje utjecaja topografije i zemljišnog pokrova na hidrauličke karakteristike površinskog toga oborinskih voda, a izrađene karte mogu se koristiti kao podloga za urbanističke planove i studije odvodnje oborinskih voda. Na razini podsliva moguće je kvantificirati učinke pojedinih tehničkih rješenja, analizirati rad sustava za odvodnju tijekom ekstremnih događaja i optimizirati planirane mjere (slika 1). Time se postiže visoka razina preciznosti, ali uz povećane zahtjeve za pouzdanim geodetskim podlogama i računalnim resursima.



Slika 1. Detalj karte rizika od poplava (dubine vode i razina rizika za objekte) za odabrani podsliv u Zadru.

Zaključak

Iskustva stečena kroz analize poplava u više priobalnih gradova pokazuju da širi obuhvat često prati niža razina pouzdanosti i točnosti. Unatoč tome, svaka vrsta analize je korisna ako je unaprijed jasno definirana njezina namjena te pripadajuća ograničenja. U praksi se pokazalo da je najefikasniji pristup onaj u kojem se strateški provodi višerazinska analiza, od razine JLS-a ili sliva za prostorne planove uređenja i definiranje prioriteta, do detaljne razine podsliva za potrebe izrade urbanističkih planova, studija i projektne dokumentacije. Ova iskustva mogu poslužiti kao polazište za standardizaciju pristupa kroz izradu smjernica za procjenu rizika od pluvijalnih poplava u urbanim sredinama u Hrvatskoj.

Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom 4SeaFlood (IP-2022-10-7598). Također rad je financiran u okviru projekta CroCo-Flood (uniri-iz-25-86), koji se financira sredstvima Europske unije – NextGenerationEU kroz Nacionalni plan oporavka i otpornosti Republike Hrvatske 2021.–2026., u suradnji s Programskim financiranjem Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Literatura

- Horvat, B. & Krvavica, N. (2023) 'Disaggregation of the Copernicus Land Use/Land Cover (LULC) and Population Density Data to Fit Mesoscale Flood Risk Assessment Requirements in Partially Urbanized Catchments in Croatia', *Land (Basel)*, 12(11), p. 2014. doi: 10.3390/land12112014.
- Krvavica, N. & Rubinić, J. (2020) 'Evaluation of Design Storms and Critical Rainfall Durations for Flood Prediction in Partially Urbanized Catchments', *Water*, 12(7), p. 2044. doi: 10.3390/w12072044.
- Krvavica, N., Šiljeg, A., Horvat, B. & Panda, L. (2023) 'Pluvial Flash Flood Hazard and Risk Mapping in Croatia: Case Study in the Gospić Catchment', *Sustainability*, 15(2), p. 1197. doi: 10.3390/su15021197.
- Šiljeg, A., Panda, L., Marinović, R., Krvavica, N., Domazetović, F., Jurišić, M. & Radočaj, D. (2023) 'Infiltration Efficiency Index for GIS Analysis Using Very-High-Spatial-Resolution Data', *Sustainability*, 15(21), p. 15563. doi: 10.3390/su152115563.

KADA NANOS UKLONITI, A KADA ZADRŽATI? LEKCIJE S KUPE I RJEČINE

MARTA MARIJA GRŽIĆ, NINO KRVAVICA

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

Uvod

Upravljanje nanosom u riječnim koritima često se promatra isključivo kao tehnička mjera za povećanje protočnosti korita ili zaštitu od poplava. Međutim, hidraulički i ekološki učinci takvih zahvata ovise o ekotipu vodotoka i njegovom hidromorfološkom kontekstu. U ovom radu prikazani su rezultati dviju recentnih studija provedenih na rijekama Kupi i Rječini, koje odražavaju dvije naizgled suprotne, ali komplementarne situacije: u prvoj je analiziran utjecaj sprudova na umanjene rizika od poplava s ocjenom opravdanosti njihovog uklanjanja, dok je u drugoj analizirana mogućnost revitalizacije virova s ciljem očuvanja hidromorfološke i ekološke funkcije. U oba slučaja primijenjen je pristup temeljen na hidrauličkom modeliranju toka površinskih voda.

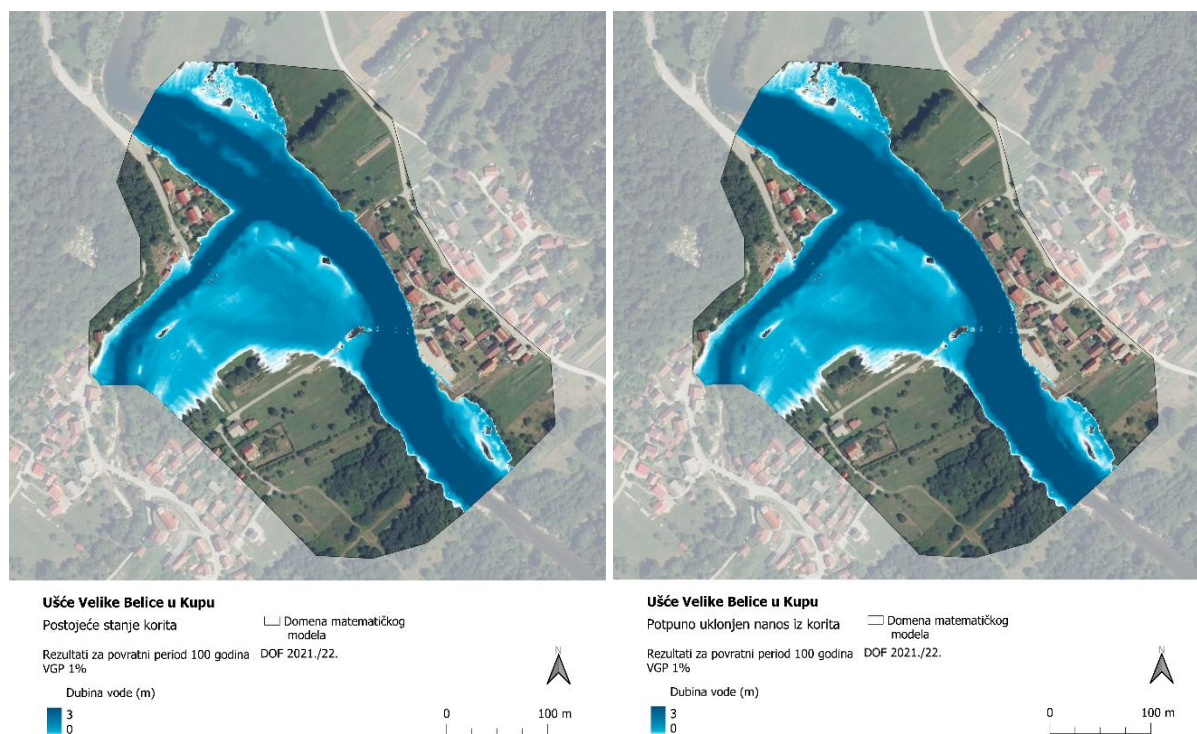
Metode

Na rijeci Kupi analizirane su tri lokacije: ušće Čabranke, ušće Velike Belice i ušće Kupice, s ciljem procjene utjecaja nanosa na hidrauličke karakteristike (dubina i brzina vode), odnosno na opasnosti od poplava. Provedeno je 2D hidrauličko modeliranje nestacionarnog toka pomoću HEC-RAS računalnog programa za tri varijante geometrije korita: (a) postojeće stanje, (b) djelomično uklanjanje nanosa i (c) potpuno uklanjanje nanosa. Hidrauličkim modelom su analizirani vodni valovi s 10- i 100-godišnjim povratnim periodom. Posebna pažnja posvećena je procjeni učinaka uklanjanja sprudova na razinu vode u koritu te obuhvat poplave. Na rijeci Rječini ispitana su dva vira u gornjem toku – Črni vir na Kućicah i Vir pod Topolun – s ciljem obnove njihove morfološke i ekološke funkcije (Addy, Cooksley i Dodd, 2016). Provedena je hidrološka analiza, uključujući trendove srednjih, minimalnih i ekstremnih protoka. Hidrauličko modeliranje provedeno je za postojeće stanje korita te za geometriju korita nakon planiranog uklanjanja nanosa, uz procjenu promjena dubine, brzine, posmičnog naprezanja te transportnog kapaciteta. Uključena je i analiza ekoloških aspekata, posebno u kontekstu očuvanja staništa bjelonogog raka.

Rezultati

Rezultati za Kupu pokazali su da uklanjanje sprudova ima minimalan ili zanemariv učinak na smanjenje poplavnog rizika (Slika 1), što potvrđuje zaključke ranijih studija (SEPA, 2010). U svim analiziranim slučajevima zaključeno je da uklanjanje sprudova nije opravdano – ni hidraulički ni ekološki – jer bi rezultiralo gubitkom rijetkih stanišnih tipova od nacionalnog i europskog značaja, uz vrlo mali doprinos smanjenju rizika od poplava.

Na Rječini, s druge strane, rezultati su pokazali da uklanjanje dijela nanosa u virovima ima značajan pozitivan učinak u sušnim razdobljima, kada produbljeni virovi zadržavaju dodatne količine vode i time osiguravaju mikrohabitate. Predloženo tehničko rješenje za Rječinu ima uporište u međunarodnim smjernicama za revitalizaciju vodotoka i upravljanje nanosom (SEPA, 2010) i temelji se na načelu minimalne intervencije, koje je ograničeno isključivo na postojeće virove koji su s vremenom zapunjeni uslijed promjena na uzvodnom dijelu sliva. Tijekom većih voda, učinak zahvata ograničen je na lokalne promjene dubine i smanjenje transportnog kapaciteta sedimenta, bez utjecaja na globalne hidrauličke uvjete. U ekstremnim poplavnim situacijama utjecaj zahvata je zanemariv. Revitalizacija virova na Rječini stoga se promatra prvenstveno kao lokalna ekološka mjera, a ne kao sredstvo za smanjenje poplavnog rizika.



Slika 1. Karte opasnosti od poplava s prikazom dubina vode i obuhvata poplave za povratni period 100 godina: postojeće stanje korita (lijevo) i potpuno uklonjen nanos iz korita (desno) na području ušća Velike Belice u Kupu (Kuželj).

Zaključak

Usporedna analiza rijeka Kupe i Rječine pokazuje kako uklanjanje nanosa može imati potpuno različite učinke ovisno o kontekstu i cilju zahvata. U rijeci Kupi, gdje ekstremni vodni valovi značajno premašuju kapacitet korita, uklanjanje sprudova nije opravdano ni s ekološkog ni s ekonomskog aspekta obzirom da ne doprinosi smanjenju opasnosti od poplava. S druge strane, selektivno uklanjanje nanosa u Rječini ima jasno opravdanje u smislu obnove ekoloških funkcija i poboljšanja hidrološke postojanosti u sušnim razdobljima.

Oba slučaja potvrđuju da upravljanje nanosom zahtijeva lokalno prilagođen, interdisciplinarni pristup koji integrira hidrauličke, geomorfološke i ekološke kriterije, uz jasno definiranu svrhu. Samo takav pristup omogućuje dugoročno održivo upravljanje riječnim koritima u promjenjivim hidrološkim i klimatskim uvjetima.

Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom 4SeaFlood (IP-2022-10-7598). Također rad je financiran u okviru projekta CroCo-Flood (uniri-iz-25-86), koji se financira sredstvima Europske unije – NextGenerationEU kroz Nacionalni plan oporavka i otpornosti Republike Hrvatske 2021.–2026., u suradnji s Programskim financiranjem Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Literatura

Addy, S., Cooksley, S. i Dodd, N., 2016. River restoration and biodiversity: nature-based solutions for restoring the rivers of the UK and Republic of Ireland. Aberdeen / Flintshire: International Union for Conservation of Nature (IUCN National Committee UK) & Scotland's Centre of Expertise for Waters (CREW).

Scottish Environment Protection Agency (SEPA), 2010. Sediment management: engineering in the water environment — good practice guide, first edition. Edinburgh: SEPA.

OCJENA STANJA KVALITETE VODA MALIH VODNIH RESURSA UPOTREBOM FUZZY -WQI MODELA

IVANA SUŠANJ ČULE¹, GORAN VOLF¹, NEVENKA OŽANIĆ¹, BARBARA KARLEUŠA¹

¹ Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Hrvatska

Uvod

Ocjena kvalitete vode u malim vodnim resursima poput lokvi otežana je jer na razini Europske unije ne postoji posebna regulativa ni propisana metodologija. Njihova je zaštita u Republici Hrvatskoj moguća jedino kroz zakonski okvir Direktive o staništima (92/43/EEZ) i Zakona o zaštiti prirode (NN 80/13), koji naglašavaju očuvanje biološke raznolikosti i ekološke vrijednosti. Kao odgovor na taj nedostatak razvijaju se različiti pristupi procjeni kvalitete voda, pri čemu se posljednjih godina sve više primjenjuju modificirani indeksi kvalitete vode (Water Quality Index, WQI). Među njima se ističu NSF-WQI (Murali i sur., 2020), CCME-WQI (Fayad i sur., 2023) te noviji pristup temeljen na Fuzzy-WQI metodi (Ramdani i sur., 2025).

S obzirom da važnost razvoja pristupa ocjene stanja kvalitete vode na lokvama iziskuje primijenjen pristup, cilj istraživanja u opisanom području usmjeren je prema ocjeni stanja spomenutih prirodnih vodnih resursa kako bi se postavili temelji za razvoj metodologije i smjernica ka zaštiti i mogućoj potrebnoj revitalizaciji istih.

Model Fuzzy indeksa kvalitete vode (Fuzzy – WQI)

Upotrebom fuzzy logike izrađen je model (Python okruženje) za procjenu stanja kvalitete vode odnosno izračun Fuzzy-WQI na lokvama temeljem podataka o kvaliteti vode. Model se temelji na primjeni fuzzy logike koja za razliku od standardnih WQI metoda omogućuje stupnjevitu ocjenu što bolje odražava realne i preklapajuće uvjete u prirodnom okolišu. Primjena fuzzy logike omogućuje primjenu višestrukih kriterija i fleksibilnije postavljanje granica pri ocjeni kvalitete vode prilikom čega se provodi analiza osjetljivosti svake analizirane lokacije na svaki zasebni parametar kvalitete vode.

Analizirane su lokacije u blizini Novalje na otoku Pagu: (i) lokva Škunca stani, (ii) lokva Dabovi stani i (iii) lokva Vidasovi stani. Uzorkovanje vode provodilo se u više navrata u periodu od 2023. do 2025. godine. Laboratorijskom analizom na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci ispitani su parametri kvalitete vode čiji je popis vidljiv u Tablici 1.

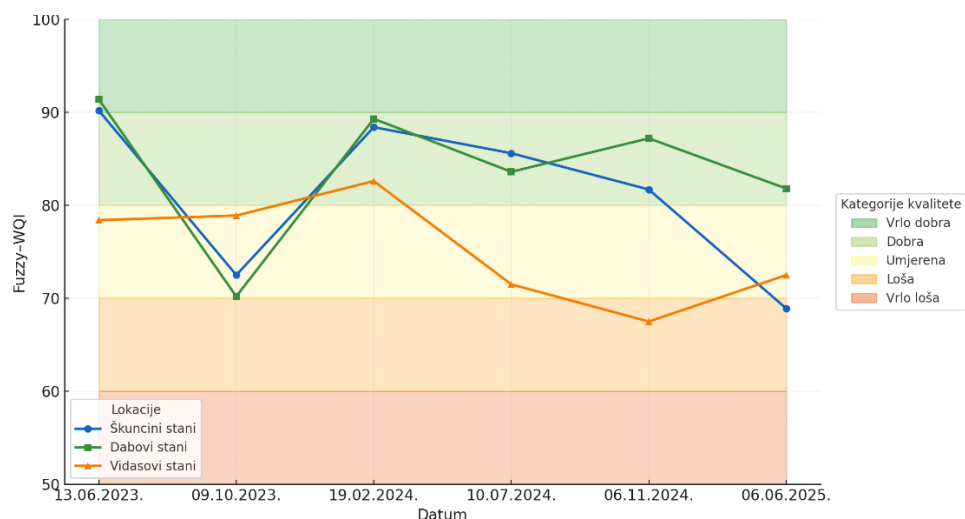
Ocjena kvalitete vode primjenom modela Fuzzy indeksa kvalitete vode (Fuzzy – WQI)

Temeljem prikupljenih podataka na navedenim lokacijama provedena je analiza osjetljivosti te su određeni težinski koeficijenti izraženi postotkom temeljem prikupljenih podataka za svaki analizirani parametar i lokaciju (Tablica 1.)

Tablica 1. Težinski koeficijenti prema parametrima kvalitete vode

Parametar kvalitete vode	Mjerna jedinica	Škuncini stani [%]	Dabovi stani [%]	Vidasovi stani [%]
pH	[]	3,7	3,8	11,8
Ukupne otopljene tvari (TDS)	[ppm]	5	5	8,4
Elektroprovodljivost (C)	[μS/cm]	6,1	6,2	12,7
Nitrati	NO ₃ -N / [mg/L]	13,6	14,2	4,4
Amonijak	NH ₄ ⁺ - N / [mg/L]	11,4	11,8	7,7
Kloridi	Cl ⁻ / [mg/L]	4,1	4,1	5,2
Nitriti	NO ₂ ⁻ - N / [mg/L]	1,8	1,4	10,8
Ukupni dušik	TN _b / [mg/L]	17,8	17,3	13,2
Ortofosfati	PO ₄ ³⁻ - P / [mg/L]	6,8	6,9	9,7
Ukupni fosfor	PO ₄ ³⁻ - P / [mg/L]	8,2	8,7	5,2
Kemijska potrošnja kisika (KPKcr)	O ₂ / [mg/L]	21,5	20,6	10,9

Rezultati modela su ocjenjeni primjenom kriterija kvalitete vode prema literaturi (Sutadian et al., 2016) i prikazani na Slici 1.



Slika 1. Promjena Fuzzy-WQI na analiziranim lokvama

Zaključak

Analiza osjetljivosti prikazanih lokvi ukazuje da WQI ovisi primarno o KPKcr te ukupnom dušiku i fosforu. Također, s obzirom na rezultate ocjene kvalitete primjenom Fuzzy-WQI modela može se zaključiti da lokve na lokacijama Škuncini i Dabovi stani imaju dugoročno dobru kvalitetu s manjim odstupanjima, dok je na lokvi smještenoj u Vidasovim stanima zabilježena umjerena kvaliteta vode. Na svim lokacijama je zamijećen pad kvalitete u jesenskom periodu koje je moguće izazvano većom temperaturom vode u ljetnim mjesecima te smanjenim prihranjivanjem vode. Prema cijelokupnoj analizi može se zaključiti da lokva u Vidasovim stanima za sad jedina pokazuje naznake pogoršanja kvalitete vode što može upućivati na stanje eutrofikacije. Temeljem izrađenog modela može se zaključiti da isti može poslužiti kao alat za sustavno praćenje stanja kvalitete vode te u konačnici razvoj metodologije za prioretiziranje potrebe za revitalizacijom, zaštitom i očuvanjem malih vodnih resursa.

Zahvala

Članak je rezultat rada u okviru UNIRI Institucionalnih istraživačkih projekta koje financira Europska unija - Next GenerationEU (uniri-iz-25-18, uniri-iz-25-34 i uniri-iz-25-27).

Literatura

- Fayad, H.A., Baydoun, S., Soliman, M.R. (2023). "Preliminary water quality assessment using Canadian Water Quality Index of Ras el-Ain ponds, South Lebanon". *Deleted Journal*, 5(1). doi:<https://doi.org/10.54729/2959-331x.1108>.
- Murali, K., Meenakshi, M. i Uma, R.N. (2020). "Surface Water (Wetlands) Quality Assessment In Coimbatore (India) Based On National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSF WQI)". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 932, p.012049. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899x/932/1/012049>.
- Ramdani, F., Zahra, D. R. A., Ramdhani, H. N., Dani, M. F. A., Nurfadillah, F., Darmawan, M. D. M., & Octavia, N. (2025). "Prediction of Water Quality in Ponds Based on Temperature, Water Clarity, pH, and Dissolved Oxygen Using Mamdani Fuzzy Logic". *Journal of Applied Science, Technology & Humanities*, 2(2), 149-161.
- Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G. and Perera, B.J.C. (2015). Development of river water quality indices—a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(1). doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>.

KORIŠTENJE DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA I SfM METODOLOGIJE U PRAKTIČNE SVRHE U GEOTEHNICI – PRIMJENA U ANALIZI STABILNOSTI STIJENSKIH POKOSA

SANJA DUGONJIĆ JOVANČEVIĆ ¹, IGOR RUŽIĆ ¹, JOSIP PERANIĆ ¹, MARTINA VIVODA PRODAN ¹, ČEDOMIR BENAC ²

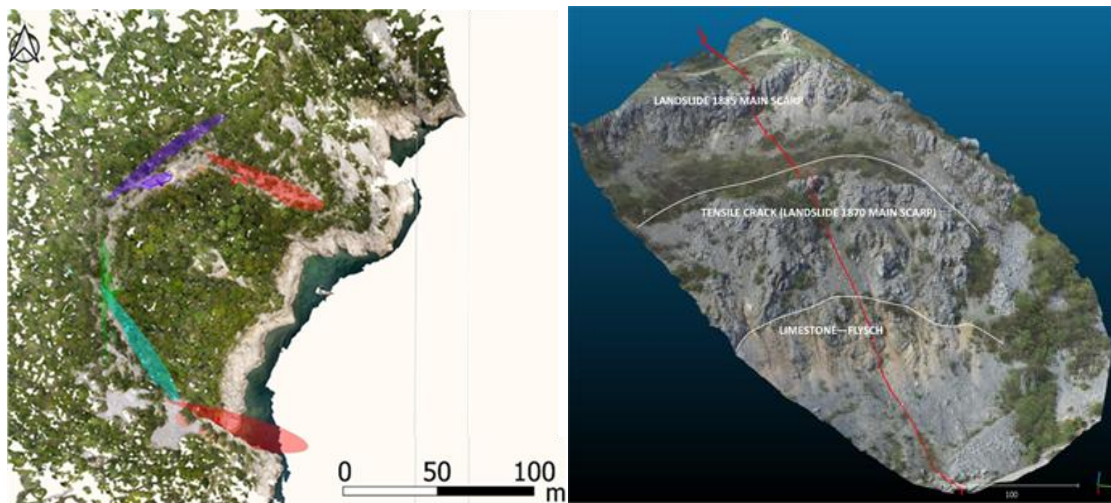
¹ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

² Sveučilište u Rijeci, Hrvatska

Uvod

Tijekom posljednjeg desetljeća, daljinska istraživanja i fotogrametrijske metode doživjele su značajan napredak te su postale ključni alati u suvremenoj geotehničkoj praksi. Primjena bespilotnih letjelica (UAV) u kombinaciji sa Structure-from-Motion (SfM) i Multi-View Stereo (MVS) metodologijom omogućuje stvaranje visokorezolucijskih 3D modela stijenskih pokosa i obalnih zona, čime se značajno poboljšava točnost i učinkovitost prikupljanja prostornih podataka.

U okviru ovog rada prikazana je primjena navedenih tehnologija na nekoliko različitih primjera rješavanja problema nestabilnosti, zaštite stijenskih pokosa i praćenja geomorfoloških procesa. Cilj je prikazati praktične mogućnosti, ograničenja i razine točnosti SfM fotogrametrije u analizama stabilnosti, kinematičkim analizama i planiranju mjera sanacije stijenskih pokosa.



Slika 1. Digitalni modeli terena izvedeni primjenom UAV i SfM: Liburnijska obala (Benac et al. 2023) lijevo; Dolina Rječine (Dugonjić Jovančević et al. 2016) desno.

Metode

Za sve prikazane studije slučaja korištena je UAV-SfM metodologija kojom su snimljeni i analizirani teško dostupni tereni. U svim istraživanjima primijenjeni su komercijalni dronovi s kamerama visoke rezolucije, pri čemu su letni parametri prilagođeni morfologiji terena i zahtijevanoj prostornoj rezoluciji. Georeferenciranje je provedeno pomoću RTK-GPS mjerenja, a 3D oblaci točaka obrađeni su u programima Agisoft Metashape, Autodesk ReCap i CloudCompare. Dobiveni modeli korišteni su za: (i) strukturnu analizu diskontinuiteta (orijentacija pukotina, rasjeda i ploha slojevitosti, kao i stupanj raspucalosti); (ii) kinematičku analizu stabilnosti korištenjem stereografskih projekcija, (iii) izradu numeričkih modela i procjenu faktora sigurnosti, (iv) praćenje deformacija i erozijskih procesa kroz višekratna snimanja. Na primjeru liburnijske obale, UAV podaci dopunjeni su snimanjem podmorja pomoću višesnogpnog sonara i samohodne ronilice. Tako je omogućena analiza i podmorskog dijela nestabilnosti, što predstavlja značajan iskorak u kombiniranju geotehničkih i geomorfoloških metoda.

Rezultati

Dobiveni 3D modeli omogućili su vrlo detaljnu karakterizaciju stijenskih masiva i pokosa, uz točnost od nekoliko centimetara. Na primjeru klizišta u dolini Rječine je SfM model omogućio rekonstrukciju povijesnog klizišta i potvrdu stabilnosti mirujuće mase pri suhim uvjetima, uz mogućnost reaktivacije.

Na Liburnijskoj obali, kombinacija UAV-SfM i sonarnih mjerenja otkrila je kompleksnu strukturu kolapsa velikih blokova stijenske mase koji se dogodio u novijoj geološkoj prošlosti, a sada su vidljivi samo povremeni odroni manjih volumena. Na otoku Krku, UAV podaci omogućili su precizno kartiranje aktivnih klizišta u području Stare Baške, identifikaciju diskontinuiteta u siparnim brečama i fliškoj stijenskom masi, te modeliranje utjecaja budućeg porasta razine mora na intenziviranje erozije i vjerojatno ubrzanje odrona te pokretanje klizišta. UAV snimanja korištena su za geometrijsku analizu stijenskih pokosa i planiranje sustava zaštitnih mreža i sidrenih elemenata. Zajednički rezultati pokazuju da SfM metodologija snimanja i obrade podataka omogućuje detaljnu analizu geometrije kosina, brzo i sigurno određivanje potencijalnih nestabilnosti i dobivanje kvalitetnih ulaznih podataka za geotehničke proračune. Kinematičke analize izvedene na osnovi UAV-SfM modela dale su usporedive rezultate s onima dobivenima konvencionalnim mjerenjima na terenu.

Zaključak

Primjena daljinskih istraživanja i SfM fotogrametrije pokazala se kao izuzetno koristan alat u geotehničkoj praksi, posebno u analizama stabilnosti stijenskih pokosa u teško dostupnim područjima. Metodologija omogućuje brzo i sigurno prikupljanje geometrijskih podataka visoke rezolucije, integraciju s geotehničkim analizama stabilnosti, praćenje promjena geometrije pokosa kroz vrijeme, te učinkovito planiranje i optimizaciju sanacijskih mjera. Kroz prikazane primjere potvrđena je visoka pouzdanost UAV-SfM metode u stvarnim inženjerskim uvjetima – od istraživanja povijesnih i aktivnih klizišta do analize obalnih erozijskih procesa i zaštite urbanih područja. U budućnosti, kombinacija SfM modela, LiDAR-a i numeričkih simulacija mogla bi predstavljati standardni pristup u procjeni rizika i projektiranju sustava zaštite od odrona u krškim i obalnim područjima Hrvatske.

Literatura

- Arbanas Ž., Sečanj M.; Vivoda Prodan M., Dugonjić Jovančević S., Peranić J., Bernat Gazibara S., Krkač M., Udovič D. (2019) Protection of the City of Omiš, Croatia, from rockfall threats, ReSyLAB 2019 / Uljarević, Mato; Zekan, Sabid; Salković, Sabrina et al. (ur.). Sarajevo: Geotechnical Society of Bosnia and Herzegovina, str. 251-255. doi: 10.35123/ReSyLAB_2019_41.
- Benac Č., Dugonjić Jovančević S., Navratil D., Tadić A., Maglić L. (2023) Large gravitational collapse structure on a rocky coast (Kvarner, NE Adriatic Sea), *Geologia Croatica*, 76 (2023), 3; 105-112. doi: 10.4154/gc.2023.10
- Benac Č., Dugonjić Jovančević S., Vivoda Prodan M., Ružić I. (2025) Collapse structure along the liburnian coast (Rijeka Bay, NE Adriatic sea), *International Rock Coast 2025 A state of the art - Proceedings* (Furlani, Stefano; Devoto, Stefano; Pappalardo, Marta et al. ur.). Trst: IAG - International Association of Geomorphology; Associazione Italiana Geografia Fisica e Geomorfologia-AIGEO; Università degli studi di Trieste, str. 28-30.
- Dugonjić Jovančević S., Peranić J., Ružić I., Arbanas Ž. (2016) Analysis of a historical landslide in the Rječina River Valley, Croatia, *Geoenvironmental Disasters*, 3 (2016), 26; 1-9. doi:10.1186/s40677-016-0061-x.
- Ružić I.; Benac Č., Dugonjić Jovančević S., Radišić M. (2021) The Application of UAV for the Analysis of Geological Hazard in Krk Island, Croatia, Mediterranean Sea, *Remote sensing*, 13 (2021), 9; 1790, 14. doi: 10.3390/rs13091790.
- Ružić I., Marović I., Vivoda M., Dugonjić Jovančević S., Kalajžić D., Benac Č., Ožanić N. (2013) Application of 'Structure-from-Motion' photogrammetry for erosion processes monitoring, Mošćenička Draga example, 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia": abstracts. Split: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, str. 49-50.

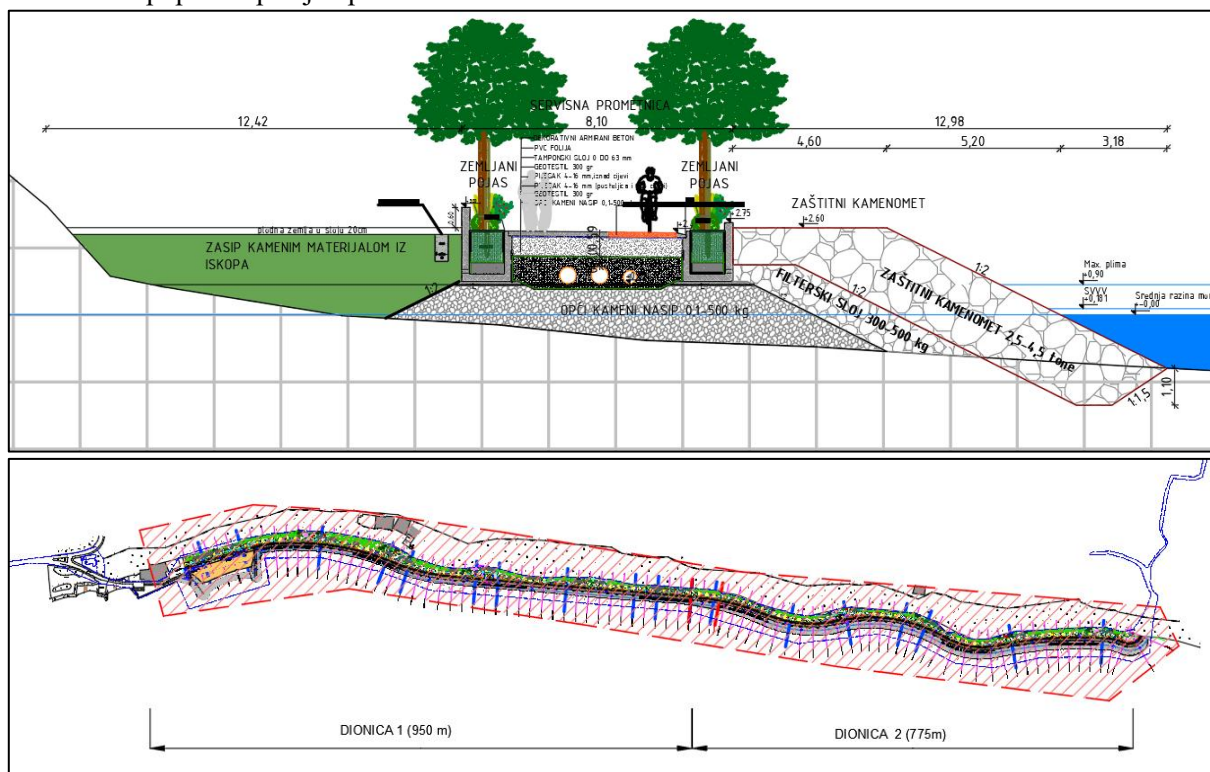
ANALIZA VELIČINE KAMENE OBLOGE OBALOUTVRDE PJEŠAČKO BICIKLISTIČKE STAZE DUILOVO-STOBREČ (SPLIT)

DALIBOR CAREVIĆ¹, DAMJAN BUJAK¹, DALIBOR CRNAC²

¹ Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kacicieva 26, Zagreb, Hrvatska

² Pomgrad inženjering d.o.o, Stinice 26/B, Split, Hrvatska

U radu se prikazuje proračun veličine kamena obaloutvrde (zaštitni kamenomet) koji je izradio Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, za potrebe izvedbenog projekta „Spoj sustava odvodnje južnog sliva na UPOV Stupe i dogradnja podmorskog ispusta Stobreč“ koji je izradila tvrtka Pomgrad inženjering d.o.o. iz Splita. Projektom je predviđeno rješenje kojim se otpadne vode južnog dijela splitskog poluotoka transportiraju s lokacije postojećeg UPOV-a na Katalinića Brigu prema centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda Stupe. Ukupna dužina obaloutvrde je približno 1720 m, a prosječna širine krune nasipa je 8,0 m te je predviđen karakteristični poprečni presjek prikazan na slici 1.



Slika 1 Poprečni presjeci obaloutvrde iz projekta „Spoj sustava odvodnje južnog sliva na UPOV Stupe i dogradnja podmorskog ispusta Stobreč“ (gore); tlocrt sustava (dolje)

Za potrebe proračuna projektnih valnih parametara izrađena su dva numerička modela deformacije valova različite rezolucije (SWAN regionalni i lokalni). Regionalni model je obuhvaćao šire područje Splitskog i Bračkog kanala i imao je za cilj određivanje dubokovodnih valnih parametara otprilike 1000m ispred dionice obaloutvrde. Model je kalibriran pomoću mjerenih valnih parametara izmjerenih u Splitskom kanalu 2007.-2008.g. (prikazano u Bujak et al, 2023). Kalibrirani model je potom forsiran poljem srednjih satnih brzina vjetra (ERA5, Copernicus) u periodu od 01.01.2008. do 31.12.2019. Iz navedenog perioda ekstrahirani su valni parametri ispred predmetne obaloutvrde na udaljenosti otprilike 1000m od obale te je provedena statistička analiza pojavnosti godišnjih ekstrema iz smjerova 90-180° (trueN). Analizom su dobiveni valni parametri povratnog perioda 100g. jednaki $H_s=3.53\text{m}$, $T_p=7.2\text{s}$. Lokalni model je obuhvaćao uže akvatorijalno područje ispred lokacije obaloutvrde do otprilike 1000 m od obalne linije, a kao rubni uvjet su korišteni valni parametri dobiveni regionalnim modelom, iz smjerova 160°, 170° i 180° i to za dvije razine mora (srednju razinu i max. plimu +0,9m.n.m.). Modelskim proračunom su u konačnici dobiveni projektni valni parametri na nožici obalutvrde jednaki $H_s^{100g}=2,1\text{m}$ za dionicu 1, te $H_s=2,95\text{m}$ za dionicu 2. Na dionici 1 su dobivene manje valne visine nego na dionici 2, unatoč jednakim inicijalnim dubokovodnim valnim visinama, zbog pojave značajne plicine ispred dionice 1 gdje je došlo do intenzivnijeg loma valova i smanjenja maksimalnih valnih visina, a

time i značajne valne visine. Analiza veličine kamene obloge je provedena pomoću Van Gent-ovog modela za konstrukcije ispred kojih se pojavljuje značajan lom maksimalnih valova.

U donjoj tablici se daje proračun mase kamenih blokova M_{50} za dionice 1 i 2 prema metodi Van Genta za valne uvjete na lokaciji. Za dionicu 2 postavljen je koeficijent dozvoljenog oštećenja $S=3$ s ciljem dobivanja ujednačene veličine kamene obloge duž čitave građevine (dionica 1 i 2).

Tablica 1 Izračun veličine kamene obloge po izrazu Van Genta za dvije karakteristične dionice ($H_{s,toe}$ - valna visina na nožici pokosa, $T_{m-1,0}$ - srednji valni period, C_{pl} -plunging koeficijent, C_s -surging koeficijent, P -koeficijent propusnosti, ξ_{cri} -kritični parametar sličnosti; $H_{2\%}$ -valna visina na nožici koja premašuje 2% najviših valova, Δ -relativna gustoća, N -broj valova koji djeluju na konstrukciju u određenom periodu, S - parametar oštećenja, D_{n50} -nazivni promjer kamene obloge, M_{n50} -nazivna masa kamene obloge)

	PROSJEČNI NAGIB DNA 1:15													
	$\tan\alpha$	$H_{s,toe}$	$T_{m-1,0}$	$\xi_{m-1,0}$	C_{pl}	C_s	P	ξ_{cri}	$H_{2\%}$	Δ	N	S	D_{50}	M_{50}
	[1]	[m]	[s]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[m]	[1]	[1]	[1]	[m]	[kg]
Dionica 1	0.50	2.10	6.00	2.59	8.4	1.3	0.4	3.95	3.49	1.5341	7000	2	1.08	3311
Dionica 2	0.40	2.95	6.60	1.92	8.4	1.3	0.4	3.49	4.61	1.5341	6000	3	1.12	3655

Visina parapetnog zida obaloutvrde +2,75m određeni su prema proceduri definiranoj u priručniku EurOtop_2018 za val na nožici $H_{m0}^{5g}=2.4m$. Visina krune je definirana kao zbroj ekstremno visoke razine $ExtrVR^{5g}=0,6m$, proračunatog potrebnog nadvišenja ($R_c=1,95 m$) da bi se zadovoljilo granično prelijevanje $q \leq 10 l/s/m'$ i pripadajuća vrijednosti maksimalnog volumena prelijevanja $V_{max}=1000 l/s/m'$, te potencijalnog utjecaja klimatskih promjena u iznosu od 0,2m ($1,95+0,6+0,2=2,75 m.n.m.$)

Literatura

- Bujak, D., Lončar, G., Carević, D., & Kulić, T. (2023). The Feasibility of the ERA5 Forced Numerical Wave Model in Fetch-Limited Basins. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 59. <https://doi.org/10.3390/jmse11010059>
- EurOtop Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. Second Edition 2018. Dostupno na: <https://www.overtopping-manual.com/eurotop/downloads/> (Preuzeto: 12.08.2025.)
- Güler, H. G., Ergin, A., & Özyurt Tarakçioğlu, G. (2014,). A comparative study on the stability formulas of rubble mound breakwaters. In *Coastal Engineering Proceedings* 34(1), 27 <https://doi.org/10.9753/icce.v34.structures.27> (icce-ojs-tamu.tdl.org)
- The SWAN team, SWAN SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION. 2022, Delft. Dostupno na: https://swanmodel.sourceforge.io/online_doc/online_doc.htm. (Preuzeto: 12.09.2025.)

ULOGA DMA ZONA PRI DETEKCIJI GUBITAKA I UPRAVLJANJU VODOOPSKRBNIM SUSTAVOM GRADA ZAGREBA

IVANA LOVRIĆ¹, FILIP KALINIĆ², MARIO MEDVEN³

^{1,2} Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, Hrvatska

³ Vodoopskrba i odvodnja d.o.o., Zagreb, Hrvatska

Uvod

U Republici Hrvatskoj prosječni gubici u vodoopskrbnom sustavu su već godinama vrlo visoki (oko 50%), te je trajna zadaća sektora vodnih usluga smanjenje gubitaka na prihvatljive vrijednosti po uzoru na razvijene europske zemlje (npr. Nizozemska 5%) („Nacionalni akcijski plan smanjenja gubitaka vode u Republici Hrvatskoj“, 2024). Prema Nacionalnom akcijskom planu smanjenja gubitaka vode u Republici Hrvatskoj (2024.) cilj je uspostaviti sistemsko praćenje razine gubitaka vode u javnim vodoopskrbnim sustavima kroz standardiziranu metodologiju gdje je jedna od tehničkih i operativnih mjera uspostava DMA zona. DMA zona (*engl. District Metered Areas*) označava izdvojeno područje mjerenja u vodoopskrbnoj mreži koje je hidraulički zatvoreno i u kojem se kontinuirano mjeri količina vode koja ulazi i izlazi iz zone. Na granicama takvog područja ugrađuju se ventili, protokomjeri i tlačni senzori, čime se omogućuje točna kontrola i nadzor sustava distribucije vode (Svjetska banka, 2024).

Uspostava DMA zona zadatak je i Vodoopskrbe i odvodnja d.o.o. Zagreb (VIO Zagreb) koji je javni isporučitelj vodnih usluga na uslužnom području 11 koje obuhvaća gradove Zagreb, Jastrebarsko, Samobor i Svetu Nedelju, te općinu Stupnik, Klinča Sela i Žumberak u Zagrebačkoj županiji te iznimno ne obuhvaća naselje Veliko Polje (NN 70/2023, 2023). Prostorno zauzima površinu od oko 1370 km² te je po ukupnoj količini dobavljene vode najveće na razini Hrvatske („Nacionalni akcijski plan smanjenja gubitaka vode u Republici Hrvatskoj“, 2024). Prema podacima iz Studije izvodljivosti (Hidroing d.o.o. Osijek i sur., 2024), za 2020. godinu prema IWA metodologiji, promatrano područje (bez Jastrebarskog, Klinča Sela i Žumberka) ima gubitke od 54%. Smanjenje vodnih gubitaka kroz uspostavu DMA zona započelo se 2012. godine, a od ukupno projektiranih 159 DMA zona do danas je formirano 17. Ovisno o provedbi projekta po fazama, uspostava svih zona se predviđa kroz narednih 10 godina.

U radu će se prikazati praćenje mjernih veličina na uspostavljenim DMA zonama na području grada Zagreba kroz aplikaciju „Ricity“. Prikazat će se iskustvene prednosti i nedostaci korištenja DMA zona kod detekcije gubitaka i upravljanja vodoopskrbnim sustavom.

Metode

Uspostava i projektiranje DMA zona provodi se ovisno o hidrauličkoj povezanosti cjevovoda, topografiji terena, broju i rasporedu potrošača, režimu tlakova, stanju infrastrukture te dostupnosti mjernih i upravljačkih uređaja (SCADA, protokomjeri, ventili) (Svjetska banka, 2024). Prije uspostave svaka se zona modelira i simulira u matematičkom modelu te ukoliko zadovoljava zadane uvjete pristupa se uspostavi DMA zone u mreži. U slučaju da dođe do nepredviđenih problema pristupa se detaljnoj analizi i utvrđivanju uzroka problema te prema potrebi reviziji mjesta zatvaranja zone. Nakon uspostave DMA zona kroz aplikaciju „Ricity“, u kojoj postoji prikaz svih instaliranih mjerača u mreži i trenutno izvedenih zona, djelatnici Odjela za otkrivanje kvarova i praćenja stanja u mreži prate mjerne veličine, detektiraju gubitke, utvrđuju lokacije curenja i po potrebi alarmiraju terenske ekipe.

Osnovni princip detekcije gubitaka je da se u svakoj zoni mjeri količina vode koja ulazi u zonu i uspoređuje se s registriranom potrošnjom korisnika unutar zone. Ključni parametar je Minimalni noćni protok (MNF) gdje je tijekom noći (obično između 2:00 i 4:00 h) potrošnja korisnika minimalna, pa protok na ulazu u zonu gotovo u potpunosti odražava stvarne gubitke. Ako je MNF veći od očekivanog referentnog protoka, u zoni postoji aktivno curenje.

U nastavku će se prikazati primjer detekcije puknuća kroz praćenje mjernih veličina u DMA zonama u aplikaciji „Ricity“. Ukazat će se i na ostale moguće uzroke pojave povećanog protoka te će se prikazati primjer mjernih veličina u DMA zoni za koju se može reći da gotovo nema gubitaka.

Rezultati

U DMA zoni Jačkovina – Lončarićev put 11.10.2025. u 1:00 sat uočen je značajan skok protoka (s oko 30 na 156 l/s) s istovremenim padom tlaka (s 8 na 6 bara) što je bio znak puknuća cijevovoda (Slika 1 - gore). U istoj

zoni se može uočiti da se srednja dnevna potrošnja kreće oko 40 l/s, a u noćnom periodu je to oko 27 l/s što ukazuje na značajne gubitke u zoni. Skok protoka ne mora nužno značiti puknuće cijevovoda već može ukazivati i na istjecanje vode na hidrantu kao što je registrirano u DMA Sveta Klara uslijed udara automobila u hidrant (28.10.2025. oko 15:30 h). Vrlo je malo zona koje nemaju gubitke ili imaju vrlo male gubitke što je moguće vidjeti na primjeru protoka DMA zone Dubec (Slika 1 – dolje). U noćnim periodima protok se kreće oko 3 l/s dok je srednja dnevna potrošnja oko 11 l/s.



Slika 1. Mjerene veličine protoka i tlaka za promatrane situacije u DMA zoni Jačkovina – Lončarićev put (gore) i u DMA zoni Dubec (dole)

Zaključak

Trajna zadaća sektora vodnih usluga je smanjenje gubitaka na prihvatljive vrijednosti. Uspostava DMA zona jedna je od tehničkih i operativnih mjera praćenja razine gubitaka vode u javnim vodoopskrbnim sustavima. U VIO Zagreb do sada je uspostavljeno 17 od planiranih 159 DMA zona čiji mjerni parametri se prate kroz web-platfomu “Ricity” koja uvelike pomaže u praćenju stanja u mreži u realnom vremenu. Uspostava DMA zona donosi višestruke koristi u vidu tehničke koristi kroz bolju kontrolu gubitaka, operativne koristi u vidu bržeg otkrivanja kvarova, ekonomske kroz uštedu energije i troškova te ekološku kroz održivo korištenje resursa. S druge strane, spostava DMA zona zahtijeva detaljan hidraulički model, visoke početne troškove kao i moguć negativni utjecaj na hidrauliku mreže. Svaka promijena u mreži zahtijeva ažuriranje zona, a za učinkovito upravljanje potrebno je imati obučeno osoblje, organizacijsku strukturu i stalno praćenje podataka.

Literatura

Hidroing d.o.o. Osijek i sur. (2024) „STUDIJA IZVODLJIVOSTI: Ulaganje u vodnocomunalnu infrastrukturu ~ „Projekt Zagreb 2021-2027““. VIO Zagreb.

„Nacionalni akcijski plan smanjenja gubitaka vode u Republici Hrvatskoj“ (2024). Hrvatske vode. Dostupno na: [https://efaidnbmnnnibpccjpcglclefindmkaj/https://www.voda.hr/sites/default/files/2024-07/Nacionalni%20akcijski%20plan%20smanjenja%20gubitaka_\(NAPSG\).pdf](https://efaidnbmnnnibpccjpcglclefindmkaj/https://www.voda.hr/sites/default/files/2024-07/Nacionalni%20akcijski%20plan%20smanjenja%20gubitaka_(NAPSG).pdf).

NN 70/2023 (2023) *Uredba o uslužnim područjima*. Dostupno na: [/eli/sluzbeni/2023/70/1160](https://eli.sluzbeni/2023/70/1160).

Svjetska banka (2024) „Izvešće za Nacrt Priručnika dobre prakse - Uspostava i upravljanje DMA zonama“. Svjetska banka.

MONITORING PROTOKA I ZASLANJENJA VODNOG STUPCA U IZRAZITO USLOJENIM UVJETIMA ESTUARIJA

VELJKO SRZIĆ¹, MARIN MILIN², MARKO DŽAJA¹, IVA ALJINOVIĆ¹

¹ Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Matice hrvatske 15, HR-21000, Republika Hrvatska

² HIGRA d.o.o., Doverska 13, HR-21000 Split, Republika Hrvatska

Uvod

Esturiji predstavljaju složene dinamične eko sustave unutar obalnih područja koji su izloženi istovremenom utjecaju dominantno hidroloških, klimatoloških, oceanografskih i antropoloških utjecaja (Savenije, 2005). Hidrološki režimi vodotoka koji prihranjuju područja estuarija svježom vodom ključni su u definiciji područja i intenziteta zaslanjenja estuarija (Geyer i Ralston, 2011). Pod klimatološkim utjecajem mogu se uzeti u obzir sezonske varijacije intenziteta zaslanjenja ali i promjene na većim vremenskim skalama koje odgovaraju projekcijskim razdobljima utjecaja klimatskih promjena. Ocenaografski utjecaji najčešće su vidljivi kroz plimotvorna svojstva i njihov utjecaj na hidrodinamička i termohalinska svojstva uzduž estuarija. Unutar ovog utjecaja svakako je meritorno uzeti u obzir i utjecaj srednje razine mora koja u kombinaciji s plimotvornim oscilacijama i dotokom slatke vode uzvodno dominantno definira i opisuje varijabilna svojstva vodnog stupca estuarija. Uzimajući u obzir i ljudski utjecaj, primarno kroz zahvaćanje voda za navodnjavanje i narušavanje prirodnog režima voda radom sustava melioracijske odvodnje, dolazi se do zaključka kako su režimi voda estuarija u najvećoj mjeri izloženi prethodno opisanim djelovanjima te predstavljaju ozbiljan istraživački izazov u pogledu identifikacije dominantnih procesa, sezonske varijabilnosti i dinamike skalarnih i vektorskih varijabli kojima se definira stanje voda estuarija.

Područje determinacije protoka u izrazito uslojenim uvjetima do sada je bilo predmet istraživanja većeg broja istraživačkih grupa. Konvencionalni pristupi temelje se na ekstenzivnoj i usklađenoj monitorng infrastrukturi koja iziskuje značajnu opremljenost i usklađenost. Osim navedenog, u literaturi su prisutni i metodološki pristupi koji se temelje na računsko aproksimativnim (Rummel et al., 2025) te modelskim pristupima (Gaiolini et al., 2023).

U ovom radu prikazuju se razrada i implementacija sustava monitoringa uslojenosti vodnog stupca u izrazito uslojenim uvjetima u fazi konceptualizacije, implementacije i demonstracije koncepta. Tako definirani parametri uslojenosti koriste se u determinaciji protoka slatke vode u površinskom sloju vodnog stupca. Terenska mjerenja i posredno razvijeni protokol determinacije slatke vode u usporedbi s do sada korištenim konceptom mjerenja protoka u ostvarenju malih voda, ukazuju na pozdan pristup koji rezultira vrijednostima protoka koje su 35-45 % manje u odnosu na do sada implementirana mjerenja u zoni estuarija.

Metode

Determinacija protoka slatke vode u zoni uspora u površinskom sloju vodnog stupca estuarija temelji se na mjerenju većeg broja parametara. Osim horizontalnih Channel Master ADCP-a kojima se mjeri brzina tečenja u površinskom sloju, koriste se i dvije CTD (MANTA 2 40+ i TruBlue CTD 585) sonde s kapacitetom mjerenja temperature i električne vodljivosti (EC) stupca vode, postavljene u površinskom i prodnom sloju. Razina mora i vodnog lica na hidrološkom mjernom profilu vodotoka mjere se mjernim uređajem Thalimedes OTT. Površina poprečnog presjeka vodotoka utvrđuje se snimanjem geometrije korita mjernim instrumentom RiverPro Teledyn) iz čega se u kombinaciji s mjerenim kotama vodnog lica utvrđuje površina vodotoka raspoloživa za protok. Stratifikacija temperaturnih svojstava vodnog stupca identificira se iz profila temperature koji se mjeri razvijenim i implementiranim temperaturnim lancem, sačinjenim od većeg broja temperaturnih senzora postavljenih u ekvidistantnim razmacima od po 20 cm od kote -1.50 m n.m. do -7.90 m n.m. Sva navedena mjerenja vrše se s vremenskim korakom od 15 min te su referirana u identičan vremenski koordinatni sustav.

Vrijednosti protoka slatke vode utvrđuju se posredno iz temperaturnih profila i mjerene brzine strujanja u površinskom sloju. Kako bi se provela validacija razvijenog koncepta, uzvodno od relevantnog profila, u zoni van uspora i u uvjetima izostajanja stratifikacije provode se hidrometrijska profiliranja ADCP-om na vodotoku i pritocima.

Rezultati

Prethodno razvijeni koncept implementira se u estuariju rijeke Neretve unutar granica Republike Hrvatske u trajanju od 20 dana. Unutar referentnog intervala mjerenja bilježi se realizacija protoka u intervalu -16 do 432 m³/s dok razina mora varira unutar 58 cm za ciklusa kvadrature i sizigija u režimu poludevnog tipa. Ovisno o realizaciji protoka i razine mora na mjernom profilu bilježe se lokalna prisustva i izostanak klina morske vode koji su izazvani navedenim vanjskim utjecajima i njihovim međusobnim odnosom. U uvjetima dominacije protoka, neovisno o ostvarenju razine mora, povlači se prema ušću i njegovo očitavanje na mjernom profilu izostaje. U uvjetima sušnog perioda klin je dubinski definiran dominantno razinom mora. U rasponu mjerenja dubina klina bilježi se u rasponu od -1.90 do -7.90 m n.m.

Vrijednosti protoka slatke vode u gornjem sloju vodnog stupca u odnosu na konvencionalno mjerene vrijednosti za trajanja malih voda manja su za 35-45 %. Razlog tome leži u činjenici kako postojeća mjerenja pretpostavljaju nizvodno usmjeren tok vode u cijelom vodnom stupcu što ne odgovara stvarnom stanju u uvjetima izražene uslojenosti uzrokovane pojavom klina morske vode na profilu.

U uvjetima malih voda provedena su profiliranja brzina s utvrđivanjem protoka uzvodno na vodotoku i pritocima u uvjetima reguliranog i lokaliziranog međudotoka. Provedenim mjerenjima utvrđeno ja kako determinirane vrijednosti protoka slatke vode na mjernom profilu Metković most odstupaju minimalno od mjerenjem utvrđenih vrijednosti s maksimalnom pogreškom od 5 % što se smatra prihvatljivim s obzirom kako su sva mjerenja provedena unutar intervala od 8 sati čime nije moguće apsolutno komparirati apsolutne vrijednosti mjerenog protoka.

Zaključak

U radu je prikazan i primijenjen novi pristup u postupku determinacije protoka slatke vode u uvjetima izražene uslojenosti vodnog stupca u zoni estuarija zasnovan na informaciji o temperaturnom profilu stupca vode. Ovaj pristup predstavlja financijski nezahtjevan, efektivan i točan protokol s kapacitetom primjene u različitim vrstama estuarija. Osim implementacije i obrade, rad nudi uvid u validaciju dobivenih rezultata čime se daje naglasak na pouzdanost u primjeni što može biti od koristi u postupku donošenja odluka u upravljanju vodnim resursima, upravljanju rizicima i prilagodbi klimatskim promjenama.

Literatura

- Gaiolini, M., Colombani, N., Mastrocicco, M., Postacchini, M., (2023) Seawater intrusion assessment along the Volturno River (Italy) via numerical modeling and spectral analysis. *Journal of Hydrology* 626, 130289. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130289>
- Geyer, W.R. and Ralston, D.K., (2011) The Dynamics of Strongly Stratified Estuaries, in: *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Elsevier, pp. 37–51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00206-0>
- Rummel, K., Strauß, T., Lauer, F., Gräwe, U., (2025) Real-Time Prediction of Salt Intrusion in Tidal Estuaries Using Long Short-Term Memory Networks. *Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation* 2, e2025JH000768. <https://doi.org/10.1029/2025JH000768>
- Savenije, H.H.G., (2005) *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52107-1.X5000-X>

UREĐENJE I STABILIZACIJA LIJEVE OBALE RIJEKE BOSUT U VINKOVcima OD RKM 92+253 DO RKM 92+953

ANTONIA MIRČETA¹, STJEPAN MATIĆ¹, DANIJELA JURIĆ KAĆUNIĆ¹, MLADEN CVETKOVIĆ¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska

Uvod

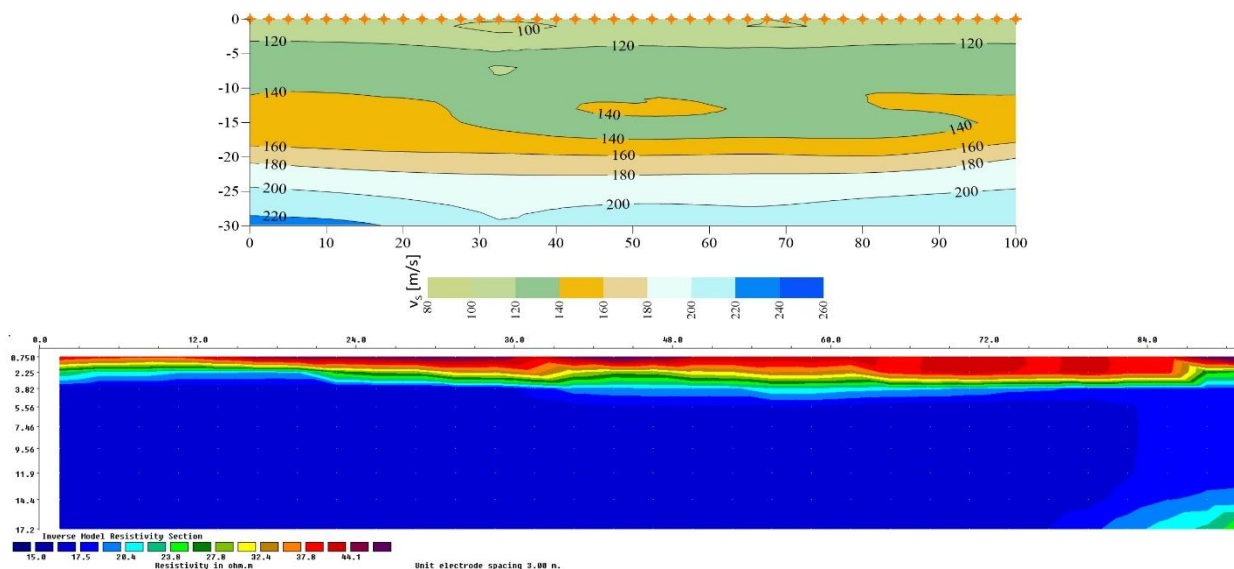
Regulacija i stabilizacija obala urbanih vodotoka zahtijeva pouzdanu geotehničku osnovu utemeljenu na detaljnom poznavanju inženjerskogeoloških i hidrogeoloških uvjeta. Posebnu složenost predstavljaju zahvati u aluvijalnim sredinama, kakve su prisutne uz rijeku Bosut u Vinkovci. U radu je prikazana metodologija geotehničkih istraživanja primijenjena pri uređenju lijeve obale rijeke Bosut na dionici od rkm 92+253 do rkm 92+953, s ciljem definiranja geotehničkog modela tla kao podloge za ocjenu mehaničke otpornosti i stabilnosti projektiranog rješenja obaloutvrde.

Metode

Istražni radovi provedeni su s ciljem definiranja debljine i prostornog rasprostiranja krovinskog glinenog sloja te identifikacije zona povećanog rizika od sloma tla na lijevoj obali rijeke Bosut u Vinkovcima (Slika 1). Istraživanja su provedena integracijom geotehničkih, geofizičkih i laboratorijskih metoda u skladu s normom HRN EN 1997-2:2024 Eurokod 7 - Geotehničko projektiranje - 2. dio: Svojstva temeljnog tla. Geotehnička istraživanja obuhvatila su osam istražnih bušotina dubine do 15 m s kontinuiranim jezgrovanjem, pri čemu su provedeni standardni penetracijski pokusi (SPT), ispitivanja ručnim penetrometrom i krilnom sondom te uzorkovanje tla za laboratorijska ispitivanja. Dodatno su izvedena tri statička penetracijska ispitivanja s mjerenjem pornog tlaka (CPTU) do dubine 20 m, na temelju kojih je izrađen detaljan geotehnički profil tla i procijenjen potencijal likvefakcije. Radi proširenja prostornog obuhvata istraživanja provedena su i geofizička ispitivanja, uključujući seizmičku refrakciju i multikanalnu analizu površinskih valova (MASW), kojima je određen profil brzina posmičnih valova i parametar $v_{s,30}$ za seizmičku klasifikaciju tla prema HRN EN 1998-1-1:2024 Eurokod 8. Također je primijenjena metoda geoelektrične tomografije (ERT) radi analize lateralnih i vertikalnih promjena litoloških jedinica do dubine oko 18 m. Ukupno je izvedeno po 600 m profila seizmičkim i ERT metodama (Slika 1).



Slika 1. Situacija provedenih istražnih radova na lijevoj obali rijeke Bosut u Vinkovcima.



Slika 2. MASW i ERT profil na lokaciji ERT-3/RF-3, poprečno na korito rijeke.

Rezultati

Sintezom terenskih i laboratorijskih podataka utvrđen je reprezentativni geotehnički profil tla duž promatrane dionice lijeve obale rijeke Bosut. Područje je pretežito građeno od glina niske plastičnosti (CL), koje se gotovo kontinuirano prostiru do dubine od približno 18 m (Slika 2), dok se u dubljim dijelovima lokalno pojavljuju i slojevi glina visoke plastičnosti (CH). Gline niske plastičnosti su uglavnom lako gnječivog do polučvrstog konzistentnog stanja, s manjim udjelom pijeska i šljunka, a vrijednosti SPT-a kreću se u rasponu 7–11, što ukazuje na srednje čvrsto koherentno tlo. Laboratorijska ispitivanja pokazala su mali rasap rezultata; srednje vrijednosti iznose: prirodna vlažnost 23,65 %, indeks plastičnosti 21,69, indeks konzistencije 0,78, kohezija 10,90 kPa, kut unutarnjeg trenja $24,22^\circ$ te modul stižljivosti pri 100 kPa opterećenja 4,42 MPa. Prema rezultatima MASW ispitivanja, brzine posmičnih valova $v_{s,30}$ po profilima kretale su se od 151 do 158 m/s, pri čemu su profil 11 i 12 pokazali 156 m/s, profil 2 158 m/s, profil 3 153 m/s, profil 4 152 m/s, a profil 5 151 m/s. Na temelju Aneksa B norme HRN EN 1998-1-1 (tablica B.3), tlo se klasificira u seizmičku kategoriju F, što odgovara dubokim nanosima pretežito aluvijalnog, mekanog tla.

Zaključak

Primijenjena metodologija geotehničkog istraživanja, temeljena na integraciji klasičnog istražnog bušenja s in situ ispitivanjima, geofizičkih metoda i laboratorijskih analiza, omogućila je pouzdanu karakterizaciju geotehničkih uvjeta aluvija na promatranoj dionici lijeve obale rijeke Bosut. Temeljem rezultata, definiran je cjelovit geotehnički model tla, koji je uzeo u obzir prostornu uslojenost tla i seizmičku kategorizaciju tla u skladu s zahtjevima HRN EN 1997-2 i HRN EN 1998-1-1. Tako utvrđeni geotehnički model predstavljao je pouzdanu podlogu za provedbu numeričkih analiza. Prikazani metodološki pristup pokazao se učinkovitim i primjenjivim u analizi i projektiranju stabilizacije obala urbanih riječnih koridora.

Literatura

- Centar Građevinskog Fakulteta d.o.o. (2026) Uređenje i stabilizacija obala rijeke Bosut u Vinkovcima, Geotehnički elaborat. Zagreb: CGF d.o.o.
- ORION PROJEKT d.o.o. (2019) Uređenje lijeve i desne obale rijeke Bosut u Vinkovcima od rkm 85+515 do rkm 96+760, Idejni projekt. Vinkovci: ORION PROJEKT d.o.o.
- ORION PROJEKT d.o.o. (2022) Elaborat povišenja berme lijeve obale rijeke Bosut u Vinkovcima od rkm 93+194 do 93+800, Elaborat održavanja. Vinkovci: ORION PROJEKT d.o.o.

REKONSTRUKCIJA LIJEVOG UNSKOG NASIPA U NASELJU UŠTICA

MARTINA PAVLOVIĆ¹, IVAN VUJIĆ¹, MARKO MANCE¹

¹ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Republika Hrvatska

Uvod

Lijevi unski nasip predstavlja važnu dionicu sustava obrane od poplava na području rijeke Une i Save te ima ključnu ulogu u zaštiti naselja Uštica i okolnih poljoprivrednih površina od štetnog djelovanja visokih voda rijeke Une. Postojeći nasip na promatranoj dionici, u duljini od 2,62 km (od stacionaže 0+700 do 3+320), ne zadovoljava važeće tehničke uvjete u pogledu širine i nadvišenja krune, što je osobito došlo do izražaja tijekom poplavnih događaja 2018. godine, kada je zabilježeno vrhunjenje vode do razine krune nasipa i potreba za privremenim mjerama zaštite izradom zečjih nasipa.

Osim nedostatne razine zaštite od poplava, dodatni problem predstavlja ograničena pristupačnost nasipu, budući da se promet vozila odvija isključivo po kruni nasipa, što uzrokuje njezina oštećenja te otežava redovno održavanje i nadzor. Posebna važnost zahvata proizlazi i iz činjenice da rijeka Una na ovom području čini državnu granicu Republike Hrvatske i Bosne i Hercegovine, zbog čega je nužno osigurati siguran i pristup vozilima granične policije.

Cilj ovog rada je prikaz idejnog rješenja rekonstrukcije lijevog unskog nasipa u naselju Uštica, s naglaskom na tehničke i geotehničke aspekte zahvata te doprinos projekta povećanju razine sigurnosti od poplava i poboljšanju funkcionalnosti sustava obrane.

Metode

Idejno rješenje rekonstrukcije nasipa izrađeno je na temelju dostupnih prostornih planova, geodetskih podloga i provedenih geotehničkih istraživanja. Za potrebe projekta izrađen je detaljan geodetski snimak terena u sustavu HTRS96, koji je poslužio kao osnova za izradu digitalnog modela terena i analizu postojećeg stanja nasipa.

Geotehničke podloge obuhvaćale su terenske istražne radove s iskopima do dubine od 8,0 m, uz uzorkovanje tla i provedbu preliminarnih laboratorijskih ispitivanja, uključujući određivanje granulometrijskog sastava i Atterbergovih granica. Dobiveni rezultati analizirani su u skladu s Općim tehničkim uvjetima za radove u vodnom gospodarstvu (OTU), s ciljem ocjene pogodnosti lokalnih materijala za ugradnju u tijelo nasipa.

Na temelju prikupljenih podataka definirano je tehničko rješenje koje uključuje nadvišenje krune i proširenje postojećeg nasipa, izvedbu armiranobetonskog obrambenog zida na najkritičnijem dijelu dionice te formiranje servisnog puta na kruni nasipa. Posebna pažnja posvećena je uklapanju novoprojektiranih elemenata u postojeću trasu nasipa i povezivanju s infrastrukturnim zahvatima u okolnom području.

Rezultati

Idejnim rješenjem predviđena je rekonstrukcija lijevog unskog nasipa duž cijele promatrane dionice od 2,62 km, pri čemu se projektirana trasa u potpunosti poklapa s trasom postojećeg nasipa. Tehničko rješenje definirano je kroz pet karakterističnih poprečnih profila, koji obuhvaćaju sve tipične situacije zatečene na predmetnoj dionici, te omogućuju prilagodbu projektiranih elemenata lokalnim prostornim i geotehničkim uvjetima.

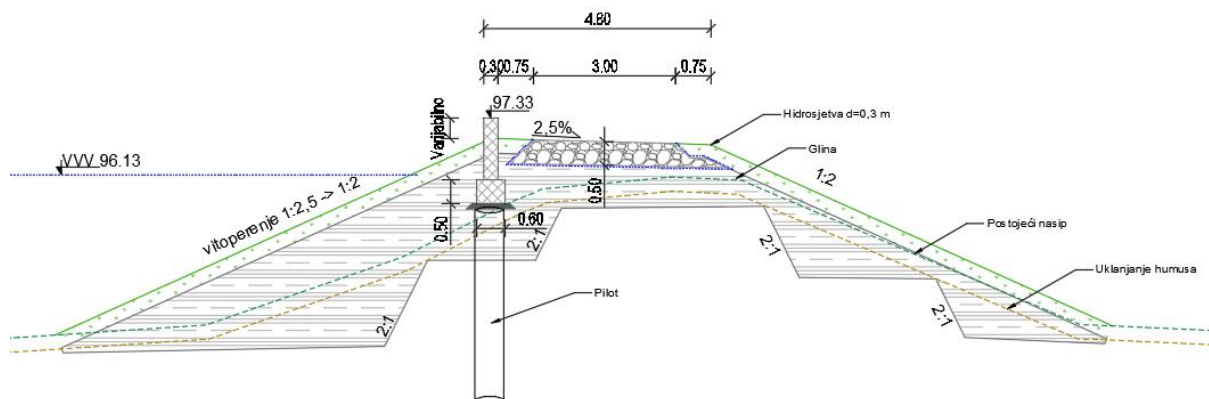
Karakteristični profil 1 smješten je na početnom dijelu dionice, te je predviđena rekonstrukcija postojećeg nasipa u duljini od približno 130 m, koja se provodi kombinacijom rekonstrukcije pokosa i nadvišenja postojećeg nasipa. Rekonstrukcija se izvodi zasijecanjem vodne strane pokosa te bušenjem pilota, na koje se postavlja armiranobetonski zid, čime se osigurava povećanje razine zaštite na ovom dijelu dionice. U sklopu zahvata predviđena je i izvedba servisnog puta na kruni nasipa.

U presjeku KP2 izvodi se vitoperenje nagiba pokosa vodne strane uz nadvišenje nivelete krune nasipa, pri čemu vitoperenje poprečnog profila predstavlja prijelaznu dionicu između rješenja primijenjenog u presjeku KP1 i rješenja u presjeku KP3. Zahvat se provodi zasijecanjem pokosa stepeničastim iskopom, s ciljem osiguranja stabilnosti nasipa i kvalitetnog povezivanja novog i postojećeg materijala.

Za profile KP3 i KP4 predviđeno je zasijecanje krune postojećeg nasipa, te rekonstrukcija koja se također izvodi stepeničastim iskopom. Ovakav način izvedbe omogućuje stabilno formiranje nadvišenja i osigurava kontinuitet konstrukcije nasipa na ovom dijelu dionice.

Karakteristični profil 5 odnosi se na završni dio dionice, izvodi se zasijecanjem postojećeg nasipa. Na zaobalnoj nožici nasipa smješten je postojeći servisni put širine 4,00 m, u svrhu obrane od štetnog djelovanja vode izvodi se armirano betonski zid, temelj zida postavlja se podložni beton, a ispod temelja zida buše se piloti.

Analiza projektiranih presjeka pokazala je da predložena rješenja osiguravaju potrebnu razinu zaštite od poplava, poboljšavaju stabilnost i uporabljivost nasipa te stvaraju tehničku osnovu za daljnje faze projektiranja i realizacije zahvata.



Slika 1. Karakteristični profil 1

Zaključak

Prikazano idejno rješenje rekonstrukcije lijevog unskog nasipa u naselju Uštica predstavlja cjelovitu mjeru unapređenja sustava obrane od poplava na ovom području. Predloženim tehničkim rješenjima osigurava se povećanje razine zaštite od štetnog djelovanja voda, poboljšava se stabilnost i trajnost nasipa te se omogućuje funkcionalan i siguran pristup kruni nasipa.

Provedena analiza ukazuje na važnost kombiniranja hidrotehničkih i geotehničkih aspekata pri planiranju ovakvih zahvata, osobito u područjima složenih geoloških uvjeta i povećanog poplavnog rizika. Idejni projekt čini pouzdanu osnovu za izradu glavnog i izvedbenog projekta te za provedbu daljnjih istražnih i projektnih aktivnosti s ciljem dugoročne zaštite prostora i stanovništva.

Literatura

Hrvatske vode (2024) *Projektni zadatak: Rekonstrukcija lijevog unskog nasipa od 0+700 do 3+320 (2.620 m) u naselju Uštica*. Slavonski Brod, Hrvatska

IDT d.o.o. (2023) *Geotehnički izvještaj: Rekonstrukcija lijevog unskog nasipa od 0+700 do 3+320 (2.620 m) u naselju Uštica* (oznaka GI-914/23). Osijek, Hrvatska

Lineal Adria Group d.o.o. (2024) *Rekonstrukcija lijevog unskog nasipa od 0+700 do 3+320 (2.620 m) u naselju Uštica – Idejni projekt (LAG021-IDP)*. Zagreb, Hrvatska

SUSTAV RANOG UPOZORAVANJA TEMELJEN NA UMJETNOJ INTELIGENCIJI ZA SIGURNU, OTPORNU I ODRŽIVU VODOOPSKRBU (AQUAGUARDIAN)

DAJANA KUČIĆ GRGIĆ¹, MARINKO MARKIĆ¹, MATIJA CVETNIĆ¹, PETAR KASSAL¹, ŠIME UKIĆ¹, DRAŽEN VOUK², MARIN VUKOVIĆ³, MARIO KUŠEK³, ORNELLA HOST⁴, NINA ŠIMUNIĆ BRIŠKI⁵, GORDAN LAUC⁵, MAGDALENA UJEVIĆ BOŠNJAK⁶, TOMISLAV BOLANČA¹

¹ Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Trg Marka Marulića 19, 10000 Zagreb, Hrvatska

² Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, 10000 Zagreb, Hrvatska

³ Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Unska ul. 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

⁴ Endress+Hauser d.o.o., Karlovačka cesta 95, 10020 Zagreb, Hrvatska

⁵ Genos d.o.o., Borongajska cesta 83H, 10000 Zagreb, Hrvatska

⁶ Hrvatski zavod za javno zdravstvo, Rockefellerova 7, 10000 Zagreb, Hrvatska

Uvod

Osiguravanje sigurnosti i otpornosti sustava opskrbe pitkom vodom postaje sve važnije u uvjetima klimatskih promjena, starenja infrastrukture i rastućih okolišnih rizika. Projekt AquaGuardian razvija integrirani sustav ranog upozoravanja temeljen na primjeni naprednih alata matematičkog modeliranja baziranih na umjetnoj inteligenciji za kontinuirano praćenje kvalitete vode i proaktivno upravljanje rizicima u vodoopskrbnim sustavima. Sustav objedinjuje napredne senzorske tehnologije, laboratorijsku analitiku i digitalne alate za obradu podataka kako bi se omogućilo pravovremeno prepoznavanje promjena u kvaliteti vode te unaprijedilo upravljanje distribucijskim mrežama.

Istraživačke aktivnosti provodit će se na području Sisačkog vodovoda, koji koristi površinski izvor vode u hidrološki složenom području ušća rijeke Kupe. Kvaliteta sirove vode pokazuje značajne sezonske oscilacije povezane s hidrodinamičkim i hidroklimatskim promjenama, uključujući povećanu mutnoću tijekom promjena vodostaja te povremene poraste organskog i anorganskog opterećenja tipične za površinske izvore. Dodatno, širok godišnji temperaturni raspon ovog riječnog sustava utječe na proces obrade vode, ali može značajno utjecati i na kakvoću vode u vodoopskrbnom sustavu. Regija Sisačko-moslavačke županije dodatno je opterećena infrastrukturnim izazovima uzrokovanim povijesnom industrijskom aktivnošću, ratnim razaranja 1990-ih te potresom u Petrinji 2020. godine, što se odražava na stanje cjevovoda, spremnika i ostale infrastrukture. Posljedice uključuju gubitke vode, nestabilnosti tlaka i otežan pristup pojedinim dijelovima mreže, što ograničava učinkovitost konvencionalnih metoda inspekcije.

U takvom okruženju projekt AquaGuardian omogućit će procjenu učinkovitosti naprednih sustava praćenja i upravljanja u uvjetima promjenjive kvalitete sirove vode i mehaničkog naprezanja cjevovoda. Pilot-aktivnosti obuhvatit će karakterizaciju hidrokemijske varijabilnosti riječnog izvora, analizu vremena detekcije i reakcije na incidente te procjenu mogućnosti smanjenja gubitaka vode primjenom prediktivnog održavanja. Također će se demonstrirati brza detekcija curenja i strukturnih anomalija primjenom bespilotnih letjelica opremljenih RGB i termalnim kamerama.

U okviru pilot-istraživanja planirano je uspostavljanje mreže od deset mjernih lokacija unutar vodoopskrbnog sustava. Tri lokacije bit će opremljene naprednim analitičkim instrumentima za kontinuirani online nadzor, uključujući analizator ukupnog organskog ugljika (TOC), plinsku kromatografiju s masenom spektrometrijom (GC-MS) te ionsku kromatografiju (IC). Preostalih sedam lokacija bit će opremljeno senzorima za kontinuirano mjerenje osnovnih fizikalno-kemijskih parametara, uključujući pH, električnu vodljivost, mutnoću i protok vode. Uz kontinuirana mjerenja, dva puta tjedno provodit će se uzorkovanje vode na svim lokacijama, pri čemu će se na terenu određivati i koncentracija rezidualnog klora. Laboratorijske analize uključivat će određivanje ključnih mikrobioloških pokazatelja (ukupni broj bakterija, ukupni koliformi, *Escherichia coli*, fekalni streptokoki, *Clostridium perfringens*, *Legionella* i somatski kolifagi) te kemijskih parametara poput ukupnog organskog ugljika (TOC) i anorganskih iona metodom ionske kromatografije. Dodatno će se GC-MS/MS analizom određivati nusprodukti dezinfekcije, uključujući trihalometane, klorite, klorate i bromate. Dobiveni rezultati koristit će se za validaciju terenskih mjerenja i procjenu potencijalnog utjecaja dezinfekcijskih sredstava na zdravlje ljudi. Paralelno će se provoditi laboratorijska istraživanja usmjerena na procjenu dugoročnih zdravstvenih učinaka promjena u kvaliteti vode primjenom testiranja na staničnim linijama ljudske jetre uz epigenetsko i glikansko profiliranje biomarkera.

Projekt također uključuje razvoj i testiranje naprednih elektrokemijskih senzora i biosenzora za detekciju širokog spektra kemijskih i bioloških onečišćivala, uključujući potencijalne slučajeve namjernog onečišćenja. Integracija ovih senzora s analitikom temeljenom na umjetnoj inteligenciji omogućit će rano upozoravanje i brzu reakciju na promjene u kvaliteti vode.

Podaci prikupljeni iz senzorskih sustava, laboratorijskih analiza i inspekcija dronovima integrirat će se u digitalni blizanac vodoopskrbnog sustava te u napredni sustav za potporu odlučivanju (DSS) koji koristi umjetnu inteligenciju i hidrauličko modeliranje. Sustav će omogućiti analizu podataka u stvarnom vremenu te simulaciju različitih scenarija, uključujući onečišćenje, puknuće cjevovoda ili prirodne katastrofe, čime se omogućuje proaktivno upravljanje rizicima, optimizacija održavanja i smanjenje gubitaka vode.

Projekt će uspostaviti i centraliziranu digitalnu platformu koja objedinjuje podatke iz senzora, dronova, laboratorijskih analiza i modelskih simulacija. Platforma će pružati upozorenja, karte rizika i nadzorne ploče za operatore vodoopskrbnih sustava te, prema potrebi, informirati javnost o kvaliteti vode u stvarnom vremenu. Posebna pozornost posvećena je kibernetičkoj sigurnosti sustava, uključujući zaštitu modula strojnog učenja od manipulacije podacima i modelima, primjenu naprednih metoda enkripcije te redovite sigurnosne provjere u skladu s europskim regulatornim okvirom, uključujući direktivu NIS2.

Integracijom kontinuiranog senzorskog nadzora, laboratorijske validacije i napredne analitike podataka projekt AquaGuardian omogućit će bolje razumijevanje dinamike kvalitete vode u distribucijskim mrežama te razvoj učinkovitih sustava ranog upozoravanja za upravljanje rizicima u vodoopskrbi. Rezultati pilot-istraživanja na području Sisačkog vodovoda pridonijet će razvoju skalabilnog modela primjene naprednih digitalnih tehnologija u sustavima opskrbe pitkom vodom u Hrvatskoj i Europskoj uniji.



Slika 1. AquaGuardian projekt



Projekt *A comprehensive AI powered early warning system for digital management of water supply security, resilience, and sustainability* (AquaGuardian) (DIGIT. 2. 1. 02. 001) se financira u sklopu zajma Svjetske banke br. 9558-HR za projekt "Digitalne, inovativne i zelene tehnologije" (DIGIT projekt).

HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION AND GROUNDWATER MONITORING WITHIN THE RETFOR PROJECT: CASE STUDY OF THE SPAČVA-BOSUT BASIN

IVAN KOSOVIC¹, MARCO POLA¹, JOSIP TERZIĆ¹, STAŠA BOROVIĆ¹, IVAN TOT², KOSTA URUMOVIĆ¹

¹ Hrvatski geološki institut, Sachsova 2, Zagreb, Croatia

² Hrvatske Vode, Ulica grada Vukovara 220, Zagreb, Croatia

Introduction

Promoting climate change adaptation through ecosystem-based approaches is essential for safeguarding biodiversity and ensuring the long-term stability of natural habitats. As part of the RETFOR project, whose specific goal is to determine the state of the ecosystem of the Spačva-Bosut basin and plan measures for enhanced climate resilience, geophysical and hydrogeological investigations were conducted to evaluate groundwater dynamics. A detailed reconstruction of the subsurface geological setting and the quantification of the hydrogeological parameters are fundamental to estimate the groundwater potential, as they permit to identify the composition and geometry of hydrogeological units revealing preferential pathways for fluid circulation. To ensure an accurate reconstruction, Electrical Resistivity Tomography (ERT) was utilized to characterize local lithology and optimize the placement of two piezometers. Geophysical data were integrated with stratigraphic well logs from the study area and its vicinity to enable a 3D reconstruction of the geological setting. These findings establish the technical framework for implementing targeted measures to revitalize the basin's ecosystem and provide a basis for sustainable irrigation strategies under increasing climate uncertainty.

Methods

This research focuses on the modelling and reconstruction of the geological and lithological settings in a part of the Spačva-Bosut basin using surface geophysical techniques (Chandra, 2015). ERT was employed to delineate the geometry of resistivity layers in the subsurface. Thirteen profiles were acquired in July 2025 using an electrical imaging system. Field apparent resistivity data were inverted into 2D resistivity subsurface models reconstructing the geometries of lithologies and structures in the subsurface (Loke et al., 2013). Field measurements were conducted using the POLARES 2.0 electrical imaging system (PASI srl). Due to the complexity of the geological structures in the subsurface, a Wenner–Schlumberger configuration was used since it resolves horizontal and vertical structures and has a greater depth of investigation (Hermawan & Putra, 2016; Kosović et al., 2023). Initially, profiles were measured at a frequency of 7.15 Hz and a maximum phase of 20° between the voltage signal and the current signal. The frequency was progressively lowered until the number of incorrect measurements was below 10% of the total. The Res2DInv 4.9.3 software was used to invert the field apparent resistivity data into 2D resistivity subsurface models using a Gauss–Newton method and a finite element solver (Loke & Barker, 1996). For the collected dataset, the method based on L2 norm was used because it gives optimal results where the subsurface resistivity changes in a gradual manner.

Results

Figure 1 presents the SP3 ERT profile, selected as the most representative illustration of the study area's subsurface architecture. The interpreted electrical resistivity sections reveal a range of values between 5 and 120 Ωm , allowing for the differentiation of two primary lithostratigraphic units (Figure 1): (1) Upper layer (Cover): it is present across all profiles as a continuous unit with an average thickness of 10 m (locally extending to 15 m) and is characterized by low resistivity values (5–30 Ωm); and (2) second layer (aquifer layer): it exhibits discontinuous geometry and variable thickness (10–30 m) with resistivity values from 40 to 80 Ωm and localized anomalies falling below 40 Ωm or exceeding 100 Ωm . The first layer is interpreted as alluvial deposits predominantly composed of silts and clayey silts, with localized occurrences of unconsolidated fine-grained sands, while the second is interpreted as fine-grained sands with silt and rare lenses of coarse sand and gravel. The observed resistivity fluctuations reflect the characteristic lateral heterogeneity of fluvial-sedimentary systems: values between 30–40 Ωm indicate a higher silt/clay content, while peaks above 100 Ωm suggest cleaner, coarser-grained deposits. The overall low resistivity signature of this second unit is further influenced by groundwater saturation, confirming its function as the first aquifer layer within the basin.

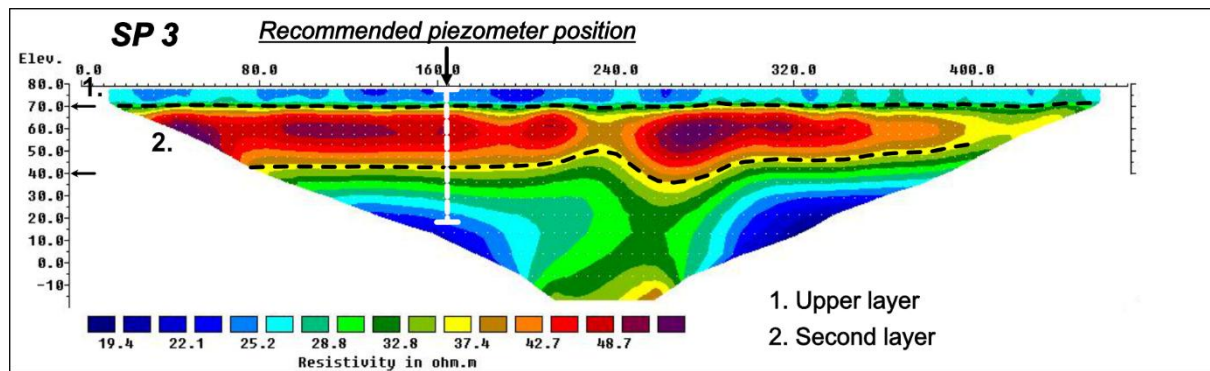


Figure 1. Profile SP3 – inverse 2D resistivity model of the subsurface with an electrode spacing of 10 m. This profile has been selected as the most representative one, as it best reflects the general structure of the study area.

Conclusion

This research focused on the reconstruction of the geological and hydrogeological settings of the Spačva-Bosut basin area using an integrated geophysical approach. By combining high-resolution geophysical interpretations with stratigraphic logs, we precisely mapped the spatial distribution of lithological units, which proved instrumental in optimizing the placement of the monitoring piezometer network. The findings underscore the synergy between surface geophysics and hydrogeology as a robust methodology for characterizing aquifer systems. Ultimately, this detailed subsurface reconstruction provides the necessary technical foundation for sustainable groundwater management, directly supporting efforts to enhance the basin's resilience to climate change and ensuring the long-term protection of the Spačva Forest ecosystem.

Acknowledgments

This research was funded by the RETFOR project: <https://www.voda.hr/hr/projekt/retfor>

References

- Chandra, P.C. *Groundwater Geophysics in Hard Rock*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015; ISBN 9780429062605.
- Hermawan, O.R.; Eka Putra, D.P. (2016) 'The Effectiveness of Wenner-Schlumberger and Dipole-Dipole Array of 2D Geoelectrical Survey to Detect The Occurring of Groundwater in the Gunung Kidul Karst Aquifer System, Yogyakarta, Indonesia'. *J. Appl. Geol.* 1, pp. 71.
- Kosović, I.; Briški, M.; Pavić, M.; Padovan, B.; Pavičić, I.; Matoš, B.; Pola, M.; Borović, S. (2023) 'Reconstruction of Fault Architecture in the Natural Thermal Spring Area of Daruvar Hydrothermal System Using Surface Geophysical Investigations (Croatia)'. *Sustainability*. 15; 12134, pp. 22.
- Loke, M.H.; Chambers, J.E.; Rucker, D.F.; Kuras, O.; Wilkinson, P.B. (2013) 'Recent Developments in the Direct-Current Geoelectrical Imaging Method'. *J. Appl. Geophys.* 95, pp. 135–156.
- Loke, M.H.; Barker, R.D. (1996) 'Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi-Newton Method'. *Geophys. Prospect.* 44, pp. 131–152.

MATEMATIČKI MODELI KAO NEIZOSTAVAN ALAT PRI PROJEKTIRANJU SUSTAVA ODVODNJE

DRAŽEN VOUK ¹, DOMAGOJ NAKIĆ ¹, MATIJA KIRHMAJER ¹, JOSIP MARIĆ ¹, HANA POSAVČIĆ ¹

¹ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Hrvatska

Uvod

Sve izraženiji utjecaji klimatskih promjena u urbanim sredinama očituju se kroz povećanu učestalost i intenzitet oborinskih događaja, što dovodi do značajnog porasta rizika od urbanih poplava. Postojeći sustavi odvodnje, osobito mješoviti, u velikom broju slučajeva projektirani su prema hidrauličkim i klimatskim pretpostavkama koje više ne odražavaju stvarne uvjete. Posljedično, dolazi do njihove nedostatne funkcionalnosti u uvjetima vršnih opterećenja.

U takvom kontekstu, matematičko modeliranje predstavlja ključan alat za analizu, projektiranje i optimizaciju sustava odvodnje. Njegova primjena omogućuje simulaciju složenih hidrauličkih procesa, procjenu ponašanja sustava u ekstremnim uvjetima te donošenje utemeljenih odluka pri planiranju novih ili rekonstrukciji postojećih sustava. Poseban naglasak stavlja se na primjenu modela pri projektiranju novih ili unaprjeđenju postojećih mješovitih sustava odvodnje, gdje interakcija oborinskih i otpadnih voda dodatno povećava složenost problema. U radu će se prikazati rezultati na konkretnom primjeru slivnog područja dijela grada Zagreba koji obuhvaća potoke Kunišćak, Jelenovac i Kraljevec.

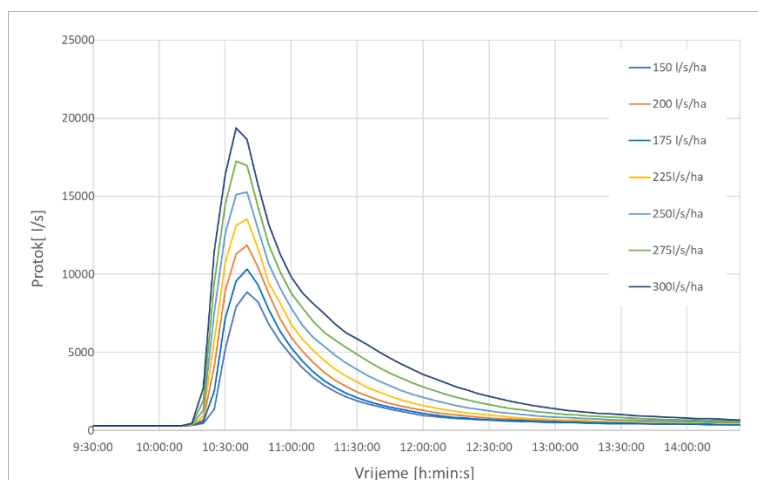
Metode

U radu je korišten matematički model za hidrauličku analizu sustava odvodnje, kojim su simulirani procesi transformacije oborine u otjecanje te tečenja unutar kanalske mreže sustava odvodnje. Model obuhvaća glavne elemente sustava: slivna područja, cjevovode, čvorove, kišne preljeve i retencijske bazene. Analize su provedene za različite scenarije oborinskih događaja, s intenzitetima 150, 175, 200, 225, 250, 275 i 300 l/s/ha, čime su obuhvaćeni ekstremni uvjeti koji se očekuju u kontekstu klimatskih promjena. Modeliranje uključuje: definiranje karakteristika slivnih površina (površine, širine i nagiba sliva, udjela učvršćenih površina, infiltracije u tlo), unos hidrauličkih parametara postojećeg sustava odvodnje, simulaciju dinamičkog toka kroz sustav, analizu rada sustava u postojećem stanju, evaluaciju scenarija s implementiranim mjerama unaprjeđenja. Posebna pažnja posvećena je usporedbi rezultata prije i nakon primjene konkretnih mjera unaprjeđenja, s ciljem kvantifikacije njihovog utjecaja na smanjenje vršnih protoka, opterećenja sustava i plavljenja terena.

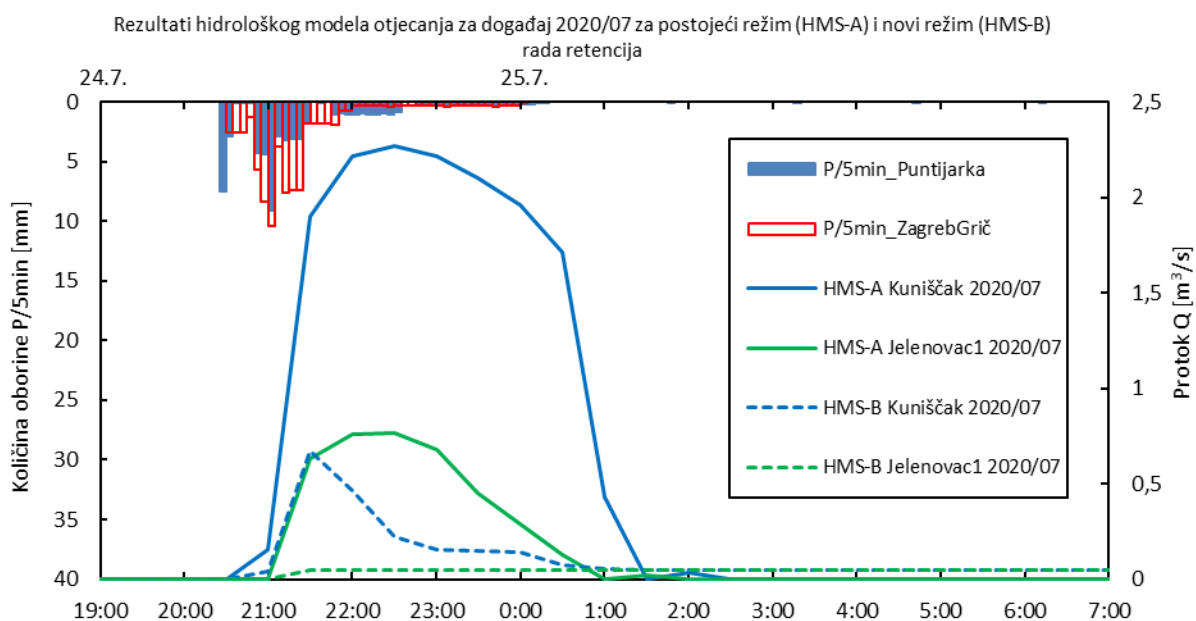
Rezultati

Analiza je provedena na dijelu sustava odvodnje grada Zagreb koji obuhvaća slivna područja kolektora potoka Medvednice: Kunišćak, Jelenovac i Kraljevec. Riječ je o izrazito urbaniziranom području s velikim udjelom nepropusnih površina, što rezultira brzim formiranjem površinskog otjecanja tijekom intenzivnih oborina. Međutim, spoj navedena tri potoka Medvednice u sustav javne odvodnje u značajnoj mjeri pridonosi njegovom hidrauličkom opterećenju (Slika 1) i rezultat je određenih neželjenih pojava poput značajnog izdizanja tlačne linije i plavljenja terena, a što dovodi do ugroze ljudskog zdravlja i imovine. Rezultati simulacija u uvjetima postojeće izgrađenosti pokazali su da pri oborinama intenziteta od 150 l/s/ha dolazi do značajnog opterećenja sustava, uz pojavu lokalnih uspora i povremenog izlivanja na kritičnim dionicama. Pri intenzitetima većim od 200 l/s/ha sustav u dijelu mreže prelazi svoje hidrauličke kapacitete, što rezultira plavljenjem terena, a pri oborinama većim od 250 l/s/ha sustav u značajnom dijelu pokazuje iste probleme.

Uvođenjem mjera unaprjeđenja sustava, prvenstveno boljom regulacijom dotoka iz ispusta podsljemenskih retencija, izgradnjom kišnih retencija i/ili povećanjem profila kanala, postižu se značajni pozitivni učinci (Slika 2).



Slika 1. Mješoviti dotok otpadnih voda u glavni kanal koji povezuje sva slivna područja potoka Kunišćak, Jelenovac i Kraljevec



Slika 2. Hidrografi otjecanja za kišni događaj 07/2020 pri postojećem i predviđenom režimu otjecanja (potoci Kunišćak i Jelenovac) – crtkane linije predstavljaju otjecanja pri učinkovitijoj regulaciji dotoka iz ispusta retencija

Zaključak

Dobiveni rezultati jasno ukazuju na ključnu ulogu matematičkih modela u suvremenom projektiranju i upravljanju sustavima odvodnje. Njihova primjena omogućuje detaljno razumijevanje ponašanja sustava u različitim uvjetima opterećenja te pruža pouzdanu osnovu za donošenje tehničkih odluka.

U kontekstu klimatskih promjena i sve učestalijih ekstremnih oborina, modeliranje postaje neizostavan alat za smanjenje rizika od urbanih poplava. Integracija retencijskih objekata i drugih mjera unaprjeđenja sustava pokazala se kao učinkovito rješenje za povećanje otpornosti postojećih mješovitih sustava.

Sustavan pristup koji uključuje analizu, simulaciju i optimizaciju putem matematičkih modela predstavlja temelj za dugoročno održivo upravljanje urbanim vodnim sustavima.

Literatura

- Butler, D., Davies, J. W. (2017) *Urban Drainage*, CRC Press (doi: <https://doi.org/10.1201/9781315272535>).
 Rossman, L. A. (2015) *Storm Water Management Model (SWMM) User's Manual*, EPA.

VAKUUMSKA KANALIZACIJA

IDEALNO REŠENJE ODVODNJE OTPADNIH VODA ZA MALA NASELJA I TURISTIČKA SREDIŠTA

SRĐAN DRAGANOVIĆ
Roediger Vacuum GmbH
SR Njemačka

Uvod

Vakuumski kanalizacijski sustav je vrhunska tehnologija koja u određenim okolnostima nudi najbolje rešenje za prikupljanje otpadnih voda u naseljima.

Metode

Što je vakuumska kanalizacija?

Sustav odvodnje otpadnih voda za naselja niske gustoće stanovništva, alternativa gravitacijskoj kanalizaciji u projektima gde gravitacijska kanalizacija sreće poteškoće sa tlom (nedostatak prirodnog nagiba, visoka podzemna voda, stenovito tlo, turističke fluktuacije, itd)

Kako funkcionira?

Skupljanje otpadne vode iz kuća, na temelju vakuuma, transport mješavine vode i zraka kroz zatvoreni cijevni sistem do centralnog mesta (vakuumske stanice). Razdvajanje vode i zraka, daljni transport vode tlačnim pumpama do npr. prečišćача.

Osnovne vakuuma

Što je vakuum, podpritisak (negativni pritisak), relativni pritisak, absolutni pritisak, radni podpritisak

Glavni dijelovi vakuumskog sustava

Vakuumsko sabirno okno-prijelaz iz kuće (gravitacije) u vakuumski sustav

Vakuumska mreža-transport od pojedinačnih kuća do vakuumske stanice

Vakuumska stanica-centralno mjesto gde se sakuplja cijelokupna otpadna voda i odakle se dalje tlačnim cijevovodom transportuje do npr. postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda.

Norme u vezi sa vakuumskom kanalizacijom

EN 186932-3, ATW-DVWK-A 116

Zašto koristiti vakuumsku kanalizaciju?

Prednosti vakuumske kanalizacije nad gravitacionom kanalizacijom



Slika 1. Durrat al Bahrain, Bahrain

Rezultati

Reference (realizovani projekti)

Neki od primjera već izgrađenih vakuumskih sustava i njihove osobnosti

Zaključak

Dugogodišnja, pouzdana tehnologija koja za određene projekte nudi optimalno rešenje.

Literatura:

Roediger Vacuum GmbH
Company knowledge and experience

Norme:

DIN EN 16932-3 (2018)
Drain and sewer systems outside buildings
Part 3: Vacuum systems

ATV-DVWK-A 116 (2004)
Part 1: Vacuum Drainage outside of buildings