

TEMELJENJE PREGRADE NA RIJECI NERETVI KAO ETAPE PROVEDBE PROJEKTA ZAŠTITE OD ZASLANJIVANJA TALA I VODA PODRUČJA DONJE NERETVE

GORAN GRGET¹, MARKO KAIĆ¹, IVAN MIHALJEVIĆ¹

¹ Geokon-Zagreb d.d., Hrvatska

Sažetak

Projekt mobilne pregrade na rijeci Neretvi s brodskom prevodnicom i ribljom stazom predstavlja prvu etapu sustava zaštite od zaslanjivanja tala i voda na području donje Neretve. Cilj prve etape projekta je sprječavanje prodora slanog klina uzvodno od planirane pregrade, čime se u razdobljima niskih voda osiguravaju povoljniji uvjeti u pogledu kakvoće površinskih i podzemnih voda te stvaraju preduvjeti za korištenje nezaslanjene vode u svrhu navodnjavanja. Rad je usmjeren na prikaz geotehničkih uvjeta lokacije, koncept temeljenja te tehnologiju izvođenja nosive konstrukcije mobilne pregrade i pratećih objekata. Zbog velikih protoka, ograničenog prostora i nepovoljnih hidrogeoloških uvjeta, izvedba građevine planirana je u mokrom postupku, bez privremenog izmještanja korita rijeke ili izvođenja klasične građevne jame. Temeljenje svih objekata predviđeno je na armiranobetonskim pilotima izvedenim s plovnih objekata, uz primjenu podvodnog betoniranja kontraktor postupkom. U radu su analizirani razlozi odabira takvog rješenja, njegova tehnička opravdanost te ključni izazovi povezani s izvođenjem geotehnički zahtjevnih radova u aktivnom riječnom koritu.

Ključne riječi

mobilna pregrada, geotehnički uvjeti, pilotno temeljenje, podvodno betoniranje, zaslanjivanje tla, rijeka Neretva

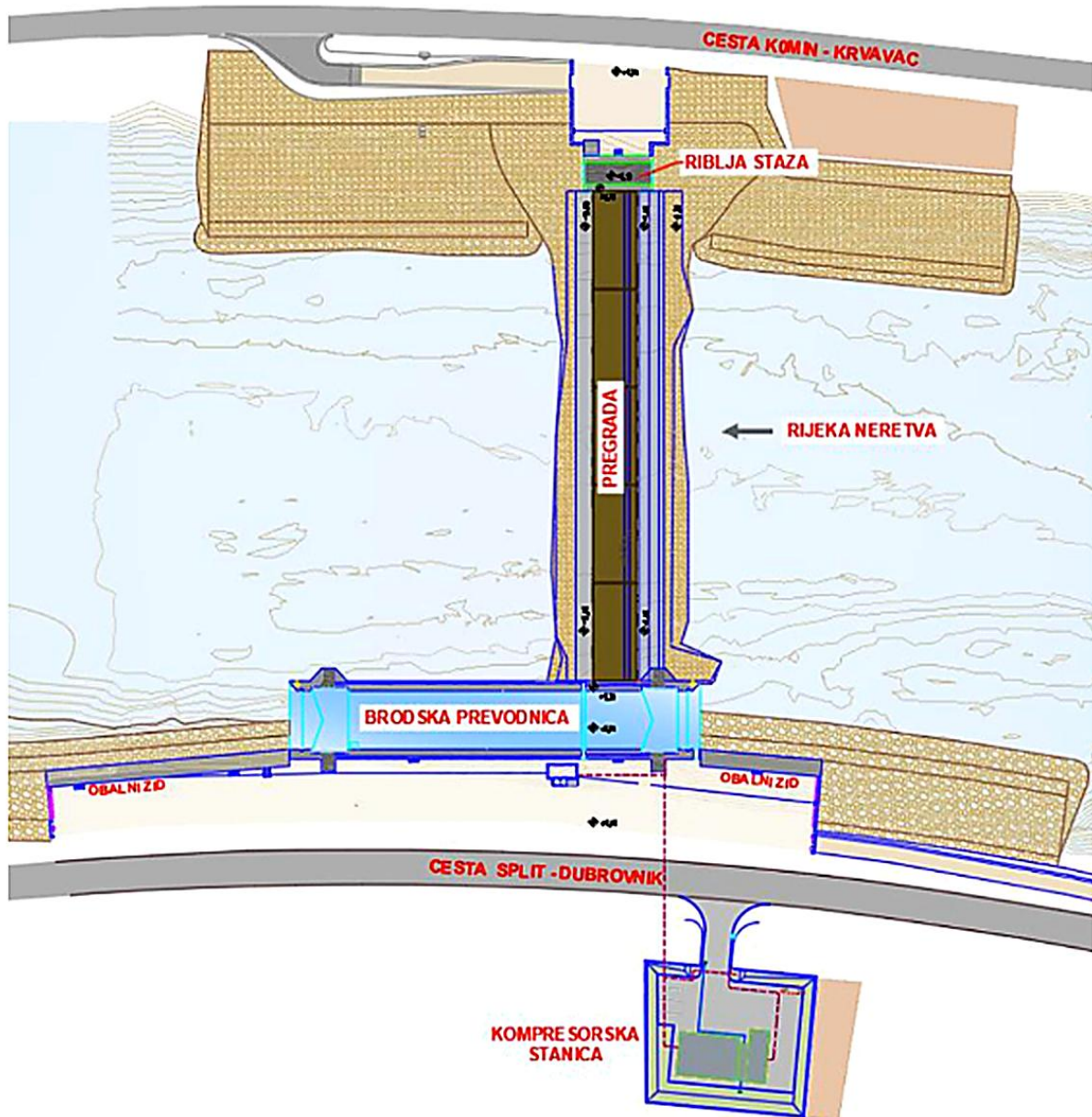
1 Uvod

Zaslanjivanje tala i voda predstavlja jedan od ključnih problema održivog upravljanja vodnim i poljoprivrednim resursima u dolini donje Neretve, osobito u deltama i estuarijima koji su izloženi dugotrajnom utjecaju morskih mijena i klimatskih promjena (Mukhopadhyay, 2021). Područje ušća rijeke Neretve izloženo je dugotrajnom utjecaju morskih mijena, prodoru slanog klina uzvodno koritom rijeke te sekundarnom zaslanjivanju tala uzrokovanom navodnjavanjem vodom neodgovarajuće kakvoće. Klimatske promjene, smanjenje dotoka svježe vode iz uzvodnog dijela sliva te izgradnja novih hidroelektrana u gornjem slivu i porast razine mora dodatno pogoršavaju navedene procese.

Kao odgovor na izražene probleme zaslanjivanja, razvijen je Projekt zaštite od zaslanjivanja tala i voda na području donje Neretve, koji je koncipiran kroz dvije etape. Prva etapa obuhvaća izgradnju mobilne pregrade na rijeci Neretvi s pripadajućom brodskom prevodnicom i ribljom stazom (Slika 1.), dok druga etapa uključuje sustav zahvata i distribucije nezaslanjene vode na poljoprivredne površine. Mobilna pregrada projektirana je kao potopljena armirano betonska konstrukcija s čeličnim mobilnim klapnama, aktivna u razdoblju malih voda, kada je utjecaj zaslanjivanja najizraženiji.

Izgradnja pregrade na Neretvi s prosječnim protocima reda veličine nekoliko stotina kubičnih metara u sekundi, uz povremene pojave ekstremnih voda, predstavlja izrazito složen inženjerski zahvat. Posebnu složenost čine geotehnički uvjeti lokacije, prisutnost debelih kvartarnih naslaga, propusnih slojeva te potreba izvođenja radova u aktivnom riječnom koritu bez mogućnosti formiranja klasične građevne jame.

Cilj ovog rada je prikazati geotehničke karakteristike lokacije, koncept temeljenja i tehnologiju izvođenja nosive konstrukcije mobilne pregrade i pratećih objekata, s naglaskom na razloge odabira temeljenja na pilotima i izvođenja u mokrom postupku. Posebna pažnja posvećena je analizi ograničenja koja su utjecala na projektna rješenja te iskustvima koja mogu biti relevantna za slične hidrotehničke i geotehničke zahvate.



Slika 1. Tlocrt pregrade na Neretvi

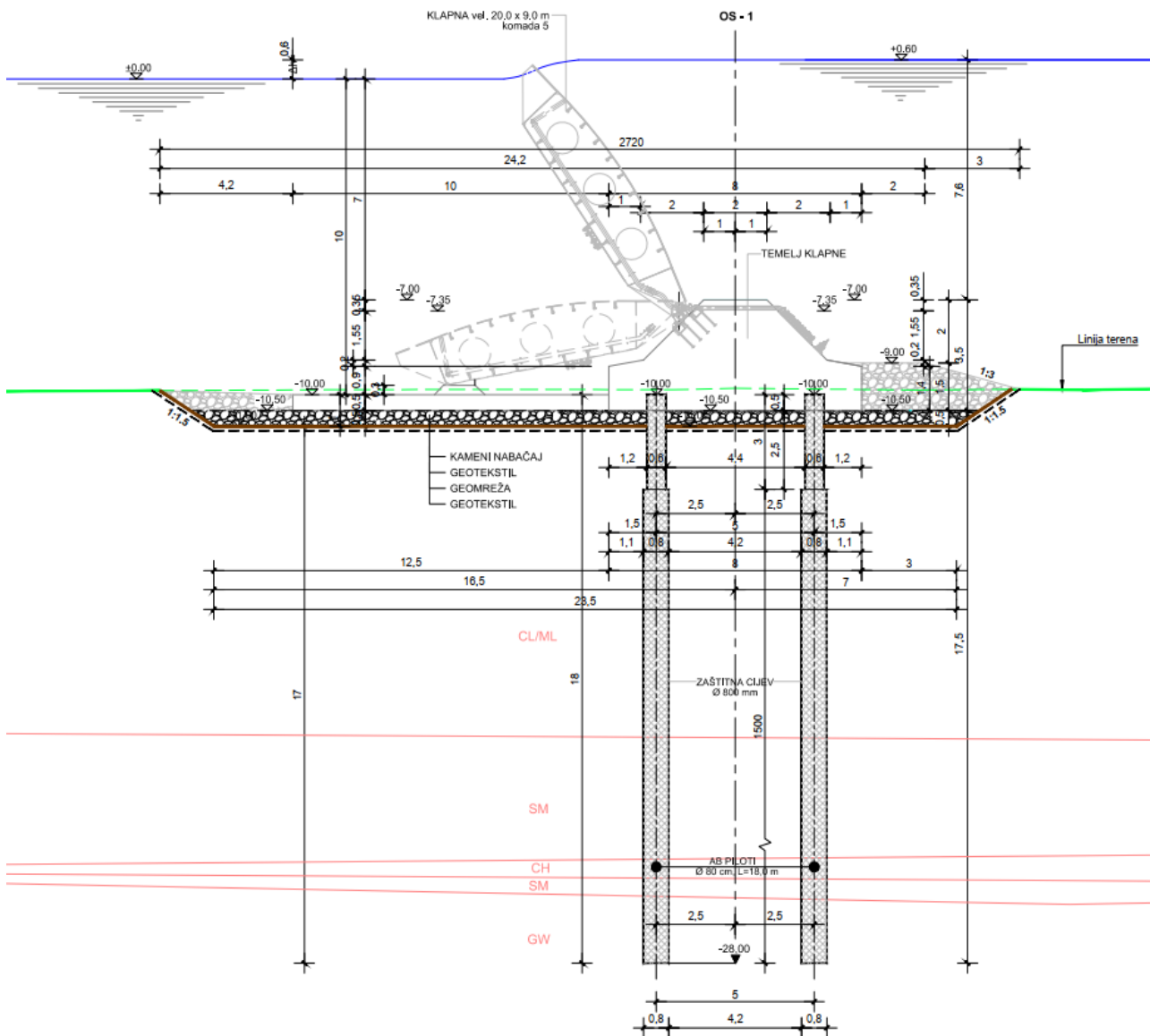
2 Opis projekta i lokacije

Projekt mobilne pregrade smješten je na donjem toku rijeke Neretve, približno 1,8 km nizvodno od grada Opuzena, u području koje je dugotrajno izloženo utjecaju morskih mijena i prodoru slanog klina uzvodno koritom rijeke. Lokacija zahvata nalazi se unutar doline Neretve koja je samo metar, dva iznad razine mora, s izraženom hidromelioracijskom mrežom te intenzivnom poljoprivrednom proizvodnjom.

Mobilna pregrada projektirana je kao potopljena armiranobetska konstrukcija duljine približno 100 m, na koju su zglobno vezane čelične mobilne klapne sandučastog, šupljeg presjeka (Slika 2.). Regulacijom količine

zraka unutar klapni omogućuje se njihovo podizanje ili spuštanje, ovisno o hidrološkim uvjetima u rijeci. Uz lijevu obalu predviđena je izgradnja brodske prevodnice za prolaz plovila, a uz desnu obalu riblja staza, čime se osigurava kontinuitet plovidbe i migracije ihtiofaune u razdoblju kada je pregrada aktivna.

Pregrada se koristi u režimu malih voda, u razdoblju od travnja do listopada, kada je utjecaj zaslanjivanja najizraženiji. U ostatku godine konstrukcija je spuštena na dno korita te ne utječe na protok velikih voda. Ovakav režim rada nameće dodatne zahtjeve u pogledu trajnosti konstrukcije, stabilnosti temelja te otpornosti na promjenjive hidrološke i geotehničke uvjete.



Slika 2. Karakteristični presjek pregrade

3 Geološko-geotehničke značajke

Geološko-geotehnički uvjeti na lokaciji zahvata definirani su na temelju opsežnih geotehničkih istražnih radova provedenih u okviru izrade idejnih i glavnih projekata sustava zaštite od zaslanjivanja tala i voda donje Neretve u nekoliko kampanja u razdoblju od 2008. do 2014. godine. Šire područje zahvata nalazi se na karbonatnoj podlozi mezozojske i kenozojske starosti, koju karakterizira izražena kavernožno-pukotinska

poroznost i visoka propusnost. Međutim, neposredna zona gradnje pregrade smještena je unutar debelih kvartarnih naslaga aluvijalnog porijekla.

Kvartarne naslage u području zahvata pretežno su građene od glina, prahova i pijesaka s međuzrnskom poroznošću i osrednjom propusnošću. U gornjem dijelu profila, do približno kote –12,0 m n.m., prevladavaju površinske gline i prahovi niske do srednje plastičnosti. Ispod tog sloja, do približno kote –27,0 m n.m., nalazi se sloj glina sličnih geomehaničkih svojstava, umjerene nosivosti i izraženije stišljivosti.

Najpovoljniji geotehnički sloj u profilu čini sloj srednje krupnog zaglinjenog šljunka, koji se javlja ispod kote –27,0 m n.m. do približno –30,0 m n.m. Ovaj sloj karakterizira visoka nosivost i mala stišljivost te je odabran kao nosivi sloj za oslanjanje armiranobetonskih pilota. Prisutnost ovog sloja bila je ključna za definiranje koncepta dubokog temeljenja, budući da plitko temeljenje nije bilo moguće zbog nedovoljne nosivosti i nepovoljnih deformacijskih svojstava gornjih slojeva.

Hidrogeološki uvjeti dodatno otežavaju izvođenje radova, jer se lokacija nalazi u području visoke razine podzemne vode, uz stalni hidraulički kontakt s riječnim tokom. Propusni slojevi u dnu korita, u kombinaciji s velikim protocima rijeke, onemogućuju učinkovitu primjenu klasičnih sustava zaštite građevne jame. Stoga su geološko-geotehnički uvjeti izravno uvjetovali potrebu izvođenja svih ključnih konstrukcijskih elemenata u mokrom postupku.

Geotehničke značajke lokacije, u kombinaciji s ograničenim prostorom gradilišta i kontinuiranim protokom rijeke, definirale su temeljne projektne pretpostavke i predstavljale jedan od najvažnijih utjecajnih čimbenika pri odabiru tehnologije temeljenja i izvedbe cijelog sustava mobilne pregrade.

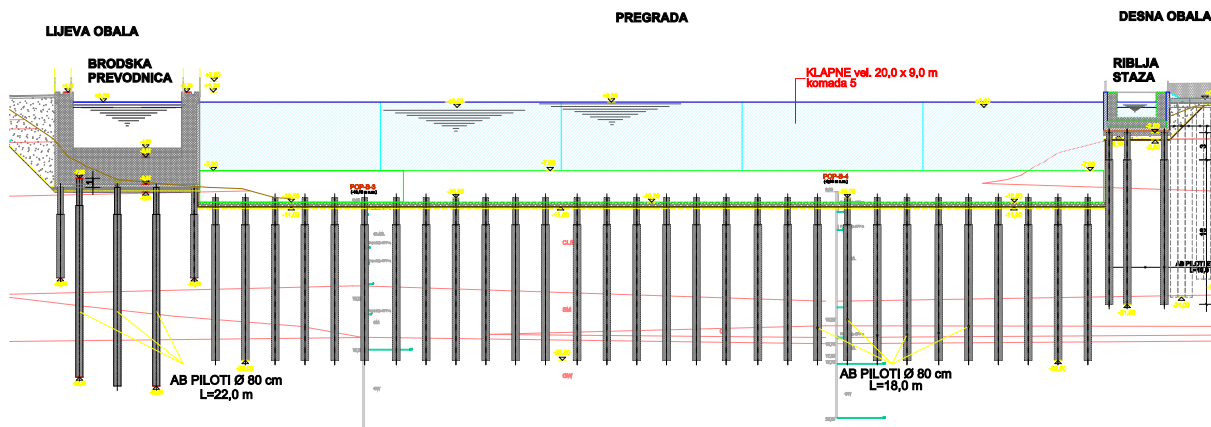
4 Metode i tehnologija izvedbe

Odabrana tehnologija izvedbe i koncept temeljenja rezultat su sinteze geotehničkih uvjeta lokacije, hidrauličkih ograničenja te zahtjeva funkcionalnosti i trajnosti mobilne pregrade. S obzirom na nemogućnost izvođenja radova u suhom, svi ključni konstrukcijski elementi projektirani su za izvedbu u mokrom postupku, uz maksimalno smanjenje utjecaja radova na postojeći režim protoka rijeke.

4.1 Koncept temeljenja

Temeljenje svih objekata u sklopu pregrade: armirano betonskog temelja pregrade – nosača mobilnih klapni, brodske prevodnice i riblje staze predviđeno je na armiranobetonskim pilotima. Duljine pilota kreću se u rasponu od približno 10 do 22 m (Slika 3.), ovisno o funkciji objekta i projektiranom opterećenju. Piloti koji nose temeljni prag mobilnih klapni oslanjaju se na sloj zaglinjenog šljunka visoke nosivosti, čime se osigurava prijenos vertikalnih i horizontalnih opterećenja na geotehnički povoljan sloj. Piloti na brodskoj prevodnici i ribljoj stazi su dominantno vertikalno opterećeni, a temelj prevodnice je opterećen i horizontalno i vertikalno. Na prevodnici je postavljena grupa pilota na način da se horizontalna sila na temeljni prag preko sprega sila prenosi osno na pilote.

Piloti ispod brodske prevodnice i riblje staze dijelom su projektirani kao “lebdeći” piloti, pri čemu se nosivost ostvaruje kombinacijom trenja po plaštu i oslanjanja na dublje, povoljnije slojeve. Takav pristup omogućio je prilagodbu temeljenja promjenjivim geotehničkim uvjetima uz istovremeno ograničenje dubine bušenja u uvjetima izvođenja s plovih objekata.



Slika 3. Uzdužni presjek u osi pregrade

4.2 Izvođenje pilota

Izvedba armiranobetonskih pilota provodi se s plovnih objekata pozicioniranih iznad osi buduće građevine. Bušenje pilota izvodi se kroz vodeni stupac i kvartarne naslage do projektirane dubine, uz primjenu zaštitnih čeličnih kolona radi stabilizacije stijenki bušotine. Ovakav način izvođenja zahtijeva preciznu kontrolu položaja pilota te stalni nadzor geotehničkih i hidroloških uvjeta tijekom radova.

Betoniranje pilota izvodi se pod vodom kontraktor postupkom, uz osiguranje kontinuiranog toka betona i sprječavanje segregacije. Kvaliteta izvedbe osigurava se primjenom provjerenih tehnoloških postupaka, kao i kontrolnim ispitivanjima tijekom i nakon betoniranja.

4.3 Podvodno betoniranje temeljnih elemenata

Temelj pregrade je ujedno i nosač mobilnih klapni te je projektiran kao armiranobetonski element koji se formira izravno na dnu korita rijeke Neretve. Nakon izvedbe pilota, na dno se postavlja armaturni koš i izgubljena čelična oplata, prethodno zajedno pripremljeni na kopnu. Betoniranje se provodi kontraktor postupkom, kojim se omogućuje kontrolirano istiskivanje vode i sprječava ispiranje cementne paste tijekom ugradnje betona.

Svaki temeljni segment oslanja se na skupinu pilota, čime se postiže povoljna raspodjela opterećenja i povećava sigurnost konstrukcije tijekom faza izvođenja i eksploatacije. Odabir kontraktor postupka bio je ključan za osiguranje potrebne kvalitete betona u uvjetima trajnog djelovanja vode.

4.4 Polumontažna izvedba pratećih objekata

Brodsko prevođnica, zbog svojih dimenzija i funkcionalnih zahtjeva, izvodi se polumontažnim postupkom. Predgotovljeni armiranobetonski elementi "U" presjeka postavljaju se s plovnih objekata na prethodno izvedene pilote te privremeno služe kao vanjska oplata za betoniranje u suhom. Ovakav pristup omogućuje skraćivanje vremena izvođenja, smanjenje rizika od prodora vode te bolju kontrolu kvalitete izvedenih konstrukcijskih elemenata.

Riblja staza temelji se na armiranobetonskim pilotima i sustavu podvodnih armiranobetonskih zidova koji osiguravaju stabilnost konstrukcije i vođenje toka vode. Izvedba je prilagođena zahtjevima migracije riba, ali i geotehničkim ograničenjima lokacije.

Primijenjene metode i tehnologije izvedbe predstavljaju kompromis između tehničke izvedivosti, sigurnosti gradnje i dugoročne pouzdanosti sustava, uzimajući u obzir izrazito zahtjevne geotehničke i hidrološke uvjete na lokaciji zahvata.

5 Analiza rješenja

Analiza odabranog geotehničkog rješenja temeljenja mobilne pregrade na rijeci Neretvi pokazuje da je temeljenje na pilotima uz izvođenje radova u mokrom postupku tehnički i izvedbeno prihvatljiva opcija u danim uvjetima. Postojeća obala je formirana s kamenom obaloutvrdom s velikim ulomcima kamena koji otežavaju ugradnju čeličnih talpi i sličnih rješenja. Osim navedenog, problematika formiranja klasične građevne jame zabijanjem čeličnih talpi je dubina korita pri normalnom vodostaju preko 10 m, a prvi sloj na dnu je lako gnječiva glina do prah sa proslojcima pijeska. Privremena devijacija korita isto nije moguća zbog nedostatka prostora, jer se na lijevoj obali odmah uz Neretvu nalazi državna cesta DC8 i nekoliko kuća i poslovnih objekata, a na desnoj obali je cesta i željeznička pruga. Osim navedenog devijacija vodotoka ima snažan utjecaj na okoliš te bi bile potrebne dodatne studije. Razmatrano je i djelomično nasipavanje korita u segmentima te izvedba klasične potporne konstrukcije tipa dijafragma ili pilotna stijena, ali zbog uspora uzrokovanog smanjenjem proticajnog profila te rasta maksimalnog vodostaja u Neretvi i rizika od poplava odustalo se od tog rješenja.

Odabrani koncept pokazuje određene sličnosti s međunarodno poznatim projektima mobilnih pregrada, među kojima se ističe sustav MOSE u Veneciji (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2020). Iako su razmjeri, hidraulički uvjeti i namjena tih projekata različiti, zajednička im je potreba za izvedbom složenih temelja u izrazito nepovoljnim geotehničkim i hidrološkim uvjetima te primjena podvodnog betoniranja i montaže elemenata u aktivnom vodnom okolišu. Za razliku od projekta MOSE, koji je projektiran prvenstveno za zaštitu od plavljenja uslijed visokih morskih razina, pregrada na rijeci Neretvi mora funkcionirati u uvjetima stalnog riječnog protoka, s velikim oscilacijama protoka i razine vode, što dodatno povećava zahtjeve u pogledu stabilnosti temelja i sigurnosti izvođenja.

Iskustva stečena na sličnim međunarodnim projektima potvrđuju opravdanost primjene temeljenja na pilotima i podvodnih tehnologija, ali ujedno naglašavaju potrebu prilagodbe svakog rješenja specifičnim lokalnim geotehničkim uvjetima, što je u slučaju Neretve bilo presudno za konačni odabir projektiranog sustava (Almeida, Couto & Rezende, 2013).

6 Zaključak

Izgradnja mobilne pregrade na rijeci Neretvi predstavlja iznimno zahtjevan hidrotehničko-geotehnički zahvat, prvenstveno zbog nepovoljnih geološko-geotehničkih uvjeta, velikih i promjenjivih protoka rijeke te ograničenog prostora za izvođenje radova. Debele kvartarne naslage glina i prahova, visoka razina podzemne vode i prisutnost propusnih slojeva u dnu korita isključili su mogućnost primjene klasičnih rješenja plitkog temeljenja i izvođenja radova u suhom.

Odabrani koncept temeljenja na armiranobetonskim pilotima, uz izvedbu ključnih konstrukcijskih elemenata u mokrom postupku, pokazao se kao tehnički opravdano i izvedbeno jedino prihvatljivo rješenje u danim uvjetima. Oslanjanje pilota na nosivi sloj zaglinjenog šljunka omogućilo je osiguranje potrebne nosivosti i ograničenje slijeganja, dok je primjena kontraktor postupka podvodnog betoniranja osigurala odgovarajuću kvalitetu betonskih elemenata unatoč stalnom djelovanju vode.

Polumontažna izvedba brodske prevodnice i prilagodba tehnologije izvođenja radu s plovnih objekata dodatno su smanjile rizike povezane s gradnjom u aktivnom riječnom koritu. Usporedba s međunarodnim projektima mobilnih pregrada, poput sustava MOSE u Veneciji, potvrđuje da se slični temeljni inženjerski principi mogu

primijeniti u različitim hidrauličkim okruženjima, ali uz nužnu prilagodbu specifičnim lokalnim geotehničkim uvjetima (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2020).

Iskustva prikazana u ovom radu mogu poslužiti kao vrijedan doprinos projektiranju i izvođenju budućih hidrotehničkih građevina u složenim geotehničkim uvjetima, osobito u područjima gdje je izvođenje radova u mokrom postupku jedina realna opcija. Idući korak je praćenje stvarnih radova na izgradnji pregrade na Neretvi koji su počeli ove, 2026. godine te povratne analize i modifikacije rješenja uvjetovane stvarnim uvjetima prilikom izgradnje.

Zahvala

Autori zahvaljuju svim kolegama koji su sudjelovali na projektu i Hrvatskim vodama na dostupnoj projektnoj i tehničkoj dokumentaciji te na potpori tijekom pripreme ovog rada.

Literatura

Almeida, W., Couto, E.G. & Rezende, R. (2013) Underwater concrete placement – an update on state-of-the-art techniques, *Marine Georesources & Geotechnology*.

Hrvatske vode (2021) Glavni projekt Sustav navodnjavanja Donja Neretva – podsustav Opuzen, etapa I – pregrada na rijeci Neretvi. Split.

Hrvatske vode (2026) Nastavak financiranja i provedbe projekata zaštite voda na području Neretve, : <https://www.voda.hr/hr/novost/nastavak-financiranja-i-provedbe-projekata-zastite-voda-na-podrucju-neretve>

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2020) MOSE Project – Technical Overview. Venice.

Mukhopadhyay, R. (2021) Soil salinity under climate change: challenges for management, *Journal of Environmental Management*.