

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

Petra Merdžo

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, mag. ing. aedif.
petra.merdzo@gmail.com

Mirna Raič

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, doc. dr. sc.
mirna.raic@gf.sum.ba

Sažetak: Ovaj rad daje prikaz istraživanja urađenog u sklopu izrade diplomskog rada pod naslovom: „Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar“, koji je urađen i uspješno obranjen na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Mostaru 2020. godine. Hidroelektrana Mostar, u pogonskoj sprezi s HE Salakovac, vrši izravnjanje protoka u nizvodnom toku rijeke Neretve. Na prostoru oko nasipa i dijafragme ima naznaka filtracijskih deformacija tla, te razvoja dominantnih pravaca strujanja podzemnih voda. U radu je ispitano područje lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar u programu MAGNET 4 WATER, te izvršena je usporedba dobivenih rezultata s već postojećim verificiranim rezultatima iz programa DHI WASY FEFLOW kao i rezultatima s terena. Zaključeno je da je prostorni model pogodan za daljnja istraživanja i analize npr. kod monitoringa strujanja podzemnih voda na području, te kod analize rizika od pronosa zagađenja u podzemlju lijevog zaobalja HE Mostar.

Ključne riječi: hidroelektrana Mostar, tečenje podzemnih voda, MAGNET, FEFLOW, model

Hydraulic numerical analysis of groundwater in the left hinterland of the Mostar hydroelectric power plant dam

Abstract: This paper presents a research conducted as part of development of the graduation thesis entitled: "Hydraulic numerical analysis of groundwater in the left hinterland of the Mostar hydroelectric power plant dam", which was developed and successfully defended at the Faculty of Civil Engineering, University of Mostar in 2020. The Mostar hydroelectric power plant, in tandem with the Salakovac HPP, levels the flows in the downstream course of the Neretva River. In the area around the embankment and the diaphragm wall, there are indications of filtration deformations of soil, and development of dominant directions of groundwater flows. The paper examines the area of the left hinterland of the Mostar hydroelectric power plant dam in the MAGNET 4 WATER program, and compares the obtained results with the existing verified results from the DHI WASY FEFLOW program as well as the field results. It was concluded that the spatial model is suitable for further research and analyses, e.g. for monitoring groundwater flows in the area, and for the analysis of risks of contaminant transport underground the left hinterland of HPP Mostar.

Key words: Mostar hydroelectric power plant, groundwater flow, MAGNET, FEFLOW, model

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

1. UVOD

Intenzivna graditeljska aktivnost na površini i u podzemlju nametnula je potrebu rješavanja složenih problema uvjetovanih postojanjem podzemnih voda. Hidrogeološka istraživanja provode se kako za potrebe izvedbe hidrotehničkih građevina tako i za potrebe vodoopskrbe naselja i industrijskih objekata, navodnjavanja, zaštitu od onečišćenja podzemne vode, itd. Kao i kod ostalih istraživačkih radova i hidrogeološka istraživanja započinju proučavanjem postojećih podataka o rezultatima prethodnih istraživanja, nakon čega se određuju potrebna daljnja istraživanja.

Modelska ispitivanja se primjenjuju kod sveobuhvatnog proučavanja hidrogeoloških sustava. Hidrogeološki sustavi su uglavnom vrlo složeni, te ih je za analizu potrebno pojednostaviti, odnosno načiniti model sustava koji sadržava sva bitna svojstva tog sustava.

Ovim radom ispitana je mogućnost primjene programa MAGNET 4 WATER koji je formiran na Michigan State University u Sjedinjenim Američkim Državama na krškim područjima. MAGNET 4 WATER ima već programirane načine modeliranja kao i svoju bazu podataka odakle preuzima podatke koji su njemu dostupni za ispitivano područje. Program je relativno noviji, te ne sadrži mnogo podataka s područja Europe posebno Balkana, jer većina modeliranja rađenih u ovom programu vezana su za područje Michigana.

Cilj rada je potvrditi primjenu prostornog stacionarnog modela tečenja podzemnih voda, na razmatranom području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar u svrhu određivanja dominantnih pravaca tečenja podzemnih voda, te usporediti rezultate s već postojećim verificiranim rezultatima iz programa DHI WASY FEFLOW. Modeliranje se radilo na osnovu baze postojećih podataka. Pored ovog istraživanja urađena je i analiza pronosa te su i ti rezultati uspoređeni s već postojećim terenskim rezultatima kao i rezultatima iz programa DHI WASY FEFLOW.

Model bi mogao poslužiti za simulaciju stanja u podzemlju u slučaju nedovoljnog opsega podataka monitoringa razine podzemnih voda, kao i za predviđanje rasporeda razina podzemnih voda ovisno o radu hidroelektrane, kao i atmosferskim utjecajima, te za ispitivanje pronosa zagađenja u podzemlje u slučaju pojave izvora zagađenja.

Rad se sastoji od 5 poglavlja. Prvo je uvodno koje govori o cilju i svrsi rada, te sadrži opis sadržaja poglavlja. Drugo poglavlje opisuje područje istraživanja, te postojeća terenska istraživanja. U trećem poglavlju objašnjen je program MAGNET 4 WATER i način njegova korištenja. U četvrtom poglavlju je prikazan konceptualni model ispitivanog područja, a kroz 2 potpoglavlja prikazani su rezultati ispitivanja (razina podzemnih voda, količina vode koja se procjeđuje iz domene, brzine tečenja podzemne vode, pronos trasera u podzemlje) kao i njihova verifikacija. Peto poglavlje je zaključno gdje su izneseni zaključci na osnovu ovoga istraživanja.

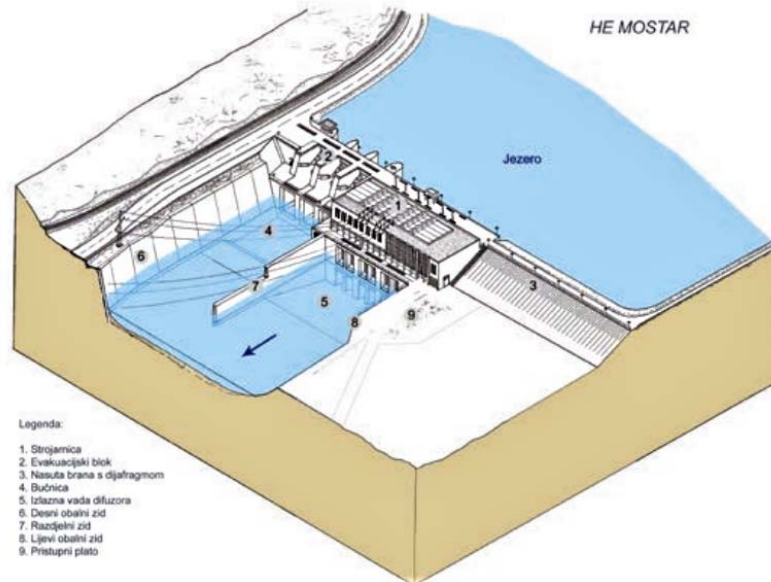
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Hidroelektrana Mostar nalazi se 6 km sjeverno od Mostara. Puštena je prvi put u pogon 1987., a nakon potpune devastacije u ratu 1992. ponovno je puštena u rad 1997. godine. Građena je u razdoblju 1983. - 1987. godine. U planiranome projektu Srednja Neretva iz 1953. godine HE Mostar je uz HE Grabovica i HE Salakovac dio kompleksnoga projekta tri elektrane pribanskoga tipa gdje svaka ima različitu energetska ulogu. Važnu ulogu ima HE Mostar u navedenome Projektu za regulaciju ravnomjernijeg rada i izravnivanja rada uzvodnih hidroelektrana. Pribransko-akumulacijsko je postrojenje, izgrađeno kao

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

najnižvodnije u nizu postrojenja na srednjoj Neretvi, koje u hidroenergetske svrhe koristi vode rijeke Neretve.



Slika 1. Shematski prikaz HE Mostar [1]

HE Mostar čine sljedeći građevinski objekti:

- Akumulacijski bazen koji je smješten u samom koritu rijeke Neretve na zapadnom dijelu Bijeloga polja. Duljina bazena je oko 11,0 km, a korisni volumen akumulacije pri normalnoj koti uspora od 78,0 m n. m. iznosi $6,37 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Brana je kombiniranog tipa s dvije konstruktivne i funkcionalne cjeline: betonska gravitacijska brana sa strojarnicom u koritu Neretve i evakuacijski blok u desnom boku te nasuti dio brane u lijevom boku koji kružno prelazi u obrambeni nasip.
- Nasuti dio brane s vodonepropusnom dijafragmom je trapeznoga oblika duljine 106 m u lijevom boku kružno prelazi u obrambeni nasip duljine 2500 m. Kao vodonepropusno jezgro izvedena je glineno-betonska dijafragma duljine 134 m u nasutom dijelu brane. Injekcijska vodonepropusna zavjesa brane izvedena je u ukupnoj duljini od 310 m, različite dubine u bokovima, ispod brane i u manjem dijelu lijevoga boka.
- Evakuacijski organi za velike vode su tri preljevna polja smještena na desnoj strani objekta, maksimalnoga kapaciteta $3.070 \text{ m}^3/\text{s}$ i temeljni ispus kapaciteta $180 \text{ m}^3/\text{s}$. Ispušta se biološki minimum od $50 \text{ m}^3/\text{s}$ u slučaju mirovanja agregata zato što je elektrana zadnja na slivu rijeke Neretve.

U strojarnici se nalaze sva razvodna postrojenja hidroelektrane kao i tri agregata s Kaplan-turbinama u armiranobetonskim spiralama. Instalirani protok agregata je $120 \text{ m}^3/\text{s}$ za maksimalnu snagu jednog agregata, a $360 \text{ m}^3/\text{s}$ za maksimalnu snagu sva tri agregata. Ukupna instalirana snaga iznosi 72 MW. Srednja je moguća proizvodnja 310 GWh [1].

Izgradnja HE Mostar i podizanje razine vode u koritu Neretve na projektiranu kotu uspora od 78,00 m n. m. promijenili su uvjete koji utječu na formiranje režima podzemnih voda. Efekti izmijenjenih uvjeta na područje bili su predmet dugotrajnih razmatranja uz prikupljanje neophodnih podataka o geološkim i hidrogeološkim (filtracijskim) osobinama sredine u kojoj se nalazi objekt s akumulacijskim bazenom. Problemi filtracije, prognoza

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

gubitaka kao i položaj razine podzemne vode u odnosu na površinu terena, rješavani su na osnovu raspoloživih podataka iz dosadašnjih istraživanja. Posebna pažnja je posvećena utvrđivanju realnih filtracijskih osobina sredine lijeve obale gdje su problemi filtracije iz bazena u zaobalje izraženiji. Iz razloga jer je razina donje vode na koti 55,00 m n. m., u području pregradnog profila javlja se veliki gradijent razine podzemne vode, čiji bi tok mogao ugroziti stabilnost prirodne kosine obale i same brane, a i gubici vode iz akumulacije bili bi veliki. Radi toga je, prilikom izvođenja objekta hidroelektrane, bilo potrebno izvesti zaštitnu zavjesu u produžetku brane, poprečno na akumulaciju, tako da se produži put tečenja podzemne vode.

Rješavanje zadatka obuhvaćalo je prikupljanje potrebne dokumentacije na osnovu koje bi se rezultati ovoga rada s pouzdanjem mogli usporediti s rezultatima prethodnih istraživanja. Bilo je potrebno prikupiti sve ulazne podatke o prethodnim istraživanjima. Također je bilo potrebno pridružiti odgovarajuće koeficijente filtracije za svaki sloj kako bi se dobila realna predstava ispitivanog područja, te zadavanje rubnih uvjeta na osnovu poznatih podataka s terena.

2.1 Terenska istraživanja

S obzirom na probleme koje je trebalo riješiti, kao metoda istraživanja najviše je primjenjivano istražno bušenje. Na širem području zaobalja i na prostoru brane ukupno je izbušeno 210 istražnih bušotina ili 12.000 m bušenja. Polovina ukupnih metara bušenja utrošeno je u zoni pregradnog mjesta [2].

Uže područje HE Mostar ima specifičnu i složenu geološku građu terena. Rezultati istraživanja na lijevoj obali Neretve, u području nasute brane, pokazuju da teren grade kvartarne naslage (terasni materijal) na površini terena i u rijeci te neogenske naslage sa slojem ugljena i gornjokredni vapnenac kao najniži i najstariji član – temeljno gorje.



Slika 2. Raspored slojeva ispod nasutog dijela brane HE Mostar [3]

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

Kvartarne naslage prekrivaju čitav prostor oko nasute brane. Uz obalu Neretve nasuta brana izravno leži na ugljenu, a dalje prema zaobalju je na neogenskom laporu, dok se ugljen pojavljuje kao sloj unutar lapora. Neogen sačinjava debele naslage lapora sa slojem ugljena debljine do 10 m. Na laporu je utvrđen tanji sloj (oko 1 m) kontaktne gline, koja s laporom leži horizontalno i pruža se u pravcu lijevog zaobalja. Istražnim radovima i tijekom izrade injekcijske zavjese i dijafragme dokazano je da u području brane postoje četiri hidrogeološke sredine s različitim hidrogeološkim karakteristikama [4].

U sklopu istraživanja posljedica filtracijskih protoka u lijevom zaobalju akumulacije HE Mostar izvršena su obilježavanja podzemnih tokova Na-fluoresceinom u 5 piezometara sa 6 testova. Bojenja pokazuju da se filtracija vode iz akumulacije obavlja u relativno ograničenoj zoni oko kraja dijafragme s izlivanjem duž lijeve obale do mosta. Rezultati ispitivanja su dali dovoljno podataka za preliminarne zaključke o glavnim putovima filtracije voda i karakteru strujanja.

Na osnovu izmjerenih vrijednosti oscilacija RPV tijekom razdoblja od 3 godine određene su maksimalne i minimalne razine podzemnih voda koje su se pojavile u tom vremenu na svim piezometrima. Pomoću tih vrijednosti napravljena je karta hidroizohipsi RPV za dva različita hidrološka stanja – sušni i vlažni period.

3. MAGNET

MAGNET (Multiscale, Adaptive Global NETwork for water (višerazinska, prilagodljiva globalna mreža za vodu)) je sustav za modeliranje koji je izgrađen na unaprijed obrađenim, u potpunosti sastavljenim okvirnim podacima, tj. podacima potrebnim za konceptualizaciju i karakterizaciju sustava (npr. DEM (Digital Elevation Model (digitalni model nadmorske visine) – 3D prikaz površine terena), procjene punjenja, itd.) u obliku spremnom za uporabu na globalnoj razini [5]. Iako podaci koje sustav pruža možda u potpunosti ne zadovoljavaju zahtjeve određenog istraživanja, on pruža ogromnu većinu podataka potrebnih za izgradnju preliminarnog modela. Dakle, osoba koja se služi ovim sustavom može koristiti sustav sa spremnim podacima za preradu ili izmjenu preliminarnog modela po želji dodavanjem podataka specifičnih za istraživano područje. Sustav korisnicima omogućuje ne samo pristup i korištenje prethodno obrađenih velikih skupova podataka, već i rad u stvarnom vremenu i interaktivno.

Proces započinje Google mapom na kojoj se odabire područje od interesa, zatim se polilinjama preciznije odredi područje istraživanja. Nakon određenog područja unose se podaci geoloških karakteristika slojeva područja, položaj slojeva, kao i koeficijenti filtracije karakteristični za svaki sloj.

Korisnik u programu može odabrati i unijeti brojne mogućnosti rešetke modela. To uključuje broj čvorova modela u vodoravnom smjeru (zapad-istok, NX), broj podslojeva u vertikalnom smjeru, postavke rješavanja matrice i multiplikacijski faktori za prostorno eksplicitne rasterske datoteke hidrauličke vodljivosti i punjenja.

Broj čvorova u smjeru sjever-jug automatski se izračunava na temelju NX i oblika domene modela. U osnovnoj verziji MAGNET-a maksimalni broj ćelija rešetke u X smjeru iznosi $Nx_max = 150$. Ukupni broj ćelija rešetke u X i Y smjeru je $Nx*Ny_max = 100 * 100 = 10000$ (NY se automatski izračunava na temelju oblika/geometrije domene). Ukupni broj vertikalnih numeričkih slojeva je $subLyr_max = 15$, a ukupni broj ćelija mrežnog uzorka je $Nx*Ny*Nz_max = 100 * 100 * 10 = 100000$.

MAGNET rješava 3D jednadžbe vodonosnika (Laplaceovu diferencijalnu jednadžbu) koristeći metodu konačnih razlika. Nudi u opcijama mogućnost biranja načina rješavanja matrica, a u zadanim postavkama postavljena je metoda Hybrid Successive Over Relaxation za rješavanje matrice.

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

4. KONCEPTUALNI MODEL

Za rješavanje ovog zadatka formiran je trodimenzionalni model lijevog zaobalja HE Mostar (HEMO). Domena područja ucrtana je u MAGNET 4 WATER. Ona je sa zapadne strane ograničena rijekom Neretvom, dok se istočna granica pruža paralelno trasi magistralnog puta M17. Prema sjeveru, granica modela se pruža u duljini oko 260 m, a prema jugu u duljini oko 600 m. Širina domene iznosi oko 400 m. Treća dimenzija modela je određena definiranjem 4 sloja materijala na 23 bušotine (čvora) raspoređenih po čitavom području.



Slika 3. Prikaz modeliranog područja s područjem rubnih uvjeta (crvena linija)

Kako bi se dobile neophodne informacije o količini vode koja struji oko zavjese, izvršen je proračun razina podzemne vode na ovom području formiranjem trodimenzionalnog stacionarnog matematičkog modela (49280 elementarnih kvadrata po sloju). Rješavanjem Laplaceove diferencijalne jednačbe za svaku elementarnu prizmu, dobivene su vrijednosti razine podzemne vode za svaki čvor koji se nalazi u središtu elementarne prizme. Vrijednosti koeficijenta filtracije su kvalitativno pridruženi određenim slojevima na osnovu analize geoloških istražnih radova na području kroz dugi niz godina. Interakcija između odbačenog i modeliranog područja nadomještena je početnim i rubnim uvjetima. Rubni uvjeti su zadani kao apsolutna vrijednost kote gornje vode HE Mostar (uzvodno od HE), apsolutna vrijednost kote donje vode HE Mostar (nizvodno od HE). Sjeverna, istočna i južna kontura modela je zadana slobodno u modelu, što znači da je moguće i dotjecanje i otjecanje prema/od konture.

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

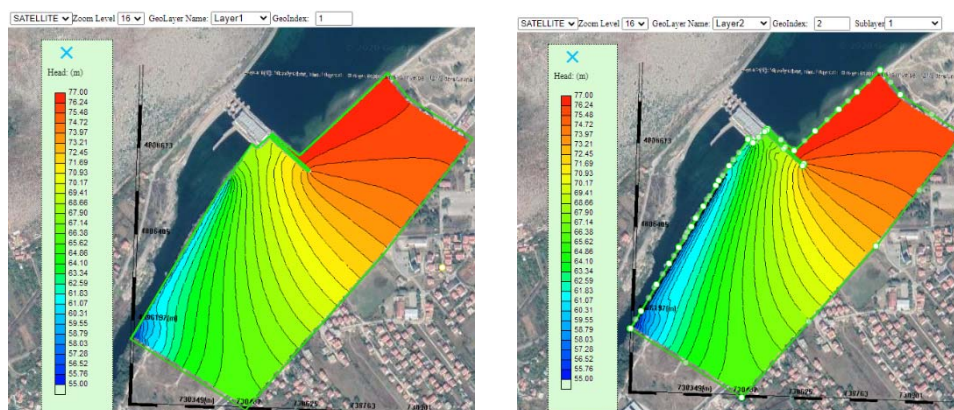
Tablica 1. Koeficijenti filtracije za odgovarajuće slojeve [2]

OZNAKA SLOJA (LAYER)	LITOLOŠKI SASTAV	HIDROGEOLOŠKA FUNKCIJA	KOEFICIJENT FILTRACIJE [m/s]
1	Diluvijalni terasni materijal i šljunak i pijesak sa slabim glinovitokarbonatnim vezivom	Jako vodopropusne sredine	$K_{xx} = K_{yy} = 3 \cdot 10^{-3}$ $K_{zz} = 3 \cdot 10^{-4}$
2	Jako zaglinjena krečnjačka drobina – dobro zbijeni konglomerat	Djelimično vodonepropusne stijene s hidrogeološkom funkcijom apsolutne barijere	$K_{xx} = K_{yy} = 10^{-5}$ $K_{zz} = 10^{-6}$
3	Kvartar – šljunak, zdrobljeni konglomerat, pijesak	Vodopropusne sredine	$K_{xx} = K_{yy} = 10^{-4}$ $K_{zz} = 10^{-5}$
4	Neogeni lapor i lapor s ugljem	Vodonepropusne stijene s hidrogeološkom funkcijom apsolutne barijere	$K_{xx} = K_{yy} = 10^{-6}$ $K_{zz} = 10^{-7}$

Unutar područja modela obilježene su kontrolne točke u kojima je poznato piezometarsko stanje za postavljene rubne uvjete i te točke služe za validaciju modela. Pokraj ispitivanja RPV, brzina tečenja podzemnih voda te količine vode koja se procjeđuje, urađena je i analiza pronosa u podzemlju.

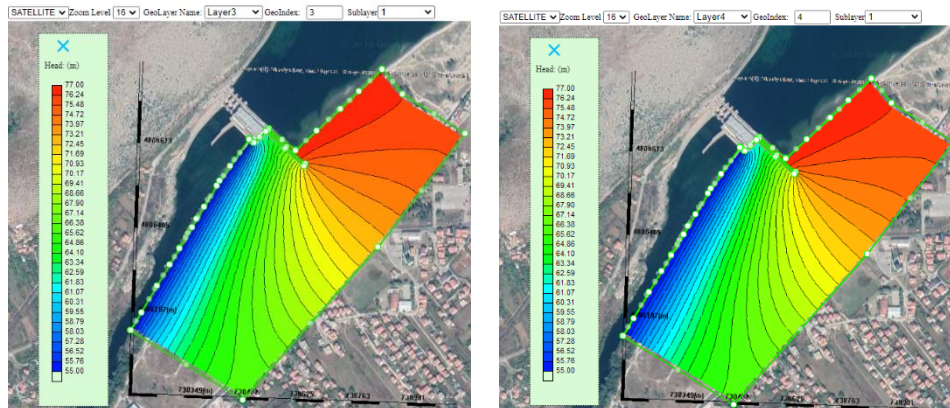
4.1 Rezultati

Nakon urađene simulacije za stacionarno strujanje u neograničenom slobodnom vodonosniku dobiveni su rezultati RPV po slojevima prikazani na sljedećim slikama.



Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar



Slika 4. Prikaz RPV po slojevima

Također su dobiveni rezultati brzina tečenja podzemnih voda po slojevima. Promatrajući ukupno područje modela može se zaključiti kako se najveće brzine tečenja podzemnih voda pojavljuju u prvom sloju i to na području nizvodno od lijevog obalnog zida, na mjestu ispusta iz drenažnog kanala. U Tablici 2. su prikazane maksimalne vrijednosti brzina po slojevima.

Tablica 2. Prikaz maksimalnih vrijednosti brzina po slojevima

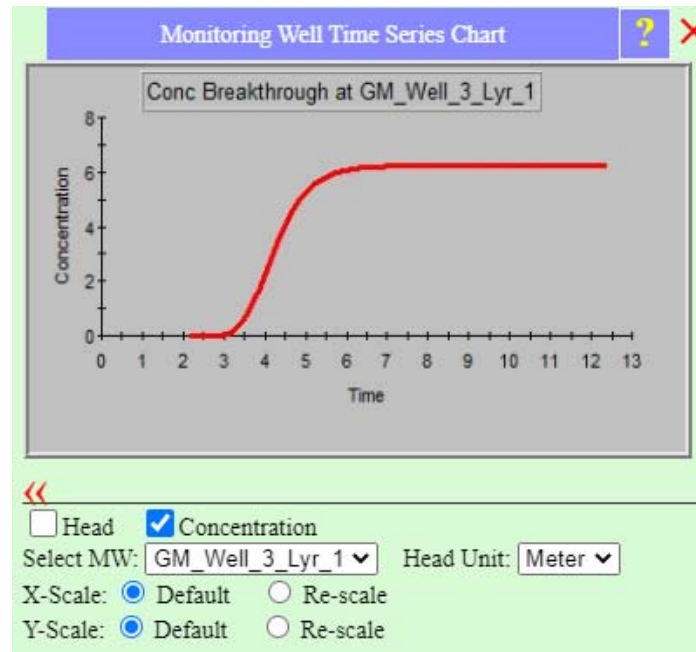
Sloj	Maksimalna vrijednost brzine (m/s) – MAGNET Premium
1	$6,38 \cdot 10^{-3}$
2	$1,55 \cdot 10^{-3}$
3	$1,78 \cdot 10^{-4}$
4	$1,72 \cdot 10^{-6}$

Cjelokupno područje rubnog uvjeta gornje vode od 77 m n. m. može se promatrati kao dio kroz koji voda ulazi u domenu, a područje rubnog uvjeta donje vode od 55 m n. m. kao dio kroz koji voda istječe iz domene. Najaktivniji dio je neposredno nizvodno od brane, na lijevoj obali Neretve, gdje su i postavljene barbakane za ispuštanje ovih količina vode. Model je prikazao ukupnu količinu vode od 455,05 l/s koja se procjeđuje iz domene.

Za simuliranje pronosa u modelu bile su potrebne vrijednosti koncentracije mase koja se unosila. Koncentracija je preuzeta iz podataka terenskih istraživanja. Bojanje na terenu, na piezometru PL1/1 rađeno je s 5 kg natrij-fluoresceina izravnim nalijevanjem kroz usta bušotine i ispiranjem s $1,5 \text{ m}^3$ vode. To je dalo vrijednost koncentracije mase od $3,33 \text{ kg/m}^3$ s kojom je model i urađen. Rezultati provedene simulacije su pokazali pojavu trasera na opažaćkom piezometru M5/2 nakon 2 sata od ubacivanja trasera u piezometar. Nakon 5 sati se vrijednost koncentracije trasera stabilizirala na koncentraciji od 6 mg/l.

Merdžo, P., Raič, M.

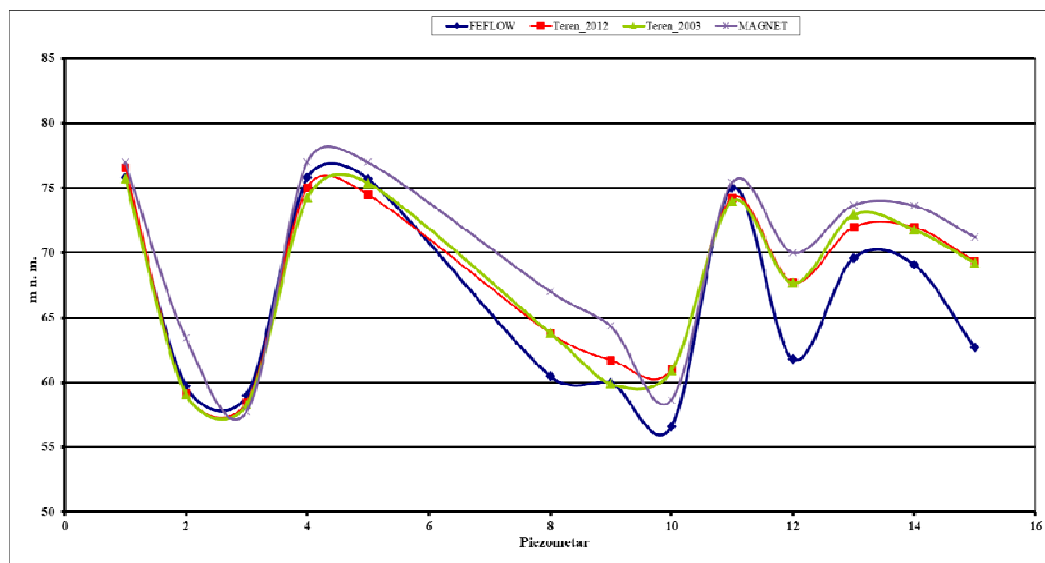
Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar



Slika 5. Krivulja koncentracije traseri na opažačkom piezometru M5/2

4.2 Verifikacija

Na slici 5 prikazana je usporedba rezultata RPV dobivenih iz numeričkih modela MAGNET 4 WATER i DHI WASY FEFLOW i rezultata mjerenih na terenu na svakom od naznačenih kontrolnih piezometara. Mogu se primijetiti veća odstupanja na piezometrima koji se nalaze neposredno blizu dijafragme koja nastaju iz razloga neposredne veze između razine gornje vode, odnosno razine vode u akumulaciji i razine vode u tim piezometrima.



Slika 5. Usporedba rezultata RPV dobivenih u MAGNET Premiumu, FEFLOW-u i terenskim mjerenjima

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

Prema rezultatima geofizičkih istraživanja iz 2003. godine na području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar, efektivna brzina tečenja podzemnih voda na mjestu proboja dijafragme je $v_{ef} = 6,6 \cdot 10^{-3}$ m/s. Model u kojem je rađeno ispitivanje je rezultirao s maksimalnom vrijednošću brzine na mjestu istjecanja iz drenažnog kanala od $6,38 \cdot 10^{-3}$ m/s, dok je u DHI WASY FEFLOW-u ova brzina iznosila $7,84 \cdot 10^{-3}$ m/s. U Tablici 3 dana je usporedba maksimalnih vrijednosti brzina po slojevima dobivenih u programima Premium MAGNET 4 WATER i DHI WASY FEFLOW. Smatra se da su odstupanja u vrijednostima posljedica diskretizacije mreže koju programi koriste. FEFLOW koristi trokut kao element diskretizacije dok je u MAGNET-u to pravilni četverokut.

Tablica 3. Maksimalne vrijednosti brzina po slojevima

Sloj	Maksimalna vrijednost brzine (m/s) - MAGNET Premium	Maksimalna vrijednost brzine (m/s) - FEFLOW
1	$6,38 \cdot 10^{-3}$	$7,84 \cdot 10^{-3}$
2	$1,55 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$
3	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$
4	$1,72 \cdot 10^{-6}$	$8,97 \cdot 10^{-5}$

Prema hidrološkim volumnim mjerenjima izdašnosti na barbakanama ukupna količina vode koja se procjeđuje iznosila je približno 348,40 l/s. Usporedba s numeričkim rezultatima prikazan je u Tablici 4.

Tablica 4. Količina vode koja se procjeđuje iz domene

	Količina vode koja se procjeđuje (l/s)
TEREN	348,40
MAGNET Premium	455,05
FEFLOW	326,01

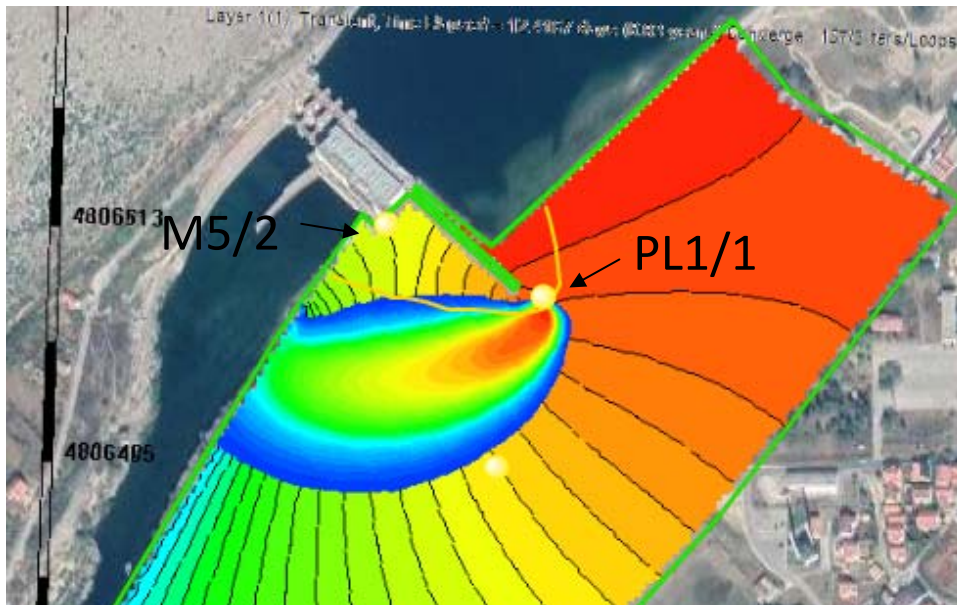
Prema izvješću o trasiranjima naznačeno je kako se traser pojavio na piezometru M5/2, 3-4 sata, nakon utiskivanja traseru u piezometar PL1/1. Stvarna koncentracija na piezometru M5/2 je iznosila 6,0 mg/l. Nakon provedene simulacije pronosa u programu DHI WASY FEFLOW utisnute mase koncentracije od $3,33 \text{ kg/m}^3$ u piezometar PL1/1, modelirana vrijednost koncentracije na mjestu piezometra M5/2 za vremensko razdoblje od četiri sata od trenutka utiskivanja, što ujedno predstavlja vrijeme prvog pojavljivanja traseru, iznosi 5,50 mg/l. U programu Premium MAGNET 4 WATER modelirana vrijednost koncentracije traseru je iznosila 6 mg/l nakon 5 sati, što se može zaključiti da odgovara terenskim rezultatima od 6mg/l koncentracije koja je ostala nepromijenjena.

Tablica 5. Prikaz rezultata koncentracije traseru

	Teran	FEFLOW	MAGNET Premium
Koncentracija traseru [mg/l]	6	5,5	6

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar



Slika 6. Koncentracija trasera oko dijafragme HE Mostar – MAGNET Premium

5. ZAKLJUČAK

Urađeno modeliranje na prostornom stacionarnom matematičkom modelu prostora lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar, omogućilo je kvalitativno sagledavanje utjecaja postojećih objekata hidroelektrane na uvjete filtracije u razmatranom području.

Rad je pokazao kako je moguće dobiti kvalitetnu predodžbu stanja podzemnih voda, uz točno definiranu geometriju područja, kao i detaljno obrađene raspoložive geološke podatke s velikog broja bušotina na području. Također, potvrđena je opravdanost primjene programa MAGNET 4 WATER za ispitivanje/modeliranje na krškim područjima.

Rad je također pokazao kako primjena ovakvog načina modeliranja može naći široku primjenu kod određivanja dominantnih pravaca tečenja podzemnih voda, a samim određivanjem pravaca i intenziteta dominantnih tokova podzemnih voda određeni su i pravci mogućeg pronosa zagađenja u podzemlju.

Na osnovu uspoređenih rezultata pronosa mase, može se zaključiti kako je prostorni konceptualni model pogodan za ispitivanje pronosa u podzemlju lijevog zaobalja HE Mostar.

Korišteni prostorni stacionarni model lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar potvrđuje da je osnova za daljnje razvijanje nestacionarnog modela za čije potrebe je neophodno neprekidno dopunjavati bazu podataka s novim podacima osmatranja.

LITERATURA

1. JP Elektroprivreda HZ HB – brošura HE Mostar, Mostar, studeni 2013.
2. Raič, M.: Određivanje područja i intenziteta procjeđivanja u lijevom zaobalju brane hidroelektrane Mostar, Magistarski rad, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, 2012.
3. <https://izgradnjahemostar.wordpress.com/2015/03/13/sloj-uglja-u-lijevom-boku-2-oktobar-1985/>

Merdžo, P., Raič, M.

Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar

4. Projekt „Obnova sustava tehničkog mjerenja te istraživanje stanja u podzemlju lijevog zaobalja i brane HE Mostar - II. faza“, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, 2005.
5. <https://www.magnet4water.com/Main.aspx?caller=magnet-user-manual.html>
6. Merdžo, P.: Hidraulička numerička analiza podzemnih voda na području lijevog zaobalja brane hidroelektrane Mostar, Diplomski rad, Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, Mostar, 2020.