



ODREĐIVANJE PODRUČJA I INTENZITETA PROCJEĐIVANJA U LIJEVOM ZAOTALJU BRANE HIDROELEKTRANE MOSTAR

mr. sc. **Mirna Raič**, dipl. ing. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Sažetak: Hidroelektrana Mostar, kao posljednje nizvodno postrojenje projekta Srednja Neretva izgrađena je s namjenom da u pogonskoj sprezi s radom HE Salakovac vrši izravnanje protoka u nizvodnom toku rijeke Neretve. Od podzemnih objekata na ovoj hidroelektrani, pored ostalih, izvedena je kombinirana protufiltracijska dijafragma. Oko čela dijafragme se formiraju značajni gradijenti razine podzemnih voda s povećanim brzinama tečenja. Na okolnom prostoru, oko nasipa i dijafragme, ima naznaka filtracijskih deformacija tla, te razvoja dominantnih pravaca strujanja podzemnih voda, što je potvrđeno ispitivanjima koja su provedena u različitim periodima. Ovaj rad je rezultirao s određivanjem dominantnih pravaca tečenja u lijevom zaobalju HE Mostar, u cilju određivanja količina voda koje se procjeđuju, kao i njihovog utjecaja na stabilnost tla. Analiza strujanja je urađena koristeći program FEFLOW, gdje su dobiveni rezultati verificirani rezultatima izmjerenim na terenu. Model je dao rezultate s neznatnim odstupanjima. Zaključeno je kako je prostorni model pogodan za daljnja istraživanja i analize i može naći primjenu kako kod monitoringa strujanja podzemnih voda na području, tako i kod analize rizika od pronosa zagađenja u podzemlju lijevog zaobalja HE Mostar.

Ključne riječi: hidroelektrana Mostar, dijafragma, tečenje podzemnih voda, FEFLOW, 3D model

DETERMINING THE AREA AND INTENSITY OF SEEPAGE IN THE LEFT HINTERLAND OF THE DAM OF MOSTAR HYDROELECTRIC POWER PLANT

Abstract: HEPP Mostar, as the last downstream object of the Middle Neretva Project, was built in purpose of downstream Neretva watercourse flow equalization with HEPP Salakovac combinational operation. Among other underground objects on this HEPP, combined counter-filtration diaphragm was built. Around diaphragm head is lineament of significant ground water level gradients with enlarged flow velocities. On the surrounding area, around embankment and diaphragm there are signs of filtration ground deformations and development of dominant ground water flow directions. This was confirmed by investigations that have been done at different periods. This work resulted with identification of dominant flow directions on the HEPP Mostar left coast area in purpose of seepage water quantity and theirs influence on the soil stability. Flow analysis was done using software FEFLOW, where reached results were verified by results measured "in situ". Model gave results with inconsiderable deviations. It was concluded that this spatial model is suitable for future investigations and analysis and could find an application at ground water flow monitoring on this area and at risk analysis considering pollution transport of the HEPP Mostar left coastal area underground as well.

Key words: HEPP Mostar, diaphragm, ground water flow, FEFLOW, 3Dmodel



1. UVOD

Osnovni zadatak kod rješavanja praktičnih problema iz oblasti hidrotehnike je prognoza režima podzemnih voda, posebno u uvjetima eksploatacije, odnosno primjene različitih tehničkih rješenja. U ovisnosti o postavljenom zadatku, znanju istraživača, uvjetima na terenu i tehničkim mogućnostima, različit je metodološki pristup i koncepcija rješavanja danog problema. Složeniji problemi zahtijevaju i odgovarajuću razinu rješavanja. Najčešće se izučavanje režima podzemnih voda u okviru izučavane strujne oblasti provodi preko modela tečenja, različitih karakteristika, namjena i mogućnosti. Njihova zajednička osobina je da na odgovarajući način mogu simulirati (oponašati) prirodnu sredinu i određene elemente režima podzemnih voda. Očigledno je kako ne postoji model koji može simulirati prirodu u svim njenim aspektima. Kvaliteta jednog modela ogleda se kroz nekoliko karakteristika. To su, prije svega, realnost rezultata dobivenih njegovim korištenjem, jednostavnost kod njegove izrade i pri radu s njim, kao i mogućnost ekstrapolacije, odnosno mogućnost provođenja prognoze u izmijenjenim uvjetima (u uvjetima primjene predviđenog tehničkog rešenja).

Pored ostalih, već klasičnih metoda modeliranja (fizikalni, analogni modeli), matematičko modeliranje režima podzemnih voda danas predstavlja praktično osnovno sredstvo u inženjerskom rješavanju problema vezanih za podzemne vode. Prednost primjene matematičkog modeliranja u odnosu na druge metode izučavanja podzemnih voda ogleda se u mogućnosti simulacije složenih uvjeta i oblika strujanja i prognozi efekata planiranog tehničkog rješenja za praktično neograničeni broj proračunskih shema. Matematičkim modelom moguće je determinirati parametre porodne sredine (strujne oblasti) i elemente režima podzemnih voda, koji se drugim metodama ne mogu, ili se veoma teško, mogu odrediti. Mogućnost relativno lakog provođenja velikog broja hidrodinamičkih proračuna strujanja podzemnih voda na matematičkom modelu, omogućava optimizaciju u svim fazama terenskih istraživanja (radova po pravilu daleko skupljih), kao i samog planiranog rješenja.

Cilj rada je potvrditi primjenu prostornog stacionarnog modela tečenja podzemnih voda, zasnovanog na tehnici konačnih elemenata, na razmatranom području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar u svrhu određivanja dominantnih pravaca tečenja podzemnih voda i količine vode koja se procjeđuje. Modeliranje se radilo na osnovu baze postojećih podataka.

Cilj je formiranje prostornog matematičkog modela za uvjete stacionarnog tečenja i analiziranje filtracijskih strujanja podzemne vode u lijevom zaobalju HE Mostar, kako bi bilo moguće odrediti količine voda koje se procjeđuju, kao i njihov utjecaj na stabilnost tla u lijevom zaobalju. 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.

Kako bi se dobile neophodne informacije o količini vode koja teče oko zavjese, izvršen je proračun razina podzemne vode u području dužine 860 m (260 m uzvodno i 600 m nizvodno od pregradnog profila) i širine oko 400 m. Napravljen je trodimenzionalni stacionarni matematički model. Postavljanjem Darcyevog zakona filtracije i jednadžbe kontinuiteta za svaku elementarnu prizmu, koristio se izraz za razinu podzemne vode u jednoj točki, ovisno o razini u svim susjednim točkama – središtima elementarnih prizmi.

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.

Analiza filtracijskih strujanja uz utvrđivanje efekata tečenja u podzemlju lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar obavljena je računalnim programom FEFLOW (Finite Element Subsurface Flow and Transpot Simulation System). To je programski paket za modeliranje



tečenja fluida i transport čestica, kao i pronosa topline u podzemlju, koji je razvijen od strane njemačke tvrtke DHI-WASY GmbH.

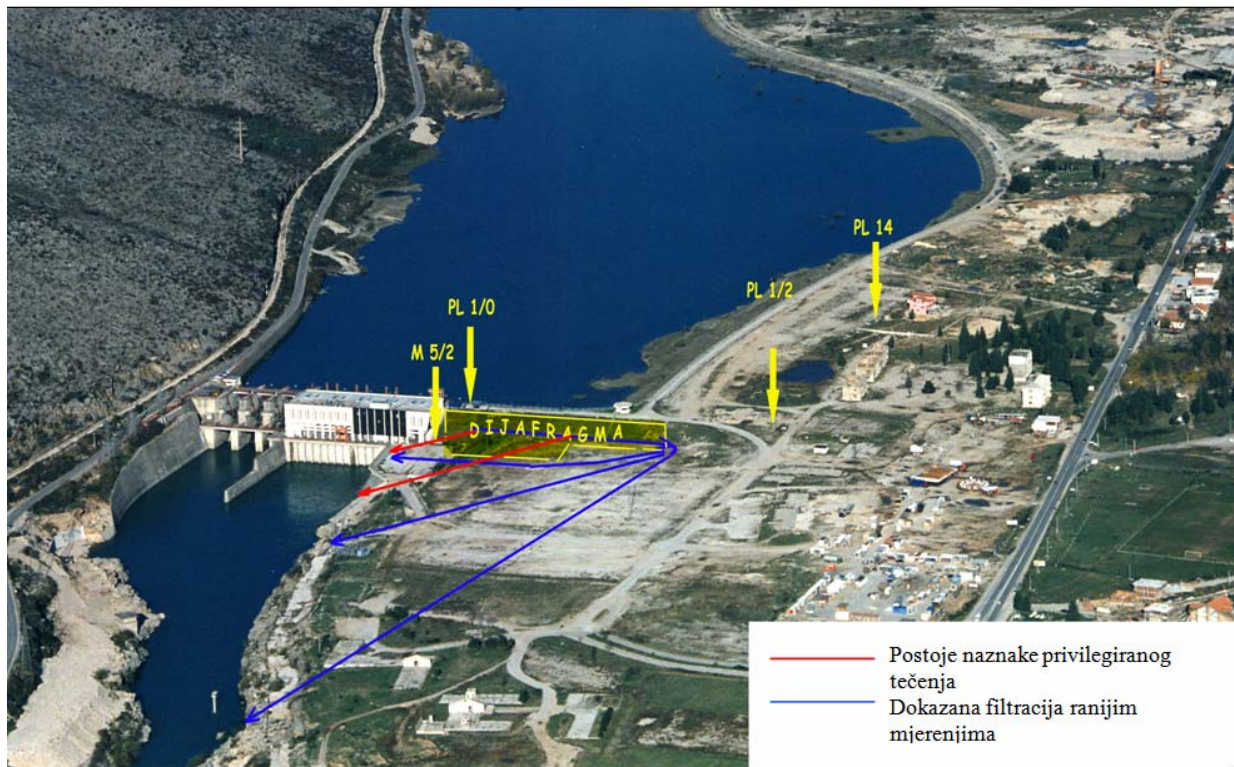
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Hidroelektrana Mostar je pribransko akumulacijsko postrojenje s pregradnim objektom, lociranim oko 6 km uzvodno od Mostara. To je posljednja stepenica projekta Srednja Neretva i ujedno najnižvodnije postrojenje u nizu hidroelektrana na Neretvi uzvodno od Mostara. Sa svojim akumulacijskim bazenom korisne zapremine $6,37 \times 10^6 \text{ m}^3$, HE Mostar omogućava pogodan energetski režim rada HE Salakovac uzvodno [1].



Slika 1. Hidroelektrana Mostar s lijevim zaobaljem [1]

Brana je kombiniranog tipa s dvije konstruktivne i funkcionalne cjeline: betonska gravitacijska brana sa strojarnicom u koritu Neretve i evakuacijskim blokom u desnom boku i nasuti dio brane u lijevom boku koji kružno prelazi u obrambeni nasip. Dio terena na lijevoj obali je niži od usvojene kote uspora, pa je stoga izgrađen obrambeni nasip duž lijeve obale u dužini 2500 m. Blok s evakuacijskim organima lociran je u sklopu betonskog dijela brane na desnoj obali, a evakuacija velikih voda riješena je s tri preljevna polja ukupne propusne moći $3070 \text{ m}^3/\text{s}$ i temeljnim ispustom od $180 \text{ m}^3/\text{s}$. Strojarnica s tri agregata instaliranog protoka $3 \times 120 \text{ m}^3/\text{s}$ čini s branom konstrukcijsku cjelinu. Visina brane od najniže točke temeljenja je 44 m, a dužina bazena je 11 km i u najvećem je dijelu u koritu Neretve. Kota normalnog uspora je 78 m n. m., a minimalna radna razina je na koti 72 m n. m.



Slika 2. HE Mostar - prikaz podzemnih vodnih veza [1]

Od podzemnih objekata na ovoj hidroelektrani izveden je kombinirani protufiltracijski ekran. Na desnom boku, ispod betonskog dijela brane i evakuacijskog organa izvedena je injekcijska zavjesa, a ispod nasute brane je kombinacija zaštite s dijafragmom i manjim dijelom s injekcijskom zavjesom. Injekcijska zavjesa je uspješno završena, što su pokazale kontrolne bušotine, dok je dijafragma rađena u složenim geološkim uvjetima i pratile su je razne poteškoće. Primijenjena nova tehnologija nije bila u potpunosti usavršena, pa se time dodatno otežavao iskop za dijafragmu [1].

Izgradnja HE Mostar otpočeta je 1983. godine i svi su objekti završeni do 1987. godine, kada je elektrana puštena u rad. Tijekom ratnih događanja, HE Mostar je bila izvan pogona i temeljito devastirana. Sredinom 1996. godine počeli su radovi na revitalizaciji objekta, odnosno postrojenja i elektrana je ponovo puštena u redoviti pogon krajem 1997. godine. Po programu revitalizacije planirana su, a obzirom da je dio objekta u lijevoj obali učinjen dostupnim za uspostavu cjelovitog sustava tehničkog motrenja (prostor lijevog zaobalja, nasuti dio brane i dio lijeve obale nizvodno) i velikim dijelom obavljena terenska istraživanja u ovom prostoru [30].

Izgradnjom HE Mostar i podizanjem razine vode u koritu Neretve na projektiranu kotu uspora od 78,00 m n. m. promijenili su se uvjeti 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 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 izraženi.



Rezultati razmatranja izvršenih tijekom istražnih radova prije izgradnje HE Mostar koji su nadopunjeni rezultatima kasnijih istraživanja u periodu od 2003. godine do danas predstavljaju osnovu za postavke stacionarnog prostornog modela strujanja podzemnih voda koji je predmet ovoga rada.

Pri planiranju i izgradnji postrojenja hidroelektrane Mostar, kota uspora u akumulacijskom bazenu definirana je na 78,0 m n.m. Ovim usvojenim usporom vode na pregradnom profilu HE Mostar, područje lijevog zaobalja površine oko 42 ha, koje je na kotama ispod 78,0 m n.m., je potopljeno. Uz to je znatan dio nepotopljenog područja izložen nepovoljnim utjecajima podzemnih i površinskih voda.

3. METODOLOGIJA I CILJ RADA

Sagledavajući problematiku, urađena je analiza hidrauličkih odnosa u promatranom području koja je urađena na osnovu postojećih raspoloživih podataka. Analiza se sastojala od slijedećeg:

- Formiranje prostornog stacionarnog matematičkog modela za analizu područja i intenziteta tečenja podzemnih voda u lijevom zaobalju HE Mostar. Simuliranje stanja potencijala na razmatranom području uz unošenje vrijednosti za gornju i donju vodu na HE Mostar. Sve je urađeno za određeni broj karakterističnih poprečnih profila, za koje postoje hidrogeološki podaci.
- Koeficijenti filtracije su kvalitativno pridruženi prema opisu hidrogeoloških značajki bušotina. RPV u poznatim bušotinama je poslužila za verifikaciju modela.

Rezultati razmatranja izvršenih tijekom istražnih radova prije izgradnje HE Mostar koji su nadopunjeni rezultatima kasnijih istraživanja u periodu od 2003. godine do danas predstavljaju osnovu za postavke stacionarnog prostornog modela tečenja podzemnih voda koji je predmet rada.

Baza podataka je napravljena na osnovu podataka prikupljenih prije, tijekom i neposredno nakon izgradnje i puštanja u pogon HE Mostar. Ta baza podataka je dopunjena s podacima koji su dobiveni tijekom istražnih radova koji su počeli 2003. godine i još uvijek traju, a rađeni su za potrebe obnove sustava tehničkog monitoringa HE Mostar i lijevog zaobalja HE Mostar.

Cilj rada je, na osnovu baze postojećih podataka, odrediti dominantne pravce tečenja u lijevom zaobalju HE Mostar, kako bi bilo moguće odrediti količine voda koje se procjeđuju, kao i njihov utjecaj na stabilnost tla u lijevom zaobalju.

Kako bi se uspješno riješio zadatak istraživanja i ostvarili ciljeve i svrhu istraživanja, bilo je potrebno:

- Razumjeti uzroke koji dovode do tečenja podzemnih voda;
- Definirati područje i uvjete tečenja podzemnih voda;
- Objasniti karakteristike vodonosnika, kao i okolnog područja;
- Objasniti rubne uvjete i ograničenja i zašto se moraju poštivati;
- Istaknuti važnost analize tečenja podzemnih voda s aspekta globalne stabilnosti tla;
- Objasniti važnost monitoringa razine podzemnih voda u blizini hidrotehničkih objekata, kao i značaj formiranja i obnavljanja baza podataka.

U okviru rada opisane su fizikalne karakteristike tečenja podzemnih voda, dane su matematičke formulacije istih, a potom je na primjeru lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar na rijeci Neretvi korištenje programskog paketa FEFLOW urađen prostorni stacionarni model tečenja podzemnih voda. Analizirani su rezultati proračuna i izvedeni su zaključci istraživanja.

Metodologija izrade rada zasnivala se na:

- Proučavanju odgovarajućih izvora literature vezanih za razmatranu problematiku.



- Prikupljanju, sistematizaciji i analizi raspoloživih podataka iz prethodnih istraživanja i projekata u cilju definiranja stanja podzemnih voda u podzemlju lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar.
- Prikupljanju ostalih podataka potrebnih za istraživanje i postavku numeričkog modela .
- Formiranju i primjeni numeričkog modela implementiranog u programski paket FEFLOW za simulaciju sadašnjeg i prognozu budućeg stanja razina i količina podzemnih voda na području.

4. REZULTATI TERENSKIH ISTRAŽIVANJA

Pregled dosadašnjih istražnih radova na području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar je predstavljen po vrsti istraživanja:

- Geologija i geofizika,
- Trasiranja i
- Hidrodinamička istraživanja.

I po periodu istraživanja:

- Period prije puštanja u pogon hidroelektrane Mostar, tj. do 1987. godine, i
- Period istraživanja započelih 2003. godine, koja su imala za cilj obnovu sustava tehničkog promatranja i istraživanje stanja u području brane i lijevog zaobalja HE Mostar.

Specifična geološka građa terena, posebno na lijevoj obali, odredila je opsežne istražne radove koji su otpočeti još 1971. god. Prije izgradnje trebalo je riješiti dva osnovna problema i to: odabir pregradnog profila za smještaj brane i strojare i problem zaštite lijevog zaobalja. Istražni radovi su rađeni sukcesivno i korištene su sljedeće metode:

- detaljno geološko kartiranje,
- istraživanja bušenjem i ispitivanje VDP metodom "Lugeon",
- istraživanje istražnim potkopima,
- ispitivanje koeficijenta filtracije terasnog materijala metodom "La Franc",
- ispitivanje koeficijenta filtracije (k) i stupnja anizotropije u terasnim materijalima, metodom utiskivanja zraka na 5 lokaliteta,
- geofizička ispitivanja seizmičkom i geoelektričnom metodom,
- geotehnička ispitivanja deformabilnosti i posmičnih karakteristika osnovne stijene,
- geomehanička ispitivanja kvartarnih naslaga,
- utvrđivanje režima podzemnih voda u području brane i u zaobalju,
- utvrđivanje podzemnih vodnih veza i
- paleontološka ispitivanja.

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. Rezultati svih metoda istraživanja prikazani su u mnogobrojnim izvješćima i elaboratima i korišteni su najviše za projektiranje protufilterskih ekrana.

Zaključci prethodnih terenskih istraživanja [1] su:

1. Provedena hidrodinamička istraživanja na prostoru oko nasutog dijela brane i dijafragme HE Mostar, s kvalitativnim ispitivanjima na uzorcima procjednih voda potvrdila su mogućnost pojave i razvoja sufozijskih i erozijskih procesa.
2. Posebnu pažnju je potrebno posvetiti dijafragmi, s ciljem utvrđivanja eventualnih deformacija, proboja, kao i opće propusnosti.



Utvrđena sniženja razine podzemnih voda ukazuju da se vremenom propusnost osnovne sredine kroz koju struji podzemna voda povećava, što se može pripisati erozijskim i sufozijskim procesima.

3. Na osnovu analize taloga s dna većine piezometara potvrđen je utjecaj erozijskih i sufozijskih procesa. Izravno su uočena područja s pojačanim ispiranjem čestica finog

materijala kako iz kvartarne terase, tako i iz nasipa u lijevom boku brane. Uglavnom se radi o fino ispranom krupnozrnomo pijesku bez ili s malo mulja. Porast razine taloga u ispitivanim piezometrima iznosi od nekoliko centimetara u nasipu brane (profil PI), pa do nekoliko decimetara u terasi nizvodno od nasutog dijela brane (profil PII).

4. Rezultati najnovijih video-endoskopskih istraživanja u piezometrima lijevog boka brane potvrdili su pravce podzemnog otjecanja utvrđene na temelju analize rezultata iz prethodnog perioda.

5. OPIS MODELA

Matematički modeli tečenja podzemnih voda se koriste od kasnih 1800-ih godina. Matematički model se sastoji od skupa diferencijalnih jednačbi za koje se zna da se mogu primijeniti za tečenje podzemnih voda. Pouzdanost predviđanja koja proizlazi iz modela podzemne vode ovisi o tome koliko dobro model aproksimira situaciju na terenu. Da bi se izradio model, neizbježno se moraju napraviti pojednostavljujuće pretpostavke, pošto je situacija na terenu previše složena da bi se točno simulirala. Obično su pretpostavke potrebne da se neki matematički model riješi analitički prilično restriktivne - na primjer, mnoga analitička rješenja zahtijevaju da sredina bude homogena i izotropna. Za razmatranje realnih situacija, obično je potrebno riješiti matematički model približno koristeći numeričke tehnike. Od 1960-ih, kada su brza digitalna računala postala široko dostupna, numerički modeli su bili poželjna vrsta modela za proučavanje podzemnih voda [2].

5.1 Programsko rješenje FEFLOW

FEFLOW 6 simulacijski paket se sastoji od sljedećih glavnih programa skupa s programskim dodacima:

- FEFLOW 6 je interaktivni simulacijski sustav koji se zasniva na metodi konačnih elemenata i služi za 2D i 3D modeliranje tečenja, modeliranje procesa pronosa topline i mase u podzemnim vodama, kao i u nezasićenim zonama.
 - FEFLOW Viewer je alat za 3D vizualizaciju i izradu animacija za modele urađene u FEFLOWu, kao i za prezentaciju rezultata modeliranja.
 - FEPlot je potprogram za pripremanje tekstualnih dokumenata, karata sadržanih od vektorskih podloga i grafičkih elemenata za ispis, a koristi se jer FEFLOW ne omogućuje opcije za ispis.
 - WGEO 6 je sofisticiran program za georeferenciranje, geokodiranje i transformaciju koordinata kojeg je razvila tvrtka WASY GmbH.
- FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) je interaktivni sustav za modeliranje podzemnih voda i koristi se za:
- trodimenzionalnu i dvodimenzionalnu analizu,
 - tlocrtnu i analizu po presjecima (horizontalnim, vertikalnim ili aksisimetričnim),
 - analizu fluida različitih gustoća, kao i termohalina, povezanih ili nevezanih,
 - analizu promjenljivo zasićenog tla,



- prijelazno ili ustaljeno stanje,
 - pronos toka, mase i toplote,
 - pronos više vrsta reaktora
- i to za podzemne vode s ili bez više slobodnih površina.

FEFLOW ima primjenu u definiranju prostorne i vremenske raspodjele onečišćenja podzemnih voda, kod modeliranja geotermalnih procesa, za procjenu trajanja i puta zagađivača u vodonosnicima, za planiranje i projektiranje strategija saniranja zagađenja i tehnika zaustavljanja širenja istoga, koristi se i kao pomoć kod određivanja alternativnih i efektivnih sustava monitoringa.

Uz pomoć sofisticirane međusobne veze između FEFLOWa i GIS-aplikacija kao što su: ArcInfo, ArcView i ArcGIS vektorski formati i grid-formati su također dostupni.

Integrirani Interface Manager (IFM) omogućuje međusobnu vezu između vanjskog koda ili čak vanjskih programa i FEFLOWa. Koristi se za primjenu procjenu parametara PEST u FEFLOWu.

FEFLOW je dostupan za WINDOWS sustave, kao i za različite platforme UNIXa.

Od kada je objavljen (1979. godine) FEFLOW je besprekidno bio poboljšavan. Izvorni kod FEFLOWa je pisan u ANSI C/C++ i sadrži više od 1300000 redaka. FEFLOW se koristi širom svijeta kao vodeći software za modeliranje podzemnih voda na sveučilištima, istraživačkim ustanovama, državnim institucijama i inženjerskim poduzećima.

6. KONCEPTUALNI MODEL

U svrhu definiranja raspodjele akumulacijskih i transportnih karakteristika sredine formiran je trodimenzionalni model lijevog zaobalja HE Mostar (HEMO). Za formiranje modela bila je na raspolaganju projektna dokumentacija i podloge koje su dobivene na posudbu za potrebe izrade magistarskog rada od JP Elektroprivrede HZ H-B Mostar.



Slika 3. Položaj razmatranog područja s ucrtanom granicom modela



Slika 4. Mreža trokutnih konačnih elemenata na tlocrtnom modelu područja HEMO

Kako bi se dobile neophodne informacije o količini vode koja struji oko ove zavjese, izvršen je proračun razina podzemne vode u području dužine 860 m (po 260 m uzvodno i 600 m nizvodno od pregradnog profila) i širine oko 400 m. Napravljen je trodimenzionalni stacionarni matematički model. Postavljanjem Darcyevog zakona filtracije i jednadžbe kontinuiteta za svaku elementarnu prizmu, dobio se izraz za razinu podzemne vode u jednoj točki, ovisno o razini u svim susjednim točkama – središtima elementarnih prizmi.

Prvi korak u formiranju modela sastojao se u tome da se iz cjeline područja izdvoji područje od interesa za modeliranje. Ono je sa zapadne strane ograničeno rijekom Neretvom, dok se istočna granica pruža paralelno trasi magistralnog puta M17 profilom koji je nastao spajanjem lokacija bušotina u kojima je poznata RPV za određenu vrijednost gornje vode i donje vode HE Mostar. Sa sjevera područje je ograničeno profilom paralelnim osi brane na udaljenosti 260 m uzvodno od HE Mostar.

Profil je određen spajanjem mjesta bušotina s poznatim RPV i/ili koeficijentom filtracije na osnovu podataka ranijih terenskih istraživanja. Južna kontura područja se nalazi oko 600 m nizvodno od HE Mostar na profilu paralelnom osi brane koji je određen spajanjem lokacija poznatih bušotina.

Izdvojeno područje je diskretizirano mrežom trokutnih konačnih elemenata. Treća dimenzija modela je definirana dodavanjem 4 različita sloja materijala. Svakom sloju je pridružen određeni koeficijent filtracije. Interakcija između odbačenog i modeliranog područja nadomještena je početnim i rubnim uvjetima.

Područje je diskretizirano trokutnim prizmatičnim konačnim elementima. Broj čvorova po elementu je 6. Broj elemenata po sloju je 182048. Ukupan broj konačnih elemenata unutar domene prostornog modela je 728192, a ukupan broj čvorova je 504905.

Razmatrano je stacionarno tečenje u zasićenom vodonosniku sa slobodnom površinom.

Rubni uvjeti su zadani kao apsolutna vrijednost kote gornje vode HE Mostar i nizvodno od HE, zadana je kota najvišeg aktivnog reda barbakana i dalje se nastavlja rubni uvjet – donja voda HE Mostar. Sjeverna, istočna i južna kontura modela je zadana slobodno u modelu, što znači da je moguće i dotjecanje i otjecanje prema/od konture.



Treća dimenzija modela je određena definiranjem 4 sloja materijala na 23 bušotine (čvora) raspoređenih po čitavom području. Za te bušotine postoji detaljan opis geoloških profila. Na osnovu tih podataka, cijelo područje je interpolirano Kriging metodom regionalizacije. Vrijednosti koeficijenata filtracije su kvalitativno pridruženi određenim slojevima i/ili bušotinama na osnovu analize geoloških istražnih radova na području kroz dugi niz godina.

Tablica 1. Materijali na geološkim profilima

OZNAKA SLOJA (LAYER)	LITOLOŠKI SASTAV	HIDROGEOLOŠKA FUNKCIJA	KOEFICIJENT FILTRACIJE [m/s]
1	Diluvijalni terasni materijal i šljunak i pijesak sa slabim glinovito-karbonatnim 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	Djelomično 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	$K_{xx} = K_{yy} = 10^{-6}$ $K_{zz} = 10^{-7}$



Slika 5. Označeni čvorovi u kojima su definirani početni i rubni uvjeti

6.1 Analiza osjetljivosti

Unutar područja modela su obilježene kontrolne točke (čvorovi) koji imaju svrhu validacije modela. U tim točkama je poznato piezometarsko stanje za postavljene rubne uvjete (RV uzvodno i nizvodno od HE Mostar) i te točke služe za usporedbu rezultata dobivenih modeliranjem i vrijednosti RPV koja je izmjerena na piezometru.

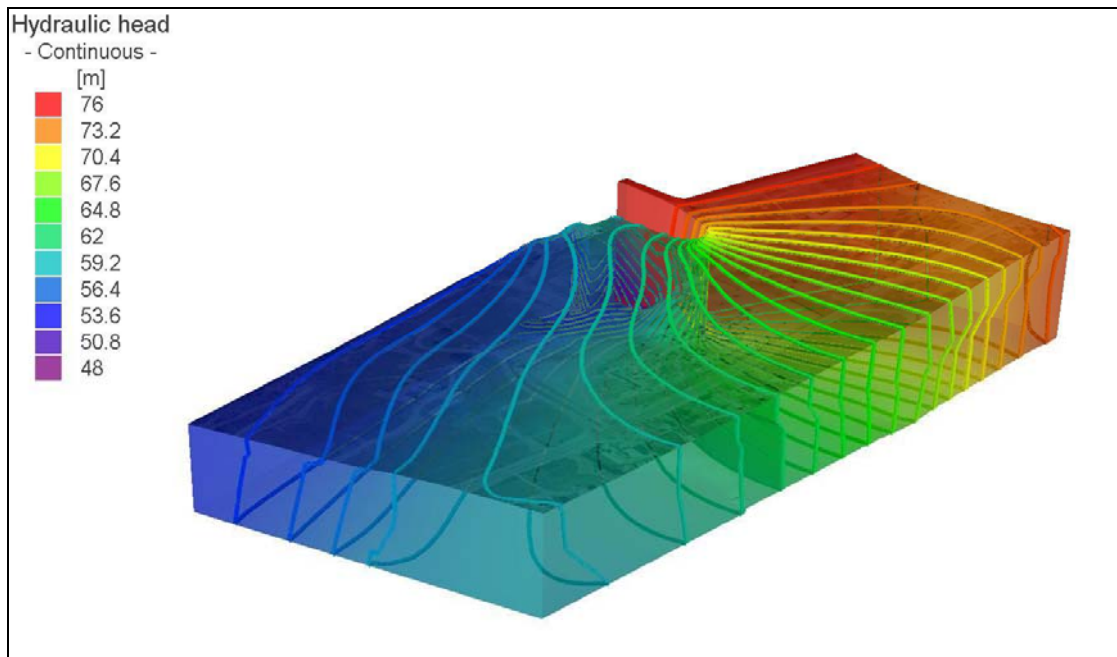
Simulacije su bile rađene sve dok nisu dobiveni zadovoljavajući rezultati. Prije početka modeliranja, nije urađena provjera podataka s terena, pa su odstupanja u početnim simulacijama bila uzrokovana djelomično netočnim kontrolnim vrijednostima, a ne greškom u postavci modela.



Slika 6. Položaj kontrolnih točaka

7. REZULTATI MODELA

Nakon definiranja područja obuhvata prostornog modela, karakteristika slojeva tla i početnih i rubnih uvjeta, započeta je simulacija modela za stacionarno strujanje u neograničenom slobodnom vodonosniku.



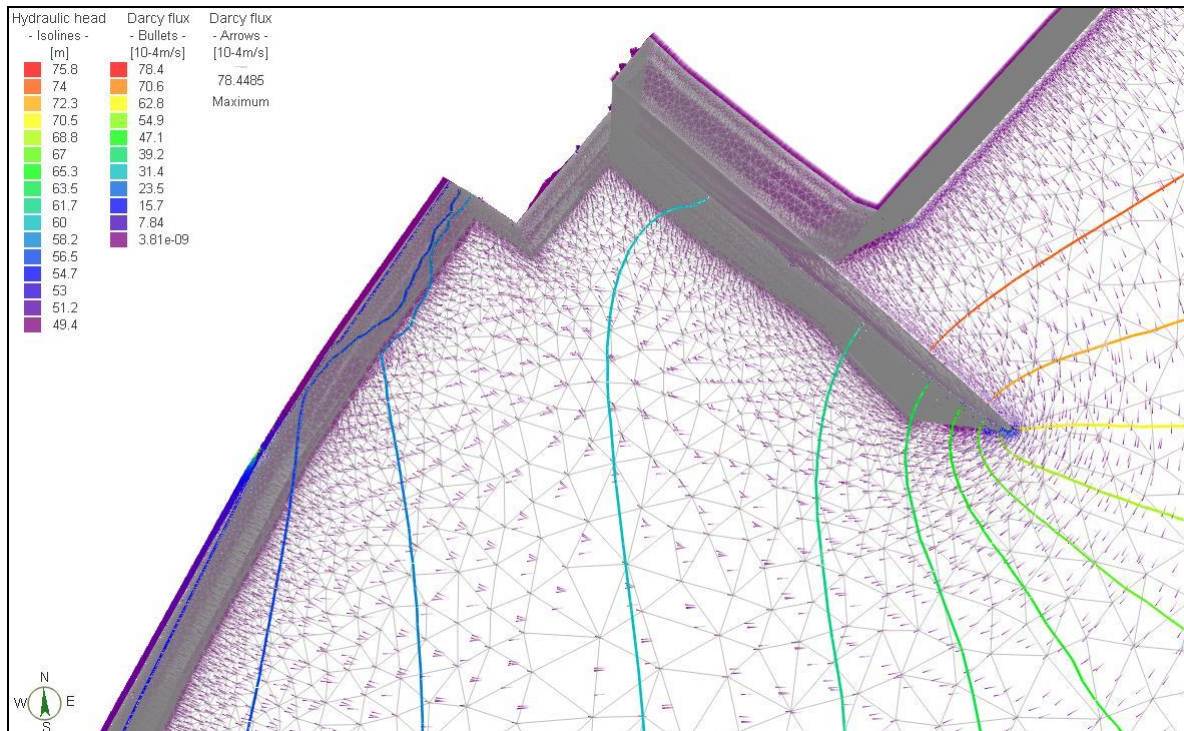
Slika 7. Površine jednakih potencijala – prostorni prikaz

Predstavljeni su rezultati brzina tečenja podzemnih voda za svaki sloj posebno i za područje oko dijafragme radi velikih hidrauličkih gradijenata. Tablica 2. pokazuje maksimalne vrijednosti brzina tečenja za svaki sloj posebno.

Tablica 2. Maksimalne vrijednosti brzine tečenja

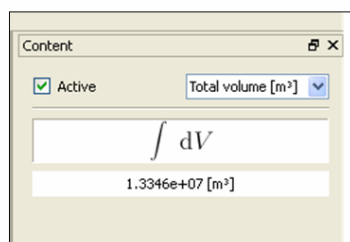
Sloj	Maksimalna vrijednost brzine (m/s)
1	$7,84 \cdot 10^{-3}$
2	$3,03 \cdot 10^{-3}$
3	$1,03 \cdot 10^{-4}$
4	$8,97 \cdot 10^{-5}$

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.

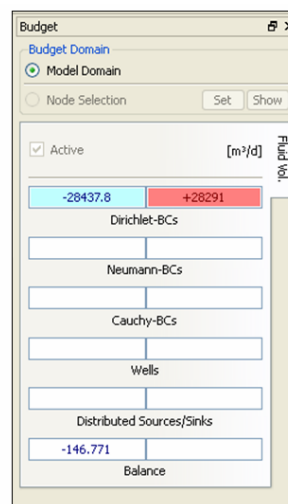


Slika 8. Raspored brzina tečenja oko dijafragme

Na slici 11 pokazano je područje na kojem voda utječe i istječe iz modeliranog sustava. To je rub modela koji graniči s koritom rijeke Neretve, nizvodno od hidroelektrane Mostar. Ukupna količina vode koja ulazi u modelirano područje i izlazi iz sustava je prikazana na slikama 9 i 10 u obliku tablica koje su dio rezultata proračuna u programskom paketu FEFLOW.



Slika 9. Ukupna količina voda koja protječe kroz domenu modela

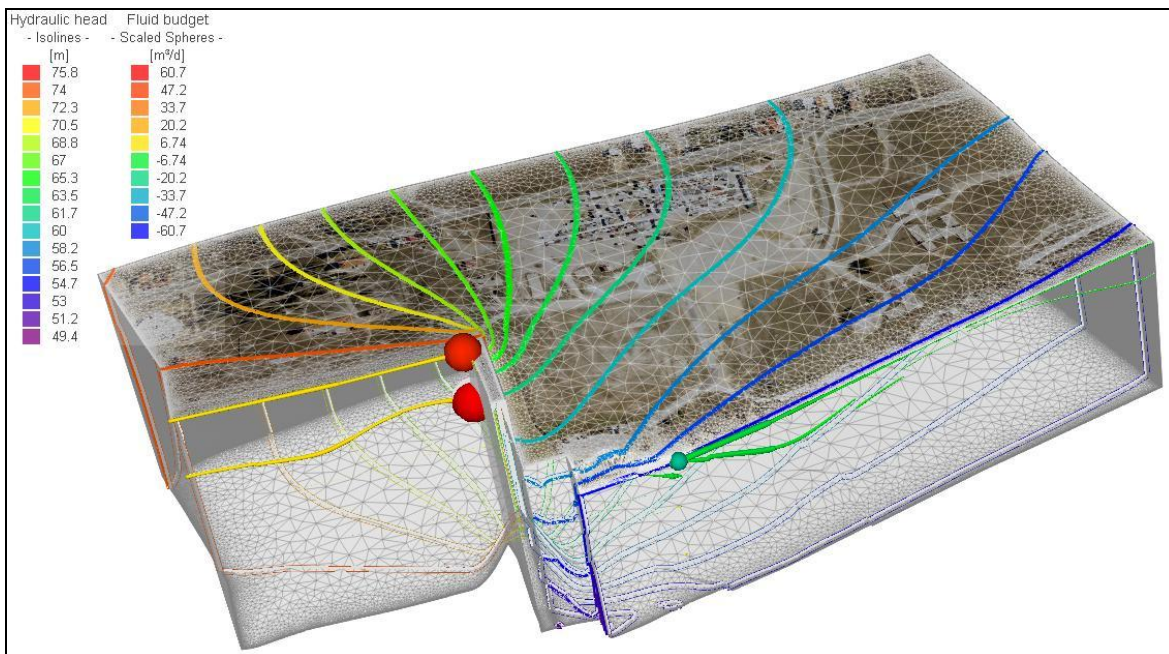


Slika 10. Balans protoka u domeni modela



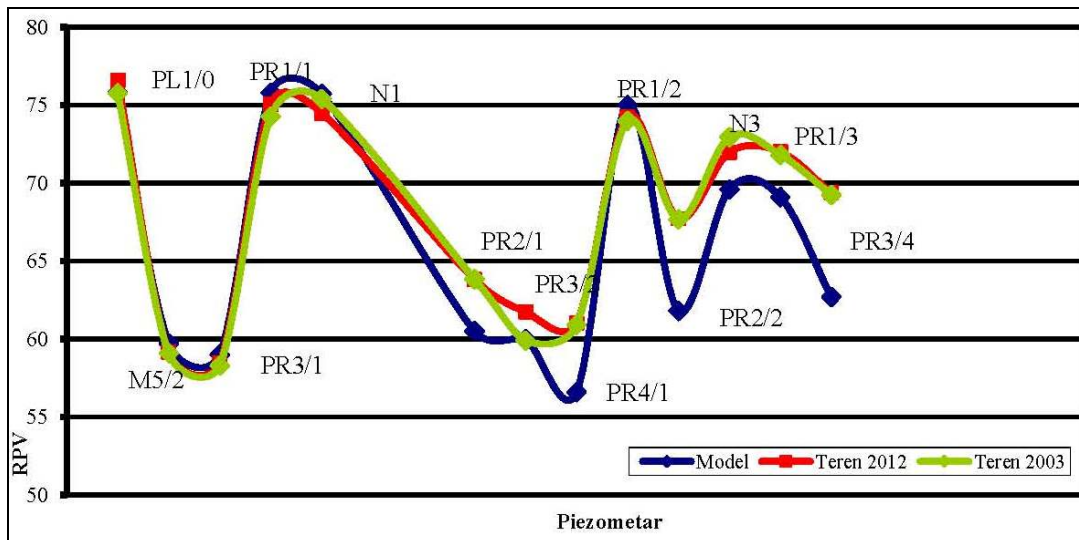
U proračun nije uzeta u obzir količina vode koja dotječe s istočnog oboda Bijelog polja iz razloga jer ta količina ne utječe na tečenje podzemnih voda u području oko dijafragme, nego ima utjecaj na tečenje nizvodno od dijafragme. Na osnovu analiza ranijih proračuna tečenja na području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar, ustanovljeno je kako su dotoci u sustav mali u odnosu na količine vode koja istječe prema koritu rijeke Neretve.

Za usporedbu rezultata razina podzemnih voda na području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar korištene su kontrolne točke poznatih prostornih koordinata. Te točke su unesene u mrežu konačnih elemenata kako bi se u njima dobile vrijednosti potencijala, te usporedile s vrijednostima koje su mjerene na terenu u sklopu redovitog monitoringa RPV na području hidroelektrane Mostar. Očekivalo se da vrijednosti RPV dobivene u modelu budu niže od vrijednosti izmjerenih na terenu iz razloga što uređaj za mjerenje RPV prilikom mjerenja u zacijevljenim perforiranim piezometrima očitava vrijednost pri prvom kontaktu s vodom, a to može biti i područje istjecanja iz perforacije koja je smještena na višoj razini nego što je ustaljena razina vode u piezometru.



Slika 11. Prostorni prikaz mjesta utjecanja i istjecanja u razmatrano područje s naznačenim ekvipotencijalama

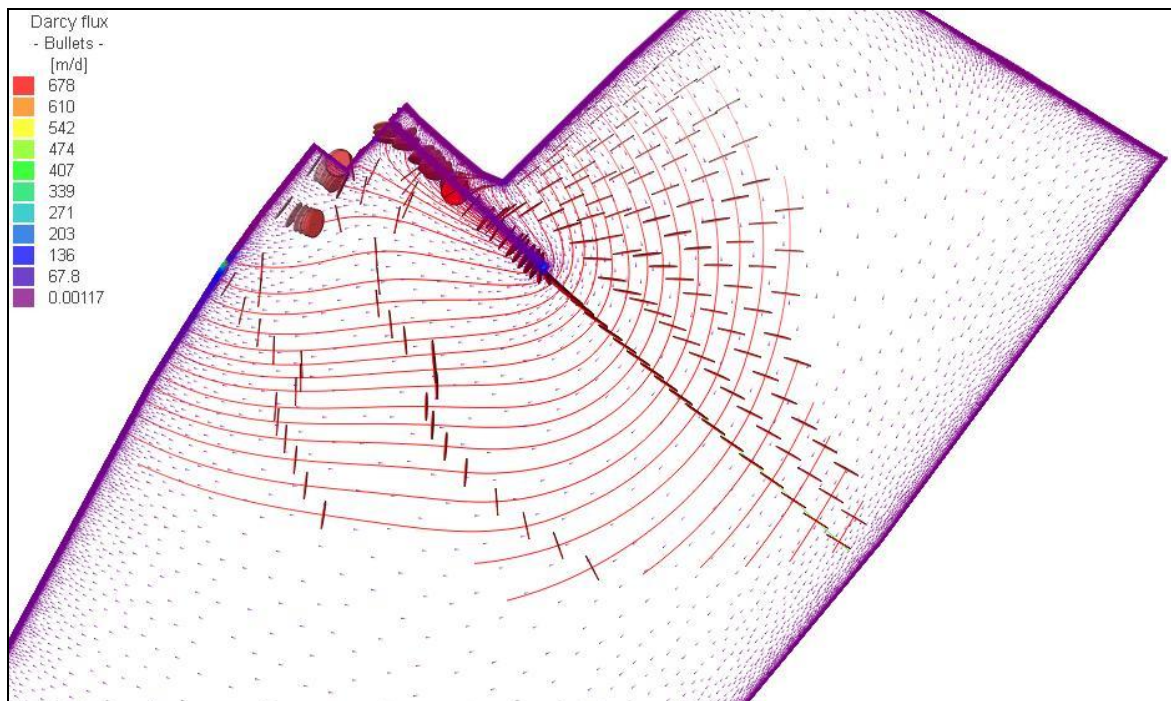
Mogu se primijetiti veća odstupanja na piezometrima koji su smješteni na i neposredno blizu profila dijafragme. Ta odstupanja nastaju iz razloga neposredne veze između razine gornje vode, odnosno razine vode u akumulaciji i razine vode u tim piezometrima. Oscilacije su svakodnevne i ovise o radu hidroelektrane. Model je stacionaran i daje vrijednost RPV samo u jednom vremenskom trenutku, pa je to jedan od razloga neslaganja vrijednosti.



Slika 12. Usporedba rezultata RPV dobivenih numeričkim modelom i rezultata mjerenih na terenu u dva navrata

Trasiranja iz 1989. godine na području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar [1] koja su rađena us cilju utvrđivanja brzina tečenja u podzemlju lijevoga zaobalja pokazala su kako je maksimalna brzina kretanja trasera 0,1 m/s na području od čela dijafragme prema drenažnom ispustu nizvodno od lijevog obalnog zida. Na ostalom području brzine kretanja

trasera su iznosile od $3 \cdot 10^{-3}$ m/s do $3 \cdot 10^{-2}$ m/s. Slika 13 pokazuje strujnu sliku oko dijafragme dobivenu programskim paketom FEFLOW.



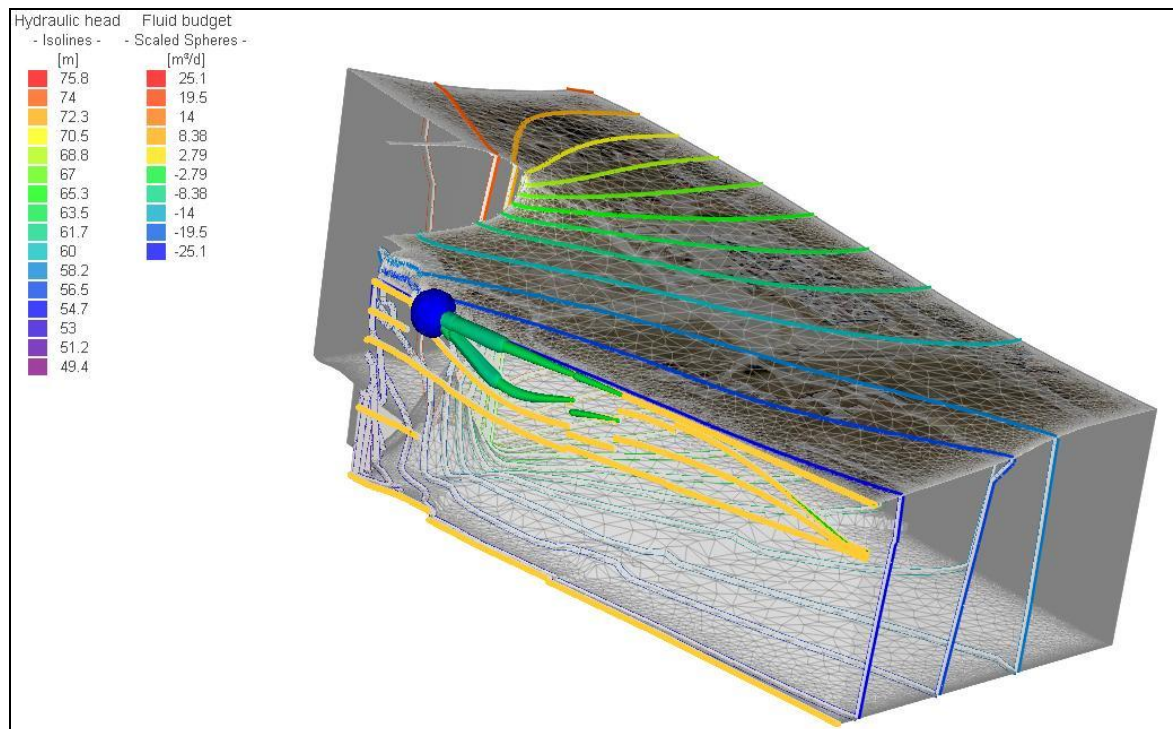
Slika 13. Strujna slika oko dijafragme

Prema rezultatima geofizičkih istraživanja koja su rađena tijekom 2003. godine na području lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar [1], efektivna brzina tečenja podzemnih voda na mjestu proboja dijafragme je $v_{ef} = 6,6 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Model koji je predmet ovoga magistarskog rada je rezultirao s maksimalnom vrijednošću brzine na mjestu istjecanja iz drenažnog kanala od $7,84 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Prema hidrološkim volumnim mjerenjima izdašnosti na barbakanama (otvorima) na lijevom obalnom zidu nizvodno od hidroelektrane Mostar (HEMO) koja su rađena u sklopu istraživanja za potrebe obnove sustava monitoringa na HEMO [1] i procjene količina vode koja se javljaju na vrelima nizvodno od lijevog obalnog zida HEMO, ukupna količina vode je iznosila približno 348,40 l/s.

Modeliranje u FEFLOWu je dalo vrijednost na rubu modela koji graniči s koritom rijeke Neretve količinu vode koja se procjeđuje od 326,01 l/s. Na slici 7.8 su na prostornom prikazu naznačeni čvorovi u kojima dolazi do istjecanja vode iz sustava. Zbroj količina vode koja istječe u tim čvorovima je jednak gore navedenoj vrijednosti od 326,01 l/s.



Slika 14. Čvorovi u kojima je registrirano istjecanje procjednih voda

8. 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.

Imajući u vidu izrazitu nehomogenost razmatranog prostora, kao i složene rubne uvjete, odabrana metoda matematičkog modeliranja korištenjem programskog rješenja FEFLOW se pokazala kao veoma praktična za analizu tečenja podzemnih voda.

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

Uz točno definiranu geometriju područja, kao i detaljno obrađene raspoložive geološke podatke s velikom broja bušotina na području, moguće je dobiti kvalitetnu predodžbu stanja podzemnih voda.



Posebnu pozornost je potrebno obratiti na vjerodostojnost podataka koji nam služe za provjeru modela. Prije usvajanja ulaznih parametara potrebno je uraditi kalibraciju postojećih podataka koji će vjerojatno biti referentni podaci za kontrolu rezultata modela. Slučaj kada je moguće usporedno s istraživanjima na terenu, formirati model tečenja podzemnih voda je najprikladniji za hidrodinamičku analizu, ali je, rijetko izvodljiv.

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

Model je također polazna točka za analizu rizika zagađenja, odnosno pronos zagađenja kroz podzemlje prema rijeci Neretvi koja nizvodno od razmatranog područja prolazi kroz grad Mostar. Obzirom na neposrednu blizinu magistralnog puta Mostar-Sarajevo, kao i blizinu gradske deponije otpada Uborak, koji su potencijalni izvori zagađenja područja, na

odgovarajući način je moguće simulirati bilo kakvu incidentnu situaciju na ta dva lokaliteta koja bi mogla dovesti u opasnost područje od zagađenja.

Preporuka za buduća istraživanja je da se kontinuirano nastavi s dopunjavanjem baze podataka dobivenih s terena koji bi mogli poslužiti za što točnije definiranje stvarnog stanja u podzemlju lijevog zaobalja hidroelektrane Mostar. Podaci se tada mogu iskoristiti za dopunjavanje modela, a i za provjeru dobivenih rezultata u budućim modelskim istraživanjima.

LITERATURA

1. Projektna i arhivska dokumentacija vezana za HE Mostar
2. W. Kinzelbach: "Groundwater Modelling - An Introduction with Sample Programs in BASIC", Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 1986.
3. M. Raič: "Određivanje područja i intenziteta procjeđivanja u lijevom zaobalju brane hidroelektrane Mostar", Magistarski rad (FGAG Sveučilišta u Splitu), 2012.
4. H.-J. G. Diersch: "DHI-WASY Software FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System Reference Manual", DHI-WASY GmbH, Berlin, Germany, 2009.
5. J. Bear, A. Verruijt: "Modeling Groundwater Flow and Pollution", Reidel Publ., Holland, 1987.