ANALIZA STRUJANJA PODZEMNIH VODA NA PODRUČJU PROJEKTIRANOG DONJEG KOMPENZACIJSKOG BAZENA CHE VRILO

Stručni rad/Professional paper
Primljen/Received: 23. 10. 2018.
Prihvaćen/Accepted: 30. 11. 2018.

doc. dr. Mirna Raič, dipl. ing. građ.
Anja Palac, mag. građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Sažetak: Ovaj rad daje prikaz istraživanja urađenoga u sklopu izrade diplomskoga rada pod naslovom: „Hidraulička studija strujanja podzemnih voda na području donjeg kompenzacijskog bazena CHE Vrilo“, a koji je urađen i uspješno obranjen na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Mostaru 2018. godine. Zadatak je bio formirati prostorni model ustaljenog strujanja podzemnih voda na području projektiranoga donjeg kompenzacijskog bazena crpne hidroelektrane Vrilo, temeljem podataka istraživanja na terenu i podataka iz idejnog projekta CHE Vrilo.

Ključne riječi: donji kompenzacijski bazen, crpna hidroelektrana Vrilo, strujanje podzemnih voda, DHI WASY FEFLOW 7.0, numerički model

ANALYSIS OF GROUNDWATER FLOWS IN THE AREA OF THE DESIGNED PSPP VRILO LOWER BALANCING RESERVOIR

Abstract: This paper gives an overview of the research conducted as part of the graduation thesis titled: "The hydraulic study of groundwater flows in the area of the lower PSPP Vrilo balancing reservoir", which was developed and successfully defended at the Faculty of Civil Engineering University of Mostar in 2018. The task was to develop a spatial model of steady groundwater flows in the area of the designed lower balancing reservoir of the Vrilo pumped-storage power plant, based on field investigation data and data from the PSPP Vrilo preliminary design.

Key words: lower balancing reservoir, Vrilo pumped-storage power plant, groundwater flow, DHI WASY FEFLOW 7.0, numerical model

1. UVOD

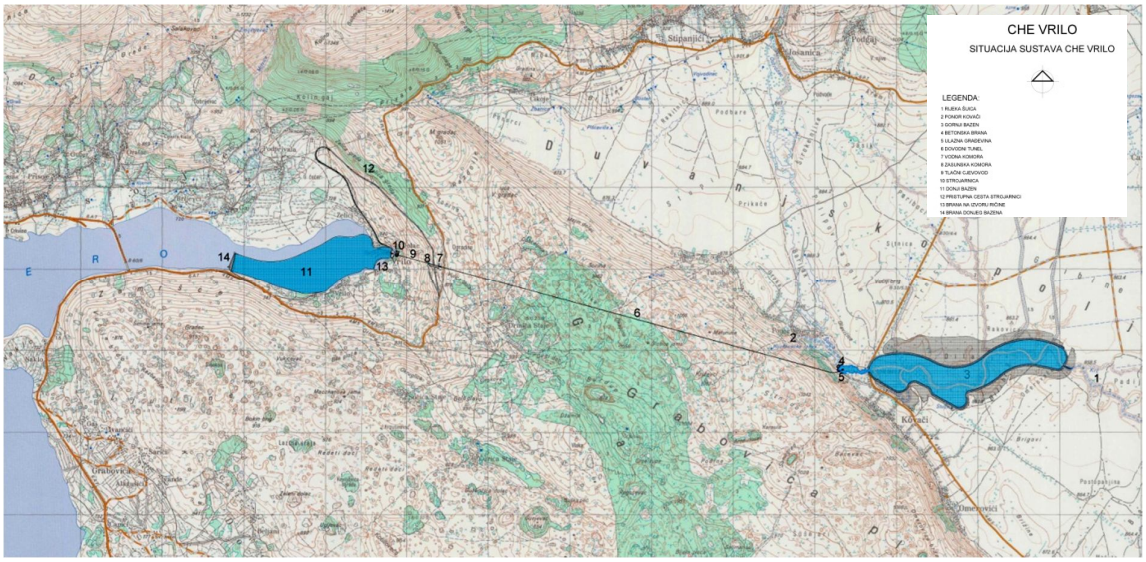
Ovaj rad daje prikaz istraživanja urađenoga u sklopu izrade diplomskoga rada pod naslovom: „Hidraulička studija strujanja podzemnih voda na području donjeg kompenzacijskog bazena CHE Vrilo“, a koji je urađen i uspješno obranjen na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Mostaru 2018. godine. Zadatak je bio formirati prostorni model ustaljenog strujanja podzemnih voda na području projektiranoga donjeg kompenzacijskog bazena crpne hidroelektrane Vrilo, temeljem podataka istraživanja na terenu i podataka iz idejnog projekta CHE Vrilo.

Lokacija projektirane crpne hidroelektrane Vrilo je na području općine Tomislavgrad i predviđena je koristiti vodni potencijal sliva Gornje Cetine, točnije rijeke Šuice. Ova elektrana elektroenergetskom sustavu ponudit će novu dodatnu proizvodnju vršne energije i pridonijeti će umanjenju zagađenja štetnim plinovima za iznos od ~230.000,00 t CO2/godinu. Istodobno, ova elektrana doprinosi obrani od poplava i navodnjavanju Duvanjskog polja za potrebe intenzivne poljoprivredne proizvodnje, pozitivno djelujući na okoliš, [1].

U radu je dan kratak prikaz rezultata urađenih terenskih istraživanja i podataka iz postojeće projektne dokumentacije, kao i prikaz formiranog prostornog modela ustaljenog strujanja podzemnih voda na području donjeg kompenzacijskog bazena projektirane CHE Vrilo.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Energetsko postrojenje CHE Vrilo koristi bruto pad od cca. 155 m od Duvanjskog polja do Buškog jezera. Korištenje ovoga potencijala predviđeno je crpnom reverzibilnom hidroelektranom koja, osim što koristi vode Duvanjskog polja odnosno rijeke Šuice za vrijeme smanjenog dotoka u Duvanjskom polju te viška električne energije u sustavu, crpi vodu iz Buškog Blata (donji kompenzacijski bazen) u akumulacijski prostor na Duvanjskom polju (gornji kompenzacijski bazen), kako bi je mogla koristiti u vrijeme kada energije u sustavu nedostaje.



Slika 1. Situacijski prikaz objekata CHE Vrilo, [1]

Odabrano rješenje CHE Vrilo sastoji se od:

- Gornjeg bazena korisne zapremine 1,8 mil. m^3 koji se ostvaruje izgradnjom betonske brane cca. 400 m nizvodno od mosta kojim prometnica Posušje-Tomislavgrad prelazi preko vodotoka Šuice.
- Ulazne građevine dovodnog tunela.
- Dovodnog tunela dužine 5207 m i promjera 4,6 m.
- Vodne i zasunske komore.
- Tlačnog cjevovoda dužine 450 m i promjera 3,8 m.
- Strojarnice s izlaznim tunelom i izlaznom građevinom, te platoom i rasklopištem.
- Donjeg bazena korisne zapremine od 1,9 mil. m^3 koji se ostvaruje izgradnjom nasute brane cca. 1,4 km nizvodno od strojarnice i betonske brane kod izvora Ričine, [1].

Istražni radovi za potrebe izrade Idejnog projekta CHE Vrilo obuhvatili su:

- Geodetska snimanja s izradom geodetskog elaborata za potrebe izrade projekta i podlogama za izradu eksproprijacijskog elaborata.
- Inženjersko-geološka istraživanja.
- Seizmološka, seizmotektonska i inženjersko-seizmološka istraživanja.
- Geofizička istraživanja.
- Geotehnička istraživanja i laboratorijska ispitivanja materijala.
- Dodatne hidrološke obrade vezane za donji kompenzacijski bazen i postojeće jezero Buško blato.
- Istraživanja za potrebe izrade studije utjecaja na okoliš.
- Istraživanja za projekt priključenja Elektrane na EES.

Osnovni cilj istraživanja i analiza bio je dobivanje mjerodavnih podloga za određivanje veličine i smještaja gornjeg i donjeg bazena, smještaja i tehničkih rješenja brana za ostvarenje bazena, smještaja i tehničkog rješenja strojarnice, te smještaja i tehničkog rješenja dovoda i pratećih objekata. Rezultati istraživanja su elaborirani u niz strukovnih elaborata.

Istražni radovi podijeljeni su u četiri lota i na taj način su i elaborirani:

LOT-1: Geodetska mjerenja, DMTGmbH CO.KG Essen;

LOT-2: Geološka, inženjersko-geološka i hidro-geološka istraživanja, GEO MARIĆ Mostar d.o.o., Mostar;

LOT-3: Istražno bušenje sa „in situ“ mjerenjima, “Geotehnika '94”, geotehnički i specijalni građevinski radovi, Mostar;

LOT-4: Geofizička istraživanja, Moho d.o.o., Zagreb;

Hidrološke, meteorološke i hidro-geološke podloge korištene su iz projekta Hidrološka studija sliva gornje Cetine, Elektroprojekt- Zagreb, FHMZ-Sarajevo, 2006., [1].

3. REZULTATI TERENSKIH ISTRAŽIVANJA - KRATAK PRIKAZ

Područje donjeg akumulacijskog bazena nalazi se na dijelu zaravni od mosta preko Ričine na zapadu, pa sve do izvorskih pećina i zaljeva Dolac na istoku. Njegova duža os je orijentirana u pravcu istok-zapad i dugačka je oko 2,5 km, a širina mu je promjenljiva i kreće se oko 500 m. Na ovom području urađeni su sljedeći terenski istražni radovi:

- 4 istražne bušotine (DB-1, DB-2, DB-3 i DB-4) svaka dubine do 40 m;
- 4 geofizička profila (RF-6a, RF-8, RF-9 i RF-11) na raznim dijelovima područja;
- 2 geoelektrična profila (GE-11 i GE-9) neposredno nizvodno od mosta na Ričini i
- inženjersko-geološko i hidro-geološko kartiranje područja.

Potrebno je naglasiti kako su se svi terenski istražni radovi morali odgoditi do povlačenja velikih voda, koje su se iznimno dugo zadržale u hidrološkom ciklusu u kojem su istraživanja rađena, što je imalo nepoželjne posljedice na dinamiku i opseg terenskih istraživanja, [2].

Slika 2. Područje donjeg bazena, [2]

Slika 3. Područje donjeg bazena – sušno razdoblje, [2]

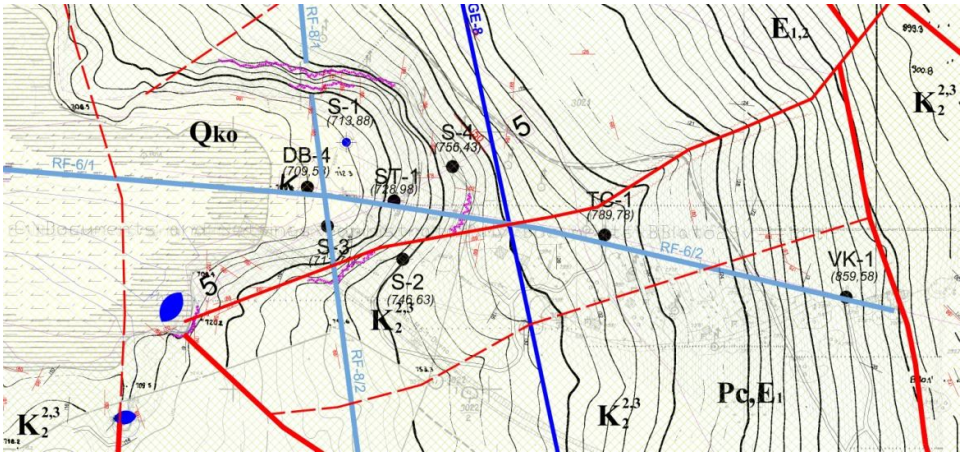
Istražnim bušaćim radovima na području donjeg bazena definirala se osnovna geološka građa, debljina i značajke površinskog pokrivača, te kakvoća osnovne stijene. Za promatranje razina podzemne vode opremljene su dvije bušotine DB-2 i DB-3 kao piezometri.

Istražna bušotina DB-1 ima tanki površinski pokrivač od 0,00 - 4,60 m. On je izgrađen od nevezane zaglinjene vapnenačke drobine ispod koje su srednje razlomljeni do kompaktni uslojeni vapnenci s lokalnim pojavama intenzivnije razlomljenog i kaveroznog vapnenca.

Istražna bušotina DB-2 ima koluvijalne površinske naslage od 0,00 – 4,40 m. Izgrađene su od jako zaglinjene vapnenačke drobine ispod koje su do dna bušotine (39,40 m), izbušeni slabo razlomljeni do kompaktni vapnenci.

Istražna bušotina DB-3 nalazi se u lijevom vapnenačkom boku iznad sekundarnog izvora. Nabušeni su srednje do dobro razlomljeni gornjokredni vapnenci. Intenzivnije razlomljena zona je u intervalu od 24,00 – 29,00 m.

Istražna bušotina DB-4 nalazi se ispod šireg područja strojarnice. Nabušene su koluvijalne naslage u intervalu od 0,00 – 6,80 m izgrađene od tamnosmeđih glina i zaglinjene vapnenačke drobine, ispod koje su do dubine od 35,50 izbušeni svijetlosivi do bijeli slabo do srednje razlomljeni rudistni vapnenci. Na dubini 35,50 pa sve do kraja bušotine (40,30 m) nabušena je kaverna zapunjena svijetlosmeđom glinom i rijetkim fragmentima vapnenca, [2].



Slika 4. Raspored istražnih bušotina i profila na dijelu DKB CHE Vrilo

U pogledu inženjersko-geoloških značajki na području donjeg bazena izdvojene su 4 cjeline:
1. tehnogene tvorevine (nasipi u podnožju mosta na krajnjem zapadnom dijelu područja;
2. površinski pokrivač (tvorevine kvartarne starosti);
3. gornja zona raspadanja osnovnog stijenskog masiva i
4. intaktna stijenska masa (gornjokredne karbonatne tvorevine).

Na prostoru donjeg bazena nema kvartarnih naslaga koje su izolatori, odnosno sredine koje bi predstavljale značajnije barijere strujanju podzemnih voda, što je poznato iz provedenih istraživanja [2].

Kvartarni pokrivač je heterogenog sastava. Površinski interval uz korito i u zoni učestalijeg plavljenja je prašinasto - glinovitog sastava. Taj dio znatno umanjuje vodopropusnost nižih kvartarnih sedimenata, pa i cijelog sustava. Zadržavanja vode u određenim izoliranim dijelovima terena i nakon snižavanja razine Buškog blata je posljedica postojanja tog površinskog sloja.

Na tri piezometra (DB-2, DB-3 i S-1) tijekom 2009. godine izvršeno je promatranje stanja podzemne vode tijekom istražnih radova. U sljedećoj tablici dana su njihova mjerenja.

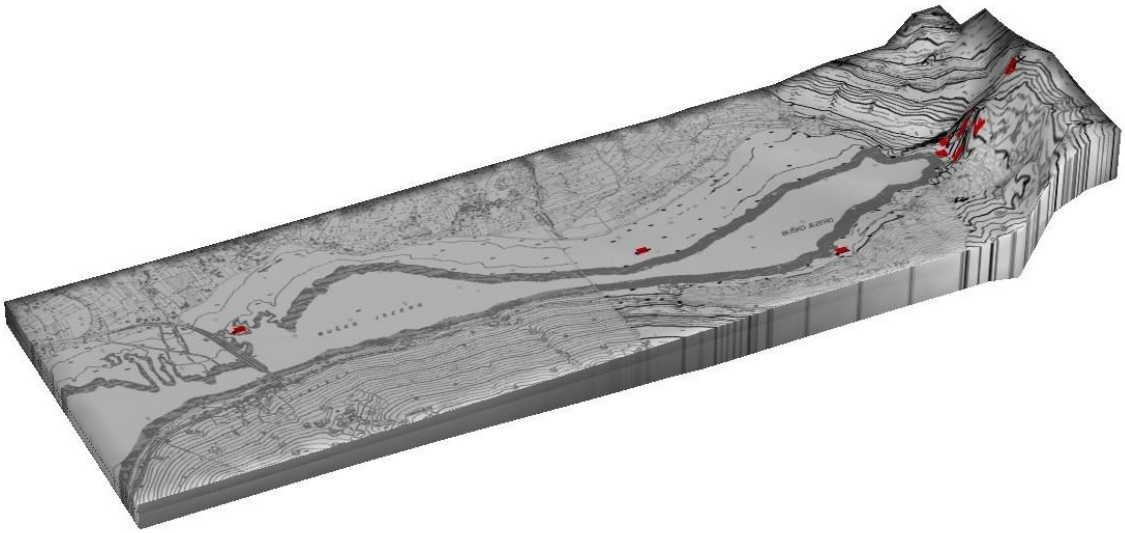
Tablica 1. Mjerenje RPV u piezometrima S-1, DB-3 i DB-2 [2]

	S-1			**DB-3**			**DB-2**		
Datum	**RPV [-m]**	**RPV**	**Razlika [m]**	**RPV [-m]**	**RPV**	**Razlika [m]**	**RPV [-m]**	**RPV**	**Razlika [m]**
17.07.09.							7,48	705,47	0,00
10.08.09.	8,10	706,19	0,00	6,53	706,18	0,00	5,85	704,37	-1,10
19.08.09.	9,25	705,04	-1,15	7,64	705,07	-1,11	7,28	702,94	-1,43
24.08.09.	9,50	704,79	-0,25	7,99	704,72	-0,35			
26.08.09.	10,95	703,34	-1,45						
16.09.09.	12,86	701,43	-1,91	9,36	703,35	-1,37	11,46	698,76	-4,18
01.10.09.	23,00	691,29	-10,14	20,55	692,16	-11,19	25,50	684,72	-14,04
		Ukupno:	**-14,90**			**-14,02**			**-20,75**

Analizom ovih rezultata, može se uočiti kako je u razdoblju od 10.08.2009. - 01.10.2009. došlo do sniženja razine podzemne vode u rasponu od 14,02 m (DB-3) do 20,75 m (DB-2). Ovi podaci ukazuju na konstantno više razine podzemne vode u piezometru DB-3, što potvrđuje ranije definirani smjer podzemnog tečenja ka Buškom blatu, odnosno u vrijeme minimuma ka izvorima u slivu Cetine. Zabilježeni niski vodostaji svakako nisu ekstremne vrijednosti. Razine vode na piezometru DB-2 ukazuju na činjenicu da je zabilježena razina podzemne vode u minimumu (684,72 m n. m.) znatno ispod kote uspora Buškog jezera čije je vodno lice formirano nedaleko od ovog piezometra na koti cca. 703 m n. m. Piezometar S-1 pokazuje da je razina podzemne vode i u vrijeme minimuma iznad predviđenih kota temeljenja strojarnice. Također, iz svega prikazanog uočava se kako izvorište Ričine (glavno vrelo, sporedno vrelo i vrelo kod bušotine DB-3) imaju velike dimenzije i predstavljaju vjerojatno razgranate podzemne sustave koji u vremenu malih i minimalnih voda (kada presuše) dobivaju funkciju uvjetnih ponora ako uspor akumulacije donjeg bazena bude viši od istih, [2].

4. KONCEPTUALNI NUMERIČKI MODEL

U svrhu definiranja raspodjele akumulacijskih i transportnih karakteristika sredine formiran je trodimenzionalni model donjeg kompenzacijskog bazena CHE Vrilo. Za formiranje modela bila je na raspolaganju projektna dokumentacija i podloge koje su dobivene na posudbu za potrebe izrade diplomskog rada od JP Elektroprivrede HZ H-B Mostar.



Slika 5. Položaj razmatranog područja CHE Vrilo

Analiza filtracijskih strujanja uz utvrđivanje efekata varijantnih dispozicija obavljena je računalnim programom DHI WASY FEFLOW 7.0.

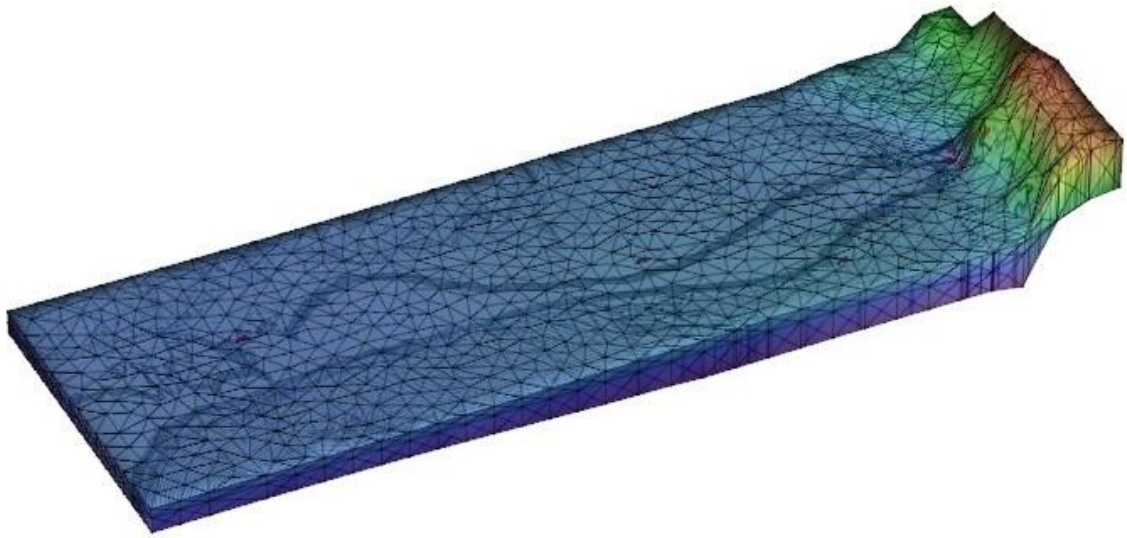
Kako bi se dobile neophodne informacije o razinama podzemne vode, izvršen je proračun razina podzemne vode u području dužine oko 4500 m i širine oko 1500 m. Napravljen je trodimenzionalni stacionarni matematički model. Postavljanjem Darcyevog zakona filtracije i jednadžbe kontinuiteta za svaku elementarnu 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. Područje obuhvaća prostor projektiranog DKB CHE Vrilo, kao i područje projektirane strojarnice CHE Vrilo.

Izdvojeno područje je diskretizirano mrežom trokutnih konačnih elemenata. Treća dimenzija modela je definirana dodavanjem 3 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. Ukupan broj konačnih elemenata unutar domene prostornog modela je 10010, a ukupan broj čvorova je 2653.

Razmatrano je stacionarno tečenje u zasićenom vodonosniku sa slobodnom površinom. Rubni uvjeti su zadani kao apsolutna vrijednost kote Buškog jezera i vodostaja na vodomjernoj postaji Kovači.



Slika 6. Mreža trokutnih konačnih elemenata na prostornom modelu područja CHE Vrilo

Treća dimenzija modela je određena definiranjem 3 sloja materijala na 10 bušotina (čvorova) raspoređenih po čitavom području. Za te bušotine postoji detaljan opis geoloških profila [3]. 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.

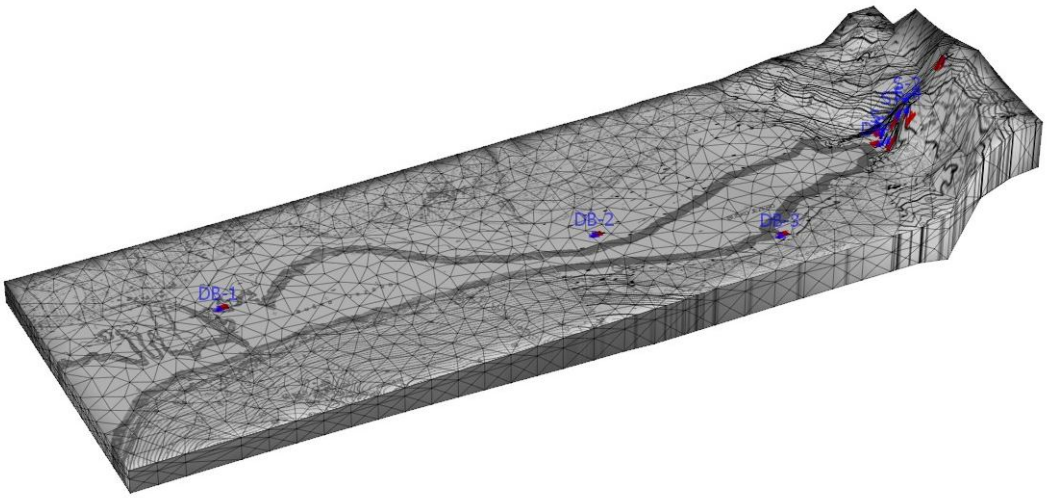
Tablica 2. Materijali na geološkim profilima

OZNAKA SLOJA (LAYER)	**LITOLOŠKI SASTAV**	**KOEFICIJENT FILTRACIJE [m/s]**
1	Vrlo jako i jako ispucali vapnenci.	$K_{xx} = K_{yy} = 1{,}04*10^{-3}$ $K_{zz} = 1{,}04*10^{-4}$
2	Srednje ispucali vapnenci.	$K_{xx} = K_{yy} = 2{,}00*10^{-4}$ $K_{zz} = 2{,}00*10^{-5}$
3	Vrlo slabo i slabo ispucali vapnenci dobroga kvaliteta.	$K_{xx} = K_{yy} = 3{,}21*10^{-5}$ $K_{zz} = 3{,}21*10^{-6}$

Unutar područja modela su obilježene kontrolne točke (čvorovi) koji imaju svrhu validacije modela. U tim točkama je poznato piezometarsko stanje za postavljene rubne uvjete 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.

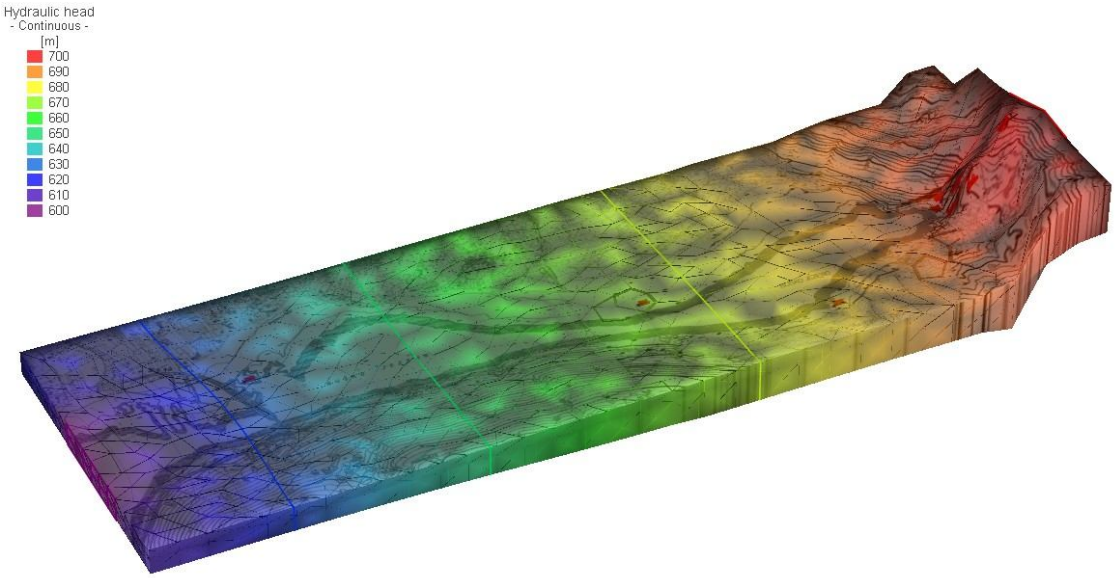
Sagledavajući problematiku područja, analizirani su hidraulički odnosi u promatranom području na osnovu postojećih raspoloživih podataka. Analiza se sastojala od sljedećeg:

- Formiranje prostornog stacionarnog matematičkog modela za analizu područja i intenziteta tečenja podzemnih voda na području projektiranog DKB CHE Vrilo. 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.



Slika 7. Položaj kontrolnih točaka

Nakon definiranja područja obuhvata prostornog modela, karakteristika slojeva tla i početnih i rubnih uvjet, započeta je simulacija modela za ustaljeno strujanje u neograničenom slobodnom vodonosniku. Na slici 8 pokazana je raspodjela razine podzemne vode na modeliranom području.



Slika 8. Raspored RPV – prostorni prikaz

Za usporedbu rezultata razina podzemnih voda na području projektiranog DKB CHE Vrilo 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 izmjerenim na terenu. Mogu se primijetiti veća odstupanja na kontrolnim točkama za kišno razdoblje. Ta odstupanja su nastala iz razloga nedovoljnog broja ulaznih podataka za prostorni stacionarni model strujanja, kao i radi toga što autor nije imao na raspolaganju rezultate o padalinama za razmatrano razdoblje, [4].

5. ZAKLJUČAK

Urađeno modeliranje na prostornom stacionarnom matematičkom modelu prostora projektiranog donjeg kompenzacijskog bazena CHE Vrilo, omogućilo je kvalitativno sagledavanje utjecaja projektiranih 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 DHI WASY FEFLOW 7.0 se pokazala kao veoma praktična za analizu tečenja podzemnih voda.
Uz točno definiranu geometriju područja, kao i detaljno obrađene raspoložive geološke podatke s velikog broja bušotina na području, moguće je dobiti kvalitetnu predodžbu stanja podzemnih voda.
Kako bi ova vrsta hidrodinamičkog modela mogla biti osnova za buduće analize potrebno je progustiti mrežu osmatranja na postojećem projektnom području. To se posebno odnosi na područje donjeg kompenzacijskog bazena crpne hidroelektrane Vrilo, a sve u cilju što preciznijeg određivanja vodoodrživosti. Preporuka je raditi redovito osmatranje postojećih piezometara i moguće izvođenje novih radi prikupljanja podataka o strujanju podzemne vode i odnosu strujanja s hidrološkim uvjetima.

LITERATURA

1. Elektroprojekt d.d. Zagreb: *CHE Vrilo – Idejni projekt*, Zagreb, 2010.
2. GEOMARIĆ d.o.o. Mostar: *Istražni radovi za Feasibility Study CHE Vrilo – LOT-2: Geološka, inženjersko-geološka i hidrogeološka istraživanja*, Mostar, 2009.
3. Geotehnika "94 d.o.o. Mostar: *CHE Vrilo - Istražni radovi za Studiju izvodljivosti - LOT-3: Geotehnička istraživanja s "in situ" i laboratorijska ispitivanja materijala*, Mostar, 2009.
4. Palac, A.: *Hidraulička studija strujanja podzemnih voda na području donjeg kompenzacijskog bazena CHE Vrilo – diplomski rad*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, Mostar, 2018.