

Hidrodinamička analiza mogućnosti povećanja eksploatacionog kapaciteta na primeru izvorišta podzemnih voda „Nelt“ u Dobanovcima

DRAGOLJUB I. BAJIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
DUŠAN M. POLOMČIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
JELENA M. RATKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
IVAN D. MATIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Stručni rad
UDC: 628.1(497.11)
DOI: 10.5937/tehnika1704512B

Za izvođenje analize mogućnosti proširenja izvorišta podzemnih voda „Nelt“ u Dobanovcima, odnosno otvaranja novog za potrebe buduće fabrike dečije hrane i kvantifikacije uticaja na bunare izvorišta „Pepsi“, koje se nalazi u neposrednoj blizini, sprovedena je kompleksna hidrodinamička analiza režima podzemnih voda na širem području istražnog terena. Postojeće izvorište „Nelt“-a sastoji se od tri aktivna bunara koji kaptiraju subartesku izdan formiranu u peskovima i šljunkovitim peskovima, međutim u proračun su uzeta u obzir samo dva bliža. Na istražnom području je izvršen dugotrajni grupni test crpljenja na bunarima N-1 i N-2 (izvorište „Nelt“) i bunarima B-1 i B-2 (izvorište „Pepsi“), dok je nivo podzemnih voda pored ovih bunara osmatran i na pijezometru P-1 koji se nalazi na perspektivnoj lokaciji za proširenje izvorišta „Nelt“. Merenja su sprovedena maksimalnim kapacitetom crpljenja na svim bunarima, sa osmatranjem nivoa podzemnih voda. Za potrebe izvođenja kompleksne hidrodinamičke analize, izrađen je hidrodinamički model strujanja podzemnih voda šireg područja izvorišta „Nelt“. Hidrodinamički prognozni proračuni vezani za mogućnost povećanja eksploatacionog kapaciteta sprovedeni su u dve varijante za period od 10 godina. Proračuni su sprovedeni u licenciranom programu Visual Modflow Pro, koji se svrstava u sam svetski vrh programa ove vrste.

Ključne reči: hidrodinamički model, modflow, varijantna rešanja

1. UVOD

Problem vodosнabdevanja za bilo koje namene u savremenim uslovima života je sve izraženiji. Uzimajući u obzir da je izvorište podzemnih voda deo sistema za vodosнabdevanje, njegov rad treba da predstavlja strogo kontrolisani proces. Međutim, iskustva iz domaćе prakse ukazuju na neplanski i neprofesionalan pristup istraživanja kod izvorišta podzemnih voda, bilo da se radi o otvaranju novog ili proširenju postojećeg. Pravilan prisup istraživanju ostvaruje se primenom hidrodinamičke analize, koja omogućava pouzdane osnove za obezbeđivanje stabilne eksploatacije podze-

mnih voda [1]. Tako se i određivanje i održavanje zona sanitарне заštite izvorišta, koje se realizuje aktuelnim Pravilnikom [2] vrši primenom „modelskih“ (hidrodinamičkih) ispitivanja kretanja podzemnih voda u vodonosnoj sredini izvorišta. Još neki problemi koji se rešavaju primenom metode hidrodinamičke analize su sledeći: kod prikaza hidrodinamičkog aspekata hidrogeoloških istraživanja [3, 4, 5, 6, 7]; kod vodosнabdevanja, uspostavljanja optimalnog korišćenja i održivog upravljanja podzemnih voda [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]; kod određivanja uticaja raznih faktora na izvorišta podzemnih voda i pratećih procesa tokom rada izvorišta, a zatim i uticaja rada izvorišta na okolinu [15, 16, 17, 18]; kod zaštite izvorišta podzemnih voda i određivanja zona sanitarnih zaštita [19, 20, 21]; kod prognoze efekata rada izvorišta podzemnih voda za dugogodišnji period [22] i kod modeliranje transporta zagađujuće materije [23, 24]. Primenom hidrodinamičke analize, u ovom radu, prikazana su varijantna

Adresa autora: Dragoljub Bajić, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7

e-mail: oslanjanje@orion.rs

Rad primljen: 03.05.2017.

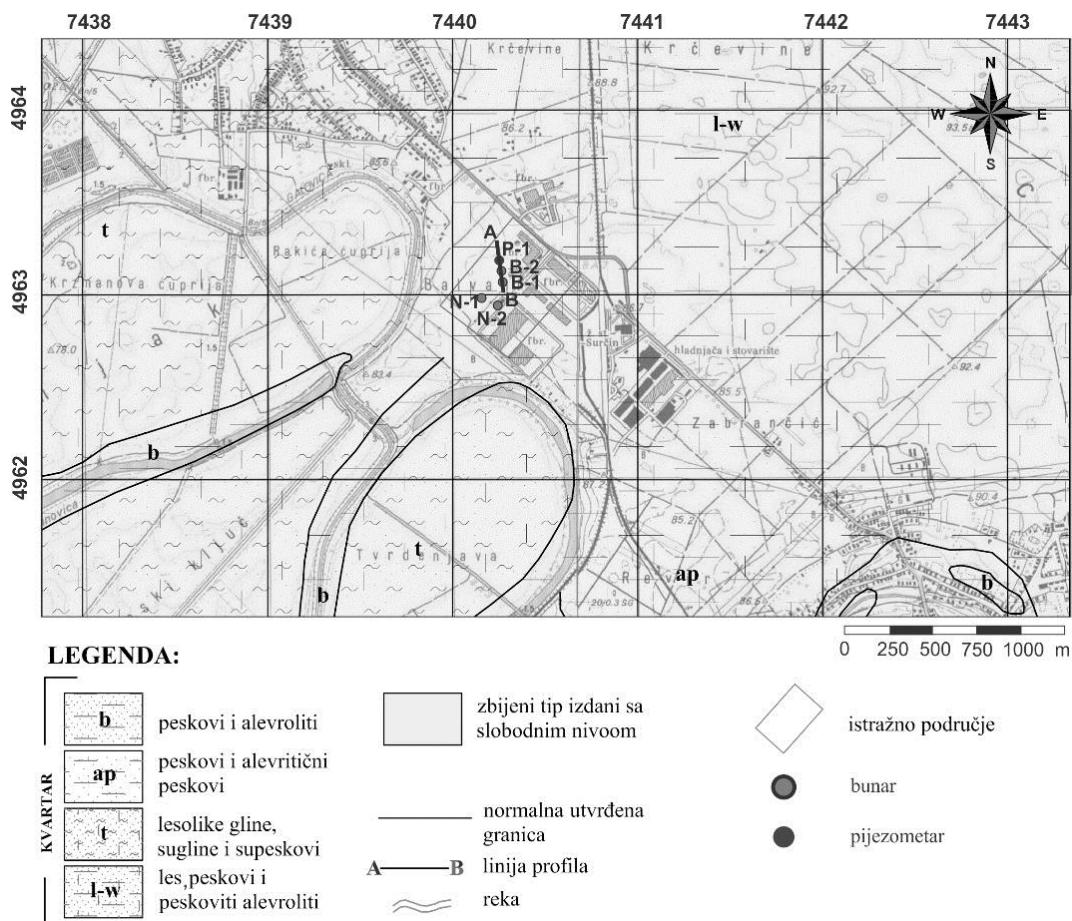
Rad prihvaćen: 18.07.2017.

rešenja povećanja eksploracionog kapaciteta izvorišta podzemnih voda „Nelt“ u Dobanovcima za potrebe otvaranja fabrike dečije hrane.

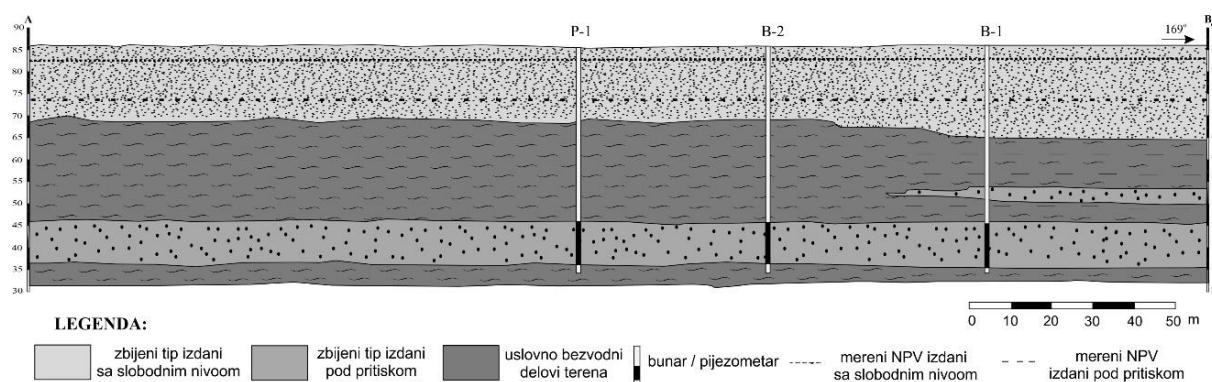
2. HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE ISTRAŽNOG PODRUČJA

Istražno područje obuhvata širu zonu izvorišta podzemnih voda „Nelt“ u Dobanovcima. Na površini terena nalaze se lesne naslage, aluvijalni peskovi i peskoviti alevroliti u terasnim sedimentima. Na osnovu

hidrogeoloških istraživanja izdvajaju se dva tipa izdani: zbijeni tip izdani veće izdašnosti u okviru peskovitim i šljunkovito-peskovitim naslaga sa subarteskim nivoom, koju kaptiraju svi bunari na širem području istraživanja i zbijeni tip izdani manje izdašnosti u okviru naslaga lesa, peskova i peskovitih alevrolita. U podini sedimenata u kojima je formiran zbijeni tip izdani nalaze se gline kao uslovno bezvodni delovi terena. Na slici 1 prikazana je hidrogeološka karta, a na slici 2 karakteristični hidrogeološki profil terena šire zone istražne oblasti.



Slika 1 - Hidrogeološka karta



Slika 2 - Hidrogeološki profil

3. METODOLOGIJA (HIDRODINAMIČKI MODEL)

Primenjena metoda za postizanje cilja rada, koji se odnosi na prikaz varijantnih rešenja povećanja eksploracionog kapaciteta izvorišta podzemnih voda „Nelt“ je hidrodinamička analiza. Ona predstavlja skup različitih metoda hidrodinamičkih proračuna, pri čemu je danas najkompleksnija i najprimenjivija metoda trodimenzionalnog hidrodinamičkog modeliranja režima izdani, bazirana na numeričkom rešavanju diferencijalnih jednačina koje opisuju prostorno kretanje podzemnih voda.

Hidrodinamički model šireg područja izvorišta „Nelt“ koncipiran je i izrađen kao višeslojeviti model, sa ukupno četiri sloja, posmatrano u vertikalnom profilu. Svaki od ovih slojeva odgovara određenom realnom sloju, šematizovanom i izdvojenom na osnovu poznavanja terena i rezultata sprovedenih analiza tereških istražnih radova. Posmatrano od površine terena korespondenti slojevi modela i terena prikazani su u tabeli 1. Realna geometrija šematizovanih slojeva je na modelu simulirana u skladu sa njihovim realnim rasprostranjenjem u prirodi. „Geometrizacija“ kontura slojeva, njihovo prenošenje u koordinatni sistem modela je izvršena na osnovu podataka istražnih bušotina raspoređenih na širem području izvorišta „Nelt“. Na osnovu podataka sa koordinatama položaja bušotina i kotama izdvojenih slojeva, izrađene su karte izohipsi njihovih podina i povlata, koje su kasnije „transportovane“ u hidrodinamički model. Interpolacija i ekstrapolacija podataka dobijenih istražnim geološkim bušenjem obavljena je Kriging metodom.

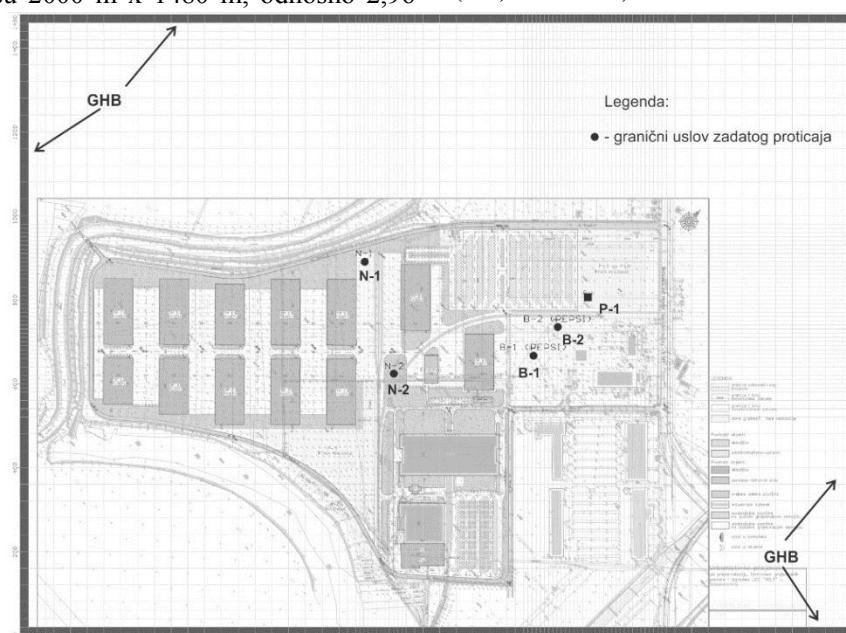
Osnovne dimenzije matrice, kojom je obuhvaćen izučavani teren su 2000 m x 1480 m, odnosno 2,96

km². Diskretizacija strujnog polja u planu je izvedena sa osnovnom veličinom celija 80 m x 80 m, koja je u delovima od većeg interesa u zoni vodozahvatnih i osmatračkih objekata pogušćena mrežom kvadrata dimenzija do 10 m x 10 m. Teren obuhvaćen modelom je izdeljen mrežom kvadrata i pravougaonika dimenzija 73 reda x 92 kolone i sastoji se od 20.148 aktivnih modelskih celija. Na slici 3 prikazana je osnovna matrica modela i diskretizacija strujnog polja na širem području izvorišta „Nelt“. Proračuni su sprovedeni u softveru Visual Modflow Pro.

Tabela 1. Šematizacija strujne oblasti po dubini - prikaz litoloških članova u modelskim slojevima

Broj sloja	Hidrogeološka funkcija sloja	Litostratigrafski članovi
1	vodonosni sloj	povlatni slabijepropusni sedimenti (les, peskovi i peskoviti alevroliti)
2	izolatorski sloj	kvartarne gline
3	vodonosni sloj	peskovi i peskoviti-šljunkovi
4	izolatorski sloj	pliocenske gline

Filtracione karakteristike porozne sredine na terenu obuhvaćenom modelom predstavljene su koeficijentima filtracije i parametarima uskladištenja litoloških članova, čije su vrednosti u modelu su zadate kao reprezentativne u svakoj celiji diskretizacije. Inicijalne vrednosti koeficijenta filtracije i parametara uskladištenja za svaki litološki član su dobijene na osnovu rezultata novijih namenskih hidrogeoloških istraživanja na istražnom području na osnovu urađenih testova crpljenja (za prvi sloj: $K = 1 \times 10^{-4} - 10^{-5}$ m/s i $S_s = 1 \times 10^{-5}$ 1/m i za treći sloj: $K = 1 \times 10^{-3} - 10^{-4}$ m/s i $S_s = (1-5) \times 10^{-5}$ 1/m).



Slika 3 - Mreža diskretizacije strujnog polja i granični uslovi u okviru kaptirane subarteske izdani

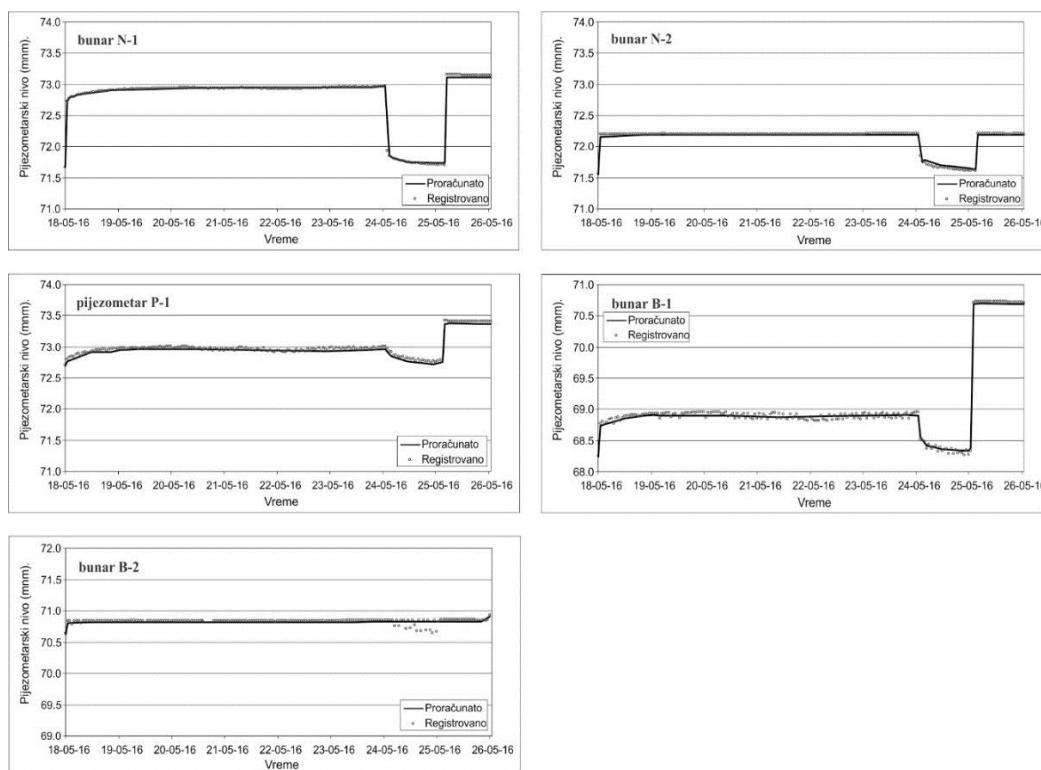
Kao granični uslovi u datom strujnom polju podzemnih voda zadaju se zone hranjenja, zone dreniranja i granice rasprostranjenja izdani. U praksi, ove granične uslove nije uvek lako odrediti i zadati na modelu. Obzirom na dubinu kaptirane izdani i odsustva hidrauličke povezanosti ove izdani sa plićom ili dubljim izdani, u hidrodinamičkom modelu šireg područja izvorišta „Nelt“ primjenjeni su sledeći granični uslovi: granični uslov opštег pijezometarskog nivoa (GHB) i granični uslov zadatog proticaja (slika 3).

Graničnim uslovom opštег pijezometarskog nivoa (GHB) se simulira uticaj nekog izvora prihranjivanja ili dreniranja koji se nalazi van područja obuhvaćenog modelom. Na modelu je ovaj granični uslov zadat u ukupno 4 zone prema spoljnjim konturama strujne oblasti u modelskom sloju šematisiranom kao izdan (prvi i treći modelski sloj), uzimajući u obzir registrirane vrednosti pijezometarskog nivoa, hipsometrijski položaj dna modelskih celija u kojima je granični uslov zadavan i filtracione karakteristike pripadajućih sedimenata. Vrednost konduktiviteta za ovaj granični uslov, kao i hidraulička uloga koju ima, predstavlja jedan od rezultata etaloniranja modela. Graničnim uslovom zadatog proticaja simuliran je rad

eksploatacionih bunara koji se nalaze na izvorištu „Nelt“ i izvorištu „Pepsi“. Na modelu je ovaj granični uslov zadat u trećem sloju sa vrednostima kapaciteta eksploracionih bunara kojima je izveden spregnuti test crpljenja realizovan u periodu 18.05. - 26.05.2016. godine: na izvorištu „Nelt“ (bunar N-1 sa kapacitetom crpljenja od $Q = 13,8 \text{ l/s}$ i bunar N-2 sa kapacitetom crpljenja $Q = 9,09 \text{ l/s}$) i na izvorištu „Pepsi“ (bunar B-1 sa kapacitetom crpljenja $Q = 16,18 \text{ l/s}$ i bunar B-2 sa kapacitetom crpljenja $Q = 12,22 \text{ l/s}$.)

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Etaloniranje modela je sprovedeno u nestacionarnim uslovima za period u kojem je izveden spregnuti test crpljenja na bunarima izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“ (18.05. - 26.05.2016. godine). Strujanje podzemnih voda je na modelu računato i simulirano kao realno strujanje, pod pritiskom ili sa slobodnim nivoom, u svakoj celiji diskretizacije pojedinačno. U procesu etaloniranja modela kao ciljne tačke u strujnoj oblasti korišćeni su registrovani nivoi podzemnih voda u bunarima N-1 i N-2 na izvorištu „Nelt“, bunarima B-1 i B-2 na izvorištu „Pepsi“ i na pijezometru P-1 (slika 3).



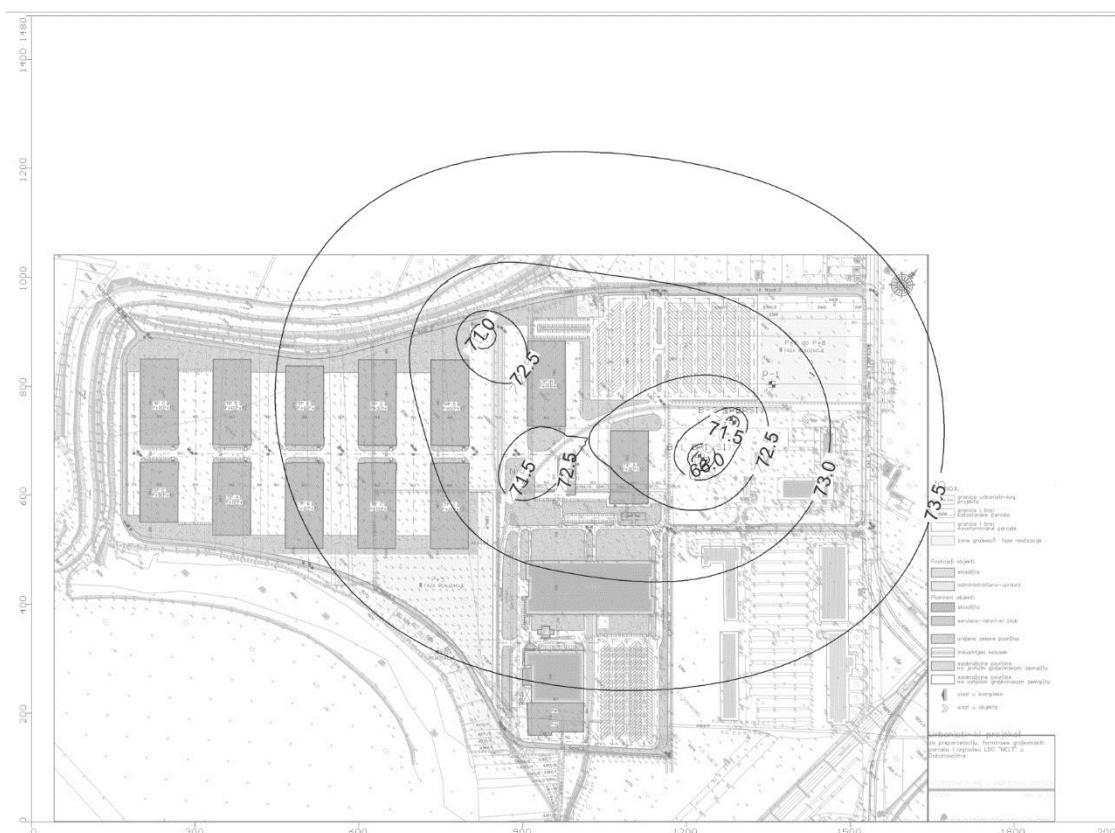
Slika 4 - Nivoografi podzemnih voda u hidrogeološkim objektima registrovani u prirodi i dobijeni procesom etaloniranja modela

Na slici 4 prikazane su registrovane vrednosti nivoa podzemnih voda koje su korišćene u procesu kalibracije modela. Osnovni vremenski korak od jednog minuta prilagođen je dinamici registrovanja

nivoa podzemnih voda tokom izvođenja testa crpljenja. Proses kalibracije modela rađen je manuelno i automatski, pomoću programa PEST. Taloniranje modela je bilo završeno kada je dobijena zadovoljavajuća

saglasnost između registrovanih nivoa podzemnih voda i nivoa dobijenih proračunom, uz kontrolu bilansa podzemnih voda (slika 4). Sa slike se može zaključiti da postoji veoma dobra usaglašenost rezultata kalibracije modela sa merenim vrednostima nivoa podzemnih voda u objektima, uz podsećanje da ne

postoji mreža pijezometara koji bi omogućili kvalitetnije sagledavanje hidrogeoloških i hidrodinamičkih uslova na istražnom području. Na slici 5 prikazan je raspored pijezometarskih nivoa u kaptiranoj izdani na kraju testa crpljenja, neposredno pre gašenja bunarskih pumpi.



Slika 5 - Karta rasporeda pijezometarskog nivoa u kaptiranoj izdani na širem području izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“ za maksimalno postignuto sniženje nivoa tokom izvođenja spregnutog testa crpljenja

Prognoza režima podzemnih voda u novim, pretpostavljenim i planiranim uslovima je osnovna svrha hidrodinamičkog modela. Međutim, mogućnosti i realnost rezultata prognoznih proračuna su rezultat nekoliko faktora. Prvi faktor je vezan za realnost i pouzdanost modela šireg područja izvorišta „Nelt“ koja nije ista u svim njegovim delovima, iz razloga što ni raspoloživi ulazni podaci nisu bili ravnomerno raspoređeni po izučavanim prostoru, što je u određenoj meri snizilo pouzdanost dobijenih rezultata proračuna prognoze. Drugi faktor jesu ograničenja vezana za detaljnost i preciznost zadavanja ulaznih parametara u prognoznim proračunima, odnosno, podseća se da rezultat proračuna nikako ne može biti na višem nivou realnosti, pouzdanosti i preciznosti od odgovarajućih karakteristika ulaznih parametara, koje je veoma teško pouzdano zadavati za duži vremenski period. Treće, opšte su poznati problemi vezani za pouzdanost prognoziranih graničnih uslova, u čijem se „okviru“ odvijaju prognozirani procesi. Ovo se odnosi na prognozirane količine podzemnih voda koje dotiču ili otiču sa

izučavanog prostora. Četvrti faktor je od uticaja na pouzdanost i realnost proračuna prognoze, a kao rezultat prethodnog jeste pitanje - da li se prognozom vrši interpolacija ili ekstrapolacija stanja sadržanih u modelu.

Jasno je da je mnogo pouzdanija prognoza kojom se bitno ne remete karakteristike modela. U slučaju kada se u prognozi značajno menjaju uslovi strujanja podzemnih voda (strujno polje definisano veličinom iskopa) uz značajno prisustvo neizvesnosti modela, očigledno je da se radi o ekstrapolaciji.

Sprovedenim prognoznim varijantnim proračunima analizirana je mogućnost održivog povećanja kapaciteta izvorišta „Nelt“ ili otvaranje novog, uz očuvanje postojeće eksploatacije podzemnih voda na oba izvorišta („Nelt“ i „Pepsi“), kao i samih eksploatacionih bunara izvorišta u hidrauličkom smislu.

U sprovodenju hidrodinamičke analize mogućnosti povećanja kappaciteta, odnosno proširenja izvorišta „Nelt“, pošlo se od sledećih postavki:

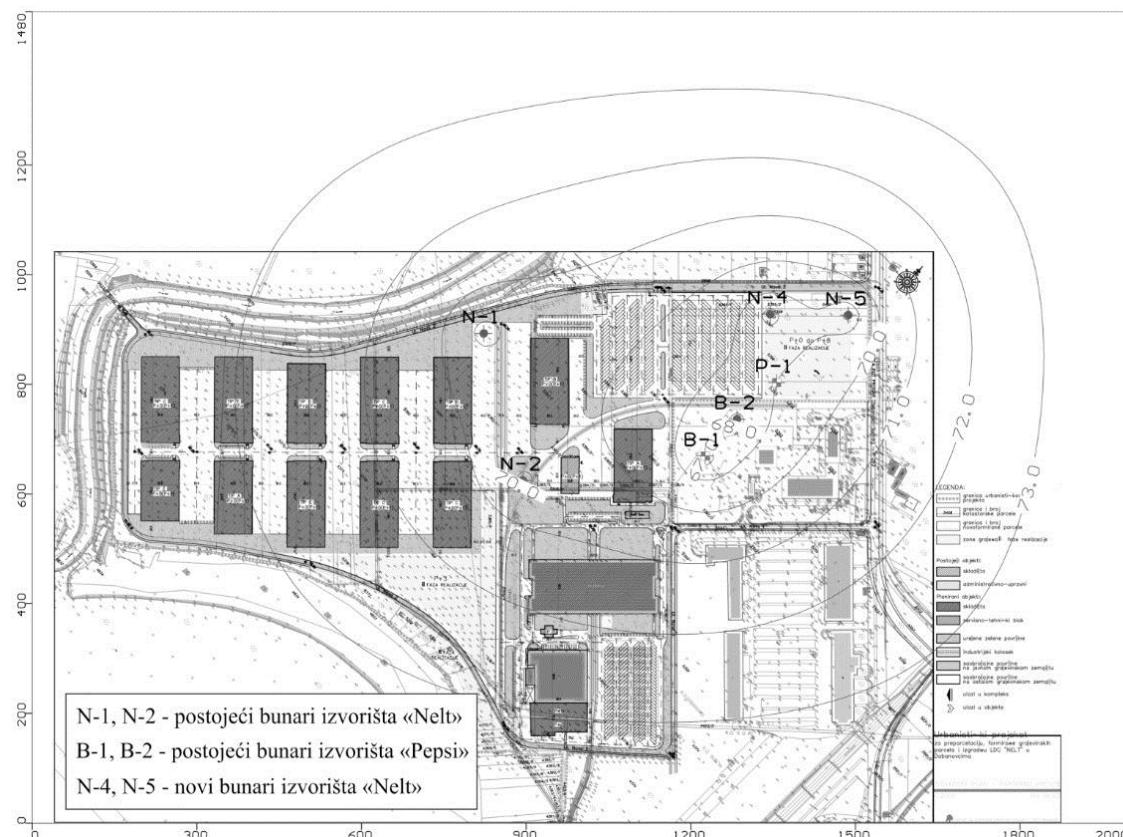
- povećanje sumarnog kapaciteta izvorišta zasniva se na izradi novih bunara, a ne na povećanju pojedinačnih kapaciteta postojećih bunara,
- novi bunari kaptiraju istu izdan kao i postojeći bunari izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“,
- pojedinačni kapaciteti novih bunara su identični i iznose po 15 l/s,
- novi bunari se izrađuju po periferiji predviđenog placa za izradu ovih objekata,
- proračunski period za koji je sprovedena analiza efekata rada izvorišta „Nelt“ sa novim bunarima je 10 godina, pri čemu svi bunari na kojima je sproveden grupni test crpljenja ostaju da rade sa identičnim kapacitetima kao i u pomenutom testu.

Navedene postavke na kojima su bazirani hidrodinamički varijantni proračuni zasnivaju se na:

- dugotrajnosti rada bunara i obezbeđenom projektovanom kapacitetu u dužem vremenskom periodu,
- blizini postojeće infrastrukture i
- proširenju izvorišta na lokacijama koje su najudaljenije od bunara izvorišta „Pepsi“, a u cilju obezbeđenja minimalnog smanjenja uticaja na ove bunare.

Proširenje izvorišta „Nelt“, odnosno povećanje njegovog sumarnog kapaciteta, analizirano je u dve varijante i to:

- varijanta 1: sa povećanjem ukupnog kapaciteta za 30 l/s (dodavanjem dva nova bunara: N-4 i N-5)
- varijanta 2: sa povećanjem ukupnog kapaciteta za 45 l/s (dodavanjem tri nova bunara: N-4, N-5 i N-6).



Slika 6 - Karta rasporeda pijeozometarskog nivoa u široj okolini izvorišta „Nelt“ (varijanta 1)

Položaj novoprojektovanih bunara je dat na slika- ma 6 i 7. Početno stanje režima podzemnih voda na istražnom području, na koje se nadovezuju varijante proširenja izvorišta „Nelt“, identično je registrovanom minimalnom nivou podzemnih voda tokom izvođenja spregnutog testa crpljenja (18.05. - 26.05.2016. godine). Vrednosti graničnih uslova u prognoznim varijantnim proračunima zadate su na identičan način kao i kod izrade hidrodinamičkog modela istražnog područja. U varijantnim proračunima, kapaciteti novih eksplotacionih bunara na izvorištu „Nelt“ su zadati sa po-

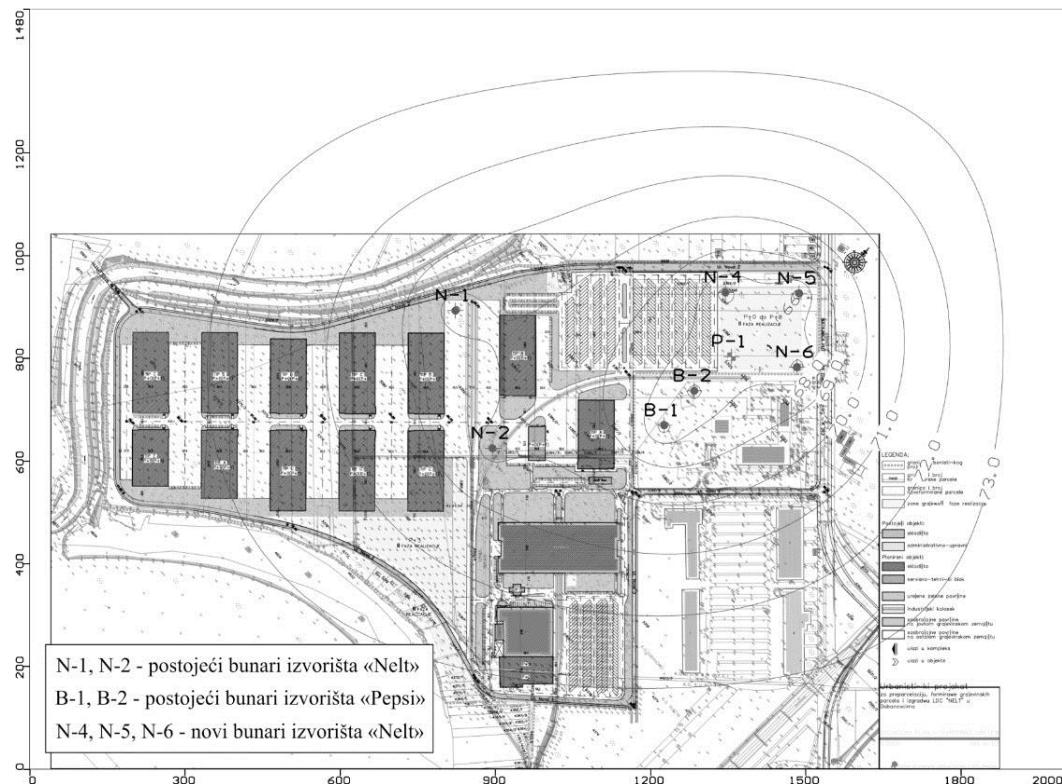
15 l/s za svaki novi buna. Novi bunari kaptiraju identičan vodonosni sloj kao i bunari izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“. Lokacije novih bunara su određene tako da njihov međusoban uticaj (uključujući i uticaj na postojeće bunare izvorišta) omogući nesmetano zahvatjanje podzemnih voda i funkcionisanje oba izvorišta u celini, u dužem vremenskom periodu. Hidrodinamičkom analizom je simuliran rad izvorišta sa zadatim kapacitetima po varijantama tokom kontinualnog rada bunara izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“ u trajanju od 10 godina.

Vremenski korak tokom proračuna je bio jedna godina, koji je na nižem nivou iteracija podeljen na 10 delova, nejednakog trajanja (faktor 1, 2).

Rezultate prognoznih proračuna predstavljaju: karte rasporeda pijezometarskog nivoa u kaptiranoj izdani nakon desetogodišnjeg kontinuiranog rada eksploracionih bunara za svaku varijantu, zatim dodatna sniženja pijezometarskog nivoa u odnosu na najniže nivoe registrovane tokom izvođenja grupnog testa

crpljenja (period 18.05. - 26.05.2016. godine), takođe i posle desetogodišnjeg rada bunara i numerički prikaz ostvarenih pijezometarskih nivoa u bunarima izvorišta i u pijezometru P-1 na kraju proračunskog perioda.

Na slikama 6 i 7 su prikazani pijezometarski nivoi podzemnih voda za svaku od varijanti proširenja izvorišta posle 10 godina kontinuiranog rada izvorišta zadatam kapacitetima sa ekvidistancom hidroizopijesti od 1 m.



Slika 7 - Karta rasporeda pijezometarskog nivoa u široj okolini izvorišta „Nelt“ (varijanta 2)

Sa prikazanim slikama uočava se manje ili veće sniženje pijezometarskog nivoa u kaptiranoj izdani kao rezultat povećanja kapaciteta izvorišta „Nelt“, odnosno novog izvorišta i kontinuiranog rada svih eksploracionih bunara tokom 10 godina. Međutim, realan uticaj ovog obaranja pijezometarskog nivoa na eksploracione bunare nije moguće kvantifikovati sa prikazanim slikama.

Zbog toga je izvedena detaljna hidrodinamička analiza veličine obaranja nivoa podzemnih voda na postojećim bunarima izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“, kao i na pijezometru P-1. U oceni veličine dobijenih sniženja nivoa, odnosno opadanja pijezometarskog nivoa u analiziranim objektima, postavlja se pitanje da li je ugrožena njihova funkcionalnost.

U hidrodinamičkoj praksi uobičajeno je da se za izdani pod pritiskom, kakva je i ona kaptirana bunarima na oba izvorišta, dopušta obaranje pijezometarskog nivoa za 50 % u odnosu na statičku vrednost nivoa, koja se kreće u dijapazonu 73 - 74 mm. U

slučaju izvorišta „Nelt“ izvedena je hidrodinamička analiza dopuštenog obaranja nivoa u eksploracionim bunarima. Sprovedena analiza je uključila i eksploracione bunare, iako su nivoi podzemnih voda u njima opterećeni parazitskom depresijom, obzirom da na istražnom području postoji samo jedan pijezometar. U tabeli 2 date su karakteristike izdani i objekata, koje podrazumevaju: minimalne registrovane vrednosti pijezometarskog nivoa tokom izvođenja spregnutog testa crpljenja na bunarima izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“, absolutne kote povlate i podine kaptirane izdani, minimalna registrovana visina vodenog stuba, dopušteno hidrauličko sniženje nivoa i dopuštena vrednost minimalnog pijezometarskog nivoa. U prikazanoj analizi ne figuriše veličina parazitske depresije u bunarima, kako zbog činjenice da ranijim istražnim radovima nisu determinisane vrednosti linijskih i kvadratnih hidrauličkih gubitaka u bunarima, tako i zbog nedovoljno pouzdanih podloga za njihovo realno prognoziranje.

Tabela 2. Elementi za proračun dopuštenog sniženja pijezometarskog nivoa za svaki objekat: Legenda: ¹- vrednosti na osnovu kalibracije modela, ²- prognozne vrednosti (na osnovu modela), ³- preuzete minimalne vrednosti iz postojećih objekata za nove bunare)

Objekat	Registrovan minimalni nivo p.v. (mm)	Kota povlate vodonosnog sloja (mm)	Kota podine vodonosnog sloja (mm)	Minimalna visina vodenog stuba (m)	Dopuštena depresija (m)	Dopušteni minimalni nivoi p.v. (mm)
B-1	68.27	44.83	36.83	31.44	15.72	52.55
B-2	70.80	46.20	36.20	34.60	17.30	53.50
P-1	72.75	49.30	35.90	36.85	18.43	54.33
N-1	71.71	45.40	35.20	36.51	18.26	53.46
N-2	71.61	47.20	37.40	34.21	17.11	54.51
N-4	73.50 ¹	48.90 ²	35.40 ²	31.44 ³	15.72 ³	57.78 ³
N-5	73.50 ¹	49.10 ²	35.50 ²			
N-6	73.50 ¹	49.30 ²	35.90 ²			

Dobijene vrednosti dopuštenog minimalnog pijezometarskog nivoa su granične (donje) vrednosti do kojih treba ići prilikom obaranja pijezometarskog nivoa, kako bi bunari ostali u funkciji u što dužem vremenskom periodu. Naravno u ovu vrednost treba

uvrstiti i veličinu dopunskih hidrauličkih gubitaka u bunarima. U tabeli 3 prikazane su vrednosti pijezometarskih nivoa u objektima (bez parazitske depresije) za svaku od varijanti proširenja izvorišta „Nelt“, odnosno otvaranja novog.

Tabela 3. Prikaz vrednosti pijezometarskih nivoa za različite varijante proširenja izvorišta „Nelt“ nakon 10 godina kontinuirane eksploatacije

Objekat	Pijezometarski nivo - Etaloniranje modela (mm)	Pijezometarski nivo - Varijanta 1 (mm)	Pijezometarski nivo - Varijanta 2 (mm)
B-1	68.27	66.65	65.86
B-2	70.80	67.15	66.16
N-1	71.71	68.65	68.34
N-2	71.61	69.29	68.94
N-4	-	66.62	65.63
N-5	-	67.17	65.98
N-6	-	-	65.84
P-1	72.75	68.96	67.70

Iz prikazane tabele, uočava se da je za obe varijante proširenja izvorišta došlo do opadanja pijezometarskog nivoa, ali da postoji preko 10 metara prostora za parazitsku depresiju, odnosno graničnih vrednosti dopuštenog obaranja nivoa podzemnih voda (tabela 2). U odnosu na minimalno registrovane nivoe podzemnih voda na bunarima tokom dugotrajnog testa crpenja, prema varijanti 1 proširenja izvorišta „Nelt“, najveće dodatno opadanje pijezometarskog nivoa javlja se na ovom izvorištu u bunaru N-1 (3,06 m), dok je na izvorištu „Pepsi“ u bunaru B-2 dobijeno najveće dodatno sniženje pijetometarskog nivoa od 3,65 m.

Prema varijanti 2 prognoznih proračuna, na istim bunarima su registrovana najveća dodatna sniženja, koja su u odnosu na početno stanje (spregnuti test crpljenja - minimalni nivoi) veći za 4,64 m (bunar B-2) i 3,37 (bunar N-1), dok su u odnosu na varijantu 1 povećani za 0,99 m (bunar B-2) i 0,31 (bunar N-1).

5. ZAKLJUČAK

Sprovedena hidrodinamička analiza režima podzemnih voda na širem području izvorišta „Nelt“, imala je za cilj simulaciju postojećeg eksplotacionog režima izvorišta, analizu mogućnosti proširenja ovog

izvorišta ili otvaranja novog, a sve u smislu održive eksploatacije i kvantifikacije uticaja na bunare izvorišta „Pepsi“ koje se nalazi u neposrednoj blizini predmetnog izvorišta.

Za ove potrebe formiran je hidrodinamički model šireg područja izvorišta, koji zbog nejednakog kvaliteta ulaznih podloga nije u svim svojim segmentima podjednako reprezentativan.

S jedne strane, geometrijski odnosi litoloških članova na terenu su sa velikom verodostojnošću „transportovani“ u model, dok je horizontalna i vertikalna distribucija vrednosti hidrogeoloških parametara i graničnih uslova, u manjoj ili većoj meri rezultat etaloniranja samog modela. Granični uslovi na konturama modela su zadati na osnovu registrovanih vrednosti pijezometarskih nivoa, a karakteristike ovog graničnog uslova su rezultat kalibracije modela. Konceptacija, u sprovedenoj hidrodinamičkoj analizi proširenja izvorišta „Nelt“, se bazira na izradi novih bunara, a ne povećanjem kapaciteta postojećih. Pojedinačni kapaciteti novih bunara su po 15 l/s koji kaptiraju identičnu izdan kao i postojeći bunari izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“.

Lokacije novih bunara su određene tako da njihov međusoban uticaj, a i uključujući i uticaj na postojeće bunare izvorišta „Nelt“ i „Pepsi“, omogući nesmetano zahvatanje podzemnih voda i funkcionalisanje izvorišta u celini u dužem vremenskom periodu. U varijantnim proračunima proširenja izvorišta „Nelt“ analizirano je zahvatanje podzemnih voda sa dodatnim kapacitetom od 30 l/s (dva nova bunara), odnosno 45 l/s (tri nova bunara). Efekti eksploatacije podzemnih voda na izvorištu ovim kapacitetima su analizirani na kraju vremenskog period od 10 godina kontinualne eksploatacije.

Kao rezultat prognoznih varijantnih proračuna dobijena su numerička stanja pijezometarskih nivoa u bunarima i pijezometru koja se odnose na stanja nivoa u kaptiranoj izdani. Na ove vrednosti treba dodati i parazitske depresije u bunarima, koje u ranijem periodu nisu adekvatno kvantifikovane.

Dobijeni rezultati ukazuju da je na širem području izvorišta „Nelt“ moguće održivo zahvatiti znatno veće količine podzemnih voda nego što se danas eksploratišu, odnosno moguće otvoriti novo izvorište za potrebe nove fabrike. Predlaže se varijanta 2 sa tri nova eksploraciona bunara s obzirom na potrebe buduće fabrike.

6. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansiranje projekata OI-176022, TR-33039 i III-43004.

LITERATURA

- [1] Polomčić D, Hidrodinamička istraživanja, otvaranje i upravljanje izvorištima izdanskih voda u integrgranularnoj poroznoj sredini, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 2001.
- [2] Ministarstvo zdravljia R. Srbije, Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarno zaštite izvorišta vodosnabdevanja, Službeni glasnik RS, br. 92/2008, 2008.
- [3] Polomčić D, Krunić O. & Ristić-Vakanjac V, Hydrogeological and hydrodynamic characteristics of groundwater sources for the public water supply of Bećej (northern Serbia), *Geološki anali balkanskog polostvra*, Vol. 72, pp. 143-157, 2011.
- [4] Hajdin B, Polomčić D, Stevanović Z, Bajić D. & Hajdin K, Asseings prospect of groundwater source „Vić Bare“ for Obrenovac's water supply. Proceedings of the XIV Serbian Symposium on Hydrogeology, pp. 107-111. Belgrade: University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, 2012.
- [5] Đurić D, Lukić V. & Soro A, Hidrodinamička analiza proširanja izvoriša „Petrovaradinska Ada“ u Novom Sadu. *Vodoprivreda*, Vol. 258-260, pp. 265-272, 2012.
- [6] Polomčić D, Bajić D, Ristić-Vakanjac V, Čokorilo M, Drašković D. & Špadijer S, Hidrodinamičke karakteristike izvorišta „Peštan“ za vodosnabdevanje Lazarevca, *Vodoprivreda*, Vol. 261-263, pp. 55-68, 2013.
- [7] Polomčić D. & Bajić D, Primena hidrodinamičkih prognoznih proračuna na primeru crpne stanice „Bezdan 1“ (Application of the hydrodynamic predictive modeling on the exapmple of the pumping station „Bezdan 1“). *Tehnika*, Vol. 69, No. 6, pp. 956-962, 2014.
- [8] Polomčić D, Dragišić V. & Živanović V, Hydrodynamic model of the groundwater source for water supply of Prijedor town (Republic of Srpska). Proceedings of the International Conference & Field Seminar - Water Resources & Environmental Problems in Karst, pp. 539-544. Belgrade, Serbia: University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, 2005.
- [9] Kumar C. P, Groundwater Modelling and Management. In Ghosh N.C. & Sharma K.D. (Ed.), Ground Water Modelling, pp. 153-178. New Delhi: Capital Publishing Company, 2006.
- [10] Mylopoulos N, Mylopoulos Y, Kolokythab E, Tolikas D, Integrated water management plans for the restoration of lake Koronia, Greece. *Water International*, Vol. 32, No. 1, pp. 720-738, 2007.

- [11] Polomčić D, Đekić M, Milosavljević S, Popović Z, Milaković M, Ristić Vakanjac V. & Krunic O, Sustainable use of groundwater resources in terms of increasing the capacity of two interconnected groundwater sources: a case study Bečeј (Serbia). Proceedings of the 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, p. 599-606. Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd, 2011.
- [12] Polomčić D, Hajdin B, Stevanović Z, Bajić D. & Hajdin K, Groundwater management by riverbank filtration and an infiltration channel: The case of Obrenovac, Serbia. *Hydrogeology Journal*, Vol. 21, No. 7, pp. 1519-1530, 2013.
- [13] Stauder S, Stevanović Z, Richter C, Milanović S, Tucović A. & Petrović B, Evaluating bank filtration as an alternative to the current water supply from Deeper Aquifer: a case study from the Pannonian Basin, Serbia. *Water Resource Management*, Vol. 26 No. 2, pp. 581-594, 2012.
- [14] Boskidisa I, Pisinarasa V, Petalasa C. & Tsirhrintzisa V. A, Monitoring and modeling of two alluvial aquifers in lower Nestos river basin, Northern Greece. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, Vol. 47, No. 12, pp. 1849-1868, 2012.
- [15] Frind E. O., Molson J.W. & Rudolph D. L, (o). Well Vulnerability: A Quantitative Approach for Source Water Protection. *Ground Water*, Vol. 44, No. 5, pp. 732-742, 2006.
- [16] Majkić-Dursun B, Popović Lj, Miolski D. & Andelković O, Uticaj opadanja nivoa podzemnih voda na procese starenja vodozahvata objekata na primeru izvorišta Trnovče. *Vodoprivreda*, Vol. 258-260, pp. 181-187, 2012.
- [17] Polomčić D, Bajić D, Papić P. & Stojković J, Hydrodynamic model of the open-pit mine "Buvač" (Republic of Srpska). *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Vol. 1, No. 3, pp. 260-271. DOI: 10.13044/j.sdewes.-2013.01.0019, 2013.
- [18] Polomčić D, Bajić D. & Krunic O, Hidrodinamička analiza interakcije dva izvorišta u radu na primeru vodosnabdevanja Bečeja (Hydrodynamic analysis of the interaction of two operating groundwater source, case study: groundwater supply of Bečeji). *Tehnika*, Vol. 69, No. 4, pp. 597-603, 2014.
- [19] Moutsopoulos N. K, Gemitzis A. & Tsirhrintzis A. V, Delineation of groundwater protection zones by the backward particle tracking method: theoretical background and GIS-based stochastic analysis. *Environmental Geology*, Vol. 54, pp. 1081-1090, 2008.
- [20] Dimkić M, Pušić M, Vidović D, Đurić D. & Boreli-Zdravković Đ, Analiza transporta zagađenja kod određivanja zona saniterne zaštite izvorišta podzemnih voda u aluvijalnim sredinama. *Vodoprivreda*, Vol. 264-266, pp. 203-218, 2013.
- [21] Polomčić D, Bajić D, Matić I. & Zarić J, Hydrodynamic characteristics of water supply source of Kikinda (Serbia). Digital Proceedings of the the 8th Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environmental Systems, SDEWE-S13_FP_482. Zagreb, Croatia: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2013.
- [22] Polomčić D, Bajić D. & Krunic O, (o). Hidrodinamička analiza interakcije dva izvorišta u radu na primeru vodosnabdevanja Bečeja (Hydrodynamic analysis of the interaction of two operating groundwater source, case study: groundwater supply of Bečeji). *Tehnika*, Vol. 69, No. 4, pp. 597-603, 2014.
- [23] Warner J. W, Khazaeib W, Warner J, Manghid F, Phranere R.W, Mortazavie B. & Namvarf R, () Flow and transport modelling of a highly stressed aquifer to refine management strategies, *Water International*, Vol. 34, No. 2, pp. 264-279, 2009.
- [24] Yidana M. S, Groundwater flow modeling and particle tracking for chemical transport in the southern Voltaian aquifers. *Environmental Earth Science*, Vol. 63, pp. 709-721, 2011.

SUMMARY

HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF POTENTIAL GROUNDWATER EXTRACTION CAPACITY INCREASE: CASE STUDY OF “NELT” GROUNDWATER SOURCE AT DOBANOVCI

A comprehensive hydrodynamic analysis of the groundwater regime undertaken to assess the potential for expanding the “Nelt” groundwater source at Dobanovci, or developing a new groundwater source for a future baby food factory, including the quantification of the impact on the production wells of the nearby “Pepsi” groundwater source, is presented in the paper. The existing Nelt source is comprised of three active production wells that tap a subartesian aquifer formed in sands and gravelly sands; however, the analysis considers only the two nearest wells. A long-term group pumping test was conducted of production wells N-1 and N2 (Nelt source) and production wells B-1 and B-2 (Pepsi source), while the piezometric head in the vicinity of these wells was monitored at observation well P-1, which is located in the area considered for Nelt source expansion. Data were collected at maximum pumping capacity of all the production wells. A hydrodynamic model of groundwater flow in the extended area of the Nelt source was generated for the purposes of the comprehensive hydrodynamic analysis. Hydrodynamic prognostic calculations addressed two solution alternatives for the capacity increase over a period of ten years. Licensed Visual MODFLOW Pro software, deemed to be at the very top in this field, was used for the calculations.

Key words: hydrodynamic model, MODFLOW, solution alternatives