

Hidrodinamička simulacija i analiza režima podzemnih voda pod uticajem bunara sa horizontalnim drenovima (primer beogradskog izvorišta)

ĐORĐIJE M. BOŽOVIĆ, JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, Beograd

DUŠAN M. POLOMČIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

DRAGOLJUB I BAJIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 628.1.036:532.546

556.34

DOI: 10.5937/tehnika1505777B

Danas je uobičajeno u praksi hidrodinamičkih istraživanja da se analiza bunara sa horizontalnim drenovima sprovodi kroz izradu hidrodinamičkog modela. Mogućnosti realnog predstavljanja konstruktivnih karakteristika bunara (šahta i drenova), zajedno sa mehanizmom eksploatacije podzemnih voda preko poznatog nivoa u unutrašnjosti drenova i kalibrisanog koeficijenta njihove propusnosti su bile ograničene u zastupljenim kodovima za numeričko modeliranje. U praksi, ograničenja su prevazilažena primenom različitih modelarskih tehnika šematizacije graničnih uslova za dobijanje tzv. „reprezentativnih“ prikaza bunara, što nije bilo bez uticaja na rezultate modela. Ovaj rad ima za cilj analizu simulacije bunara sa horizontalnim drenovima u MODFLOW-USG kodu zasnovanom na numeričkoj metodi konačnih zapremina. Kao primer je odabran jedan od bunara beogradskog izvorišta podzemnih voda u čijoj je zoni uticaja registrovana kompleksna promena režima podzemnih voda. Dobijeni rezultati ukazuju da se metoda može primeniti u simulaciji praktično svih aspekata i uslova rada ovog tipa bunara sa najvišim stepenom reprezentativnosti.

Ključne reči: vodosnabdevanje, bunar sa horizontalnim drenovima, hidrodinamički model, MODFLOW-USG

1. UVOD

Bunari sa horizontalnim drenovima (BHD) predstavljaju vodozahvatne objekte izgrađene u cilju eksploatacije većih količina podzemnih voda. Najčešće se grade u izdanima formiranim u aluvijalnim sedimentima, neposredno uz obalu stalnih površinskih tokova. Eksploatacija podzemnih voda na izvorištima gde su izgrađeni ovakvi bunari se odvija prema zakonitostima procesa priobalne filtracije [1].

Na beogradskom izvorištu podzemnih voda je izgrađeno 99 BHD. Od samog početka eksploatacije, bunari se nalaze pod uticajem procesa starenja, tj. kontinuiranog opadanja njihovog kapaciteta [2]. Tokom višedecenijskog delovanja različitih prirodnih i antropogenih (mehaničkih, hemijskih, biohemijskih i hidrauličkih) faktora, došlo je do delimičnog ili potpunog uništenja filterske konstrukcije i/ili smanjenja poroznosti filtera i prifilterske zone. Rezultat lošeg stanja

drenova je permanentno smanjenje eksploatacije podzemnih voda ($1 \text{ m}^3/\text{s}$ za poslednjih 10 godina). Rezultati dosadašnjih istraživanja ukazuju da potencijal prihranjivanja izdani koji pruža reka Sava nema uticaja na dinamiku ovog procesa.

Sprečavanje daljeg opadanja kapaciteta bunara i održavanje sadašnjeg učešća podzemnih voda u ukupnom vodosnabdevanju Beograda (trenutno u jednakom odnosu sa prerađenom rečnom vodom) se može postići zamenom dotrajalih drenova na gotovo polovini izgrađenih bunara.

U zoni uticaja BHD na beogradskom izvorištu prisutni su kompleksni uslovi filtracije podzemnih voda koji se isključivo mogu predstaviti, upoznati i kvantifikovati simulacijom na hidrodinamičkom modelu.

Do danas je formiran veći broj detaljnih hidrodinamičkih modela koji su poslužili za upoznavanje različitih scenarija režima podzemnih voda prisutnih na beogradskom izvorištu.

Ipak, tim ni izbliza nisu iscrpljene sve mogućnosti hidrodinamičke analize efekata rada ovog tipa vodozahvatnih objekata, prvenstveno kroz definisanje veličine otpora na drenovima, promenljivosti

Adresa autora: Đordije Božović, JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, Beograd, Kneza Miloša 27

Rad primljen: 17.09.2015.

Rad prihvaćen: 21.09.2015.

hidrogeološke funkcije prifilterske zone, kao i razdvajanja hidrauličkih otpora na filterskoj konstrukciji i u prifilterskoj zoni od otpora u unutrašnjosti filtera i dr.

Ovaj rad ima za cilj da na karakterističnom primeru jednog od BHD beogradskog izvorišta detaljno predstavi:

- postupak izrade hidrodinamičkog modela u poslednjoj verziji softvera MODFLOW–USG, kao i
- analizu kompleksnog režima podzemnih voda koji nastaje kao posledica diskretnih promena uslova eksploatacije.

Kao primer je odabran bunar RB–46 koji kapacitetom crpenja od svega 20–tak l/s formira velika sniženja i prostorno kompleksne gradijente nivoa podzemnih voda u zoni uticaja. Koliko je autorima rada poznato, ovo je do sada jedini primer upotrebe verzije MODFLOW–USG u detaljnoj simulaciji rada BHD.

2. KRATAK PREGLED HIDRODINAMIČKIH ISTRAŽIVANJA BHD

Hidrodinamička analiza efekata rada BHD na beogradskom izvorištu podzemnih voda je u primeni već sedam decenija, što ne čudi ako se ima u vidu njihov privredni značaj. U početku su korišćena brojna analitička rešenja (domaćih i inostranih autora), čiji su rezultati ukazivali na značajna ograničenja u praktičnoj primeni [3–5]. U svetu su u poslednjih nekoliko godina analitička rešenja doživela značajna poboljšanja [6–9]. Međutim, kako se matematičkim izrazom ne mogu jednostavno opisati različita stanja i nepravilna prostorna orijentacija drenova, heterogenost vodonosne sredine u njihovom okruženju i brojni drugi faktori od uticaja, upotrebljivost ovih izraza u praktične svrhe na beogradskom izvorištu je i dalje nedovoljna.

Napredak računarske tehnike je omogućio dinamičan razvoj softverskih alata, čijom primenom se mogu uspešno simulirati i analizirati najrazličitiji scenariji režima podzemnih voda, transport zagađujuće materije i energije (toplote) kroz poroznu sredinu. Danas je istraživačima omogućeno da na numeričkim hidrodinamičkim modelima realno predstavljaju konstruktivne delove BHD: vertikalni betonski šaht i (sub)horizontalne drenove. Takođe, detaljno upoznavanje hidrogeoloških uslova terena, kao i graničnih uslova, uz svu kompleksnost i heterogenost koju mogu imati, više ne predstavlja ograničenje.

U poslednjih 15–tak godina se za simulaciju BHD u svetu uspešno primenjuju različiti višeslojeviti, trodimenzionalni numerički modeli analitičkih elemenata [10–12]. Ova metoda, međutim, nije našla primenu u detaljnoj analizi bunara na beogradskom izvorištu.

Numerički modeli po metodi konačnih razlika su i dalje zastupljeni u istraživanjima, iako bi se moglo reći

da je odavno prošao period „renesanse“ koju je ova metoda donela hidrodinamičkoj analizi [13, 14]. Čini se da su rezultati koje istraživači širom sveta i danas ostvaruju upotrebom tradicionalnih graničnih uslova za simulaciju vodoprijemnih delova BHD argument kojim ova metoda „poručuje“ da joj pripada nešto više od istorijske vrednosti.

Početak primene metode konačnih elemenata je značio raskid sa brojnim ograničenjima koje je imala metoda konačnih razlika. Formiranje detaljnih modela je postalo jednostavnije i efikasnije a njihova pouzdanost veća. Omogućena je diskretizacija prostora samo lokalno oko unutrašnjih graničnih uslova (drenovi BHD), bez uticaja na ostatak prostora obuhvaćenog modelom. Takođe, stvoreni su uslovi za realnije predstavljanje geometrije slojeva i korita vodotoka. U svetu su konkretni zadaci u modeliranju BHD najčešće rešavani upotrebom FEFLOW softvera/koda [15, 16].

Ova numerička metoda je našla široku primenu na beogradskom izvorištu podzemnih voda. Pre desetak godina, sa otpočinjanjem aktivnosti na revitalizaciji drenova na bunarima, započeta su i detaljna hidrodinamička istraživanja koja je pokrenuo Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ [17–20]. Za potrebe detaljne analize efekata rada BHD na hidrodinamičkim modelima, razvijen je namenski softver za simulaciju BHD i kretanja podzemnih voda pod uticajem njihovog rada. Ovaj softver (LIZZA) je prvobitno bio zasnovan na metodi konačnih elemenata, a kasnije je unapređen u metod konačnih zapremina [21, 22].

Rezultati koji su ostvareni izradom i analizom detaljnih modela su imali takav značaj da je među istraživačima koji se bave BHD usvojen princip istraživanja koji nalaže da se za svaki od bunara za koji je potrebno uraditi projektnu dokumentaciju revitalizacije neizostavno izradi detaljan hidrodinamički model (za koje još postoji naziv lokalni ili mikro modeli). Detaljni modeli bunara se danas intenzivno formiraju i u cilju analize i praćenja efekata eksploatacije podzemnih voda preko bunara koji imaju stare drenove, ocene efekata njihove regeneracije i td.

Metoda konačnih zapremina je u istraživanjima računarski simuliranog kretanja podzemnih voda uvedena nedavno, polovinom 2013. godine, predstavljanjem nove verzije programa MODFLOW, koji se smatra svetskim profesionalnim standardom u oblasti simulacije i prognoze uslova filtracije podzemnih voda. Nova verzija programa: MODFLOW–USG, je zasnovana na rešavanju sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina primenom numeričke metode konačnih zapremina, tj. metode integrisanih konačnih razlika (CVFD – control volume finite difference). Ova metoda pruža široke mogućnosti u pogledu diskretizacije prostora obuhvaćenog modelom nestruktuiranim diskretnim

poljima različitog oblika i dimenzija (za razliku od prethodnih verzija koje su koristile isključivo mrežu pravolinijskih ćelija) [23]. Metoda konačnih zapremina je nakon kraćeg vremena primenjena i na mreži konačnih elemenata (CVFE – control volume finite element).

Utisak je da MODFLOW–USG sadrži sve dobre strane metode konačnih razlika i konačnih elemenata a da je istovremeno oslobođen njihovih ograničenja i nedostataka, npr. slojevi na modelu ne moraju biti kontinualni duž istražnog prostora obuhvaćenog modelom, dok diskretizacija može biti različita za svaki od slojeva, što rezultira manjim brojem diskretnih polja (lakšim i bržim proračunima), realno predstavljanje geometrije slojeva i proslojaka/sočiva, kao i rasednih struktura, uspešno rešeno pitanje tzv. „suvih“ polja, postojanje softverskih paketa (modula) čijom upotrebom se mogu uspešno simulirati specifični uslovi kretanja podzemnih voda (npr. kroz karstne kanale), kao i simulirati složeni vodozahvatni objekti. Jedan od takvih paketa je i CLN (Connected Linear Network).

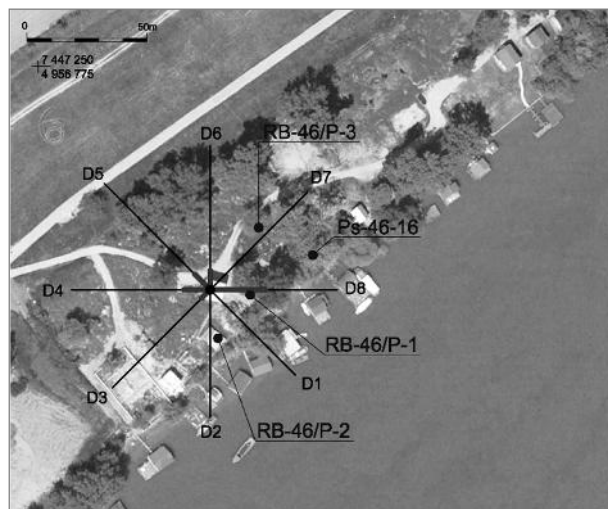
Nagoveštaj da se bunari sa horizontalnim drenovima mogu simulirati preko CLN paketa, dali su autori MODFLOW–USG [24]: „A CLN network may be useful for representing tile drains, radial collector wells, or other connected linear features.“ (u slobodnom prevodu: Mreža međusobno povezanih linijskih elemenata – CLN, može biti korisna za simulaciju cevnih drenaža, bunara sa horizontalnim drenovima ili drugih linijskih objekata).

Uparedna analiza različitih verzija MODFLOW–a za simulaciju BHD je urađena nedavno, na primeru izvorišta vodosnabdevanja grada De Moinesa u SAD (Des Moines, Iowa) [25]. Tema hidrodinamičke analize je bilo ispitivanje uticaja: različitih pristupa u diskretizaciji prostora u zoni BHD, proračunske efikasnosti, mogućnosti zadavanja unutrašnjih otpora u drenovima i turbulentnog režima kretanja podzemnih voda u drenovima. Međutim, u ovom radu nije prikazana metodika izrade i analize formiranih modela, već samo mogućnosti različitih verzija i paketa softvera za manje ili više uspešnu simulaciju BHD.

3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE BUNARA

Bunar sa horizontalnim drenovima RB–46 se nalazi na levoj obali reke Save, na oko 13,5 km od njenog ušća u Dunav. Izgrađen je 1982. godine. U pitanju je tipičan vodozahvatni objekat sa horizontalnim drenovima, koji se sastoji od 3 celine: bunarske kućice, bunarskog šahta i drenova. Iz bunarskog šahta, radijalno je utisnuto 8 drenova po tzv. beogradskoj modifikaciji Reni (Ranney) metode na koti 52,40 mnm.

Položaj osmatračkih objekata u odnosu na raspored drenova, početne dužine i dužine snimljene tokom 2007. godine su predstavljeni na slici 1.



Slika 1 - Početne dužine i dužine drenova utvrđene ispitivanjem 2007. godine

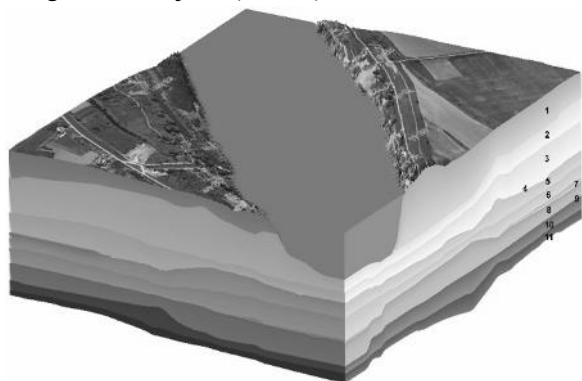
Početni kapacitet bunara je bio procenjen na 150 l/s, da bi nakon nekoliko godina rada drastično opao. Na bunaru su izvršene tri mehaničke regeneracije drenova. U okviru poslednje regeneracije (2004. godine) utvrđeno je loše stanje drenova. U 2007. godini je izvršeno snimanje aktivnih drenova podvodnom kamerom pri čemu su utvrđene dužine i vertikalne devijacije drenova. Konstatovano je da je 5 od 6 aktivnih drenova delimično prohodno. Dren broj 1 je već na samom ulazu iz šahta bio zasut materijalom vodonosne sredine, tako da ga nije bilo moguće ispitati. Drenovi: 3, 4, 5, 6 i 8 su snimljeni u dužini od 3 m, 9 m, 7 m, 6 m i 21 m, respektivno. Vertikalna devijacija na najdužem drenu je zanemarljiva. Drenovi su zapunjeni materijalom sredine i zarušeni, tj. skraćeni na određenim stacionažama koje nije bilo moguće utvrditi jer u takvim situacijama postoji rizik od zaglave mernih instrumenata. Iz tog razloga, drenovi su na modelu zadati sa pretpostavljenim, „hidraulički ekvivalentnim“ dužinama.

4. GEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ODLIKE ISTRAŽNOG PROSTORA

Klastične stene prisutne u široj zoni bunara RB–46 imaju tipično razviće kvartarnih aluvijalnih sedimentata savske doline. Predstavljene su policikličnim sedimentima intergranularne poroznosti, različite mehaničke kompozicije zrna, sa čestim smenama u planu i profilu, koje ukazuju na energiju rečnog toka, značajan uticaj bočnih pritoka i brze promene uslova taloženja sedimenta facije korita i facije povodnja u dolini Save, u periodu pleistocena i holocena. Vodonosnu sredinu predstavljaju peskovi i šljunkovi u različitom međusobnom odnosu. Osnovna odlika vodonosne sredine je izražena heterogenost litološkog i granulometrijskog sastava, što ima velikog uticaja na filtraciona svojstva. Vrednosti karakterističnih prečnika zrna

sedimenata prisutnih na koti utisnutih drenova su: $d_{10}=0,15-0,35$ mm i $d_{50}=0,3-4,5$ mm. Šematizacija vodonosne sredine je izvršena interpretacijom rezultata istražnog bušenja i granulometrijskih analiza. Ukupno su analizirane 143 bušotine, od čega 19 u neposrednoj okolini bunara RB-46.

Polazna osnova za šematizaciju je bio reprezentativni hidrogeološki stub, opšteprihvaćen u praksi istraživanja na beogradskom izvorištu poslednjih godina [26]. Hidrogeološki model je formiran preko 11 litostratigrafskih slojeva (slika 2).



Slika 2 - Trodimenzionalni hidrogeološki model terena u široj zoni bunara RB-46

Najmlađi sedimenti na istražnom prostoru su recentne aluvijalne tvorevine facije povodnja. Prisutne su na površini terena u okvirima rasprostranjenja doline reke Save. U litološkom smislu čine ih slabopropusne glinovite, glinovito-prašinate i prašinate naslage, debljine od 3 do 6 m (na slici 2 predstavljene su brojem 1). U hidrogeološkom smislu ovaj sloj ima funkciju slabopropusne povlate koja pruža relativno dobru zaštitu vodonosnoj sredini od zagađenja sa površine terena.

Vodonosni sedimenti holocenske starosti su nastali u faciji korita. Šljunkoviti peskovi predstavljaju bazalni deo savremenog korita Save (sloj 3). Njihova debljina u užoj zoni bunara varira od 2-7 m. Preko njih su deponovani sitnozrni do srednjezrni peskovi, jednorodnog mehaničkog sastava (sloj 2).

Sedimente pleistocena odlikuje višestruko naslojavanje facija korita i povodnja. Litološkom i granulometrijskom analizom identifikovana su tri sedimentaciona ciklusa, koji su predstavljeni različitim litofacijama, od peskovitih šljunkova i šljunkovitih peskova (sloj 10 i 8) do krupnozrnih peskova koji navise prelaze u peskove sitnijih frakcija zrna (sloj 6 i 5).

Zajedničko svim ciklusima je da se, po pravilu, u bazi nalaze sedimenti najvećih frakcija zrna a sa smanjenjem dubine postepeno prelaze u sitnozrnije materijale. U njima su, kao završni članovi svakog od ciklusa sedimentacije lokalno prisutne gline, alevritske gline, alevriti i muljevi.

Proslojci (sočiva) prašinatog, muljevitog ili glinovitog litološkog sastava su na prostoru istraživanja interkalirani kroz vodonosnu sredinu tako da je lokalno presecaju i po više puta. Na hidrogeološkom modelu su predstavljeni slojevima 4, 7 i 9.

Zbog svog litološkog sastava imaju slabo propusna do nepropusna filtraciona svojstva. Iako su male debljine (reda 30 cm), njihovo prisustvo je od izuzetnog značaja za rad BHD jer stvaraju velike otpore filtraciji podzemnih voda od korita reke prema drenovima. Detaljno poznavanje lokalnih hidrogeoloških uslova terena u zoni svakog od bunara je ključan uslov uspešne revitalizacije.

5. OPIS I POSTAVKA PROBLEMA ISTRAŽIVANJA

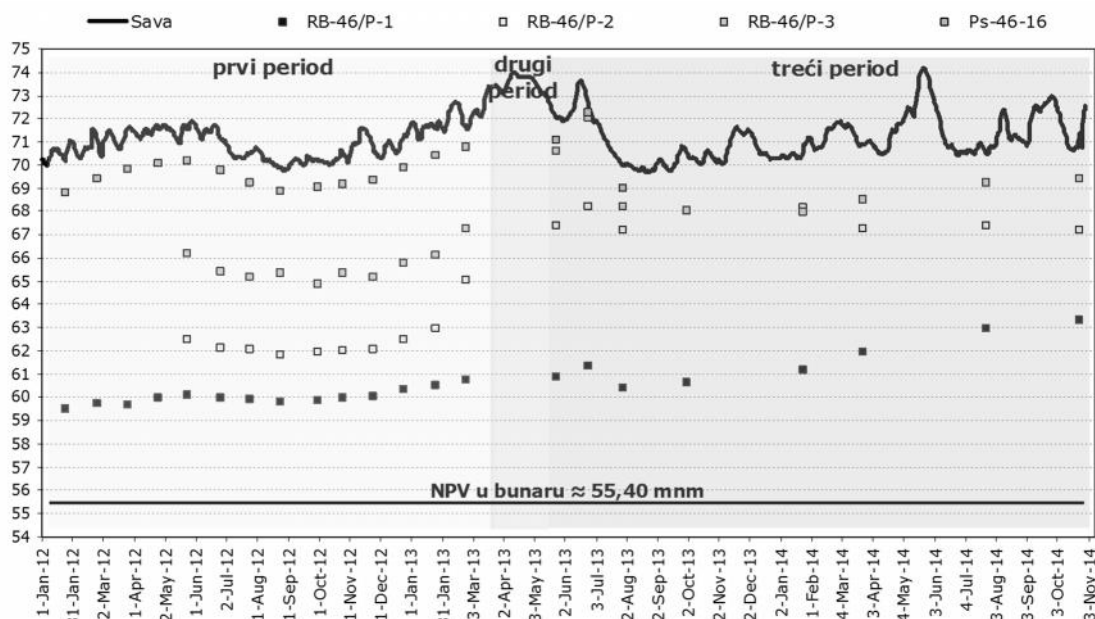
Do većih sniženja nivoa podzemnih voda u zoni drenova na bunarima beogradskog izvorišta dolazi generalno u dva slučaja:

- pri zahvatanju većih količina voda, kod bunara koji su zadržali najveći deo početne dužine drenova i uz prisustvo slabo propusnog međusloja (primer bunara na Novom Beogradu) i
- pri niskom stepenu ili odsustvu kolmiranosti drenova i maloj količini vode koja se crpi, kada su duboki nivoi podzemnih voda rezultat slabih filtracionih svojstava vodonosne sredine, tj. otpora koji nastaju pri filtraciji podzemnih voda na putu od korita reke prema drenovima bunara.

Hidraulički mehanizam filtracije podzemnih voda u zoni uticaja bunara RB-46 je kompleksan, zbog čega strujna slika ima veoma izražen trodimenzionalni karakter. Bunarom se zahvata mala količina vode, a formiraju se strmi gradijenti pijezometarskog nivoa na malom rastojanju od drenova.

Oscilacije nivoa podzemnih voda u zoni lepeze nekadašnjih drenova se prate preko četiri pijezometra, od čega tri nova imaju kratke filtere, postavljene na dubini drenova (RB-46/P-1, P-2 i P-3), dok je četvrti pijezometar izgrađen u vreme izgradnje bunara i ima plitko postavljen filter (Ps-46-16).

Analizom je obuhvaćen period eksploatacije od 01.01.2012. do 31.10.2014. godine, u toku kojeg je nastupila promena stanja nivoa izdani u zoni uticaja rada bunara. Na dijagramu oscilacija nivoa na slici 3 se može primetiti da su od polovine 2013. godine promenjeni uslovi kretanja podzemnih voda. Od početka analiziranog perioda do polovine 2013. g, pijezometar RB-46/P-1 je beležio nivo u intervalu od 59,5 mm do 60,75 mm. Druga dva nova pijezometra (RB-46/P-2 i RB-46/P-3), registruju više nivoa, oko kote 62 mm i 65 mm. Ovaj period je označen kao prvi period na slici 3.



Slika 3 - Oscilacije nivoa podzemnih voda u zoni bunara RB-46

U periodu visokih vodostaja Save tokom aprila i maja 2013. godine, došlo je do promene režima podzemnih voda (na slici 3 označeno kao drugi period). Od tog trenutka pijeometri P-2 i P-3 naglo počinju da registruju nivoje na znatno višim kotama: P-2 na koti 67 mm, a P-3 na koti 68–69 mm (označeno kao treći period). Registrovanje promena nije sinhronizovano kod svih osmatračkih objekata. Tek od oktobra meseca iste godine, pijeometar P-1 počinje da beleži porast nivoa (od 60,6 do 63,3 mm). Pri svemu ovome, nivo vode u bunaru nije promenjen ($H_b=55,4$ mm) a promene kapaciteta bunara tokom čitavog analiziranog perioda su minimalne ($Q=20$ l/s za nisku Savu, $Q=25$ l/s u vreme visokih vodostaja i $Q=15$ l/s na kraju analiziranog perioda). Razumevanje nastanka ovakve strujne slike dodatno komplikuju položaji pijeometara. Za pijeometar P-1, situacija je jasna jer se on nalazi neposredno uz dren broj 8. Pijeometar P-2 i P-3 su približno podjednako udaljeni od drena 8, ali se nivoi na njihovim lokacijama nalaze na različitim dubinama, što upućuje na zaključak da se P-2 (koji registruje niži nivo) nalazi pod uticajem još nekog drena. Najbliži dren ovom pijeometru je dren 2, koji nije u funkciji već 10–tak godina.

Objašnjenje za promene režima podzemnih voda je traženo u promeni stanja drenova. Postavljena hipoteza je zasnovana na tome da je u periodu visokog vodostaja došlo do izdizanja nivoa podzemnih voda u zoni bunara, što su i registrovali pijeometri P-2 i P-3. Svojom reakcijom na promenu vodostaja, sva četiri pijeometra su ukazala na solidan kvalitet hidrauličke veze izdani i reke. Za dren broj 8 je pretpostavljeno da ima najveći pojedinačni kapacitet (jer je snimljen u najvećoj dužini i bio u

najboljem stanju), zbog čega je određeno vreme od promene hidroloških uslova uspevao da održava nivoje na prethodnoj dubini. Povećanje gradijenta u pravcu Z ose u neposrednoj zoni ovog drena je dovelo do malog povećanja kapaciteta bunara, što je ukazivalo da se režim eksploatacije nalazi u maksimalno napregnutom stanju i da kapacitet bunaru primarno obezbeđuje ovaj dren.

Pretpostavljeno je i da je došlo do zarušavanja ili dodatnog skraćivanja nekih drenova, budući da je stanje nivoa u pijeometru P-2 upućivalo na zaključak da se nivoi na lokaciji pijeometra ne nalaze pod uticajem samo drena br. 8.

Snimci kamerom su pokazali da su drenovi delimično zarušeni u punoj cevi što ne znači da nisu aktivni jednim delom svoje prvobitne dužine. Moguće je da je povećanje pritiska vodenog stuba iznad drena na račun višeg vodostaja reke (zajedno sa pritiskom težine sedimenata) prešlo kritičnu tačku zbog čega je došlo do urušavanja drena. Postoje mnogi bunari na izvoristu koji i pored drenova prilično zapunjenih materijalom vodonosne sredine imaju solidan kapacitet.

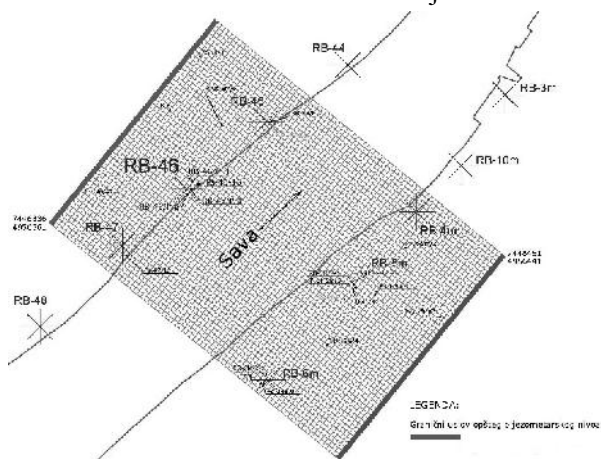
Ovo je zbog toga što u drenu koji ima filter u lošem stanju i koji je u većem delu poprečnog preseka zapunjen materijalom, ipak moguće održavati uslov nivoa koji je jednak nivou u bunarskom šahtu. Tek kada je dren potpuno zarušen na nekoj stacionaži, više se ne može smatrati da od tog mesta on predstavlja vodozahvatni objekat već samo poroznu sredinu (ispranu ili kolmiranu prethodnim radom drena).

U cilju provere postavljene hipoteze, formiran je detaljni hidrodinamički model na kojem su rekonstruisani hidrodinamički uslovi na široj lokaciji bunara RB-46.

6. HIDRODINAMIČKI MODEL

Hidrodinamički model je formiran u softveru Groundwater Vistas, verzija 6.79 (build 2) [27]. Konceptcija izrade je bila takva da su pored analiziranog bunara obuhvaćeni i okolni bunari, po jedan nizvodno i uzvodno od njega u okviru bunarskog niza (RB-45 i RB-47), kao i tri bunara na naspramnoj obali reke (RB-6M, RB-5M i RB-4M), slika 4.

Analizirani bunar RB-46 je detaljno predstavljen na modelu (realnim konstruktivnim karakteristikama), dok su okolni bunari simulirani nižim nivoom detaljnosti – kao vertikalni, cevasti bunari velikog prečnika ali sa promenljivim kapacitetima crpenja, u skladu sa rezultatima terenskih merenja.



Slika 4 - Područje obuhvaćeno modelom i granični uslovi na konturama modela

Legenda:

— Granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa severozapadnoj granici modela

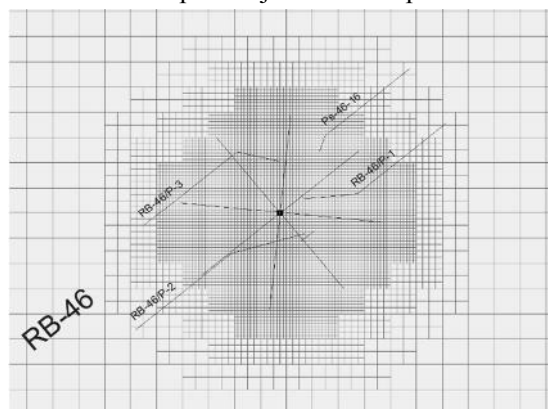
Hidrodinamički model ima sedam slojeva. Povlatni sloj i svi registrovani slabopropusni slojevi predstavljaju zasebne slojeve i imaju geometriju koja odgovara onoj u hidrogeološkom modelu, dok su dva vodonosna sloja u hidrogeološkom modelu zadata kao jedan sloj na hidrodinamičkom modelu. Šema prema kojoj je izvršeno prevođenje slojeva iz konceptualnog hidrogeološkog u hidrodinamički model je predstavljena u tabeli 1.

Kao što je prethodno rečeno, primenjeni kod MODFLOW-USG ima mogućnost zadavanja slojeva u granicama njihovog realnog rasprostranjenja, tako da slabopropusni slojevi 4, 7 i 9 nisu zadati kontinualno duž celog modela već samo u zoni u kojoj su registrovani (prisustvo sloja 7 nije identifikovano u zoni bunara RB-46).

Tabela 1. Konceptcija slojeva na HG i HD modelu

HG model		HD model
1	→	1
2	→	2
3	→	2
4	→	3
5		
6	→	4
7		
8	→	5
9	→	6
10	→	7
11	→	nije zadat

Diskretna strujna polja su kvadratnog oblika, dimenzija 16x16 m (eng. parent model). U zoni bunara RB-46 je izvršeno pugušćavanje zadavanjem nepravilne pravougaone umetnute mreže (tzv. quadtree refinement), koja je omogućila da se u delu prostora oko bunara svako od odabranih polja podeli na 4 polja jednakih dimenzija, sve do željenog nivoa diskretizacije (slika 5). U toj zoni je najizraženije strujanje podzemnih voda u odnosu na Z osu. Veća rezolucija omogućava tačnije proračune i pomaže u prikazu sračunatih vrednosti potencijala u zoni lepeze drenova.



Slika 5 - Diskretizacija prostora u zoni RB-46

Primenjen je četvrti nivo diskretizacije, što znači da su polja sa početnim dimenzijama umanjena do dimenzija 2x2 m. Odabrana metoda šematizacije prostora je pogodna zbog toga što se povećanje broja polja dešava samo u određenom delu prostora, zbog čega se ukupan broj diskretnih polja ne uvećava značajno. Na ovaj način su ostvareni brži i stabilniji proračuni a postupak kalibracije modela je bio olakšan.

U cilju zadavanja spoljašnjih graničnih uslova na konturama modela, analizirani su nivoi podzemnih voda u pijezometrima u zaleđu bunarskog niza, kao i gradijenti nivoa prema bunarskim linijama. Za simulaciju potencijala na konturama modela upotrebljen je granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa (slika 4).

Granični uslov *reka* je zadat na osnovu podataka o vodostaju za v.s. Beograd, bez pada vodnog ogledala (zbog malih dimenzija modela). Analizom dnevnih vodostaja Save, odabrana je dužina proračunskog koraka u trajanju od 5 dana. U skladu sa tim, model ima 207 proračunskih intervala, tzv. stres perioda. Na osnovu analizirane geometrije korita reke, izdvojene su dve zone različitih dubina usecanja u vodonosne sedimente. Prva zona ima dominantno rasprostranjenje, usečena je u peskovite sedimente označene slojem 2 u hidrogeološkoj šematizaciji područja, a na modelu je zadata sa kotom dna korita 64 mm. Druga zona ima manje rasprostranjenje u planu, predstavlja deo korita reke koji je usečen u sedimente facije korita peskovitošljunkovitog litološkog sastava do kote 62 mm (sloj broj 3 na HG modelu). Na hidrodinamičkom modelu, reka je zadata u drugom hidrodinamičkom sloju. Vrednosti koeficijenta filtracije naslaga rečnog dna su dobijene u postupku kalibracije modela. Došlo se do reprezentativne vrednosti parametra K/d preko kog se simulira otpor infiltracije rečne vode Save u vodonosnu sredinu. Obe zone su zadate sa vrednošću $K=2 \times 10^{-7}$ m/s, dok je debljina naslaga rečnog dna od $d=1$ m.

Elementi vertikalnog bilansa nisu uzeti u razmatranje u formiranom hidrodinamičkom modelu, imajući u vidu zanemarljiv uticaj prihranjivanja analiziranog dela izdani na račun infiltracije atmosferskih taloga, kao i dreniranja putem isparavanja sa površine nivoa izdani u okvirima lokalnog modela.

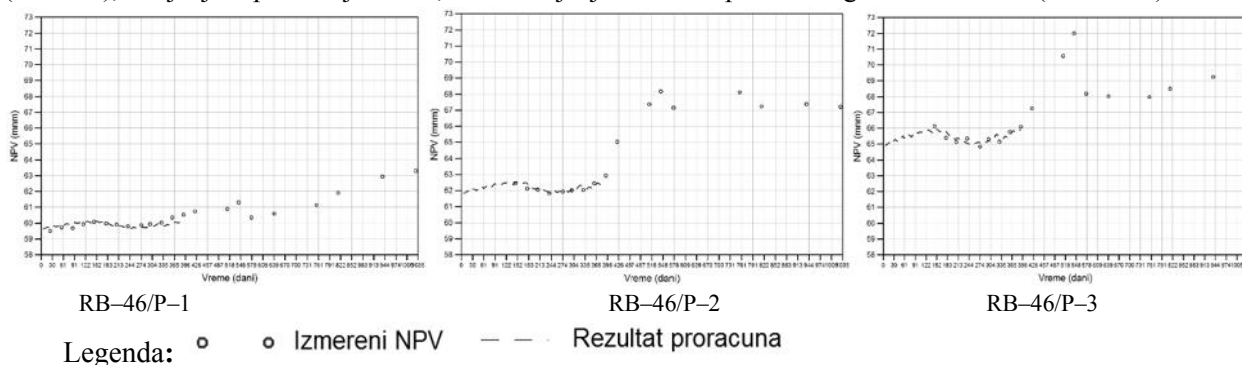
Za simulaciju drenova na bunaru korišćen je paket CLN koji je sadržan u softveru MODFLOW-USG. Paket omogućava da se u modelu predstave vodozahvatni objekti (ili bilo koji drugi objekti kroz koje se vrši kretanje podzemnih voda) koji imaju tu osobinu da im je površina poprečnog preseka višestruko manja od njihove dužine. Drugim rečima, paket je namenjen simulaciji kretanja podzemnih voda kroz linijske objekte (kakvi i jesu drenovi BHD). Programski kod je napisan tako da istovremeno rešava jednačine strujanja u mreži međusobno povezanih linijskih elemenata (drenova), strujanja u poroznoj sredini, kao i strujanja

između porozne sredine i drenova. Objekti mogu biti vertikalni, horizontalni ili kosi, a na modelu se predstavljaju jednim ili preko više međusobno povezanih elemenata. U pogledu šematizacije, CLN paket je vrlo fleksibilan, što korisnicima omogućava komfor u definisanju realne prostorne orijentacije graničnih uslova. Nije potrebno da nivo diskretizacije linijskih elemenata prati nivo diskretizacije mreže diskretnih strujnih polja (trouglova, poligona, Voronoi poligona ili strujnih polja bilo kog drugog raspoloživog oblika).

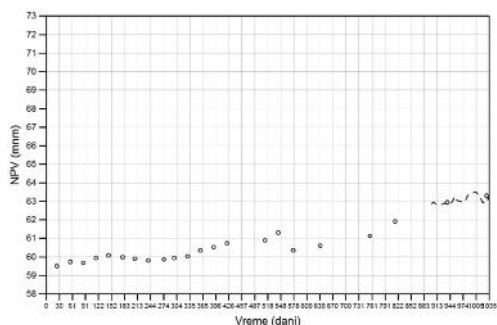
Nivoi u unutrašnjosti drenova odgovaraju nivou vode u bunarskom šahtu, koji se duži niz godina generalno održava na oko 55,4 mm (3 m iznad drenova). Od tri raspoložive, odabrana je opcija proračuna kapaciteta drenova preko koeficijenta njihove propusnosti, kod koje se kapacitet računa na osnovu poznatih vrednosti nivoa u unutrašnjosti dreva i nivoa na spoljašnjoj strani dreva (koji se dobija osmatranjem nivoa u pije-zometrima), za poznate tehničke karakteristike filter-skih cevi – poluprečnika i dužine. Postupak se sastoji u iterativnom ispitivanju vrednosti koeficijenta propusnosti aktivnih drenova, usaglašavanjem nivoa u osmatračkim objektima sa računskim nivoima i, istovremeno, usklađivanjem sumarnog proticaja drenova sa poznatim proticajem bunara. Model je podeljen na dva perioda (pre i posle porasta vodostaja reke). Svi drenovi su zadati sa jednakim pretpostavljenim (hidraulički ekvivalentnim) dužinama perforiranog dela cevi u dužini od 20 m u prvom periodu a u drugom su neki zarušeni, tj. zanemareni u simulaciji (u skladu sa postavljenom hipotezom).

7. REZULTATI I DISKUSIJA

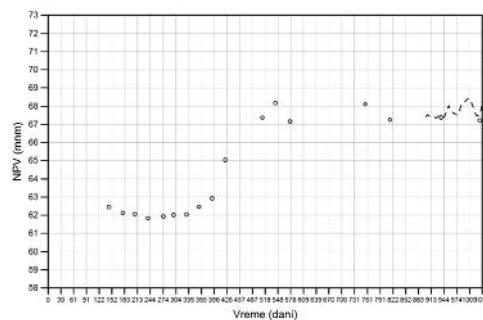
Kalibracija modela je vršena upoređenjem nivoa podzemnih voda osmotrenih u pije-zometrima sa rezultatima proračuna na matematičkom modelu (trial and error metoda), zajedno sa proverom elemenata bilansa za analizirani prostor. Rezultati pokazuju da je postignut visok stepen saglasnosti podataka izmerenih na terenu i rezultata dobijenih proračunom, za zadate vrednosti početnih i graničnih uslova (slika 6 i 7).



Slika 6 - Rezultat kalibracije prvog perioda modela RB-46



RB-46/P-1



RB-46/P-2

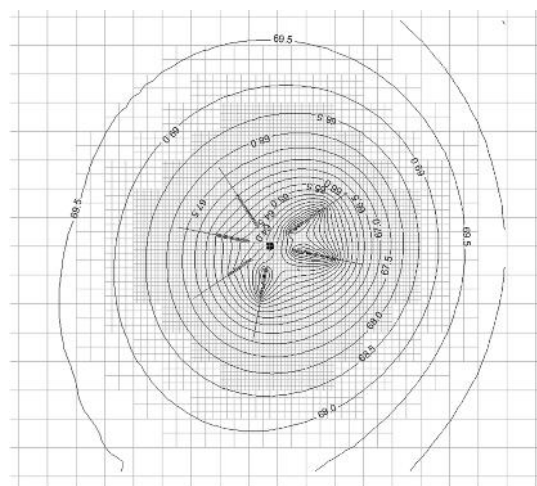
Slika 7 - Rezultat kalibracije završnog dela drugog perioda modela RB-46

Kao rezultat kalibracije modela dobijene su reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije u planu i profilu. U zoni oko bunara RB-46, u sloju u kojem su utisnuti drenovi koeficijent filtracije ima vrednost $K_f=1 \times 10^{-4}$ m/s. Svi slojevi na modelu odlikuju se anizotropijom, koja je zadata u uobičajenom odnosu za aluvijalne sedimente: $K_x=K_y=0,3 \times K_z$. Relativno niske vrednosti koeficijenta filtracije u zoni bunara su u skladu sa prisustvom sloja sitnozrnog i prašinstog peska konstatovanog istražnim bušenjem, na dubini od 17,6–22,6 m (pijezometar P-1). Bilo je opravdano pretpostaviti da su velike količine materijala koji je iznošen iz drenova tokom eksploatacije ovog bunara i tokom regeneracija, rezultat prisustva ovog litološkog člana. Potvrda pretpostavke je dobijena kalibracijom modela, kada je utvrđeno da je vrednost koeficijenta filtracije prifilterske zone (rasprostranjene na rastojanju od 1 m od filtera) oko drena broj 8 veća od koeficijenta porozne sredine ($K_{prif}=1,25 \times 10^{-4}$ m/s). Drenovi broj 1 i 3 imaju iste vrednosti K_{prif} kao i sredina, dok je za drenove: 4, 5 i 6 dobijeno da im je K_{prif} 100 puta manji od sredine, zbog čega su praktično zanemareni u bilansu. Rezultati bilansa i hidrauličkog stanja drenova su dati u nastavku.

Tabela 2. Rezultat kalibracije: bilans bunara RB-46

Datum merenja	Q teren (l/s)	Q model (l/s)	ΔQ (l/s)
18.04.2012.	21	21,2	0,2
17.10.2012.	20	20,8	0,8
23.10.2012.	18,84	20,4	1,5
28.05.2013.	24	23,1	0,9
30.10.2014.	18,5	17,9	0,6

Primenjeni paket CLN trenutno nema mogućnost zadavanja vremenski promenljivog koeficijenta propusnosti drenova, zbog čega je drugi deo analiziranog perioda eksploatacije morao biti podeljen na više delova, tj. urađeno je više zasebnih proračuna. Na slici 7 je prikazan rezultat kalibracije završnog dela analiziranog perioda.



Slika 8 - Raspored ekvipotencijalnih linija u zoni RB-46 dobijenih na modelu (stanje 18.04.2012.)

Rezultati pokazuju da je u odnosu na prvi period došlo do promene u stanju drenova:

- koeficijent propusnosti drena 8 je smanjen sa $K_f=1,25 \times 10^{-4}$ m/s na $K_f=8 \times 10^{-5}$ m/s,
- dren broj 1 je zarušen u periodu velikih voda Save ($K_f=1 \times 10^{-4}$ m/s smanjen na $K_f=1 \times 10^{-6}$ m/s),
- dren broj 3 je zadržao isti $K_f=1 \times 10^{-4}$ m/s.

Merenje nivoa podzemnih voda 25.01.2014. godine je pokazalo da je nivo u pijeziometrima P-2 i P-3 bio na istoj koti. Od tog trenutka, intenzivira se proces starenja drena 8, što se manifestuje stalnim rastom nivoa i smanjenjem kapaciteta drena. Takođe, raste i nivo u pijeziometru P-3 koji je pod uticajem ovog drena. Nivo koji registruje pijeziometar P-2 počinje da opada od navedenog datuma, približno istim intenzitetom kojim raste nivo u P-1. To znači da je dren 3 preuzeo hidrauličku funkciju drena 8 i počeo da zahvata sve veću količinu vode kako proces starenja drena 8 napreduje. Sve do slabljenja drena 8 to nije bilo moguće jer je on bio dominantan među aktivnim drenovima (kako u pogledu vrednosti koeficijenta filtracije tako i u pogledu dužine). Sagledavajući sveukupno stanje režima, od početka drugog dela perioda obuhvaćenog analizom, kapacitet bunara je u opadanju.

8. ZAKLJUČAK

Hidrodinamička analiza je sprovedena izradom detaljnog hidrodinamičkog modela režima podzemnih voda pod uticajem rada bunara sa horizontalnim drenovima. Rezultati analize su pokazali da se paket CLN sadržan u poslednjoj verziji MODFLOW programskog koda (MODFLOW-USG) može uspešno primeniti za simulaciju drenova (i ostalih konstruktivnih delova) BHD. Rezultati modelskog istraživanja su potvrdili pretpostavljeni hidraulički mehanizam pod kojim je došlo do promene režima podzemnih voda u zoni bunara. Režim je rekonstruisan sa visokim stepenom pouzdanosti, a svi bitni elementi sistema (hidrogeološke odlike sedimenata, uslovi prihranjivanja, hidrauličke karakteristike drenova, bilans) su kvantifikovani. Ovim su stvoreni uslovi za prognoziranje daljeg napredovanja procesa opadanja kapaciteta bunara.

Bunar RB-46 nije bio adekvatan primer za ispitivanje svih raspoloživih opcija primenjenog CLN paketa, prvenstveno zbog lošeg stanja drenova i mnogih pretpostavki koje bi iz tog razloga morale biti unete u analizu. Paket omogućava analizu i kvantifikaciju uticaja otpora na trenje sa unutrašnje strane filtera, kao i otpora strujanju vode na račun zapunjenosti drena materijalom sredine. Hidrodinamička analiza bunara RB-46 je realizovana uz polaznu pretpostavku da je strujanje u unutrašnjosti drenova laminarnog karaktera, mada je moguće ispitati i kakav bi uticaj na rad bunara imali turbulentni uslovi.

9. ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] Krešić, N, Groundwater Resources. Sustainability, Management and Restoration. McGraw-Hill, p. 521-522, 2009.
- [2] Grupa autora, Studija Beogradsko izvorište podzemnih voda – stanje i pravci razvoja, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 2010.
- [3] Babac, D, Babac P, Beogradsko izvorište podzemnih voda. Bunari sa horizontalnim drenovima. Balby International, Beograd, 2005.
- [4] Hantush, M, Papadopoulos, I, Flow of ground water to collector wells. Proceedings, American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division 88, p. 221-224, 1962.
- [5] Ching-Sheng, H, Pei-Rong, T, Hund-Der, Y, An analytical solution for a radial collector well near a stream with a low-permeability streambed. Journal of Hydrology Vol. 446-447, p. 48-58, 2012.
- [6] Zhan, H, Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer. Water Resources Research Vol. 38, Issue 7, p. 13-1-13-11, 2002.
- [7] Kompani-Zarea, M, Zhan, H, Samania, N, Analytical study of capture zone of a horizontal well in a confined aquifer. Journal of Hydrology Vol. 307, Issues 1-4, p. 48-59, 2005.
- [8] Steward, D, Jin, W, Uniform Head in Horizontal and Vertical Wells. Ground Water, Vol. 44, No. 1, p. 86-90, 2006.
- [9] Huang, C. S, Chen, J. J, Yeh, H. D, Analysis of three-dimensional groundwater flow toward a radial collector well in a finite-extent unconfined aquifer. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 12, p. 7503-7540, 2015.
- [10] Moore, R, Kelson, V, Wittman, J, Rash, V, Modeling Framework for the Design of Collector Wells. Ground Water, Vol. 50, Issue 3, p. 355-366, 2012.
- [11] Haitjema, H, Kuzin, S, Kelson, V, Abrams, D, Modeling flow into horizontal wells in a Dupuit-Forchheimer model, Ground Water, 48(6), p. 878-83, 2010.
- [12] Bakker, M, Kelson, V, A, Luther, K. H, Multilayer Analytic Element Modeling of Radial Collector Wells, Ground Water, 43(6), p. 926-934, 2005.
- [13] Wan Zamri, I, Ismail Bin, Y, Bahaa-edlin Elwali, R, Simulation of horizontal well performance using Visual MODFLOW. Environmental Earth Sciences, 68, p. 1119-1124, 2013.
- [14] X, Xiaomeng, C, Qian, G, Analysis of water-taking effect of Radial Collector Well in the Yellow River Valley. International journal of environmental sciences, Vol. 3, No 6, p. 2031-2035, 2013.
- [15] Lee, E, Hyun, Y, Lee, K, Shin, J, Hydraulic analysis of a radial collector well for riverbank filtration near Nakdong River, South Korea. Hydrogeology Journal, 20(3), 2012.
- [16] Hyoung-Soo, K, Characterization of Groundwater Flow to Horizontal or Slanted Well Using Numerical Modeling. Journal of Soil and Groundwater Environment, 13(2), 2008.
- [17] Dimkić M, Ranković V, Filipović N, Stojanović B, Isailović, V, Pušić, M, Kojić M, Modeling of radial well lateral screens using 1D finite elements. Journal of hydroinformatics, Vol. 15, No. 2, p. 405-415, 2013.

- [18]Dimkić, M, Krstić, M, Filipović, N, Stojanović, B, Ranković, V, Otašević, L, Ivanović, M, Nedeljković, M, Tričković, M, Pušić, M, Boreli-Zdravković, Đ, Đurić, D, Kojić, M, Comparison of Different Configurations of Ranney Wells Using Finite Element Modeling. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, Vol. 1, No. 1, p. 144–153, 2007.
- [19]Pušić, M, Dimkić M, Vidović, D, Dotlić, M, Oparušić I, Analiza uticaja nekih hidrogeoloških parametara na početni kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima. *Vodoprivreda*, Beograd, p. 175–180, 2012.
- [20]Pušić, M, Dimkić M, Vidović, D, Dotlić, M, Oparušić I, Hidrodinamička analiza kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima na primeru beogradskog izvorišta. XIV Srpski hidrogeološki simpozijum sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, p. 21–25, 2012.
- [21]Dotlić, M, Vidović, D, Dimkić M, Pušić, M, Radanović, J, Finite volume method for well-driven groundwater flow. *Finite Volumes for Complex Applications VI Problems and Perspectives*, Vol. 1, FVCA 6, International Symposium, Prague, June 6–10, p. 231–238, 2011.
- [22]Dotlić, M, Finite Volume Methods for Well-Driven Flows in Anisotropic Porous Media. *Comput. Methods Appl. Math.*, 14 (4), p. 473–483, 2014.
- [23]Polomčić, D, Bajić, D, Ristić Vakanjac, V, Čokorilo Ilić, V, MODFLOW na raskršću. *Zapiski srpskog geološkog društva*, Beograd, 2013.
- [24]Panday, S, Langevin, C. D, Niswonger, R. G, Ibaraki, M, Hughes, J. D, MODFLOW-USG Version 1: An Unstructured Grid Version of MODFLOW for Simulating Groundwater Flow and Tightly Coupled Processes Using a Control Volume Finite-Difference Formulation. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2013.
- [25]Dahlstrom, D. J, Janzen, A. K, Rash, V. D, Mechenich, M. F, Simulating Radial Collector Wells – a Comparison of Methods. *MODFLOW and More 2015: Modeling a Complex World – IGWMC – Maxwell, Hill, Zheng & Tonkin (eds)*, p. 350–353, 2015.
- [26]Zorić, M, Slimak, T, Vrvic, N, Metodologija izrade hidrogeološkog modela na primeru bunara sa horizontalnim drenovima RB-16 na Adi Ciganliji. XIV Srpski hidrogeološki simpozijum sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, p. 57–62, 2012.
- [27]Rumbaugh, J. O, Rumbaugh, D. B, Tutorial Manual for Groundwater Vistas, version 6. *Environmental Simulations*, 2011.

SUMMARY

HYDRODYNAMIC SIMULATION AND ANALYSIS OF GROUNDWATER REGIME AS IMPACTED BY RADIAL COLLECTOR WELLS (A CASE STUDY OF BELGRADE'S WATER SUPPLY SOURCE)

The currently prevalent practice in hydrodynamic research is to assess radial wells by constructing a hydrodynamic model. Numerical modeling codes tended to limit the possibility of realistically representing the structural characteristics of a radial well (shaft and laterals), along with the groundwater abstraction mechanism via the known groundwater level within the laterals and the calibrated coefficient of their conductivity. Such limitations were offset by various boundary condition modeling techniques in order to produce a so-called "representative" depiction of the radial well, which did not fail to affect the results. The objective of the present research is to assess the simulation of radial wells in MODFLOW-USG code, based on a numerical method of finite volumes. One of the radial wells at Belgrade's water supply source was selected for the case study, given that a complex groundwater regime change had been registered within its zone of influence. The results indicate that the method can be applied to simulate virtually all aspects and operational conditions of this type of well, with the highest level of representativeness.

Key words: water supply, radial wells, hydrodynamic modeling, MODFLOW-USG