

Hidrodinamičke karakteristike izvorišta podzemnih voda „Ključ“ u Požarevcu

MILICA D. STEPANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

DRAGOLJUB I. BAJIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

ALEKSANDAR D. AVRAMOVIĆ, PD „Georad“ doo, Drmno

MILAN R. TUCAKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

STEFAN Z. ŠIKMAN, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet

Stručni rad

UDC: 628.113(497.11)

556.36(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika2105584S

Geološka i hidrogeološka istraživanja sprovedena na području izvorišta podzemnih voda „Ključ“ u Požarevcu imala su za cilj pre svega određivanje bilansa i rezervi podzemnih voda. Predmetno izvorište se koristi za vodosnabdevanje oko 55.000 stanovnika u Braničevskom okrugu, ukupnog kapaciteta oko 250 l/s. U sklopu primenjenih terenskih hidrogeoloških metoda na datom istražnom području, po svom značaju može se izdvojiti metoda kratkotrajnog opitnog crpenja poznatija kao „step - test“. Podaci sa izvorišta dobijeni na ovaj način obrađeni su grafoanalitičkom metodom obrade podataka opitnog crpenja u nestacionarnom režimu strujanja, odnosno primenom Tajsovog (Theiss) rešenja diferencijalne jednačine strujanja podzemnih voda prema usamljenom bunaru radi definisanja hidrauličkih parametara bunara (hidrauličkih gubitaka u bunaru i prifilterskoj zoni), filtracionih parametara sredine i maksimalno dozvoljenih kapaciteta bunara. Hidraulički gubici koji se javljaju u bunarima uglavnom ukazuju na proces starenja bunara, što najčešće rezultira i smanjenjem kapaciteta istih.

Ključne reči: vodosnabdevanje, „step-test“ hidraulički parametri bunara, filtracioni parametri, maksimalno dozvoljeni kapaciteti bunara

1. UVOD

Podzemne vode predstavljaju veoma značajan segment u sistemu javnog snabdevanja vodom na području Republike Srbije. One učestvuju sa oko 75% od ukupnih količina voda koje se koriste za vodosnabdevanje stanovništva [9]. Pretpostavka je da bi udeo podzemnih voda mogao biti znatno veći ukoliko bi se intenzivnije pristupilo merama veštačke regulacije, odnosno veštačkog prihranjivanja izdani. Jedno od specifičnijih izvorišta koje se nalazi na prostoru naše zemlje, a na kome se i primenjuju pomenute mere predstavlja izvorište „Ključ“ u Požarevcu. Formirano je u aluvijonu Velike Morave, u okviru intergranularne

porozne sredine, gde je režim podzemnih voda u direktnoj zavisnosti od režima reke usled postojanja hidrauličke veze. Brojni autori vršili su istraživanja na ovom području: [1] [4], [7] [8] [13] [14], [15].

Problematika aluvijalnih izdani najčešće se odnosi na relativno brzo staranje eksploatacionih bunara ali i na kvalitet podzemnih voda. Naime, podzemne vode ovakvih izdani najčešće prate povišene koncentracije gvožđa i mangana, a na izvorištu „Ključ“ već godinama se beleže i povišene koncentracije nitrata, najverovatnije usled korišćenja različitih hemijskih sredstava u poljoprivredi.

Mere veštačkog prihranjivanja izdani koje se primenjuju na datom istražnom terenu stoga imaju dvojaku funkciju: da povećaju količinu voda koje će se eksploatirati (kvantitativna) ali i da poboljšavaju kvalitet podzemnih voda, odnosno da nalivanjem novih količina razblaže tj. smanje koncentraciju nitrata u zbirnoj vodi.

Adresa autora: Milca Stepanović, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7

e-mail: milica.stepanovic@rgf.rs

Rad primljen: 01.07.2021.

Rad prihvaćen: 19.10.2021.

Džekoba. Ova metoda spada u grupu grafoanalitičkih metoda koje se koriste za obradu podataka opitnog crpenja u nestacionarnom režimu strujanja i za istu važi pretpostavka da je zasnovana na primeni Tajsove jednačine strujanja prema usamljenom savršenom bunaru [11]. Pored toga, neophodna je i šematizacija porodne sredine, kada se ona posmatrana kao homogena, izotropna i neograničenog prostiranja (model kontinuuma). Koristi se za obradu podataka koji se odnose na bunar i pijezometre u okviru tranzitne zone strujnog polja ($u < 0.05$). Pre početka testa, neophodno je utvrditi statički nivo izdani od koga se kasnije računa ostvarena depresija. Za uslov da se strujna oblast može šematizovati kao homogena, izotropna i neograničenog prostiranja, jednačina strujanja prema bunaru u opštem slučaju se može napisati u sledećem obliku [2]:

$$S = \frac{Q_b}{4\pi T} \ln \frac{2.25T}{r^2\mu} + \frac{Q_b}{4\pi T} \ln t \quad (1)$$

odnosno u semilogaritamskom koordinatnom sistemu:

$$S = 0.183 \frac{Q_b}{T} \log \frac{2.25T}{r^2\mu} + 0.183 \frac{Q_b}{T} \log t \quad (2)$$

Za vreme crpenja iz homogene izotropne izdani neograničenog prostiranja, ukupna depresija u bunaru, zajedno sa dopunskim „linearnim“ i „kvadratnim“ gubicima, izražava se jednačinom [2]:

$$S = \frac{Q_b}{4\pi T} \ln \frac{2.25T}{r_0^2\mu} + A_1 Q_b + B Q_b^2 + \frac{Q_b}{4\pi T} \ln t \quad (3)$$

gde je:

r_0 - polouprečnik bunara [m],

$A_1 Q$ - dopunski gubitak (depresija) u samom bunaru i prifilterskoj zoni, usled strujanja vode u laminarnom režimu, [m],

$B Q^2$ - dopunski gubitak odnosno dopunska depresija u bunaru i prifilterskoj zoni, usled strujanja vode u turbulentnom režimu (dopunski gubitak kvadratnog karaktera), [m],

A_1 - koeficijent dopunskog gubitka u uslovima laminarnog strujanja, [s/m^2],

B - koeficijent dopunskog gubitka u uslovima turbulentnog režima strujanja, [s^2/m^5].

Koeficijent vodoprovodnosti, T , se može izračunati iz koeficijenta pravca prave predstavljenim kao tangens ugla α :

$$tg\alpha = 0.183 \frac{Q_b}{T} \quad (4)$$

odnosno:

$$tg\alpha = \frac{S_2 - S_1}{\log t_2 - \log t_1} \quad (5)$$

Indeksi 1 i 2 se odnose na proizvoljno izabrane tačke na pravoj. Sređivanjem jednačina 4 i 5, dolazi se do izraza pomoću kojeg je moguće izračunati

koeficijent vodoprovodnosti izdani, interpretacijom registrovanih podataka opitnog crpenja [3]:

$$T = 0.183 Q_b \frac{\log t_2 - \log t_1}{S_2 - S_1} \quad (6)$$

Ako se eksperimentalne tačke izaberu sa vremenima $t_2 = 10t_1$, dobija se izraz za koeficijent provodnosti izraz koji je pogodan za rad u terenskim uslovima [3]:

$$T = 0.183 \frac{Q_b}{S_2 - S_1} \quad (7)$$

Analizirajući prethodnu jednačinu, moguće je zaključiti da veličinu hidrauličkog gubitka u bunaru i prifilterskoj zoni, kao i vrednost specifične izdašnosti izdani, nije moguće odrediti samo na osnovu podataka praćenja opitnog crpenja na bunaru. Da bi se isti odredili, neophodno je koristiti podatke koji su registrovani u odgovarajućim pijezometrima, odnosno one koji su mereni u tačkama strujnog polja gde se ne manifestuju parazitski gubici.

Depresija u pijezometru, koji se nalazi u tranzitnoj zoni strujnog polja ($u < 0.05$) u homogenoj, izotropnoj izdani neograničenog prostiranja, može se izraziti sledećom jednačinom [6]:

$$S = 0.183 \frac{Q_b}{T} \log \frac{2.25T}{r^2\mu} + 0.183 \frac{Q_b}{T} \log t \quad (8)$$

gde r predstavlja udaljenje od ose bunara [m].

Kao i za slučaj bunara, vrednost koeficijenta vodoprovodnosti se dobija izborom dve proizvoljne tačke na pravoj $S = f(\log t)$, i uvrštavanjem veličina sa apscise i ordinate u jednačinu (6) [3]: $T = 0.183 Q_b \frac{\log t_2 - \log t_1}{S_2 - S_1}$. Drugi način je da se eksperimentalne tačke izaberu sa vremenima u odnosu $t_2 = 10t_1$, koristeći jednačinu (7).

Vrednosti specifične izdašnosti izdani se mogu dobiti interpretacijom podataka registrovanih tokom opitnog crpenja na pijezometru na dva načina. U prvom slučaju, ako se postavi uslov da je $S = 0$, navedenu veličinu je moguće dobiti produživanjem eksperimentalne prave do preseka sa apscicom [6]:

$$S = \frac{Q_b}{4\pi T} \ln \frac{2.25T t_0}{r^2\mu} = 0 \quad (9)$$

Tada se dolazi do izraza:

$$\ln \frac{2.25T t}{r^2\mu} = 0 \quad (10)$$

odnosno:

$$\frac{2.25T t}{r^2\mu} = 1 \quad (11)$$

gde je $t = t_0$ vreme na apscisi za $S = 0$.

U drugom slučaju, s obzirom na činjenicu da mala promena nagiba prave (tokom njenog povlačenja kroz eksperimentalne tačke), ima za posledicu relativno

veliku promenu vremena, t_0 , specifična izdašnost izdani se može dobiti i iz podataka za jednu eksperimentalnu tačku, rešavanjem jednačine za pijezometar po μ [6]:

$$S_i = \frac{Q_b}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt_1}{r^2\mu} \quad (12)$$

$$\frac{4\pi S_1}{Q_b} = \ln \frac{2.25Tt_1}{r^2\mu} \quad (13)$$

$$e^{\left(\frac{4\pi TS_1}{Q}\right)} = \frac{2.25Tt_1}{r^2\mu} \quad (14)$$

$$\mu = \frac{2.25Tt_1}{r^2 e^{\left(\frac{4\pi TS_1}{Q}\right)}} \quad (15)$$

Upoređivanjem podataka za bunar i pijezometre na istom dijagramu, $S = f(\log t)$, može se zaključiti da su nagibi ovih pravih isti. Interpretacijom podataka registrovanih depresija za bunar i pijezometre, dobija se skup međusobno paralelnih pravih. Na osnovu toga proizilazi zaključak da se na osnovu interpretacije podataka opitnog crpenja, i za bunar i za pijezometre, može izračunati vrednost koeficijenta vodoprovodnosti. Međutim, vrednost specifične izdašnosti izdani se može dobiti samo na osnovu podataka koji se odnose na pijezometre. Izuzetak bi predstavljao slučaj kada bi se poznavali koeficijenti hidrauličkih gubitaka u bunaru (A_I , B_I , jednačina 3).

Navedena metoda se može primeniti samo na opitno crpenje sa jednostavnim hidrogramom iz usamljenog savršenog bunara u homogenoj izotropnoj izdani pod pritiskom, neograničenog prostiranja. Kada realni uslovi odstupaju od ove idealizovane proračunske sheme, u opštem slučaju se ne mogu dobiti jednoznačni rezultati [6]. Za podatke drugog i trećeg sniženja koristi se metoda obrade kompletnog hidrograma, u literaturi poznata kao metoda Tajsa [16].

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Obradom registrovanih podataka tokom sprovedenih testova crpenja (2016 god.) (tabela 1), kva

Tabela 1. Sniženja nivoa podzemnih voda tokom testiranja bunara na izvorištu „Ključ” (vreme povratka nivoa)

Objekat	Sniženje				
	I	II	III	IV	V
EB-1	$t_1 =$ 240 min	$t_2 =$ 240 min	$t_3 =$ 238 min		
	$Q_1 =$ 9,48 l/s	$Q_2 =$ 18,14 l/s	$Q_3 =$ 28,40 l/s		
	S_I	S_2	S_3		
	0.17 m	0.33 m	0.51 m		
EB-2	$t_1 =$ 240 min	$t_2 =$ 240 min	$t_3 =$ 239 min		
	$Q_1 =$ 9,31 l/s	$Q_2 =$ 18,31 l/s	$Q_3 =$ 28,40 l/s		
	S_I	S_2	S_3		

ntifikuju se vrednosti koeficijenta hidrauličkih gubitaka linearnog i kvadratnog karaktera i filtracioni parametri sredine: koeficijent transmisivnosti (T) i specifična izdašnost izdani (μ). Iz tabele 2 može se zaključiti da se najveće vrednosti koeficijenta transmisivnosti javljaju kod bunara EB-9, EB-10, EB-12 i EB-14. Vrednosti drugog bitnog filtracionog parametra (μ), najveće su kod bunara EB-1, EB-2, EB-12 i EB-13. Što se tiče koeficijenata dopunskih, hidrauličkih gubitaka linearnog i kvadratnog karaktera (A i B), najveće vrednosti se obično javljaju tamo gde je bunar neadekvatno izveden ili gde je započeo proces starenja bunara. Što su vrednosti A i B veće to će biti i veća vrednost parazitske depresije. U tabeli 2 vidi se da se najveće vrednosti koeficijenta A javljaju kod bunara EB-4, EB-7, EB-9 i EB-13. U bunarima EB-3, EB-4, EB-10 i EB-13 zabeležene su najveće vrednosti koeficijenta hidrauličkog gubitka kvadratnog karaktera. Maksimalno dozvoljeni kapaciteti bunara (tabela 2) određeni su na osnovu kriterijuma maksimalno dozvoljenih brzina - u ovom slučaju korišćeni su kriterijumi Ziharda, Abramova i Kovača [17]. Najveće vrednosti ovog parametra se javljaju kod bunara EB-2, EB-3, EB-5 i EB-7. Poređenjem sa vrednostima koeficijenata hidrauličkih gubitaka linearnog i kvadratnog karaktera, iz tabele 2, može se zaključiti da se kod pomenutih bunara javljaju relativno male vrednosti parametara A i B.

Nasuprot tome, u bunarima EB-11, EB-13, EB-6 i EB-4, dobijene su najniže vrednosti maksimalno dozvoljenih kapaciteta bunara, što je opet povezano sa visokim vrednostima parametara A i B za iste objekte. Stoga je jasno da, postoji nedvosmislena veza između hidrauličkih gubitaka i kapaciteta bunara, odnosno što su veći hidraulički gubici (otpori) u bunaru i prifilterskoj zoni, kapacitet bunara se smanjuje i obrnuto. Na osnovu filtracionih parametara iz tabele 2, izrađene su karte prostorne raspodele istih (slike 2 i 3) u programskom paketu „Surfer[®]” [5].

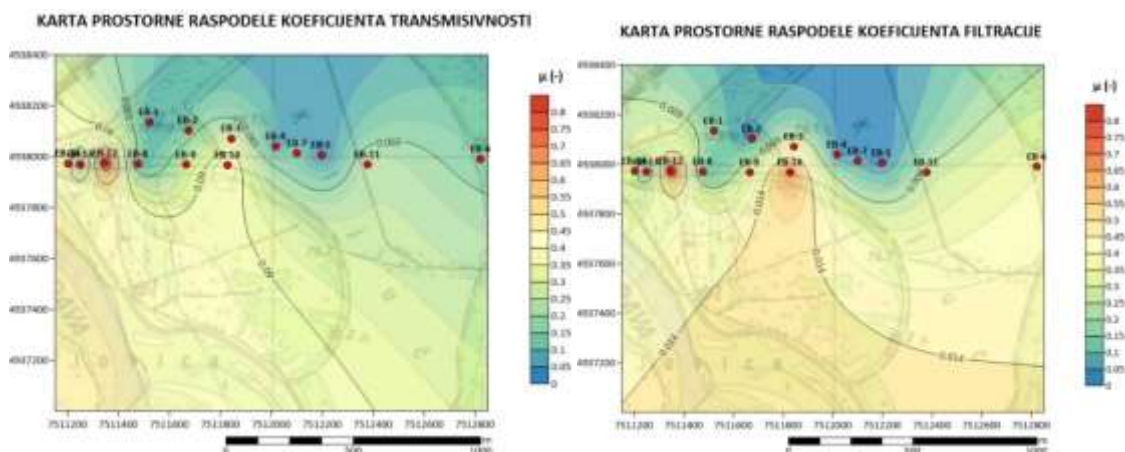
Objekat	Sniženje				
	I	II	III	IV	V
EB-8	$t_1 =$ 246 min	$t_2 =$ 239 min	$t_3 =$ 239 min		
	$Q_1 =$ 9,35 l/s	$Q_2 =$ 18,37 l/s	$Q_3 =$ 25,44 l/s		
	S_I	S_2	S_3		
	0.25 m	0.52 m	0.72 m		
EB-9	$t_1 =$ 240 min	$t_2 =$ 240 min	$t_3 =$ 240 min		
	$Q_1 =$ 9,40 l/s	$Q_2 =$ 18,43 l/s	$Q_3 =$ 21,35 l/s		
	S_I	S_2	S_3		

Objekat	Sniženje				
	I	II	III	IV	V
	0.18 m	0.38 m	0.47 m		
EB-3	t ₁ = 239 min	t ₂ = 239 min	t ₃ = 241 min		
	Q ₁ = 10,60 l/s	Q ₂ = 20,11 l/s	Q ₃ = 25,61 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0.23 m	0.52 m	0.69 m		
EB-4	t ₁ = 240min	t ₂ = 240 min	t ₃ = 240 min		
	Q ₁ = 9,2 l/s	Q ₂ = 17,2 l/s	Q ₃ = 23,75 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	1,19 m	2,59 m	4,1 m		
EB-5	t ₁ = 240 min	t ₂ = 241 min	t ₃ = 240 min		
	Q ₁ = 8,94 l/s	Q ₂ = 18,33 l/s	Q ₃ = 25,13 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0,19 m	0,45 m	0,68 m		
EB-6	t ₁ = 240 min	t ₂ = 239 min	t ₃ = 241 min		
	Q ₁ = 9,19 l/s	Q ₂ = 18,06 l/s	Q ₃ = 25,30 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0,14 m	0,25 m	0,37 m		
EB-7	t ₁ = 240 min	t ₂ = 240 min	t ₃ = 239 min		
	Q ₁ = 9,43 l/s	Q ₂ = 18,23 l/s	Q ₃ = 27,11 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0,21 m	0,41 m	0,68 m		
Objekat	Sniženje				
	I	II	III	IV	V
	0.26 m	0.53 m	0.59 m		
EB-10	t ₁ = 239 min	t ₂ = 240 min	t ₃ = 240 min		
	Q ₁ = 9,16 l/s	Q ₂ = 17,75 l/s	Q ₃ = 23,73 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0.16 m	0.33 m	0.48 m		
EB-11	t ₁ = 240 min	t ₂ = 75 min	t ₃ = 76 min	t ₄ = 256 min	t ₅ = 231 min
	Q ₁ = 9,20 l/s	Q ₂ = 18,00 l/s	Q ₃ = 10,10 l/s	Q ₄ = 17,90 l/s	Q ₅ = 12,45 l/s
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
	0.18 m	0.32 m	0.2 m	0.34 m	0.24 m
EB-12	t ₁ = 241 min	t ₂ = 242 min	t ₃ = 237 min		
	Q ₁ = 10,30 l/s	Q ₂ = 20,02 l/s	Q ₃ = 32,17 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0.19 m	0.42 m	0.72 m		
EB-13	t ₁ = 240 min	t ₂ = 241 min	t ₃ = 241 min		
	Q ₁ = 10,33 l/s	Q ₂ = 20,02 l/s	Q ₃ = 30,00 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0.52 m	1,05 m	1,72 m		
EB-14	t ₁ = 240 min	t ₂ = 240 min	t ₃ = 240 min		
	Q ₁ = 9,22 l/s	Q ₂ = 18,24 l/s	Q ₃ = 24,95 l/s		
	S ₁	S ₂	S ₃		
	0.16 m	0,27 m	0,40 m		

Tabela 2. Filtracioni i geometrijski parametri porozne sredine i maksimalno dozvoljeni kapaciteti bunara

Objekat	Hidrogeološki parametri						Maksimalno dozvoljeni kapacitet bunara- Q _{max} (l/s)
	T (m ² /s)	M (m)	K (m/s)	μ	Au (s/m ²)	B (s ² /m ⁵)	
EB-1	4,82 x 10 ⁻²	6,6	7,30 x 10 ⁻³	2,83 x 10 ⁻¹	33	10	26,59
EB-2	5,85 x 10 ⁻²	12,9	4,53 x 10 ⁻³	2,71 x 10 ⁻¹	33	10	28,51
EB-3	8,00 x 10 ⁻²	6,95	1,15 x 10 ⁻²	1,82 x 10 ⁻²	29	250	28,96
EB-4	4,68 x 10 ⁻²	10,4	4,50 x 10 ⁻³	1,95 x 10 ⁻¹	112	3250	25,43
EB-5	4,03 x 10 ⁻²	9,67	4,17 x 10 ⁻³	9,9 x 10 ⁻²	12	150	28,34
EB-6	6,00 x 10 ⁻²	5,01	1,19 x 10 ⁻²	4,4 x 10 ⁻²	32	10	23,84
EB-7	5,89 x 10 ⁻²	10,83	5,44 x 10 ⁻³	5,44 x 10 ⁻³	35	180	29,58
EB-8	4,94 x 10 ⁻²	8,83	5,59 x 10 ⁻³	5,9 x 10 ⁻²	35	100	27,05
EB-9	8,00 x 10 ⁻²	7,31	1,09 x 10 ⁻²	7,1 x 10 ⁻³	38	90	28,51

Objekat	Hidrogeološki parametri						Maksimalno dozvoljeni kapacitet bunara- Q_{max} (l/s)
	T (m ² /s)	M (m)	K (m/s)	μ	Au (s/m ²)	B (s ² /m ⁵)	
EB-10	$1,01 \times 10^{-1}$	5,43	$1,84 \times 10^{-2}$	$3,17 \times 10^{-2}$	18	200	26,85
EB-11	$7,50 \times 10^{-2}$	7,87	$9,53 \times 10^{-3}$	$5,10 \times 10^{-3}$	28	100	19,33
EB-12	$1,63 \times 10^{-1}$	7,35	$2,2 \times 10^{-2}$	$3,76 \times 10^{-1}$	23	170	25,43
EB-13	$4,75 \times 10^{-2}$	9,79	$4,85 \times 10^{-3}$	$7,84 \times 10^{-1}$	64	250	18,51
EB-14	$1,10 \times 10^{-1}$	10,39	$1,06 \times 10^{-2}$	$3,71 \times 10^{-2}$	22	20	26,49



Slika 2 - Karte prostorne distribucije vrednosti koeficijenta transmisivnosti (levo) i koeficijenta filtracije (desno) na području izvorišta „Ključ“



Slika 3 - Karte prostorne distribucije vrednosti specifične izdašnosti izdani na području izvorišta „Ključ“

U pogledu prostornog rasporeda vrednosti koeficijenta transmisivnosti, jasno se može videti da su najveće vrednosti u jugoistočnom delu izvorišta (bunari EB-14, EB-12, EB-10), dok idući ka severoistoku vrednosti opadaju. Vrednosti koeficijenta filtracije se povećavaju u severnom delu izvorišta. Vrednosti specifične izdašnosti najveće su u istočnom delu karte oko bunara EB-12 dok u severnom delu skoro da padaju na nulu. Navedeno predstavlja posledicu

nedostatka podataka za severnije delove karte koje program Surfer automatski dodeljuje tokom interpolacije (Kriging metodom). Stoga, vrednosti parametara za severnije delove karte treba uzeti sa rezervom. S druge strane, tačnost prostorne raspodele je najveća oko i u neposrednoj blizini bunara.

6. ZAKLJUČAK

Dobijene hidrodinamičke karakteristike izvorišta „Ključ“ neophodna su podloga za racionalno upavljanje rada kako samog izvorišta tako i celog sistema za vodosnabdevanje Požarevca. S obzirom na to da je ovo jedino izvorište koje snabdeva grad Požarevac, a da konstantno postoji pitanje kvaliteta i kvantiteta voda, bilo je neophodno sprovesti detaljnija istraživanja (u ovom slučaju opite crpenja) radi izračunavanja najbitijih filtracionih parametara sredine. Kod nekih bunara na osnovu hidrauličkih parametara zaključeno je da dolazi do starenja istih, što može biti posledica nadeksploatacije ili neadekvatne izrade bunara.

Konstantna degradacija kvaliteta (u našem slučaju nitratima) još jedan je od faktora ugrožavanja rada izvorišta, sa aspekta zadovoljavanja propisanih vrednosti i naravno lošeg uticaja na korisnike. S obzirom na to da se radi o plitkoj izdani i da se izvori zagađenja

ne mogu u potpunosti neutralisati, hidrodinamičke karakteristike nam predstavljaju osnovu za procenu odgovarajućih mera koje je neophodno sprovesti kako bi se zagađenje svelo na minimum (o kojima su se detaljnije bavili neki od navedenih istraživača u literaturi). S druge strane, uzimajući u obzir kvantitativne karakteristike podzemnih voda i hidrodinamičke karakteristike izdani koje su prikazane, može se naglasiti da rad dalje predstavlja osnov za buduća projektovanja, odnosno detaljnu hidrodinamičku analizu i modeliranje režima izdani, a takođe i, ukoliko se ukaže potreba, novih vodozahvatnih objekata ili novog izvorišta podzemnih voda, kao i njihovih efekata rada.

LITERATURA

- [1] Avramović A, *Elaborat o zonama sanitarne zaštite izvorišta „Ključ“ u Požarevcu*, (fondovski materijal), 2016.
- [2] Bear J, *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, Minneola, NY, 1972.
- [3] Bear J, *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill, New York, 1972.
- [4] Boreli-Zdravković Đ., Radenković Z. (2003): Nitrati u podzemnim vodama šireg područja izvorišta „Ključ 1“ za vodosnabdevanje Požarevca, *Zbornik radova 32. Jugoslovenske konferencije „VODA 2003“*, Jugoslovensko društvo za zaštitu voda i Srpsko društvo za zaštitu voda, str. 357-360, Zlatibor 3-6 jun 2003.
- [5] Golden Software, LLC. 809 14th Street Golden, Colorado 80401 www.goldensoftware.com
- [6] Hantush, M. S, *Hydraulics of wells. Advances in hydroscience*, V.T. Chow, Academic Press, New York, 1, 281-432, 1964.
- [7] Miljević N, Boreli-Zdravković Đ, Obradović V, Golobočanin D, Majer B, Evaluation of the origin of the nitrate influencing the Ključ groundwater source, Serbia. *Water science and technology*, vol. 66, br. 3, str. 472-478, 2012.
- [8] Miljević N, Boreli-Zdravković Đ, Veličković J, Golobočanin V, Majer B, Evaluation of the origin of sulphate at the groundwater source Ključ, Serbia. *Isotopies in environmental and health studies*, vol.49 br. 1, str. 62-72, 2013.
- [9] Polomčić D, Stevanović Z, Bajić D, Hajdin B, Ristić-Vakanjac V, Dokmanović P, Milanović S, (): Vodosnabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodama u Srbiji. *Vodoprivreda*, 0350-0519, 44 (2012), 258-260, p. 225-231, 2012.
- [10] Pušić M, *Dinamika podzemnih voda*. Univerzitetski udžbenik. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1996.
- [11] Pušić M. *Hidraulika bunara*. Univerzitetski udžbenik. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2011.
- [12] Pušić M, Polomčić D, *Step-test (opitno crpenje iz bunara) koncepcija, realizacija, interpretacija*. Univerzitetski udžbenik. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu i Kruševac: JP Direkcija za urbanizam i izgradnju, Kruševac, 1997.
- [13] Radenković Z, Boreli-Zdravković Đ, Uzroci naglog pogoršavanja kvaliteta vode izvorišta „Ključ 1“, *Zbornik radova 32. Jugoslovenske konferencije „VODA 2003“*, Jugoslovensko društvo za zaštitu voda i Srpsko društvo za zaštitu voda, 3-6 jun 2003. Zlatibor, str.361-366, 2003.
- [14] Radenković Z., Boreli-Zdravković Đ. Sistem zaštite izvorišta „Ključ“ grada Požarevca: faza realizacije objekta, *Zbornik radova 34. Jugoslovenske konferencije „VODA 2005“*, Jugoslovensko društvo za zaštitu voda i Srpsko društvo za zaštitu voda, 7-10 jun 2005. Kopaonik, p.449-456, 2005.
- [15] Radenković Z., Boreli-Zdravković Đ. and V. Zuber-Radenković Effects of urgent measures implemented to protect the Ključ groundwater source, *Proceedings Regional IWA conference on Groundwater management in the Danube river basin and other large river basins*, 7-9 June 2007, „Jaroslav Černi“ Institute for the development of water resources, Belgrade, p. 291-297, 2007.
- [16] Stevanović Z, Milanović S, *Metode hidrogeoloških istraživanja*. Univerzitetski udžbenik. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2017.
- [17] Vuković M, Soro A, *Hidraulika bunara, teorija i praksa*. Građevinska knjiga. Bor: Štamparsko-izdavačko preduzeće „Bakar“, 1990.

SUMMARY

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE GROUNDWATER SOURCE „KLJUC” OF THE CITY OF POZAREVAC

Geological and hydrogeological research conducted in the area of groundwater source „Kljuc“ of the city of Pozarevac aimed primarily for determining the groundwater's balance and reserves. The study groundwater source is used for water supply of about 55 000 inhabitants in the Branicevo district, with a total capacity of approximately 250 l/s. As part of the applied field hydrogeological methods in the study area, by its significance the method of step-test pumping, can be singled out. The data from the groundwater source obtained in this way were processed by graphoanalytical method of processing experimental pumping data in transient flow regime, ie application of Theiss solution of differential flow to define hydraulic parameters of well (hydraulic losses in well and filter zone), filtration parameters of the medium and maximum allowed capacities of the well. Hydraulic losses that occur mainly indicate the aging process of wells which usually results in a decrease in their capacity.

Key words: water supply, step-test, hydraulic parameters of wells, filtration parameters, maximum allowed well capacities