

**OGRANIČENJE EKSPLOATACIONIH KOLIČINA VODE SA
IZVORIŠTA PODZEMNE VODE U SOKOLOVIĆIMA**

**LIMITATION OF EXPLOITATION WATER FROM SOKOLOVIĆI
GROUNDWATER SOURCE**

Hadžić Emina, Viši asistent
Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu
Sarajevo

Ključne riječi: podzemne vode, akvifer, crpljenje vode, matematičko modeliranje
Key words: groundwater, aquifer, exploitation water, mathematical modeling

REZIME

U radu su definirane optimalne crpljene količine vode sa izvorišta podzemne vode u Sokolovićima po tri kriterijuma, za usvojene pretpostavke i ograničenja. Korištenjem matematičkog modeliranja - Comet¹, napravljena je prognoza NPV za različite šeme crpljenja vode sa pomemnutog izvorišta. Cilj prognoznog računa bio je utvrđivanje dominantnih pravaca prehranjivanja.

ABSTRACT

In this article optimal exploitation ground water from water supply area of Sokolovići are defined using three criterion and including all of assumptions and limitations. The forecast of ground water levels, in different situations of exploitation, are given by mathematical modeling - software Comet. The main goal was to determine of dominant direction of aquifer recharge.

1. UVOD

Problem koji se često javlja uslijed dugotrajnog i neplanskog korištenja podzemnih voda je prekomjerna eksploatacija, odnosno eksploatacija preko prirodno obnovljivih količina. Posljedice mogu biti katastrofalne, ne samo sa aspekta stalnog snižavanja nivoa podzemnih voda te crpljenja statičkih rezervi, već se mogu značajno reflektovati i na degradaciju kvaliteta podzemne vode. Najteži dio posla sa aspekta planiranja i upravljanja akumulacijama podzemnih voda, a sve u cilju prevazilaženja i sprječavanja nastanka navedenog problema, svakako je definiranje količina koje mogu biti zahvaćene. Postoji više pristupa rješavanju ovakvih zadataka. Posljednjih godina sa razvojem računarske tehnike, sve je uobičajenija primjena matematičke simulacije sistema, radi poboljšanja upravljanja i donošenja najboljih odluka.

¹ Comet - version 1.03, Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH, Hamburg, Germany

2. PROBLEMATIKA

Grad Sarajevo zadovoljava oko 80% svojih potreba za vodom sa izvorišta podzemne vode u Sarajevskom polju. Prethodnim istraživanjima koja se na ovom području provode još od 50 - tih godina prošlog stoljeća, utvrđeno je da se prirodno obnovljive količine podzemnih voda, ovisno od hidrološke situacije kreću od 600 do 1250 l/s. Navedeni problem pokušao se ublažiti uz primjenu različitih metoda vještačkog prehranjivanja izvorišta.

Stalni porast potreba za vodom uvjetavao je uključivanje izvorišta Sokolovići u sistem vodosnabdijevanja Grada. Problem određivanja količina vode koje se mogu zahvatati sa Sokolovića, a da ne dovedu do precrpljivanja istog, kao i da ne ugroze otjecanje ka nizvodnijim izvorištima (Bačevo i Konaci) je nesumnjivo izazov koji ostaje otvoren sukladno dinamičkim promjenama u cjelovitom sistemu.

U radu su djelomice prikazani rezultati matematičkog modeliranja strujanja podzemnih voda na izvorištu Sokolovići. Simulirane su različite crpljene količine vode na aktivnim bunarima izvorišta Sokolovići, za tri različita hidrološka stanja.

Cilj simulacija bio je, da se ustanove prirodno obnovljive količine podzemne vode za svaku hidrološku situaciju, odnosno količine koje bi se trebale eksploatirati sa razmatranog prostora. Zbog vrlo kratkog vremena korištenja ovog izvorišta, odabrana hidrološka stanja vezala su se za hidrološko stanje malih, srednjih i povećanih voda rijeke Željeznice, koja prema rezultatima analize dosadšnjih istraživanja predstavlja dominantan izvor prihranjivanja.

3. POSTAVKA MODELA

Matematički model metode konačnih zapremina, korišten u proračunima režima podzemnih voda i proračunima različitih eksploatacionih šema zahvatanja podzemnih voda sa postojećeg izvorišta Sokolovići u Sarajevskom polju, koncipiran je tako, da su u svakoj kontrolnoj ćeliji odnosno za svaki segment diskretizovanog prostora, definirane odgovarajuće geometrijske, hidrološke, hidrogeološke i hidrodinamičke veličine koje su reprezentne za diskretizovanu površinu.

Razmatrano područje dimenzija 1900x1260 m, diskretizovano je mrežom 100x60 kontrolnih zapremina-ćelija. Numerička mreža oko bunara rafinirana je dodatno. Gustina i veličina elemenata prilagođena je geometriji razmatranog prostora, te eksploatacionim i infiltracionim objektima.

Interakcija između razmatranog područja i "odbačenog" područja nadomještena je konturnim uvjetima - vrijednostima piježometarskih pritisaka po konturama, u prirodnim uvjetima. Zbog kratkog vremena rada izvorišta, nedovoljnog broja kontrolnih-mjernih mjesta, te njihovog nepovoljnog prostornog rasporeda, poređenje stvarno mjerenih i numerički dobijenih nivoa podzemnih voda je provedeno na ograničenom broju tačaka, lociranom uglavnom oko eksploatacionih objekata. Konturni uvjeti definirani su za tri izabrana, hidrološka stanja koja se odnose na period prije početka crpljenja podzemnih voda sa izvorišta Sokolovići.

3.1. Tariranje - kalibracija modela

Tariranje matematičkog modela provedeno je hidrauličkim proračunima za strujanje podzemne vode u kvazistacionarnim uvjetima, za pomenuta hidrološka stanja. Prilikom tariranja matematičkog modela vrijednosti koeficijenata filtracije u neposrednoj okolini bunara dobijene su obradom rezultata prethodno provedenih probnih crpljenja, dok su početne vrijednosti koeficijenata filtracije za ostali dio razmatranog prostora preuzeti iz dostupne literature [2]. Konturni, Dirichlet-ovi uvjeti definirani su za tri različita hidrološka stanja kao $\Pi_G(x,y)$, za promatrani vremenski presjek t , odnosno izabrano hidrološko stanje.



SLIKA 1. SITUATIVNI PRIKAZ IZVORIŠTA SOKOLOVIĆI U SARAJEVSKOM POLJU.

Uporedbom podataka mjerenih u prirodi i podataka dobijenih modeliranjem, kao i ponovnom analizom ulaznih podataka, vršene su popravke nepoznatih veličina sa kojima se račun ponavljao. Sukcesivnom primjenom ovog postupka, postepeno se približavalo potpunom usklađivanju mjerenih i proračunskih vrijednosti pijezometarskih pritisaka. Za svaku iteraciju vršena je kontrola proticaja na granicama, odnosno ulaznim i izlaznim količinama. Uporedni podaci o nivoima podzemnih voda u prirodi i nivoima dobijenim primjenom matematičkog modela prikazani su u tabelama 1, 2 i 3. Dobijene razlike između nivoa podzemnih voda registrovanih u prirodi i nivoa dobijenih hidrodinamičkim proračunom primjenom matematičkog modela, su u granicama od 0 do 20 cm.

TABELA 1. UPOREDNI PRIKAZ NPV REGISTROVANIH U PRIRODI I NPV DOBIJENIH MATEMATIČKIM MODELIRANJEM ZA HIDROLOŠKO STANJE MALIH VODA.

Broj ćelije na modelu	Osmatrački objekat	Koordinate*		NPV registrovani u prirodi na dan 31/8/96 m n.m.	NPV dobijeni modeliranjem m n.m.	Razlika (m)
		X	Y			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(5)-(6)
5739	BSK-5	440	750	501.1	501.139	-0.039
5788	P-61	455	770	501.11	501.197	-0.087
4101	R-47	380	950	501.14	501.295	-0.155
4594	R-44	415	1080	501.57	501.561	0.009
6265	BSK-4	860	910	502.68	502.774	-0.094
6230	SK-45	920	890	502.8	502.992	-0.192
3345	OT ₁ *	921	745	502.69	502.712	-0.022
6795	BSK-2	1180	940	503.75	503.913	-0.163
6749	SK-53	1200	920	503.8	503.917	-0.117
7318	BSK-3	1310	450	503.2	503.162	0.038
7356	P-311	1250	480	503.1	503.088	0.012
2194	SK-36	1470	470	503.55	503.619	-0.069

* koordinate su vezane za usvojeni koordinatni početak

* OT₁ – odabrana osmatračka tačka

TABELA 2. UPOREDNI PRIKAZ NPV REGISTROVANIH U PRIRODI I NPV DOBIJENIH MATEMATIČKIM MODELIRANJEM ZA HIDROLOŠKO STANJE SREDNJIH VODA.

Broj ćelije na modelu	Osmatrački objekat	Koordinate*		NPV registrovani u prirodi na dan 2/6/97 m n.m.	NPV dobijeni modeliranjem m n.m.	Razlika (m)
		X (m)	Y (m)			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(5)-(6)
5739	BSK-5	440	750	501.6	501.71	-0.11
5788	P-61	455	770	501.61	501.765	-0.155
4101	R-47	380	950	501.69	501.798	-0.108
4594	R-44	415	1080	501.91	502.039	-0.129
6265	BSK-4	860	910	503.3	503.393	-0.093
6230	SK-45	920	890	503.44	503.625	-0.185
3345	OT ₁ *	921	745	503.25	503.401	-0.16
6795	BSK-2	1180	940	504.7	504.59	0.11
6749	SK-52	1200	920	504.73	504.608	0.122
4840	R-51	1280	1120	505.25	505.178	0.072
7318	BSK-3	1310	450	504.3	504.117	0.183
7356	P-311	1250	480	504.13	504.021	0.109
6899	SK-52	1225	980	504.42	504.38	0.04

* koordinate su vezane za usvojeni koordinatni početak

* OT₁ je odabrana osmatračka tačka

TABELA 3. UPOREDNI PRIKAZ NPV REGISTROVANIH U PRIRODI I NPV DOBIJENIH MATEMATIČKIM MODELIRANJEM ZA HIDROLOŠKO STANJE POVEĆANIH VODA.

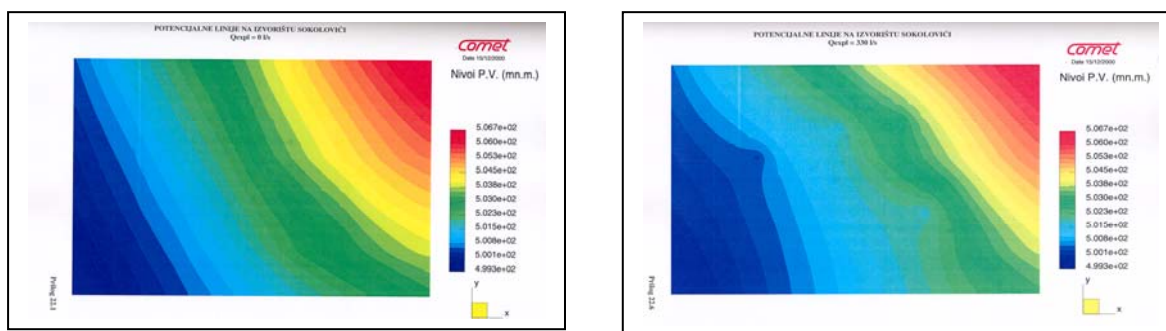
Broj ćelije na modelu	Osmatrački objekat	Koordinate*		NPV registrovani u prirodi na dan 6/1/97 m n.m.	NPV dobijeni modeliranjem m n.m.	Razlika (m)
		X	Y			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(5)-(6)
5739	BSK-5	440	750	502.59	502.6718	-0.0818
5788	P-61	455	770	502.61	502.724	-0.114
4101	R 47	380	950	502.59	502.744	-0.154
4594	R-44	415	1080	502.78	502.965	-0.185
6265	BSK 4	860	910	504.28	504.33	-0.05
6230	SK45	920	890	504.4	504.577	-0.177
6795	BSK 2	1180	940	505.65	505.537	0.113
6749	SK 53	1200	920	505.69	505.572	0.118
7318	BSK 3	1310	450	505.41	505.449	-0.039
7356	P 311	1250	480	505.4	505.276	0.124
6899	SK 52	1225	980	505.71	505.695	0.015
2194	SK36	1470	470	505.9	506.069	-0.169

* koordinate su vezane za usvojeni koordinatni početak

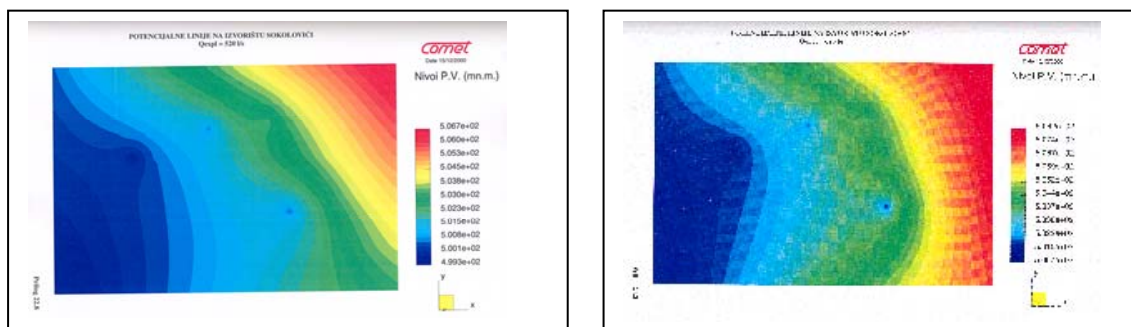
3.2. Eksploatacione šeme

Na istariranom matematičkom modelu provedeni su hidrodinamički proračuni za strujanje podzemne vode u kvazistacionarnim uvjetima, za različite eksploatacione šema zahvatanja podzemnih voda izvorišta Sokolovići. Za tri razmatrana hidrološka stanja, provedene simulacije uključivale su raspon eksploatacionih količina od 50 l/s do 620 l/s. Urađeno je po 7 simulacija za svako hidrološko stanje. Na slikama 2 i 3, prikazane su potencijalne linije za hidrološko stanje malih voda za četiri različite crpljene količine.

Početni uvjeti predstavljeni su piježometarskim nivoima na izvorištu Sokolovići, dok su granični uvjeti predstavljeni gradijentom piježometarskih pritisaka duž razmatrane granice, za izvršenu diskretizaciju.



SLIKA 2. POTENCIJALNE LINIJE NA IZVORIŠTU SOKOLOVIĆI ZA $Q_{expl}=0$ l/s I $Q_{expl}=330$ l/s.



SLIKA 3. POTENCIJALNE LINIJE NA IZVORIŠTU SOKOLOVIĆI ZA $Q_{expl.}=520$ l/s I $Q_{expl.}=620$ l/s

4. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Rezultati primjene matematičkog modeliranja na izvorište podzemnih voda na lokalitetu Sokolovića pokazali su, da je pravac rijeke Željeznice dominantan pravac prihranjivanja za sva razmatrana hidrološka stanja. Značajan dotjecaj u razmatrano područje, dešava se i kroz granicu modela prema Vojkovićima. U hidrološkom stanju malih voda rijeke Željeznice dotjecaj kroz granicu prema Vojkovićima je oko tri puta manji od dotjecaja kroz granicu prema rijeci Željeznici, u hidrološkom stanju srednjih voda manji je oko dva puta, a u hidrološkom stanju povećanih voda rijeke Željeznice, taj dotjecaj je manji oko 1,5 puta od dotjecaja kroz granicu prema rijeci Željeznici.

Otjecanje kroz granicu prema masivu Igman-Bjelašnica dešavalo se u različitim količinama i najveće je bilo u periodu malih voda rijeke Željeznice i malih crpljenih količina sa bunara u Sokolovićima. U hidrološkoj situaciji povećanih voda, kada su crpljene količine sa bunara prešle vrijednost 200 l/s, dešavao se obrnuti proces tj. došlo je do prihranjivanja razmatranog područja sa ove granice.

Za tri hidrološka stanja, kroz sve razmatrane varijante simulacije crpljenja (ukupno 21), otjecanje vode prema Bačevu dešavalo se u količinama koje su se kretale između 180 l/s i 300 l/s. Indikativno je da se razlike u količini vode koja otječe prema ovoj granici nisu puno mijenjale sa promjenom crpljenih količina.

Otjecanje kroz ovu granicu u tzv. "nultom stanju" (stanju bez crpljenja) i sa maksimalnim simuliranim crpljenim količinama, se kroz tri razmatrana hidrološka stanja umanjilo za cca. 100 l/s. Koeficijenti transmisibiliteta, dobijeni modelom, kretali su se od 2×10^{-2} m²/s do 9.1×10^{-2} m²/s i bili su veći na dijelu prostora oko rijeke Željeznice, dok su najmanji bili na granici prema obroncima masiva Igman-Bjelašnica.

Rezultati provedene analize su pokazali da su karakteristike akvifera, kao i uvjeti koji vladaju na granicama modela, ograničavajuća ali ne i jedina odlučujuća komponenta u određivanju obnovljivih količina vode.

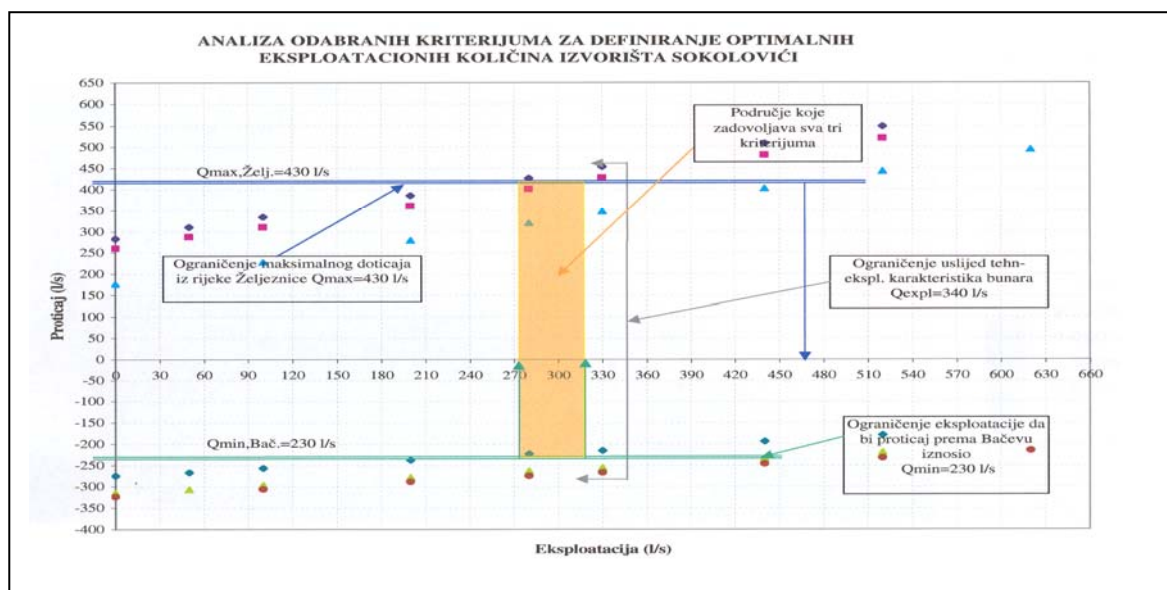
5. IZBOR KRITERIJUMA ZA VRIJEDNOVANJE DOBIJENIH REZULTATA

Imajući na umu pretpostavke i pojednostavljenja sa kojima se ušlo u formiranje matematičkog modela, mora se stalno imati u vidu da je on upotrebljiv samo u jednom specifičnom opsegu koji je odabran usvojenim početnim pretpostavkama i ograničenjima. Nepoznanica do koje se pokušalo doći je definiranje količina vode koje se mogu crpiti sa

Sokolovića, a koje neće narušiti ravnotežu dotjecanja i otjecanja sa šireg razmatranog područja, odnosno neće ugroziti eksploataciju na Bačevu.

Kriterijumi ograničenja za ovaj nivo razmatranja problema definirali su se kao ograničenja uslovljena tehničko - eksploatacionim karakteristikama bunara na prostoru izvorišta Sokolovići, minimalni potrebni protok prema Bačevu koji eksploatacija u Sokolovićima ne smije ugroziti, te maksimalni mogući dotjecaj iz rijeke Željeznice, za pretpostavljenu geometriju i granične uvjete.

1. Sagledavajući geološke, hidrogeološke i hidrološke uvjete, te tehničke karakteristike izvedenih bunara, provedena je analiza koja uključuje definisanje kapaciteta svakog bunara [1]. Prema rezultatima analize, ukupna eksploatacija sa izvorišta podzemnih voda u Sokolovićima, sistemom bunara ne bi trebala biti veća od 340 l/s.
2. Kao polazište za definisanje kriterijuma koji bi u sebi nosio moguća ograničenja podzemnog proticaja prema Bačevu, poslužile su analize urađene od strane Instituta za hidrotehniku GF u Sarajevu [3]. Rezultati modeliranja Sarajevskog polja, urađenog 1985. godine [2], za najkritičniji (najsušniji) registrovani period, period 1983-84 godina, pokazali su da za pretpostavljenu granicu modela proticaj prema Bačevu ne bi trebao biti manji od cca. 230 l/s vode.
3. Prema rezultatima hidrološke obrade bilansa voda u Sarajevskom polju urađenom za period 1984, 1985, 1986 i 1987. godina [4], pokazalo se, da je infiltracija duž rijeke Željeznice (od VS Krupac do VS Ilidža) iznosila oko 730 l/s vode. Uvažavajući dosadašnje rezultate prema kojima se infiltracija iz rijeke Željeznice u prostor Sarajevskog polja, kreće u količinama od 800 do 1250 l/s, te uzimajući za kriterij gornju granicu (oko 1250 l/s), koja za odabrane granične uvjete, znači da maksimalni mogući proticaj, koji bi se mogao desiti kroz granicu prema r. Željeznici modela konačnih volumena, iznosi cca. 400-430 l/s vode, što je suglasno već postojećim rezultatima.



SLIKA 4. DEFINIRANJE PODRUČJA EKSPLOATACIJE KOJE ISPUNJAVA UVJETE PO TRI KRITERIJUMA.

6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Uvažavajući prethodne kriterijume, te analizirajući rezultate dobijene matematičkim modeliranjem tečenja podzemnih voda metodom konačnih volumena, može se ustvrditi da je istovremeno zadovoljenje sva tri postavljena kriterijuma skoro nemoguće. Pristup rješenju bio bi višekriterijumska optimizacija tri raznoreda kriterijuma. Kompromisno rješenje koje zadovoljava sva tri postavljena kriterijuma, kojima bi se mogla dati približno ista težina, uz rezultate dobijene matematičkim modeliranjem, daje optimalne količine koje se mogu crpiti sa prostora izvorišta u Sokolovićima, ali uz napomenu da su one vezane za usvojena ograničenja, pretpostavke i granične uvjete.

Za razmatrana hidrološka stanja, usvojena pojednostavljena i granične uvjete sa kojima se ušlo u proračun, optimalne crpljenje količine vode, po tri navedena kriterijuma, trebale bi izositi od 270 do 320 l/s vode, Slika 4. Eksploatacija podzemne vode u ovoj količini, uz načinjene pretpostavke i pojednostavljena, može se smatrati kao eksploatacija dinamičkih količina vode.

Na kraju se mora napomenuti da su sistemi podzemnih voda dinamički i adaptivni sistemi, te da se ciljevi i kriterijumi, ograničenja kao i interakcije sa okolinom mjenjaju u toku vremena. Njihovo planiranje treba obnoviti čim nastupe relevantne promjene nekih od osnovnih polaznih postavki na kojima je planiranje bilo obavljeno.

Primjena rezultata ove analize na tehnički dio sistema, odnosno na donošenje tzv. operativnih odluka morala bi biti neodvojiva od analize kvaliteta podzemne vode. Obzirom na nepoznanicu koja se odnosi na stvarnu zapreminu podzemne akumulacije, koja u sebe uključuje i dinamičke i statičke rezerve, kao i na činjenicu da je provedena analiza rađena za stacionarno strujanje podzemnih voda, veoma interesantan rezultat bio bi ponavljanje ovakve analize za nestacionarne uvjete strujanja podzemnih voda uz praćenje transporta zagađenja, kao i paralelna provjera kvaliteta na terenu.

7. REFERENCE

- [1] Hadžić E.: Prilog optimizaciji eksploatacionih količina izvorišta Sokolović, Magistrski rad, Građevinski fakultet, Sarajevo, 2001.,
- [2] Zavod za hidrotehniku GF u Sarajevu.: Istražni radovi za potrebe Sarajevskog vodovoda u 1984. god., Sarajevo, 1985.,
- [3] Zavod za hidrotehniku GF u Sarajevu.: Bilans podzemnih voda Sarajevskog polja u funkciji eksploatacije podzemnih voda, Sarajevo, 1990.
- [4] Institut za hidrotehniku GF u Sarajevu.: Višenamjenski vodosprivredni podsistem Crna Rijeka, Sarajevo, 1999.