

## SIMULACIJA EKSPLOATACIONOG REŽIMA I ODREĐIVANJE RADIJUSA UTICAJA IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA „PRAMENAC“ I „BELJINA“ (ČAČAK) SIMULATION OF THE OPERATING REGIME AND DETERMINATION OF THE RADIUS OF INFLUENCE OF THE GROUNDWATER SOURCES “PRAMENAC” AND “BELJINA” (ČAČAK)

Dušan Polomčić<sup>1</sup>, Dragoljub Bajić<sup>1</sup>, Jelena Močević<sup>1</sup>,  
Slavko Špadijer<sup>2</sup>, Dejan Drašković<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Departman za hidrogeologiju;  
e-mail: osljane@orion.rs

<sup>2</sup>Preduzeće: “BeoGeoAqua” d.o.o., Bulevar Zorana Đinđića 117/IV, Beograd, Srbija

**APSTRAKT:** Geološka i hidrogeološka istraživanja koja su izvedena u zoni izvorišta „Pramenac“ i „Beljina“ grada Čačka imala su za cilj obezbeđivanje neophodnih količina kvalitetnih podzemnih voda za potrebe vodosnabdevanja stanovništva. Pomenuta izvorišta za vodosnabdevanje sastoje se od ukupno 19 eksploatacionih bunara koji kaptiraju izdan pod pritiskom do oko 240 m dubine. U cilju sprovođenja simulacije režima eksploatacije podzemnih voda na izvorištima za vodosnabdevanje izrađen je hidrodinamički model režima podzemnih voda. Takođe, simulacijom kretanja konzervativne čestice određen je radijus uticaja gradskih izvorišta za uslove rada izvorišta za vremenske periode od 50 i 200 dana.

**Ključne reči:** MODFLOW, MODPATH, transport čestice, vodosnabdevanje

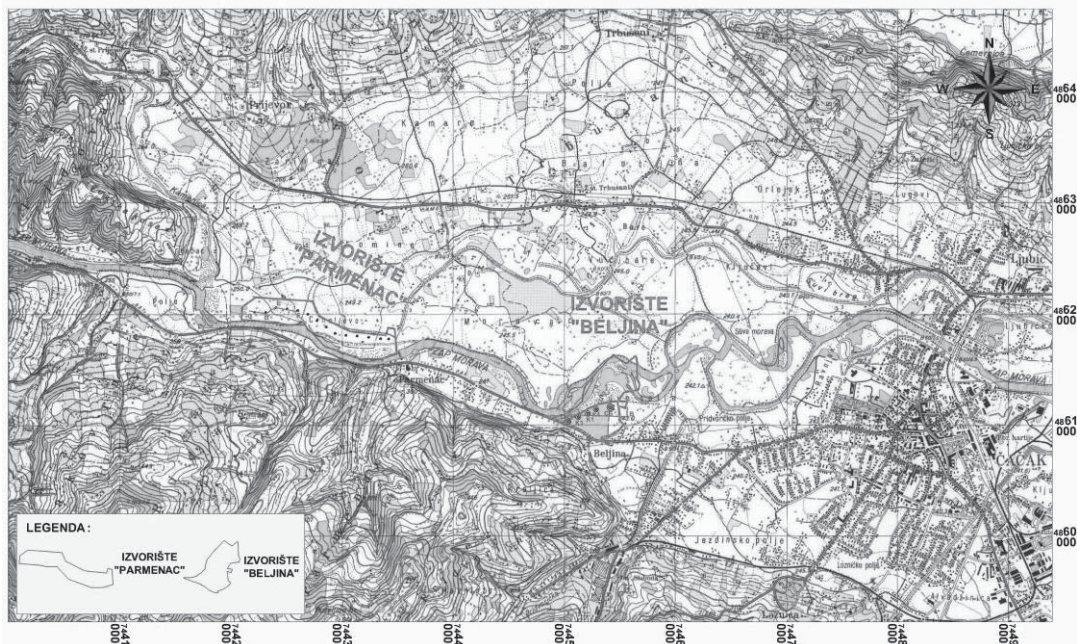
**ABSTRACT:** Geological and hydrogeological exploration was conducted in the general area of the groundwater sources “Pramenac” and “Beljina” in the city of Čačak with a view to ensuring sufficient quantities of high-quality groundwater for drinking water supply. The two water supply sources are comprised of a total of 19 production wells which tap a confined aquifer at a depth of about 240 m. A hydrodynamic model of the groundwater regime was developed to simulate groundwater extraction. In addition, travel of a conservative particle was simulated to determine the radius of influence of the urban water supply sources for operating conditions during time periods of 50 and 200 days.

**Key words:** MODFLOW, MODPATH, particle transport, drinking water supply

### UVOD

Istraživanja u ovom radu bave se problematikom određivanja radijusa uticaja izvorišta podzemnih voda “Pramenac” i “Beljina” u uslovima aktuelnog eksploatacionog režima. Istražno područje - pomenuta izvorišta podzemnih voda služe za vodosnabdevanje Čačka i nalazi se u centralnom delu Srbije gde zauzima prostor oko gornjeg dela toka reke Zapadne Morave (Slika 1).

Prema dubini vodonoshih horizonata iz kojih se zahvataju podzemne vode, treba izdvojiti zbijeni tip izdani u okviru peskovito-šljunkovitih sedimenata. Debljina izdani kreće se u intervalu od 3.9 m do 6 m. Primarni vid prihranjivanja izdani predstavlja infiltracija od atmosferskih padavina gde ravničarski reljef ne dozvoljava formiranje velikog površinskog oticaja pa se samim tim velika količina vode proceđuje u podzemlje. Litološki sastav kvartarne serije sedimenata omogućava akumulaciju velikih količina podzemnih voda, a strukturni položaj kvartarnih sedimenata je takav da ona može da akumulira na duži vremenski period velike količine voda. Drugi vid prihranjivanja ogleđa se u postojanju aktivne hidrauličke veze između izdani i površinskih voda, tako da reka predstavlja izvor hranjenja podzemnih voda. Što se tiče dreniranja izdani, prvi i osnovni način je preko vodozahvatnih objekata-bunara, a drugi način je slobodnim isticanjem putem izvora. Kako je reč o zbijenom tipu izdani jedini vid pražnjenja putem slobodnog isticanja je preko difuznog isticanja u koritu reke.



**Slika 1.** Šire područje izvorišta „Pramenac“ i izvorišta „Beljina“ obuhvaćeno hidrodinamičkim modelom  
**Figure 1.** The wider area of the „Pramenac“ and „Beljina“ groundwater sources covered by hydrodynamic model

## METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

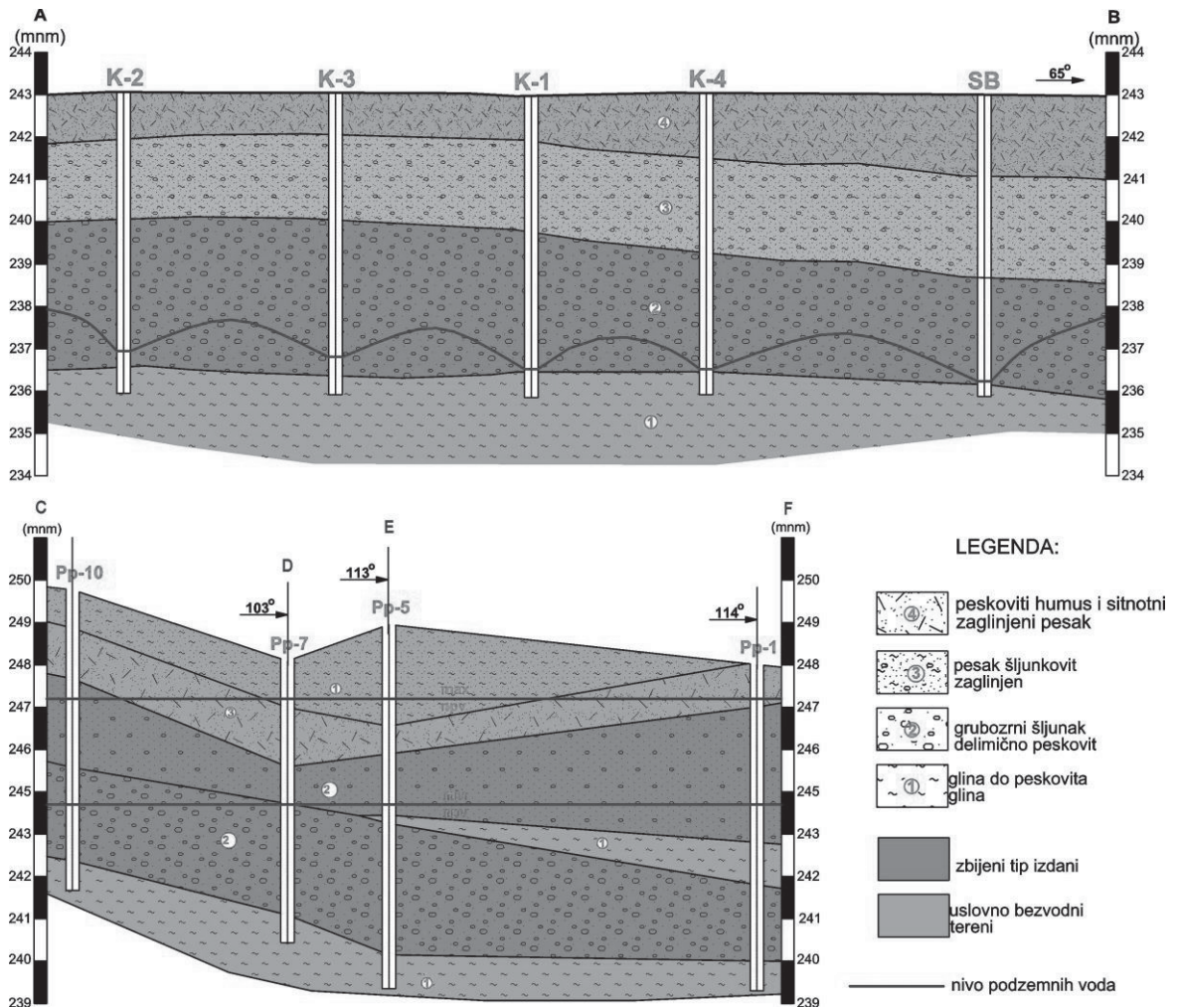
Primenjena metoda za postizanje cilja rada, koji se odnosi na simulaciju eksploatacionog režima i određivanje radijusa uticaja izvorišta podzemnih voda „Pramenac“ i „Beljina“ je hidrodinamička analiza. Hidrodinamička analiza predstavlja skup različitih metoda hidrodinamičkih proračuna, pri čemu je danas najkompleksnija i najprimenjivija metoda trodimenzionalnog hidrodinamičkog modeliranja režima izdani, bazirana na numeričkom rešavanju diferencijalnih jednačina koje opisuju prostorno kretanje podzemnih voda. Problemi u hidrogeologiji koji se mogu rešavati primenom hidrodinamičke analize kod istraživanja izvorišta podzemnih voda mogu biti različiti, a slični problemi kao u ovom slučaju - simulaciju eksploatacionog režima i određivanje radijusa uticaja izvorišta podzemnih voda, prikazani su u više radova (Đurić et al., 2012; Dimkić, 2013; Polomčić et al., 2015; Polomčić et al., 2013; Polomčić et al., 2011). Za postizanje cilja rada, korišćeni su kompjuterski kodovi MODFLOW i MODPATH (Harbaugh et al., 2000; Pollock, 1994).

Za izradu modela poslužili su svi relevantni podaci o ranijim namenskim geološkim i hidrogeološkim istraživanjima izvedenim na širem prostoru izvorišta „Pramenac“ i izvorišta „Beljina“. Konceptcija izrade hidrodinamičkog modela šireg područja izvorišta „Pramenac“ i izvorišta „Beljina“ zasniva se na simulaciji trodimenzionalnog strujanja. Posmatrano u vertikalnom profilu, hidrodinamički model je koncipiran i izrađen kao troslojeviti model. Povlatu i podinu (prvi i treći sloj) vodonosnih sedimenata čine gline koje su po svojim hidrogeološkim karakteristikama slabovodopropusni sedimenti i predstavljaju barijeru kretanju podzemnih voda. Drugi modelski sloj izgrađen je od peskovitih i šljunkovitih sedimenata.

Osnovne dimenzije matrice, kojom je obuhvaćen izučavani teren su 5.3 km x 2.6 km, što obuhvata prostor od 13.78 km<sup>2</sup>. Diskretizacija strujnog polja u planu je izvedena sa osnovnom veličinom ćelija 50 m x 50 m, koja je u području predmetnih izvorišta poguščena u mrežu kvadrata dimenzija 12.5 m x 12.5 m. Teren obuhvaćen modelom je izdijeljen mrežom kvadrata i pravougaonika dimenzija 52 reda x 106 kolona i sastoji se od 27.726 aktivnih modelskih ćelija.

U hidrodinamičkom modelu izvorišta „Pramenac“ i izvorišta „Beljina“ kao inicijalne vrednosti koeficijenta filtracije porozne sredine zadavane su vrednosti dobijene obradom podataka crpenja, a od graničnih uslova (slike 2 i 3) primenjeni su sledeći: granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa (zatada u prvom modelskom sloju), granični uslov reka kojim je simuliran hidraulički uticaj površinskih tokova - reke Zapadne Morave (zadat u drugom modelskom sloju), granični uslov sa zadatim proticajem kojim su simulirani eksploatacioni bunari i infiltracija padavina (zadata u prvom modelskom sloju) u vrednosti od 10 % prosečnih višegodišnjih vrednosti padavina za analizirane vremenske periode i neaktivne modelske ćelije („no flow“).

Manuelno i automatsko (Doherty & Hunt, 2010; Doherty, 2013; Polomčić et al., 2014) etaloniranje modela je sprovedeno za stacionarne uslove strujanja podzemnih voda za stanje režima od 2011-2015. god. U okviru monitoringa registrovani su: sumaran rad eksploatacionih bunar izvorišta „Pramenac“ i izvorišta „Beljina“, nivoi podzemnih voda na pijezometrima na izvorištu „Beljina“ i na izvorištu „Pramenac“ i vodostaji na Zapadnoj Moravi. Kao vremenski presek za koji je obavljeno etaloniranje modela uzet je 20.09.2011. godine kada je registrovana maksimalna eksploatacija podzemnih voda na oba izvorišta (simulatno merena) od 152 l/s.



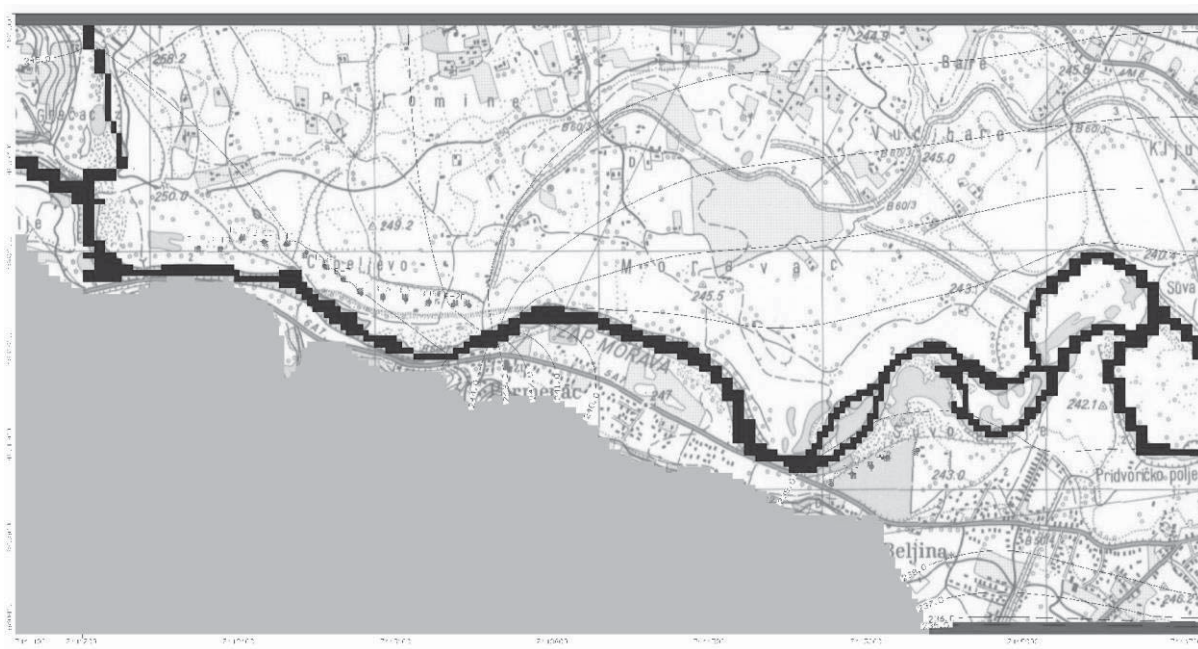
Slika 2. Hidrogeološki profili istražnog područja (profilne linije na slici 1)  
Figure 2. Hydrogeological cross section of the study area (profile lines in Figure 1)

## PRIKAZ REZULTATA

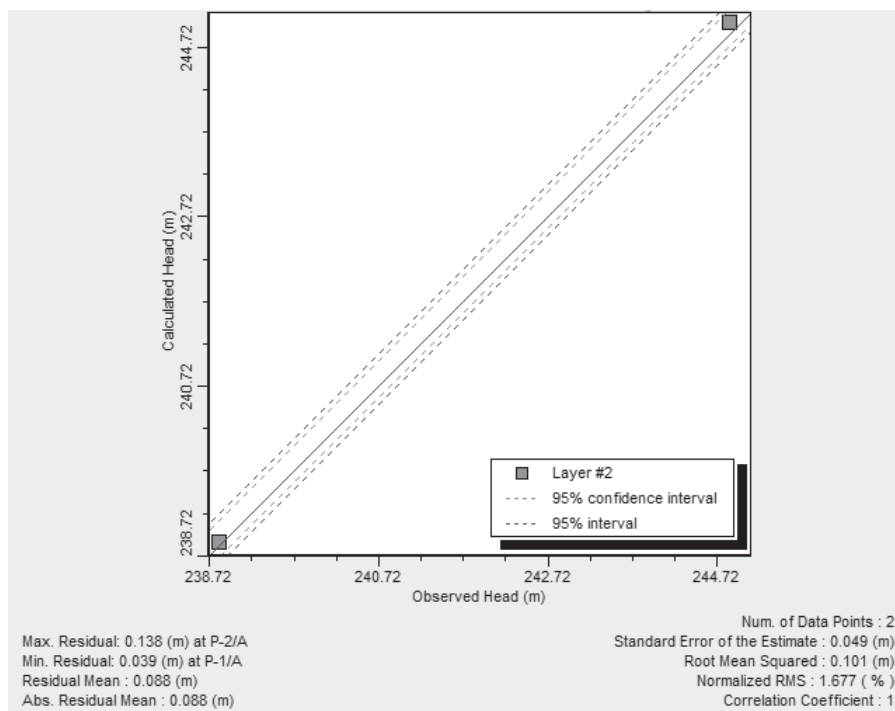
Na slici 3 prikazan je raspored pijezometrijskih nivoa u drugom modelskom sloju, dok je na slici 4 prikazana korelaciona zavisnost koja ukazuje na generalno dobru usaglašenost registrovanih i proračunatih vrednosti pijezometrijskog nivoa u osmatračkim objektima.

Za potrebe utvrđivanja radijusa uticaja koji ostvaruju eksploatacioni bunari predmetnih izvorišta u radu maksimalnim registrovanim kapacitetom od 131 l/s (izvorište „Pramenac“), odnosno 77 l/s (izvorište „Beljina“), sprovedeno je određivanje udaljenosti sa kojeg podzemne vode dolaze do eksploatacionih bunara za 50, odnosno za 200 dana, prema važećem Pravilniku o određivanju zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda (2008). Navedeno je izvedeno simulacijom kretanja konzervativne čestice (trase) do eksploatacionih bunara na hidrodinamičkom modelu režima izdani, a rezultati proračuna su prikazani na slikama 5 i 6. Na ovim slikama strelice na strujnim linijama koje su usmerene ka eksploatacionim bunarima označavaju segment od 10 dana putovanja konzervativne čestice (do bunara).

Za vreme putovanja konzervativne čestice od 50 dana pri sumarnom kapacitetu izvorišta „Pramenac“ od 131 l/s maksimalna dužina puta čestice od ose eksploatacionih bunara iznosi do 180 m u kapiranoj izdani, dok za izvorište „Beljina“ pri sumarnom radu eksploatacionih bunara kapacitetom od 77 l/s maksimalna dužina puta čestice od ose bunara iznosi do 210 m u kapiranoj izdani. Za vreme putovanja konzervativne čestice od 200 dana, pri navedenim sumarnim kapacitetima oba izvorišta maksimalna dužina puta čestice od ose bunara iznosi: za izvorište „Pramenac“ do 500 m u kapiranoj izdani i za izvorište „Beljina“ do 510 m u kapiranoj izdani.

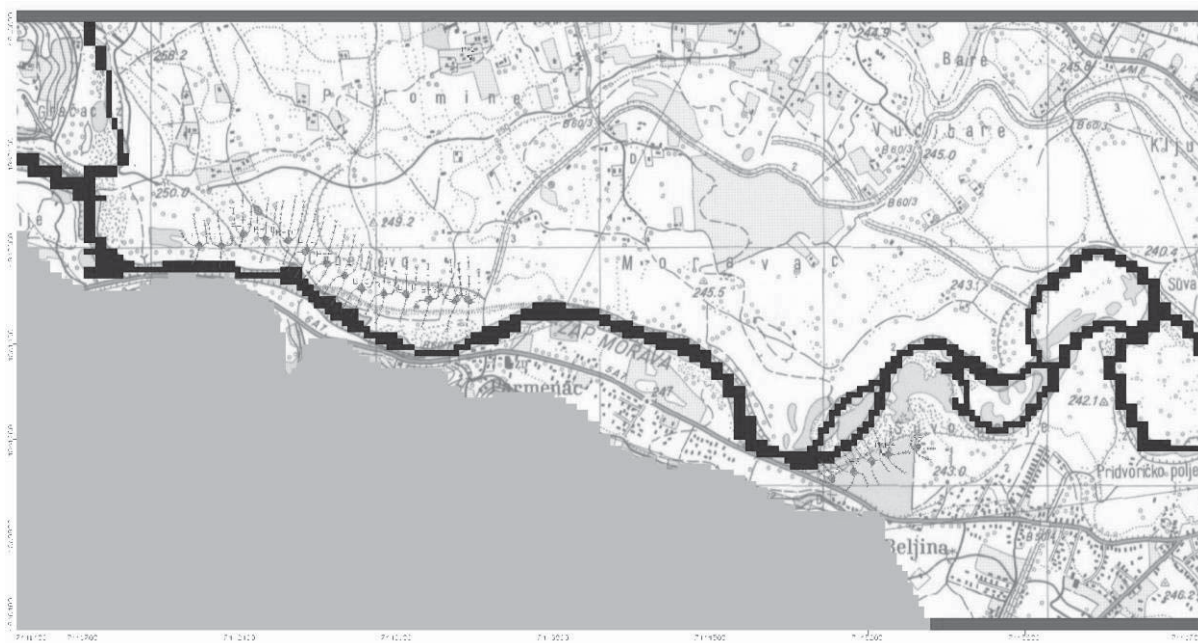


**Slika 3.** Karta hidroizohipsi u drugom modelskom sloju u široj okolini izvorišta „Parmenac“ i izvorišta „Beljina“  
**Figure 3.** Water-table contour line map of the wider area of groundwater sources "Parmenac" and spring "Beljina" (the second layer)

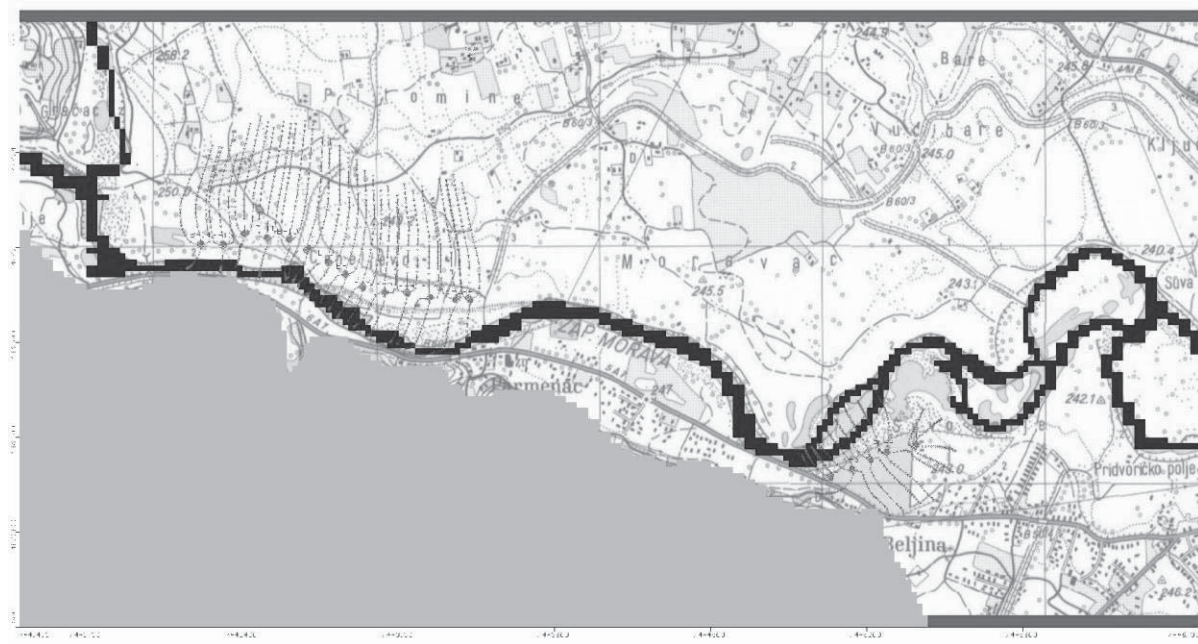


**Slika 4.** Korelaciona zavisnost registrovanih i proračunatih vrednosti  
 pijezometarskog nivoa u osmatračkim objektima

**Figure 4.** Correlation dependence of registered and calculated values of piezometrical levels in observation wells



**Slika 5.** Raspored strujnica oko eksploatacionih bunara izvorišta „Pramenac“ i izvorišta „Beljina“ za maksimalno registrovane kapacitete koje pokazuju udaljenje potrebno da se do bunara filtrira voda za 50 dana  
**Figure 5.** Disribution of streamlines around production wells at the groundwater sources of „Pramenac“ and „Beljina“ for maximum discharge rate, which indicates the distance from the well covered in 50 days



**Slika 6.** Raspored strujnica oko eksploatacionih bunara izvorišta „Pramenac“ i izvorišta „Beljina“ za maksimalno registrovane kapacitete koje pokazuju udaljenje potrebno da se do bunara filtrira voda za 200 dana  
**Figure 6.** Disribution of streamlines around production wells at the groundwater source of „Pramenac“ and „Beljina“ for maximum discharge rate, which indicates the distance from the well covered in 200 days

## ZAKLJUČAK

U periodu od 2011.-2015. godine izvršena su osmatranja režima podzemnih voda i vođena je evidencija o radu izvorišta „Parmenac“ i izvorišta „Beljina“. U cilju sprovođenja simulacije eksploatacije podzemnih voda i određivanja radijusa uticaja predmetnih izvorišta izvedena je izrada hidrodinamičkog modela šireg područja izvorišta „Parmenac“ i izvorišta „Beljina“. Osnovna namena hidrodinamičkog modela je određivanje realnog radijusa uticaja izvorišta „Parmenac“ i izvorišta „Beljina“ u aktuelnim uslovima kaptiranja izdanskih voda na širem području. Za vreme putovanja konzervativne čestice od 50 dana pri aktuelnom kapacitetu izvorišta „Parmenac“ maksimalna dužina puta čestice od ose eksploatacionih bunara iznosi do 180 m u kapiranoj izdani, dok za izvorište „Beljina“ pri iznosi do 210 m. Za vreme putovanja konzervativne čestice od 200 dana, maksimalna dužina puta čestice od ose bunara iznosi za izvorište „Parmenac“ do 500 m u kapiranoj izdani i za izvorište „Beljina“ do 510 m u kapiranoj izdani.

## ZAHVALNICA

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

## LITERATURA

- ĐURIĆ, D., LUKIĆ, V. & SORO, A. (2012). *Hydrodynamic assessment of the Expansion of the Groundwater Source of Petrovaradinska Ada in Novi Sad (in Serbian)*, *Vodoprivreda*, 258-260: 265-272.
- DIMKIĆ, M., PUŠIĆ, M., VIDOVIĆ, D., ĐURIĆ, D., BORELI-ZDRAVKOVIĆ, Đ. (2013). *Pollution Transport analysis in defining the Sanitary Protection Zones of Groundwater Sources in Alluvial Areas*. *Vodoprivreda*, 264-266: 203-218.
- DOHERTY J. (2013). *Addendum to the PEST Manual*. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing, pp.1-294.
- DOHERTY E.J. & HUNT J.R. (2010). *Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration*, Scientific Investigations Report 2010-5169. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- POLOMČIĆ D., BAJIĆ D., ZARIĆ J. (2015). *Determining the Groundwater Balance and Radius of Influence Using Hydrodynamic Modeling: Case Study of the Groundwater Source Šumice in Serbia*. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3(3): 217-229. doi: 10.13044/j.sdewes.2015.03.0017
- POLOMČIĆ D., BAJIĆ D., RISTIĆ-VAKANJAC V., ČOKORILO M., DRAŠKOVIĆ D., ŠPADIJER S. (2013). *Hydrodynamic Characteristics of the Water Supply Source „Peštan“ (Lazarevac, Serbia)*. *Vodoprivreda*, 261-263: 55-68.
- POLOMČIĆ D., BAJIĆ D., RISTIĆ-VAKANJAC V. & ČOKORILO ILIĆ M. (2014). *Automatic calibration of hydrodynamic models using PEST program*. *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, pp. 13-27.
- POLOMČIĆ, D., KRUNIĆ, O., RISTIĆ-VAKANJAC, V. (2011). *Hydrogeological and Hydrodynamic Characteristics of Groundwater Sources for the Public Water Supply of Bečej (northern Serbia)*. *Geološki anali balkanskog poluostrva*, 72: 143-157. doi: 10.2298/GABP1172143P.
- POLLOCK, D. W. (1994). *User's Guide for MODPATH/MODPATHPLOT, Version 3: A Particle Tracking Post-processing Package for MODFLOW, the US Geological Survey Finite-difference Ground-water Flow Model*, US Geol Surv Open-File Rep, 94-464.
- Rulebook about the Method of Determining and Maintaining Sanitary Protection Zones for Water Supply (2008). Official Gazette of Republic of Serbia, No. 92.
- HARBAUGH, A. W., BANTA, E. R., HILL, M. C. AND MCDONALD, M. G. (2000). *MODFLOW-2000: The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model, User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process*, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, Reston, VA, USA, pp 121.