

# Metodologija određivanja vremena i putanje zagađivača na primeru zaštite izvorišta podzemnih voda

Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić, Vesna Ristić Vakanjac, Jelena Ratković, Marina Čokorilo Ilić



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Metodologija određivanja vremena i putanje zagađivača na primeru zaštite izvorišta podzemnih voda | Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić, Vesna Ristić Vakanjac, Jelena Ratković, Marina Čokorilo Ilić | Zbornik radova nacionalne konferencije sa međunarodnim učešćem ekoremedijacija i ekonomska valorizacija vodnih resursa-modeli i primena | 2018 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007301>



## **METODOLOGIJA ODREĐIVANJA VREMENA I PUTANJE ZAGAĐIVAČA NA PRIMERU ZAŠTITE IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA**

Dušan Polomčić, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, [dusan.polomcic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dusan.polomcic@rgf.bg.ac.rs)  
Dragoljub Bajić, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, [dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs)  
Vesna Ristić Vakanjac, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, [vesna.ristic@rgf.bg.ac.rs](mailto:vesna.ristic@rgf.bg.ac.rs)  
Jelena Ratković, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, [jelena.ratkovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:jelena.ratkovic@rgf.bg.ac.rs)  
Marina Čokorilo Ilić, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, [marinacokorilo@rgf.bg.ac.rs](mailto:marinacokorilo@rgf.bg.ac.rs)

### **IZVOD**

Analiza vremena putovanja potencijalnog zagađivača do bunara izvorišta podzemnih voda predstavlja veoma bitan segment kod upravljanja i zaštite podzemnih voda. Ova metodologija se zasniva na simulaciji kretanja nereagujuće čestice sa podzemnim vodama i poroznom sredinom ("idealna" čestica). Rezultati hidrodinamičkog modela, kojim se vrši simulacija režima podzemnih voda, predstavljaju osnovu za model praćenja "idealne" čestice. Postoje različiti softveri koji se koriste u hidrogeološkoj praksi za analizu problema zagađivača. U ovom radu korišćen je numerički kod Modpath, dok je za simulaciju režima podzemnih voda korišćen numerički kod Modflow. Primena navedene metodologije prikazana je na primeru iz prakse. Rezultati modelskih istraživanja predstavljani su u vidu karata rasporeda pijezometarskih nivoa podzemnih voda i karata putanje „idealnih“ čestica u prostoru i vremenu.

**Ključne reči:** *upravljanje podzemnim vodama, zaštita podzemnih voda, hidrodinamički model, metoda praćenja „idealne“ čestice, modflow, modpath*

## **METHODOLOGY OF DETERMINING THE TRAVEL TIME AND PATHWAYS OF CONTAMINANTS IN INSTANCES OF GROUNDWATER SOURCES PROTECTION**

### **ABSTRACT**

The timeseries analysis of potential contaminations of groundwater sources represents a important section in groundwater management and groundwater protection. This methodology is based on the simulation of movement a particle that doesn't react with groundwater and porous media ("ideal" particles). The results of the hydrodynamic model which simulates the groundwater regime are the basis for the particle-tracking model: a particle-tracking model is designed to work with groundwater flow model output. There are different softwares used in hydrogeological research for groundwater contamination analysis. In this paper, it was used modpath code, while, on the other hand, modflow code was used for simulation of groundwater regime. The application of the abovementioned methodologies was presented on a real case study. The outputs from model are presented in the form of water-table maps and distribution of the pathlines around the wells at groundwater source.

**Key words:** *groundwater management, groundwater protection, hydrodynamic model, particle tracking, modflow, modpath*



## UVOD

Vodosnabdevanje kvalitetnom pijaćom vodom, u savremenim uslovima života, često predstavlja pojam polemike. S druge strane, izvorište podzemnih voda je deo sistema za vodosnabdevanje, pa njegov rad treba da predstavlja strogo kontrolisani proces. Često iskustva iz domaće prakse ukazuju na ne tako dobar pristup pri istraživanju koja su neophodna prilikom otvaranja novog ili proširenja postojećeg izvorišta podzemnih voda. Isti je slučaj i kod zaštite izvorišta podzemnih voda od zagađenja. Problemi koji se često javljaju su nekontrolisana eksploatacija podzemnih voda, starenje vodozahvata i starenje izvorišta, zatim međusobni uticaji vodozahvata jednog izvorišta na drugo prilikom eksploatacije vode iz istog vodonosnog horizonta (npr. industrijske zone). Takođe, zagađenja iz fabrika ili neki drugi antropogeni uticaji mogu narušiti kvalitet podzemnih voda. Pravilan pristup istraživanju ostvaruje se primenom hidrodinamičke analize, koja omogućava pouzdane osnove za obezbeđivanje stabilne eksploatacije podzemnih voda [1]. Tako se i određivanje i održavanje zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda, koje se realizuje aktuelnim Pravilnikom [2] vrši primenom hidrodinamičkih modela koji simuliraju kretanje podzemnih voda u vodonosnoj sredini izvorišta. Neka zanimljiva rešavanja problema na izvorištima podzemnih voda primenom hidrodinamičke analize u Srbiji predstavljena su u sledećim naučnim radovima: izvorište Bečej [3, 4], izvorište „Petrovaradinska Ada“ - Novi Sad [5], izvorište „Peštan“ - Lazarevac [6], izvorište „Vić Bare“ - Obrenovac [7], beogradsko izvorište [8, 9, 10, 11], izvorišta „Parmenac“ i „Beljina“ - Čačak [12], izvorište „Nelt“ - Dobanovci [13], izvorište „Carina“ - Kladovo [14], izvorište „Šumice“ - Kikinda [15].

U ovom radu je prikazano određivanja vremena i putanje zagađivača na izvorištima podzemnih voda. U osnovi, metoda hidrodinamičkog modeliranja režima izdani se primenjuje i za ove potrebe. Postupak koji je prikazan se sastoji u tome da se za posmatrani slučaj izradi i kalibriše hidrodinamički model, a zatim se koriste specifični softverski kodovi za analizu putanje i vremena putovanja potencijalnog zagađivača od izvora zagađenja do bunara izvorišta podzemnih voda. Metodologija se zasniva na simulaciji kretanja nereagujuće čestice sa podzemnim vodama i poroznom sredinom, tzv. - metoda praćenja „idealne“ čestice. Za simulaciju režima podzemnih voda i analizu putanje i vremena „idealne“ čestice korišćen je softver Groundwater Vistas Advanced verzija 64-Bit 6.93 b.9 [16], a u okviru njega numerički kodovi Modflow [17] i Modpath [18]. Pomenuta metodologija primenjena je na slučaj iz hidrogeološke prakse u Srbiji. Problem se sastoji u sledećim činjenicama: za obezbeđivanje građevinskog materijala, koji se koristi prilikom izvođenja radova na području opštine Surčin, vrši se eksploatacija žutih i sivih alevritskih peskova na površinskom kopu „Jakovačka Kumša“, u priobalju Save; u neposrednoj blizini površinskog kopa, nalazi se više bunara sa horizontalnim drenovima koji služe za vodosnabdevanje Beograda. Hidrodinamičkom analizom utvrđen je uticaj eksploatacije alevritskih peskova na kvalitet podzemnih voda koje se zahvataju bunarima na beogradskom izvorištu. Eventualnu opasnost od zagađenja izvorišta podzemnih voda predstavlja mogućnost nekontrolisanog izlivanja dizel goriva iz građevinskih i rudarskih mašina i vozila ili, s druge strane, zagađivači koji se nalaze na nelegalnom odlagalištu otpada koje se nalazi u okviru površinskog kopa.

## METODOLOGIJA

Metoda koja se odnosi na sagledavanje režima podzemnih voda na analiziranom istražnom području, a zatim i analizu putanje i vremena kretanja zagađujuće materije je hidrodinamička analiza [1]. Hidrodinamička analiza predstavlja skup različitih metoda hidrodinamičkih proračuna, od kojih je danas najkompleksnija i najprimenljivija metoda trodimenzionalnog hidrodinamičkog modeliranja režima izdani, bazirana na numeričkom rešavanju diferencijalnih jednačina koje opisuju kretanje podzemnih voda i procese koji se dešavaju u poroznoj sredini. Kreiranje hidrodinamičkog modela obuhvata nekoliko faza, a krenuvši redom to su: razmatranje problema koji treba rešiti primenom modela (svrha i cilj modeliranja); kreiranje hidrogeološkog modela; faza



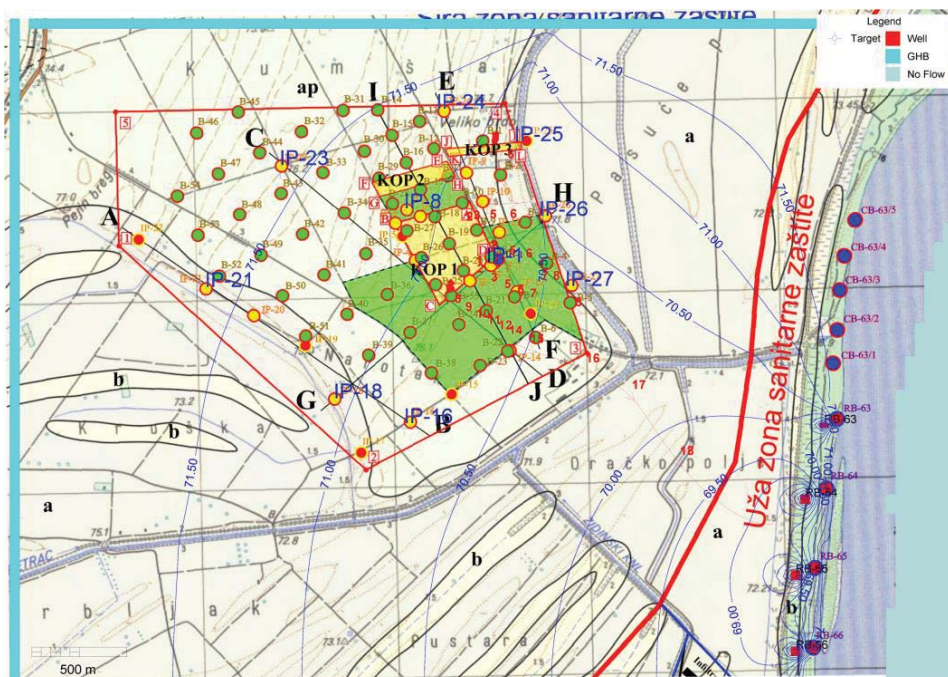
prevođenja hidrogeološkog modela u hidrodinamički model (odabir numeričke metode i softvera za modeliranje, diskretizacija prostora i „uvoz geometrije modela“, „uvoz“ hidrogeoloških parametara porozne sredine, postavljanje graničnih uslova na modelu, postavljanje početnih uslova na modelu, odabir i diskretizacija proračunskog intervala, etaloniranje hidrodinamičkog modela, analiza osetljivosti hidrodinamičkog modela, verifikacija hidrodinamičkog modela, izrada različitih prognoznih hidrodinamičkih proračuna i odabir optimalne varijante, noveliranje ili rekalkibracija hidrodinamičkog modela i prikaz dobijenih rezultata). S druge strane, u hidrodinamičkoj analizi kretanja podzemnih voda, proračun transporta „idealne“ čestice predstavlja najprimenljiviju metodu za određivanje putanje i vremena putovanja zagađivača u podzemnim vodama. Kod ove metode zanemaruje se efekat disperzije i usvaja se pretpostavka da ne dolazi ni do kakvih reakcija između čestice i podzemnih voda, kao ni između čestice i porozne sredine. Ovom metodom se relativno brzo može utvrditi pravac transporta zagađenja, kao i prosečno vreme putovanja zagađivača od izvora zagađenja do bunara izvorišta podzemnih voda. Metoda praćenja „idealne“ čestice najveću primenu ima kod određivanja zona sanitarnih zaštitnih podzemnih voda kod izvorišta i pojedinačnih vodozahvatnih objekata, a neki primeri iz sveta i Srbije prikazani su u radovima [12, 15, 19, 20, 21].

## REZULTATI I DISKUSIJA

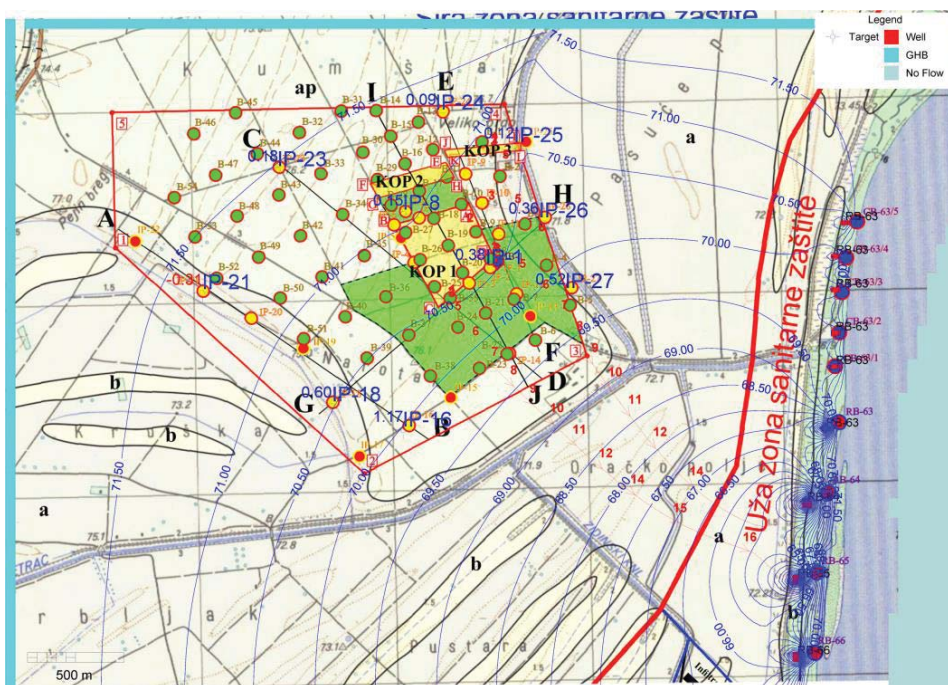
Hidrodinamički model šire okoline površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ je koncipiran i izrađen kao višeslojeviti model, sa ukupno tri sloja, posmatrano u vertikalnom profilu. Obuhvata prostor od 17.5 km<sup>2</sup> i sastoji se od 47.085 aktivnih modelskih ćelija. Sva tri sloja odgovaraju određenom realnom sloju, šematizovanom i izdvojenom na osnovu poznavanja terena i rezultata sprovedenih analiza terenskih istražnih radova. Unos inicijalnih vrednosti hidrogeoloških parametara (koeficijenta filtracije i specifične izdašnosti izdani) izvršen je na osnovu terenskih hidrogeoloških istraživanja za sve litološke članove. Od graničnih uslova (slike 1 i 2), primenjeni su sledeći: „vertikalni bilans“ - efektivna infiltracija (izražena preko procenta padavina), granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa (mereni nivoi podzemnih voda na pijezometrima), granični uslov reka (simulacija režima reke Save), granični uslov drenaža (hidraulički uticaj kanalske mreže) i granični uslov sa zadatim proticajem (prosečne vrednosti proticaja bunara sa horizontalnim drenovima). Etaloniranje modela je sprovedeno u nestacionarnim uslovima, u skladu sa prikupljenim podlogama, za period od februara 2016. do maja 2016. god. U procesu etaloniranja modela kao ciljne tačke u strujnoj oblasti korišćeni su registrovani nivoi podzemnih voda u pijezometrima. Osmatračka mreža obuhvata ukupno 10 pijezometara. Etaloniranje modela je bilo završeno kada je dobijena zadovoljavajuća saglasnost između registrovanih nivoa podzemnih voda i nivoa dobijenih proračunom, uz kontrolu bilansa podzemnih voda.

U analizi putanje i vremena putovanja potencijalnog zagađivača od površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ do bunara beogradskog izvorišta podzemnih voda analizirane su dve varijante. U prvoj varijanti (slika 1) simulirana je postojeća eksploatacija podzemnih voda sa ukupnim kapacitetom bunara od 62.9 l/s (4 bunara sa horizontalnim drenovima). U drugoj varijanti (slika 2) je simulirana eksploatacija podzemnih voda sa ukupnim kapacitetom bunara od 240 l/s, gde je u rad bilo uključeno pored 4 bunara sa horizontalnim drenovima još 5 cevastih bunara koji se nalaze u toj zoni beogradskog izvorišta. „Idealne“ čestice u hidrodinamičkim proračunima locirane su po obodu celog površinskog kopa (na slikama 1 i 2: „Kop 1“, „Kop 2“ i „Kop 3“). Kako na tim lokacijama nema povlatnog zaštitnog sloja, infiltracija „idealnih“ čestica u vodonosne peskove je relativno brza. Na osmatrani režim podzemnih voda uticaj imaju i drenažni kanali koji se pružaju duž istočne i južne strane površinskog kopa (slike 1 i 2).





Slika 1.- Putanja i vreme putovanja „idealne“ čestice od površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ do bunara beogradskog izvorišta (u mesecima) za kapacitet izvorišta od 62.9 l/s



Slika 2. - Putanja i vreme putovanja „idealne“ čestice od površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ do bunara beogradskog izvorišta (u mesecima) za kapacitet izvorišta od 240 l/s

Za uslove zahvatanja podzemnih voda iz bunara sa horizontalnim drenovima ukupnim proticajem od 62.9 l/s (slika 1), vode iz kopa uglavnom gravitiraju ka drenažnim kanalima do kojih „idealne“ čestice dolaze prosečno za 6 do 9 meseci. Izuzetak je krajnja jugoistočna zona površinskog kopa (“Kop 1”), odakle vode gravitiraju ka bunaru sa horizontalnim drenovima RB-64 i čestice stižu za 19 meseci.



U uslovima zahvatanja podzemnih voda u količini od 240 l/s (slika 2) dolazi do promene strujne slike i preraspodele proticajaj u okviru simulirane strujne oblasti. Iz udaljenijih kopova u odnosu na bunare beogradskog izvorišta („Kop 2“ i „Kop 3“), vode gravitiraju ka drenažnim kanalima i „idealne“ čestice do njih stižu za 5 do 6 meseci. S druge strane, duž najbliže konture površinskog kopa bunarima beogradskog izvorišta („Kop 1“) sve vode gravitiraju ka bunarima sa horizontalnim drenovima i čestice stižu u vremenskom dijapazonu od 15 meseci (RB-64) do 17 meseci (RB-65).

## ZAKLJUČAK

Hidrodinamičkim proračunima transporta „idealne“ čestice na primeru iz hidrogeološke prakse, prikazan je uticaj eksploatacije peskova sa površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ na kvalitet podzemnih voda koje se zahvataju bunarima na beogradskom izvorištu. Potencijalnu opasnost od zagađenja podzemnih voda izvorišta za vodosnabdevanje čini skup različitih procesa koji se odvijaju na površinskom koku. Za ovo istražno područje, bitan činilac koji utiče na pravac kretanja „idealne“ čestice je depresija koja je nastala tokom eksploatacije peska, a takođe veliki uticaj ima i sistem drenažnih kanala. S druge strane, ako se posmatra stanje dok površinski kop nije postojao, sada bi bila mnogo brža infiltracija „idealne“ čestice jer nema povlatnog zaštitnog sloja. Putanja „idealne“ čestice je uglavnom ka drenažnim kanalima, ali se na jugoistočnoj strani kopa uočava zona odakle putanja čestica vodi do bunara izvorišta podzemnih voda. Za analizirane uslove zahvatanja podzemnih voda, vreme putovanja „idealne“ čestice se generalno kreće od minimalno 6 do maksimalno 19 meseci. Kako bi se smanjio uticaj kretanja potencijalnog zagađivača, predlaže se da donja granica budućeg dela ležišta, gde će se vršiti eksploatacija, bude površ koja se nalazi na 2 m iznad glavnog peskovito-šljunkovitog vodonosnog sloja u okviru alevritskih peskova, a koju treba kontrolisati i održavati tokom celog vremena eksploatacije peskova. Postojanje ovakve „tampon“ zone peskova sa dobrim apsorpcionim karakteristikama produžuje vreme za intervenciju ako bi došlo do eventualnog zagađenja.

## Zahvalnica

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

## LITERATURA

1. Polomčić D. (2001). Hidrodinamička istraživanja, otvaranje i upravljanje izvorištima izdanskih voda u intergranularnoj poroznoj sredini, Rudarsko geološki fakultet, Beograd.
2. Ministarstvo zdravlja R. Srbije (2008). Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja, Službeni glasnik RS, br. 92/2008.
3. 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 balkanskoga poluostvra*, 72: 143-157.
4. Polomčić D., Bajić D. & Krunić O. (2014). Hidrodinamička analiza interakcije dva izvorišta u radu na primeru vodosnabdevanja Bečeja. *Tehnika*, 69(4): 597-603.
5. Đurić D., Lukić V. & Soro A. (2012). Hidrodinamička analiza proširanja izvorišta „Petrovaradinska Ada“ u Novom Sadu. *Vodoprivreda*, 258-260: 265-272.
6. Polomčić D., Bajić D., Ristić-Vakanjac V., Čokorilo M., Drašković D. & Špadijer S. (2013). Hidrodinamičke karakteristike izvorišta „Peštan“ za vodosnabdevanje Lazarevca. *Vodoprivreda*, 261-263: 55-68.



7. Polomčić D., Hajdin B., Stevanović Z., Bajić D. & Hajdin K (2013). Groundwater management by riverbank filtration and an infiltration channel: The case of Obrenovac, Serbia. *Hydrogeology Journal*, 21(7): 1519-1530.
8. Božovć Đ., Polomčić D. & Bajić D. (2015). Hidrodinamička simulacija i analiza režima podzemnih voda pod uticajem bunara sa horizontalnim drenovima (primer beogradskog izvorišta). *Tehnika*, 66(5): 777-786.
9. Božovć Đ., Polomčić D. & Bajić D. (2016). Hidrodinamička analiza opravdanosti utiskivanja novih drenova na većoj dubini na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda. *Vodoprivreda*, 48(282-284): 221-233.
10. Dimkić M., Ranković V., Filipović N., Stojanović B., Isailović, V., Pušić, M. & Kojić M. (2013). Modeling of radial well lateral screens using 1D finite elements. *Journal of hydroinformatics*: 15(2): 405-415.
11. Pušić, M., Dimkić M., Vidović, D., Dotlić, M. & Oparušić I. (2012). Hydrodynamic analysis of radial well capacity, example of the Belgrade groundwater source. Proceedings of the XIV Serbian Symposium on Hydrogeology, Zlatibor, Serbia, 17-20 May, 2012; Savić N. and Jovanović M, Eds.; University of Belgrade - Faculty of mining and geology: Belgrade; pp. 21-25.
12. Polomčić D., Bajić D., Močević J., Špadijer S. & Drašković D. (2016). Simulation of the operating regime and determination of the radius of influence of the groundwater sources „Parmenac“ and „Beljina“ (Čačak). In Vranješ A., Vukićević M. (Ed.), Proceedings of the XV Serbian Symposium on Hydrogeology, Kopaonik, Serbia, 14-17 September, 2016; University of Belgrade - Faculty of mining and geology: Belgrade; pp. 141-146.
13. Bajić D., Polomčić D., Ratković J. & Matić I. (2017). Hidrodinamička analiza mogućnosti povećanja eksploatacionog kapaciteta na primeru izvorišta podzemnih voda „Nelt“ u Dobanovcima. *Tehnika*, 68 (4): 512-525.
14. Pajić P., Polomčić D., Čalenić A & Bajić D. (2018). Hydrodynamic approach in the process of prevention of groundwater contamination in the case of potential faecal contamination of Kladovo water source „Carina“. In Ganić M. (Ed.), Proceedings of the XVII Serbian Geological Congress, Vrnjačka banja, Serbia, 17-20 May 2018, pp. 484-489. Belgrade: Serbian Geological Society.
15. 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.
16. Rumbaugh J.O. & Rumbaugh D.B. (2011). Guide to using Groundwater Vistas: version 6. New York: Environmental Simulations.
17. 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.
18. 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.
19. Yidana M.S. (2011). Groundwater flow modeling and particle tracking for chemical transport in the southern Voltaian aquifers. *Environmental Earth Science*, 63: 709-721.
20. Warner J.W., Khazaeib W., Warnerc J., Manghid F., Phranere R.W., Mortazavie B. & Namvarf R. (2009). Flow and transport modelling of a highly stressed aquifer to refine management strategies. *Water International*, 34(2): 264-279.
21. Dimkić M., Pušić M., Vidović D., Đurić D. & Boreli-Zdravković Đ. (2013). Analiza transporta zagađenja kod određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda u aluvijalnim sredinama. *Vodoprivreda*, 264-266: 203-218.