

Simulation of groundwater regime and quantification of groundwater balance by means of hydrodynamic analysis: Case of open-cast mine 'Jakovačka Kumša'

Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić, Jelena Ratković, Đorđije Božović, Predrag Pajić



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Simulation of groundwater regime and quantification of groundwater balance by means of hydrodynamic analysis: Case of open-cast mine 'Jakovačka Kumša' | Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić, Jelena Ratković, Đorđije Božović, Predrag Pajić | Tehnika | 2019 | |

10.5937/tehnika1901056P

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007262>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на www.dr.rgf.bg.ac.rs

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: www.dr.rgf.bg.ac.rs

Simulacija režima i kvantifikacija bilansa podzemnih voda primenom hidrodinamičke analize: primer Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“

DUŠAN M. POLOMČIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

DRAGOLJUB I. BAJIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

JELENA M. RATKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

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

PREDRAG R. PAJIĆ Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

Stručni rad

UDC: 556.34(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika1901056P

Hidrodinamička analiza, kao metodološki postupak, korišćena je za simulaciju režima i kvantifikaciju bilansa podzemnih voda na širem području Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“. Istražni prostor obuhvata i deo beogradskog izvorišta podzemnih voda koje se nalazi u neposrednoj blizini površinskog kopa, u priobalju reke Save. Na površinskom kopu se vrši eksploatacija peska, koji se koristi kao građevinski materijal. Analizom i sintezom podataka koji se odnose na geološke i hidrogeološke karakteristike područja, u radu je prikazan trodimenzionalni hidrogeološki model istražnog područja. Prevođenje hidrogeološkog modela u hidrodinamički izvršeno je primenom numeričke metode konačnih razlika i softverskog koda Modflow, zatim diskretizacije oblasti obuhvaćene modelom i vremenskog intervala, „uvozom“ hidrogeoloških parametara porozne sredine i postavljanjem graničnih i početnih uslova na modelu. U radu su prikazani rezultati hidrodinamičkog modela režima izdani istražnog područja u vidu karata rasporeda pijezometarskog nivoa, kao i bilansa podzemnih voda. Ovako postavljen trodimenzionalni hidrodinamički model predstavlja bazu za dalje prognozne hidrodinamičke proračune, kao i procenu uticaja eksploatacije peskova na kvalitet podzemnih voda tog dela beogradskog izvorišta.

Ključne reči: hidrogeološki model, hidrodinamički model, izvorište podzemnih voda, numerička metoda konačnih razlika, Modflow

1. UVOD

Izvorište podzemnih voda je deo sistema za vodosnabdevanje, pa njegov rad treba da predstavlja strogo kontrolisani proces. U savremenim uslovima života, vodosnabdevanje kvalitetnom pijaćom vodom često predstavlja pojam polemike. Iskustva iz domaće prakse ukazuju na ne tako dobar pristup pri istraživanju koja su neophodna prilikom otvaranja novog, proširenja postojećeg izvorišta podzemnih voda i zaštite izvorišta podzemnih voda od zagađenja. Starenje vodozahvata i starenje izvorišta u celini su problemi koji se često javljaju. Pored toga, evidentirani su i slučajevi

nekontrolisane eksploatacije podzemnih voda, a s druge strane i negativni efekti međusobnih uticaja vodozahvata jednog izvorišta na drugo prilikom eksploatacije vode iz istog vodonosnog horizonta (npr. Industrijske zone). Takođe, zagađenja iz fabrika, rudnika 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

Adresa autora: Dušan Polomčić, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7

e-mail: dusan.polomcic@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 29.10.2018.

Rad prihvaćen: 25.12.2018.

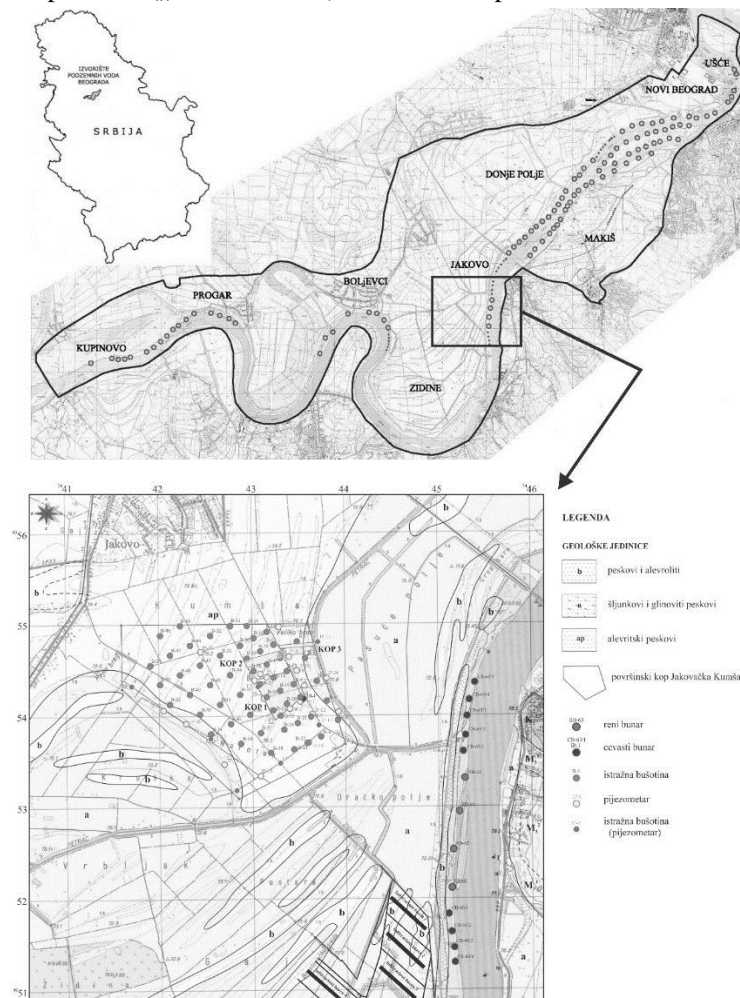
Bečej [3, 4], Izvorište „Petrovradinska Ada“ - Novi Sad [5], Izvorište „Peštan“ – Lazarevac [6], Izvorište „Vić Bare“ - Obrenovac [7], beogradsko izvorište [8, 9, 10, 11], Izvorišta „Parmenac“ i „Beljina“ - Čačak [12], Izvorište „Nelt“ - Dobanovci [13], Izvorište „Carina“ - Kladovo [14], Izvorište „Šumice“ - Kikinda [15].

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

U ovom radu prikazan je hidrodinamički model režima izdani istražnog područja na kome se nalaze Površinski kop „Jakovačka Kumša“ i deo vodozahvatnih objekata beogradskog izvorišta podzemnih voda. Naučna metodologija koja je primenjena u radu je hidrodinamička analiza - trodimenzionalno hidrodinamičko modeliranje režima podzemnih voda. Za simulaciju režima podzemnih voda korišćen je softver Groundwater Vistas Advanced verzija 64-Bit 6.93 b.9 [16], a u okviru njega numerički kod Modflow [17].

Na širem području Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ izdvajaju se naslage barskog i aluvijalnog porekla (slika 1). Čine ih peskovi i alevriti („b“ na slici 1), šljunkovi i glinoviti peskovi („a“ na slici 1) i

alevritski peskovi („ap“ na slici 1). Na osnovu brojnih istražnih bušotina i analizom i interpretacijom uzoraka, utvrđeno je da su naslage pleistocenske i holocenske starosti. Inače, na Površinskom koku „Jakovačka Kumša“, koji se nalazi u priobalju Save, vrši se eksploatacija žutih i sivih alevritskih peskova koji se koriste za obezbeđivanje građevinskog materijala prilikom izvođenja radova na području opštine Surčin. Sa istočne strane površinskog kopa, nalazi se više vertikalnih bunara i bunara sa horizontalnim drenovima koji služe za vodosnabdevanje Beograda (slika 1). Za pomenuto istražno područje, prvi hidrodinamički model i kalibracija [18] urađeni su za period kada eksploatacija peskova na površinskom koku još nije počela, za stanje režima izdani za period iz 2010. god, koje predstavlja i tzv. „nulto stanje“. Kako se tokom vremena vršila eksploatacija peska, površinski kop je proširen, a za nove uslove na terenu, koji obuhvataju tri površinska kopa (na slici 1 - „Kop 1“, „Kop 2“ i „Kop 3“) i novi režim podzemnih voda, urađena je rekalkibracija hidrodinamičkog modela za vremenski period od 12.02.2016. god. do 10.05.2016. god., a rezultati su prikazani u ovom radu.



Slika 1 - Prikaz istražnog područja i litostratigrafskih jedinica

3. PRIKAZ I PRIMENA METODOLOGIJE

Metoda koja je korišćena za simulaciju režima podzemnih voda i određivanje bilansa na istražnom području je hidrodinamička analiza. Hidrodinamička analiza predstavlja skup različitih metoda hidrodinamičkih proračuna, od kojih je danas najkompleksnija i najprimenljivija metoda trodimenzionalnog hidrodinamičkog modeliranja režima izdani.

Ovaj metodološki postupak se sastoji u numeričkom rešavanju diferencijalnih jednačina koje opisuju kretanje podzemnih voda i procese koji se dešavaju u poroznoj sredini. U ovom radu primenjena je numerička metoda konačnih razlika.

Proces se sastoji u tome da se ceo hidrogeološki sistem podeli na veliki broj malih, trodimenzionalnih „ćelija“ i zatim reši osnovna jednačina strujanja podzemnih voda za svaku ćeliju. Na taj način, hidrodinamički model predstavlja sistem sa „n“ jednačina (ćelija) sa isto toliko nepoznatih. Ove jednačine se rešavaju primenom kompjutera tako što se diferencijalne jednačine zamenjuju konačnim razlikama i rešavaju putem numeričkih metoda koje predstavljaju bazu u softverskim kodovima.

U ovom slučaju, za simulaciju režima podzemnih voda, korišćen je numerički kod Modflow [17] u okviru softvera Groundwater Vistas Advanced verzija 64-Bit 6.93 b.9 [16]. Razvoj jednačine strujanja podzemnih voda u formi konačnih razlika sledi iz primene jednačine kontinuiteta. Pod pretpostavkom da je gustina podzemne vode konstantna, jednačina koja izražava bilans ili proticaj za određenu ćeliju je:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

gde su: Q_i - proticaj kroz ćeliju (m^3s^{-1}); S_s - specifično uskladištenje (m^{-1}); ΔV - zapremina ćelije (m^3); Δh - promena nivoa u vremenskom periodu Δt (m).

Desni član jednačine je jednak količini vode koja uđe u posmatranu ćeliju tokom vremenskog intervala Δt usled jedinične promene hidrauličkog pritiska (nivoa). Posmatrajući sliku 2 [17], gde su u modelu označeni redovi sa „i“, kolone sa „j“ i slojevi sa „k“, jednačina doticaja u ćeliju „i,j,k“, u pravcu reda modela iz ćelije „i,j-1,k“ se može prikazati kao:

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}}$$

odnosno

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})$$

gde su: $h_{i,j,k}$ - nivo u ćeliji „i, j, k“ (m); $h_{i,j-1,k}$ - nivo

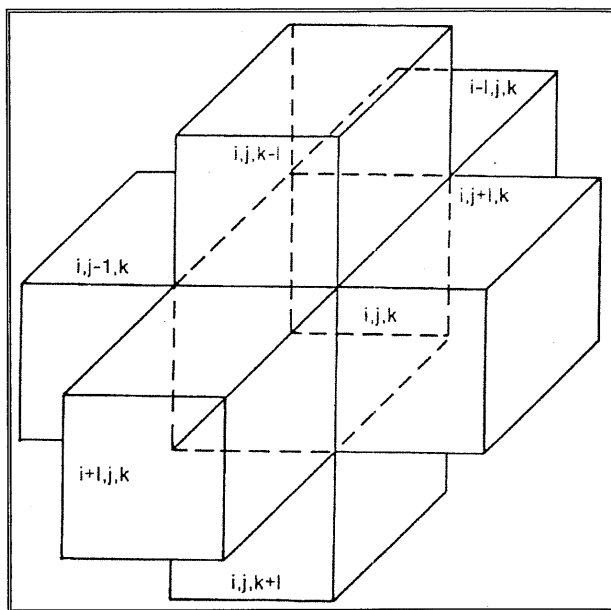
u ćeliji „i, j-1, k“ (m); $q_{i,j-1/2,k}$ - proticaj na kontaktu

između ćelija „i, j, k“ i „i, j-1, k“ (m^3s^{-1}); $KR_{i,j-1/2,k}$ - koeficijent filtracije duž reda između ćelija „i, j, k“ i „i, j-

1, k“ (ms^{-1}); $\Delta C_i \Delta v_k$ - površina poprečnog preseka

ćelija normalnog na pružanje redova (m^2); $\Delta r_{j-1/2}$ - rastojanje između ćelija „i, j, k“ i „i, j-1, k“ (m),

$CR_{i,j-1/2,k}$ - hidraulička provodljivost (”konduktivitet”) u redu „i“ i sloju „k“, između ćelija „i, j, k“ i „i, j-1, k“ (m^2s^{-1}).



Slika 2 - Trodimenzionalna šema „ćelija“ u hidrodinamičkom modelu za postavku diferencijalnih jednačina u kodu Modflow [17]

3.1. Koncept izrade hidrodinamičkih modela

Izrada hidrodinamičkog modela obuhvata nekoliko faza: razmatranje problema koji treba rešiti primenom modela; kreiranje hidrogeološkog modela; kreiranje hidrodinamičkog modela (faza prevođenja hidrogeološkog modela u hidrodinamički model); etaloniranje hidrodinamičkog modela; analiza osetljivosti hidrodinamičkog modela; verifikacija hidrodinamičkog modela; izrada različitih prognoznih hidrodinamičkih proračuna; noveliranje ili rekalkibracija hidrodinamičkog modela i prikaz dobijenih rezultata. Prilikom faze prevođenja hidrogeološkog u hidrodinamički model vrši se još nekoliko koraka: 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 i odabir i diskretizacija proračunskog intervala.

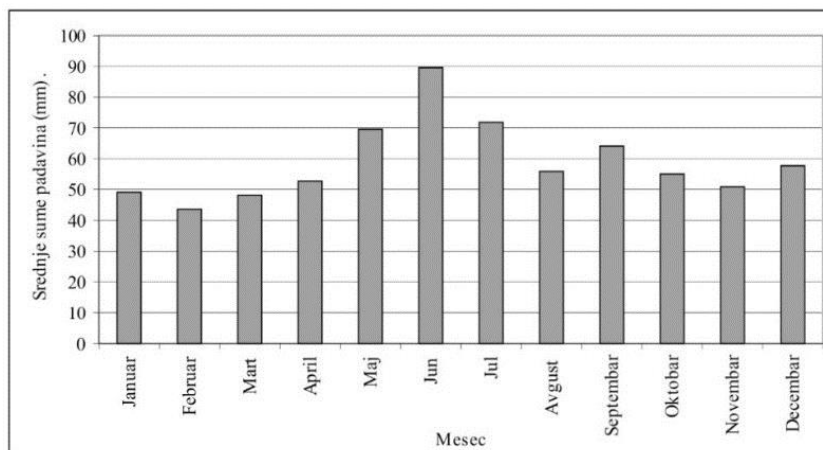
Hidrodinamički model režima izdani istražnog područja na kome se nalaze Površinski kop „Jakovačka Kumša“ i deo vodozahvatnih objekata beogradskog izvorišta podzemnih voda je koncipiran i izrađen kao višeslojeviti model, sa ukupno tri sloja, posmatrano u vertikalnom profilu, površine od 17.5 km². Diskretizacija strujnog polja u planu je izvedena sa osnovnom veličinom ćelija 50 m x 50 m, koja je u užoj zoni površinskog kopa poguščena mrežom kvadrata dimenzija 25 m x 25 m. Teren obuhvaćen modelom je izdvojen mrežom kvadrata i pravougaonika dimenzija 109 redova x 148 kolone 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 (tabela 1). Unos inicijalnih vrednosti hidrogeoloških parametara (koeficijenta filtracije i specifične izdašnosti izdani) izvršen je na osnovu terenskih hidrogeoloških istraživanja za sve litološke članove [18].

Tabela 1. Šematizacija strujne oblasti po dubini - prikaz litoloških članova u modelskim slojevima

Modelska sloj	Litološki članovi	Kote rasprostiranja slojeva (mnm)
prvi izolatorski sloj	kompleks glinovitih i alevritskih peskovitih povlatnih sedimenata	68.22 - 57.30
drugi vodonosni sloj	sivi peskovi	62.70 - 54.74
treći vodonosni sloj	vodonosni peskoviti šljunkovi	58.55 - 37.24

Od graničnih uslova, 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). Dalje u tekstu, prikazani su podaci koji su korišćeni kao „ulazni“ parametri u hidrodinamičkom modelu. Efektivna infiltracija. U ukupnom bilansu

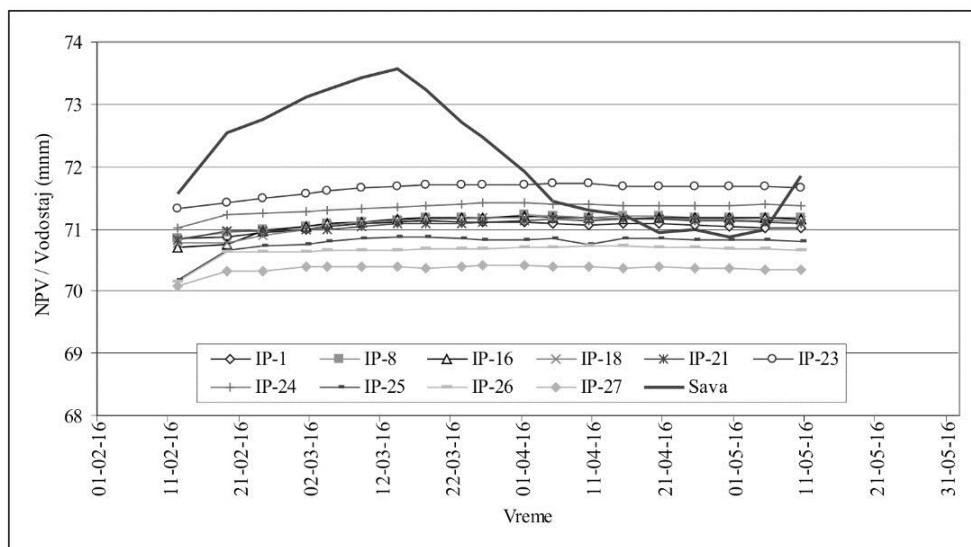
podzemnih voda, „vertikalni bilans“ izučavanog područja ima određen uticaj na kaptirane vodonosne slojeve. U ovom slučaju, ovde se podrazumeva efektivna, rezultatna infiltracija (suma infiltracije od padavina, isparavanja sa nivoa podzemnih voda i evapotranspiracija). Kao inicijalna vrednost efektivne infiltracije uzeta je vrednost od 10% padavina identično kao i tokom kalibracije modela iz 2010. godine [18]. Ovaj granični uslov je zadat samo u prvom sloju modela. Na slici 3 prikazane su sume mesečnih vrednosti padavina za period od 1991. - 2015. god. za meteorološku stanicu Beograd.



Slika 3 - Sume srednjemesečnih vrednosti padavina za period 1991 - 2015. god. (M.S. „Beograd“)

Granica opšteg pijezometarskog nivoa. Doticaj iz zaleđa na širem području Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ je na modelu simuliran preko graničnog uslova opšteg pijezometarskog nivoa. Za određivanje vrednosti pijezometarskog nivoa koji će se zadati ovim graničnim uslovom za vodonosne slojeve (drugi i treći modelski sloj), izvršena je hidrodinamička analiza režima podzemnih voda. Za ovu namenu poslužili su

registrovani nivoi podzemnih voda u deset pijezometara čije se filterske konstrukcije nalaze u drugom i trećem modelskom sloju. Na slici 4 prikazani su uporedni nivogrami podzemnih voda registrovani na pijezometrima i vodostaj Save za period 12.02.2016. – 10.05.2016. god. Vrednosti pijezometarskog nivoa i konduktiviteta za ovaj granični uslov predstavljaju jedan od rezultata rekalkibracije modela.



Slika 4 - Nivogrami u osmatračkim objektima šireg područja Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ i vodostaj reke Save za period 12.02.2016. - 10.05.2016. god.

Granični uslov „reka”. Na istočnom delu istražnog područja nalazi se reka Sava koja u znatnoj meri utiče na režim podzemnih voda. Hidraulička uloga reke Save na modelu je simulirana graničnim uslovom „reka”. Uzimajući u obzir hipsometrijske odnose kota vodostaja reka, kota terena i kota podina slojeva, na modelu je ovaj granični uslov zadat u prvom i drugom modelskom sloju. Vrednosti vodostaja Save koji je zadat na modelu prikazani su na slici 4, a vrednosti konduktiviteta su zadržane u dijapazonu dobijenim etaloniranjem modela iz 2010. godine [18]. Takođe, ovim graničnim uslovom zadate su akumulacije u površinskim kopovima peska, samo u prvom modelskom sloju, imajući u vidu njihove geometrijske karakteristike.

Granični uslov drenaža. Graničnim uslovom drenaža simuliran je hidraulički uticaj kanalske mreže na području obuhvaćenom modelom. Ovaj granični uslov zadat je samo u prvom modelskom sloju, a vrednost konduktiviteta modelskih ćelija u kojima je zadat ovaj granični uslov predstavlja jedan od rezultata rekalkibracije modela.

Eksploatacioni bunari - ćelije sa zadatim proticajem (unutrašnja kontura). U neposrednoj blizini Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“, na obali Save, nalaze se 4 bunara sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta koja su u radu. Treba pomenuti da se

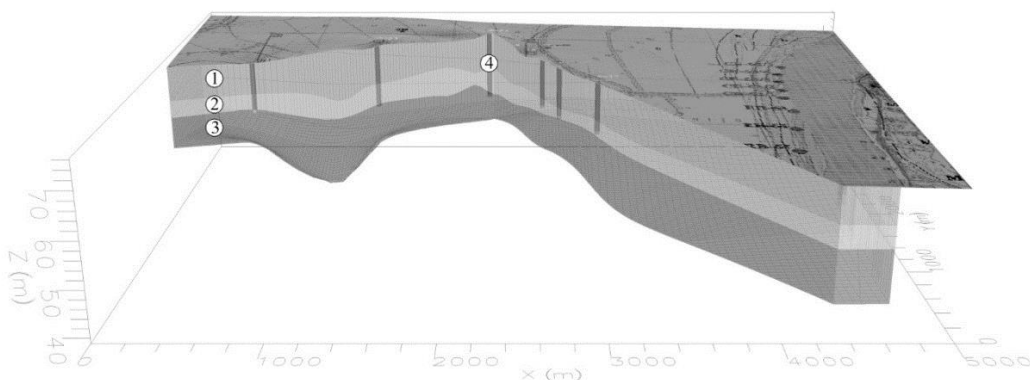
na tom delu istražnog područja nalazi još nekoliko cevastih bunara, ali koji nisu u funkciji. Uticaj četiri aktivna bunara na režim podzemnih voda istražnog područja simuliran je preko graničnog uslova zadatog proticaja, čije su vrednosti izdašnosti bunara pribavljene od J.K.P. „Beogradski vodovod i kanalizacija“ za period 12.02.2016. - 10.05.2016. god. Prosečne vrednosti proticaja ovih vodozahvata prikazane su u tabeli 2. Prema kotama utisnutih horizontalnih drenaža, na modelu je ovaj granični uslov zadat u trećem sloju.

Tabela 2. Prosečne vrednosti proticaja bunara sa horizontalnim drenovima (BHD) dela beogradskog izvorišta

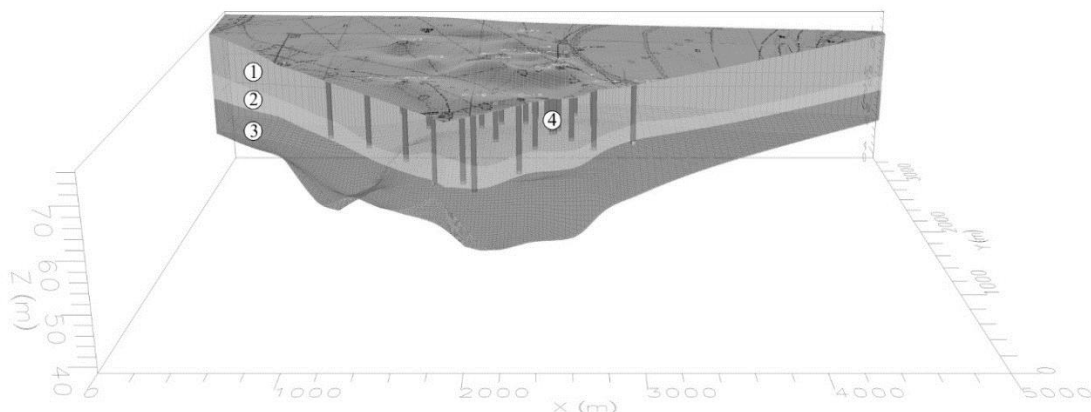
BHD	RB-63*	RB-64	RB-65	RB-66*
Q (l/s)	15,7	15	14,3	17,9

4. REZULTATI I DISKUSIJA

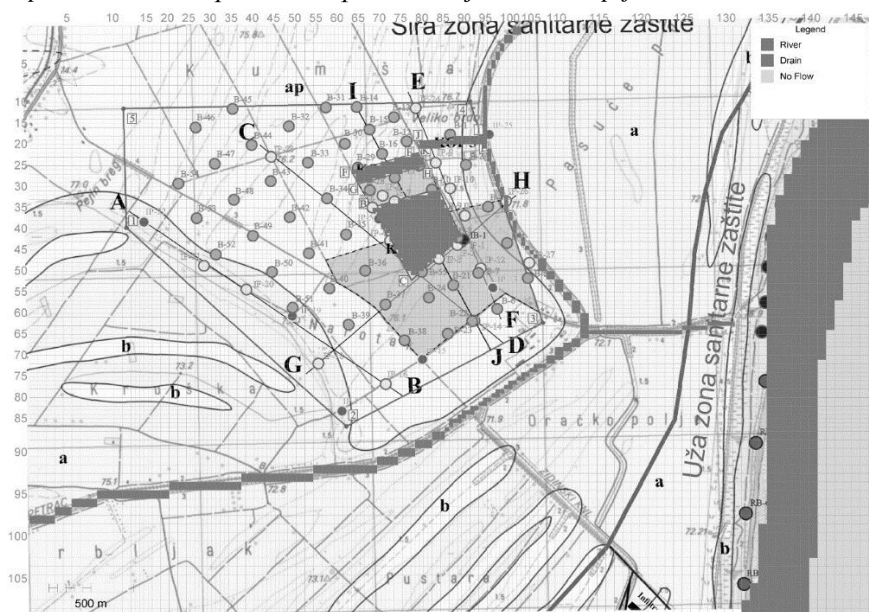
Na osnovu pomenutih faza prilikom kreiranja hidrodinamičkog modela, na slikama 5 i 6 prikazan je trodimenzionalni hidrogeološki model Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ i dela beogradskog izvorišta podzemnih voda iz dva različita preseka. Na slikama 5 i 6 je pored rasprostranjenja litoloških članova, prikazana i izvedena prostorna diskretizacija područja u profilu.



Slika 5 - Trodimenzionalni hidrogeološki profil modela šireg područja „Jakovačka Kumša“ sa prikazom prostorne diskretizacije područja (pogled sa jugozapada) Legenda: 1 - kompleks povlatnih glinovitih i alevritskih peskova, 2 - sivi peskovi, 3 peskoviti šljunkovi, 4 - pijezometar



Slika 6 - Trodimenzionalni hidrogeološki profil modela šireg područja „Jakovačka Kumša“ sa prikazom prostorne diskretizacije područja (pogled sa juga) Legenda: 1 - kompleks povlatnih glinovitih i alevritskih peskova, 2 - sivi peskovi, 3 peskoviti šljunkovi, 4 - pijezometar



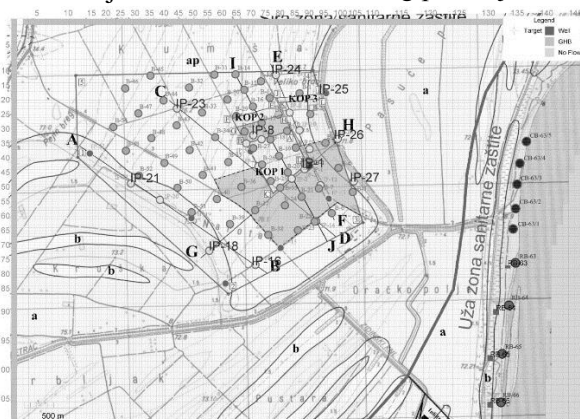
Slika 7 - Prostorna diskretizacija i granični uslovi šireg područja p.k. „Jakovačka Kumša“ (prvi modelsi sloj) Legenda: „river“ - granični uslov reka; „drain“ - granični uslov drenaža; „no flow“ - ćelije bez proticaja

Na slikama 7 i 8 prikazana je diskretizacija istražnog prostora u planu, redom, za prvi i treći modelski sloj. Pored prostorne diskretizacije, prikazano je i rasprostranjenje graničnih uslova na modelu.

Na slici 7, sa istočne strane, prikazana je granični uslov „reka“ („river“) kojim je simuliran režim Save. Takođe, na modelu je simulirana i kanalska mreža, koja se prostire duž istočne i južne strane površinskog kopa, graničnim uslovom drenaža („drain“). Pored ovih graničnih uslova, na slici 8 date su lokacije bunara na području obuhvaćenom modelom koji su simulirani

graničnim uslovom sa zadatim proticajem („well“). Granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa („GHB“) je zadat na severnoj i istočnoj granici modela (slika 8). Čelije bez proticaja se takođe mogu videti na slikama 7 i 8.

Na slikama 7 - 9 se vide i delovi granica rasprostriranja zona sanitarne zaštite, koje nisu predmet ovog rada, pa treba napomenuti da se samo radi o podlogama koje su „uvezene“ u softver za modeliranje režima podzemnih voda čija je jedina uloga da prikažu granice istražnog područja.

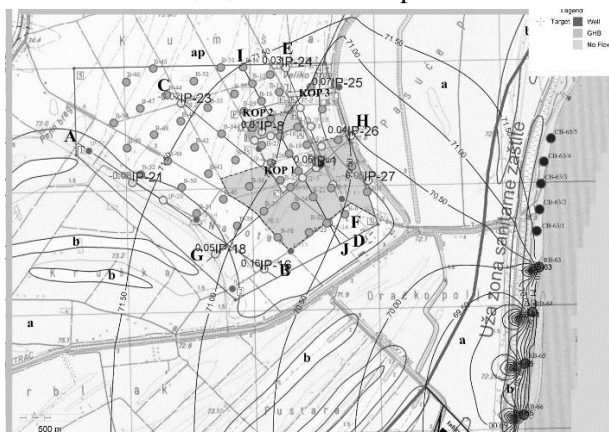


Slika 8 - Prostorna diskretizacija i granični uslovi šireg područja Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ (treći modelski sloj) Legenda: „well“ - granični uslov sa zadatim proticajem (bunari); „GHB“ - granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa; „no flow“ - ćelije bez proticaja

Proces kalibracije, odnosno rekalkibracije, hidrodinamičkog modela predstavlja najdelikatniju fazu u toku izrade jednog modela. Od kvaliteta i pouzdanosti ulaznih podataka, reprezentativnosti zadatih parametara, znanja i iskustva autora modela, kao i njegovog ispravnog shvatanja prirodnih uslova i procesa strujanja podzemnih, kao i karaktera postavljenog zadatka, zavisi i krajnji rezultat: matematički model izučavane porodne sredine koji sa zadovoljavajućom realnošću i pouzdanošću može da posluži za analizu i prognozu planiranih tehničkih rešenja. Rekalkibracija modela je sprovedena u nestacionarnim uslovima strujanja, sa

vremenskim korakom od jednog dana za analizirani vremenski period od 12.02.2016. do 10.05.2016. god., koji je na nižem nivou iteracija podeljen na 10 delova, nejednakog trajanja („faktor 1.2“).

Strujanje podzemnih voda je na modelu računato i simulirano kao realno strujanje, pod pritiskom, ili sa slobodnim nivoom, u svakoj ćeliji diskretizacije pojedinačno, pri čemu su uslovi strujanja tokom vremena na modelu menjani u skladu sa realnim uslovima. Rekalkibracija modela je završena kada je dobijena zadovoljavajuća saglasnost između registrovanih nivoa podzemnih voda i nivoa dobijenih proračunom.

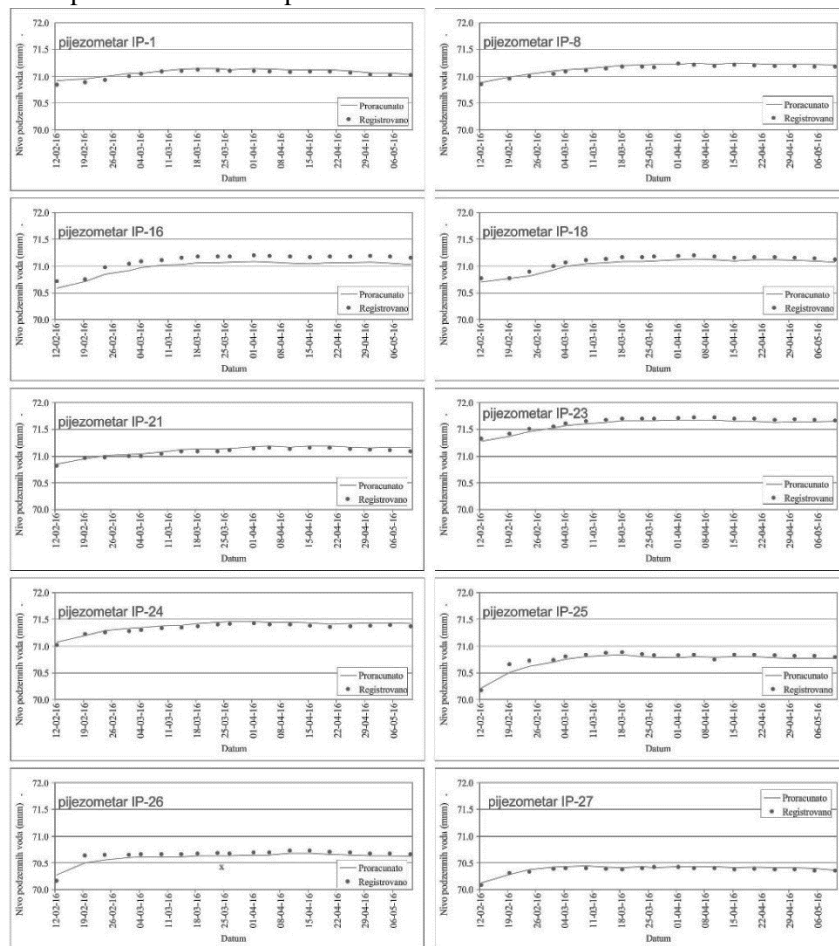


Slika 9 - Karta rasporeda pijezometarskog nivoa u trećem modelskom sloju u široj okolini Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ na kraju perioda za koji je model rekalkibrisan

Na slici 9 prikazan je raspored pijezometarskih nivoa u kaptiranim vodonosnim slojevima na kraju vremenskog perioda za koji je model rekalibriran (10.05.2016. god.).

Ekvidistanca između hidroizohipsi iznosi 0,5 m, a na slici su prikazane i vrednosti reziduala (razlika između merenih i proračunatih vrednosti) nivoa u pijezometrima. Na slici 10 prikazani su nivoi podzemnih

voda registrovani na osmatračkim objektima i dobijeni proračunom u procesu rekalibracije modela za analizirani vremenski period: 12.02.2016. - 10.05.2016. god. Sa slike se može uočiti da je generalno postignuta dobra usaglašenosti proračunatih sa registrovanim nivoima podzemnih voda na pijezometrima tokom celokupnog simuliranog vremenskog perioda.



Slika 10 - Prikaz nivoa podzemnih voda registrovanih u pijezometrima i dobijenih procesom rekalibracije modela

Na kraju, analiza bilansa podzemnih voda na području obuhvaćenom modelom je određena za datum 10.05.2016. god. i prikazana je u tabeli 3.

Tabela 3. Bilans podzemnih voda na širem području Površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ (10.05.2016. god.)

Granični uslov	Doticaj (l/s)	Oticaj (l/s)
Efektivna infiltracija	8,7	
Reka Sava	45,1	
GHB	9,2	
BHD		62,9
Ukupno	63,0	62,9

Doticaj u analizirani hidrogeološki sistem se vrši preko efektivne infiltracije (8,7 l/s), prihranjivanjem iz pravca reke Save u količini od 45,1 l/s i sa istočne i severne granice modela (granični uslov opšteg pijezometarskog nivoa) u količini od 9,2 l/s. Dreniranje ili oticaj iz analiziranog hidrogeološkog sistema se vrši preko bunara sa horizontalnim drenovima u količini od 62,9 l/s.

5. ZAKLJUČAK

Prema hidrogeološkoj funkciji stenskih masa izdvojena su ukupno tri sloja na istražnom području, od kojih su drugi i treći sloj vodonosni, dok prvi sloj ima funkciju hidrogeološkog izolatora. Izražena litološka slojevitost u vertikalnom profilu i nejednako horizontalno prostiranje litoloških članova imaju za

posledicu izraženo prostorno (3D) strujanje podzemnih voda i izradu višeslojevitog hidrodinamičkog modela. Izradom i rekalkibracijom hidrodinamičkog modela područja na kome se nalaze površinski kop „Jakovačka Kumša“ i deo vodozahvatnih objekata beogradskog izvorišta podzemnih voda sagledan je režim i bilans podzemnih voda. Za verifikaciju dobijenih rezultata u procesu rekalkibracije korišćeni su prikupljeni podaci o nivoima podzemnih voda u pijezoimetrima. Rezultati matematičke simulacije režima podzemnih voda u odnosu na registrovane nivoe podzemnih voda se relativno dobro slažu i usaglašeni su. Kao rezultat rekalkibracije modela modela, kvantifikovan je uticaj reke Save na režim podzemnih voda i određeni su ostali elementi bilansa podzemnih voda koji se odnose na prihranjivanje (ukupno 63 l/s) i dreniranje (62,9 l/s) podzemnih voda u okviru istražnog područja. Ovako rekalkibrirani hidrodinamički model predstavlja polaznu osnovu za izvođenje određenih prognoznih hidrodinamičkih proračuna. S druge strane, eventualnu opasnost od zagađenja izvorišta podzemnih voda predstavlja mogućnost nekontrolisanog izlivanja dizel goriva iz građevinskih i rudarskih mašina i vozila ili zagađivači koji se nalaze na nelegalnom odlagalištu otpada koje se nalazi u okviru površinskog kopa. Iz tog razloga rezultati hidrodinamičkog modela, kojim se vrši simulacija režima podzemnih voda, predstavljaju i osnovu za model praćenja „idealne“ čestice. Na taj način, može se odrediti uticaj eksploatacije peskova sa površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ na kvalitet podzemnih voda koje se zahvataju bunarima na beogradskom izvorištu. S druge strane, analiza putanje i vremena putovanja potencijalnog zagađivača od površinskog kopa „Jakovačka Kumša“ predstavlja veoma bitan segment kod upravljanja i zaštite podzemnih voda koje se zahvataju bunarima na tom delu beogradskog izvorišta.

6. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju anonimnim recenzentima na korisnim sugestijama, kao i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansiranje projekata OI-176022, TR-33039 i III-43004.

LITERATURA

- [1] Polomčić D. *Hidrodinamička istraživanja, otvaranje i upravljanje izvorištima izdanskih voda u intergranularnoj poroznoj sredini*, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 2001.
- [2] Ministarstvo zdravlja R. Srbije. *Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja*, Službeni glasnik RS, br. 92/2008, 2008.
- [3] Polomčić D., Krunić O. & Ristić-Vakanjac V. *Hydrogeological and hydrodynamic characteristics of groundwater sources for the public water supply of Bečej (northern Serbia)*, Geološki anali balkanskoga poluostva, 72: 143-157, 2011.
- [4] Polomčić D., Bajić D. & Krunić O. *Hidrodinamička analiza interakcije dva izvorišta u radu na primeru vodosnabdevanja Bečeja*. Tehnika, 69(4): 597-603, 2014.
- [5] Đurić D., Lukić V. & Soro A. *Hidrodinamička analiza proširivanja izvorišta „Petrovaradinska Ada“ u Novom Sadu*. Vodoprivreda, 258-260: 265-272, 2012.
- [6] Polomčić D., Bajić D., Ristić-Vakanjac V., Čokorilo M., Drašković D. & Špadijer S. *Hidrodinamičke karakteristike izvorišta „Peštan“ za vodosnabdevanje Lazarevca*. Vodoprivreda, 261-263: 55-68, 2013.
- [7] Polomčić D., Hajdin B., Stevanović Z., Bajić D. & Hajdin K. *Groundwater management by riverbank filtration and an infiltration channel: The case of Obrenovac, Serbia*. Hydrogeology Journal, 21(7): 1519-1530, 2013.
- [8] Božović Đ., Polomčić D. & Bajić D. *Hidrodinamička simulacija i analiza režima podzemnih voda pod uticajem bunara sa horizontalnim drenovima (primer beogradskog izvorišta)*. Tehnika, 66(5): 777-786, 2015.
- [9] Božović Đ., Polomčić D. & Bajić D. *Hidrodinamička analiza opravdanosti utiskivanja novih drenova na većoj dubini na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda*. Vodoprivreda, 48(282-284): 221-233, 2016.
- [10] 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: 15(2): 405-415, 2013.
- [11] Pušić, M., Dimkić M., Vidović, D., Dotlić, M. & Oparušić I. *Hydrodynamic analysis of radial well capacity, example of the Belgrade groundwater source*. 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, 2012.
- [12] Polomčić D., Bajić D., Močević J., Špadijer S. & Drašković D. *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.), XV Serbian Symposium on Hydrogeology, Kopaonik, Serbia, 14-17 September, 2016; University of

- Belgrade - Faculty of mining and geology: Belgrade; pp. 141-146, 2016.
- [13]Bajić D., Polomčić D., Ratković J. & Matić I. *Hidrodinamička analiza mogućnosti povećanja eksploataisanog kapaciteta na primeru izvorišta podzemnih voda „Nelt“ u Dobanovcima*. Tehnika, 68 (4): 512-525, 2017.
- [14]Pajić P., Polomčić D., Čalenić A & Bajić D. 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.), *XVII Serbian Geological Congress*, Vrnjačka banja, Serbia, 17-20 May 2018, pp. 484-489. Belgrade: Serbian Geological Society, 2018.
- [15]Polomčić D., Bajić D., Zarić J.. *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, 2015.
- [16]Rumbaugh J.O. & Rumbaugh D.B. *Guide to using Groundwater Vistas: version 6*. New York: Environmental Simulations, 2011.
- [17]Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. and McDonald, M. G. *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, 2000.
- [18]Matić I., Polomčić D., Vujasinović S., Sorajić S., Marić N. & Zarić J. The impact of sand open pit "Jakovačka Kumša" on groundwater in a part of Belgrade source. *IWA Specialist Groundwater Conference*, Belgrade, Serbia, 08-10 May, 2011; Institute for the Development of Water Resources "Jaroslav Černi", pp. 397-403, 2011.

SUMMARY

SIMULATION OF GROUNDWATER REGIME AND QUANTIFICATION OF GROUNDWATER BALANCE BY MEANS OF HYDRODYNAMIC ANALYSIS: CASE OF OPEN-CAST MINE "JAKOVAČKA KUMŠA"

Hydrodynamic analysis was used as the methodological approach to simulate the groundwater regime and quantify the groundwater balance in the extended area of the open-cast mine "Jakovačka Kumša". The study area includes a part of Belgrade Groundwater Source, located along the Sava River, in the immediate vicinity of the mine. Sand is excavated there and used as construction material. The paper analyzes and synthesizes data on local geology and hydrogeology, and portrays a three-dimensional hydrogeological model of the study area. The hydrogeological model is transformed into a hydrodynamic model applying the numerical method of finite differences and the Modflow software code. The modeled area and time interval are then discretized by importing the hydrogeological parameters of the porous medium and specifying the initial and boundary conditions of the model. The paper also includes the results of hydrodynamic modeling of the aquifer regime in the form of piezometric-head distribution charts, as well as the groundwater balance. The 3D hydrodynamic model set up in this manner constitutes a basis for hydrodynamic prognostic calculations and assessment of sand mining impact on groundwater quality in that part of Belgrade Groundwater Source.

Key words: hydrogeological model, hydrodynamic model, groundwater source, numerical method of finite differences, Modflow