

# Metodologija izrade 3D konceptualnog hidrogeološkog modela za potrebe hidrodinamičkog modeliranja bunara sa horizontalnim drenovima

Đorđije Božović, Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Metodologija izrade 3D konceptualnog hidrogeološkog modela za potrebe hidrodinamičkog modeliranja bunara sa horizontalnim drenovima | Đorđije Božović, Dušan Polomčić, Dragoljub Bajić | Proceedings of the XVI Serbian Symposium on Hydrogeology, Zlatibor, Serbia, 28. September - 02. October, 2022 | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007180>

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](http://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](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA HIDROGEOLOGIJU

HG

XVI SRPSKI SIMPOZIJUM  
O HIDROGEOLOGIJI  
sa međunarodnim učešćem  
**ZBORNİK RADOVA**



**ZLATIBOR**  
**28. septembar - 02. oktobar**  
**2022. godine**



**XVI SRPSKI SIMPOZIJUM O HIDROGEOLOGIJI**  
sa međunarodnim učešćem  
**ZBORNİK RADOVA**

**IZDAVAČ:**

Univerzitet u Beogradu  
Rudarsko-geološki fakultet  
Đušina 7

**ZA IZDAVAČA:**

Prof. dr Biljana Abolmasov, dekan  
Rudarsko-geološki fakultet

**UREDNIK:**

Doc. dr Ana Vranješ

**TIRAŽ:**

100 primeraka

**ŠTAMPA:**

Štamparija Grafolik, Beograd

**GODINA IZDANJA: 2022.**

Na 12/19-oj, sednici Departmana za hidrogeologiju doneta je odluka o organizaciji XVI srpskog simpozijuma o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, koja je utvrđena saglasnošću Nastavno-naučnog veća Rudarsko-geološkog fakulteta od 30.12.2019.

Naslovna strana: Sušičko vrelo, Zlatibor

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

556(082)  
628.1(082)

СРПСКИ симпозијум о хидрогеологији са међународним учешћем (16 ; 2022 ; Златибор)  
Zbornik radova / XVI Srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim  
učešćem, Zlatibor 28. septembar - 02. oktobar 2022. godine ; [urednik Ana  
Vranješ]. - Beograd : Univerzitet, Rudarsko-geološki fakultet, 2022  
(Beograd : Grafolik). - [18], 514 str. : ilustr. ; 30 cm

Na vrhu nasl. str.: Departman za hidrogeologiju. - Radovi ćir.i lat. -  
Tiraž 100. - Str. [5-6]: Uvodna reć / Dejan Milenić. - Abstracts. -  
Bibliografija uz svaki rad.

ISBN 978-86-7352-380-4

a) Хидрогеологија - Зборници b) Снабдевање водом - Зборници

COBISS.SR-ID 74364937

## **ORGANIZACIONI ODBOR:**

### **Predsednik:**

*Doc. dr Ana Vranješ, dipl. inž.*

### **Članovi:**

*Prof. dr Petar Dokmanović, dipl. inž.*

*Doc. dr Ljiljana Vasić, dipl. inž.*

*Dr Tanja Petrović Pantić, dipl. inž.*

*Natalija Radosavljević, mast. inž.*

*Velizar Nikolić, dipl. inž.*

*Vukašin Vučević dipl.inž.*

*Andrej Pavlović, dipl. inž.*

*Dejan Drašković, dipl. inž.*

*Branko Ivanković, dipl. inž.*

*Nenad Toholj, dipl. inž.*

*Boban Jolović, dipl. inž.*

*Uroš Jurošević, dipl. inž.*

## **NAUČNI ODBOR:**

### **Predsednik:**

*Prof. dr Dejan Milenić, dipl. inž.*

### **Članovi:**

*Prof. dr Zoran Stevanović, dipl. inž.*

*Prof. dr Dušan Polomčić, dipl. inž.*

*Prof. dr Vesna Ristić Vakanjac, dipl. inž.*

*Prof. dr Igor Jemcov, dipl. inž.*

*Prof. dr Vladimir Živanović, dipl.inž.*

*Prof. dr Dragoljub Bajić, dipl. inž.*

*Doc. dr Jana Štrbački, dipl.inž*

*Doc. dr Saša Milanović, dipl. inž.*

*Prof. dr Veselin Dragišić, dipl. inž.*

*Prof. dr Milan Radulović, dipl. inž.*

*Prof. dr Zoran Nikić, dipl. inž*

*Doc. dr Nenad Marić, dipl. inž.*

*Prof. dr Petar Milanović, dipl. inž.*

## **PROGRAMSKO-UREĐIVAČKI ODBOR:**

### **Predsednik:**

*Prof. dr Dušan Polomčić, dipl. inž.*

### **Članovi:**

*Prof. dr Dejan Milenić, dipl. inž.*

*Prof. dr Nevenka Đerić, dipl. inž.*

*Doc. dr Ana Vranješ, dipl. inž.*



**ORGANIZATOR SIMPOZIJUMA:**

*UNIVERZITET U BEOGRADU*

*RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET*

*DEPARTMAN ZA HIDROGEOLOGIJU*

*u saradnji sa*

*DRUŠTVOM GEOLOŠKIH INŽENJERA I TEHNIČARA SRBIJE*

*SRPSKIM GEOLOŠKIM DRUŠTVOM*

*NACIONALNIM KOMITETOM IAH*

***POKROVITELJ:***

**REHAU d.o.o.**

***SPONZORI:***

Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

BeoGeoAqua d.o.o.

Opština Čajetina

Turistička organizacija Opštine Brus

Hotel Zlatibor Mountain Resort&Spa

Knjaz Miloš

***DONATOR:***

Gold Gondola

Ibis-Inženjering

## METODOLOGIJA IZRADE 3D KONCEPTUALNOG HIDROGEOLOŠKOG MODELA ZA POTREBE HIDRODINAMIČKOG MODELIRANJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA 3D CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL DEVELOPMENT METHODOLOGY FOR HYDRODYNAMIC MODELING OF RADIAL COLLECTOR WELLS

Đordije Božović<sup>1</sup>, Dušan Polomčić<sup>2</sup>, Dragoljub Bajić<sup>3</sup>

1 Beogradski vodovod i kanalizacija, Vodovodska 158, 11000 Beograd. E-mail: djordjije.bozovic@bvk.rs

Elektroprivreda Crne Gore, Vuka Karadžića 2, 81400 Nikšić. E-mail: djordjije.bozovic@epcg.com

2 Rudarsko–geološki fakultet, Đušina 7, 11000 Beograd. E-mail: dusan.polomcic@rgf.bg.ac.rs

3 Rudarsko–geološki fakultet, Đušina 7, 11000 Beograd. E-mail: dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs

**APSTRAKT:** Trodimenzionalni konceptualni hidrogeološki model je osnov za numeričku simulaciju i analizu uticaja eksploatacije podzemnih voda na režim kaptirane izdani. Metodologija izrade modela je predstavljena na primeru izvorišta podzemnih voda Beograda, formiranog u zbijenoj izdani aluvijalne geneze, na kojem se eksploatacija podzemnih voda vrši preko bunara sa horizontalnim drenovima. Model obuhvata deo prostora Makiša i Donjeg polja, u okviru kog postoji 6 bunara, od kojih je bunar RB-5m predstavljen detaljno u konstruktivnom i hidrauličkom smislu. Postupak formiranja konceptualnog modela je započet definisanjem oblasti istraživanja u planu i profilu, pri čemu je naročit značaj imala evaluacija svih potencijalnih prirodnih i antropogenih uticaja na režim izdani, koji se na hidrodinamičkom modelu tretiraju kao relevantni granični uslovi. U nastavku je vršena detaljna šematizacija vodonosne sredine, prema litostratigrafskoj i hidrogeološkoj pripadnosti deponovanih sedimenata. Na 3D hidrogeološkom modelu su zadate geometrijske karakteristike kontakta reke Save, kao glavnog izvora prihranjivanja, i izdani, uz izdvajanje zona u kojima je reka usekla korito u sedimentima povlate i u vodonosnim sedimentima različitim dubinama. Metodologija za određivanje položaja konture u okviru koje se zadaje granični uslov doticaja iz zaleđa i vremenski promenljivih vrednosti pijezometarskih nivoa je bio zasnovan na izradi pijezometarskih profila i analizi gradjenata nivoa izdani registrovanih u osmatračkim objektima. Drenovi su koncipirani kao hidraulički realan uslov, sa zadavanjem tehničkih karakteristika drenova i ravnomernim pijezometarskim nivoom unutar drenova, koji je usvojen kao ekvivalentan nivou u bunarskom šahtu.

**Ključne reči:** šematizacija vodonosne sredine, geometrija korita reke, granični uslovi, hidrodinamički model, izvorište Beograda.

**ABSTRACT:** A three-dimensional conceptual hydrogeological model is the basis for numerical simulation and assessment of the impact of groundwater abstraction on the tapped aquifer. The conceptual model development methodology is presented through a case study of Belgrade well field, which captures groundwater from an alluvial aquifer by radial collector wells. The model covers part of Makiš and Donje Polje (study area) with six wells present, of which RB-5m is further analysed in detail. The conceptual model development procedure begins with the definition of the study area in plan view and elevation. It is important to evaluate all potential natural and anthropogenic influences on the aquifer regime, which will be treated as relevant boundary conditions on the model. Then the water-bearing medium is schematized in detail, based on the lithostratigraphy and hydrogeology of the deposited sediments. Geometric characteristics of the Sava River, as the main recharge source, and the aquifer contact are specified, identifying the parts in which the river has incised its channel in the overlain sediments and the water-bearing strata (with different depth zones). The methodology for positioning the contour on which the boundary condition for groundwater inflow from the hinterland is specified, along with the time-variable piezometric head, is based on constructing of piezometric profiles and correlating groundwater levels at available observation wells as well as groundwater gradient analysis. The laterals are conceived as a hydraulically real condition and technical characteristics of the laterals and uniform head within the laterals, equivalent to the caisson head, are specified.

**Key words:** aquifer schematization, riverbed geometry, boundary conditions, hydrodynamic model, Belgrade well field.

## UVOD

Konceptualni hidrogeološki modeli predstavljaju pojednostavljene prikaze hidrogeološkog sistema ili dela hidrogeološkog sistema, zasnovane na postojećim informacijama o geološkoj građi i sklopu terena, hidrogeološkim odlikama i funkcijama stenskih masa, dinamici kretanja, uslovima i oblastima prihranjivanja i dreniranja podzemnih voda. Izrada konceptualnog hidrogeološkog modela predstavlja prvu, a često i najznačajniju, fazu u izradi hidrodinamičkog modela režima izdani, transporta materije i energije u hidrogeološkoj sredini. Formiranje konceptualnog modela podrazumeva proces prikupljanja, sistematizacije, digitalizacije (prevođenja u oblik u kojem ih je kroz odabrani softverski alat moguće inkorporirati u konceptualni model), detaljne analize i vizuelizacije brojnih informacija i saznanja vezanih za geološke, hidrogeološke, hidrološke, klimatske i druge uslove datog terena, kao i pojave i objekte koji utiču na režim izdani u razmatranim granicama. Reprezentativnost konceptualnog modela zavisi od reprezentativnosti, obima i prostorne zastupljenosti hidrogeoloških i drugih informacija o analiziranom terenu, kao i pojavama i procesima koji se u njemu odvijaju.

Ulazne podatke za izradu 3D konceptualnog modela najčešće čine informacije vezane za tačku, konturu ili površinu neke realne, fizičke karakteristike terena, podaci o tehničkim karakteristikama i radu vodozahvatnih i drugih objekata, podaci o površinskim vodnim telima i dr. (npr. koordinate, kote ili izohipse terena, litološki i granulometrijski sastav upoznat izradom istražne bušotine, kapacitet bunara, izdašnost izvora ili vreli, pijezometrijski nivo izdani, podaci opita trasiranja podzemnih voda, geometrija korita reke, njeni vodostaji i dr.). Iz tog razloga, izrada 3D hidrogeološkog modela podrazumeva geostatističku analizu različitih vrsta podataka čijom se prostornom interpolacijom dolazi do definisanja uslova za ceo razmatrani istražni prostor. U skladu sa tim, može se reći da konceptualni model predstavlja manje ili više uspešnu aproksimaciju uslova i procesa prisutnih u okviru analiziranog dela terena, zbog čega je potrebno vršiti kontinuirano i iterativno unapređivanje njegove reprezentativnosti u odnosu na posmatrane realne uslove, kao i u cilju redukcije uticaja usvojenih polaznih pretpostavki i subjektivnosti autora modela.

Istraživačima su dostupni brojni literaturni izvori na temu izrade konceptualnih hidrogeoloških modela. Među njima, istaknuto mesto pripada studiji autora Kresic & Mikszewski (2012), u kojoj je na primerima najrazličitijih vrsta hidrogeoloških uslova predstavljena metodologija izrade i vizuelizacije konceptualnih modela. Teorijski osnov izrade konceptualnih modela je predstavljen u radu Betancur et al., (2012). Na primeru zagađenja i remedijacije izdani, Nikolaidis & Shen (2000) predstavljaju izradu konceptualnog hidrogeološkog i geohemijskog modela, koji je služio kao podloga za izradu hidrodinamičkog modela transporta zagađujuće materije. Nastev et al., (2008) su analizirali uslove kretanja podzemnih voda u dvema izdanima pukotinskog tipa poroznosti, sa različitim prostornim orijentacijama i stepenom hidrauličke povezanosti sistema pukotina u njima. Analizu geološke građi, hidrogeoloških odlika, hidroloških i klimatskih uslova, kao i topografije terena uz upotrebu GIS tehnike u cilju demarkacije zona različitog stepena prihranjivanja izdani su predstavili Singhal & Goyal (2011). Guastaldi et al., (2014) su sproveli kompleksnu geostatističku analizu litološkog i granulometrijskog sastava stena koje izgrađuju zbijenu izdan, kvartarne starosti i aluvijalne geneze, zajedno sa njihovim filtracionim karakteristikama, kako bi utvrdili stepen zavisnosti rezultata kalibracije hidrodinamičkog modela od stohastičkog karaktera ulaznih veličina.

U nacionalnim okvirima i u protekloj deceniji, konceptualni hidrogeološki modeli su dominantno bili predmet hidrodinamičkog aspekta hidrogeoloških istraživanja za potrebe eksploatacije podzemnih voda, ali u različite svrhe – vodosnabdevanja pijaćim vodama i zaštite od negativnog uticaja podzemnih voda.

Bajić & Polomčić (2012) su izradili 3D konceptualni hidrogeološki model površinskog kopa „Polje E“ u okviru kolubarskog ugljonošnog basena, kao podlogu za izradu hidrodinamičkog modela u cilju projektovanja sistema zaštite kopa od podzemnih voda. U odnosu na hidrogeološke odlike stena izdvojeno je sedam slojeva modela, za koje su definisane vrednosti hidrogeoloških parametara. Različite vrste graničnih uslova su primenjene u okviru konceptualnog modela, kako na njegovim spoljašnjim konturama, tako i unutar prostora kopa.

Formiranjem 3D hidrogeološkog modela, Radanović i dr., (2016) su izvršili hidrogeološku šematizaciju aluvijalne izdani u delu priobalja Dunava, koje je pod uticajem uspora nastalog na račun rada HE „Đerdap I“ i sistema drenažnih objekata za regulaciju režima nivoa izdani.

U ovom radu će izrada 3D konceptualnog modela biti prikazana na primeru izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda, na delu prostora Makiša i Donjeg polja, tj. dela desne i leve obale reke Save. U okviru razmatranog terena je prisutno šest bunara sa horizontalnim drenovima, od kojih je jedan bunar (RB–5m) bio predmet detaljnih istraživanja na hidrodinamičkom modelu (Božović et al., 2020).

U prethodnom višegodišnjem periodu predstavljeno je više radova iz oblasti bunara sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta podzemnih voda, u okviru kojih je dat prikaz šematizacije vodonosne sredine. Tako su Zorić i dr., (2012) predstavili metodologiju izrade hidrogeološkog modela aluvijalnih sedimenata Save, koja predstavlja polaznu osnovu i svojevrsni „ključ“ za litostratigrafsku i hidrogeološku interpretaciju i šematizaciju predmetne vodonosne sredine u profilu.

Na osnovama navedene metodologije, Božović i dr., (2015; 2016) su reprezentativni hidrogeološki stub i profil unapredili u trodimenzionalni model, u okviru kojeg su uključili realnu geometriju usecanja korita reke Save u aluvijalne sedimente izdani. Iz ovog razloga će hidrogeološka šematizacija izdani beogradskog izvorišta u profilu i planu u ovom radu biti prikazana u manjem, neophodnom obimu, dok će fokus rada biti na daljem unapređenju postojećeg 3D hidrogeološkog modela u konceptualni 3D model. Prikaz metodologije izrade konceptualnog modela će obuhvatiti postupak zadavanja realne geometrije korita reke Save na 3D hidrogeološkom modelu (što čini polaznu osnovu za analizu uslova prihranjivanja kaptirane izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda na hidrodinamičkim modelima), diskretizaciju vremena obuhvaćenog hidrodinamičkom analizom, kao i granične i početne uslove.

## GEOLOŠKA I HIDROGEOLOŠKA GRAĐA I ODLIKE TERENA

Prema superpoziciji stvaranja, genetskim karakteristikama, litološkom sastavu i hidrogeološkim odlikama, na prostoru beogradskog izvorišta podzemnih voda mogu se izdvojiti dva tipa kvartarnih naslaga:

- jezersko–barsko–terestični sedimenti plio–pleistocenske starosti,
- aluvijalni sedimenti pleistocenske i holocenske starosti.

Jezersko–barsko–terestični sedimenti plio–pleistocenske starosti predstavljaju povlatu panonu i podinu pleistocenskim aluvijalnim tvorevinama na najvećem delu prostora izvorišta. Od pleistocenskih rečnih naslaga se jasno razlikuju prema litološkom sastavu. Predstavljani su laporovitim glinama, alevritima, zaglinjenim peskovima, mestimično sa sočivima jako obogaćenim oolitima mangana, gvožđa i konkrecijama karbonata, zbog čega se njihov kontakt sa deponatima rečne faze može smatrati donjom granicom kvartara, odnosno pleistocena, a ujedno i podinom kaptirane izdani. Iako mogu imati sličan sastav sa naslagama panona u neposrednoj podini, odlika po kojoj se od njih razlikuju je karakteristična paleontološka sterilnost (Nenadić et al., 2010). Na osnovu svega nekoliko dubljih istražnih bušotina, debljina im je određena orijentaciono na nekoliko desetina metara (Nenadić et al., 2009). Filtracione karakteristike ovih tvorevina su procenjene na vrednosti  $K \approx 1 \times 10^{-8}$  m/s, zbog čega se mogu smatrati vodonepropusnom podinom kaptiranoj zbijenoj izdani.

U okviru rečnih naslaga, u kojima je formirana izdani iz koje se zahvataju podzemne vode za potrebe vodosnabdevanja Beograda, mogu se izdvojiti dve različite stratigrafske jedinice:

- policiklični rečni sedimenti starijeg i srednjeg pleistocena,
- holocenski sedimenti.

Budući da su slične u pogledu litološkog sastava klastita, nije jednostavno povući granicu razdvajanja između sedimenata koji pripadaju starijem delu profila rečnih naslaga u odnosu na holocenske sedimente. Međutim, postoji paleontološki kriterijum za njihovu jasnu identifikaciju: prisustvo školjki roda *Corbicula*, koje su vezane samo za sedimente formirane tokom starijeg i srednjeg pleistocena (Gaudenyi et al., 2013; Gaudenyi et al., 2015; Knežević et al., 2018).

Na delu izvorišta podzemnih voda Beograda nizvodno od Ostružničkog mosta, moguće je identifikovati tri ciklusa sedimentacije pleistocenskih naslaga. Zajedničko za ove cikluse je da se po pravilu u bazi nalaze sedimenti korita, šljunkovito–peskovito–alevritskog sastava, koji sa smanjenjem dubine prelaze u granulometrijski heterogene peskove sa alevritima i manjim sadržajem sitnijeg šljunka (Božović i dr., 2016). Debljina pleistocenskih naslaga je u proseku oko 15 m na prostoru nizvodno od Ostružničkog mosta.

Kao završni članovi svakog od ciklusa sedimentacije mogu biti prisutni sedimenti povodnja (mestimično i starača). Obično se javljaju u vidu sočiva i proslojaka, ograničenog horizontalnog rasprostranjenja. U pogledu litološkog sastava, sedimenti povodnja i starača su predstavljani glinama, alevritskim glinama, peskovitim alevritima i muljevima. Njihova debljina je vrlo promenljiva, od centimetarskih pa do metarskih dimenzija. Lokalno, umesto fino-zrnih klastita, mogu biti prisutni glinci, laporci, peščari ili konglomerati, pretežno centimetarske debljine. Sedimentacioni ciklusi često nisu potpuni. Razlog za takvo stanje je intenzivna erozija podloge koja je vršena tokom naredne faze rečnog korita. U hidrogeološkom smislu, fino-zrni klastiti su slabijepropusni i kao takvi imaju izraženo nepovoljnu hidrauličku funkciju i uticaj na rad bunara sa horizontalnim drenovima.

Holocenski sedimenti Save su mlađi stratigrafski član u paketu aluvijalnih sedimenata. Deponovani su diskordantno preko sedimenata donjeg i srednjeg pleistocena, budući da su naslage gornjeg pleistocena intenzivno erodovane u fazi stvaranja korita reke na početku holocena. Sedimenti facije korita holocenske reke se međusobno razlikuju u pogledu litološkog sastava. Stariji deo profila predstavlja bazalni deo savremenog korita reke Save. U pitanju su sedimenti facije korita izgrađeni od peskova sitnozrne do krupnozrne granulacije, uz značajnije učešće šljunkovitih peskova. Mlađi deo profila facije holocenskog korita Save je izgrađen od relativno uniformnih sitnozrnih do srednjozrnih peskova, ređe sa učešćem sitnog šljunka. Neretko su u pitanju peskovi sa značajnijim učešćem alevritske komponente. U slučaju i starijeg i mlađeg dela profila holocenskih naslaga, jasno je da reč o vodonosnim i vodopropusnim tvorevinama. Prosečna debljina holocenskih tvorevina je 10–15 m.

Sedimenti povodnja prekrivaju praktično celu površinu terena savremene aluvijalne ravni Save. Čine ih alevriti, alevritski peskovi, alevritske i sitnopeskovite gline. Njihova debljina varira u okvirima prostora izvorišta, a generalno je oko 5 m. U pogledu hidrogeoloških svojstava, one imaju funkciju slabopropusne povlate izdani, sa vrednostima koeficijenta filtracije po pravilu oko  $K = 1 \times 10^{-7}$  m/s. Zbog svojih filtracionih karakteristika i debljine, pružaju relativno dobru zaštitu vodonosnoj sredini od zagađenja sa površine terena.

## METODOLOGIJA IZRADE KONCEPTUALNOG MODELA

Postupak izrade trodimenzionalnog hidrogeološkog konceptualnog modela, kao podloge za izradu numeričkog modela, se sastoji iz više koraka koji obuhvataju:

- 1) definisanje granice istražnog prostora, tj. dela analizirane izdani koji će biti obuhvaćen numeričkim hidrodinamičkim modelom;
- 2) izradu 3D hidrogeološkog modela (koja podrazumeva: šematizaciju izdani adekvatnim stepenom detaljnosti, definisanje broja i geometrizaciju slojeva modela, kontakt korita reke i drugih tokova sa sedimentima izdani);
- 3) definisanje vremenskog perioda za analizu režima izdani i efekata eksploatacije podzemnih voda (ovaj korak ima naročit značaj sa aspekta veoma izraženih promena režima nivoa podzemnih voda, koji su posledica intenzivnog starenja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu Beograda);
- 4) definisanje graničnih uslova kojima se matematički predstavljaju izvori prihranjivanja i dreniranja izdani.



Predstavljena metodologija izrade 3D konceptualnog modela podrazumeva da se izbor vrste i oblika diskretnih polja, kao i stepena diskretizacije prostora u planu vrši u postupku izrade numeričkog modela.

U cilju definisanja istražnog prostora za potrebe numeričke hidrodinamičke analize bunara sa horizontalnim drenovima, konceptualnim 3D modelom je potrebno obuhvatiti onaj deo izdani (u konkretnom analiziranom slučaju – beogradskog izvorišta podzemnih voda i šire zone bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m) u okviru kojeg je mogao biti ostvaren uticaj rada predmetnog bunara na režim nivoa izdani, odnosno prostor sa kojeg je mogao biti ostvaren uticaj eksploatacije podzemnih voda okolnim bunarima i drugim prirodnim i antropogenim uticajima na režim podzemnih voda u užoj zoni analiziranog bunara RB–5m. Okolni bunari su prvi susedni bunar uzvodno i nizvodno u odnosu na detaljno analizirani bunar na istoj obali reke, kao i bunari na naspramnoj obali duž toka reke obuhvaćenog modelom. U slučaju simulacije dugotrajnih nestacionarnih uslova režima, uobičajeno je da na svim analiziranim bunarima u okviru modela dolazi do promene veličine eksploatacije podzemnih voda, prvenstveno iz razloga starenja drenova, zatim realizovane regeneracije postojećih drenova, utiskivanja novih drenova ili promene režima rada bunara. Stoga je režim podzemnih voda u užoj i široj zoni svakog od predmetnim modelom obuhvaćenih bunara karakteristično i kompleksno vremenski promenljiv (što 3D konceptualni model čini zapravo 4D sistemom).

Drugi aspekt koji je potrebno razmotriti prilikom definisanja veličine prostora modela se odnosi na režim nivoa izdani u zaleđu bunara, čije poznavanje je zasnovano na podacima osmatranja nivoa podzemnih voda u pijezometrima u bližem i daljem zaleđu bunarskog niza i reke. Na slici 1 je predstavljen prostor konceptualnog modela izrađenog za potrebe analize bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m.



**Slika 1.** Granice 3D konceptualnog modela sa položajem bunara i istražnih bušotina korišćenih u šematizaciji izdani i graničnim uslovima (na osnovu Božović et al., 2020).

**Figure 1.** 3D conceptual model boundaries with radial collector wells, boreholes used in aquifer schematization and boundary conditions (based on Božović et al., 2020).

Hidrogeološka šematizacija prostora modela je obuhvatila izradu baze hidrogeoloških objekata u okviru usvojenog prostora, koja je uključivala oko 150 istražnih bušotina. Oblast obuhvaćena hidrogeološkim modelom je šematizovana po principu litostratigrafske paralelizacije srodnih facija, hronostratigrafski i genetski jednovremeno stvaranih aluvijalnih naslaga, koji imaju sličan granulometrijski sastav i hidrogeološke odlike. Hidrogeološka šematizacija je vršena tako što je uža zona svakog bunara obuhvaćenog modelom analizirana, revidovana i korigovana potrebnim brojem intervencija sve do postizanja zadovoljavajućeg stepena reprezentativnosti. Zatim je vršeno usklađivanje prostora između dva susedna bunara, kako bi i taj deo analiziranog terena bio adekvatno raščlanjen u pogledu litoške slojevitosti i hidrogeoloških svojstava deponovanih sedimenata. Revizija delova modela je vršena iterativno, izradom većeg broja hidrogeoloških, tj. hidrolitostratigrafskih preseka, karata debljine pojedinih šematizovanih članova, karata geometrije povlate i podine slojeva, sve do konačnog usvajanja.

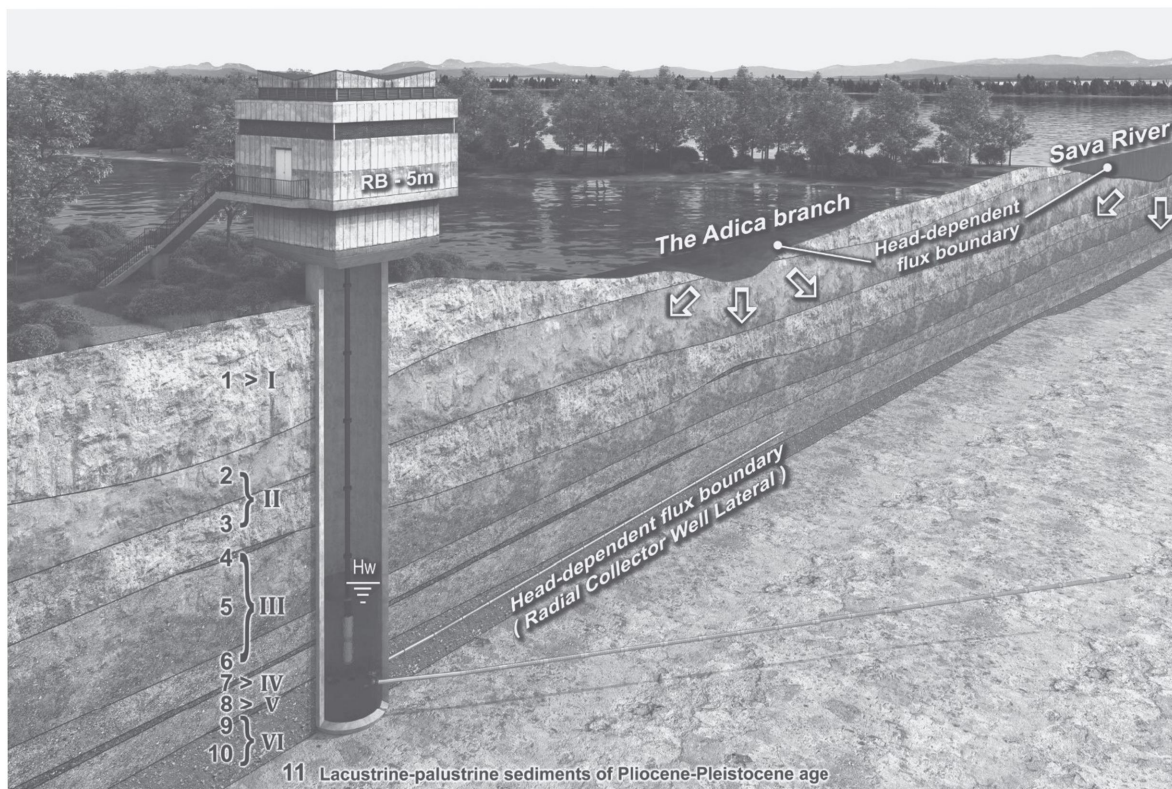
Nakon što je baza podataka formirana i dokumentovana odgovarajućim brojem prikaza i interpretacija, zajedno sa formiranim 3D hidrogeološkim modelom, u nastavku se pristupilo analizi geometrijskog odnosa korita Save i šematizovanih slojeva izdani. Kao rezultat je dobijen prostorni odnos usecanja korita reke kroz slabijepropusne povlatne i vodonosne sedimente izdani, koji je na slici 2 predstavljen detaljem u profilu. Izrađene su odgovarajuće 2D interpretacije geometrije korita, koje će na hidrodinamičkom modelu služiti za zadavanje graničnog uslova „reka“. U odnosu na dubinu usecanja korita reke u aluvijalnim naslagama, zaključeno je da će zadovoljavajući stepen šematizacije realnih uslova biti ostvaren definisanjem dve zone. One imaju različite dubine usecanja i različite površine dna u planu. Plićoj zoni je dodeljena prosečna dubina dna korita na koti 63 mnm, dok je u slučaju dublje zone dno korita zadato na koti 61 mnm.



Zbog toga što je na modelu simuliran višegodišnji period osmatranja i merenja elemenata režima izdani, dužina jednog proračunskog perioda je definisana tako da se potrebnim nivoom reprezentativnosti predstave hidrološki uslovi, tj. promene vodostaja reke Save, imajući u vidu da ona predstavlja glavni izvor prihranjivanja izdani izvorišta podzemnih voda Beograda. Jedan diskretni proračunski period je imao trajanje od 5 dana, zbog čega je ceo analizirani vremenski period imao ukupno 761 vremenski proračunski interval (engl. „stress period“).

U skladu sa iskustvom stečenim izradom hidrodinamičkih modela bunara sa horizontalnim drenovima izvorišta podzemnih voda Beograda, na modelu su zadati granični uslovi: „reka“, „opšti pijezometrijski nivo podzemnih voda“, „ekvivalentan cevasti bunar velikog prečnika“ i „bunar sa horizontalnim drenovima“.

Granični uslov „reka“ je šematizovan u skladu sa usvojenom dužinom vremenskog koraka kao srednji petodnevni vodostaj reke Save, na osnovu podataka o vodostajima registrovanim na v.s. „Beograd“, bez pada vodnog ogledala (iz razloga što je tok reke obuhvaćen konceptualnim modelom imao dužinu od oko jednog kilometra). Graničnim uslovom „reka“ su predstavljeni reka Sava i rukavac Adica koji je sa rekam u hidrauličkom kontaktu nizvodno od bunara RB–5m.



Slika 2. Detalj 3D konceptualnog hidrogeološkog modela uže zone bunara RB–5m sa graničnim uslovima (Božović et al., 2020; izmenjeno)

Figure 2. Detail of the 3D conceptual model of the immediate zone of well RB–5m with boundary conditions (Božović et al., 2020; modified)

Graničnim uslovom treće vrste su simulirani vremenski promenljivi pijezometrijski nivoi na spoljašnjim konturama modela. Uslov je definisan na severozapadnoj i jugoistočnoj konturi konceptualnog modela, odnosno na različitim rastojanjima u zaleđu bunarskog niza na području Donjeg polja i Makiša. Lokacija zadavanja konture graničnog uslova zavisi od raspoloživosti objekata za osmatranje nivoa podzemnih voda. U slučaju graničnog uslova na prostoru Donjeg polja upotrebljene su informacije o režimu nivoa izdani dobijene merenjima u pijezometrima: Zsur–2d, Zsur–2p i Zsur–3. Na prostoru desne obale Save, tj. Makiša, na raspolaganju su bili pijezometri: Ps–287, Zmak–1 i Put–5m/3. Metodologija definisanja vrednosti pijezometrijskih nivoa u okviru graničnog uslova podrazumeva postupak prostorne i statističke analize gradijenta nivoa izdani od zaleđa prema liniji bunara i reci. Postupak se sastoji u konstrukciji pijezometrijskog profila i korelaciji nivoa podzemnih voda na mestu/konturi zadavanja graničnog uslova prema podacima sa pijezometara i vodostajima reke Save.

U slučaju predmetnog modela, okolni bunari sa horizontalnim drenovima nisu predstavljeni konstruktivno i hidraulički realno, već kao ekvivalentni cevasti bunari velikog prečnika. Okolni bunari su zadati kao granični uslovi druge vrste (zadavanjem poznatog kapaciteta). Svaki od okolnih bunara je predstavljen preko određenog broja vertikalnih bunara, čiji broj zavisi od kapaciteta bunara, broja i funkcionalnog stanja drenova. Hidraulički ekvivalentan princip predstavljanja okolnog bunara sa horizontalnim drenovima podrazumeva da se u odgovarajućem broju diskretnih polja na modelu, u kojima su zadati ekvivalentni vertikalni bunari, dodeli ona vrednost koeficijenta filtracije sedimenata vodonosne sredine koja će omogućiti da se za zadate vrednosti kapaciteta bunara ostvare sniženja nivoa podzemnih voda koja se registruju pijezometrima u zoni bunara.

Predmetni bunar RB–5m je na modelu predstavljen hidraulički realno, tj. kao bunar sa horizontalnim drenovima. Drenovi su predstavljeni unutrašnjim graničnim uslovom ravnomernog pijezometarskog nivoa. Za vrednost pijezometarskog nivoa unutar drenova je usvojena vrednost ekvivalentna nivou podzemnih voda u vodosabirnom bunarskom šahtu. Drenovi su zadati sa tehničkim karakteristikama (dužinom, prečnicima, vertikalnom devijacijom, debljinom prifilterske zone i dr., slika 2) koje odgovaraju stvarnom, izvedenom stanju.

## ZAKLJUČAK

Predmetni postupak izrade 3D konceptualnog hidrogeološkog modela predstavlja unapređenje u odnosu na dosadašnja iskustva izrade hidrogeoloških modela i temeljniju osnovu za formiranje numeričkog hidrodinamičkog modela. Unapređenje je vezano za identifikaciju svih onih prirodnih i antropogenih činilaca (pojava i objekata), koji imaju značajnijeg uticaja na režim nivoa izdani na istražnom području koje će biti obuhvaćeno hidrodinamičkim modelom. Analiza prostornih odnosa geometrije korita reke i šematizovanih vodonosnih i slabijepropusnih delova vodonosne sredine ima naročit značaj sa aspekta formiranja 3D konceptualnog modela. Na osnovu definisane usećenosti korita reke u okviru sedimenata izdani, dobija se adekvatna osnova za preciznije prostorno zadavanje graničnog uslova „reka“ na numeričkom modelu, kao i verodostojnije kvantifikovanje kvaliteta hidrauličkog kontakta reke (kao glavnog izvora prihranjivanja izdani) i izdani. U pogledu šematizacije bunara sa horizontalnim drenovima, postupak podrazumeva predstavljanje bunara u skladu sa njihovim realnim tehničkim, konstruktivnim karakteristikama. Na ovaj način, za razliku ranije zastupljenog pristupa hidraulički ekvivalentnih karakteristika drenova, stiču se uslovi za definisanje realnijih hidrauličkih karakteristika drenova, a naročito prifilterske zone drenova. Ovakav pristup predstavljanja drenova na 3D hidrodinamičkom modelu ima naročit značaj sa aspekta identifikacije uzroka hidrauličkih otpora prisutnih na drenovima, kao i dinamike razvoja procesa starenja drenova, odnosno bunara.

## LITERATURA

- BAJIĆ D., POLOMČIĆ D., 2012: *A conceptual hydrogeological model for open pit mine „Polje E“ (Kolubara coal basin, Serbia)*, Conference: GIS Ostrava 2012 – Surface models for geosciences symposium, Ostrava, Czech Republic.
- BETANCUR T., PALACIO C.A.P., ESCOBAR J.T., 2012: *Conceptual Models in Hydrogeology, Methodology and Results*, Hydrogeology – A Global Perspective, Gholam A. Kazemi, IntechOpen.
- BOŽOVIĆ Đ., POLOMČIĆ D., BAJIĆ D., RATKOVIĆ J., 2020: *Hydrodynamic analysis of radial collector well ageing at Belgrade well field*, Journal of Hydrology, 582.
- BOŽOVIĆ 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.
- BOŽOVIĆ 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.
- GAUDÉNY T., NENADIĆ D., JOVANOVIĆ M., BOGIĆEVIĆ K., 2013: *The stratigraphical importance of the Viviparus boeckhi Horizon of Serbia*, Quaternary International, 292, 101–112.
- GAUDÉNY T., NENADIĆ D., STEJIĆ P., JOVANOVIĆ M., BOGIĆEVIĆ K., 2015: *The stratigraphy of the Serbian Pleistocene Corbicula beds*, Quaternary International, 357, 4–21.
- GUASTALDI E., CARLONI A., PAPPALARDO G., NEVINI J., 2014: *Geostatistical Methods for Lithological Aquifer Characterization and Groundwater Flow Modeling of the Catania Plain Quaternary Aquifer (Italy)*, Journal of Water Resource and Protection, vol. 6, 272–296.
- KNEŽEVIĆ S., NENADIĆ D., RADULOVIĆ B., BOGIĆEVIĆ K., ZARIĆ J., 2018: *Stratigraphic characteristics of Quaternary deposits on the left bank of the Sava River near Belgrade*, Geološki anali Balkanskoga poluostrva, 79 (1), 21–30.
- KRESIC N., MIKSZEWSKI A., 2012: *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization*, CRC Press.
- NASTEV M., MORIN R., GODIN R., ROULEAU A., 2008: *Developing conceptual hydrogeological model for Potsdam sandstones in southwestern Quebec, Canada*, Hydrogeology Journal, vol. 16, no. 2, 373–388.
- NENADIĆ D., KNEŽEVIĆ S., BOGIĆEVIĆ K., 2009: *Stratigraphical and paleogeographical characteristics of Pleistocene series in the Sava riparian area at Belgrade (Serbia)*, B. of the Nat. Hist. Mus., 2, 63–80.
- NENADIĆ D., BOGIĆEVIĆ K., LAZAREVIĆ M., MILIVOJEVIĆ J., 2010: *Lower and Middle Pleistocene sediments of eastern Srem (Northern Serbia) – paleogeographical reconstruction*, B. of the Nat. Hist. Mus., 3, 7–25.
- NIKOLAIDIS N., SHEN H., 2000: *Conceptual site model for evaluating contaminant mobility and pump and treat remediation*, Global Nest: the Int. J., vol. 2, no. 1, 67–76.
- RADANOVIĆ J., NIKOLIĆ I., STOJADINOVIĆ V., 2016: *Conceptualni hidrogeološki model aluvijalne izdani na primeru drenažnog sistema Kovin – Dubovac*, XV Srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, Kopaonik, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko–geološki fakultet, 567–572.
- SINGHAL V., GOYAL R., 2011: *Development of conceptual groundwater flow model for Pali Area, India*, African Journal of Environmental Science and Technology, vol. 5, no. 12, 1085–1092.
- ZORIĆ M., SLIMAK T., VRVIĆ N., 2012: *Metodologija izrade hidrogeološkog modela na primeru bunara sa horizontalnim drenovima RB–16 na Adi Ciganliji*, XIV Srpski hidrogeološki simpozijum sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, 57–62.