

# **Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода**

Ђорђе М. Боžовић



**Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду**

**[ДР РГФ]**

Хидродинамичка анализа процеса старења бунара са хоризонталним дренажима на београдском изворишту подземних вода |  
Ђорђе М. Боžовић | | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008153>

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO–GEOLOŠKI FAKULTET

Đorđije M. Božović

**HIDRODINAMIČKA ANALIZA PROCESA STARENJA  
BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA  
NA BEOGRADSKOM IZVORIŠTU PODZEMNIH VODA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Đorđije M. Božović

**HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF  
RADIAL COLLECTOR WELL AGEING  
AT BELGRADE WELL FIELD**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

## Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije

### Mentor:

Dr Dušan Polomčić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko–geološki fakultet  
uža naučna oblast: Hidrogeologija

---

### Članovi komisije:

Dr Dragoljub Bajić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko–geološki fakultet  
uža naučna oblast: Hidrogeologija

---

Dr Vesna Ristić Vakanjac, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko–geološki fakultet  
uža naučna oblast: Hidrogeologija

---

Dr Saša Milanović, docent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko–geološki fakultet  
uža naučna oblast: Hidrogeologija

---

Dr Zoran Nikić, redovni profesor u penziji, Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet  
uža naučna oblast: Hidrogeologija

---

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

*Posvećeno ocu Mišu i kumu Tadiji*

## ZAHVALNOST

Doktorska disertacija „*Hidrodinamička analiza procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda*“ urađena je pod mentorstvom dr Dušana Polomčića, redovnog profesora Rudarsko–geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Na rukovođenju mojim naučno–istraživačkim radom tokom doktorskih studija, savetima pri definisanju teme i tokom izrade doktorske disertacije, strpljenju i podršci, kao i na učinjenom velikom naporu da se disertacija uredi u svom finalnom obliku, naročitu zahvalnost dugujem svom mentoru, profesoru Dušanu Polomčiću.

Dr Dragoljubu Bajiću, vanrednom profesoru, zahvaljujem na ukazanoj pomoći, korisnim savetima prilikom objavljivanja rezultata istraživanja u naučnim časopisima, kao i na doprinosu učinjenom prilikom pregleda disertacije.

Dr Vesni Ristić Vakanjac, redovnom profesoru, izražavam zahvalnost na sugestijama kojima je unapređena disertacija.

Redovnom profesoru Šumarskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, dr Zoranu Nikiću zahvaljujem na korisnim sugestijama upućenim prilikom izrade Projekta doktorske disertacije, kao i na pregledu i oceni njenog završnog oblika.

Dr Tivadar Gaudenji, viši naučni saradnik Geografskog instituta „Jovan Cvijić“ SANU, je bio spreman da u svakom trenutku, nesebično pruži pomoć i objašnjenja na temu regionalne hronostratigrafije i paleogeografije kvartarnih depozicionih sistema, prvenstveno fluvijalnih tvorevina (paleo)Save, na čemu mu izražavam posebnu zahvalnost.

Dr Petru Stejiću iz Geološkog zavoda Srbije zahvaljujem na konsultacijama, savetima i ustupljenim rezultatima geoloških istraživanja sedimenata aluvijalne ravni Save kod Beograda.

Dr Petar Papić, redovni profesor Rudarsko–geološkog fakulteta u penziji je podržavao i mnogo puta pružao pomoć mojim studentskim i istraživačkim naporima, na čemu mu se najlepše zahvaljujem.

Veljko Marinović, dipl. inž. geologije i kolega doktorand mi je kontinuirano tokom doktorskih akademskih studija pomagao konstruktivnim savetima i sugestijama. Na svojoj ukazanoj pomoći i poverenju mu se iskreno zahvaljujem.

Želim da izrazim najlepšu zahvalnost kolegi Radiši Kostiću iz JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, čija je stručna i nesebična pomoć doprinela ostvarivanju uspeha u publikovanju najznačajnijih rezultata sprovedenih hidrodinamičkih istraživanja.

Kolegama iz Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ zahvaljujem na saradnji prilikom učešća u brojnim zajedničkim terenskim istraživanjima beogradskog izvorišta podzemnih voda.

Predsedniku Odbora direktora Elektroprivrede Crne Gore, gospodinu Milutinu Đukanoviću, zahvaljujem na podršci koja je mnogo značila u završnoj fazi izrade doktorske disertacije.

Zahvaljujem se rukovodstvu, kolegama i saradnicima iz JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, kao i svim osobama koje su mi na bilo koji način i u bilo kom trenutku tokom izrade disertacije ukazali podršku i pružili pomoć.

Zahvaljujem se porodicama Božović, Ružičić, Krstajić i Marković, jer je moj uspeh bio i njihov.

Najviše dugujem svojoj porodici, na ljubavi, strpljenju i podršci, koje su dale snagu, želju i upornost da istrajem na profesionalnom i naučno–istraživačkom putu.

*Dordžije Božović*

## HIDRODINAMIČKA ANALIZA PROCESA STARENJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA NA BEOGRADSKOM IZVORIŠTU PODZEMNIH VODA

### Sažetak

Predmet istraživanja doktorske disertacije su bunari sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta podzemnih voda, drugog najvećeg izvorišta ovog tipa na svetu, čiji je režim rada opterećen procesima intenzivnog starenja prisutnog od samog početka formiranja izvorišta, početkom 1950-ih godina. Istraživanja sprovedena u okviru izrade disertacije su imala za cilj definisanje nove metodologije izučavanja procesa mehaničkog i biohemijskog kolmiranja drenova izradom detaljnih 3D numeričkih hidrodinamičkih modela, upotrebom postojećih, dostupnih i široko rasprostranjenih računarskih programa. Istraživanja su realizovana simulacijom ostvarenog režima podzemnih voda 15-godišnjeg trajanja na formiranom modelu, na kojem su bunari, zajedno sa mehanizmom zahvatanja podzemnih voda, predstavljeni geometrijski, konstruktivno i hidraulički realno, dok su drenovi simulirani upotrebom matematičkog (numeričkog) graničnog uslova treće vrste i hidrodinamičkog uslova „dren“.

Hidrodinamička istraživanja su rezultirala predlogom optimalne, hidraulički reprezentativne i hidrodinamički efikasne metodologije definisanja aktuelne vodozahvatne sposobnosti drenova putem kvantifikovanja vrednosti hidrauličkih karakteristika drenova, kao i dinamike razvoja procesa starenja praćenjem promena vrednosti koeficijenta propusnosti prifilterske zone drenova tokom vremena rada bunara. Na osnovu rezultata hidrodinamičke analize, date su preporuke optimalnog stepena diskretizacije vremena za simulaciju režima izdani i prostora modela u užoj zoni bunara sa horizontalnim drenovima. Simulacija rada grupe hidraulički realno simuliranih bunara je izvršena u uslovima optimalnog kapaciteta drenova, definisanog uz uvažavanje kriterijuma biohemijskog kolmiranja i resursa podzemnih voda na lokaciji bunara.

**Ključne reči:** modeliranje podzemnih voda, hidrauličke karakteristike drenova, koeficijent propusnosti drenova, prifilterska zona drena, hidraulički otpori na drenovima, kolmiranje drenova, ulazne brzine podzemnih voda, MODFLOW, CLN Package

**Naučna oblast:** Geološko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Hidrogeologija

**UDK:** 556.3:628.112.1(043.3)

## HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF RADIAL COLLECTOR WELL AGEING AT BELGRADE WELL FIELD

### Summary

The research presented in this Doctoral Dissertation focuses on radial collector wells at Belgrade well field, the second largest public water supply source of this type in the world, whose operation has been impacted by intensive well ageing processes since the well field's development began in the early 1950's. The objective of the research conducted within the scope of the Dissertation was to define novel methodologies for studying mechanical and biochemical clogging of radial collector well laterals through detailed 3D numerical hydrodynamic modeling by means of existing, accessible, and widely used computer programs. The groundwater dynamics observed over a 15-year period were simulated on the model. The wells, along with their groundwater extraction mechanism, were represented in real geometric, structural, and hydraulic terms, whereas the laterals were simulated using a mathematical (numerical) boundary condition of the third type and the hydrodynamic condition "lateral".

The hydrodynamic investigations resulted in a proposal of an optimal, hydraulically representative, and hydrodynamically efficient methodology for defining the current groundwater extraction capacity of the laterals by quantifying the hydraulic properties of the laterals and the rate of advance of ageing processes by monitoring the change in the coefficient of leakage of the near-lateral zone while the wells are in operation. The results of the hydrodynamic analysis served as a basis for recommending the optimal level of time discretization for simulating the dynamics of the aquifer and the area of the model covering the immediate zone of the radial collector wells. The operation of a group of wells represented in real hydraulic terms was simulated under the conditions of optimal capacities of the laterals, which were defined applying criteria relating to biochemical clogging and the groundwater resource at the well field.

**Key words:** groundwater modeling, hydraulic characteristics of laterals, coefficient of leakage, near-screen zone, hydraulic resistances at laterals, clogging of laterals, groundwater entrance velocities, MODFLOW, CLN Package

**Scientific field:** Geological engineering

**Scientific subfield:** Hydrogeology

**UDC number:** 556.3:628.112.1(043.3)



## SADRŽAJ

UVOD .....	1
1 KONCEPCIJA HIDRODINAMIČKIH ISTRAŽIVANJA PROCESA STARENJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA.....	8
2 PRIKAZ GEOLOŠKE GRAĐE I HIDROGEOLOŠKIH ODLIKA TERENA BEOGRADSKOG IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA .....	14
3 TEORIJSKI OSNOV HIDRODINAMIČKIH ISTRAŽIVANJA PROCESA STARENJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA.....	17
3.1 Pregled dosadašnjih hidrauličkih i hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima .....	17
3.1.1 Primenjene metode i rezultati dosadašnjih hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima.....	17
3.1.2 Metodologija i rezultati dosadašnjih hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda.....	25
3.1.3 Zaključak primenjenih metoda i ostvarenih rezultata dosadašnjih hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda.....	27
3.2 Hidraulika i hidrodinamičko modeliranje bunara sa horizontalnim drenovima sa aspekta procesa starenja .....	28
3.2.1 Faktori koji utiču na kapacitet i režim rada bunara sa horizontalnim drenovima .....	32
3.2.2 Hidraulički mehanizam zahvatanja podzemnih voda bunarom sa horizontalnim drenovima .....	34
3.2.3 Primena graničnog uslova „dren“ u hidrodinamičkom modeliranju bunara sa horizontalnim drenovima.....	36
3.2.4 Sličnost graničnog uslova „dren“ sa uslovima treće vrste konturnih uslova u hidrauličkoj teoriji filtracije podzemnih voda.....	41
3.2.5 Hronološki prikaz razvoja MODFLOW–USG koda za diskretizaciju uže zone bunara sa horizontalnim drenovima nestrukturiranim mrežama diskretnih polja na hidrodinamičkom modelu .....	42
3.2.6 Upotreba MODFLOW–USG koda i Connected Linear Network (CLN) numeričkog paketa u savremenoj simulaciji bunara sa horizontalnim drenovima.....	43
4 METODOLOGIJA NAUČNO–ISTRAŽIVAČKOG RADA .....	45
4.1 Metodologija izrade numeričkog hidrodinamičkog modela analiziranog dela izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda .....	46
4.1.1 Podaci o detaljno analiziranom bunaru sa horizontalnim drenovima RB–5m .....	46
4.1.2 Metodologija izrade 3D hidrogeološkog modela analiziranog dela terena .....	49
4.1.3 Metodologija izrade 3D hidrogeološkog modela bunara sa horizontalnim drenovima...	50
4.1.4 Analiza eksploatacionog režima nivoa izdani u zoni bunara RB–5m.....	52
4.1.5 Metodologija ispitivanja uticaja šematizacije prostora i vremena na rezultate numeričkih hidrodinamičkih modela bunara sa horizontalnim drenovima .....	54
4.1.6 Analiza diskretizacije vremena na formiranom hidrodinamičkom modelu .....	55
4.1.7 Analiza diskretizacije prostora na formiranom hidrodinamičkom modelu .....	56
4.2 Metodologija ispitivanja starenja bunara sa horizontalnim drenovima na numeričkom hidrodinamičkom modelu.....	59
4.3 Metodologija hidrodinamičkih ispitivanja uticaja propusnosti prifilterske zone drenova na kapacitet i hidraulički režim rada bunara .....	62
4.3.1 Hidraulički realna simulacija bunara sa horizontalnim drenovima .....	62

4.3.2	Hidraulički ekvivalentna i hidraulički realna simulacija prifilterske zone drenova.....	63
4.3.3	Metodologija ispitivanja uticaja debljine i propusnosti prifilterske zone drenova.....	65
4.4	Metodologija definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda .....	67
4.5	Metodologija hidrodinamičkih ispitivanja rada grupe hidraulički realno simuliranih bunara sa horizontalnim drenovima u uslovima optimalnog kapaciteta drenova .....	69
5	REZULTATI HIDRODINAMIČKIH ISTRAŽIVANJA PROCESA STARENJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA.....	71
5.1	Rezultat izrade 3D hidrogeološkog modela analiziranog dela izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda .....	71
5.2	Rezultati rekonstrukcije hidrauličkog režima rada analiziranog bunara RB–5m.....	74
5.3	Rezultati analize režima nivoa izdani u zoni analiziranog bunara RB–5m.....	77
5.4	Rezultati analize uticaja diskretizacije vremena na hidrodinamičkom modelu .....	79
5.5	Rezultati analize uticaja diskretizacije prostora na hidrodinamičkom modelu bunara sa horizontalnim drenovima .....	82
5.6	Rezultati izrade hidrodinamičkog modela dela izdani beogradskog izvorišta.....	84
5.6.1	Početni i granični uslovi hidrodinamičkog modela .....	85
5.6.2	Kalibracija modela.....	86
5.6.3	Identifikacija reprezentativnih vrednosti filtracionih karakteristika sedimenata izdani..	87
5.6.4	Identifikacija reprezentativnih vrednosti naslaga dna površinskih vodnih tela (reke Save i rukavaca Adica).....	87
5.6.5	Kvantifikovanje hidrauličkih karakteristika drenova tokom vremena .....	87
5.6.6	Rezultati analize starenja bunara RB–5m u odnosu na kriterijum biohemijskog kolmiranja.....	90
5.7	Rezultati ispitivanja geneze uvećanih početnih otpora na drenovima .....	91
5.8	Rezultati analize definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima sa aspekta procesa starenja putem kolmiranja.....	93
5.9	Rezultati hidrodinamičke analize rada grupe hidraulički realno simuliranih bunara sa horizontalnim drenovima u cilju definisanja optimalnih kapaciteta bunara .....	95
5.10	Rezultati hidrodinamičke analize uticaja propusnosti prifilterske zone drenova na kapacitet i hidraulički režim rada bunara.....	103
6	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....	110
7	LITERATURA .....	114

## UVOD

Dostupnost resursa za zadovoljenje potreba za kvalitetnom pijaćom vodom je u prošlosti bio jedan od najvažnijih uslova nastanka prvih većih naselja, kasnije njihovog rasta i razvoja, zbog čega su u povoljnom prirodnom okruženju, na obalama reka, formirane brojne prestonice, danas najveći i najrazvijeniji gradovi evropskih i zemalja sveta. Industrijalizacija je ovim naseljima donela ubrzan rast i razvoj, praćen porastom broja stanovnika i njihovog životnog standarda, koji su za preduslov imali civilizacijski iskorak u vidu izgradnje i dostupnosti komunalne infrastrukture – pijaće vode i odvođenja i tretmana otpadnih voda.

U zaravnjenim, nizijskim terenima donjih delova toka većih reka formirane su izdani zbijenog tipa, kvartarne starosti, aluvijalne geneze, koje zahvaljujući značajnom rasprostranjenju u planu, debljini vodonosnih naslaga i direktnoj hidrauličkoj vezi sa stalnim površinskim vodotokom, predstavljaju jedan od najznačajnijih izvora snabdevanja pijaćom vodom stanovništva i industrije. U ovakvim hidrogeološkim uslovima, bunari sa horizontalnim drenovima su čest izbor tipa vodozahvatnog objekta za obezbeđenje potrebnih količina voda.

Iako originalno projektovani za eksploataciju ugljovodonika, bunari sa horizontalnim drenovima su široku primenu našli u oblasti zahvatanja podzemnih voda, prvenstveno za potrebe snabdevanja pijaćim vodama. U konstruktivnom i hidrauličkom smislu, reč je o složenim vodozahvatnim objektima, sa konstrukcijom koja se tipično sastoji iz tri celine: bunarske kućice, vertikalnog vodosabirnog bunarskog šahta i horizontalnih drenova. Bunarska kućica se najčešće gradi kao nadzemna dvospratna građevina, koja sadrži mašinsku salu i zatvaračnicu, u kojima su smeštene elektroenergetska i hidromašinska oprema (elektro orman, transformator, frekventni regulator, dizalica za manipulisanje opremom, ventili zatvarača drenova, merač protoka i dr.). Bunarski šaht je kružnog poprečnog preseka, prečnika 2,5–5,0 m i debljine armirano–betonskog zida 0,25–0,5 m. Drenovi se formiraju utiskivanjem, upotrebom hidrauličke prese, prema Reni, Felman ili Projsag (engl. *Ranney, Fehlmann, Preussag*) metodi, odnosno njihovim modifikacijama, u skladu sa lokalnim litološkim uslovima terena (Balke et al., 2000; Hunt, 2002; Nemeček, 2006; Babac & Babac, 2008; Houben et al., 2022), u različitim prostornim rasporedima u planu (Moore et al., 2011), najčešće u jednoj ili u dve lepeze (Spiridonoff, 1964; Kresic, 2009). Konstrukcija drena se sastoji od bušaće glave, niza filterskih cevi koje čine vodozahvatni deo bunara i neperforiranih, tzv. „slepih“ cevi koje se ugrađuju na kraju drena, uz bunarski šaht.

Uobičajeno prirodno okruženje za izgradnju bunara sa horizontalnim drenovima su priobalna područja stalnih površinskih vodnih tela, najčešće većih reka, ređe prirodnih ili veštačkih jezera, u kojima su formirane izdani intergranularnog tipa poroznosti, sa slobodnim nivoom podzemnih voda, zbog čega se rad izvorišta podzemnih voda u okviru kojih se ovaj tip bunara gradi zasniva na procesu obalske filtracije (Ray et al., 2002; Hunt et al., 2002; Grischek et al., 2002). U hidrodinamičkom smislu, obalska filtracija (engl. *riverbed filtration, RBF*) koristi povoljnost postojanja hidrauličke veze između površinskih i podzemnih voda. Zahvatanje podzemnih voda nizom bunara rezultira sniženjem nivoa izdani duž obale reke i nastankom manje ili veće razlike između nivoa u izdani i nivoa u reci (Fox & Durnford, 2003; Salehin et al., 2004; Su et al., 2007; Patel et al., 2010; Polomčić et al., 2013a). Veća razlika u nivoima utiče na intenzivnije prihranjivanje izdani na račun infiltracije veće količine površinskih voda kroz rečno korito, čime se ograničava veličina sniženja nivoa izdani i relaksira režim rada bunara.

Osim aspekta stabilnosti rada izvorišta u kvantitativnom smislu, proces obalske filtracije povoljno utiče i na stabilnost fizičkog, hemijskog i mikrobiološkog kvaliteta zahvaćenih podzemnih voda, te manjeg stepena njihovog naknadnog tretmana za potrebe vodosnabdevanja (Schijven et al., 2002; Verstraeten et al., 2002; Newcomer et al., 2016; Nagy–Kovács et al., 2019).

Budući da je kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima rezultat lokalnih prirodnih uslova – litološkog, granulometrijskog, geohemijskog sastava deponovanih klastičnih sedimenata, njihovih hidrogeoloških odlika, hidrodinamičkog režima izdani, kvaliteta hidrauličke veze sa rekom kao dominantnim izvorom prihranjivanja, hidrohemijskog sastava podzemnih voda, kao i tehničkih karakteristika i režima rada samog vodozahvatnog objekta, to je i uobičajeno da njihovi kapaciteti variraju u širokom dijapazonu i u okviru jednog izvorišta. Imajući u vidu da aluvijalni sedimenti formirani u rečnim dolinama imaju relativno malu debljinu, po pravilu 15–30 m, to je uobičajeno da bušeni bunari u takvim uslovima imaju dužinu filtera od svega 5–10 m. Na prostoru od 300–500 m duž rečne obale, koliko je po pravilu rastojanje između dva bunara sa horizontalnim drenovima, može se u okviru utvrđenog hidrogeološki najpovoljnijeg dela profila vodonosne sredine ugraditi nekoliko puta veća dužina filterske konstrukcije drenova u odnosu na ukupnu dužinu vodozahvatnih delova nekoliko bušenih vertikalnih bunara izgrađenih na istom prostoru i uz uvažavanje istih hidrauličkih kriterijuma rada u pogledu definisanog sniženja i interferencije rada objekata.

Neposredni predmet istraživanja u okviru izrade predmetne doktorske disertacije je izvorište podzemnih voda Beograda, čija je izdan formirana u aluvijalnoj ravni reke Save, koju predstavlja vodonosna sredina kompleksne geneze, izraženo heterogenog litološkog i granulometrijskog sastava, značajnih razlika u hidrogeološkim odlikama deponovanih sedimenata u planu i profilu, kao i nepovoljnog hemijskog i mikrobiološkog sastava podzemnih voda. Istovremeno, predmet istraživanja su bunari sa horizontalnim drenovima, kao složeni tip vodozahvatnog objekta, zajedno sa procesima intenzivnog starenja prisutnim na njima. Istorijat proučavanja zbijene izdani u širokoj aluvijalnoj ravni reke Save datira još od kraja 19. veka, kada su vršena prva namenska hidrogeološka istraživanja na prostoru od najuzvodnijeg dela Makiškog polja pa nizvodno sve do ušća Save u reku Dunav za potrebe organizovanog, centralizovanog vodosnabdevanja (*slika 1*).



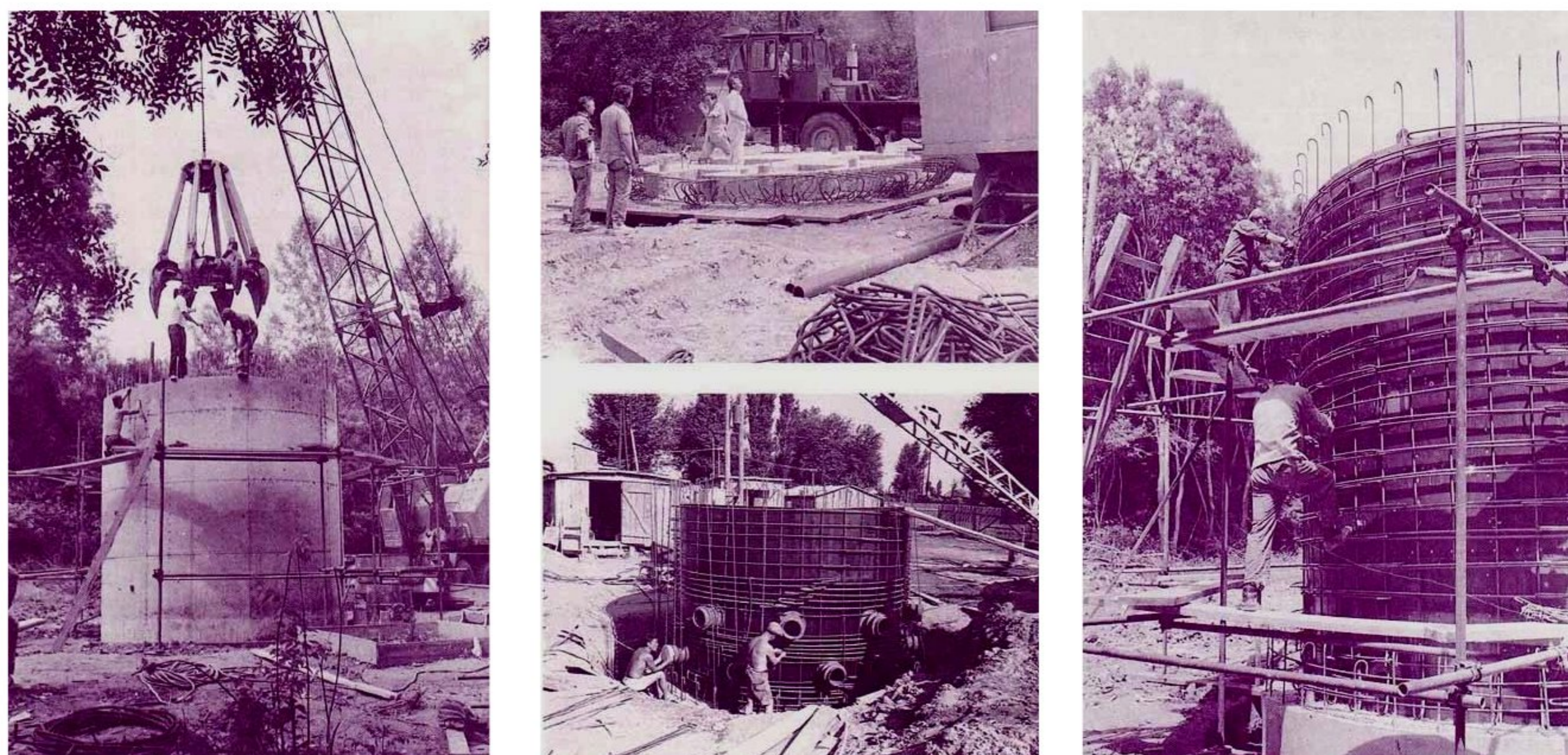
После овога настала је дискусија о геолошком саставу Макиша и о пореклу и особинама макишке подземне воде.  
 Др. Светолик Радовановић. Господо! Пре неколико месеци имао сам част, да од стране одбора београдске општине будем постављен за члана комисије, која је имала задатак да свестрано проучи нов београдски водовод. Примивши се ове почаст, имао сам прилике да се упознам са свима подацима, који се тичу овога предмета, а поред тога још да зађем дубље у само ове питање из практичке Геологије. Одзивајући се радо позиву Г. Жујовића, ја ћу вам данас саопштити главне резултате, до којих сам дошао у погледу на геолошки састав Макиша и порекло његове подземне воде; о самом хемијском саставу ове воде имаћете прилике чути стручно мишљење од г. г. хемичара.

Ј. М. Жујовић. Господо! По давнашњој жељи неколико људи, који се интересују питањем о води у новом београдском водоводу, а и по скорошњем предлогу г. Марка Лека, ја сам као деловођа Геолошког Друштва изнео данас на дискусију поштованог збора то важно питање.

наноси Саве близу ушћа јој, дакле онде, где је она у току дугог времена непрекидним таложењем наноса непрекидно уздизала своје корито, отуда поступно умањавала своју снагу, па тако приликом повремених излива поступно доносила све финији материјал. Из овога излази, да је макишка равница само један део великог наносног терена, који је створила Сава, поступно издижући своје корито. Према томе поменути склади шљунка, песка, муља и т. д., на које се наишло у Макишу приликом бушења поменутих рупа, морају се продужавати и даље испод Саве на другу страну. Ово су потврдила и сондирања Савина дна приликом постављања стубова за железнички мост, за тим бушења код земунске железничке станице, којима се ушло у сасвим сличне водоспроводне слојеве као и у Макишу. Али и ако је истина, да се у овом наносном терену Саве склади шљунка, песка, муља и т. д. у опште говорећи тако ређају, да идући на више долази све финији материјал, опет се не може узети, да су они правилно и равномерно по целом Макишу распрострањени. Речни

Slika 1: Razmatranje potencijalnosti korišćenja zbijene izdani aluvijalne ravni Save za potrebe vodosnabdevanja Beograda na 32. zboru Srpskog geološkog društva održanom na Velikoj školi 10. 12. 1894.

Prvi vertikalni bunari izvedeni su u zoni izvora Bele Vode početkom 20. veka. Predviđena je bila izgradnja 5 bunara u prvoj i još 15 bunara u drugoj fazi izgradnje vodozahvatnih objekata na planiranom izvorištu podzemnih voda. Izvedeno je svih 5 bunara u prvoj fazi, dok je predviđene radove u drugoj fazi prekinuo početak Prvog svetskog rata. Tek je u periodu od 1925. do 1928. godine izgrađeno je još 10 bunara. U periodu od 1936. do 1937. godine je izgrađen i u sistem vodosnabdevanja uključen prvobitni sistem bunara na središnjem delu Makiškog polja iz kojih se zahvatanje podzemnih voda vršilo sistemom natega (tzv. Južna i Severna natega, koje su, donekle izmenjene, u eksploataciji i danas). Nakon Drugog svetskog rata započinje period obimnih i detaljnih multidisciplinarnih geoloških istraživanja aluvijona Save, među kojima su dominantna bila hidrogeološka istraživanja u cilju definisanja perspektivnosti zbijene izdani za potrebe snabdevanja kvalitetnim pijaćim vodama intenzivno rastućeg broja stanovnika glavnog grada i industrije u njemu. Kao optimalan tip vodozahvatnog objekta je opredeljen bunar sa horizontalnim drenovima, da bi izgradnja prvog bunara započela 1952. godine (*slika 2*).



Slika 2: Izgradnja prvog bunara sa horizontalnim drenovima u Beogradu (RB-1) 1952. g.

Do kraja 1960. godine izgrađena su još dva bunara na levoj obali Save u neposrednoj blizini njenog ušća u Dunav i tri bunara na desnoj obali reke u središnjem delu Makiša. Do kraja sedme decenije 20. veka izgrađen je još 21 bunar sa horizontalnim drenovima (na Novom Beogradu, Adi Ciganliji i Makišu), da bi u periodu od 1970. do 1979. godine u eksploataciju uključeno još 26 bunara. Najintenzivniji period izgradnje su bile '80. godine prošlog veka, kada su izgrađena i u sistem javnog vodosnabdevanja uključena 42 bunara sa horizontalnim drenovima. Do kraja 1996. godine su izgrađena još 4 bunara, čime je dostignut današnji broj od 99 bunara sa horizontalnim drenovima (uz 47 bušenih, vertikalnih bunara, od kojih tri zahvataju vode karstne izdani u paleoreljevu aluvijalnih sedimenata na desnoj obali reke Save u zoni Ušća).

Ograničavajući aspekti izgradnje i eksploatacije bunara sa horizontalnim drenovima su najčešće same prirodne odlike aluvijalnih izdani – heterogenost litološkog sastava sedimenata i hidrohemijski sastav podzemnih voda. Oba uticaja su izraženo prisutna na beogradskom izvorištu podzemnih voda. Sa 99 izgrađenih bunara, na kojima je do danas utisnuto više od 900 drenova, beogradsko izvorište podzemnih voda je drugo najveće izvorište ovog tipa na svetu. Prosečna dubina bunarskog šahta je oko 24,50 m, iz kojeg je utisnuto između 3 i 16 drenova, u proseku 8 drenova, čija je prosečna dužina oko 50 m. Sa prosečnim sadržajem gvožđa u zahvaćenim podzemnim vodama od 2,04 mg/l (u dijapazonu od 0,16 do 6,63 mg/l, Dimkić et al., 2012), proces starenja je, kao suštinski neizbežan, pratio rad vodozahvatnih objekata na beogradskom izvorištu podzemnih voda od samog početka njihove izgradnje.

### ***Procesi starenja bunara sa horizontalnim drenovima***

Starenje bunara predstavlja skup složenih procesa koji se odvijaju na filterskoj konstrukciji i u prifilterskoj zoni bunara, koji dovode do narušavanja vodozahvatne sposobnosti bunara, intenziviranja hidrauličkog režima rada i kontinuiranog opadanja kapaciteta, sve do potpunog prestanka rada bunara. Starenje bunara obuhvata dva suštinski različita procesa – koroziju i kolmiranje (Houben & Treskatis, 2007; van Beek, 2011). Korozija bunara se manifestuje degradacijom materijala od kojeg je izgrađena filterska konstrukcija. Za razliku od korozije, kolmiranje dovodi do smanjenja poroznosti prifilterske zone i filterske konstrukcije bunara usled taloženja produkata mehaničkog, hemijskog ili mikrobiološkog porekla.

U slučaju drenova na analiziranim bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda, proces korozije započinje proširivanjem pojedinačnih perforacija na filterskoj konstrukciji, na kojoj vremenom dolazi do spajanja dve perforacije, što se nastavlja spajanjem sve većeg broja susednih perforacija tako da se na konstrukciji dreva formiraju tzv. proboji, otvori većih dimenzija, zbog kojih dolazi do zapunjavanja unutrašnjosti drenova materijalom vodonosne sredine. Zidovi filterskih konstrukcija drenova postaju sve tanji, tako da u jednom, kritičnom trenutku, filterska konstrukcija na određenoj stacionaži nije u stanju da izdrži pritisak težine sedimenata i hidrostatički pritisak, usled čega dolazi do njenog loma i skraćivanja dužine dreva. Proces se nastavlja sve dok ne dođe do zarušavanja na kontaktu punih i perforiranih filterskih cevi (što se poslednjih godina često dokumentuje snimcima unutrašnjosti drenova podvodnom kamerom).

Najčešći uzroci starenja različitih tipova bunara putem procesa biohemijskog kolmiranja su povišen sadržaj dvovalentnog gvožđa rastvorenog u podzemnim vodama, ređe povišen sadržaj mangana, kao i produkata bioloških aktivnosti određenih vrsta bakterija prisutnih u podzemnim vodama, zatim neadekvatan režim eksploatacije, tehničke karakteristike bunara koje nisu usklađene sa granulometrijskim karakteristikama sedimenata vodonosne sredine i dr. (Houben, 2003; van Beek et al., 2009; Dimkić et al., 2011a; 2011b; Majkić–Dursun et al., 2016; van Beek, 2018; Božović et al., 2020a; Houben & Sander, 2020). Sedimenti koji izgrađuju izdani u oblastima aluvijalnih ravni često imaju takav geohemijski sastav da u njima minerali gvožđa imaju značajno učešće (Houben, 2003; Majkić–Dursun et al., 2015), usled čega dolazi do taloženja jona dvovalentnog gvožđa rastvorenog u zahvaćenim podzemnim vodama i formiranja gvožđevitih inkrustacija na filterskoj konstrukciji i u prifilterskoj zoni bunara koje direktno i nepovoljno utiču na hidrauličke uslova rada bunara, što je bilo u fokusu istraživanja autora Houben (2006) i van Beek (2018).

Između hidrauličke funkcije prifilterske zone dreva i hidrauličke funkcije sedimenata dna rečnog korita postoji određena analogija u smislu procesa mehaničkog kolmiranja. Naime, u gornjim delovima rečnih slivova, u planininskim i brdovitim terenima (tzv. zonama produkcije i transfera aluvijalnih sedimenata; Charlton, 2007), rečna korita su usečena u grubozrnim, mahom šljunkovitim sedimentima glacio–limno–fluvijalne geneze, koji se odlikuju dobrim hidrogeološkim svojstvima, tj. visokim vrednostima hidrogeoloških parametara. Usled toga, kvalitet hidrauličke veze vodotoka i izdani je visok, zbog čega su prisutni uslovi za intenzivno prihranjivanje izdani na račun površinskih voda. U ovakvim hidrogeološkim i hidrološkim uslovima, bunari sa horizontalnim drenovima neretko imaju kapacitete od nekoliko stotina litara u sekundi.

Sa druge strane, u donjem delu sliva (tzv. zoni depozicije aluvijalnih naslaga; Nichols, 2009; Grubić et al., 1996), kada je reka u ravničarskim terenima u kojima energija rečnog toka opada i gde su u okviru aluvijalnih ravni deponovani sedimenti heterogenog granulometrijskog sastava, sa povišenim sadržajem sitnozrne frakcije i prekriveni povlatnim slojem fino-zrnih naslaga (koje reka eroduje i nosi u vidu suspendovanog materijala, zbog čega njene vode imaju povišenu mutnoću), na dnu rečnog korita se talože muljevite, alevritsko–glinovite tvorevine, što predstavlja proces mehaničkog kolmiranja rečnog korita. Ove tvorevine se odlikuju slabije propusnim karakteristikama, koje presudno utiču na slab kvalitet hidrauličkog kontakta reke i izdani, a samim tim i na otežano prihranjivanje izdani (Mays & Hunt, 2005; Veličković, 2005; Wett, 2006; Pholkern et al., 2015;

Grischek & Bartak, 2016; Milašinović & Jaćimović, 2017; Przybyłek et al., 2017). Kada se u ovakvim prirodnim uslovima eksploatacija podzemnih voda vrši preko niza vodozahvatnih objekata duž obala, nivoi podzemnih voda su na većoj dubini ispod rečnog korita i u zoni uz samo korito (sa izraženom vertikalnom komponentom brzina filtracije podzemnih voda), čak i onda kada je količina zahvaćenih podzemnih voda relativno skromna (nekoliko desetina litara u sekundi, kao u slučaju bunara na izvorištima Budimpešte i Beograda (Nagy–Kovács et al., 2018; Božović et al., 2016c).

Starenje bunara na račun mehaničkog i biohemijskog kolmiranja drenova je proces sličan kolmiranju korita reke. Tako u slučaju drenova, uvećanje razlike između nivoa podzemnih voda unutar i izvan drenova ne nastaje samo kao rezultat intenzivnijeg prihranjivanja izdani na račun porasta vodostaja (doticaja iz reke) i ne dovodi uvek do povećanja kapaciteta bunara. Proces sa sasvim suprotnim uzrocima i efektima često je prisutan (na bunarima sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta podzemnih voda suštinski je opšteprisutan). Porast razlike između pijezometarskih nivoa u unutrašnjosti drena i na spoljašnjoj konturi prifilterske zone je pouzdan pokazatelj napredovanja procesa starenja bunara, koji se karakteriše uzročno–posledničnim odnosom slabljenja filtracionih karakteristika materijala prifilterske zone i porasta hidrauličkih otpora kretanju podzemnih voda kroz njega. U ovom slučaju, uvećanje razlike u nivoima ne nastaje kao rezultat porasta nivoa u izdani, već snižavanja nivoa u šahtu (usled težnje za održanjem dotadašnjeg kapaciteta bunara u cilju urednog vodosnabdevanja) do kojeg dolazi iz razloga procesa starenja drenova, izazvanog mehaničkim kolmiranjem, hemijskom inkrustacijom, mikrobiološkim kolmiranjem (engl. *biofouling*) ili njihovim sadejstvom.

Na osnovu prethodno navedenog se može konstatovati da kapacitet bunara nije reprezentativan pokazatelj hidrauličke efikasnosti drenova kao njegovih vodozahvatnih delova, što potvrđuje i to da za određeni period vremena tokom napredovanja procesa starenja i smanjenja vodozahvatne efikasnosti drenova ne dolazi do pada kapaciteta bunara. Smanjenje kapaciteta neće nastupiti sve dok je u šahtu moguće vršiti sniženje nivoa podzemnih voda. Dostizanje maksimuma sniženja u šahtu (koje je uslovljeno kotom lepeze utisnutih drenova i dubinom ugradnje bunarske pumpe), predstavlja i granicu nastojanja obezbeđenja stabilnosti kapaciteta bunara. Od trenutka kada se ovo ograničenje dostigne, kapacitet bunara će biti u opadanju, a kao posledica kontinualnog smanjenja količine zahvaćenih podzemnih voda, nivo izdani u zoni uticaja rada bunara će rasti (čak i onda kada vodostaj u reci opada). Dakle, u prvoj fazi procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima, uvećanje razlike u nivoima podzemnih voda u bunarskom šahtu i u izdani neposredno u zoni lepeze drenova nastaje na račun snižavanja nivoa u šahtu, a u drugoj fazi, nakon stabilizacije minimalnog radnog nivoa u šahtu (maksimalno usiljenih hidrauličkih uslova rada bunara), na račun zahvatanja sve manje količine podzemnih voda (usled čega nivoi u izdani rastu).

Neadekvatne vrednosti ulaznih brzina će u nastavku eksploatacije bunara voditi daljem intenzivnom starenju drenova i opadanju kapaciteta bunara. Ovakav postupak održanja stabilnosti kapaciteta je najčešće kontinualan i ponavlja se dok god je moguće snižavati nivo vode u šahtu. Kada se dostigne maksimum ostvarivog sniženja nivoa, pristupa se sprovođenju regeneracije bunara, mehaničkim, retko hemijskim ili kombinacijom dve vrste postupka. Regeneracijom se privremeno revitalizuje vodozahvatna sposobnost drenova putem uklanjanja gvožđa kao produkta taloženja iz podzemnih voda, produkata mikrobiološke aktivnosti ili fino-zrnih čestica sedimenata izdani, čime se povećava efektivna poroznost, tj. propusnost prifilterske zone i filterske konstrukcije drenova.

Istraživanja ubrzanog opadanja kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima izazvanog procesima starenja drenova su, gotovo isključivo, vezana za istraživanja realizovana u Republici Srbiji i izvorište podzemnih voda Beograda. Budući da je reč o kompleksnom procesu, istraživanje starenja bunara zahteva multidisciplinarn pristup (Majkić–Dursun, 2013; Majkić–Dursun et al., 2015;2016; Zarić, 2019). Hidrodinamički aspekt hidrogeoloških istraživanja starenja bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda je imao istaknutu ulogu u izučavanju procesa, prvenstveno upoznavanju njegove dinamičke komponente. Iz tog razloga su u disertaciji

predstavljani rezultati i dostignuća dosadašnjih hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara (Dimkić et al., 2010; Božović et al., 2015; 2020a; Mitrinović et al., 2021).

Pad eksploatacionog kapaciteta beogradskog izvorišta podzemnih voda je takav da je u periodu od 2005. godine do danas zahvatanje podzemnih voda smanjeno sa oko 4,4 m<sup>3</sup>/s na oko 2,5 m<sup>3</sup>/s (uz utiskivanje novih drenova koje je izvedeno na 13 bunara i mehaničkim regeneracijama realizovanim više od 150 puta u ovom periodu na bunarima sa starim i sa novim drenovima), odnosno takav da se na nivou jedne godine eksploatacija podzemnih voda smanji za nešto više od 100 l/s.

Sistematska, multidisciplinarna istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu su započeta 2005. godine. Istraživanjima su obuhvaćeni svi bunari na izvorištu, a naročito obimni istražni radovi su bili usmereni na praćenje procesa starenja pet bunara (RB-8, RB-15, RB-16, RB-20 i RB-5m) na kojima su u periodu od 2005. do 2008. godine utisnuti novi drenovi. Novi drenovi su formirani prema Projsag metodi, koja podrazumeva ugradnju filterskog zasipa oko filterske konstrukcije drenova. Procesu korozije i kolmiranja mogu postojati samostalno, a mogu biti, kao u slučaju gotovo svih prvobitno formiranih drenova na bunarima beogradskog izvorišta, istovremeno prisutni na jednom vodozahvatnom objektu. Dok su prvobitni drenovi bili izrađeni od čelika podložnog delovanju korozije, novi drenovi su izrađeni od nerđajućih legura. Adekvatnim izborom materijala se preventivno delovalo na eliminisanje korozije, tako da je kolmiranje jedini oblik procesa starenja na drenovima obnovljenih bunara.

### ***Ciljevi izrade disertacije***

U skladu sa postojećim stepenom naučnog saznanja u oblasti bunara sa horizontalnim drenovima, zajedno sa procesima opadanja kapaciteta bunara u složenim hidrogeološkim uslovima, izrada predmetne doktorske disertacije je obuhvatila realizaciju kompleksne hidrodinamičke analize na numeričkom modelu, čiji je zadatak bio da pruži odgovor na pitanje reprezentativnosti dosadašnjih zaključaka i stavova u pogledu uzroka i dinamike procesa starenja drenova na beogradskom izvorištu podzemnih voda. Realizacija predmetnih istraživanja je rezultirala predlogom nove metodologije hidrauličkog predstavljanja i softverske simulacije bunara sa horizontalnim drenovima na numeričkim hidrodinamičkim modelima.

Jedan od ciljeva izrade disertacije je bio da se diskusijom i kritičkom analizom do danas korišćenih pristupa u hidraulički realnoj simulaciji drenova na hidrodinamičkim modelima, predstavi uticaj primenjenih metodologija i tehnika simulacije drenova na identifikaciju uzroka kolmiranja, kao i na kvantifikovanje promene hidrauličkih karakteristika drenova tokom vremena eksploatacije.

Cilj hidrodinamičkih istraživanja koja su realizovana u okviru izrade doktorske disertacije je bio da se putem realizacije savremene hidrodinamičke analize, kroz izradu trodimenzionalnog numeričkog hidrodinamičkog modela, simulacijom nestacionarnih uslova režima podzemnih voda u dužem vremenskom periodu, pouzdano identifikuju uzroci starenja i detaljno kvantifikuju promene otpora na drenovima na primeru jednog od obnovljenih bunara na izvorištu podzemnih voda Beograda. Ovako definisan cilj sprovedenih istraživanja je imao značaj u oceni valjanosti prethodno definisanog funkcionalnog odnosa porasta otpora na drenovima u zavisnosti od sadržaja pojedinih komponenti hidrohemijskog sastava podzemnih voda (tzv. *indikatora procesa kolmiranja drenova*, Dimkić & Pušić, 2008; 2014; Dimkić et al., 2010; 2011a, 2011b).

Istraživanja su imala za cilj definisanje novih zaključaka o uzrocima i dinamici kolmiranja drenova bunara beogradskog izvorišta, kao i definisanje reprezentativne metodologije izučavanja problema starenja bunara sa horizontalnim drenovima izradom detaljnih hidrodinamičkih modela (ne samo za bunare analiziranog izvorišta, već i u opštem slučaju). Kompleksnost uslova prisutnih na beogradskom izvorištu podzemnih voda u pogledu stratifikacije izdani, hidrogeoloških odlika deponovanih sedimenata, režima nivoa izdani, uslova prihranjivanja izdani, konstruktivnih



karakteristika vodozahvatnih objekata, predstavlja osnov za preporuku utvrđene metodologije simulacije bunara i softverskih alata koji su korišćeni u istraživanju.

U pogledu hidrodinamičkog aspekta hidrogeoloških istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima, istraživanja su podrazumevala i analizu optimalnog stepena diskretizacije istražnog prostora obuhvaćenog modelom u planu i profilu, kao i diskretizaciju vremenskog perioda analiziranog simulacijom režima nivoa podzemnih voda na formiranom modelu. Potreba za ovim vidom analiza je proizašla iz izraženo trodimenzionalnog karaktera strujanja podzemnih voda u zoni bunara sa horizontalnim drenovima i prostorno promenljivih gradijenata nivoa izdani. Ispitivanjem uticaja diskretizacije vremena, na modelu je detaljno razmatran uticaj vodostaja reke Save, budući da ona predstavlja glavni izvor prihranjivanja izdani analiziranog izvorišta.

Jedan od zadataka istraživanja u okviru izrade disertacije bila je i simulacija rada grupe hidraulički realno simuliranih bunara, pri čemu su bunari analizirani sa prognoziranom obnovljenim drenovima i optimalnim kapacitetom pojedinačnog drena definisanim uvažavanjem kriterijuma biohemijskog kolmiranja drenova na bunarima beogradskog izvorišta. Predmet ovog aspekta hidrodinamičke analize je proistekao iz potrebe da se na hidrodinamičkom modelu hidraulički realno simulira i analizira rad grupe bunara, umesto dosadašnje prakse detaljnog ispitivanja samo jednog, odabranog bunara, dok se ostali bunari simuliraju kao vertikalni bunari velikog prečnika. Kao prethodni korak u sprovođenju analize, na hidrodinamičkom modelu je izvršena simulacija i analiza ostvarenog režima nivoa izdani za višegodišnji period (hidrodinamičkom analizom je obuhvaćen ostvareni režim podzemnih i površinskih voda u periodu od sredine 2008. do kraja 2022. godine).

Poslednji od definisanih ciljeva disertacije je bio taj da se promoviše primena hidraulički realnog pristupa simulacije bunara sa horizontalnim drenovima, ali i svih drugih vrsta vodozahvatnih objekata podzemnih voda, naročito u intergranularnoj poroznoj sredini. Iz ovog razloga su bunari koji su obuhvaćeni formiranim hidrodinamičkim modelom simulirani hidraulički realno, upotrebom matematičkog (numeričkog) graničnog uslova treće vrste i hidrodinamičkog uslova „dren“, za razliku od pristupa hidraulički ekvivalentnog predstavljanja drenova i upotrebe drugih vrsta graničnih uslova i numeričkih paketa, više decenija prisutnih u praksi hidrodinamičkih istraživanja zahvatanja podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima (kao i horizontalnih bunara i vodozahvatnih drenaža).

# 1 KONCEPCIJA HIDRODINAMIČKIH ISTRAŽIVANJA PROCESA STARENJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA

U dosadašnjim istraživanjima bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu Beograda, analiza procesa starenja novoformiranih drenova je sprovedena kvantifikovanjem promene dva hidraulička parametra: koeficijenta lokalnog hidrauličkog otpora (LHR, Dimkić et al., 2011b; Mitrinović et al., 2021) analitičkim putem, odnosno koeficijenta propusnosti drenova numeričkim putem (na hidrodinamičkom modelu; Dimkić et al., 2010; Božović et al., 2015).

Hipoteza sprovedenih hidrodinamičkih istraživanja je podrazumevala da su tokom vremena rada bunara, inicijalno uvećani početni otpori na drenovima dodatno uvećavani hemijskim kolmiranjem, tj. taloženjem dvovalentnog gvožđa. U skladu sa tim, cilj istraživanja je bio da se utvrdi da li su i u kojoj meri ukupni otpori na novim drenovima rezultat dve, genetski različite, vrste kolmiranja. Porast otpora na bunaru u uslovima visokog sadržaja gvožđa u podzemnim vodama, rezultat je smanjenja poroznosti filterskog zasipa (slabljenja njegovih propusnih karakteristika) i filterskih cevi. Intenziviranje režima eksploatacije bunara (putem povećanja sniženja nivoa podzemnih voda u bunarskom šahtu) rezultira povećanjem kapaciteta bunara, a samim tim i povećanjem vrednosti brzina podzemnih voda u prifilterskoj zoni drenova. U slučaju kada su ulazne brzine uvećane iznad kritičnih vrednosti, dolazi do intenzivnijeg taloženja gvožđa u pornom prostoru prifilterske zone, što vodi smanjenju poroznosti prifilterske zone (filterskog zasipa u analiziranom slučaju). Sa kontinuiranim smanjenjem veličine pornog prostora slobodnog za kretanje podzemnih voda unutar filterskog zasipa, ulazne brzine se sve više povećavaju i pri istom kapacitetu crpenja (Houben et al., 2018). Na taj način, ulazne brzine veće od kritičnih konstantno doprinose dinamici kolmiranja.

Na osnovu ranijih stavova o hidrauličkim otporima na novim drenovima pet obnovljenih bunara, istraživanja predložena u okviru izrade doktorske disertacije su zasnovana na sledećim hipotezama:

- U prethodnim hidrodinamičkim istraživanjima procesa starenja bunara korišćen je princip **hidraulički ekvivalentnih karakteristika drenova**, zbog čega rezultati ranijih istraživanja ne daju osnov za identifikaciju onih vrednosti filtracionih karakteristika prifilterske zone drenova koje mogu ukazati na pojavu uvećanih početnih otpora na njima.
- Zadavanje realnijih geometrijskih karakteristika drenova, u prvom redu debljine prifilterske zone, na hidrodinamičkom modelu je omogućilo definisanje **hidraulički realnih karakteristika drenova**, a među njima i onih kritičnih – koje će ukazati na eventualno prisustvo uvećanih početnih otpora (na primeru analiziranog bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m).
- Odnos filtracionih karakteristika prifilterske novih zone drenova neposredno po njihovom formiranju i filtracionih karakteristika sedimenata porozne sredine na koti i duž trasa utisnutih novih drenova je posmatran u svetlu reprezentativnog pokazatelja mehaničkog kolmiranja drenova kao eventualnog uzroka prisustva uvećanih inicijalnih otpora na njima.
- Jedan od osnovnih ciljeva istraživanja je da se utvrdi da li su i u kojoj meri ukupni otpori na novim drenovima rezultat dve, genetski različite, vrste kolmiranja – **mehaničkog i biohemijskog**. Korozija kao vid procesa starenja je u slučaju novih drenova izrađenih od nerđajućih legura isključena. Uzrok mehaničkog kolmiranja može biti neadekvatna granulacija filterskog zasipa (uz neodgovarajuće tehničke karakteristike filterske konstrukcije), dok je mogućnost pojave sufozije srazmerno niska iz razloga niskih vrednosti ulaznih brzina podzemnih voda u drenove. Ovakvo shvatanje procesa starenja bi suštinski značilo da su na drenovima postojali uvećani početni hidraulički otpori mehaničke geneze, koji su tokom vremena rada bunara uvećavani hemijskim kolmiranjem, tj. taloženjem gvožđa u prifilterskoj zoni, a koje je inhibirano neadekvatnim režimom rada bunara.
- Porast početnih vrednosti otpora na drenovima bunara je posmatran kao efekat smanjenja poroznosti filterskog zasipa i filterskih cevi, što je na formiranom hidrodinamičkom modelu predstavljeno smanjenjem vrednosti filtracionih karakteristika prifilterske zone drenova tokom

analiziranog vremena rada bunara. Dodatno, analizirana je i zavisnost dinamike kolmiranja drenova od režima eksploatacije bunara, koji je izražen preko ulaznih brzina podzemnih voda u drenove, odnosno u prifiltersku zonu drenova.

- Uticaj reke Save, kao dominantnog izvora prihranjivanja izdani beogradskog izvorišta, je predstavljen adekvatnim stepenom detaljnosti i reprezentativnosti u smislu vremenske diskretizacije vodostaja na modelu, imajući u vidu uticaj reke na režim nivoa izdani, kapacitet i eksploatacioni režim rada bunara, a samim tim i na proces starenja drenova.
- U odnosu na dosadašnja hidrodinamička istraživanja, u predloženim istraživanjima je primenjen pristup koji podrazumeva da se dinamika napredovanja procesa starenja bunara izučava simulacijom kontinualnog rada bunara, umesto simulacije povremeno vršenih opita testiranja.

Hidrodinamička istraživanja na numeričkom modelu su sprovedena pristupom **hidraulički realne simulacije bunara sa horizontalnim drenovima**. Pod hidraulički realnom simulacijom bunara sa horizontalnim drenovima na hidrodinamičkom modelu se u istraživanjima sprovedenim u predmetnoj disertaciji podrazumeva zadavanje drenova kao vodozahvatnih delova konstrukcije bunara u skladu sa realnim tehničkim i geometrijskim karakteristikama, kao i hidrauličkim predstavljanjem drenova u vidu jednodimenzionalnih, linijskih elemenata, kružnog poprečnog preseka, sa adekvatnim graničnim uslovom zadatim unutar i prifilterskom zonom oko drenova.

Hidraulički realna simulacija bunara sa horizontalnim drenovima ne podrazumeva predstavljanje drenova preko privilegovanih delova šematizovane vodonosne sredine, uz veći stepen diskretizacije prostora modela u planu i profilu u užoj zoni bunara, što je bio uobičajen pristup u oblasti hidrodinamičkog modeliranja u prethodnim decenijama. Dodatnom vertikalnom diskretizacijom prostora obuhvaćenog modelom se u prošlosti težilo tome da debljina sloja na modelu u kojem su zadati drenovi generalno odgovara prečniku drenova, dok se pogašćavanjem mreže polja u planu postiže zadovoljavajuća saglasnost prostornog položaja simuliranih sa trasama realnih drenova (što je predstavljalo značajno ograničenje u slučaju izrade modela primenom metode konačnih razlika i strukturirane mreže pravougaonih polja).

U skladu sa navedenim, pod realnom hidrauličkom simulacijom drenova nije verodostojno, ali ni opravdano smatrati primenu tradicionalnih graničnih uslova koji su prisutni u programima za hidrodinamičko modeliranje i koji su dominantno korišćeni za simulaciju ovog tipa bunara u svetskoj praksi (zasnovanih na MODFLOW, FEFLOW ili drugim kodovima), kao ni upotrebu numeričkih paketa kojima se ti granični uslovi predstavljaju na modelima: „drenaža“, „reka“, „opšti pijezometrijski nivo“, konstantan nivo ili kapacitet, o čemu više detalja daju Božović et al., 2020b).

U cilju hidrodinamičke analize starenja bunara, hidrodinamičkim modelom su obuhvaćeni svi oni faktori uticaja koji postoje u realnim uslovima istraživanog terena, koji mogu imati uticaj na pojavu procesa starenja drenova i njen manje ili više intenzivan razvoj tokom eksploatacije bunara.

Imajući u vidu da su novi drenovi utisnuti na detaljno analiziranom bunaru RB–5m formirani prema Projsag metodi (Božović et al, 2020a; Mitrinović et al., 2021), koja podrazumeva ugradnju filterskog zasipa oko filterskih cevi, u okviru istraživanja je definisan pristup prema kojem prifiltersku zonu predstavlja ugrađeni filterski zasip, što znači da je debljina prifilterske zone ekvivalentna debljini omotača filterskog zasipa. Samim tim, na hidrodinamičkom modelu su kvantifikovane realne, umesto hidraulički ekvivalentnih karakteristika propusnosti drenova.

Prifilterska zona ima izuzetan značaj za hidrauličku efikasnost svih vrsta zahvatnih objekata podzemnih voda u intergranularnoj poroznoj sredini, a naročito drenova u konkretnom slučaju bunara koji su u fokusu predmetne doktorske disertacije. Bilo da je formirana od prirodnog geološkog materijala izdani (kao tzv. obratni filter) ili veštačkom ugradnjom materijala (filterskog zasipa, kvarcnog granulata), prifilterska zona ima odlučujući uticaj na rad bunara, zbog čega je pitanje debljine prifilterske zone od presudnog uticaja za koncept hidrauličkog predstavljanja

drenova na modelu. Jedna od hipoteza predloženih istraživanja je i ta da postoji značajna razlika u hidraulički ekvivalentnom i hidraulički realnom pristupu simulacije prifilterske zone drenova u smislu njihove reprezentativnosti, koja je imala uticaja na identifikaciju uzroka starenja obnovljenih bunara, tj. novih drenova, i na dinamiku razvoja procesa starenja tokom vremena eksploatacije.

Jedan od aspekata hidrodinamičke analize koji je razmatran u okviru istraživanja je i pristup zadavanja graničnog uslova pijezometarskog nivoa na spoljašnjim konturama modela. Izrada hidrodinamičkog modela je podrazumevala zadavanje vremenski promenljivih nivoa podzemnih voda izmerenih u osmatračkim objektima tokom višegodišnjeg analiziranog perioda. Lokacije zadavanja graničnog uslova su određene na osnovu položaja raspoloživih pijezometara koji se nalaze u zaleđu niza priobalnih vodozahvatnih objekata na obema obalama reke Save. Za potrebe definisanja vrednosti nivoa izdani između dva terenska merenja, izvršena je analiza gradijenata nivoa izdani od reke i bunara prema zaleđu, putem konstrukcije pijezometarskog profila i korelacije nivoa podzemnih voda u pijezometrima sa vodostajima reke Save.

Imajući u vidu da se izdan beogradskog izvorišta odlikuje izraženim litološkim promenama u planu i u profilu, često i na sasvim malom prostoru (u okviru prostora lepeze drenova jednog bunara), kao i da drenovi imaju značajne devijacije u odnosu na horizontalnu ravan (zbog čega se u realnim uslovima zapravo radi o sub–horizontalnim drenovima), drenovi bunara odabranog za analizu su na hidrodinamičkom modelu predstavljeni u skladu sa utvrđenom vertikalnom devijacijom. Posledica prostorno heterogene litološke građe i zakrivljenih drenova je ta da su drenovi po pravilu utisnuti u dva ili više litoloških slojeva u profilu izdani. U uslovima kada se filtracione karakteristike, tj. hidrogeološke odlike, slojeva značajnije razlikuju ili kada su oni razdvojeni slabije propusnim međuslojem, eksploatacija podzemnih voda rezultira formiranjem kompleksnog režima nivoa izdani. Pretpostavka je da se ekvipotencijalne linije u tim uslovima značajnije razlikuju u okviru pojedinih slojeva, što uslovljava sprovođenje detaljne hidrogeološke šematizacije izdani, kako bi litostratigrafski slojevi bili predstavljeni adekvatnim slojevima na hidrodinamičkom modelu.

U okviru sprovedene hidrodinamičke analize, u funkciji modelskih istraživanja korišćene su naučne metode i postupci koji pripadaju oblasti geoloških i hidrogeoloških istraživanja, dok su za potrebe sagledavanja procesa starenja bunara korišćeni rezultati hidrohemijskih i mikrobioloških ispitivanja podzemnih voda. Od geoloških istraživanja, naročito značaj je imala metoda litološke identifikacije i litostratigrafske paralelizacije, prostornog povezivanja srodnih litoloških članova na osnovu rezultata izrade istražnih bušotina (izrađenih kako u neposrednoj zoni lepeze drenova modelom obuhvaćenih bunara, između dva bunara, tako i u bližem ili daljem zaleđu bunara), detaljnog kartiranja jezgra bušotina i laboratorijskog ispitivanja granulometrijskog sastava uzoraka nabušenih sedimenata, definisanja hipsometrijskog položaja u profilu kvartarnih naslaga, genetskih uslova stvaranja i dr. Dobijeni rezultati istražnog bušenja su analizirani statističkim i geostatističkim metodama uobičajenim u hidrogeološkim istraživanjima. Budući da je reč o većem broju različitih podataka i informacija o vodonosnoj sredini dela izvorišta podzemnih voda grada Beograda, u svrhu sprovođenja hidrogeološke šematizacije prostora izrađena je baza podataka, u namenskom softveru za realizaciju različitih vrsta analiza i 2D i 3D interpretaciju rezultata hidrogeoloških istraživanja.

Istraživanja predviđena predmetnom disertacijom su realizovana po pojedinim fazama i etapama, koje proizilaze iz postavljenih ciljeva istraživanja.

1) **Prva faza sprovedenog istraživanja** je obuhvatila:

- Prikupljanje relevantnih rezultata naučnih istraživanja i saznanja u oblasti bunara sa horizontalnim drenovima, na nacionalnom i međunarodnom nivou, u cilju izučavanja do danas primenjenih koncepcija simulacije bunara, bilo hidraulički ekvivalentnim, bilo hidraulički realnim pristupom, sa zaključcima o prednostima i ograničenjima u svakom analiziranom slučaju primenjenih graničnih uslova i diskretizacije prostora u zoni bunara. Sistematizacija i analiza rezultata dosadašnjih istraživanja je izvršena hronološki, kako bi se u okviru doktorske

disertacije mogao prikazati tok narastanja naučnog saznanja u predmetnoj oblasti i u takvom kontekstu pozicionirala predložena istraživanja.

- Izradu hidrodinamičkog modela analiziranog dela terena beogradskog izvorišta podzemnih voda. Za potrebe formiranja modela prethodno su izvršeni: prikupljanje, sistematizacija, analiza i sinteza raspoloživih podataka o hidrogeološkoj sredini i vodozahvatnim objektima, čijom integracijom je nastao predmetni model. U prvom redu, reč je o:
  - geološkoj građi istražnog prostora odabranog dela izvorišta (što uključuje rezultate izvođenja istražnih bušotina sa analizama granulometrijskog sastava),
  - hidrogeološkim odlikama i filtracionim karakteristikama sedimenata izdani (preliminarno zadatih na modelu na osnovu litološkog/granulometrijskog sastava i dosadašnjih istraživanja, a reprezentativno identifikovanih u postupku kalibracije modela),
  - hidrološkim uslovima reke Save, zajedno sa podacima o geometriji njenog korita, kao i drugih površinskih vodnih tela,
  - nivoima izdani registrovanim u piježometrima na prostoru obuhvaćenom modelom,
  - podacima o režimu rada bunara (radnim nivoima i kapacitetima bunara),
  - podacima o konstruktivnim karakteristikama bunara, naročito drenova, zajedno sa istorijatom njihovog održavanja,
  - podacima o hemijskom i mikrobiološkom sastavu podzemnih voda, među kojima su najznačajniji sadržaj dvovalentnog i ukupnog gvožđa, redoks potencijal podzemnih voda, broj i biološka aktivnost bakterija koje inhibiraju kolmiranje.

Naročit značaj za istraživanja u ovoj fazi je imalo definisanje početnih vrednosti hidrauličkih karakteristika drenova. Na osnovu primene predložene koncepcije kontinualne simulacije i analize ostvarenog režima nivoa podzemnih voda u okviru hidrodinamičkih istraživanja na modelu, stvoreni su uslovi za pružanje odgovora na pitanje koje je činilo polaznu hipotezu predmetnih istraživanja – pitanje uzroka i dinamike procesa starenja drenova, a ujedno i granice reprezentativnosti i aktuelnosti kriterijuma biohemijskog kolmiranja bunara, koji je do sprovođenja istraživanja u okviru predmetne disertacije bio model za razumevanje procesa starenja bunara na izvorištu Beograda.

Aktivnosti u okviru prve faze istraživanja su rezultirale predlogom optimalnog načina predstavljanja drenova na hidrodinamičkim modelima, u smislu primenjenog graničnog uslova, hidrauličkog mehanizma eksploatacije podzemnih voda i kvantifikovanja realnih vrednosti hidrauličkih karakteristika drenova. Kao završni korak ove faze detaljno je predstavljen postupak primene predložene koncepcije zadavanja drenova na modelu, zajedno sa metodologijom ispitivanja uzroka i efekata starenja drenova, na primeru predmetnog obnovljenog bunara.

U nastavku istraživanja je vršena dalja eksploatacija hidrodinamičkog modela u cilju utvrđivanja optimalnog stepena diskretizacije istražnog prostora u planu i profilu, naročito uže zone bunara i aspekta uticaja diskretizacije prostora na odabrane granične uslove kojima se predstavljaju drenovi, kao i diskretizacije vremenskog perioda obuhvaćenog simulacijom režima podzemnih voda.

## 2) Druga faza sprovedenog istraživanja je obuhvatila:

- Simulaciju šest bunara sa horizontalnim drenovima obuhvaćenih hidrodinamičkim modelom, kao realnih bunara sa horizontalnim drenovima u skladu sa predloženom metodologijom simulacije drenova i njihovog starenja iz prve faze istraživanja, u prognoznim, hipotetičkim uslovima eksploatacije podzemnih voda, sa novim drenovima istih tehničkih i hidrauličkih karakteristika zadatim i u istom prostornom rasporedu na svim bunarima, pri čemu je kapacitet pojedinačnog dreva u prvom koraku postupka definisan prema kriterijumu biohemijskog kolmiranja drenova, a u drugom, završnom, prilagođen raspoloživoj količini resursa podzemnih

voda prisutnoj u zoni svakog simuliranog bunara. Dakle, druga faza sprovedenih hidrodinamičkih istraživanja je rezultirala predlogom metodologije definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda.

- Analizu i sintezu svih rezultata dobijenih sprovedenim istraživanjima u okviru pojedinih faza i etapa, njihovo povezivanje u jedinstven naučno–istraživački rezultat, sa predlogom pravca daljih hidrodinamičkih istraživanja, kroz izradu i odbranu doktorske disertacije.

Naučni doprinos predložene disertacije je ostvaren kroz primenjenu metodologiju i ostvarene rezultate hidrodinamičkih istraživanja, koja su pružila nova saznanja vezana za kompleksne procese filtracije podzemnih voda pod uticajem rada bunara sa horizontalnim drenovima, izgrađenim u složenim hidrogeološkim uslovima, čiji su drenovi ugroženi dejstvom različitih vidova procesa starenja. Najznačajniji rezultati hidrodinamičke analize su:

- Dat je odgovor na pitanje reprezentativnosti kriterijuma biohemijskog kolmiranja drenova, koji je na osnovu rezultata ranijih istraživanja predstavljao jedini pristup razumevanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda.
- Identifikacija prisustva dve genetski različite vrste kolmiranja i precizno definisanje porasta otpora na drenovima tokom vremena rada bunara, uz ispitivanje u kojoj meri su utvrđeni uvećani početni otpori na novim drenovima ograničili njihovu hidrauličku funkcionalnost u pogledu zahvatanja podzemnih voda.
- U okviru hidrodinamičkih istraživanja prisustva uvećanih inicijalnih hidrauličkih otpora na drenovima, ispitivana je i njihova geneza, što je podrazumevalo analizu usklađenosti granulometrijskih karakteristika ugrađenog filterskog zasipa i dimenzija otvora na filterskoj konstrukciji sa granulometrijskim karakteristikama sedimenata izdani deponovanih na koti i duž trasa utisnutih drenova, što je bio prvi pokušaj tumačenja uzroka kolmiranja ove vrste u predmetnoj oblasti.
- Istraživanjima vezanim za utvrđivanje uzroka i dinamike starenja drenova na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda, razvijena je nova metodologija primenjenog hidrodinamičkog modeliranja bunara sa horizontalnim drenovima od koje se očekuje da na nacionalnom i međunarodnom nivou promoviše reprezentativniji i sveobuhvatniji pristup simulacije ovog tipa vodozahvatnog objekta u odnosu na koncepcije prisutne u predmetnoj oblasti istraživanja, uključujući i aspekt starenja bunara.
- Za potrebe izrade hidrodinamičkog modela, izrađen je detaljni 3D hidrogeološki model. Njegova izrada je uključila litostratigrafsku i hidrogeološku šematizaciju deponovanih aluvijalnih klastita, zajedno sa geometrijom usecanja korita reke Save u sedimente izdani, iz čega je proistekla temeljna osnova za sagledavanje kvaliteta hidrauličkog kontakta reke i izdani, kao osnove za analizu uslova prihranjivanja vodonosne sredine.
- Simulacija grupe bunara na hidrodinamičkom modelu prema predloženoj metodologiji realnog hidrauličkog predstavljanja drenova, je omogućila sagledavanje interferencije uticaja rada bunara u zavisnosti od njihovog režima eksploatacije, ali i od prirodnih uslova terena (u prvom redu značajnijeg rasprostranjenja slabije propusnih sedimenata međusloja i propusnosti sedimenata prisutnih na dnu korita reke). Analiza rada grupe hidraulički realno simuliranih bunara sa horizontalnim drenovima, čiji su optimalni kapaciteti definisani na osnovu kriterijuma biohemijskog kolmiranja drenova u prvom koraku istraživanja, a potom usklađeni sa optimalnim uslovima hidrauličkog režima rada svakog od bunara i raspoloživim resursom podzemnih voda na njihovim lokacijama je bio prvi primer ove vrste u predmetnoj naučno–istraživačkoj oblasti u svetskim okvirima.
- Na osnovama naučnog vrednovanja dobijenih rezultata, može se konstatovati da je predložena metodologija hidraulički realne simulacije bunara, zajedno sa simulacijom ostvarenog režima

nivoa izdani rezultirala predlogom metodologije sveobuhvatnog definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvoristu podzemnih voda i da kao takva može služiti kao teorijski osnov primenljiv i na drugim terenima koji se odlikuju nepovoljnim hidrohemijskim i hidrogeološkim uslovima, u kojima je rad bunara praćen procesima intenzivnog starenja.

U odnosu na dosadašnja hidrodinamička istraživanja, u sprovedenoj hidrodinamičkoj analizi je primenjen pristup koji podrazumeva da se proces starenja bunara: analizira simulacijom kontinualnog rada bunara (umesto simulacije povremeno vršenih opita testiranja), da se drenovi predstavljaju realnim geometrijskim i konstruktivnim karakteristikama, da se kvantifikuju realne umesto hidraulički ekvivalentnih karakteristika propusnosti drenova, da se uticaj reke Save kao dominantnog izvora prihranjivanja izdani predstavi detaljnom diskretizacijom vodostaja, da se doticaj iz pravca zaleđa predstavi vremenski promenljivim nivoima podzemnih voda merenim u pijezometrima, da se izvrši detaljna hidrogeološka i hidrodinamička šematizacija izdani.

Sprovedeni postupak izrade 3D hidrogeološkog modela predstavlja unapređenje u odnosu na dosadašnju metodologiju i iskustva izrade hidrogeoloških modela beogradskog izvorišta 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 je obuhvaćeno izrađenim modelom. Takvi su npr., uticaj rukavca Adica i kanala Mala Adica u zoni detaljno analiziranog bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m. Iako su hidrodinamički modeli analiziranog bunara rađeni i ranije, rukavac i kanal su prvi put uključeni u prostor modela četiri bunara koji su locirani duž pružanja rukavca i kanala. Formiranje hidrodinamičkog modela u okviru istraživanja sprovedenih za potrebe izrade predmetne disertacije je pokazalo da bez zadavanja ovih površinskih vodnih tela predmetni model nije mogao biti adekvatno kalibrisan.

Imajući u vidu prethodno predstavljene zaključke o značaju i uticaju prifilterske zone drenova na kapacitet i hidraulički režim rada bunara, kao i uticaja prifilterske zone na proces starenja drenova putem njihovog mehaničkog i biohemijskog kolmiranja, u završnom delu sprovedenih modelskih ispitivanja su pod ulaznim brzinama podrazumevane ulazne brzine podzemnih voda u prifiltersku zonu drena, umesto ulaznih brzina u filtersku konstrukciju drena. Ovaj pristup predstavlja novinu u odnosu na dosadašnja numerička modelska hidrodinamička istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima.

Utvrđeno je da su stvarni uzroci starenja obnovljenih bunara višestruki, tj. da nisu vezani samo za prirodne uslove vodonosne sredine (sadržaj rastvorenog gvožđa u zahvaćenim podzemnim vodama i vrednosti ulaznih brzina podzemnih voda na konturi drenova), kao što se to prethodno smatralo. Utvrđeno je da su na drenovima analiziranog bunara prisutna dva različita oblika kolmiranja – mehaničko i biohemijsko. Uzrok mehaničkog kolmiranja je vezan za kvalitet samih drenova, tj. kvalitet ugrađenog filterskog zasipa i dimenzije otvora na filterskoj konstrukciji drenova. Na ovaj način inicijalno narušena hidraulička sposobnost drenova je predisponirala dalji razvoj starenja bunara, putem taloženja gvožđa u pornom prostoru prifilterske zone, koju predstavlja filterski zasip drenova. Predložen je nov način izražavanja hidrauličke funkcionalnosti drenova na bunarima, koji se može primeniti i na druge vodozahvatne objekte u intergranularnoj poroznoj sredini (naročito na horizontalne bunare i vodozahvatne drenaže), kao i nov pristup kvantifikovanja procesa starenja bunara putem numeričke hidrodinamičke analize.

## 2 PRIKAZ GEOLOŠKE GRAĐE I HIDROGEOLOŠKIH ODLIKA TERENA BEOGRADSKOG IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA

Izvorište podzemnih voda Beograda je formirano u priobalju reke Save, u sedimentima kvartarne starosti i aluvijalne geneze. Može se reći da je izuzetna prostorna heterogenost litostratigrafskog sastava i hidrogeoloških svojstava sedimenata (čak i na sasvim malom prostoru – u zoni lepeze drenova jednog bunara sa horizontalnim drenovima) osnovna prirodna odlika beogradskog izvorišta. Ovakvo stanje je rezultat kompleksnih uslova geneze, prema aktuelnim shvatanjima vezane za intenzivnu tektonsku aktivnost koja se odvijala tokom kraja pliocena i donjeg pleistocena, kao i za specifične paleoklimatske uslove tokom celog kvartara.

Tektonska aktivnost se manifestovala višestrukim izdizanjem horsta Fruške Gore na severozapadu i beogradskog pobrđa na jugu, uz istovremeno spuštanje rova (paleo) Save između ove dve strukture (Toljić et al., 2014). Drastične globalne promene klimatskih uslova tokom pleistocena su drugi najznačajniji agens nastanka karakteristične policiklične građe sedimenata koji čine izdan beogradskog izvorišta. Na primeru terena izvorišta je potvrđeno pravilo da regionalne promene u geološkoj građi (prvenstveno sklopu) nastaju kao rezultat tektonske aktivnosti, dok su lokalne promene predisponirane uticajem klimatskih faktora.

Vodonosnu sredinu izvorišta podzemnih voda Beograda predstavljaju sedimenti holocenske i pleistocenske starosti, nastali u tektonski predisponiranoj depozicionoj sredini Savskog rova (Marović et al., 2002; Toljić et al., 2014). Stratifikacija izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda podrazumeva višestruke smene generalno grubozrnih, peskovito–šljunkovitih sedimenata korita sa sedimentima povodnja, tipično alevritsko–glinovitog litološkog sastava. Granulometrijska heterogenost slojeva ukazuje na uslove kratkog transporta i brze depozicije geološkog materijala. Debljina izdanske zone u granicama izvorišta se kreće u dijapazonu oko 25 m (na prostoru tzv. nizvodnog sektora izvorišta, tj. nizvodno od Ostružničkog mosta 25–30 m; oko 20 m na delu tzv. uzvodnog sektora, tj. uzvodno od Ostružničkog mosta), a u zoni istražnog prostora obuhvaćenog hidrodinamičkim modelom 20–25 m.

Prema superpoziciji stvaranja, genetskim karakteristikama, litološkom sastavu i hidrogeološkim odlikama, na prostoru beogradskog izvorišta podzemnih voda mogu se izdvojiti dva tipa kvartarnih naslaga (Božović et al., 2022):

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

Kao što Božović et al. (2022) navode, jezersko–barsko–terestični sedimenti plio–pleistocenske starosti predstavljaju povlatu panonu i podinu pleistocenskim aluvijalnim tvorevinama na najvećem delu prostora izvorišta (Marović et al., 2002; Knežević et al., 2012; 2018; Nenadić & Gaudenji, 2014; Zarić, 2019). Od pleistocenskih rečnih naslaga se jasno razlikuju prema litološkom sastavu. Predstavljeni 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 (Nenadić, 2003; Nenadić et al., 2001; 2009). Iako mogu imati sličan sastav sa naslagama panona u njihovoj neposrednoj podini, odlika po kojoj se od njih razlikuju je karakteristična paleontološka sterilnost (Nenadić et al., 2011; Nenadić & Bogićević, 2014; 2015a; 2015b; 2016). Na osnovu svega nekoliko dubljih istražnih bušotina, debljina im je određena orijentaciono na nekoliko desetina metara, dok lokalno može biti veća od 100 m (Nenadić et al., 2010). Iz razloga litološkog sastava i debljine, ove tvorevine se smatraju vodonepropusnom podinom kaptiranoj zbijenoj izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda.

U okviru rečnih naslaga, u kojima je formirana izdan 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 savremenog toka Save i njenih pritoka.

Budući da su slične u pogledu litološkog sastava klastita, Božović et al. (2022) ističu da nije jednostavno povući granicu razdvajanja između sedimenata koji pripadaju starijem delu profila rečnih naslaga u odnosu na holocenske sedimente. Ipak, 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., 2012; 2013; 2014; Knežević et al., 2018).

Eksploatacija podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima (kao i bušenih vertikalnih bunara) je vezana za stariji deo profila kvartarnih naslaga (ranije poznat kao „makiški slojevi“ i „slojevi sa *Corbicula fluminalis*“, a danas kao „slojevi sa pleistocenskom *Corbicula*–om“; Gaudenyi et al., 2015). I starije i mlađe vodonosne sedimente odlikuje karakteristična policiklična građa koja je rezultat višestrukog taloženja sedimenata facije korita i facije povodnja, uz često prisustvo tvorevina facije mrtvaja ili starača. Zajedničko za sve cikluse je da se po pravilu pri dnu nalaze sedimenti facije korita, šljunkovito–peskovitog litološkog sastava, koji prema površini terena prelaze u peskove različite krupnoće zrna.

Prema rečima autora Božović et al. (2022), na delu izvorišta podzemnih voda Beograda nizvodno od Ostružničkog mosta, kojem pripada analizirano područje obuhvaćeno hidrodinamičkim modelom, 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. Debljina pleistocenskih naslaga je u proseku oko 15 m na prostoru nizvodno od Ostružničkog mosta, kojem pripada i Makiško polje, sa bunarom RB–5m.

Kao završni članovi svakog od ciklusa sedimentacije lokalno su prisutni sedimenti povodnja (mestimično i starača). Obično se javljaju u vidu sočiva i proslojaka, ograničenog horizontalnog rasprostranjenja. U pogledu litološkog sastava, sedimenti povodnja su predstavljeni 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 slabije propusni i kao takvi imaju nepovoljnu hidrauličku funkciju i uticaj na rad bunara sa horizontalnim drenovima. Samim tim, njihovo prisustvo značajno ograničava i otežava eksploataciju podzemnih voda, o čemu detaljnije govore Božović et al. (2016a).

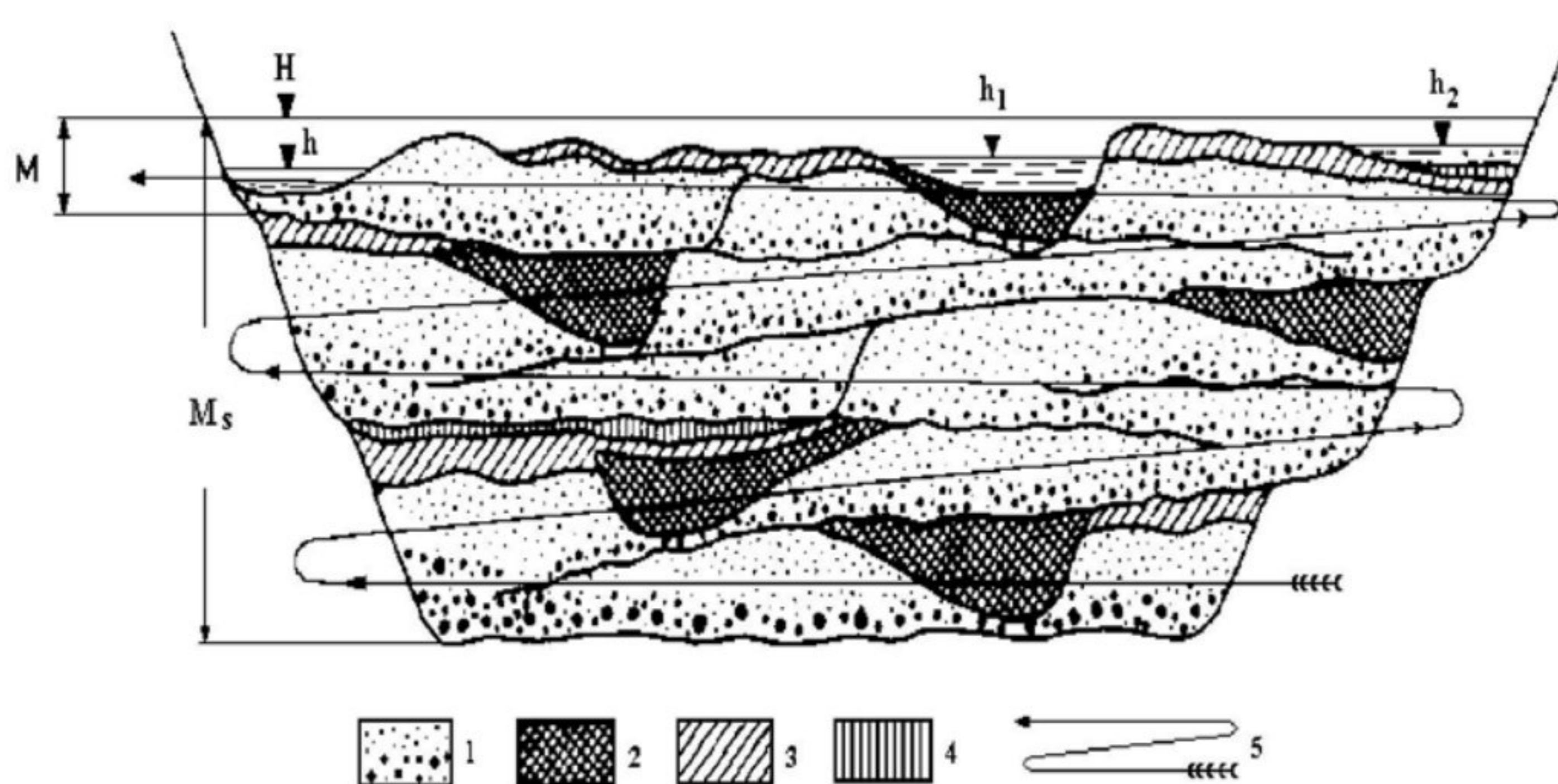
Holocenski sedimenti Save su mlađi stratigrafski član u paketu aluvijalnih sedimenata. Deponovani su diskordantno preko sedimenata donjeg i srednjeg pleistocena, budući da su naslage gornjeg pleistocena intenzivno erodovane u fazi stvaranja korita reke na početku holocena. Sedimenti facije korita holocenske 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 generalno 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 se kreće oko 5 m. U pogledu hidrogeoloških svojstava, one

imaju funkciju slabopropusne povlate izdani. Zbog svojih filtracionih karakteristika i debljine, pružaju relativno dobru zaštitu vodonosnoj sredini od zagađenja sa površine terena.

Kompleksna građa aluvijalnih naslaga beogradskog izvorišta se trenutno najpotpunije objašnjava Šancerovim dinamičkim modelom konstrativne rečne faze (slika 3; Nenadić et al., 2010), uz uticaj bočnih pritoka sa padina koje čine obod aluvijalne ravni (Knežević et al., 2012). Međutim, brze bočne smene sedimenata različitog litološkog i geohemijskog sastava, često na rastojanju od svega nekoliko metara, su nešto što ukazuje da je navedeni model pojednostavljen, mada se uspešno koristi za rešavanje praktičnih, inženjerskih zadataka (za koje je po pravilu dovoljno definisati litološku slojevitost u profilu).

Dalja istraživanja u pravcu identifikacije uticaja bočnih pritoka u zapunjavanju prostora savskog rova tokom pleistocena su neophodna. Imajući u vidu dosadašnje pojedinačne napore i doprinos istraživača ovog terena, može se reći da je potrebno formirati tim istraživača različitih geoloških disciplina (uz obezbeđenje uslova potrebnih za istraživanje), kako bi se postavio valjan geološki model geneze terena beogradskog izvorišta.



Slika 3: Model konstrativne dinamičke faze (iz Rakić, 1977, prema Shantser, 1951; u Božović et al., 2016b)

Objašnjenje uz sliku 14: 1. aluvijum rečnog korita; 2. aluvijum starača; 3. aluvijum povodnja; 4. sedimenti sekundarnih basena; 5. pravac migracije korita; H – nivo povodanjskih voda; h – srednji nivo u koritu;  $h_1$ ,  $h_2$  – srednji nivoi u staračama i sekundarnim basenima; M – normalna debljina aluvijuma;  $M_s$  – ukupna debljina aluvijuma.

### 3 TEORIJSKI OSNOV HIDRODINAMIČKIH ISTRAŽIVANJA PROCESA STARENJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA

#### 3.1 Pregled dosadašnjih hidrauličkih i hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima

Hidrodinamička istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima imaju bogatu istoriju, čiji hronološki pregled govori da su na razvoj metoda istraživanja ovog tipa bunara određenim delom uticali pristupi u istraživanjima i rezultati dobijeni u oblasti primene drugih tipova horizontalnih vodozahvatnih objekata do kojih su dolazili istraživači širom sveta. Kao što su konstatovali Collins & Houben (2020), praktično sve metode hidrauličkih i hidrodinamičkih ispitivanja istorijski prisutne u oblasti dinamike podzemnih voda primenjivane su i u oblasti zahvatanja podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima. Do danas su data dva istorijska pregleda razvoja hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima, zajedno sa horizontalnim bunarima i drenažama, koja su stručnoj javnosti predstavljena nedavno i u kratkom vremenskom razmaku. Tako su Božović et al. (2020b) svoje rezultate pregleda prvenstveno namenili istraživačima u Srbiji, sadašnjim i budućim, imajući u vidu da se bunarima sa horizontalnim drenovima obezbeđuju podzemne vode za potrebe vodosnabdevanja Beograda i Novog Sada, čija su izvorišta najveća u zemlji u okviru zbijene izdani i u pogledu količina zahvaćenih podzemnih voda. Houben et al. (2022) nastoje da pruže argumente u prilog šire upotrebe horizontalnih vodozahvatnih objekata u različite svrhe zahvatanja podzemnih voda, budući da je poslednjih godina primetan porast interesovanja za izgradnju ovih vodozahvatnih objekata širom Azije, a prvenstveno u Kini.

U ovom poglavlju disertacije, aspekt istorijata hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima je predstavljen kao izvod najznačajnijih rezultata i saznanja proisteklih iz rada objavljenog u časopisu „Vodoprivreda“ krajem 2020. godine od strane autora Božović et al. (2020b). Prikupljanje dosadašnjih naučnih rezultata u oblasti predmetnih istraživanja, kako na nacionalnom tako i na međunarodnom nivou, bilo je predviđeno obrazloženjem predloga teme doktorske disertacije. Aktivnosti sprovedene u okviru istraživanja istorijata hidrodinamičkih istraživanja za potrebe izrade disertacije su obuhvatile izučavanje primenjenih metodoloških pristupa, a naročito koncepcija numeričkih simulacija bunara, sa zaključcima o prednostima i ograničenjima u svakom analiziranom slučaju korišćenih matematičkih/numeričkih metoda, graničnih uslova i pristupa diskretizacije prostora u zoni bunara. Sistematizacija i analiza rezultata dosadašnjih istraživanja je data hronološki, kako bi se u okviru predmetne doktorske disertacije mogao prikazati tok narastanja naučnog saznanja u predmetnoj oblasti i u takvom kontekstu pozicionirala istraživanja sprovedena u okviru izrade disertacije.

##### 3.1.1 Primenjene metode i rezultati dosadašnjih hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima

Prva hidrodinamička istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima su vezana za period nakon Drugog svetskog rata, kada počinje sistematska izgradnja ovog tipa bunara za potrebe vodosnabdevanja gradova u Evropi i u Sjedinjenim Američkim Državama. Na osnovu rezultata izgradnje nekoliko prvih bunara sa horizontalnim drenovima, ostvareni visoki kapaciteti su postali svojevrsno merilo za ocenu uspešnosti njihove izgradnje, tako da su kapaciteti od nekoliko stotina litara u sekundi podrazumevani. Međutim, iskustva eksploatacije su pokazala drugačije rezultate, zbog čega se postavilo pitanje pouzdanijeg definisanja početnog kapaciteta bunara u različitim hidrogeološkim i hidrološkim uslovima. Iz ovog razloga su započeta hidrodinamička istraživanja koja su se zasnivala na primeni matematičkih metoda u oblasti dinamike podzemnih voda. Ovakav pristup u istraživanjima je pružio naučnu objektivnost i kvantitativan karakter dobijenih rezultata, umesto dotadašnjeg mahom empirijskog (Božović et al., 2020b).

Hidrodinamička istraživanja se mogu svrstati u dve grupe u odnosu na pristup matematičkog rešavanja jednačina kojima se opisuje kretanje podzemnih voda pod uticajem rada bunara sa horizontalnim drenovima (zajedno sa horizontalnim bunarima i drenažama) – istraživanja zasnovana na primeni *analitičkih* i *numeričkih metoda*. U okviru predstavljanja najznačajnijih rezultata primene analitičkih i numeričkih metoda (dominantno u vidu publikovanih radova), u disertaciji je izvršena dalja klasifikacija prema nameni istraživanja. Tako su u okviru srodnih grupa izdvojena istraživanja vezana za izučavanje:

- veličine sniženja nivoa podzemnih voda kao posledice zahvatanja bunarima sa horizontalnim drenovima (najčešće određivanih u okviru opitnih crpenja), kao i definisanja kapaciteta bunara;
- zone uticaja rada bunara (engl. *capture zone*) i vremena kretanja podzemnih voda kroz geološku sredinu do trenutka zahvatanja bunarom (engl. *capture time*), koje su najčešće istraživane za potrebe zaštite i remedijacije podzemnih voda,
- opadanja vodostaja površinskog toka kao posledice rada bunara uz njene obale (Tsou et al, 2010; Maroney & Rehmann, 2017),
- hidrauličkih otpora u bunaru (engl. *in-well hydraulics*),
- adekvatnog graničnog uslova za predstavljanje bunara na analitičkim i numeričkim modelima, zajedno sa pitanjem unutrašnjeg graničnog uslova.

Prva hidrodinamička istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima su započeta krajem '40. godina 20. veka. Ona su bila zasnovana na empirijskim izrazima za procenu početnog kapaciteta bunara, putem kojih su istraživači pokušali utvrditi i u vidu matematičkih izraza, manje ili više kompleksnih jednačina, izraziti zavisnost kapaciteta bunara od sniženja nivoa u izdani, debljine i filtracionih karakteristika vodonosne sredine i osnovnih tehničkih karakteristika vodozahvatnog objekta (broja, pojedinačne i ukupne dužine drenova, međusobnog ugla). Rezultati istraživanja su imali ograničenu primenu, najviše iz razloga naglašene empirijske prirode parametara sadržanih u jednačinama, čije su vrednosti dobijene merenjima u okviru jednog izvorišta ili, češće, u zoni samo jednog bunara. Kao takve, one nisu mogle imati opšti značaj.

Početakom '60. godina prošlog veka, istraživači nastoje da svoje rezultate učine univerzalno primenljivim, zbog čega počinju vršiti laboratorijske eksperimente, u koje svrhe izrađuju analogne elektro–hidrodinamičke modele (Kordas, 1961; Debrine, 1970). Istraživanja domaćih autora su u tom periodu imala istaknut doprinos (Milojević, 1961; 1963a; b; 1965a; b; Babac & Babac, 2005).

Prekretnicu u hidrauličkim istraživanjima bunara sa horizontalnim drenovima je predstavljalo istraživanje autora Hantush & Papadopoulos (1962), u kojem je dato analitičko rešenje za prognozu sniženja nivoa podzemnih voda u zoni drenova, u izdani sa slobodnim nivoom i nivoom pod pritiskom, za stacionarne i nestacionarne uslove. Uslovi koje su pretpostavili autori u okviru analitičkog modela su podrazumevali da je izdan konstantne debljine, homogenih i izotropnih filtracionih karakteristika, da je raspodela proticaja duž drena (tj. doticaj u dren) ravnomerna, dok su gubici na drenu i unutar drena zanemareni. Autori su analizirali slučaj bunara sa samo jednim horizontalnim drenom, zbog čega se može pitati da li se suštinski radi o slučaju horizontalnog bunara, a ne bunara sa horizontalnim drenovima. Istraživanje autora Hantush & Papadopoulos (1962) je dopunio Hantush (1964) i konstatovao da neravnomeran doticaj podzemnih voda u drenove, sa konstantnim pijeziometarskim nivoom unutar drenova, predstavlja bolju aproksimaciju realnog stanja od uslova ravnomernog doticaja podzemnih voda u dren.

Autor Zhan (1999) je definisao analitičko rešenje za proračun vremena putovanja podzemnih voda do horizontalnog bunara u cilju remedijacije izdani (pod pritiskom, homogenih filtracionih karakteristika, sa i bez prisustva anizotropije). Analitičko rešenje je provereno numeričkom metodom (uz upotrebu MODFLOW i MODPATH programa). Iako je pitanje adekvatnog matematičkog predstavljanja bunara sa horizontalnim drenovima otvoreno decenijama ranije, može se reći da od istraživanja autora Zhan (1999) započinje intenzivnija diskusija na ovu temu.

Značajno istraživanje predstavljaju autori Zhan & Zlotnik (2002) koji su analizirali sniženje nivoa izdani u zoni hipotetičkog horizontalnog bunara. Analitički model koji su autori formirali je podrazumevao homogenu i anizotropnu izdan sa slobodnim nivoom. Analitičko rešenje je testirano numeričkim pristupom, primenom metode konačnih razlika, simulacijom realizovanom u MODFLOW programu. Bunar je predstavljen preko oba karakteristična granična uslova – ravnomernog proticaja (engl. *Uniform flux*) i ravnomernog nivoa podzemnih voda (engl. *Uniform head*). U slučaju uslova ravnomernog nivoa, unutar svake diskretne ćelije koja na modelu predstavlja bunar, zadata je visoka vrednost koeficijenta filtracije kako bi se simuliralo odsustvo hidrauličkog otpora u unutrašnjosti bunara.

Autori Chen et al. (2003) su predložili nov pristup predstavljanja horizontalnih bunara u odnosu na tok podzemnih voda unutar bunara i vrednost Rejnoldsovog broja, tako da ne koriste ni uslov ravnomernog proticaja ni ravnomernog nivoa. Stavovi autora u pogledu izbora graničnog uslova su rigorozniji u odnosu na dotadašnja shvatanja. Naime, autori ističu da ni jedan od dva tipična granična uslova (ravnomernog proticaja i ravnomernog nivoa) nije adekvatna reprezentacija realne raspodele proticaja i pijeziometarskog nivoa duž horizontalnog bunara, zbog čega primenjuju koncept hidraulički ekvivalentne porozne sredine unutar bunara.

Pored otpora kretanju podzemnih voda u prifilterskoj zoni bunara (bilo kakva da je njena geneza i debljina) javlja se i gubitak usled konvergencije, tj. suženja toka podzemnih voda i koncentrisanja strujnica, odnosno prelaska iz radijalnog difuznog u strujanje koje se sve više usmerava prema otvorima na filterskoj konstrukciji. Zatim, dolazi do gubitka prilikom prelaska iz porozne sredine kroz otvore na filteru prema unutrašnjosti filterske cevi drena, kao i otpora na trenje o zidove bunarske konstrukcije i unutrašnjeg trenja same tečnosti. Neki od navedenih gubitaka imaju samo teorijski značaj, dok se u praktičnim problemima oni zanemaruju ili posmatraju kao ukupni otpori u prifilterskoj zoni i na filterskoj konstrukciji bunara, što je dominantan pristup u numeričkim simulacijama bunara sa horizontalnim drenovima. Sa druge strane, gubitke unutar bunara, tj. drena je moguće odrediti, iako najčešće aproksimativno.

Numerički pristup u hidrodinamičkim istraživanjima bunara sa horizontalnim drenovima podrazumeva izradu detaljnih hidrodinamičkih modela koji su zasnovani na primeni jedne od numeričkih metoda rešavanja sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina. Najčešće numeričke metode zastupljene u primenjenom modeliranju podzemnih voda su: metoda analitičkih elemenata, metoda konačnih razlika, metoda konačnih elemenata i metoda konačnih zapremina (Bear & Cheng, 2010; Yeh & Chang, 2012).

U hronološki najstarijim numeričkim hidrodinamičkim istraživanjima (tokom '80. i '90. godina prošlog veka), bilo je uobičajeno da se na modelima bunara sa horizontalnim drenovima simulira kao hidraulički ekvivalentan vertikalni (bušeni) bunar velikog prečnika (Ophori & Farvolden, 1985). Ova tehnika predstavljanja bunara je kasnije unapređena tako što su na modelu, u zoni koja odgovara zoni lepeze drenova u planu, zadavane visoke vrednosti koeficijenta filtracije porozne sredine, kako bi se generisala strujna slika slična stvarnom rasporedu pijeziometarskih nivoa u zoni analiziranog bunara. Prvi pokušaji za eksplicitnim zadavanjem drenova na modelima su bili praćeni intenzivnom diskretizacijom prostora modela u planu i profilu. Naime, diskretizacijom u profilu se težilo tome da hidrogeološki sloj u kojem su utisnuti drenovi, na modelu bude predstavljen hidrodinamičkim slojem čija debljina odgovara prečniku drenova (0,2–0,3 m). Ograničenja metode konačnih razlika i strukturirane mreže diskretnih polja su uslovia različite pristupe diskretizacije prostora u zoni bunara u planu, kako bi drenovi na modelu imali prostornu orijentaciju koja odgovara trasama realnog, simuliranog bunara.

Pitanje unutrašnjeg graničnog uslova je dilema koja je prisutna od vremena prvih hidrodinamičkih analiza bunara sa horizontalnim drenovima, početkom '60. godina prošlog veka. U poslednje dve decenije, u okviru analitičkih modela je dominantno primenjivan unutrašnji granični uslov

ravnomernog doticaja u dren, dok su na numeričkim modelima drenovi predstavljani preko ravnomernog pijezometarskog nivoa unutar drenova, koji je verodostojniji realnim uslovima.

Za potrebe analize optimalne dužine filterske konstrukcije horizontalnog bunara, kao i kapaciteta crpenja koji bi rezultirao željenim sniženjem nivoa podzemnih voda i zahvatanja zagađenja izdani ispod tela deponije, autori Speake et al. (1991) koriste numerički pristup i formiraju višeslojni hidrodinamički model u MODFLOW programu, na osnovu metode konačnih razlika. Na modelu je horizontalni bunar predstavljen na osnovu principa ekvivalentne porozne sredine, uz upotrebu numeričkog paketa „drenaža“ (engl. *Drain*).

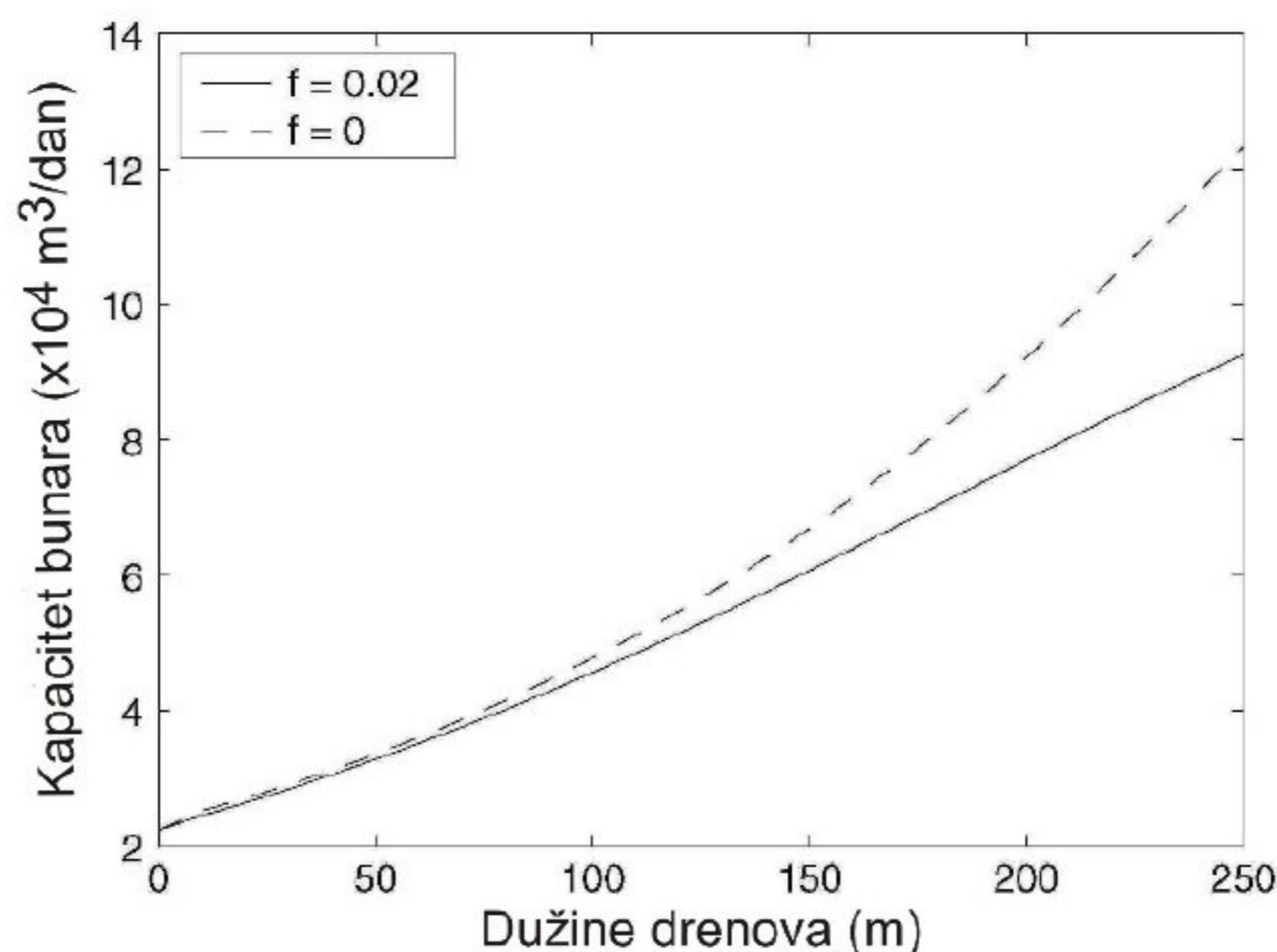
Zahvaljujući modularnoj prirodi MODFLOW koda, autori Lieuallen–Dulam & Sawyer (1997) su izvršili izmene u njegovom numeričkom paketu „bunar“ (engl. *Well*) u cilju sprovođenja preciznije i verodostojnije simulacije bunara na hidrodinamičkom modelu. Izmenama su omogućili prelazak sa uobičajenog pristupa hidraulički ekvivalentnog bunara na simulaciju bunara bližeg realnijim uslovima, bunara čiji rad je praćen hidrauličkim otporima. Ovaj prelazak je izvršen tako što je bunar na modelu predstavljen kretanjem podzemnih voda kroz cev, uz matematičko povezivanje razmene podzemnih voda između diskretnih polja koje predstavljaju izdan i polja koja predstavljaju bunar. Pristup je nazvan „teorija povezanih ćelija“ i imao je značajan uticaj na dalji razvoj teorije modeliranja bunara.

Autori Sawyer & Lieuallen–Dulam (1998) su formirali numerički model kretanja podzemnih voda i transporta materije u MODFLOW i MT3D okruženju, u cilju poređenja efikasnosti vertikalnih i horizontalnih bunara u svrhe remedijacije izdani. Horizontalni bunar je na modelu predstavljen zadavanjem graničnog uslova ravnomernog nivoa, dok je kapacitet bunara kalibrisana veličina koja je iterativnim proračunima usaglašena sa poznatom vrednošću kapaciteta i nivoima podzemnih voda u izdani. Autori su konstatovali da je ovakav način simulacije bunara precizan u dovoljnoj meri, jer su kapaciteti većine horizontalnih bunara izvedenih za potrebe remedijacije izdani mali, zbog čega smatraju da su mali i gubici duž unutrašnjosti bunara. Iz ovog proizilazi da se u takvim slučajevima hidraulički otpori u bunaru mogu zanemariti.

Istraživanje autora Bakker et al. (2005) ima izuzetan značaj za razvoj teorije primenjenog modeliranja bunara sa horizontalnim drenovima, imajući u vidu da autori predlažu nov i efikasan pristup simulacije kretanja podzemnih voda prema bunaru. Numerička metoda koju autori koriste je metoda analitičkih elemenata. Metodologija koju su autori razvili omogućava uključivanje svih aspekata koji čine jedinstven i kompleksan *granični uslov „dren“*, uključujući otpore u prifilterskoj zoni drena, kao i unutrašnje gubitke na račun trenja usled kretanja podzemnih voda unutar filterske konstrukcije i punih cevi. Doticaj u dren je određen slično načinu na koji ga u svom radu definišu autori Park & Zhan (2002), preko parametra koji predstavlja otpor infiltraciji podzemnih voda iz vodonosne sredine u dren. Inicijalno je odabran granični uslov ravnomernog nivoa u drenu, međutim, uključanjem otpora u prifilterskoj zoni i gubitaka usled trenja u unutrašnjosti drena, prvobitni granični uslov postaje mešoviti granični uslov (granični uslov treće vrste). Proračun gubitaka unutar drena autori vrše pomoću Darsi–Vajzbahove jednačine (Munson et al., 2009). Budući da vrednost koeficijenta trenja nije poznata za bunarske filterske cevi, autori definišu i usvajaju vrednost zasnovanu na vrednosti Rejnoldsovog broja. Rezultati pokazuju da se uticaj otpora na trenje unutar filterske konstrukcije povećava sa povećanjem dužine drenova. Ipak, za uobičajene dužine drenova (50–60 m) i kapacitete pojedinačnih drenova do oko  $q_d=35$  l/s, unutrašnji otpori su praktično zanemarljivi (*slika 4*).

Autori Mohamed & Rushton (2006) su na numeričkom modelu zasnovanom na primeni metode konačnih razlika analizirali horizontalni bunar. Tom prilikom, autori su konstatovali da se u analiziranom hidrogeološkom sistemu razlikuju tri komponente toka podzemnih voda: a) kretanje u izdani pod uticajem izvora prihranjivanja i dreniranja, b) kretanje prema bunaru i c) kretanje unutar samog bunara. Sve otpore koji postoje na spoljašnjoj konturi bunara, zajedno sa otporima na ulasku

podzemnih voda kroz perforacije na filterskoj konstrukciji autori predstavljaju preko empirijskog parametra koeficijenta hidrauličke provodljivosti. Ovaj hidraulički parametar u sebi objedinjuje geometriju vodoprijemnog dela bunara, zajedno sa filtracionim karakteristikama i debljinom prifilterske zone. Objedinivši otpore na bunaru sa gubicima unutar bunara (koji su sračunati preko Hazen–Vilijamsove formule; Rushton, 2006) autori su kvantifikovali veličinu pada pijezometarskog nivoa i zaključili da granični uslov ravnog proticaja nije utemeljeno koristiti u slučaju iole značajnije dužine horizontalnih bunara.

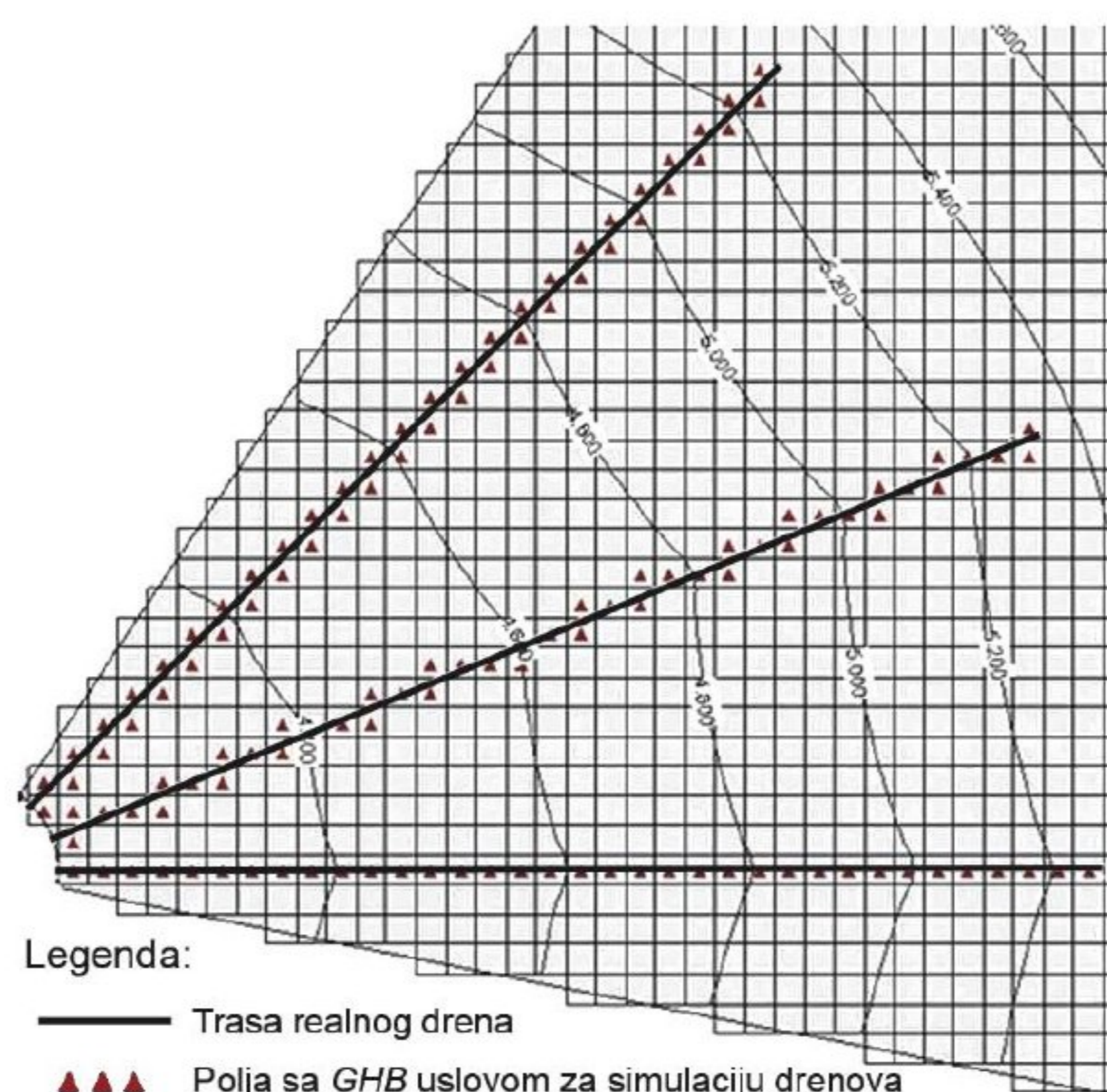


Slika 4: Zavisnost kapaciteta bunara od dužine drenova i uticaja unutrašnjeg otpora (Bakker et al., 2005, izmenjeno)

Autori Patel et al. (2010) koriste numeričku metodu analitičkih elemenata za simulaciju realnog bunara sa horizontalnim drenovima u izdani sa slobodnim nivoom, lociranim uz obalu reke. Cilj istraživanja je bila analiza odnosa sniženja nivoa podzemnih voda i kapaciteta bunara, zatim efekata različitih konfiguracija drenova, filtracionih karakteristika izdani i koeficijenta hidrauličke provodljivosti drenova na kapacitet bunara. Na modelu su drenovi predstavljeni kao linijski analitički elementi, sa graničnim uslovom ravnog nivoa (na način sličan sa Bakker et al., 2005). Usvojeno je da je pijezometarski nivo unutar drenova jednak nivou u vodosabirnom bunarskom šahtu, kao i da otpori unutar drenova imaju zanemarljiv uticaj na pad nivoa. Realizacija proračuna na modelu je za rezultat imala raspodelu doticaja u drenove, koja pokazuje da je doticaj neravnomeran i da se smanjuje posmatrano od kraja drenova prema bunarskom šahtu.

U cilju provere dobijenih rezultata i primenljivosti formiranog modela analitičkih elemenata i upotrebljenih graničnih uslova, autori Patel et al. (2010) su formirali višeslojeviti model na osnovu metode konačnih razlika. Jedno od najvećih ograničenja u primeni metode konačnih razlika u simulaciji bunara sa horizontalnim drenovima je vezano za mrežu diskretnih polja i prostornu orijentaciju drenova. Naime, po pravilu, drenovi se nalaze pod određenim uglom u odnosu na pravougaonu mrežu diskretnih polja, zbog čega je potrebno vršiti dodatna prilagođavanja mreže u cilju smanjenja uticaja ovog ograničenja u geometrijskom predstavljanju bunara na rezultate modela. Najčešća tehnika za ublažavanje uticaja ovog ograničenja je dodatna diskretizacija prostora u zoni bunara, koja ima negativnu posledicu u vidu smanjenja računarske efikasnosti (povećanja dužine trajanja proračuna, potrebe za većim resursima računara, potencijalno i numeričkih nestabilnosti pri konvergenciji rešenja). U analiziranom slučaju, proračunska polja su imala generalno male dimenzije (1 x 1 m), zbog čega nije vršena dodatna diskretizacija.

Da bi dodatno redukovali uticaj orijentacije drenova, autori Patel et al. (2010) su povećali broj polja u kojima su zadali drenove, uz istovremeno smanjenje vrednosti hidrauličke provodljivosti drenova (slika 5). Drenovi su zadati kao granični uslov treće vrste, preko numeričkog paketa „opšteg pijezometarskog nivoa“ (engl. *General Head Boundary*) u MODFLOW programu.



Slika 5: Primer prevazilaženja ograničenja metode konačnih razlika u simulaciji bunara sa horizontalnim drenovima (Patel et al., 2010; prilagođeno u Božović et al., 2020b)

Autori Haitjema et al. (2010) navode da je granični uslov treće vrste adekvatan za predstavljanje bilo kog horizontalnog vodozahvatnog objekta na numeričkim modelima. Suština primene ovog graničnog uslova je u tome da se doticaj u vodozahvatni objekat ostvaruje kao funkcija razlike između pijeziometarskog nivoa u izdani i nivoa unutar drena (horizontalnog bunara ili drenaže), dok na veličinu doticaja utiče propusnost prifilterske zone. Ovakva koncepcija graničnog uslova za vodozahvatni objekat je analogna graničnom uslovu na modelima kojima se matematički predstavlja reka, tako što se prihranjivanje izdani iz pravca reke odvija na račun razlike nivoa vode u reci i nivoa podzemnih voda neposredno ispod njenog korita, dok intenzitet prihranjivanja zavisi od debljine i filtracionih karakteristika sedimenata istaloženih na dnu korita reke. O graničnom uslovu za hidraulički realnu simulaciju drenova („dren“) i njegovoj analogiji sa drugim matematičkim graničnim uslovima treće vrste i numeričkim paketima u programima za primenjeno modeliranje podzemnih voda biće više reči u narednim poglavljima disertacije.

U radu autora Lee et al. (2010) ističu se da je u okviru hidrodinamičke analize kretanja podzemnih voda prema bunaru sa horizontalnim drenovima potrebno analizirati sve tri karakteristične komponente toka podzemnih voda (u saglasnosti sa Mohamed & Rushton, 2006):

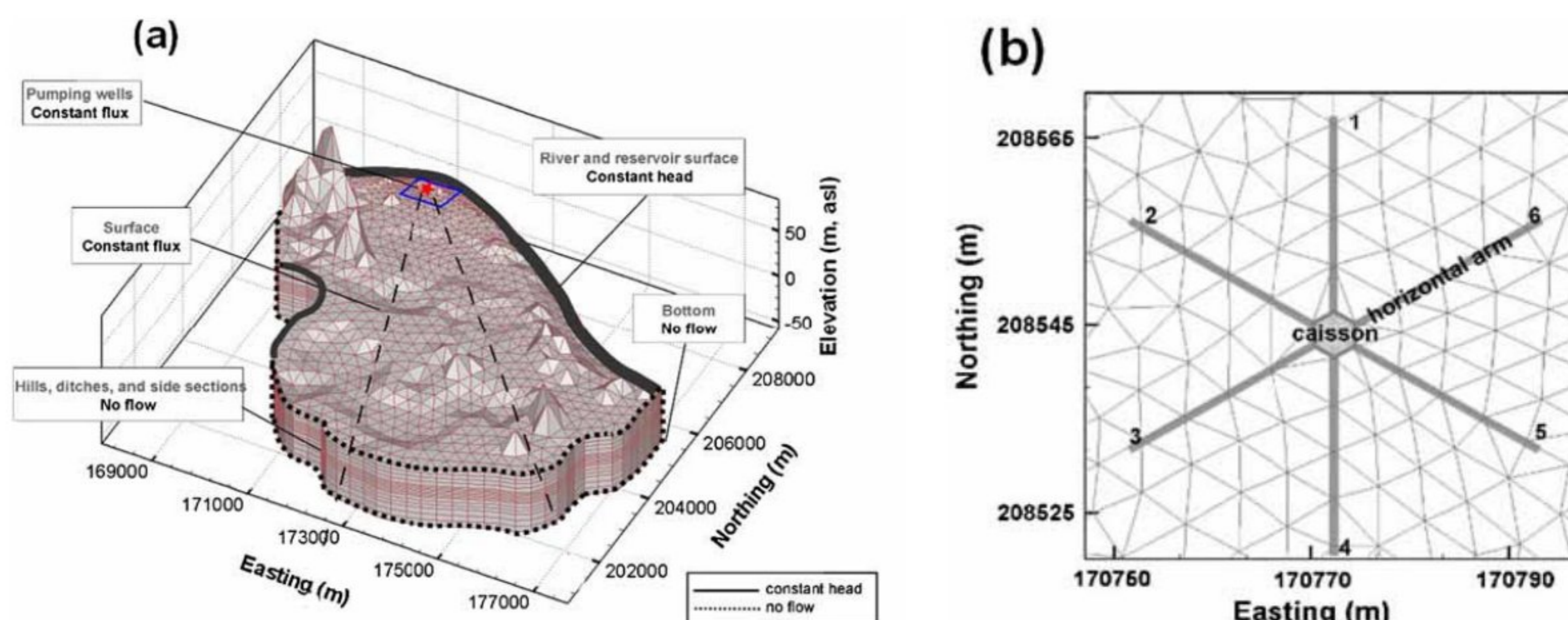
- regionalno kretanje podzemnih voda (pod uticajem graničnih uslova, izvan uticaja rada bunara),
- lokalno kretanje u okviru domena modela koji je pod direktnim uticajem rada bunara i na ulasku u sam bunar (tj. u filtersku konstrukciju drena),
- domen unutrašnjih hidrauličkih uslova i otpora unutar samih drenova bunara.

Autori rada smatraju da je uticaj otpora na spoljašnjoj konturi drenova (u prifilterskoj zoni i na ulasku u dren kroz perforacije na filterskoj konstrukciji) neophodno analizirati zajedno sa unutrašnjim otporima u drenovima. Iz tog razloga je model tretirao unutrašnje otpore na račun trenja o zidove filterskih cevi, koji zavise od vrednosti Rejnoldsovog broja i hrapavosti cevi.

Dodatno, autori Lee et al. (2010) dele mišljenje Bakker et al. (2005) i Mohamed & Rushton (2006), da se svi otpori u prifilterskoj zoni i na ulasku u filtersku konstrukciju drenova mogu uspešno predstaviti i matematički uključiti preko hidrauličkog parametra *koeficijenta propusnosti drenova*. Na formiranom numeričkom modelu koji je bio zasnovan na metodi konačnih elemenata analizirani su promenljivi režimi kretanja voda unutar drenova, uključujući tehničko–hidrauličke karakteristike drenova koje nisu bile analizirane u dotadašnjim hidrodinamičkim studijama. U cilju objedinjavanja jednačine za kretanje podzemnih voda prema drenovima sa jednačinom za kretanje unutar drenova, autori koriste iterativan postupak koji, suštinski, predstavlja analizu osetljivosti parametara koji



učestvuju u predmetnim jednačinama. Predstavljeni 3D hidrogeološki model je kasnije primenjen na primeru realnog bunara (Lee et al., 2012, slika 6).



Slika 6:(a) Šematizacija prostora obuhvaćenog numeričkim modelom u planu i profilu, sa graničnim uslovima; (b) diskretizacija uže zone simuliranog bunara sa horizontalnim drenovima (Lee et al., 2012; prilagođeno u Božović et al., 2020b)

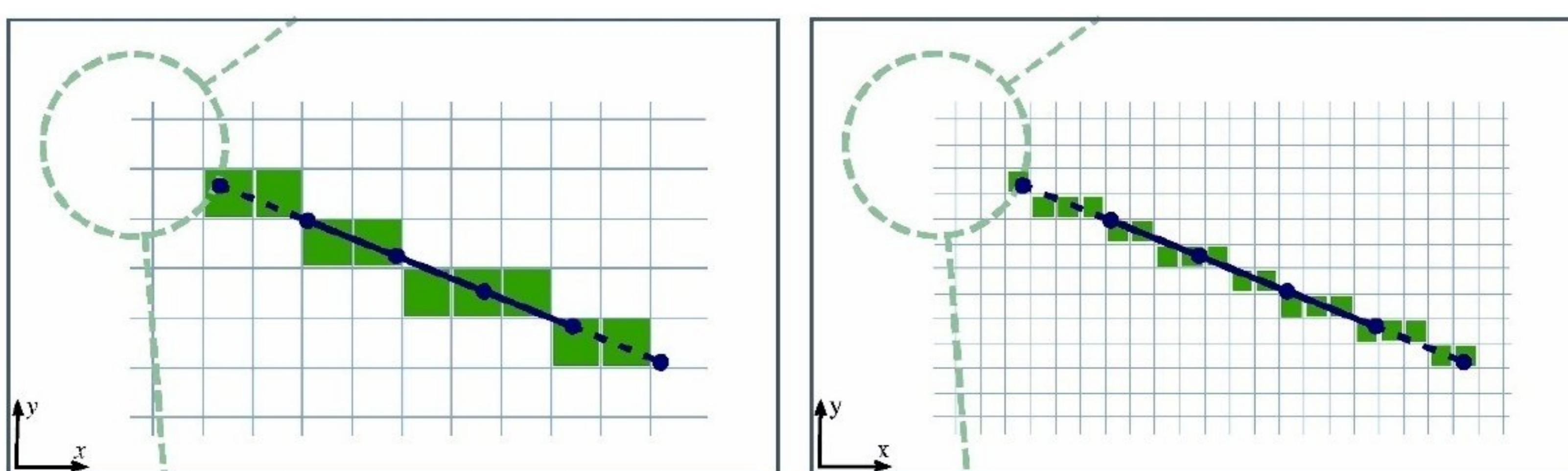
Za potrebe analize optimalnog rasporeda drenova na dva bunara čija je izgradnja predviđena u okviru postojećeg izvorišta, zajedno sa procenom kapaciteta izvorišta, autori Moore et al. (2011) su formirali 2D i 3D hidrodinamičke modele prema metodi analitičkih elemenata. Regionalni model je urađen kao 2D, dok je lokalni model sadržao i vertikalnu komponentu kretanja podzemnih voda (3D). Dva modela su međusobno povezana na način koji je sličan *Telescopic Mesh Refinement* tehnici koja se koristi u hidrodinamičkim istraživanjima na modelima izrađenim u MODFLOW programu. Na modelu su analizirane lokacije izgradnje bunara u pogledu raspoloživog resursa podzemnih voda, broja, dužina i kota utiskivanja drenova, procentualnog učešća površinskih voda u ukupno zahvaćenim podzemnim vodama i veličine doticaja po jedinici dužine drena. Drenovi su predstavljeni kao analitički elementi, pri čemu je svaki od njih bio podeljen na više segmenata male dužine kako bi se omogućila promena veličine doticaja duž drena. Matematički izraz za unutrašnji granični uslov je blizak onom koji koriste Haitjema et al. (2010).

U cilju ispitivanja uticaja zahvatanja podzemnih voda i rada ustave na reci na hidrodinamički režim podzemnih voda, autori Zhang et al. (2011) su formirali numerički hidrodinamički model, na kojem su analizirali dva procesa: širenje nadizdanske zone i kolmiranje dna korita reke. Aluvijalni sedimenti izdani su na modelu intenzivno diskretizovani u profilu. Debljina sloja u kojem su utisnuti drenovi bunara odgovara prečniku drenova (0,2 m). U planu, mreža diskretnih polja ima promenljivu diskretizaciju, koja je formirana tako da u zoni bunara sa horizontalnim drenovima i zoni reke polja imaju manje dimenzije. Rezultati kalibracije modela su ukazali da je: efikasnost rada bunara prvenstveno uslovljena kolmiranjem rečnog korita, stvaranje zone aeracije ispod dna korita u najvećoj meri uslovljeno propusnošću korita, upravljanje vodostajem reke preko brane ima uticaja na rad bunara samo u periodima kada je propusnost dna korita veća.

Na hidrodinamičkom modelu autori Appiah–Adjei et al. (2012) su simulirali opit testiranja bunara sa horizontalnim drenovima. Tom prilikom, autori su bunar predstavili preko modela dualnog kontinuuma. Pristup se zasniva na primeni izraženo različitih vodopropusnosti za izdani i bunar. Autori koriste analogiju kaverni i kanala u stenama karstne izdani, kod kojih postoji jasan kontrast propusnosti u odnosu na okolnu stensku masu. Model u hidrauličkom smislu koncipira istražni prostor kao dve sredine koje su u interakciji, tako što se bunar „prihranjuje“ doticajem iz izdani na račun razlike u pijeziometarskim nivoima. Na ovaj način, bunar deluje kao izvor dreniranja izdani u privilegovanim pravcima, koji odgovaraju prostornom položaju drenova. Autori koriste matematički izraz za kapacitet bunara koji zavisi od razlike između nivoa u bunaru i nivoa u izdani,

zajedno sa empirijskim koeficijentom provodljivosti (ili kako ga autori nazivaju „koeficijentom razmene toka“, engl. *coefficient of flow exchange*).

Kelson (2012) koristi pristupe koje su razvili Haitjema et al. (2010) i Bakker et al. (2005) upotrebom metode analitičkih elemenata, da na numeričkom modelu razvijenom u metodi konačnih razlika i MODFLOW programu predstavi hidraulički parametar otpora infiltraciji podzemnih voda iz izdani u dren. U skladu sa pristupom analitičkih elemenata, svaki od drenova je predstavljen preko niza diskretnih intervala u okviru kojih je zadat unutrašnji granični uslov. Za potrebe simulacije drenova na modelu autor je koristio numeričke pakete „drenaža“ (engl. *Drain*) i MNW2. Dodatno, autor je razvio proračunsku interpolacionu šemu prema kojoj je moguće prevazići ograničenje numeričke metode konačnih razlika tako da se i pored toga što diskretna polja u kojima se zadaje granični uslov nisu uklađena sa prostornom orijentacijom drenova, korekcijama u kodu programa, kao rezultat proračuna dobijaju piježometarski nivoi duž stvarne trase drenova. Stepenn usklađenosti proračunske i stvarane trase drena zavisi prvenstveno od broja diskretnih delova na koje je podeljen analitički element (*slika 7*).

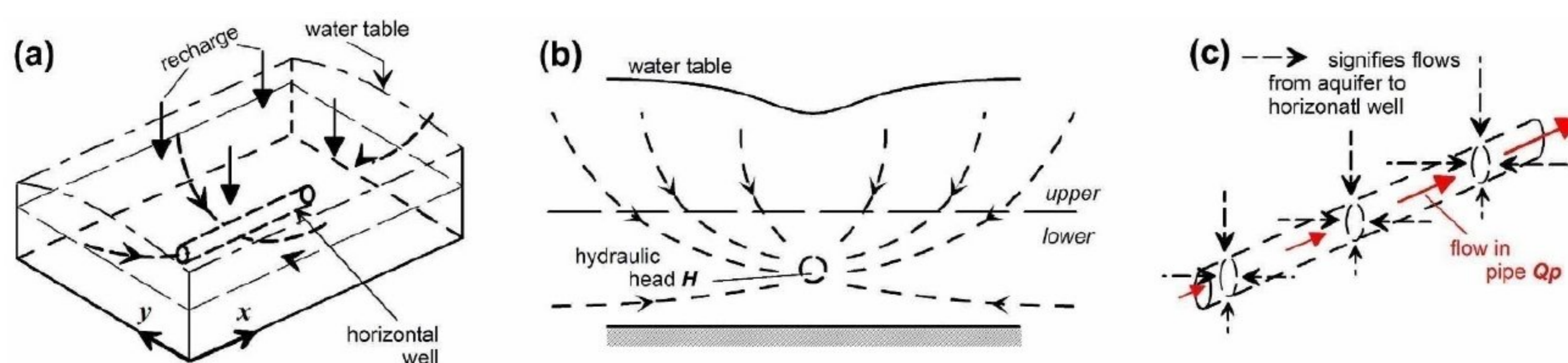


Slika 7: Uticaj različite veličine diskretnih polja u zoni drenova simuliranih preko MNW2 paketa (Kelson, 2012; prilagođeno u Božović et al., 2020b)

Numeričku hidrodinamičku analizu u cilju definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima pri kojem bi sniženje nivoa podzemnih voda na određenom rastojanju od bunara bilo manje od unapred definisane vrednosti izvršili su Ismail et al. (2012). Hidrodinamički model je izrađen u MODFLOW programu, sa intenzivnom diskretizacijom proračunskih polja u planu, kao i slojeva u profilu modela (do nivoa da sloj u kojem su utisnuti drenovi ima debljinu jednaku prečniku drenova). Drenovi na modelu su simulirani preko numeričkog paketa „drenaža“, pri čemu su filtracione karakteristike unutrašnjosti drena zadate sa nekoliko hiljada puta većom vrednošću u odnosu na vrednost koeficijenta filtracije vodonosne sredine, kako bi se simuliralo kretanje voda kroz cevi (tj. bez otpora, za razliku od kretanja kroz poroznu sredinu). Kalibracija modela je sprovedena preko statističkih pokazatelja za rezidualne piježometarskog nivoa. U cilju analize uticaja bunara na nivo izdani, analizirani su različiti scenariji konfiguracije drenova, položaja drenova u profilu izdani, kapaciteta bunara i pojedinačnog kapaciteta drenova, kao i „radnog nivoa“ (nivoa podzemnih voda u bunarskom šahtu).

Autori Rushton & Brassington (2013a; 2013b) su saglasni sa stavom prethodno navedenih istraživača da rešavanje zadataka iz oblasti horizontalnih vodozahvatnih objekata treba da obuhvati sve tri komponente ili domena procesa kretanja podzemnih voda: kretanje podzemnih voda u izdani izvan zone uticaja bunara, kretanje u zoni uticaja bunara sve do ulaska podzemnih voda u filtersku konstrukciju i kretanje unutar same bunarske konstrukcije (*slika 8*). Na dvoslojevitom hidrodinamičkom modelu analizirana je vodozahvatna cevna drenaža. Model je formiran primenom metode konačnih razlika. Mreža diskretnih polja kvadratnog oblika je imala promenljivu diskretizaciju (od 100 x 100 m u delu spoljnih kontura modela, do 10 x 10 m u zoni bunara). Vremenska diskretizacija je, takođe, bila promenljiva: osnovni vremenski korak je trajao sedam dana, dok je za potrebe simulacije šestodnevog opitnog crpenja bunara vremenski korak skraćen na svega 15 minuta. Doticaj u bunar je predstavljen preko koeficijenta provodljivosti, tj.

koeficijenta otpora bunara, matematičkim izrazom koji koriste Mohamed & Rushton (2006). Budući da su tri komponente toka podzemnih voda koje su obuhvaćene simulacijom na modelu u interakciji (domen modela izvan uticaja bunara, u zoni uticaja bunara i u unutrašnjosti samog bunara), svaka od njih je određivana sprovođenjem iterativnog postupka sve dok nisu dobijena rešenja koja zadovoljavaju kriterijume usklađenosti izmerenih i proračunskih vrednosti analiziranih veličina. Autori Rushton & Brassington (2013a; 2013b) su mišljenja da pretpostavka ravnomernog doticaja podzemnih voda u drenažu nije opravdana, kao što nije opravdan ni ravnomeran nivo unutar vodozahvatnog objekta ovog tipa sa većom dužinom i manjim prečnikom cevi. Samim tim, granični uslov treće vrste je najreprezentativniji matematički prikaz realnog stanja.



Slika 8: Prikaz tri domena režima podzemnih voda na numeričkim modelima: (a) izvan uticaja rada bunara, (b) u zoni uticaja bunara, (c) režim u unutrašnjosti bunara (Rushton & Brassington, 2013b; prilagođeno u Božović et al., 2020b)

### 3.1.2 Metodologija i rezultati dosadašnjih hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda

Istaknut doprinos u oblasti starenja vertikalnih bunara dali su autori G. Houben, sprovođenjem istraživanja na izvorištima u Nemačkoj i C. G. E. M. van Beek na izvorištima u Holandiji. Starenje izazvano taloženjem gvožđa u vidu formiranja inkrustacija je bilo predmet istraživanja Houben (2003; 2006), Houben & Treskatis (2007), Houben et al. (2018), van Beek (2018), dok su starenje bunara izazvano mehaničkim kolmiranjem analizirali van Beek et al. (2009) i van Beek (2011).

Na globalnom nivou, starenje bunara sa horizontalnim drenovima nije bilo predmet značajnijih naučnih istraživanja sve do 2005. godine, kada su od strane Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ započeta sistematska multidisciplinarna istraživanja na izvorištu podzemnih voda Beograda. Istraživanjima su obuhvaćeni svi bunari, a naročito obimni istražni radovi su bili usmereni na izučavanje starenja pet bunara na kojima su u periodu od 2005. do 2008. godine utisnuti novi drenovi. Istraživanja su generalno imala tri komponente:

- ispitivanje hidrogeološke građe terena izvorišta sa litostratigrafskim tumačenjem geneze uslova formiranja deponovanih kvartarnih sedimenata,
- ispitivanja hidrohemijskog i mikrobiološkog sastava podzemnih voda zajedno sa geohemijskim sastavom deponovanih sedimenata i
- hidrodinamičkom simulacijom bunara sa horizontalnim drenovima sa kvantifikovanjem efekata i prognozom razvoja starenja drenova tokom vremena eksploatacije.

Za uslove beogradskog izvorišta, autori Dimkić & Pušić (2008) su definisali tzv. *indikatore procesa biohemijskog kolmiranja drenova* – sadržaj divovalentnog gvožđa, redoks potencijal, biološku aktivnost određenih vrsta bakterija. Tom prilikom, autori su definisali parametar koji nazivaju specifičnom depresijom („depresija po jediničnom proticaju bunara“; odnos između razlike nivoa podzemnih voda neposredno na spoljašnjoj konturi drena i u unutrašnjosti drena sa kapacitetom bunara) kao osnovni hidraulički parametar kojim kvantifikuju stepen kolmiranosti drenova.

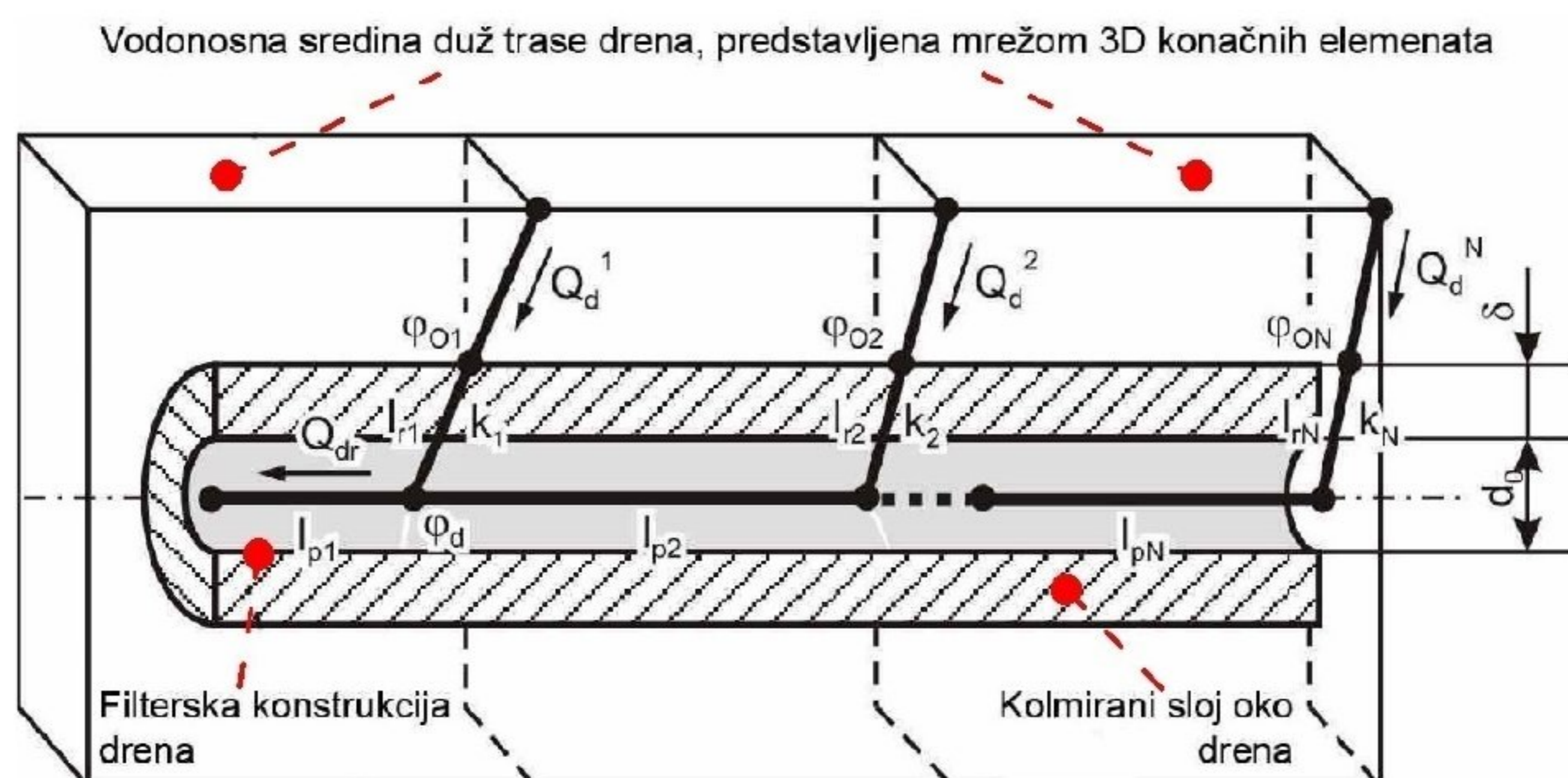
Za specifičnu depresiju bunara, Dimkić et al. (2011b) uvode termin „lokalni hidraulički otpor“ (*Local Hydraulic Resistance, LHR*), koji predstavljen u izmenjenom matematičkom izrazu, ukazuje

na stanje pojedinačnih drenova na bunaru u smislu procesa kolmiranja. Istovremeno, Dimkić et al. (2011b) promenu vrednosti parametra lokalnog hidrauličkog otpora tokom vremena eksploatacije tumače kao pokazatelj napredovanja starenja i predstavljaju hidraulički parametar i pojam kinetike promene lokalnog otpora na drenovima (*Kinetics of LHR variation*, KLHR). Promenu vrednosti ovog parametra autori kvantifikuju na primeru pet obnovljenih bunara, za višegodišnji period njihove eksploatacije. Na osnovu praćenja napredovanja starenja tokom prvih godina eksploatacije pet bunara na kojima su utisnuti novi drenovi, autori su zaključili da na novim drenovima nisu postojali inicijalni hidraulički otpori i da je kolmiranje drenova koje se odvijalo tokom analiziranog perioda rada bunara funkcija sadržaja dvovalentnog gvožđa i redoks potencijala podzemnih voda.

Dimkić et al. (2012) inoviraju utvrđenu funkcionalnu zavisnost između porasta otpora na drenovima pet obnovljenih bunara sa indikatorima procesa kolmiranja pridruživanjem ulazne brzine podzemnih voda u drenove kao hidrauličkog parametra značajnog za dinamiku starenja bunara. Dimkić & Pušić (2014) su nastavili sa razvojem teorije starenja bunara na izvorištu Beograda na osnovu promene, tj. porasta otpora na drenovima u zavisnosti od sadržaja dvovalentnog gvožđa i redoks potencijala podzemnih voda. Značajan doprinos poznavanju problematike starenja bunara predstavljala je utvrđena razlika između ulaznih brzina podzemnih voda u drenove prema kriterijumu biohemijskog kolmiranja u odnosu na standardne hidrauličke kriterijume definisanja vrednosti maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina određenih prema kriterijumu filtracione stabilnosti prifilterske zone i laminarnog režima filtracije podzemnih voda. Na bazi dobijenih rezultata, autori su definisali metodologiju prognoze porasta otpora na drenovima, u zavisnosti od prisutnih prirodnih uslova vodonosne sredine i režima eksploatacije bunara, izraženog preko maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina podzemnih voda u drenove bunara.

Ciklus hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda je započeo 2007. g., kao jedna od najznačajnijih komponenti multidisciplinarnih istraživanja pitanja opadanja kapaciteta bunara pokrenutih 2005. godine. Za potrebe hidraulički i hidrodinamički verodostojne simulacije drenova izrađen je namenski softver za numeričko modeliranje u metodi konačnih elemenata (Lizza i PAK-P, Dimkić et al, 2007; 2010; Pušić et al., 2012), u kojem je nešto kasnije primenjena metoda konačnih zapremina (Vidović et al., 2011; Dotlić et al., 2011; 2013). Obe ove metode su obezbeđivale znatno veću fleksibilnost u pogledu prilagođavanja nestrukturirane mreže diskretnih polja trasama drenova u odnosu na metodu konačnih razlika na kojoj je bila zasnovana u to vreme aktuelna verzija MODFLOW-2005 programa. Drenovi su predstavljeni 1D elementima, pri čemu je filterska konstrukcija drena podeljena na veći broj delova. Oko 1D elemenata prisutna je 3D zona koja predstavlja hidrauličku vezu između filterske konstrukcije drenova i sedimenata porozne sredine (a koja suštinski predstavlja prifiltersku zonu drenova, *slika 9*). Softver i metodologija predstavljanja drenova su verifikovani na primeru bunara RB-8, na kojem su 2006. godine utisnuti novi drenovi.

Na primeru ranije analiziranog bunara RB-8, autori Dimkić et al. (2010) kvantifikuju efekte procesa starenja tako što na hidrodinamičkom modelu simuliraju više testova crpenja i analiziraju promenu vrednosti koeficijenta propusnosti za svaki od novih drenova. Tom prilikom, primenjen je unutrašnji granični uslov ravnog pijezometarskog nivoa. Uticaj unutrašnjeg otpora na pad pijezometarskog nivoa nije analiziran, uz stav autora da je zanemaren iz razloga niskih vrednosti brzina podzemnih voda.



Slika 9. Grafički prikaz graničnog uslova „dren“ (Dimkić et al., 2007, prilagođeno u Božović et al., 2020b)

Budući da u slučaju prvih hidrodinamičkih istraživanja bunara beogradskog izvorišta nije korišćen komercijalni softver, dostupan širem krugu istraživača, postojala je potreba za verifikacijom postignutih rezultata i stavova o uzrocima kolmiranja bunara definisanih od strane istraživača Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, kao i daljom realizacijom hidrodinamičkih istraživanja beogradskog izvorišta podzemnih voda. Ovi uslovi su zadovoljeni predstavljanjem nove generacije programa MODFLOW, koji se globalno smatra profesionalnim standardom u oblasti istraživanja računarski simuliranog kretanja podzemnih voda (MODFLOW je osmišljen i izrađen početkom '80. godina 20. veka od strane Geološkog zavoda Sjedinjenih Država, USGS, koji je svetski lider u razvoju i primeni softverskih alata u oblasti hidrogeologije i koji se stara o daljem unapređenju MODFLOW-a, sa praksom da novu verziju/generaciju programa predstavi na svakih 4–5 godina).

MODFLOW–USG verzija programa je zasnovana na rešavanju sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina metodom konačnih zapremina. Metoda, tj. računarski program, pruža široke mogućnosti u pogledu diskretizacije prostora obuhvaćenog modelom, mrežom nestruktuiranih diskretnih polja različitog oblika i dimenzija, pri čemu slojevi na modelu mogu imati diskontinualno rasprostranjenje u granicama istražnog područja. Važna odlika MODFLOW–USG koda je postojanje softverskih paketa (modula) čijom upotrebom se mogu simulirati složeni vodozahvatni objekti i uslovi kretanja podzemnih voda. Jedan od takvih paketa je i *Connected Linear Network Process Package* (CLN).

### 3.1.3 Zaključak primenjenih metoda i ostvarenih rezultata dosadašnjih hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda

Numeričko hidrodinamičko modeliranje je nezamenljiva metoda rešavanja praktičnih i istraživačkih zadataka u oblasti eksploatacije i zaštite resursa podzemnih voda u izdani zbijenog tipa i izvorištima na kojima se zahvatanje podzemnih voda vrši preko bunara sa horizontalnim drenovima.

Od prvih dana hidrodinamičke analize bunara sa horizontalnim drenovima je bio prisutan stav da se bunari u okviru analitičkih i numeričkih modela predstavljaju preko unutrašnjeg graničnog uslova ravnomernog proticaja (engl. *Uniform Flux Boundary Condition*) ili graničnog uslova ravnomernog pijezometarskog nivoa unutar drenova (engl. *Uniform Head Boundary Condition*). Granični uslov ravnomernog nivoa je zahtevno matematički inkorporirati u analitičkim modelima, zbog čega se po pravilu koristi manje verodostojan uslov ravnomernog proticaja, tj. doticaja duž filterske konstrukcije bunara. U slučaju numeričkih metoda u oblasti hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima (i uopšteno horizontalnih bunara) takvo ograničenje ne postoji, što je jedna od najsnažnijih preporuka njihove upotrebe. Dodatno, u rešavanju kompleksnih problema u oblasti dinamike podzemnih voda, a takvi su gotovo bez izuzetka svi realni uslovi terena, umesto

analitičkog matematičkog pristupa (kojim se mogu simulirati samo pojednostavljeni, hipotetički uslovi) potrebno je primeniti numerički pristup za opisivanje složenih graničnih uslova, složene geometrije šematizovanih delova hidrogeološke sredine i prostorno promenljivih vrednosti hidrogeoloških parametara vodonosne sredine u okvirima modelom obuhvaćenog prostora.

Predstavljeni najznačajniji rezultati hidrodinamičkih istraživanja sprovedenih u oblasti bunara sa horizontalnim drenovima ukazuju da treba težiti sagledavanju i analizi sva tri aspekta kretanja podzemnih voda: pod uticajem izvora prihranjivanja i dreniranja izvan zone uticaja bunara, u zoni uticaja rada bunara i kretanja unutar samog bunara. Istraživanja realizovana u poslednje dve decenije daju snažnu preporuku za primenom hidraulički realnog umesto hidraulički ekvivalentnog pristupa predstavljanja bunara na hidrodinamičkim modelima. Ovaj pristup podrazumeva simulaciju drenova na numeričkim hidrodinamičkim modelima u skladu sa njihovim geometrijskim i tehničkim karakteristikama (kao cilindričnih vodozahvatnih objekata), određene dužine i prečnika, sa prifilterskom zonom zadatom oko filterske konstrukcije drenova (pri čemu prifilterska zona ima realnu ili debljinu koja je u skladu sa standardima u oblasti izrade bunara), uz uključivanje otpora i aspekta kretanja podzemnih voda unutar drenova u slučaju veće izdašnosti bunara.

Proces filtracije podzemnih voda kroz poroznu, vodonosnu sredinu i prifiltersku zonu drenova se ne završava na konturi drenova (odnosno bunara u opštem slučaju). Na putu daljeg toka podzemnih voda, dodatni gubici se javljaju na ulasku podzemnih voda u otvore na filterskoj konstrukciji drenova, kao i unutar samih drenova. U praksi numeričkih modelskih hidrodinamičkih istraživanja, po pravilu se ne raspolaže podacima potrebnim za definisanje uticaja svih vrsta hidrauličkih gubitaka vezanih za kretanje podzemnih voda unutar drenova (ili je ono značajno samo sa teorijskog, a ne i praktičnog aspekta). Međutim, gubitke na trenje o zidove filterskih cevi, kao dominantne po uticaju na pad pijezometarskog nivoa unutar drenova, je moguće zadovoljavajuće aproksimativno kvantifikovati.

Rezultati novijeg datuma, zajedno sa kritičkom analizom ranijih rezultata modeliranja starenja bunara sa horizontalnim drenovima, ukazuju na potrebu dalje realizacije istraživanja na izvorištu podzemnih voda Beograda, zbog čega je predmetna doktorska disertacija pokušaj pružanja naučno-istraživačkog okvira za realizaciju novih, detaljnih hidrodinamičkih istraživanja.

### **3.2 Hidraulika i hidrodinamičko modeliranje bunara sa horizontalnim drenovima sa aspekta procesa starenja**

Potrebe za vodom, prirodne odlike izdani i tehnički uslovi eksploatacije određuju količinu podzemnih voda koja će se zahvatati na jednom izvorištu, kao sumu pojedinačnih kapaciteta vodozahvatnih objekata. U slučaju bunara sa horizontalnim drenovima, zahvatanje podzemnih voda se ostvaruje kao funkcija sniženja nivoa podzemnih voda u vodosabirnom bunarskom šahtu. Pri tom, zahvatanje jedne te iste količine podzemnih voda određenim bunarom, u istim hidrološkim i drugim uslovima, može biti ostvareno pri sasvim različitim sniženjima nivoa u njegovom šahtu, što prvenstveno zavisi od hidrauličkih karakteristika drenova, koje ukazuju na sposobnost drenova za zahvatanjem podzemnih voda i koje se menjaju tokom vremena eksploatacije bunara na račun napredovanja procesa starenja. Iz ovog razloga se **kapacitet bunara** i odgovarajuća **veličina sniženja nivoa podzemnih voda** u neposrednoj blizini drenova, uz čiji se uslov održanja u šahtu dati kapacitet ostvaruje, mogu smatrati pokazateljima intenziteta eksploatacije ili hidrauličkog režima rada bunara.

Kao što pri zahvatanju određene količine podzemnih voda bunarom sa horizontalnim drenovima, veličina razlike između statičkog i dinamičkog nivoa izdani reprezentuje hidrogeološke odlike i uslove prihranjivanja izdani (drugim rečima, ukazuje na „kvalitet“ izdani), tako i veličina razlike između nivoa podzemnih voda u izdani neposredno uz spoljašnju konturu drenova (na kontaktu drena sa sedimentima izdani) i nivoa u unutrašnjosti drenova ukazuje na prisustvo i veličinu

hidrauličkih gubitaka na samim drenovima (odnosno, na „kvalitet“ drenova, u smislu njihove sposobnosti da zahvataju podzemne vode).

U uslovima postojanja značajnije razlike u nivoima podzemnih voda izvan i unutar drenova, stanje hidrodinamičkog režima nivoa ukazuje na narušenu vodozahvatnu funkcionalnost drenova, koju je u cilju razumevanja procesa starenja bunara i praćenja njegovog napretka tokom vremena, umesto kapacitetom bunara verodostojnije iskazivati u funkciji veličine hidrauličkih gubitaka koji nastaju pri infiltraciji podzemnih voda iz izdani u drenove.

Za hidrauličke gubitke koji nastaju radom bunara sa horizontalnim drenovima relevantne su iste zakonitosti koje važe i u slučaju bušenih vertikalnih bunara – sniženje nivoa u šahtu je suma svih pojedinačnih gubitaka:

- **linearnih laminarnih gubitaka**, koji nastaju pri kretanju podzemnih voda kroz izdan prema drenovima (za koje se uobičajeno usvaja da su konstantni tokom vremena) i dodatnih
- **nelinearnih laminarnih i turbulentnih gubitaka**, vezanih za prifiltersku zonu i konstrukciju drenova (koji se najčešće uvećavaju tokom vremena eksploatacije bunara usled procesa starenja).

Detaljan pregled geneze i uticaja pojedinačnih komponenti hidrauličkih gubitaka na rad bušenih bunara (engl. *wellbore skin layer loss, gravel pack loss, well screen loss, loss in well interior*) – gubitaka na filtraciju kroz tanki sloj na konturi bušenja bunara, gubitaka u prifilterskoj zoni, gubitaka na filterskoj konstrukciji, gubitaka u unutrašnjosti bunara (na putu kretanja podzemnih voda unutar perforiranih i neperforiranih bunarskih cevi), gubitaka vezanih za ugrađenu hidromašinsku opremu i dr., predstavio je Houben (2015a). Sprovodeći analizu veličine uticaja navedenih uzroka hidrauličkih gubitaka analitičkim proračunima, ovaj autor je potvrdio ranije stavove istraživača da je uticaj gubitaka na konturi bušenja bunara izraženo dominantan među svim ostalim uzrocima hidrauličkih gubitaka, kao i da je uticaj gubitaka na filterskoj konstrukciji bušenih (vertikalnih) bunara suštinski zanemarljiv u odnosu na gubitke u njihovoj prifilterskoj zoni.

Autori Park & Zhan (2002) su analizirali uticaj prisustva tankog sloja na konturi bušenja horizontalnog bunara na efekat tzv. početnog ili ranog sniženja (koji se ispoljava u prvim trenucima od početka crpenja bunara) i tom prilikom utvrdili graničnu vrednost propusnosti ovog sloja iznad koje se negativan hidraulički uticaj otpora vezanog za formaciju na konturi bušenja bunara suštinski može zanemariti. Polomčić et al. (2016) su potvrdili da se granična vrednost koji su definisali i predložili autori Park & Zhan (2002) može smatrati reprezentativnom i u slučaju propusnosti prifilterske zone drenova, u uslovima redovne eksploatacije bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda.

U sveobuhvatnoj studiji teorije hidraulike i modeliranja različitih tipova vodozahvatnih objekata, Yeh & Chang (2012) su predstavili matematička rešenja za uticaj gubitaka na konturi bušenja bunara, u slučaju postojanja zasebne formacije prisutne na određenoj udaljenosti oko konstrukcije bušenog vertikalnog bunara, čija se propusnost razlikuje u odnosu na sedimente izdani koji je okružuju, među kojima i rešenja za slučaj beskonačno male debljine ovog sloja i za slučaj određene, realne vrednosti debljine sloja na konturi bušenja bunara (engl. *finite thickness of skin zone*). Hidrauličke efekte predmetnog sloja na konturi bušenja izučavali su i Yeh & Yang (2006; 2009).

Gubici u prifilterskoj zoni i pri prolasku kroz otvore na filterskoj konstrukciji su praćeni, po uticaju na rad bunara znatno manjim, frikcionim i kinematskim hidrauličkim gubicima vezanim za unutrašnjost bunarske konstrukcije (engl. *fluid-inflow effect and acceleration effect*), čija su inovirana rešenja za doticaj u horizontalni bunar i gubitke unutar njega dali Wang & Zhan (2016).

Analizu uticaja jednostrukog i dvostrukog filterskog zasipa na hidrauličku efikasnost bušenih (vertikalnih) bunara je izvršio Kim (2014), dok su Barrash et al. (2006), Houben et al. (2016) i Weidner et al. (2016) vršili terenska, laboratorijska i analitička modelska ispitivanja uzroka i uticaja gubitaka na konturi bušenja bunara (engl. *wellbore skin effect*) na hidrauličke uslove rada bunara.

Na ovom mestu biće bliže razmatrana određena analogija navedenih komponenti hidrauličkih otpora prisutnih u oblasti eksploatacije podzemnih voda bušenim vertikalnim bunarima (kao u praksi češće zastupljenim vidom vodozahvatnog objekta bunarskog tipa) sa bunarima sa horizontalnim drenovima. Dosadašnja istraživanja veličine hidrauličkog uticaja tankog sloja prisutnog na konturi bušenja vertikalnog bunara, čiji je nastanak prvenstveno vezan za upotrebu i kasnije nepotpuno uklanjanje cirkulacionog fluida sa zidova bušotine (tzv. isplačnog kolača) kao posledicu neadekvatno sprovedenog postupka razrade bunara, jasno ukazuju da u uslovima kada je prisutan, ovaj pribunarski sloj ima najveći nepovoljan uticaj na uslove rada bunara. Iako ovaj sloj ima vrlo malu debljinu (svega nekoliko milimetara) i nalazi se na određenom rastojanju od same filterske konstrukcije bunara, njegove nepovoljne filtracione, odnosno propusne karakteristike čine odlučujućim negativan uticaj na uslove eksploatacije podzemnih voda bunarom.

Kako se i u izradi horizontalno bušenih bunara neretko koriste aditivi za postizanje potrebnih svojstava cirkulacionog fluida (najčešće bentonitska glina, uz dodatke različitih polimera), usled čega se formira tanak zid isplake na zidu pribunarske zone koji ima hidrauličku ulogu barijere koja privremeno (u fazi izrade objekta) razdvaja vodozahvatni objekat od vodonosne sredine, tako je i u slučaju ovog tipa bunara moguće postojanje gubitaka na konturi bušenja koji će nepovoljno uticati na efikasnost rada bunara.

Prilikom formiranja drenova prema nekoj od tri postojeće metode (i njima pratećih modifikacija), same podzemne vode imaju ulogu tzv. radnog fluida, kojim se vrši iznošenje rastresitih sedimenata vodonosne sredine od otvora na vrhu probojno–ispirne (tzv. bušaće) glave kroz konstrukciju drena (ili kroz cevi obložne kolone, u zavisnosti od izbora metode utiskivanja, Babac & Babac, 2009a) do unutrašnjosti bunarskog šahta. Samim tim, ne postoje uslovi za nastanak tankog sloja na konturi utiskivanja drena, odnosno obložne kolone, na način na koji se to odvija u slučaju vertikalnih ili horizontalno bušenih bunara. Međutim, do nastanka tankog sloja nepovoljnih filtracionih karakteristika oko drenova može doći u slučaju kada na koti i duž projektovane trase utiskivanja drena postoje sedimenti koji imaju slabije filtracione karakteristike. U izdanima aluvijalnog tipa, kakvo je i beogradsko izvorište podzemnih voda, takve slabijepropusne geološke tvorevine su vezane prvenstveno za facije povodnja, mestimično i facije mrtvaja ili starača, koje tipično imaju manju debljinu i ograničeno horizontalno rasprostranjenje u planu.

Utiskivanje drenova kroz sedimente nepovoljnih hidrogeoloških odlika je moguće vezati za nedovoljno prepoznat značaj poznavanja uticaja ovih tvorevina na hidrauličke uslove rada bunara, za nedovoljan stepen poznavanja geološke građe i hidrogeoloških odlika deponovanih sedimenata u užoj zoni bunara (što se vezuje za aspekt projektovanja bunara), kao i za propuste do kojih dolazi prilikom samog utiskivanja drenova (kao što je nastanak devijacije drenova u odnosu na projektovanu horizontalnu ravan, prilikom čega drenovi ne bivaju utisnuti u predviđenom delu profila hidrogeološke sredine, što je slučaj koji se vezuje za aspekt izvođenja radova; Oparušić & Božović, 2012).

U 70 godina dugoj tradiciji izgradnje i održavanja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda, nisu bili retki primeri navedenih slučajeva, a takvih primera ima i u savremenoj praksi revitalizacije bunara utiskivanjem novih drenova. Tako je, na primer, u slučaju revitalizacije dva bunara na Adi Ciganliji, jednog prema Projsag i drugog prema Reni tehnologiji formiranja drenova, došlo do toga da su neki od drenova utisnuti kroz tanke slabijepropusne sedimente povodnja. U prvom slučaju, interval prolaska obložnih kolona jednog drena kroz sedimente povodnja je prilikom formiranja konstrukcije drenazacevljen punim, tj. neperforiranim cevima u adekvatnoj dužini, čime je ovaj deo drena isključen iz procesa zahvatanja podzemnih voda. U slučaju formiranja novih drenova na drugom bunaru prema Reni metodi, došlo je do propusta u određivanju kote utiskivanja drenova, što je za posledicu imalo to da je filterska konstrukcija mostičavog tipa direktnim postupkom utiskivana u glinovito–alevritske naslage visoke plastičnosti. Usled postojanja velikog otpora sedimenata deponovanih na datoj koti daljem



napredovanju utiskivanja, preporučeno je da se dren uz pomoć hidraulične prese izvuču iz izdani, da se odredi nov smer utiskivanja, a kota odredi adekvatnom preciznošću. Izvlačenjem drena iz izdani stekli su se jedinstveni uslovi da se ostvari neposredan uvid u izgled filterske konstrukcije drena, oko koje je bio obavijen tanak sloj slabije propusnih naslaga visoke plastičnosti, u potpunosti sprečavajući infiltraciju podzemnih voda iz izdani u unutrašnjost drena, odnosno bunara.

Na osnovu zaključaka da je propusnost prifilterske zone predstavljene ugrađenim filterskim zasipom imala odlučujući značaj na hidraulički režim rada i proces starenja bušenih bunara ispitivanih od strane Houben et al. (2018), kao i bunara sa horizontalnim drenovima ispitivanih od strane Božović et al. (2020a) i ukoliko se usvoji prethodni stav da formiranje početnog tankog i slabijepropusnog sloja oko konture drenova prilikom njihovog formiranja nije verovatno, budući:

- a) da je utiskivanje drenova mehanički postupak, bez upotrebe bušačkog fluida (sa ili bez hemijskih aditiva), bez rotacije bušaće glave i bez usitnjavanja stenske mase, kao i
- b) da se prisustvo fino-zrnih čestica vodonosne sredine zadržanih na drenovima prilikom utiskivanja ili akumuliranih tokom opitnog testiranja bunara, može ukloniti kroz postupak razrade drenova (podrazumeva se, uz uslov adekvatnih tehničkih karakteristika filterske konstrukcije i zasipa drenova; Driscoll, 1986; Sterrett, 2007; Ahmed et al., 2014),

***definisana je hipoteza da prifilterska zona presudno utiče na hidrauličke karakteristike drenova i da, kao takva, predstavlja meru vodozahvatne sposobnosti i hidrauličke efikasnosti bunara sa horizontalnim drenovima.***

Bilo da je prifilterska zona formirana kroz postupak razrade drenova – uvećanjem efektivne poroznosti tipično peskovito–šljunkovitih aluvijalnih sedimenata putem iznošenja fino-zrnih frakcija njihovog granulometrijskog sastava kroz otvore na filterskoj konstrukciji (u slučaju Reni i Felman metode formiranja drenova), bilo ugradnjom filterskog zasipa (u slučaju Projsag metode), hidraulička funkcija prifilterske zone je definisana ***geometrijom i propusnošću*** geološkog materijala od kojeg je izgrađena. Ako se pođe od toga da su orijentacija, tj. aksijalna osa i dužina drenova na nekom bunaru koji je predmet hidrodinamičkih istraživanja po pravilu poznate, pitanje hidrauličkog uticaja podrazumevano cilindrične geometrije prifilterske zone se svodi na analizu njene radijalne komponente, tj. debljine.

Zajedničko za filtracione karakteristike bilo koje geološke, a naročito intergranularne porozne sredine (Bear, 1972; Kruseman & de Ridder, 1994), zatim za tipično tanke formacije koje određuju intenzitet razmene voda između izvora prihranjivanja ili dreniranja izdani i same izdani (u oblasti modelskih hidrodinamičkih istraživanja sadržanih u graničnom uslovu treće vrste; Anderson et al., 2015; Bear & Cheng, 2010), kao i za prifiltersku zonu u oblasti hidraulike bunara (bila ona tanki sloj na konturi bušenja bunara, odnosno utiskivanja drena, zona formirana razradom bunara ili ugrađeni filterski zasip; Houben, 2015a; Yeh & Chang, 2012) je to da se mogu sagledati definisanjem reprezentativnih vrednosti koeficijenta filtracije.

Analiza uticaja hidrauličkih karakteristika drenova, sagledanih preko debljine i filtracionih karakteristika prifilterske zone drenova, na:

- kapacitet i režim rada bunara sa horizontalnim drenovima,
- na kvalitet hidrauličkog kontakta drenova i izdani kroz veličinu otpora na drenovima, kao i na
- uticaj ulaznih brzina podzemnih voda u prifiltersku zonu drenova sa aspekta procesa starenja,

***nije bila predmet dosadašnjih istraživanja u predmetnoj naučnoj oblasti, zbog čega je cilj predmetne doktorske disertacije da ispitivanjima na numeričkom hidrodinamičkom modelu bliže definiše predmetnu zavisnost.***

### 3.2.1 Faktori koji utiču na kapacitet i režim rada bunara sa horizontalnim drenovima

Poznato je da bunari sa horizontalnim drenovima omogućavaju zahvatanje višestruko većih količina podzemnih voda u odnosu na bušene (vertikalne) bunare izgrađene u istim hidrogeološkim uslovima. Veći kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima se ostvaruje prvenstveno zahvaljujući višestruko većoj dužini filterskih konstrukcija drenova (koji celom svojom dužinom mogu biti formirani u okviru slojeva najpovoljnijih hidrogeoloških odlika, a neretko male debljine), kao i mogućnosti većeg sniženja nivoa u bunaru i u izdani, dok su niže ulazne brzine podzemnih voda u drenove prateći benefit koji ima povoljan uticaj na proces starenja bunara.

Kapacitet i režim rada bunara sa horizontalnim drenovima zavisi od većeg broja **prirodnih, tehničkih i hidrauličkih uslova**. Među **prirodnim uslovima**, na kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima dominantno utiču: debljina, litološki sastav i hidrogeološke odlike sedimenata izdani, širina i dubina usečenosti rečnog korita u izdani, debljina i propusnost naslaga istaloženih na rečnom dnu, vodostaj reke, doticaj iz bližeg i daljeg zaleđa bunara, hemijske i mikrobiološke karakteristike podzemnih voda, od kojih će zavisiti uslovi za nastanak i dinamiku razvoja procesa starenja bunara (Cullimore, 1999; Dimkić et al., 2011a, 2012; Majkić–Dursun et al., 2015; Mansuy, 1998; van Beek, 2011).

Istraživanje koje su na primeru bunara izgrađenog u litološki homogenoj i dobro vodopropusnoj vodonosnoj sredini sprovedli Patel et al. (2010) je ukazalo da povećanje kapaciteta bunara u zavisnosti od porasta vrednosti filtracionih karakteristika izdani suštinski ima karakter linearne zavisnosti. Sa druge strane, treba istaći da izražena heterogenost litološkog sastava u planu i profilu čini jednu od najmarkantnijih odlika aluvijalnih izdani, naročito u donjim, ravničarskim delovima rečnog toka, u kojima su formirane široke aluvijalne ravni (Charlton, 2007; Nichols, 2009). Stoga je, u cilju definisanja uticaja filtracionih karakteristika izdani na kapacitet bunara, na 3D hidrogeološkim i numeričkim hidrodinamičkim modelima potrebno detaljno šematizovati ne samo dobro vodopropusne, generalno grubozrne sedimente facije korita, već i slabijepropusne, alevritsko–glinovite sedimente povodnja, po pravilu prisutne u vidu tankih proslojaka i sočiva, ograničenog rasprostranjenja u planu.

Upravo je višestruko smenjivanje vodopropusnih i slabijepropusnih naslaga u profilu izdani karakteristično za aluvijalnu ravan reke Save uzvodno od njenog ušća u Dunav (Sava je jedna od najdužih, a količinom voda najbogatija pritoka reke Dunav), u kojem je formirano izvorište podzemnih voda Beograda, koje je, kao što je rečeno, sa 99 izgrađenih bunara sa horizontalnim drenovima drugo najveće izvorište ovog tipa na svetu. Modelska hidrodinamička istraživanja izvorišta su ukazala da je u uslovima značajnijeg rasprostranjenja slabijepropusnih naslaga u zoni bunara, uticaj ovih tvorevina na režim nivoa izdani i kapacitet bunara značajan u meri da predstavlja ključni prirodni faktor ograničenja potencijala lokacije bunara za zahvatanje značajnijih količina podzemnih voda (Pušić et al., 2012; Pušić & Dimkić, 2016; Božović et al., 2016a; 2020a).

Imajući u vidu da je reka dominantan izvor prihranjivanja izdani kaptirane bunarima sa horizontalnim drenovima, identifikacija reprezentativnih vrednosti filtracionih karakteristika naslaga dna rečnog korita predstavlja jedan od najznačajnijih koraka u postupku kalibracije numeričkog hidrodinamičkog modela. Simulaciju i analizu efekata kolmiranja kontakta reke i izdani na kapacitet jednog od bunara na izvorištu podzemnih voda Beograda izvršili su Pušić & Dimkić (2016). Analiza je izvršena tako što je utvrđena reprezentativna vrednost propusnosti sedimenata rečnog korita u široj zoni odabranog bunara umanjena za jedan i za dva reda veličine. Rezultati sprovedenih proračuna su pokazali da je smanjenje propusnosti naslaga na rečnom dnu u prvom analiziranom slučaju uticalo da kapacitet ispitivanog bunara opadne za 70%, dok je u drugom slučaju bunar praktično izgubio kapacitet, a hidraulička veza reke i izdani raskinuta.

Da je propusnost rečnog korita ključan faktor prihranjivanja izdani i efikasnosti rada bunara pokazali su i rezultati istraživanja Zhang et al. (2011). U analiziranom slučaju, smanjenje

propusnosti sedimenata rečnog dna se odvija periodično, u zavisnosti od visine ustave na reci, preko koje se upravlja režimom vodostaja i proticaja reke, a posredno (smenom faza taloženja i erozije fino-zrnih naslaga) utiče na kolmiranje rečnog korita, režim podzemnih voda i kapacitet bunara.

Sa aspekta **tehničkih uslova**, na kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima dominantno utiču: broj, dužina i prostorni raspored drenova, dubina utiskivanja drenova u odnosu na profil deponovanih aluvijalnih sedimenata, udaljenost bunara od reke, tip i tehničke karakteristike filterske konstrukcije drenova (prečnik filterskih cevi, dimenzije i oblik otvora na njima, poroznost filtera; granulometrijski sastav, debljina i kvalitet filterskog zasipa ugrađenog oko filterske konstrukcije). Budući da su drenovi, odnosno filterske cevi, vodozahvatni deo konstrukcije predmetnog tipa bunara, to i povećanje njihovog broja i dužine utiče na povećanje ukupne vodoprijemne površine bunara.

Uticaj dubine utiskivanja drenova na kapacitet bunara ima kompleksan karakter u hidrodinamičkom smislu, budući da je tesno povezan sa konkretnim uslovima terena – stratifikacijom i hidrogeološkim odlikama izdani. U slučaju aluvijalnih izdani jednostavnije građe, kao i litološki složenijih izdani koje su na modelima šematizovane pojednostavljeno (manjim brojem slojeva veće debljine), najveći kapaciteti bunara se ostvaruju u uslovima kada su drenovi utisnuti hipsometrijski u sredini izdani, odnosno sloja, što pokazuju rezultati Moore et al. (2011), Kelson (2012) i Pušić et al. (2012). Sa približavanjem kote utiskivanja drenova slabije propusnim granicama rasprostranjenja vodonosne sredine (podini, povlati ili međusloju), raste nepovoljan uticaj ovih granica na hidrodinamički karakter strujanja podzemnih voda prema drenovima.

Uticaj broja i dužine drenova na kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima je bio predmet više modelskih istraživanja. Polazeći od činjenice da su istraživanja realizovana za različite geološke i hidrogeološke uslove, različite uslove prihranjivanja, različite konfiguracije drenova, a da su autori Bakker et al. (2005), Dimkić et al. (2007), Patel et al. (2010), Moore et al. (2011), Pušić et al. (2012) došli do sličnih rezultata, može se izneti generalni zaključak da kapacitet bunara nema karakter linearne zavisnosti od broja utisnutih drenova, već da povećanje broja drenova iznad određenog, optimalnog broja (sasvim) ograničeno doprinosi povećanju kapaciteta bunara. Razlog je taj što sa povećanjem broja drenova dolazi do smanjenja njihovog pojedinačnog kapaciteta, na račun smanjenja ugla između njih i porasta kompeticije za zahvatanjem raspoložive količine podzemnih voda. Kada je reč o aspektu uticaja dužine drenova, uobičajene dužine jednog drena od 50 do 60 m se načelno mogu smatrati adekvatnim, bilo da su dosadašnjim hidrodinamičkim istraživanjima bili obuhvaćeni uticaji unutrašnjih hidrauličkih otpora ili ne.

Aspekt hidrauličkih uticaja na kapacitet i režim rada bunara sa horizontalnim drenovima je dobio najmanje pažnje u dosadašnjim istraživanjima, iako prvenstveno od njih zavisi vodozahvatna sposobnost drenova. Među **hidrauličkim uticajima**, odlučujući značaj imaju **hidrauličke karakteristike drenova** i **veličina sniženja nivoa** u bunarskom šahtu. Na osnovu hidrodinamičkih istraživanja sprovedenih u cilju izrade predmetne disertacije u prethodnom višegodišnjem periodu, može se zaključiti da se hidrauličke karakteristike drenova mogu reprezentativno predstaviti preko dva hidraulička parametra: vrednosti **koeficijenta propusnosti drenova** i veličine **hidrauličkih gubitaka na drenovima**. Između ova dva parametra postoji određena uzročno–posledična veza: od vrednosti koeficijenta propusnosti drenova, koji odražava sposobnost drenova da zahvataju podzemne vode, zavisi i veličina otpora kojem su izložene podzemne vode na putu njihove filtracije kroz prifiltersku zonu i na ulasku u filtersku konstrukciju drena. Drugim rečima, veličina hidrauličkih otpora na drenu je posledica propusnosti prifilterske zone tog drena.

Zadavanje većeg sniženja nivoa u šahtu rezultira većim gradijentom nivoa izdani prema bunaru, odnosno njegovim drenovima, pa stoga i većim kapacitetom bunara (analogno doticaju iz reke u izdan), što su i pokazala istraživanja Patel et al. (2010), Ismail et al. (2012) i Božović et al. (2016b). Jedno od retkih namenskih ispitivanja hidrauličkih uticaja koje su sprovedeli Patel et al. (2010) je

ukazalo na nelinearan karakter zavisnosti kapaciteta bunara od vrednosti specifične propusnosti drenova, parametra preko kog autori na modelu diskretno ispituju promene hidrauličkih karakteristika drenova, a koji je poznat iz oblasti matematičkog modeliranja podzemnih voda (McDonald & Harbaugh, 1988; Harbaugh, 2005). Kako se izučavanje hidrauličkih karakteristika drenova nalazi u središtu jedne od hipoteza predmetne disertacije, to će u narednom delu teksta ova tema biti bliže razmatrana.

### 3.2.2 Hidraulički mehanizam zahvatanja podzemnih voda bunarom sa horizontalnim drenovima

U savremenim uslovima, upravljanje radom bunara sa horizontalnim drenovima vrši se zadavanjem određene kote nivoa podzemnih voda u bunarskom šahtu. Održavanje zadate kote se ostvaruje automatizovanom regulacijom parametara rada ugrađene bunarske pumpe (jačine struje i broja obrtaja motora), što se postiže upotrebom frekventnog regulatora. U zavisnosti od intenziteta doticaja podzemnih voda u drenove, prigušenjem ili intenziviranjem rada pumpe, količina zahvaćenih podzemnih voda se smanjuje, odnosno uvećava, tako da se definisani nivo u šahtu održava načelno konstantnim. Kvazistacionaran nivo u bunarskom šahtu odražava ravnotežno stanje, u kome je količina podzemnih voda koja se u datom trenutku zahvata pumpom jednaka doticaju podzemnih voda iz izdani u drenove, što podrazumeva da kapacitet bunara ( $Q_b$ ) predstavlja sumu pojedinačnih kapaciteta drenova ( $q_d$ ).

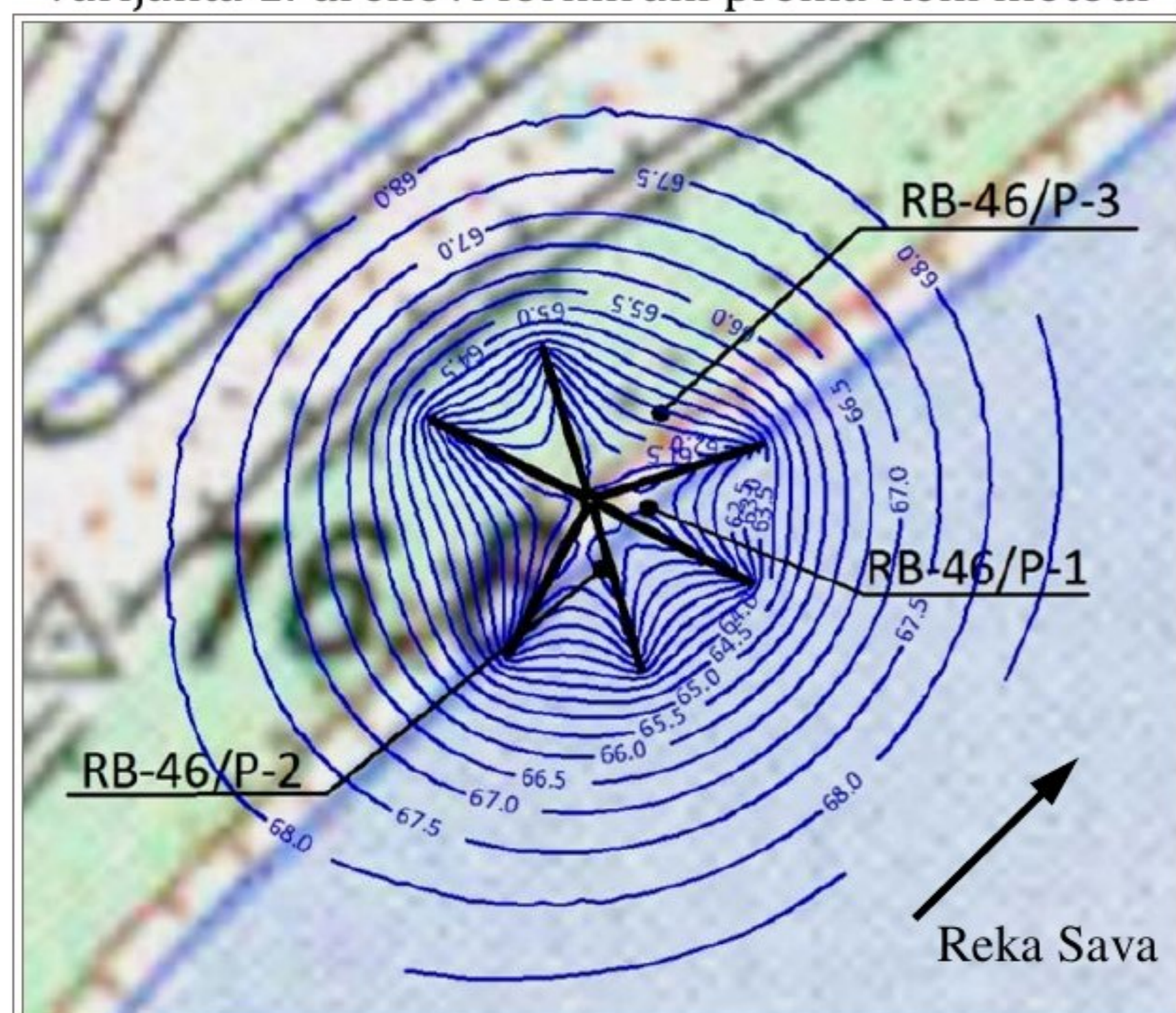
Međusobna zavisnost elemenata hidrodinamičkog sistema „reka – izdan – bunar sa horizontalnim drenovima“ ima kompleksan karakter. Porastom vodostaja u reci, na primer, raste i nivo u izdani, usled čega se uvećava razlika između pijeziometarskog nivoa izvan i nivoa unutar drenova. Na račun veće razlike u nivoima, povećava se doticaj iz izdani u drenove, što dovodi do rasta nivoa u šahtu. Porast nivoa u šahtu izvan definisanog dozvoljenog se registruje senzorom frekventnog regulatora koji prema programiranom režimu, intenzivira rad pumpe, čime se uvećava zahvatanje podzemnih voda (tj. kapacitet bunara), a sniženje u šahtu vraća i nastavlja da održava na zadatoj koti.

Kada u uslovima neporemećenog, statičkog nivoa izdani, trenutkom početka snižavanja nivoa u bunarskom šahtu započne proces zahvatanja podzemnih voda, inicira se kretanje prema i infiltracija podzemnih voda iz izdani u drenove. Do kretanja podzemnih voda dolazi usled razlike u pijeziometarskim nivoima, tj. različitih stanja potencijalne energije, od izdani koja se odlikuje višim, ka drenovima unutar kojih egzistiraju niže vrednosti pijeziometarskog nivoa.

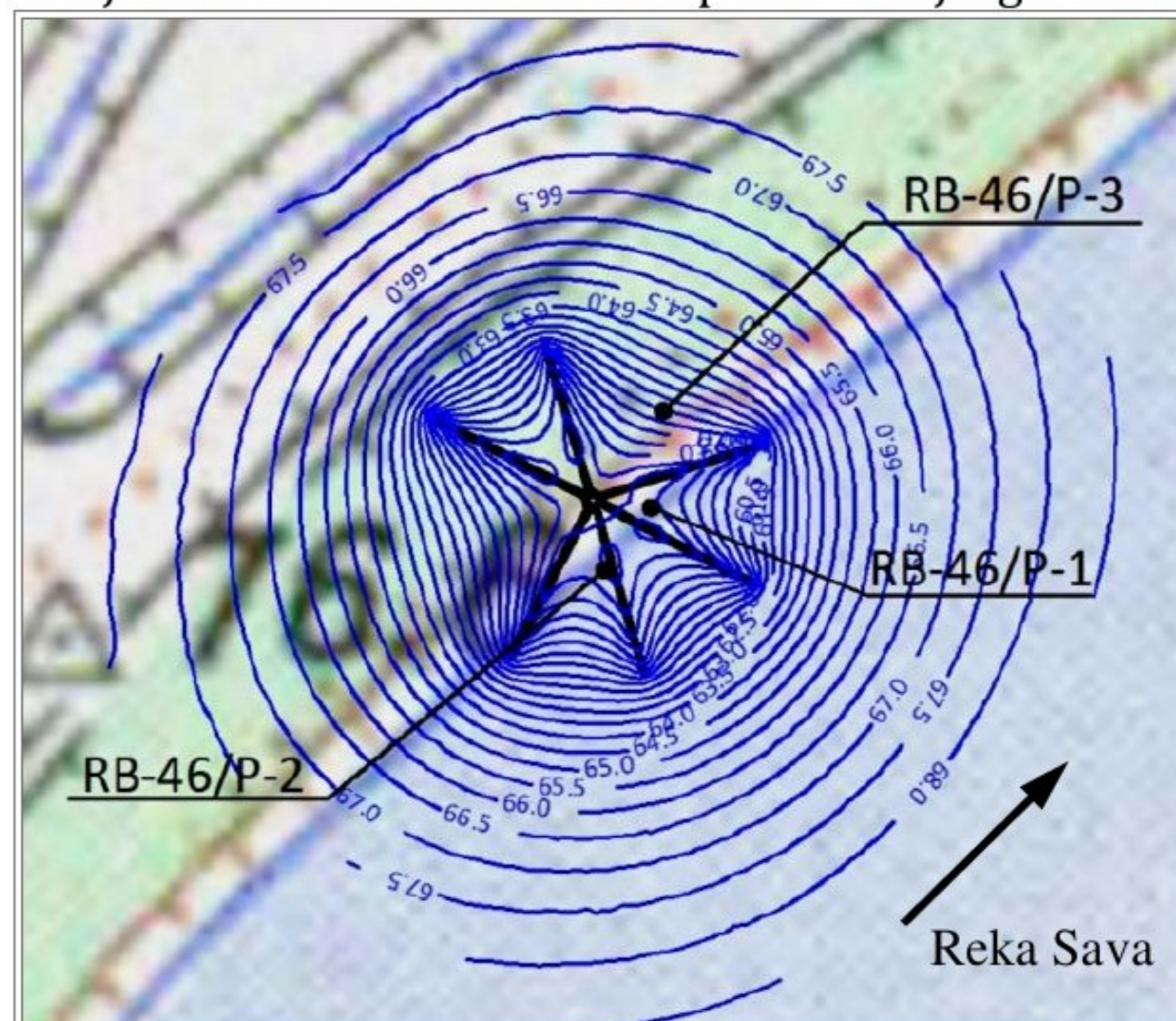
Kao rezultat zahvatanja podzemnih voda, u zoni uticaja rada bunara dolazi do formiranja dinamičkog režima nivoa izdani, sa najnižim pijeziometarskim nivoima neposredno uz same drenove. Pri tom, nivo izdani duž jednog drena nije ravnomeran, već je on najviši na njegovom kraju (uz bušaću glavu), dok sa približavanjem šahtu pijeziometarski nivo opada, kao rezultat prisustva otpora na kretanje podzemnih voda kroz vodonosnu sredinu, otpora na drenovima i jačanja interferencije uticaja susednih drenova sa smanjenjem rastojanja među njima (što je vidljivo sa prikaza ekvipotencijalnih linija u planu kao rezultata modeliranja kretanja podzemnih voda pod uticajem rada bunara: Bakker et al., 2005; Lee et al., 2010; Božović et al., 2016b; *slika 10*).

U skladu sa rasporedom nivoa podzemnih voda duž trase drena, menjaju se i doticaji podzemnih voda iz porozne sredine u dren. Infiltracija podzemnih voda ima najveći intenzitet na kraju drena, uz bušaću glavu, a sa približavanjem punim cevima intenzitet doticaja se smanjuje. Ovakvo stanje je posledica režima podzemnih voda koji vlada u delu posmatranog hidrodinamičkog sistema (izdan – bunar sa horizontalnim drenovima), sa nivoima izdani koji imaju najveće vrednosti na kraju drena (uz bušaću glavu) i sve niže vrednosti sa približavanjem početku filterske konstrukcije drena (tj. punim cevima), dok u unutrašnjosti drena vlada (suštinski) ravnomeran pijeziometarski nivo.

varijanta 1: drenovi formirani prema Reni metodi



varijanta 2: drenovi formirani prema Projsag metodi



Slika 10: Karakterističan izgled nivoa izdani u zoni bunara sa horizontalnim drenovima, na primeru bunara RB-46 beogradskog izvorišta (rezultat ispitivanja prognoznih uslova rada bunara na hidrodinamičkom modelu; izmenjeno prema Božović et al., 2016b)

Kako je razlika između dva povezana dela hidrodinamičkog sistema najveća na kraju drena, na tom delu je najveći i doticaj podzemnih voda u dren. Budući da razlika postaje sve manja sa kretanjem prema punim cevima, tako se i veličina doticaja u istom smeru smanjuje. Opisano stanje predstavlja opšti, teorijski slučaj, dok u konkretnom slučaju realnog bunara, stanje u pogledu rasporeda doticaja duž aksijalne ose drena može u manjoj ili većoj meri odstupati od univerzalnog slučaja. Za svaki od slučajeva u istraživačkoj i inženjerskoj praksi koji odstupaju od predstavljenih opštih uslova, svakako će biti potrebno utvrditi i izneti relevantno obrazloženje uzroka specifičnih promena na izučavanom vodozahvatnom objektu.

O okviru razmatranja teorijskog osnova hidrauličkih i hidrodinamičkih uslova zahvatanja podzemnih voda bunarima sa horizontalnim drenovima, potrebno je dati obrazloženje i za ostale elemente značajne za definisanje procesa – brzine podzemnih voda i proticaje unutar pojedinačnog drena, odnosno bunara u celini. U slučaju podzemnih voda treba razlikovati dva aspekta: brzine podzemnih voda na konturi prelaska iz vodonosne sredine u dren, odnosno u njegovu prifiltersku zonu, koje se nazivaju *ulaznim brzinama* ( $V_{ul}$ ) i koje su esencijalan parametar za izučavanje starenja bunara, kao i brzine kretanja podzemnih voda unutar konstrukcije drena (filterskih i punih cevi), čije poznavanje je potrebno u slučaju kvantifikovanja veličine hidrauličkih otpora unutar drena. Kako su unutrašnji otpori srazmerno mali po doprinosu ukupnoj veličini hidrauličkih otpora koji se vezuju za bunar sa horizontalnim drenovima, to znatno veći uticaj u hidrodinamičkoj analizi uslova rada i procesa starenja ovog tipa bunara ima poznavanje ulaznih brzina podzemnih voda u dren.

Raspored ulaznih brzina podzemnih voda posmatrano duž trase jednog drena ima isti oblik kao i raspored doticaja u dren, budući da nivo podzemnih voda (u smislu fizičkog procesa) predstavlja oblik energije, sa pratećom komponentom brzine koja se menja u prostoru i vremenu. Dakle, ulazne brzine podzemnih voda u dren su najveće na kraju drena, a njihove vrednosti se smanjuju sa približavanjem punim cevima, odnosno bunarskom šahtu. Sa druge strane, proticaj kroz dren i brzine unutar drena se u istom smeru povećavaju. Naime, doticaj u dren po određenoj jediničnoj dužini drena se smanjuje od kraja (vrha) drena prema njegovom početku, dok se u njegovoj unutrašnjosti proticaj ili kapacitet drena kumulativno povećava. Ujedno, sa povećanjem količina podzemnih voda koje se kreću kroz dren od njegovog kraja prema bunarskom šahtu, uvećavaju se i brzine kretanja podzemnih voda u unutrašnjosti drena.

### 3.2.3 Primena graničnog uslova „dren“ u hidrodinamičkom modeliranju bunara sa horizontalnim drenovima

Hidraulički mehanizam zahvatanja podzemnih voda bunarom sa horizontalnim drenovima je moguće predstaviti u matematičkom obliku definisanjem jednačine kojom se opisuje kretanje podzemnih voda iz izdani u dren, a koja u oblasti matematičkog modeliranja podzemnih voda predstavlja granični uslov. Osnov za formulisanje jednačine počiva na principu održanja masa, izraženog u obliku jednačine kontinuiteta toka podzemnih voda, primenjenog na slučaj bunara sa horizontalnim drenovima kojim se te vode zahvataju. Iz ovog uslova proizilazi da kapacitet jednog drene ( $q_d$ ) zavisi od veličine površine po kojoj se vrši doticaj podzemnih voda iz izdani u dren ( $\omega_{fk}$ ) i vrednosti brzina podzemnih voda na konturi prelaska, tj. infiltracije (ulaznih brzina,  $V_{ul}$ ), *jedn. 1*:

$$q_d = \omega_{fk} V_{ul} \quad [1]$$

Površina po kojoj se vrši doticaj voda u dren se, u skladu sa pristupom u oblasti hidraulike drugih tipova bunara, može aproksimirati cilindričnim oblikom u prostoru (radijalno duž ose drene), čija veličina zavisi od poluprečnika ( $r_{fk}$ ) i dužine ( $L_{fk}$ ) filterske konstrukcije drene (*jednačina 2*):

$$\omega_{fk} = 2 r_{fk} \pi L_{fk} \quad [2]$$

Budući da je režim podzemnih voda u izdanima intergranularnog tipa poroznosti po pravilu laminaran, sa niskim vrednostima brzina podzemnih voda (zbog čega se kinetička komponenta energije toka može zanemariti), u matematičkom definisanju veličine doticaja podzemnih voda u dren primenu ima fundamentalni, Darsijev zakon kretanja podzemnih voda. Poznato je da u opštem slučaju Darsijev zakon definiše zavisnost zapreminskog proticaja od hidrauličkog gradijenta kroz poroznu sredinu određene površine i propusnosti (Bear, 1972).

Primenom Darsijevog zakona na slučaj bunara sa horizontalnim drenovima (*jednačine 3 i 4*) sledi da onaj deo ukupnog gradijenta nivoa podzemnih voda koji se odnosi na hidrauličke gubitke na drenovima ( $I_d$ ), predstavlja razliku u pijeziometarskim nivoima ( $H_{iz}$  i  $H_d$ ) koja nastaje na kratkom putu filtracije podzemnih voda, od kontakta drene sa sedimentima izdani (čiji granulometrijski sastav nije poremećen utiskivanjem drene niti kasnijim radom bunara) do unutrašnjosti filterske konstrukcije drene. Dužina razmatranog puta, tj. rastojanje od spoljašnje do unutrašnje konture, suštinski predstavlja debljinu prifilterske zone drene ( $d_{pz}$ ), dok razlika u vrednostima nivoa na dvema konturama ( $\Delta H_d$ ) ukazuje na pad energije do kojeg dolazi usled postojanja hidrauličkih otpora kretanju podzemnih voda, genetski vezanih za propusnost materijala prifilterske zone (kao zone izmenjenog granulometrijskog sastava i filtracionih karakteristika originalnih sedimenata izdani, odnosno zone namenski ugrađenog filterskog zasipa).

$$V_{ul} = K_{pz} I_d \quad [3]$$

gde  $K_{pz}$  predstavlja koeficijent filtracije materijala prifilterske zone drene.

$$I_d = \frac{(H_{iz} - H_d)}{d_{pz}} \quad [4]$$

Evidentno je da prifilterska zona hidraulički povezuje izdan i drenove kao dva dela posmatranog hidrodinamičkog sistema koji se odlikuju različitim vrednostima potencijalne energije, pri čemu drenovi predstavljaju „centar eksploatacije“ ili deo posmatrane oblasti pod uticajem zahvatanja podzemnih voda koji se odlikuje najnižim pijeziometarskim nivoima (*slika 10*).

Nakon što su definisane konture prifilterske zone drene, na osnovu principa održanja toka, može se konstatovati da je ukupna promena u količini podzemnih voda koja za određeni interval vremena uđe i izađe iz prifilterske zone drene, posmatrane kao elementarne zapremine, jednaka promeni količine podzemnih voda u samoj prifilterskoj zoni. Drugim rečima, količina podzemnih voda koja iz izdani dotekne na spoljašnju konturu prifilterske zone drene jednaka je količini podzemnih voda

koja se iz prifilterske zone infiltrira u unutrašnjost drena kroz otvore na filterskoj konstrukciji, budući da unutar same prifilterske zone nema promene u količini podzemnih voda (*jednačina 5*).

$$Q_d = \omega_{sp} V_{sp} = \omega_{un} V_{un} = \text{const.} \quad [5]$$

gde su:  $\omega_{sp}$  i  $\omega_{un}$  površina spoljašnje, odnosno unutrašnje konture prifilterske zone drena;  $V_{sp}$  i  $V_{un}$  brzine toka podzemnih voda na datim konturama, respektivno.

Samim tim, prilikom kretanja kroz prifiltersku zonu brzine podzemnih voda se uvećavaju, budući da se površina poprečnog preseka u pravcu toka smanjuje, sve do ulaska podzemnih voda u unutrašnjost drena. Kada se razmatraju brzine kretanja podzemnih voda kroz prifiltersku zonu, odnosno ulazne brzine u drenove, podrazumeva se da je reč o srednjoj, linearnoj brzini filtracije podzemnih voda (Stauffer, 2006; Haitjema & Anderson, 2016).

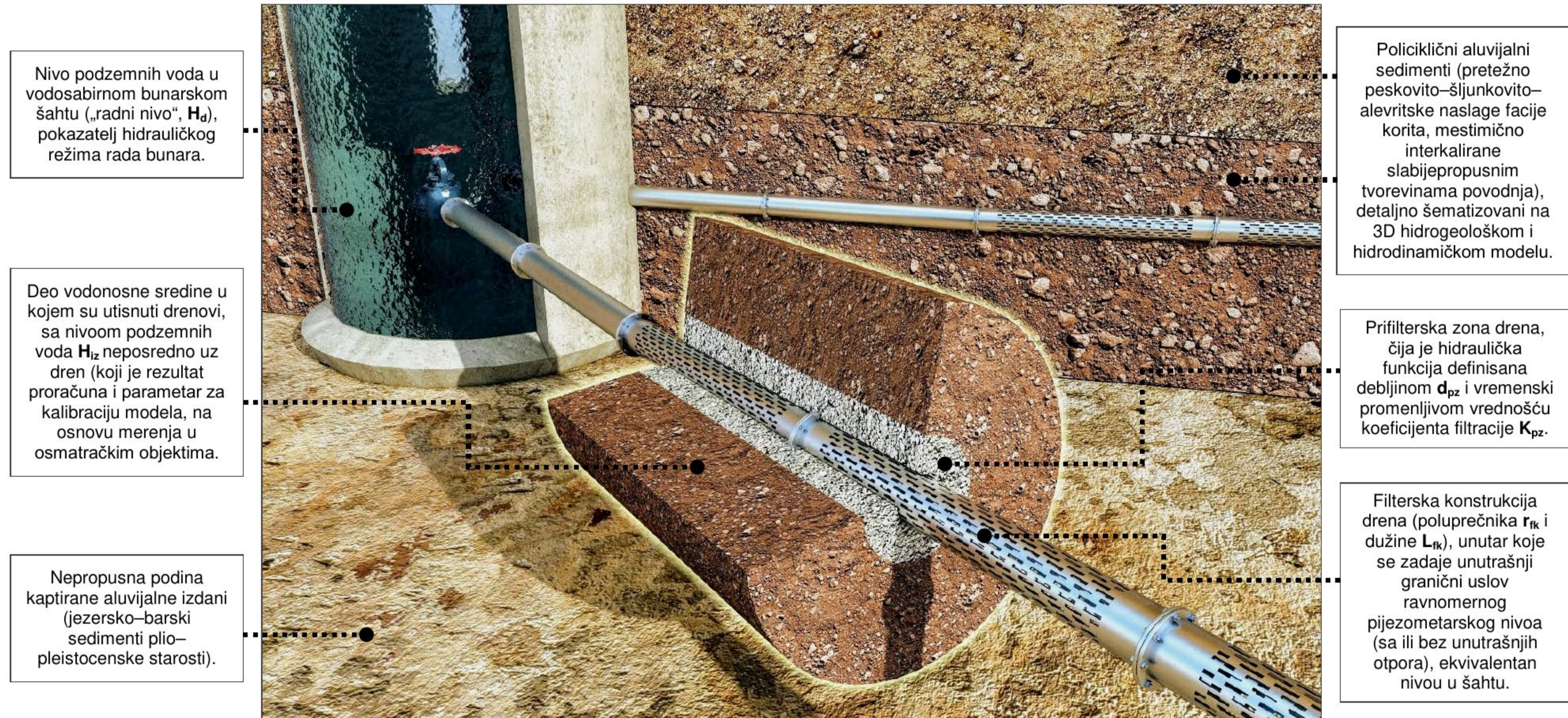
Objedinivši prethodno rečeno, proces zahvatanja podzemnih voda drenovima podrazumeva da se kapacitet drena ostvaruje kao funkcija razlike između pijezometarskog nivoa izdani na spoljašnjoj konturi prifilterske zone drena i nivoa podzemnih voda u unutrašnjosti drena, pri čemu intenzitet ili veličinu doticaja podzemnih voda u dren određuju debljina i filtracione karakteristike prifilterske zone, što se matematički može izraziti u obliku *jednačine 6* i *7* za **granični uslov „dren“**:

$$q_d = 2 r_{fk} \pi L_{fk} \frac{K_{pz}}{d_{pz}} (H_{iz} - H_d) \quad [6] \quad \text{tj.} \quad q_d = 2 r_{fk} \pi L_{fk} \left[ \frac{K_{pz}}{d_{pz}} \right] \Delta H \quad [7]$$

Drugim rečima, doticaj u dren je proporcionalan površini kroz koju se vrši infiltracija podzemnih voda iz izdani u dren i razlici u pijezometarskim nivoima izvan i unutar drena, dok je obrnuto proporcionalan dužini puta filtracije podzemnih voda kroz prifiltersku zonu kao razmatranu poroznu sredinu. U cilju bliže kontekstualizacije i sinteze predstavljenog teorijskog osnova eksploatacije podzemnih voda bunarima sa horizontalnim drenovima sa matematičkom definicijom graničnog uslova „dren“, data je grafička ilustracija procesa (*slika 11*).

Razmatrajući jednačinu kojom se opisuju uslovi zahvatanja podzemnih voda drenovima (*jednačina 7*), odnosno kojom se kvantifikuje kapacitet jednog drena kao količina voda koja u njega dotiče, evidentno je da su u njoj sadržana dva elementa – jedan koji definiše geometrijske karakteristike drena ( $\omega_{fk}$ ) i drugi koji definiše njegove propusne karakteristike ( $K_{pz}/d_{pz}$ ). Bilo da se razmatra površina po spoljašnjoj konturi prifilterske zone drena, bilo po unutrašnjoj konturi (za koju se može usvojiti da je ekvivalentna konturi po filterskoj konstrukciji drena), za veličinu površine po kojoj se vrši doticaj u dren u opštem slučaju se može usvojiti da je konstantna tokom vremena (dok u praksi svakako postoje slučajevi kada usled odmaklog procesa starenja drenova, prvenstveno na račun korozije materijala od kojeg su izgrađene filterske cevi, dolazi do skraćivanja čelične konstrukcije drena u odnosu na početnu, utisnutu dužinu; Božović et al., 2015).

Propusne karakteristike drenova su, sa druge strane, element koji je u predmetnoj jednačini za granični uslov „dren“ predstavljen odnosom dva parametra – koeficijenta filtracije prifilterske zone i debljine prifilterske zone, koji se naziva **koeficijentom propusnosti drena** [ $K_{pz}/d_{pz}$ ] i čije se vrednosti uobičajeno menjaju tokom vremena eksploatacije bunara (engl. *leakage coefficient*, *coefficient of leakage*; u domaćim okvirima hidrodinamičkih istraživanja korišćeni su i termini: hidraulički otpor, koeficijent razmene, transfer koeficijent, koeficijent lokalnog otpora i dr.).



Slika 11: Elementi graničnog uslova „dren“ za hidraulički realnu simulaciju bunara sa horizontalnim drenovima (litostratigrafski uslovi terena i konstrukcija bunara su predstavljeni na primeru bunara RB-5m beogradskog izvoriša podzemnih voda, prema Božović et al., 2020a)



U hidrogeološkoj nauci, u oblasti hidraulike i dinamike podzemnih voda (Bear, 1972; Bear, 1979; Lohman/USBR, 1972; Delleur, 2007), hidraulike bunara (Hantush, 1964; Kruseman & de Ridder, 1994; Fetter, 2010; Fitts, 2002), kao i u oblasti modeliranja podzemnih voda (Bear & Cheng, 2010; Chiang, 2005; Wels et al., 2012; Anderson et al., 2015), upotreba parametra koji se izražava odnosom koeficijenta filtracije i debljine, „ $K/d$ “, ima dugu tradiciju i vezana je za pojam **hidrauličke propusnosti** (engl. *leakage, leakance*), zbog čega predstavlja jedan od osnovnih parametara kojim se kvantifikuju hidrogeološka svojstva određene porozne sredine (uz koeficijent filtracije, poroznost, transmisibilnost, specifičnu izdašnosti izdani i druge hidrogeološke parametre). Predmetni parametar se neretko u domaćoj literaturi nazivao koeficijentom procurivanja ili pretakanja (Dragišić & Polomčić, 2009; Karanjac, 1986).

Upotreba koeficijenta propusnosti u oblasti primenjenog modeliranja podzemnih voda je vezana za sam početak primene numeričkih metoda rešavanja sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina kojima se opisuju procesi kretanja podzemnih voda u geološkoj poroznoj sredini pri izradi hidrodinamičkih modela i upotrebu MODFLOW koda, kao najšire rasprostranjenog računarskog programa u predmetnoj oblasti (McDonald & Harbaugh, 1988). U MODFLOW programu, koeficijent propusnosti je sadržan u matematičkoj definiciji propusnosti sedimenata dna rečnog korita (engl. *streambed conductance*; Eberts & Bair, 1990; Cunningham et al./USGS, 1996) u okviru graničnog uslova treće vrste konturnih uslova u hidrauličkoj teoriji filtracije podzemnih voda i numeričkog paketa „reka“, kao i u okviru definicije parametra vertikalne propusnosti (engl. *vertical leakance*) tipično tankih slabijepropusnih tvorevina koje u litološkom i hidrauličkom smislu razdvajaju dve izdani, a od kojih zavisi razmena podzemnih voda između tih izdani (njihovo prihranjivanje, odnosno dreniranje; parametar je imao značajnu ulogu u epohi tzv. kvazi 3D hidrodinamičkih modela).

Neki autori odnos koeficijenta filtracije i debljine tankih tvorevina vezuju za pojam *provodljivosti* (engl. *conductance*; Park and Zhan, 2002; Motz, 1998; Zengguang et al., 2011; Wang et al., 2013), pojam *otpora* (Bakker et al., 2005; Lee et al., 2010, 2012) ili mu, kao Patel et al., 2010, u analizi bunara sa horizontalnim drenovima pridružuju hidrauličke gubitke na drenovima ( $\Delta H_d$ ), koji, kao što je prethodno rečeno, nastaju u prifilterskoj zoni kao posledica manje propusnosti materijala prifilterske zone u odnosu na propusnost sedimenata izdani prisutnih na koti i duž trasa utisnutih drenova, usled mehaničkog i/ili biohemijskog kolmiranja. Autori Patel et al. (2010) i Wang et al., (2013) svoj pristup zasnivaju na definiciji pojma provodljivosti u MODFLOW-u, u kojem se odnosu koeficijenta filtracije i debljine pridružuju geometrijske karakteristike, tj. površina diskretnih polja u kojima se zadaje granični uslov „reka“ upotrebom istoimenog numeričkog paketa.

U oblasti primenjenog matematičkog modeliranja horizontalnih vodozahvatnih objekata (horizontalnih bunara, vodozahvatnih drenaža i bunara sa horizontalnim drenovima) upotreba hidrauličkog parametra koeficijenta propusnosti za simulaciju zahvatanja podzemnih voda je, takođe, zasnovana na analogiji sa pojmom propusnosti naslaga na dnu reke i vertikalne hidrauličke propusnosti slabijepropusnih hidrogeoloških formacija u profilu izdani. Međusoban odnos koeficijenta filtracije i debljine sloja prisutnog oko drenova koji kontroliše količinu podzemnih voda koja će se zahvatati drenom (u različitim matematičkim izrazima i koristeći različite nazive) koriste: Bakker et al. (2005), Dimkić et al. (2007, 2011, 2013), Patel et al. (2010), Vidović et al. (2011), Dotlić et al. (2011), Lee et al. (2010, 2012), Kelson (2012), Ismail et al. (2012), Jialu et al. (2013), Wang et al. (2013), Božović et al. (2015, 2016b, 2020a). Simulaciju uslova rada horizontalnih bunara na temelju propusnosti sloja oko filterske konstrukcije koriste: Wang et al. (2013) i Park & Zhan (2002), dok su takav pristup u slučaju horizontalnih vodozahvatnih drenaža primenili: Mohamed & Rushton (2006) i Rushton & Brassington (2013a; b).

Kao što se može videti, istraživači koriste istu metodologiju i numeričke alate da simulacijama na hidrodinamičkim modelima analiziraju uslove i efekte rada različitih vrsta vodozahvatnih objekata. Iako se izvode u različite svrhe i njihova izgradnja podrazumeva različite pristupe, u smislu

hidrauličkih uslova zahvatanja podzemnih voda, vodozahvatne drenaže, horizontalni bunari i bunari sa horizontalnim drenovima su bliski, budući da je reč o horizontalnim vodozahvatnim objektima, kod kojih je dužina filterskog, vodozahvatnog dela konstrukcije višestruko veća od njenog prečnika.

Tako se zahvatanje podzemnih voda horizontalnim bunarom hidraulički značajno ne razlikuje od bunara sa jednim horizontalnim drenom u funkciji, dok razlika u efektima rada u smislu izgleda hidrodinamičkog režima nivoa izdani (strujne slike) u zoni uticaja eksploatacije nastaje kada je na bunaru u funkciji više drenova. Više drenova na jednom bunaru suštinski predstavljaju veći broj horizontalnih bunara, izgrađenih na malom međusobnom rastojanju, zbog čega ostvaruju uticaj jedni na druge i unutar kojih je zadat jedan isti unutrašnji granični uslov, pri čemu se drenovi često odlikuju značajnim razlikama u vrednostima hidrauličkih karakteristika, usled čega imaju različite kapacitete (Božović et al., 2015). Razlika među horizontalnim vodozahvatnim objektima postaje značajnija kada se razmatraju unutrašnji granični uslovi, tj. hidraulički uslovi koji vladaju unutar vodozahvatnog dela objekata, o čemu detaljnije govore Božović et al. (2020b).

Imajući u vidu odlučujuću ulogu prifilterske zone drenova u kontroli intenziteta doticaja podzemnih voda u bunar, zajedno sa činjenicom da je ona definisana preko svojih filtracionih karakteristika i debljine, evidentno je da se kompleksni uslovi eksploatacije podzemnih voda bunarima sa horizontalnim drenovima u oblasti hidrodinamičke analize na adekvatan način, detaljno i verodostojno, mogu izučavati primenom metode matematičkog, prvenstveno numeričkog, modeliranja podzemnih voda.

Polazeći od toga da se izdani aluvijalne geneze u oblasti rasprostranjenja širokih rečnih dolina uobičajeno odlikuju izraženom heterogenošću litološkog i granulometrijskog sastava deponovanih sedimenata, često i na sasvim malom prostoru, zbog čega u hidrogeološkoj građi terena u zoni lepeze drenova samo jednog bunara učestvuje veći broj slojeva različitih hidrogeoloških svojstava u planu i profilu, uz istovremeno prostorno i vremenski promenljive druge prirodne i antropogene uticaje, zajedno sa konstruktivnim i vodozahvatnim specifičnostima svakog bunara, dolazi se do zaključka da izrada detaljnog hidrodinamičkog modela predstavlja jedinstven istraživački pristup u procesu definisanja optimalnog tehničkog rešenja konfiguracije, kapaciteta i režima rada u svakom konkretnom slučaju planiranja izgradnje novog ili revitalizacije postojećeg bunara sa horizontalnim drenovima. Navedene specifičnosti je moguće predstaviti, a njihove uticaje kvantitativno definisati isključivo primenom metode numeričkog modeliranja u analizi režima izdani, pri čemu će i sami resursi metode biti angažovani u značajnoj meri.

Na numeričkim hidrodinamičkim modelima režima izdani, uslove eksploatacije podzemnih voda bunarima sa horizontalnim drenovima, zajedno sa procesima starenja bunara, je iz razloga prisustva prifilterske zone kao polupropusne granice (konture) u hidrauličkom smislu, adekvatno predstaviti *graničnim uslovom treće vrste* (Cauchy–jevim uslovom kod Haitjema et al., 2010, odnosno Robin–ovim uslovom kod Dotlić, 2014; 2015), koji ima svoje specifičnosti koje ga čine drugačijim i dodatno složenijim u odnosu na ostale, tradicionalne, granične uslove treće vrste prisutne u oblasti primenjenog modeliranja podzemnih voda (kao što su uslovi: „reka“, „drenaža“, „opšti pijezometarski nivo“; Anderson & Woessner, 1992; Anderson et al., 2015; Bear & Cheng, 2010).

Ono što uslov „dren“ čini graničnim uslovom treće vrste i u matematičkom i hidrauličkom smislu sličnim numeričkim paketima zasnovanim na graničnom uslovu treće vrste u najčešće prisutnim kodovima i računarskim interfejs programima za hidrodinamičko modeliranje podzemnih voda, tj. režima izdani (MODFLOW, FEFLOW, Processing MODFLOW, Visual MODFLOW, HydroGeoSphere, Groundwater Modeling System GMS, HYDRUS, Lizza & PAK–P) je upravo postojanje prifilterske zone oko drenova, zbog čega izdani i dren kao izvor dreniranja izdani nemaju idealan hidraulički kontakt. Budući da kontakt drenova sa vodonosnom sredinom nije idealan u hidrauličkom smislu, tj. nije bez hidrauličkih gubitaka na kontaktu dve sredine, jasno je da se

drenovi ne mogu simulirati graničnim uslovom prve vrste, tj. graničnim uslovom konstantnog nivoa ili *Dirichlet*-ovim graničnim uslovom.

Upotreba graničnog uslova druge vrste (*Neumann*-ovog graničnog uslova) nije adekvatna iz više razloga, od kojih je prvi taj što zadavanje konstantnog kapaciteta drena podrazumeva da je doticaj podzemnih voda iz izdani u dren jednak ili ravnomeran duž čitave trase filterske konstrukcije drena, a što, kao što je prethodno rečeno, nije slučaj u realnim uslovima. Zadavanje ravnomerno raspoređenog proticaja kroz dren će za posledicu imati i neadekvatan raspored pijezometarskog nivoa u izdani, naročito u zoni lepeze drenova, zbog čega će adekvatna kalibracija modela sa aspekta nivoa izdani biti otežana. Istovremeno, kvantifikovanje hidrauličkih karakteristika drenova preko kojih bi trebalo sagledati praktične aspekte sprovođenja hidrodinamičke analize: uspešnost izrade bunara, ocenu primenjenih mera njegove regeneracije ili praćenje efekata procesa starenja tokom vremena, neće biti moguće.

Zadavanje konstantnog (ravnomernog) pijezometarskog nivoa ili ravnomernog kapaciteta nije adekvatan pristup u hidrodinamičkoj simulaciji i analizi bunara sa horizontalnim drenovima zbog toga što granični uslov prve i druge vrste ne podrazumevaju zadavanje prifilterske zone oko drenova, ali ni drenova kao karakterističnih vodozahvatnih objekata (cilindričnog oblika, dužine i prečnika). Ovo ograničenje je jednim delom moguće prevazići pri izradi modela primenom različitih modelarskih tehnika, tako što bi se izvršila vrlo intenzivna diskretizacija prostora modela u zoni drenova simuliranog bunara, uz zadavanje zone nižih vrednosti filtracionih karakteristika, čije se rasprostranjenje podudara sa trasom drena (za svaki od drenova bi trebalo zadati odgovarajuću zonu). Ipak, ni u slučaju ovakvog pristupa ne može se govoriti o hidraulički realnoj simulaciji bunara, već samo o manje ili više uspešnoj hidraulički ekvivalentnoj simulaciji režima izdani, u smislu kalibracije modela prema kapacitetima bunara i nivoima izdani (osmotrenim u pijezometrima) koji nastaju kao posledica zahvatanja datih količina podzemnih voda. *Dakle, evidentno je da se u svrhe projektovanja i izgradnje novih bunara, obnavljanja postojećih utiskivanjem novih drenova i izučavanja procesa starenja, hidrodinamički modeli realizovani primenom bilo kog graničnog uslova izuzev uslova „dren“ ne mogu smatrati reprezentativnim.*

### **3.2.4 Sličnost graničnog uslova „dren“ sa uslovima treće vrste konturnih uslova u hidrauličkoj teoriji filtracije podzemnih voda**

Dok u fizičkom smislu, vezu reke i izdani predstavlja površina kontakta korita reke i aluvijalnih sedimenata u kojima je ono usečeno, u hidrodinamičkom smislu (bilo u prirodnim, bilo u radom vodozahvatnih objekata inhibiranim uslovima) kvalitet hidrauličke veze određuje intenzitet razmene voda između reke i izdani, a taj kvalitet zavisi od debljine i propusnosti sedimenata deponovanih na dnu korita vodotoka. U hidrauličkom smislu, prifilterska zona drenova ima funkciju analognu sedimentima istaloženim na dnu rečnog korita, te stoga od debljine i propusnosti prifilterske zone zavisi veličina doticaja podzemnih voda iz izdani u dren.

Između prifilterske zone drena i sedimenata rečnog korita postoji evidentna razlika u geometriji, a istovremeno i sličnost u načinu kvantitativnog određivanja propusnih karakteristika na hidrodinamičkim modelima. Sedimenti korita ravničarskih reka suštinski imaju horizontalno rasprostranjenje. Kao horizontalni se i zadaju u diskretnim poljima modela u okviru kojih se zadaje granični uslov „reka“, dok filtracija površinskih voda kroz sedimente korita ima smer upravan na njihovo pružanje. Iz ovog razloga se vertikalna komponenta koeficijenta filtracije naslaga rečnog korita koristi kao relevantna za definisanje njihove propusnosti. Isti je slučaj i sa zadavanjem otpora na filtraciju podzemnih voda kroz polupropusne tvorevine (međuslojeve).

Sa druge strane, geološki materijal prifilterske zone je „obmotan“ oko filterske konstrukcije drena, zbog čega ona ima kružni oblik u poprečnom preseku, odnosno geometriju cilindričnog oblika u prostoru (*slika 11*). Za definisanje propusnosti materijala od kojeg je izgrađena prifilterska zona,

polazi se od toga da su pri infiltraciji podzemnih voda iz izdani u prifiltersku zonu strujnice upravne na konturu zone, zbog čega je relevantna komponenta otpora na kretanje podzemnih voda u smeru upravnom na pružanje konture drena, odnosno radijalno u prostoru.

Na ovom mestu biće bliže obrazložena dinamička komponenta razmene voda između reke i izdani, odnosno između izdani i bunara sa horizontalnim drenovima, u zavisnosti od promene hidrauličkih karakteristika sloja kroz koji se vrši kretanje voda, čijim prisustvom i hidrauličkom ulogom su predmetni granični uslovi definisani kao uslovi trećeg reda (hidraulički aspekt procesa obalske filtracije je bio predmet brojnih istraživanja: Wilson, 1993; McDowell–Boyer et al., 1986; Fox et al., 2002; Kelly & Murdoch, 2002; Sophocleus, 2002; Schubert, 2002; Wett et al., 2002; Chen, 2003; Fox & Durnford, 2003; Zlotnik, 2004; Salehin et al., 2004; Su et al., 2007; Brunner et al., 2010; Boreli–Zdravković, 2014; Siergieiev et al., 2015; Dimkić & Pušić, 2016; Wang et al., 2016).

Prethodno je rečeno da intenzitet prihranjivanja izdani na račun doticaja iz reke zavisi od veličine razlike između vodostaja u reci i nivoa podzemnih voda u izdani, za prisutne propusne karakteristike sedimenata istaloženih na dnu rečnog korita. Što je ova razlika veća, veće je i prihranjivanje izdani na račun površinskih voda, proporcionalnost je koja proističe iz Darsijevog zakona filtracije kroz poroznu sredinu. Za ovakav odnos se može reći da predstavlja opšti slučaj uslova hidrodinamičkog sistema „reka – izdan – bunar sa horizontalnim drenovima“, u kojem do povećanja razlike u nivoima dolazi usled porasta vodostaja u reci ili, što je ređi slučaj, usled snižavanja nivoa u izdani na račun povećanja zahvatanja podzemnih voda bunarima uz obale reke.

Međutim, do povećanja razlike između nivoa u reci i nivoa u izdani dolazi i usled slabljenja propusnosti tankog sloja na kontaktu reke i vodonosnih sedimenata kroz koji se odvija razmena voda. U slučaju niskih vrednosti filtracionih karakteristika sedimenata na dnu reke, naročito u sadejstvu sa njihovom značajnijom debljinom, uvećanje količine voda kojima se prihranjuje izdan neće biti značajno čak ni u uslovima veoma visokih vodostaja u reci.

### **3.2.5 Hronološki prikaz razvoja MODFLOW–USG koda za diskretizaciju uže zone bunara sa horizontalnim drenovima nestrukturiranim mrežama diskretnih polja na hidrodinamičkom modelu**

Sve do pojave *MODFLOW–USG* verzije koda početkom marta meseca 2013. g. (USG u nazivu potiče od osnovne odlike programa da je zasnovan na primeni nestrukturirane mreže diskretnih polja, engl. *UnStructured Grid*, kojima se diskretizuje oblast istraživanja i u kojima je primenjena jednačina za rešavanje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina kojima se opisuju uslovi kretanja podzemnih voda u razmatranom domenu; Polomčić et al., 2013b), koja je predstavljala značajan evolutivni iskorak u odnosu na prethodnu, do tada aktuelnu *MODFLOW–2005* verziju, mogućnosti za hidraulički manje ili više verodostojnu simulaciju bunara sa horizontalnim drenovima u okviru hidrodinamičkih modela bile su ograničene. Do tada je postojalo samo nekoliko softvera čijom upotrebom je bilo moguće simulirati bunare sa horizontalnim drenovima većim stepenom hidrauličke reprezentativnosti u odnosu na granične uslove prisutne u *MODFLOW*, *FEFLOW* i drugim programima. U pitanju su 3D programi zasnovani na metodi analitičkih elemenata: *Tim<sup>ML</sup>* (Bakker & Strack, 2003; Bakker, 2004; 2005) i *GFLOW* (Haitjema, 2010), koji su otvorenog tipa, te kao takvi slobodni za preuzimanje i upotrebu. Ovi programi imaju i određena ograničenja – zahtevaju poznavanje programiranja i mogu da predstave jednostavnije prirodne uslove u smislu geološke građe i hidrogeoloških odlika terena, hidroloških uslova i dr.

Suštinski, sve do pojave *MODFLOW–USG* samo jedan softver za verodostojnu realizaciju hidrodinamičke analize bunara sa horizontalnim drenovima je promovisan u svetu. Reč je o softveru *LIZZA* koji je namenski razvijen za potrebe istraživanja bunara na izvorištu podzemnih voda Beograda (Kojić et al., 1998; IJČ & BioRC, 2004). Softver *LIZZA* je prvobitno bio zasnovan na primeni numeričke metode konačnih elemenata, da bi nakon nekoliko godina bio unapređen

implementacijom metode konačnih zapremina (Vidović et al., 2011; 2014). Softver nije bio dostupan za upotrebu van ustanove za čije je potrebe razvijen, zbog čega je sve do 2013. godine i pojave MODFLOW–USG bio osetan nedostatak široko rasprostranjenog i univerzalno dostupnog namenskog računarskog programa koji bi obezbedio uslove istraživačima u predmetnoj oblasti da realizuju istraživanja i testiraju naučne hipoteze.

Upravo je nedostatak adekvatnog softverskog alata uticao na to da se tokom godina istraživačke prakse širom sveta razviju brojni pristupi i tehnike u modeliranju bunara sa horizontalnim drenovima, kao i dugih vrsta horizontalnih vodozahvatnih objekata, koji su imali određenog uspeha u reprezentaciji stvarnih stanja i uslova eksploatacije bunara (hronološki i metodološki razvoj ovih tehnika detaljnije obrađuju Božović et al., 2020b).

Interesantno je da nije bilo pokušaja upotrebe *Conduit Flow Process* (CFP, Shoemaker et al., 2008) paketa kreiranog za simulaciju kretanja podzemnih voda kroz karstne pukotine i kaverne, kao i da je *Multi–Node Well* (MNW1 i MNW2; Halford & Hanson, 2002; Konikow et al., 2009) paket za simulaciju kompleksnih vodozahvatnih objekata (vertikalnih bunara koji zahvataju vode iz više izdani, horizontalnih i kosih bunara) svega dva puta bio uspešno primenjen u simulaciji bunara sa horizontalnim drenovima (Kelson, 2012; Dahlstrom et al., 2015).

### **3.2.6 Upotreba MODFLOW–USG koda i Connected Linear Network (CLN) numeričkog paketa u savremenoj simulaciji bunara sa horizontalnim drenovima**

U okviru MODFLOW–USG verzije programa razvijen je i implementiran *Connected Linear Network Process* paket (CLN) sa ciljem simulacije linijskih pojava i objekata koji imaju odliku da je njihova dužina višestruko veća od njihovog prečnika, dok je ujedno prečnik višestruko manji od dimenzija diskretnih polja modela. Dodatno, jednodimenzionalni objekti se mogu međusobno povezivati u celine i na taj način na modelu predstavljati prostorno i hidraulički kompleksni sistemi, kao na primer sistemi pukotina i kanala u karstnim stenskim masama (Kresic & Panday, 2017) ili bunari sa horizontalnim drenovima kao konstruktivno i hidraulički kompleksan vid vodozahvatnog objekta. MODFLOW–USG kod je napisan tako da je CLN paket blisko povezan sa osnovnim GWF (*Groundwater Flow Process*) numeričkim paketom, koji je kreiran kako bi se implementirala nestrukturirana mreža diskretnih polja i omogućilo povezivanje jednog polja sa proizvoljnim brojem susednih polja (Polomčić et al., 2013), zbog čega su jednačine za kretanje podzemnih voda u izdani, za kretanje podzemnih voda unutar CLN analitičkih elemenata i za kretanje između izdani i CLN elemenata povezane u jedinstven matriks diferencijalnih jednačina za nestrukturirana polja, te se i rešavaju istovremeno.

Primena CLN paketa za simulaciju bunara sa horizontalnim drenovima počela je 2015. g., kada su Dahlstrom et al. (2015) vršili komparaciju MNW i CLN paketa za simulaciju bunara, kao i različite pristupe u diskretizaciji prostora modela u zoni bunara. Prvu detaljnu (i detaljnije dokumentovanu) simulaciju bunara sa horizontalnim drenovima upotrebom CLN numeričkog paketa, uključujući analizu kompleksnih promena režima nivoa izdani, zajedno sa analizom procesa starenja bunara na izvorištu podzemnih voda Beograda, u nacionalnim i međunarodnim okvirima realizovali su Božović et al. (2015). Usledile su i druge hidrodinamičke studije sa primenom CLN paketa koje su imale za cilj: definisanje potencijala lokacija na kojima su izgrađeni bunari u pogledu raspoloživih količina resursa podzemnih voda, simulaciju različitih uslova sanacije bunara utiskivanjem novih drenova (prema različitim metodama formiranja drenova, na različitim kotama, u različitim uslovima režima rada bunara, Božović et al., 2016b), identifikaciju uzroka i analizu dinamike porasta hidrauličkih otpora na drenovima kao efekta procesa starenja (Božović et al., 2020a), optimalnu šematizaciju hidrograma crpenja i nivograma radnog nivoa (Polomčić et al., 2022).

U okviru hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima sa procesima starenja na primeru izvorišta podzemnih voda Beograda, sprovedenih za potrebe predmetne disertacije, korišćene su dve verzije MODFLOW programa za simulaciju i analizu režima podzemnih voda:

- 1) ***U prvoj fazi sprovedenog istraživanja*** korišćena je MODFLOW–USG verzija (Panday et al., 2013), a interfejs softver je bio Groundwater Vistas 6 (Rumbaugh & Rumbaugh, 2011).

Ova faza je uključila početne simulacije i analize hidrauličkih karakteristika drenova na grupi odabranih bunara, koje su praćene ispitivanjem uticaja dubine utiskivanja drenova i hidrauličkih uslova režima rada bunara (Božović et al., 2015; 2016b). U nastavku su usledila ispitivanja metodologije hidraulički realnog predstavljanja prifilterske zone drenova, zajedno sa identifikacijom prisustva početnih otpora na drenovima odabranog bunara i kvantifikovanjem dinamike slabljenja hidrauličkih karakteristika drenova, odnosno porasta hidrauličkih otpora na drenovima tokom analiziranog višegodišnjeg perioda rada bunara (Božović et al., 2020a).

U ovoj fazi je kao unutrašnji granični uslov korišćen uslov ravnomernog piježometarskog nivoa unutar drenova, a učinjen je napor da se kvantifikuju otpori na kretanje zahvaćenih podzemnih voda u unutrašnjosti konstrukcije drenova (za koje je utvrđeno da su minimalni, zbog čega su u daljim simulacijama u ovoj fazi bili izostavljeni).

- 2) ***U drugoj fazi sprovedenog istraživanja*** korišćena je aktuelna MODFLOW 6 generacija koda (Hughes et al, 2017; Langevin et al., 2017; 2022), zajedno sa aktuelnom Groundwater Vistas 8 verzijom interfejs softvera (Rumbaugh & Rumbaugh, 2020).

Prednosti upotrebe CLN paketa u simulaciji bunara se ogledaju u tome što se hidraulički mehanizam eksploatacije podzemnih voda i geometrijske karakteristike drenova mogu realno predstaviti na modelu. Rezultat kalibracije modela predstavljaju definisane hidrauličke karakteristike drenova – ***vrednosti koeficijenta propusnosti  $[K_{pz}/d_{pz}]$  i veličine hidrauličkog otpora na drenovima ( $\Delta H_d$ )***. Za rad u CLN paketu na modelu, korisnicima/istraživačima na raspolaganju stoji prethodno navedena dokumentacija o MODFLOW (verzije USG i 6) i Groundwater Vistas (verzije: 6, 7 i 8) u kojima postoje detaljne informacije o teorijskom osnovu numeričkog paketa i načinu njegove primene.

U MODFLOW–USG programu postoji više mogućnosti za proračun propusnosti hidrauličkog kontakta između CLN analitičkog elementa i ćelija nestrukturirane mreže (tj. GWF i CLN polja na modelu), preko kojih se kvantitativno definiše razmena voda između izdani i drena, a koja zapravo predstavlja veličinu doticaja u dren ili kapacitet drena. Od izbora u ovoj opciji zavisi da li će bunar na modelu biti simuliran hidraulički realno, što izboru daje najveći značaj. Navedeni načini definisanja propusnosti drenova su:

1. proračun preko jednačine Tima za propusnost vodonosnih sedimenata pri opitu crpenja, bez uticaja prifilterske zone (*Günther Thiem, Wenzel, 1935; Houben & Batelaan, 2021*);
2. proračun preko jednačine Tima, sa uticajem prifilterske zone;
3. direktno zadavanje vrednosti za koeficijent propusnost drena i dalje sprovođenje postupka kalibracije sve do usvajanja reprezentativne vrednosti koeficijenta;
4. proračun preko koeficijenta filtracije i debljine prifilterske zone.

Debljina prifilterske zone je parametar za čiju se vrednost autor modela odlučuje na osnovu posedovanja informacija o stvarnoj debljini prifilterske zone drenova na analiziranom bunaru, zatim na osnovu literaturnih podataka o dijapazonu vrednosti debljina koje ova zona može imati (Driscoll, 1986; Sterrett, 2007) ili na osnovu sopstvenih, utemeljenih pretpostavki. Usvojena vrednost po pravilu ostaje konstantna do kraja proračuna na modelu. Sa druge strane, koeficijent filtracije je parametar do čije se identifikacije reprezentativnih vrednosti dolazi kroz postupak kalibracije modela, što podrazumeva brojne iteracije u pogledu testiranih vrednosti.

## 4 METODOLOGIJA NAUČNO–ISTRAŽIVAČKOG RADA

Imajući u vidu da su za izgradnju novog bunara sa horizontalnim drenovima ili revitalizaciju postojećeg utiskivanjem novih drenova potrebna značajna materijalna ulaganja, kvantitativna evaluacija brojnih, kompleksnih i genetski različitih vrsta uticaja na kapacitet i režim rada bunara nalaže sprovođenje hidrodinamičke analize putem izrade detaljnih numeričkih modela, koji se odlikuju visokim stepenom reprezentativnosti simuliranih uslova i pouzdanosti dobijenih rešenja. U cilju izrade detaljnog hidrodinamičkog modela potrebno je raspolagati brojnim informacijama o geološkoj građi i hidrogeološkim odlikama sedimenata koji izgrađuju kaptiranu izdan, hidrološkim i morfološkim karakteristikama reke, zahvatanju podzemnih voda i dr. Kalibracijom modela se kvantifikuju elementi režima izdani i raspoložive količine podzemnih voda u modelom obuhvaćenim granicama terena. Sprovođenjem parametarske analize, kao numeričkog eksperimenta na kalibrisanom modelu, definiše se uticaj različitih prirodnih, tehničkih i hidrauličkih uticaja na izbor optimalnog tehničkog rešenja izgradnje, odnosno revitalizacije analiziranog bunara. Upravo se jedna takva parametarska analiza nalazi u fokusu hidrodinamičkih istraživanja realizovanih u okviru izrade predmetne disertacije. Reč je o analizi u kojoj je na hidrodinamičkom modelu ispitivan uticaj propusnosti prifilterske zone drenova na kapacitet i režim eksploatacije bunara.

Jedan od najvažnijih i najkompleksnijih postupaka u procesu definisanja hidrogeoloških uslova terena za izgradnju bunara sa horizontalnim drenovima, definisanja tehno–ekonomski optimalnog tehničkog rešenja utiskivanja novih drenova na postojećim bunarima, kao i kvantitativne analize eksploatacionog režima izdani i izučavanja procesa starenja bunara jeste realizacija hidrodinamičke analize putem izrade hidrodinamičkog modela. Izrada hidrodinamičkog modela bunara sa horizontalnim drenovima je istraživački postupak koji treba da rezultira kvantifikovanjem potencijalnosti lokacije određenog bunara u pogledu raspoloživih količina podzemnih voda koje se mogu zahvatati na datoj lokaciji, definisanjem optimalne konfiguracije vodozahvatnih delova konstrukcije bunara, optimalnim uslovima eksploatacije i režima rada bunara, imajući u vidu procese starenja.

Iz razloga kompleksnih hidrogeoloških uslova beogradskog izvorišta podzemnih voda, zajedno sa tehničkim karakteristikama vodozahvatnih objekata, koji uključuju:

- složeni litofacijalni sastav sedimenata izdani i prostorno heterogene hidrogeološke odlike sedimenata, koje treba identifikovati kalibracijom hidrodinamičkog modela;
- uticaj prisustva slabije propusnih sedimenata facije povodnja, starača ili mrtvaja (tzv. međuslojeva) na: hidrauličke uslove rada bunara, uslove eksploatacije podzemnih voda u smislu analize strujanja, hidrodinamički režim izdani i prihranjivanje zone bunara iz pravca reke Save;
- kvalitet hidrauličkog kontakta reke Save i sedimenata izdani u kojima je rečno korito neposredno usečeno, kao i uticaj različitih hidroloških uslova na intenzitet prihranjivanja izdani;
- eventualni uticaj drugih tela površinskih voda obuhvaćenih hidrodinamičkim modelom na režim izdani (kanala, rukavaca, Savskog jezera i dr.);
- uticaj rada bunara na pijezometarske nivoe u zaleđu bunarskog niza i veličinu prihranjivanja iz pravca zaleđa;
- hidrauličke karakteristike postojećih ili novoutisnutih drenova na bunarima, kao i njihovu promenu tokom vremena eksploatacije na račun napredovanja procesa starenja, zbog čega se drenovi i mehanizam zahvatanja podzemnih voda trebaju predstaviti hidraulički realno;
- definisanje optimalne kote formiranja novih drenova, zajedno sa njihovom dužinom, prečnicima i pravcima utiskivanja, metodom utiskivanja i formiranja prifilterske zone;
- analizu uticaja rada grupe bunara;
- hemijski i mikrobiološki sastav podzemnih voda, kao osnov za definisanje optimalnog početnog kapaciteta pojedinačnog drena i režima eksploatacije bunara;

jedinstvena metoda istraživanja kojom se mogu simulirati i evaluirati efekti svih navedenih, ali i drugih uticaja, jeste savremena hidrodinamička analiza putem izrade trodimenzionalnog numeričkog hidrodinamičkog modela režima analiziranog dela kaptirane izdani, uz upotrebu graničnog uslova „dren“.

U cilju analize režima nivoa izdani u zoni bunara sa horizontalnim drenovima, potrebno je raspolagati određenim informacijama o: tehničkim karakteristikama i stanju otvorenih drenova (njihovoj aktuelnoj dužini izvođenjem podvodnog snimanja, orijentaciji u planu, vertikalnoj zakrivljenosti, konstruktivnom stanju filterskih cevi, prisustvu sedimenata vodonosne sredine u unutrašnjosti drenova i dr.), nivoima podzemnih voda u šahtu bunara, kapacitetima bunara, oscilacijama nivoa podzemnih voda u osmatračkim objektima adekvatne konstrukcije i položaja u odnosu na drenove, osnovnim pokazateljima hemijskog sastava zahvaćenih podzemnih voda (prvenstveno sadržaja dvovalentnog gvožđa i vrednosti redoks potencijala).

Bunar sa horizontalnim drenovima RB–5m koji je predmet detaljnih hidrodinamičkih istraživanja režima izdani i procesa starenja je odabran imajući u vidu uslove neophodne za sprovođenje hidrauličke analize drenova. Sprovedena istraživanja su zasnovana na stavu da je neophodan uslov za izučavanje procesa starenja i kvantifikovanja hidrauličkih otpora na drenovima postojanje reprezentativnih objekata za osmatranje režima nivoa podzemnih voda. Reprezentativnim osmatračkim se smatraju pijeometri izrađeni u zoni lepeze drenova (neposredno uz drenove), koji imaju filter male dužine i čiji položaj u profilu izdani odgovara koti utisnutih drenova (prema Božović et al., 2016a).

#### **4.1 Metodologija izrade numeričkog hidrodinamičkog modela analiziranog dela izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda**

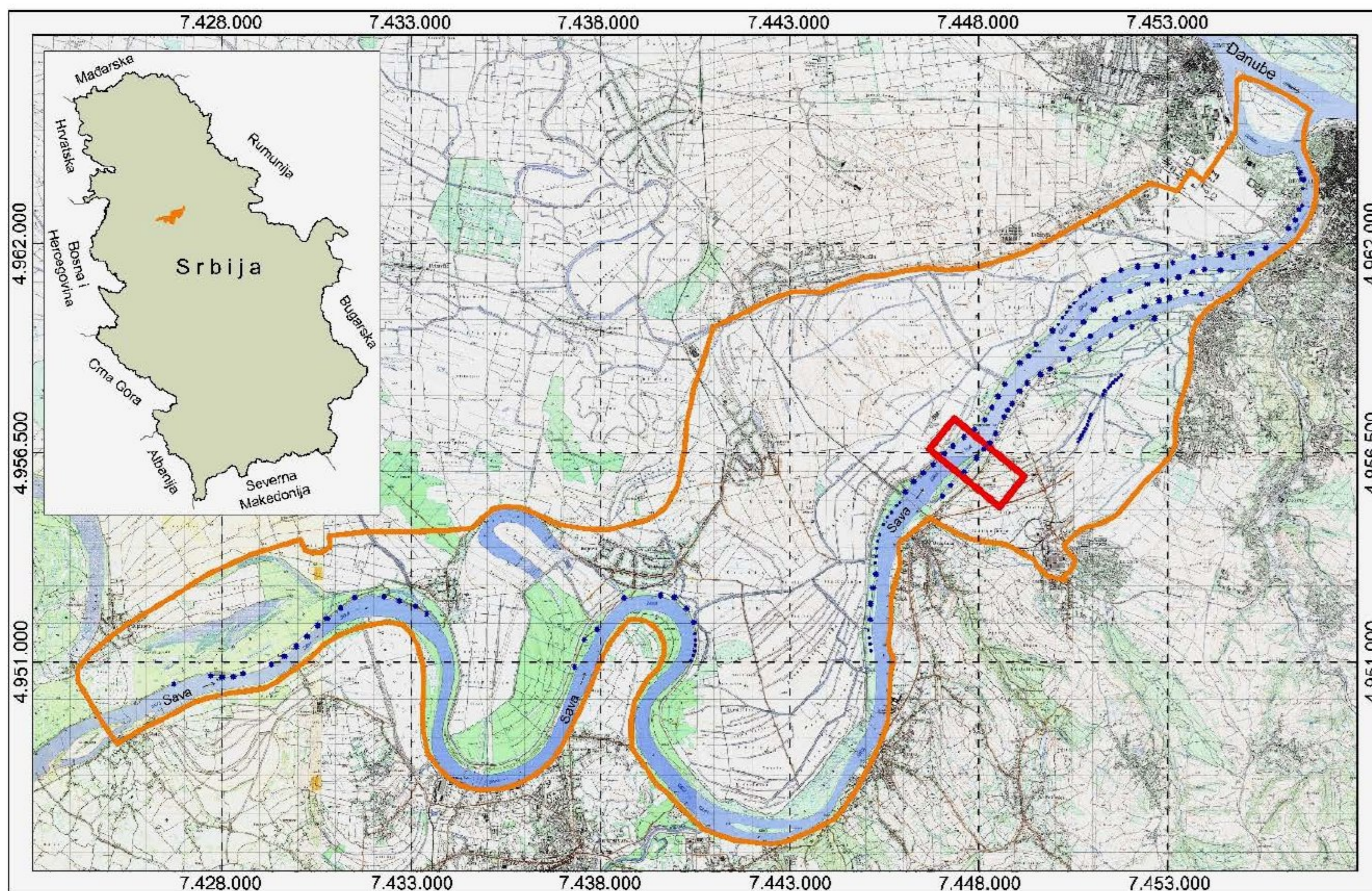
##### **4.1.1 Podaci o detaljno analiziranom bunaru sa horizontalnim drenovima RB–5m**

Izvorište podzemnih voda Beograda je formirano u sedimentima aluvijalne ravni reke Save, u najnižvodnijem delu njenog toka, od ušća u reku Dunav pa sve do 55. km uzvodno. Predmetni bunar RB–5m lociran je na desnoj obali reke, na području Makiškog polja. Od ušća Save u Dunav bunar je udaljen oko 13 km, dok je bunarski šaht od linije korita reke udaljen oko 120 m. Granice prostora izvorišta podzemnih voda Beograda i granice dela obuhvaćenog hidrodinamičkim modelom su predstavljene na *slici 12*.

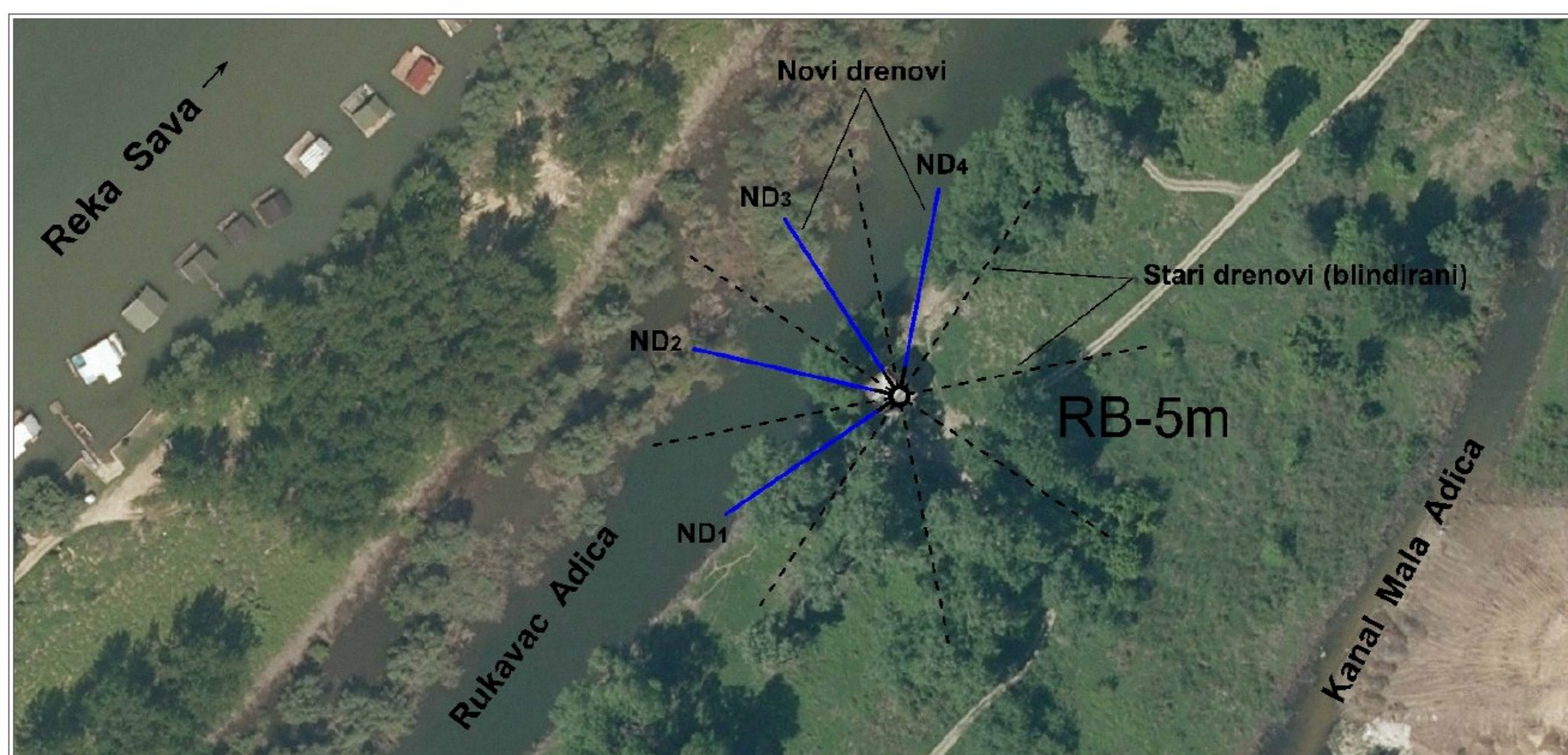
Bunar RB–5m ima konstrukciju uobičajenu za ovaj tip vodozahvatnog objekta na izvorištu podzemnih voda Beograda. Sastoji se od nadzemne građevine (mašinske sale i zatvaračnice), armirano–betonskog bunarskog šahta i drenova.

Bunar je izgrađen i u vodozahvatni sistem izvorišta podzemnih voda uključen 1976. g. Izgrađen je neposredno uz rukavac Adicu (*slike 13 i 14*), koji okružuje manje rečno ostrvo uz desnu obalu Save i koji je u pre više decenija pregrađen na uzvodnom kraju. Rukavac je na taj način ostao povezan sa rekom Savom na svom nizvodnom kraju, na rastojanju od 250 m od bunara.





Slika 12: Položaj dela izvorišta podzemnih voda Beograda obuhvaćenog hidrodinamičkim modelom (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

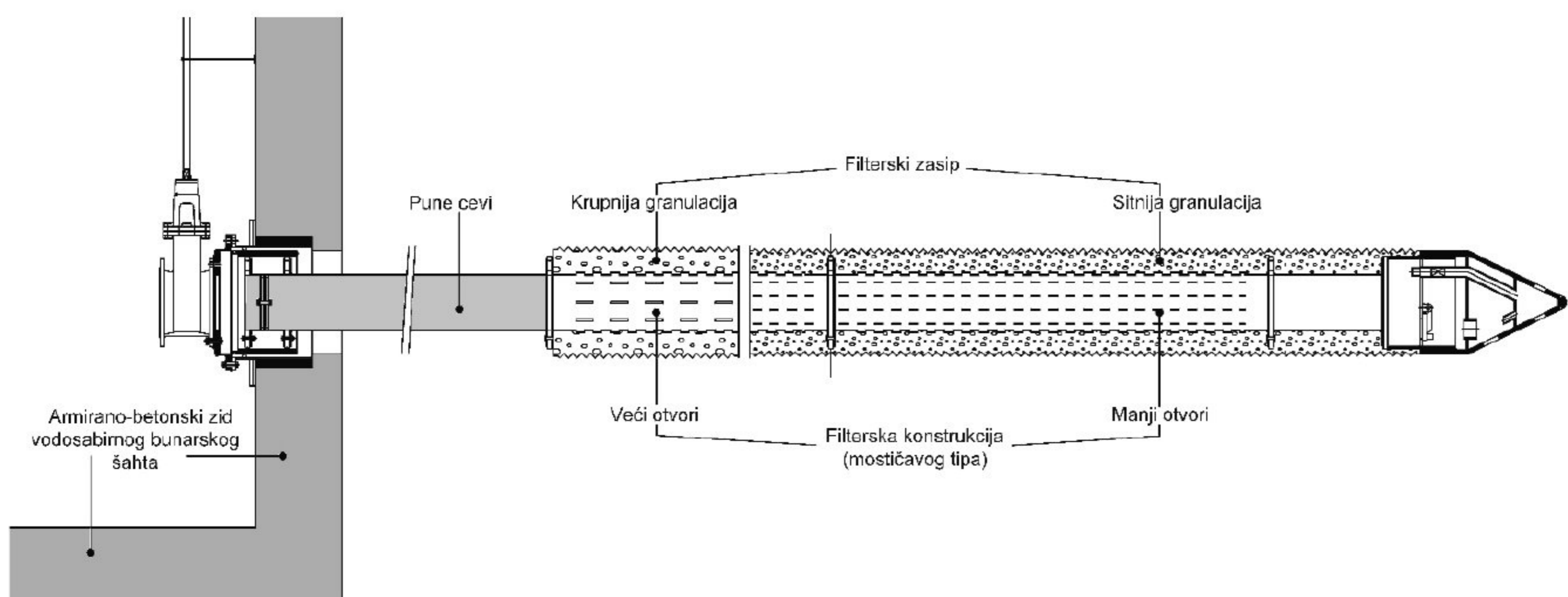


Slika 13: Orijentacija u odnosu na rukavac Adicu i dužine novih drenova bunara RB-5m

Na bunaru su formirana četiri nova drena 2008. godine, na koti 50,60 mm, primenom Projsag postupka. Drenovi se sastoje od: bušaće glave, filterske konstrukcije mostičavog tipa dužine 45 m, neperforirane (tzv. „slepe“) cevi uz bunarski šaht dužine 5 m i filterskog zasipa ugrađenog oko filterskih cevi. Dimenzije otvora na filterskim cevima (visina tzv. „mostića“), kao i granulacija filterskog zasipa su promenljive duž trase svakog drena (slika 15). Na drenovima je prisutna manja vertikalna devijacija, u dijapazonu od 0,2 do 1,8 m.



Slika 14: Rukavac Adica, levo: širina vodnog ogledala oko 60 m pri vodostaju Save od  $H_{Sava}=72$  mm na dan 12. 03. 2020. g.; desno: ušće rukavca u Savu; dole: ušće danas pregrađeno nasipanjem



Slika 15: Konstrukcija drena formiranog prema Projsag metodi, na primeru bunara RB-5m

Hidrohemijske karakteristike podzemnih voda zahvaćenih bunarom su nepovoljne sa aspekta procesa starenja: sadržaj dvovalentnog gvožđa je oko 2,8 mg/l, sadržaj ukupnog gvožđa oko 3,5 mg/l, dok se vrednosti oksido-redukcionog potencijala kreću oko 85 mV (Dimkić et al., 2011a).

#### 4.1.2 Metodologija izrade 3D hidrogeološkog modela analiziranog dela terena

##### *Pojam 3D hidrogeološkog modela i pregled značajnijih rezultata izrade modela*

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 hidrogeološkog modela predstavlja prvu, a neretko i najznačajniju, fazu u izradi hidrodinamičkog modela režima izdani, transporta materije i energije u hidrogeološkoj sredini. Formiranje 3D hidrogeološkog modela podrazumeva proces prikupljanja, sistematizacije, digitalizacije (prevođenja u oblik u kojem ih je kroz odabrani softverski alat moguće inkorporirati u hidrogeološki 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. Reprerentativnost hidrogeološkog modela zavisi od reprerentativnosti, 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 hidrogeološkog 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 vrela, pijezometarski 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 hidrogeološki model predstavlja manje ili više uspešnu aproksimaciju uslova i procesa prisutnih u okviru analiziranog terena, zbog čega je potrebno vršiti kontinuirano i iterativno unapređivanje njegove reprerentativnosti 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 hidrogeoloških modela (Enemark et al., 2019). Među njima, istaknuto mesto pripada monografiji autora Kresic & Mikszewski (2012), u kojoj je na primerima najrazličitijih vrsta hidrogeoloških uslova predstavljena metodologija izrade i vizuelizacije hidrogeoloških modela. Teorijski osnov izrade 3D hidrogeoloških modela je predstavljen u radu Betancur et al. (2012). Na primeru zagađenja i remedijacije izdani, Nikolaidis & Shen (2000) predstavljaju izradu 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 građe, 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 (2012). 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. Brojni primeri teorije i prakse izrade hidrogeoloških modela u različite svrhe su raspoloživi u fondu USGS (na ovom mestu se navode samo neki: Reilly, 2001; van Heeswijk et al., 2008; Sweetkind et al., 2013; Davis et al./USGS, 2014; Long et al./USGS, 2014).

U nacionalnim okvirima, 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. Definiciju 3D

hidrogeološkog modela i metodologiju detaljne šematizacije hidrogeološke sredine u okviru postupka izrade 3D modela je prvi postavio autor Polomčić (1995), na primeru kladovske izdani.

Autori Polomčić et al. (2011) su izradili 3D hidrogeološki model površinskog kopa „Polje E“ u okviru kolubarskog ugljonosnog basena, kao podlogu za izradu hidrodinamičkog modela u cilju projektovanja sistema zaštite kopa od podzemnih voda. Izrađeni 3D hidrogeološki model su dopunili Bajić & Polomčić (2012). 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 3D hidrogeološkog modela, kako na njegovim spoljašnjim konturama, tako i unutar prostora kopa. Polomčić et al. (2013a) su izradili 3D hidrogeološki model kao prethodni korak u izradi hidrodinamičkog modela izvorišta za vodosnabdevanje Obrenovca, u aluvijalnim sedimentima reke Save, na kojem se podzemne vode, kao i u Beogradu, zahvataju preko bunara sa horizontalnim drenovima i linijskim nizom vertikalnih bunara. Formiranjem 3D hidrogeološkog modela, Radanović et al. (2016) su izvršili šematizaciju aluvijalne izdani u delu priobalja Dunava, koje je pod uticajem uspora nastalog radom HEPS „Đerdap I“ i sistema drenažnih objekata za regulaciju režima nivoa izdani.

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. Metodologiju izrade hidrogeološkog modela aluvijalnih sedimenata reke Save kod Beograda predstavili su autori Zorić et al. (2012). Ona predstavlja polaznu osnovu i svojevrsni „ključ“ za litostratigrafsku i hidrogeološku interpretaciju i šematizaciju vodonosne sredine u profilu. Na osnovama navedene metodologije autori Božović et al. (2015; 2016b) 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.

#### **4.1.3 Metodologija izrade 3D hidrogeološkog modela bunara sa horizontalnim drenovima**

Postupak izrade trodimenzionalnog hidrogeološkog 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 (što 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 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 hidrogeološkog 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, 3D hidrogeološkim 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 naspravnoj obali duž toka reke obuhvaćenog modelom. U prostor hidrodinamičkog modela su uključeni okolni bunari sa horizontalnim drenovima za koje je procenjeno da su eventualno mogli biti pod uticajem rada bunara RB-5m, odnosno sa kojih je mogao biti ostvarivan uticaj na zonu bunara RB-5m. U pitanju su bunari: RB-4m i RB-6m na desnoj obali Save, kao i RB-45, RB-46 i RB-47 na njenoj levoj obali (prostor hidrogeološkog modela izrađenog za potrebe analize bunara RB-5m, zajedno sa položajem okolnih bunara, rasporedom istražnih bušotina i graničnih uslova je predstavljen na slici 16).



Slika 16: Granice 3D hidrogeološkog i hidrodinamičkog modela, sa položajem bunara, istražnih bušotina korišćenih u šematizaciji izdani i graničnim uslovima (Božović et al., 2022)

Za potrebe izrade hidrodinamičkog modela, izvršena je detaljna hidrogeološka šematizacija istražnog prostora. Šematizacija je izvršena kroz izradu 3D hidrogeološkog modela, u koje svrhe su analizirani rezultati izrade gotovo 150 istražnih bušotina, od čega više od 20 u užoj zoni bunara RB-5m. Princip šematizacije je podrazumevao da jedan deo profila izdani, tj. hidrogeološko-litostratigrafski sloj, čine oni sedimenti koji imaju srodan litološki i granulometrijski sastav, hidrogeološke odlike, kao i da su istih genetskih uslova stvaranja (stvoreni tokom jedne faze korita ili u fazi povodnja, mrtvaja ili starača).

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, 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 hidrogeološki model čini zapravo 4D sistemom). Još jedan 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 priobalnog bunarskog niza.

Analiza prostornih odnosa geometrije korita reke i šematizovanih vodonosnih i slabijepropusnih delova vodonosne sredine ima naročit značaj sa aspekta formiranja 3D hidrogeološkog modela. Na osnovu definisane usečenosti korita reke u sedimentima izdani, dobija se adekvatna osnova za preciznije prostorno zadavanje graničnog uslova „reka“ na numeričkom modelu, a samim tim i za verodostojnije kvantifikovanje kvaliteta hidrauličkog kontakta reke i izdani.

U pogledu šematizacije bunara sa horizontalnim drenovima, postupak podrazumeva predstavljanje bunara u skladu sa njihovim realnim tehničkim, konstruktivnim karakteristikama (izgled bunarskog šahta i izgled nadzemne konstrukcije bunara su prikazani na slici 17). Na ovaj način, za razliku od ranije zastupljenog pristupa hidraulički ekvivalentnih karakteristika drenova, stižu se uslovi za definisanje hidrauličkih karakteristika drenova koje su bliže realnim. Ovakav pristup predstavljanja drenova na modelu ima naročit značaj sa aspekta identifikacije uzroka hidrauličkih otpora prisutnih na drenovima, kao i dinamike razvoja procesa starenja drenova.



Slika 17: Izgled nadzemne konstrukcije i unutrašnjosti vodosabirnog šahta bunara RB–5m

#### 4.1.4 Analiza eksploatacionog režima nivoa izdani u zoni bunara RB–5m

Upravljanje režimom rada bunara sa horizontalnim drenovima vrši se regulacijom nivoa voda u bunarskom šahtu, tj. kontrolisanim sniženjem u samom bunaru. Funkcionalno stanje drenova danas ima dominantan uticaj na kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda. Stanje filterskih cevi i hidrauličke karakteristike prifilterske zone drenova su osnovni razlog značajnog sniženja nivoa u šahtovima bunara i skromnih kapaciteta bunara.

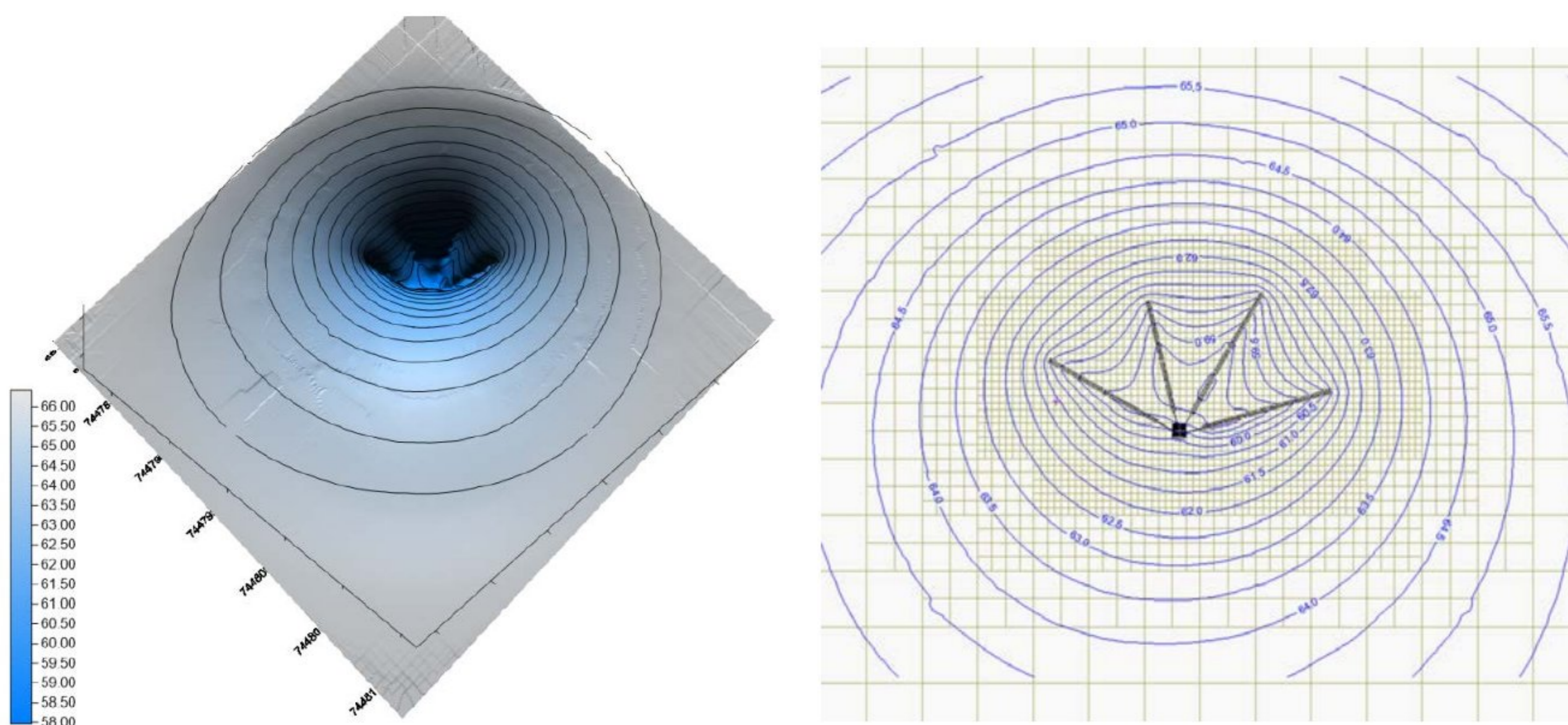
Godinama unazad nivoi podzemnih voda u šahtovima bunara (radni nivoi) na beogradskom izvorištu podzemnih voda se nalaze na maloj visini u odnosu na utisnute drenove. Ova pojava je prvenstveno posledica smanjene vodoprijemne sposobnosti drenova koja, sa druge strane, proizilazi iz njihove višedecenijske izloženosti delovanju procesa korozije i kolmiranja (Dimkić et al 2011a, 2011b, 2012; Polomčić, 2001). Može se reći da značajno oboreni radni nivoi, zajedno sa skromnim prosečnim kapacitetom bunara danas predstavljaju prepoznatljivu odliku beogradskog izvorišta, kao i jasan pokazatelj stanja vodozahvatnih objekata i režima eksploatacije podzemnih voda na njemu.

Prema stavu autora Božović et al. (2016a), identifikacija i analiza režima nivoa izdani u zoni eksploatacije podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima predstavlja pouzdan, reprezentativan i relativno jednostavan mehanizam kojim se mogu sagledati potencijal lokacije bunara u pogledu raspoloživih količina podzemnih voda i obezbediti uslovi za pravilan izbor objekata koje je potrebno revitalizovati, odnosno izvršiti zamenu dotrajalih i nefunkcionalnih starih drenova. U cilju analize režima nivoa izdani u zoni bunara, potrebno je raspolagati određenim informacijama o stanju drenova, nivoima voda u šahtovima, oscilacijama nivoa izdani u adekvatnim osmatračkim objektima, osnovnim pokazateljima biohemijskog sastava zahvaćenih voda. Stoga je istraživanje koje je sprovedeno u okviru izrade disertacije uključilo i definisanje karakterističnog hidrodinamičkog režima nivoa izdani u zoni uticaja rada odabranog bunara.

Polaznu tačku za istraživanje koje su sproveli Božović et al. (2016a) je predstavljalo zapaženje da održavanje po pravilu niskih nivoa podzemnih voda u šahtovima bunara sa horizontalnim drenovima rezultira kapacitetima čije se vrednosti kreću u dijapazonu od 3 do 150 l/s (u vreme kada su autori vršili istraživanje), kao i da se u neposrednoj zoni uticaja eksploatacije podzemnih voda, pod ovakvim režimom rada bunara, formiraju veoma različiti režimi nivoa izdani.

Kapaciteti bunara su funkcija broja i stanja aktivnih drenova, kao i hidrogeoloških odlika i uslova prihranjivanja vodonosne sredine. Samim tim, velike razlike u količini zahvaćenih podzemnih voda između bunara ukazuju na velike razlike u funkcionalnom stanju njihovih vodoprijemnih delova, kao i na izraženu prostornu heterogenost litološkog sastava i filtracionih karakteristika porozne sredine u okruženju bunara. U odnosu na postojeći intenzivan režim rada bunara, Božović et al. (2016a) su prepoznali i izdvojili pet karakterističnih režima nivoa podzemnih voda, zbog čega se i bunari na izvorištu mogu svrstati u pripadajuće grupe u odnosu na karakteristični režim.

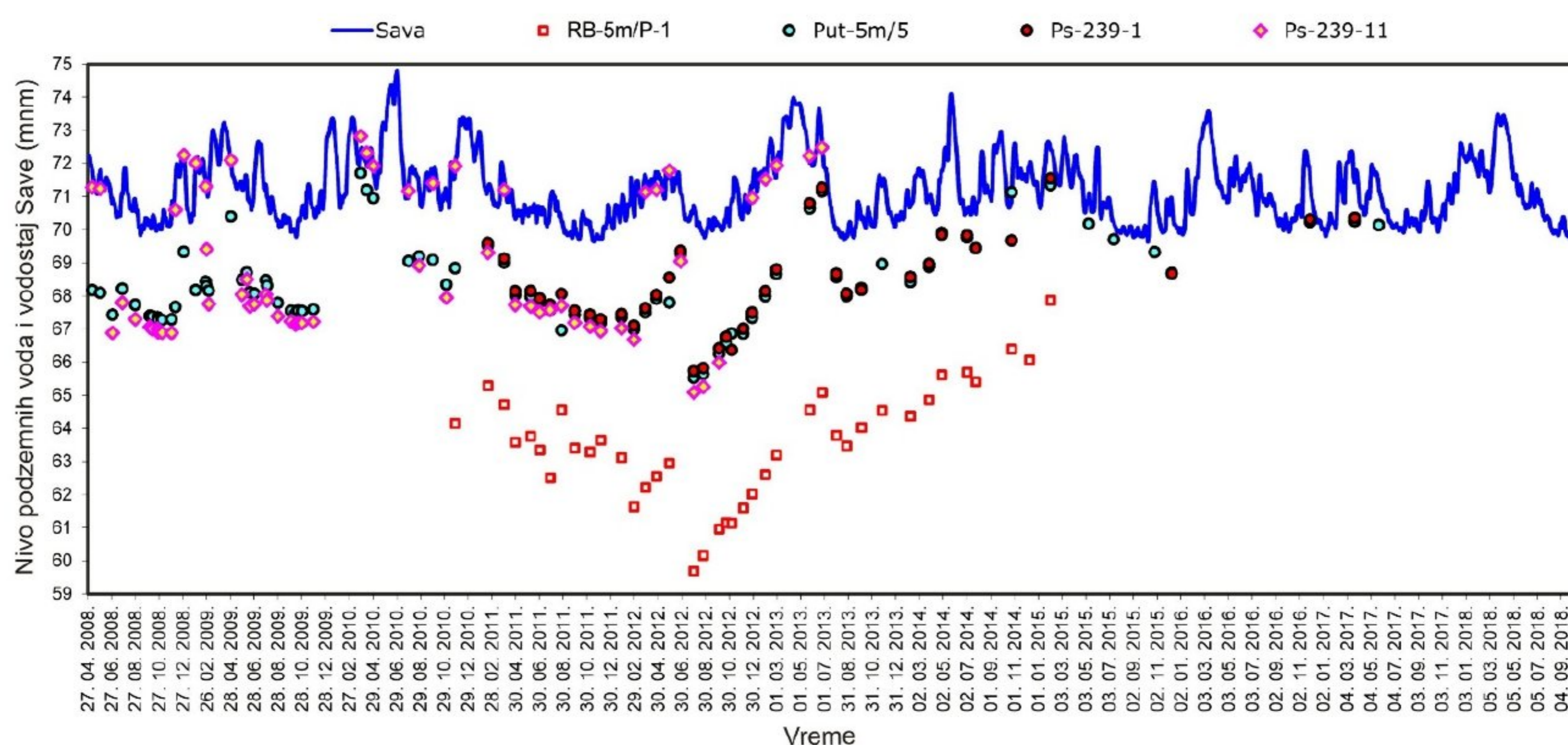
U odnosu na metodologiju definisanja režima nivoa izdani u zoni uticaja svakog od bunara na izvorištu, može se konstatovati da režim nivoa podzemnih voda u zoni bunara RB-5m predstavlja kombinaciju dva karakteristična režima i to prvog i petog režima (prema Božović et al., 2016a). U slučaju analiziranog bunara, režim podzemnih voda je sledeći: u uslovima održavanja niskog radnog nivoa u bunaru, nivoi u pijeziometrima se nalaze na različitim dubinama: u pijeziometru sa kratkim filterom ugrađenim na koti drenova (u delu izdani koji je pod direktnih uticajem zahvatanja podzemnih voda) nivo se nalazi na većoj dubini, dok se u pijeziometrima sa plitko ugrađenim filterom ili filterom veće dužine koji spaja dublji i plići deo izdani nivoi nalaze na manjoj dubini (i pod dominantnim uticajem hidroloških prilika), pri čemu je kapacitet relativno skroman (slika 18).



Slika 18: Karakterističan izgled površine nivoa izdani u zoni bunara sa horizontalnim drenovima (na primeru bunara RB-5m, meren u dubljem delu profila izdani, pri eksploataciji od  $Q=50$  l/s, jul 2012. g.)

Dodatno, usled intenzivnog procesa starenja, kapacitet bunara ubrzano opada, usled čega nivoi u piježometrima kontinualno rastu (*slika 19*). U slučaju bunara na kojima su evidentni efekti procesa kolmiranja, pri niskom nivou vode u šahtu tokom vremena eksploatacije dolazi do manje ili više ubrzanog smanjenja kapaciteta bunara. Smanjenje kapaciteta se manifestuje kontinuiranim promenama nivoa podzemnih voda u zoni drenova, tako što nivo izdani ubrzano i konstantno raste.

U cilju praćenja i kvantitativne analize hidruličke efikasnosti i starenja bunara, potrebno je, povremenom dinamikom (ako nije moguće kontinualno), meriti kapacitet bunara, nivo u šahtu i nivoe izdani. Izradom piježometra neposredno uz dren se uticaj linearnog laminarnog otpora usled kretanja podzemnih voda kroz izdan završava na spoljašnjoj konturi prifilterske zone, zbog čega se izmerena razlika između nivoa unutar drene i nivoa u piježometru može pripisati hidrauličkom otporu u prifilterskoj zoni („*based on delineation of flow regimes*“, prema Houben, 2015b). Malom dužinom filtera, ugrađenim na dubini drenova, izbegava se merenje različitih hidrodinamičkih režima u delovima izdani u povlati i podini slabije propusnog međusloja.



Slika 19: Nivoi podzemnih voda u odabranim piježometrima u zoni bunara RB-5m

#### 4.1.5 Metodologija ispitivanja uticaja šematizacije prostora i vremena na rezultate numeričkih hidrodinamičkih modela bunara sa horizontalnim drenovima

Jedna od početnih faza izrade numeričkog hidrodinamičkog modela podrazumeva postupak diskretizacije prostora i vremena, unutar kojih se modelskim ispitivanjima analiziraju pojave i procesi prisutni u predmetnoj izdani. U okviru postupka diskretizacije prostora obuhvaćenog numeričkim modelom, vrši se podela oblasti istraživanja na adekvatan broj diskretnih proračunskih polja ili tzv. ćelija modela, u kojima se primenjuju jednačine kojima se opisuje kretanje podzemnih voda pod uticajem zadatih graničnih uslova. Diskretizacija vremena se vrši u slučaju onih numeričkih modela koji imaju komponentu vremena, tj. koji su nestacionarnog tipa. Na ovaj način, parametri kojima se definišu vodonosna sredina (hidrogeološke odlike stenskih masa, geometrija izdani i dr.) i granični uslovi (kapaciteti bunara, vodostaji reka i dr.) na modelu mogu biti zadati kao promenljivi u vremenu i prostoru. Iz razloga mogućnosti zadavanja ovih i drugih parametara analiziranog terena, numerički hidrodinamički modeli omogućavaju realniju reprezentaciju po pravilu složenih prisutnih prirodnih i antropogenih uslova u odnosu na analitičke modele.

Istražni prostor i vremenski period režima izdani se na modelu dele na manje diskretne intervale, imajući u vidu da hidrodinamički modeli sa prostornim poljima manjih dimenzija i sa kraćim vremenskim intervalima rezultiraju proračunima većeg stepena tačnosti u odnosu na modele na kojima su simulirani istovetni prisutni uslovi, a u kojima proračunska polja imaju veće dimenzije i u



kojima su vremenski intervali dužeg trajanja. Sa druge strane, kraći vremenski intervali dovode do toga da analizirani period bude diskretizovan većim brojem proračunskih intervala, zbog čega je duže vreme potrebno za realizaciju jednog celog proračuna (od prvog do poslednjeg intervala), a samim tim i za izradu modela po svim fazama postupka. Na isti način, manje dimenzije proračunskih polja će na modelu rezultirati većim ukupnim brojem polja kojima je prostor modela diskretizovan (u planu i profilu), dok veći broj polja zahteva veće angažovanje resursa računara na kojem se realizuju proračuni, odnosno na kojem se kreira hidrodinamički model. Na granicama raspoloživih proračunskih mogućnosti računarskog aparata dolazi do pojave numeričkih nestabilnosti koje vode uvećanju greške modela, nereprezentativnosti dobijenih rezultata i, neretko, prekidu u izvršenju pokrenutih proračuna, što dodatno produžava vreme izrade modela.

U opštem slučaju, pitanje stepena detaljnosti šematizacije prostora i vremena na numeričkim hidrodinamičkim modelima ima istaknut značaj, budući da broj i dimenzije homogenih diskretnih polja utiču na rezultate proračuna u pogledu sračunatih vrednosti pijezometarskih nivoa i bilansa modela. I u slučaju modela na kojima se simuliraju uslovi kretanja podzemnih voda pod uticajem zahvatanja bunarima sa horizontalnim drenovima, pitanje diskretizacije prostora i vremena može imati fundamentalan značaj na rezultate ispitivanja. Od dužine vremenskog koraka u prvom redu zavisi adekvatna reprezentacija hidroloških uslova, tj. vrednosti osrednjenih nivoa voda u reci Savi u slučaju analiziranog izvorišta podzemnih voda Beograda. Pitanje adekvatnog izbora dimenzija diskretnih polja dobija naročit značaj u užoj zoni bunara sa horizontalnim drenovima, imajući u vidu da kretanje podzemnih voda u ovoj zoni karakterišu prostorno promenljivi i strmi gradijenti nivoa izdani, tj. u kojoj nivo izdani ima izražen trodimenzionalan karakter (*slika 18*).

#### **4.1.6 Analiza diskretizacije vremena na formiranom hidrodinamičkom modelu**

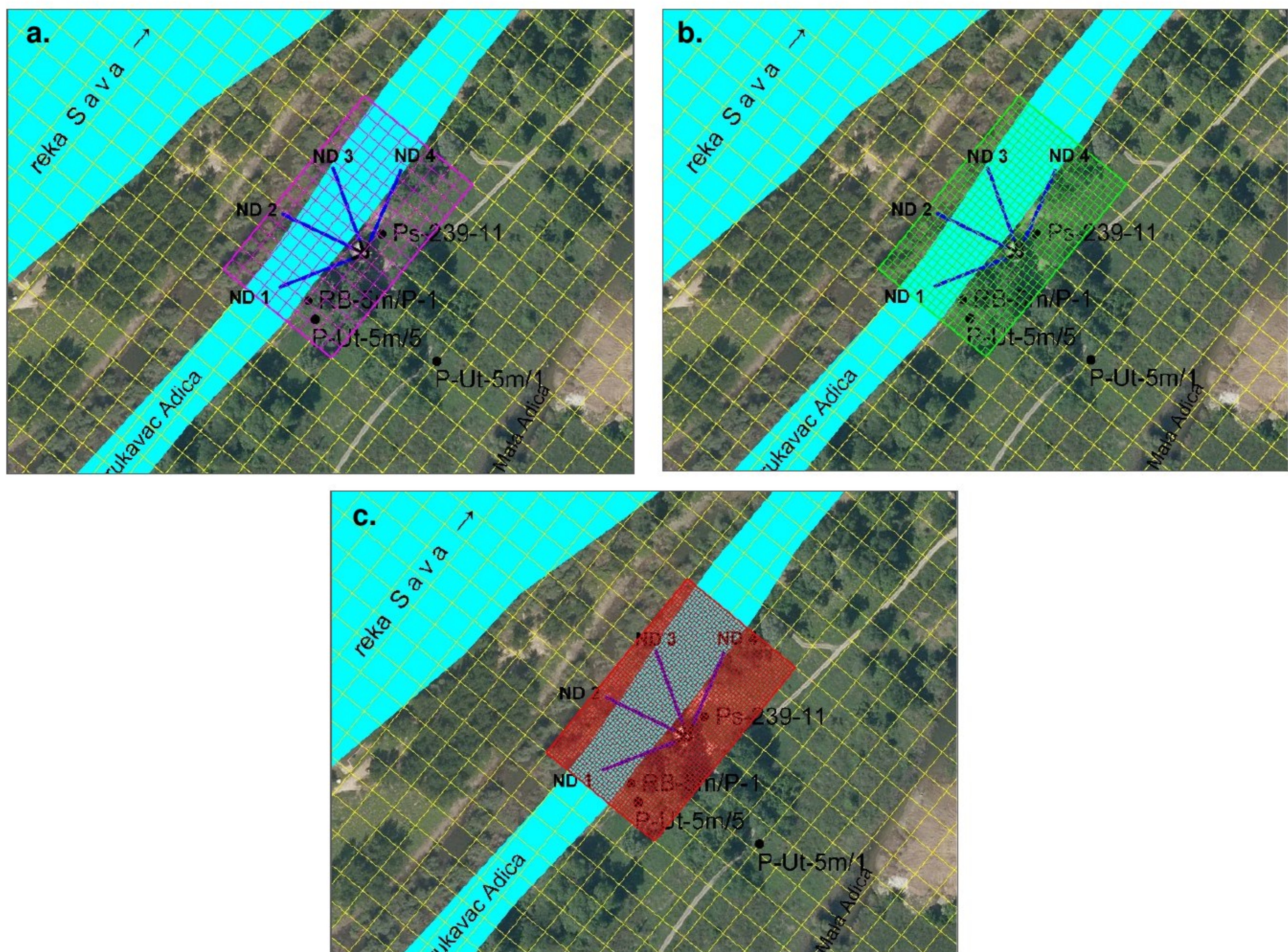
Za dužinu trajanja jednog proračunskog intervala na hidrodinamičkom modelu analiziranog prostora, na kojem se simulacijom nestacionarnih uslova režima podzemnih voda izučavaju zakonitosti formiranja, kretanja prema i zahvatanja podzemnih voda preko drenova bunara, se može reći da predstavlja postupak od kojeg u najvećoj meri zavisi uspeh kalibracije modela (makar u zadovoljavajućem roku i bez povratka autora modela na ponovno definisanje polaznih postavki u njegovoj izradi). U ovom koraku do izražaja dolazi iskustvo istraživača ne samo u radu sa hidrodinamičkim modelima, već i u suštinskom hidrogeološkom poznavanju režima izdani i metoda izučavanja kvantitativnih elemenata režima. Stoga je od valjanosti diskretizacije vremena na predmetnom hidrodinamičkom modelu bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m zavisio najvažniji element režima izdani formirane u aluvijalnoj ravni reke Save iz koje se zahvataju podzemne vode za potrebe vodosnabdevanja Beograda – diskretizacija vodostaja Save kao vodećeg faktora režima podzemnih voda. Na osnovu analize dnevnih promena vodostaja bilo je evidentno da Savu odlikuju česte i brze promene vodostaja, zbog čega je konstatovano da dužina vremenskog perioda jednog proračunskog intervala treba da bude srazmerno kratka kako bi se uslovi ostvareni u prirodi zadovoljavajućim stepenom reprezentativnosti preneli na numerički aparat, koji je u funkciji rešavanja postavljenog cilja istraživanja. Ipak, imajući u vidu da se na modelu simuliraju uslovi režima voda trajanja 15 godina, sprovedena je optimizacija dužine trajanja jednog vremenskog intervala, imajući u vidu resurse računara i vremena potrebnog za realizaciju modelskih ispitivanja.

Jasno je da je najuspešnija hidrodinamička analiza ona kod koje su na modelu zadaju uslovi režima koji se najmanje razlikuju u odnosu na one realne, koji se odvijaju u uslovima terena. Tako bi bilo najpoželjnije da jedan vremenski interval na modelu ima dužinu jednog dana, budući da se oscilacije vodostaja reke prikazuju dnevnom dinamikom (unutardnevne promene vodostaja su prisutne, podaci o njima se evidentiraju tri puta dnevno i predstavljaju kao osrednjene dnevne vrednosti), dok se nivoi izdani u pijezometrima i kapaciteti bunara mere sporadično. Izrada modela sa ukupno 5358 proračunskih intervala trajanja od jednog dana (koliko ima dana u periodu obuhvaćenom predmetnom hidrodinamičkom analizom) jeste teorijski moguća, ali i vrlo zahtevna. Iz tog razloga je sproveden postupak diskretizacije vremena. U cilju podele gotovo 15 godina

dugog vremenskog perioda kojim su obuhvaćeni ostvareni uslovi režima izdani koji je izučavan simulacijom na hidrodinamičkom modelu, na adekvatan broj diskretnih perioda odgovarajućeg jediničnog vremena trajanja, detaljno su analizirane promene vodostaja reke Save. U ove svrhe, na raspolaganju su bili podaci dnevnih vodostaja osmatranih na vodomernoj stanici „Beograd“ Republičkog hidrometeorološkog zavoda, lociranoj na desnoj obali Save, u blizini ušća u Dunav.

#### 4.1.7 Analiza diskretizacije prostora na formiranom hidrodinamičkom modelu

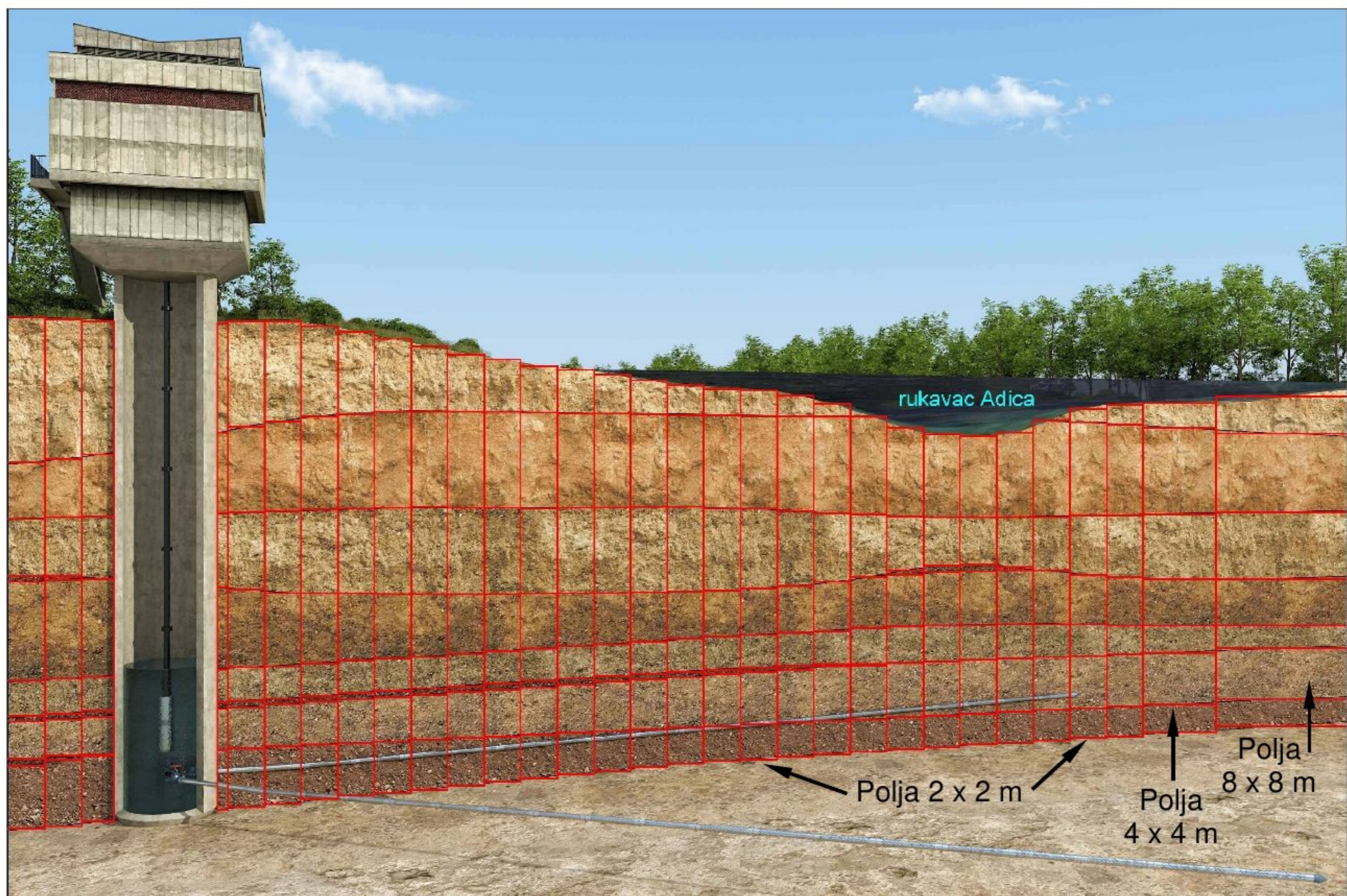
Prethodna analiza izbora adekvatnih dimenzija proračunskih polja na hidrodinamičkom modelu je sprovedena ispitivanjem uticaja različitih veličina polja primenjenih u neposrednoj zoni bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m, u kojoj je naizraženije 3D strujanje podzemnih voda. Imajući u vidu da je u prethodnim hidrodinamičkim istraživanjima bunara sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta podzemnih voda primenom MODFLOW programa i *Connected Linear Network* (CLN) paketa (Božović et al, 2015; 2016b; 2020a; Polomčić et al, 2022) korišćen pristup diskretizacije užeg prostora bunara primenom nepravilne pravougaone umetnute mreže (*Quadtree refinement*), u sprovedenoj analizi izbora optimalnog pristupa diskretizacije uže zone bunara i veličine diskretnih polja je korišćena pravilna pravougaona umetnuta mreža, *Nested grid* (Polomčić et al., 2013b), *slika 20*. Analiza je izvršena tako što je u početnom koraku ispitan uticaj samo osnovne mreže polja na hidrodinamičkom modelu, tj. bez dodatne diskretizacije prostora u neposrednom okruženju bunara, da bi potom bio ispitan uticaj tri varijante sa dodatnom diskretizacijom. Analizirana su polja dimenzija 8 x 8 m, 4 x 4 m i 2 x 2 m u planu u zoni predmetnog bunara (*slika 20*). Poređenje diskretizacije prostora u užoj zoni bunara u profilu pravilnom i nepravilnom pravougaonom umetnutom mrežom je prikazano na *slikama 21 i 22*.



Slika 20: Prikaz ispitanih varijanti uticaja dodatne diskretizacije prostora u zoni bunara RB–5m u planu upotrebom pravilne pravougaone umetnute mreže (a. polja dimenzija 8 x 8 m; b. 4 x 4 m; c. 2 x 2 m)



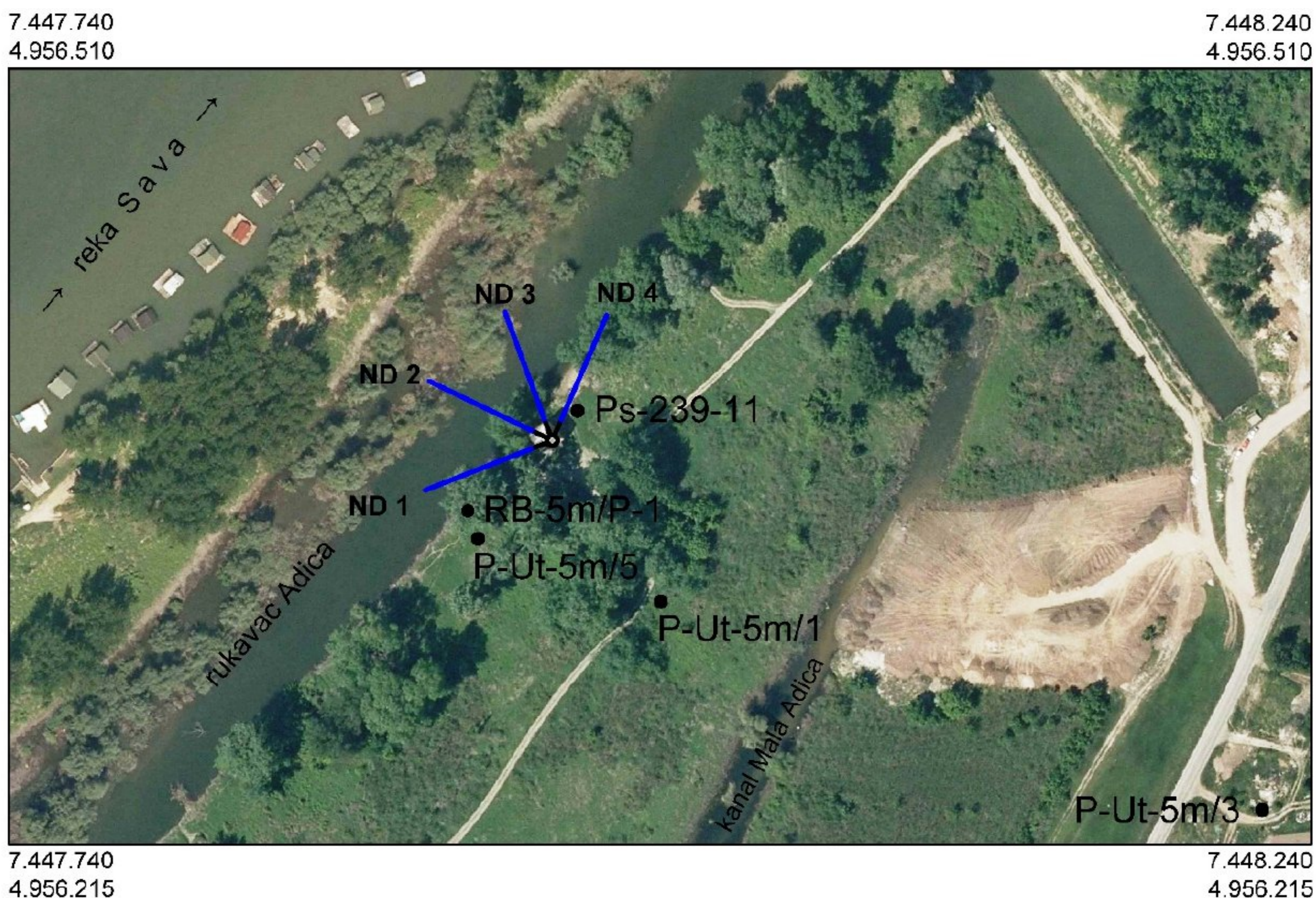
Slika 21: Prikaz primenjene diskretizacije prostora u profilu u zoni drenova bunara RB-5m upotrebom pravilne pravougaone umetnute mreže dimenzija 2 x 2 m (polja osnovne mreže su dimenzija 16 x 16 m)



Slika 22: Prikaz diskretizacije prostora u profilu upotrebom nepravilne pravougaone umetnute mreže dimenzija 2 x 2 m u zoni drenova bunara RB-5m, primenjene u naučno-istraživačkom radu Božović et al. (2020a)

Kao *pre* i *post*procesing program za podršku MODFLOW kodu korišćen je interfejs softver *Groundwater Vistas*, kao globalno široko zastupljen i visoko cenjen među istraživačima u oblasti hidrodinamičkih istraživanja podzemnih voda (Langevin & Bean, 2005; Kumar, 2019). Jedan od ključnih razloga za izbor i primenu *Groundwater Vistas* softvera u sprovedenim istraživanjima je bio taj što je njegovi autori razvijaju sopstvenu verziju CLN paketa (tzv.  $\beta$  verzija) koja je unapređena u odnosu na standardnu USGS verziju, koju koriste drugi interfejs softveri.

Analiza je sprovedena za tri karakteristična vremenska preseka koji objektivno predstavljaju različite uslove režima podzemnih voda u delu prostora obuhvaćenog modelom, a koji je pod uticajem eksploatacije podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima RB-5m. Tako je usvojeno da vremenski presek od 05. 11. 2012. godine predstavlja uslove kada se bunar nalazio u najintenzivnijem hidrauličkom režimu rada, tj. kada je njim zahvatana najveća količina podzemnih voda, a posledično, nivoi izdani u užoj zoni bunara bili najniži i sa najstrmijim gradijentima prema novim drenovima. Vremenski presek režima izdani na dan 04. 10. 2013. godine je odabran kao prosečan u smislu zahvaćene količine podzemnih voda i nivoa podzemnih voda osmotrenim u pijezometrima u zoni bunara. Vremenski presek na dan 25. 10. 2014. godine je bio reprezent nižih kapaciteta bunara i viših nivoa podzemnih voda u zoni najizraženijeg uticaja rada bunara. Za analizu su odabrani podaci o nivoima podzemnih voda osmotrenim u tri pijezometra (*slika 23*). Pijezometar RB-5m/P-1 je odabran kao reprezentativan osmatrački objekat u smislu uslova neophodnih za izučavanje hidrauličkog režima rada i procesa starenja bunara (Božović et al., 2016a). Najniži nivoi podzemnih voda u delu profila izdani ukojem su utisnuti novi drenovi na bunaru RB-5m su registrovani preko pijezometra RB-5m/P-1. Pijezometri Put-5m/1 i Put-5m/3 su odabrani zbog toga što su locirani u bližem, odnosno daljem zaleđu bunara, prvi izvan lepeze drenova bunara, a drugi na granici neposredne zone uticaja zahvatanja podzemnih voda drenovima analiziranog bunara. Ovakav izbor osmatračkih objekata je zasnovan na težnji da se prostorna i vremenska analiza strmih gradijenata nivoa izdani vrši preko osmatračkih objekata koji formiraju pijezometarski profil od zaleđa bunara prema bunaru i reci (tj. rukavcu Save; *slika 18*). Rezultati analize uticaja različitih veličina diskretnih polja su na kraju izvršenih proračuna upoređeni sa rezultatima dobijenim primenom pristupa nepravilne umetnute mreže (Božović et al., 2020a).



Slika 23: Lokacije pijezometara u zoni bunara sa horizontalnim drenovima RB-5m

## 4.2 Metodologija ispitivanja starenja bunara sa horizontalnim drenovima na numeričkom hidrodinamičkom modelu

U cilju definisanja realnih početnih hidrauličkih karakteristika novih drenova bunara RB–5m, kao i njihove promene tokom vremena eksploatacije, na modelu je analiziran ostvareni režim izdani tokom celog perioda nakon revitalizacije bunara. Bunar je uključen u eksploataciju krajem aprila meseca 2008. godine. Prvom fazom hidrodinamičke analize je obuhvaćen period od 01. 05. 2008. godine do 30. 09. 2018. godine. Simulirani period je imao trajanje 3805 dana i njim su obuhvaćene tri regeneracije novih drenova. U drugoj fazi hidrodinamičke analize, period istraživanja je produžen do 31. 12. 2022. godine, da bi u adekvatnim hidrološkim uslovima koji su ostvareni tokom jeseni 2022. godine bio simuliran rad grupe bunara obuhvaćenih modelom hidraulički reprezentativnim pristupom, uvažavajući kapacitete bunara proistekle iz kriterijuma biohemijskog kolmiranja. Analiza efekata četvrte regeneracije drenova je poslužila kao rekalkibracija modela prve faze i po njemu zasnovanih zaključaka i stavova o uzrocima i dinamici starenja bunara RB–5m.

Pod realnom simulacijom bunara sa horizontalnim drenovima smislu režima podzemnih voda se podrazumeva zadavanje na modelu hidrauličkog mehanizma eksploatacije podzemnih voda na način na koji se ona odvija u stvarnim uslovima terena. Eksploatacija podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima se odvija kontrolisanim sniženjem nivoa u vodosabirnom bunarskom šahtu, tj. zadavanjem odgovarajućeg radnog nivoa bunara.

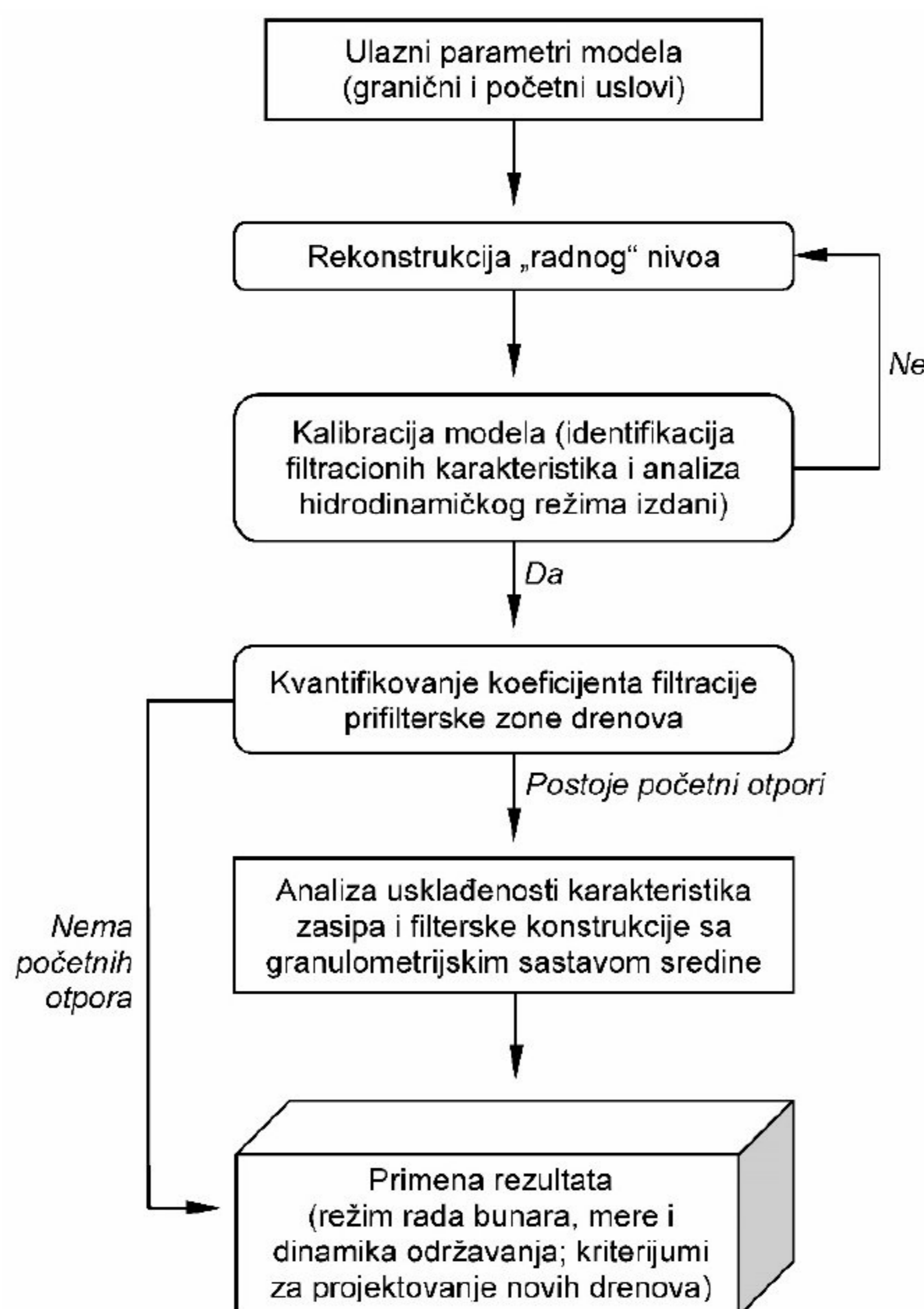
Drenovi bunara RB–5m su simulirani realno i u pogledu tehničkih i geometrijskih karakteristika. Zadati sa prečnikom filterske konstrukcije  $\varnothing 250$  mm, dužine 45,0 m i sa ugrađenim filterskim zasipom debljine  $d=0,085$  m oko filterskih cevi. Drenovi su zadati u skladu sa utvrđenim vertikalnim devijacijama. Ukupni hidraulički otpori ili gubici u prifilterskoj zoni drenova su predstavljeni preko hidrauličkog parametra koeficijenta propusnosti drenova, koji predstavlja odnos koeficijenta filtracije prifilterske zone i debljine prifilterske zone drenova [ $K_{pz}/d_{pz}$ ].

Kvantifikovanjem promena koeficijenta propusnosti novih drenova jednog od obnovljenih bunara tokom vremena, Dimkić et al., (2010) predstavljaju efekte procesa kolmiranja. Međutim, iste vrednosti koeficijenta propusnosti drenova se mogu dobiti zadavanjem sasvim različitih vrednosti pojedinačnih komponenti otpora na drenovima: **koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova i njene debljine**. Zadavanje neadekvatne, isuviše velike, debljine prifilterske zone drenova na modelu uslovljava identifikaciju isuviše velikih vrednosti koeficijenta filtracije, dok se kao rezultat odnosa dve komponente otpora dobija koeficijent propusnosti drenova sa kojim se postiže uspešna kalibracija modela (zadovoljavajuća saglasnost izmerenih i sračunatih nivoa podzemnih voda u osmatračkim objektima i kapaciteta bunara).

Budući da su novi drenovi na predmetnom bunaru RB–5m formirani prema Projsag tehnologiji, kao i imajući u vidu indicije o postojanju uvećanih početnih otpora na drenovima (na osnovu analize režima nivoa podzemnih voda u zoni bunara, tj. razlike između nivoa u šahtu i nivoa izdani izmerenih u piježometrima izgrađenim u zoni bunara), u sprovedenoj hidrodinamičkoj analizi je usvojeno da prifiltersku zonu drenova predstavlja ugrađeni filterski zasip:  $K_{pz} = K_{fz}$ . Na osnovu uočenog prisustva uvećanih početnih hidrauličkih otpora na drenovima, tj. u prifilterskoj zoni i na filterskoj konstrukciji drenova, usvojeno je da se prifilterska zona, pored konstruktivnog, i u hidrauličkom smislu treba poistovetiti sa omotačem filterskog zasipa ugrađenog oko filterskih konstrukcija četiri nova drena na bunaru RB–5m.

Usvojeno je i da je debljina filterskog zasipa, tj. prifilterske zone drenova konstantna tokom analiziranog perioda, dok je koeficijent filtracije prifilterske zone vremenski promenljiva veličina. Iz tog razloga je promena hidrauličkih karakteristika drenova i porasta otpora na drenovima predstavljena promenom vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone. Na ovaj način je dosadašnji pristup u hidrodinamičkoj analizi procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima unapređen tako što kolmiranje drenova predstavlja promena (suštinski smanjivanje) vrednosti

koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova ( $K_{pz}$ ), umesto koeficijenta njihove propusnosti [ $K_{pz}/d_{pz}$ ]. Definisani i primenjeni pristup je prvi put primenjen u oblasti hidrodinamičke analize procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima, kao i uopšteno bilo kog tipa vodozahvatnih objekata. Metodologija istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima, na primeru bunara RB–5m beogradskog izvorišta je predstavljena na slici 24.



Slika 24: Metodologija istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima, na primeru bunara RB–5m beogradskog izvorišta podzemnih voda (prema Božović et al., 2020a)

Imajući u vidu da promene vodostaja Save, nivoa u bunaru i koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova utiču na kapacitet bunara i nivoe podzemnih voda, vrednosti potencijala i polja brzina u zoni bunara se menjaju u svakom proračunskom intervalu. Zbog toga je kalibracija modela podrazumevala realizaciju velikog broja proračunskih iteracija za svaki od 119 proračunskih intervala za koji su postojali elementi za kalibraciju modela. Svaki od njih je kalibrisan zadovoljavajućom tačnošću u pogledu izmerenih i sračunatih vrednosti kapaciteta bunara (sa razlikama u granicama 1–2 l/s) i nivoa u piježometrima (sa razlikama u nivou podzemnih voda u piježometrima centimetarskog reda veličine) tek nakon, po pravilu, nekoliko desetina ponovljenih proračuna. Iako su okolni bunari zadati pojednostavljeno u odnosu na bunar RB–5m, i za njih je nešto kasnije, u drugoj fazi hidrodinamičke analize, izvršena kalibracija u odnosu na izmerene kapacitete, koji su tokom analiziranih 15 godina u opadanju na račun procesa starenja, kao i nivoe podzemnih voda koji su, posledično, u porastu.

Kao što autori Lee et al. (2010) ističu, rešavanje problema u oblasti bunara sa horizontalnim drenovima na hidrodinamičkim modelima uključuje uspešno predstavljanje tri komponente toka podzemnih voda: u izdani izvan uticaja rada analiziranog bunara, iz izdani prema bunaru sa horizontalnim drenovima i toka unutar drenova. Pitanje matematičkog tretiranja režima toka voda unutar konstrukcije drenova (engl. *in-well hydraulics*) i izbora unutrašnjeg graničnog uslova – ravnomernog proticaja ili ravnomernog piježometarskog nivoa za predstavljanje hidrauličkog

domena unutar drenova je značajno za uspešnu simulaciju bunara. Kao što doticaj podzemnih voda iz izdani u drenove nije linearan niti ravnomeran duž filterske konstrukcije drena, to nije ni proticaj u unutrašnjosti drena. Iz tog razloga je unutrašnji uslov ravnomernog piježometarskog nivoa bolja aproksimacija realnog stanja od uslova ravnomernog proticaja (Zhan, 1999; Kawecki, 2000; Park and Zhan, 2002;). Sa druge strane, Chen et al. (2003) navode da ni granični uslov ravnomernog nivoa nije verodostojan, jer duž ose horizontalnog bunara uvek postoje određeni aksijalni otpori pa samim tim i pad nivoa (što važi i za drenove bunara sa horizontalnim drenovima). Dakle, u određenom trenutku realizacije predmetne hidrodinamičke analize, postavilo se pitanje koji je od dva granična uslova adekvatan u slučaju bunara sa horizontalnim drenovima.

Iskustva istraživača u oblasti hidraulike horizontalnih bunara (bili oni izrađivani za potrebe eksploatacije tečnih ugljovodonika ili podzemnih voda, u svrhe remedijacije izdani, kada se često grade ispod deponija čvrstog otpada ili u svrhe vodosnabdevanja, što je u poslednjih godina u porastu) govore da unutrašnje gubitke (usled otpora na trenja, na promenu smera kretanja podzemnih voda, na ubrzanje unutar konstrukcije bunara) treba uključiti u analizu. Međutim, konstrukcije drenova imaju veći prečnik i manju debljinu odnoosu na horizontalne bunare, dok se u slučaju analiziranog beogradskog izvorišta, pojedinačnim drenom zahvata srazmerno mala količina podzemnih voda (danas je ona maksimalno  $q_d=20$  l/s, za dužinu filterskih cevi od oko  $L_{fk}=50$  m).

Da bi se dao odgovor na ovo pitanje, potrebno je odrediti veličinu pada nivoa unutar drenova, odnosno brzinu toka i veličinu otpora na trenje (Bakker et al., 2005; Munson et al., 2009). Imajući u vidu broj i prečnik drenova, prosečan i maksimalno ostvareni kapacitet bunara RB–5m tokom analiziranog perioda ( $Q_{ave}\approx 25$  l/s,  $Q_{max}<60$  l/s), brzine kretanja podzemnih voda unutar drenova su niske, uticaj unutrašnjeg otpora praktično zanemarljiv, zbog čega pad je nivoa duž drenova u proseku manji od  $\Delta h_{un}=1,5$  cm. Stoga se može zaključiti da se izbor pristupa ravnomernog nivoa unutar drena, na hidrodinamičkom modelu predstavljenog preko unutrašnjeg graničnog uslova konstantnog nivoa (engl. *Constant Head*), može smatrati utemeljenim. Kao rezultat ovakvog predstavljanja drenova, doticaj u dren će biti najveći na krajevima drenova, dok će se sa približavanjem bunarskom šahtu smanjivati, kao rezultat sve manje razlike između nivoa u izdani neposredno uz dren i nivoa u drenu. Opadanje nivoa izdani duž drena (ujedno i smanjenje doticaja u dren) zavisi i od uticaja drugih drenova, njihovog pojedinačnog kapaciteta i međusobnog rastojanja, zbog čega je taj uticaj najmanji na krajevima drenova, a sve veći sa približavanjem šahtu.

Nedostaci upotrebe CLN paketa vezani su za granični uslov konstantnog nivoa koji je korišćen za predstavljanje nivoa u bunarskom šahtu, tj. unutar drenova. Za razliku od graničnih uslova treće vrste u MODFLOW programu (engl. *Head-dependent flux*; graničnih uslova: „Drain“, „River“ ili „GHB“), granični uslov konstantnog nivoa ne podrazumeva zadavanje vremenski promenljivih vrednosti koeficijenta propusnosti. Zbog toga su zadate vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone i debljine prifilterske zone na modelu konstantne tokom simulacije. Kako se u slučaju analiziranog bunara RB–5m koeficijenti filtracije prifilterske zone menjaju tokom vremena kao posledica kolmiranja drenova, svaki vremenski period za koji je vršena kalibracija je tretiran kao zaseban model kraćeg trajanja.

Ograničenje unutrašnjeg uslova konstantnog nivoa je uslovilo da se ukupan vremenski period koji je obuhvaćen hidrodinamičkim modelom podeli na onoliko modela koliko ima terenskih merenja kapaciteta bunara i nivoa podzemnih voda na osnovu kojih je vršena kalibracija. U okviru svakog od tih modela kraćeg (višemesečnog) trajanja su identifikovane vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone koje su omogućile uspešnu kalibraciju modela. Iz navedenog je jasno da upotreba graničnog uslova konstantnog nivoa za predstavljanje nivoa u bunaru uslovljava veliki obim rada na kalibraciji modela.

### 4.3 Metodologija hidrodinamičkih ispitivanja uticaja propusnosti prifilterske zone drenova na kapacitet i hidraulički režim rada bunara

Kako je u prethodnom delu teksta predstavljena metodologija ispitivanja uticaja diskretizacije prostora i vremena na reprezentativnost rezultata simulacije bunara sa horizontalnim drenovima, na ovom mestu biće dat prikaz primenjene metodologije analize uticaja dva parametra od kojih zavise hidraulički uticaji na kapacitet i režim rada bunara sa horizontalnim drenovima, odnosno sama propusnost drenova: filtracione karakteristike i debljina prifilterske zone drenova. Budući da analiza predstavlja numerički eksperiment realizovan na modelu, prethodno je potrebno razmotriti pitanje hidraulički realne reprezentacije drenova na numeričkim hidrodinamičkim modelima.

#### 4.3.1 Hidraulički realna simulacija bunara sa horizontalnim drenovima

Pod hidraulički realnom simulacijom bunara sa horizontalnim drenovima na hidrodinamičkom modelu u istraživanjima sprovedenim u predmetnoj disertaciji podrazumeva se zadavanje delova konstrukcije bunara – drenova i bunarskog šahta, u skladu sa realnim tehničkim i geometrijskim karakteristikama vodozahvatnog objekta, kao i hidrauličkim predstavljanjem drenova u vidu jednodimenzionalnih, linijskih elemenata, kružnog poprečnog preseka, sa adekvatnim graničnim uslovom zadatim unutar i prifilterskom zonom oko drenova. Najznačajniji delovi konstrukcije bunara su svakako njegovi drenovi, a u užem smislu to su filterske konstrukcije drenova, budući da su one vodozahvatni deo objekta. Geometrijske karakteristike drenova se na modelima zadavaju u skladu sa poznatom dužinom i prečnikom filterskih i neperforiranih (punih ili slepih) cevi. U uslovima kada se raspoložive podacima ispitivanja vertikalne zakrivljenosti drenova i ovi podaci se implementiraju u model.

Granični uslov koji se zadaje unutar linijskih nizova jednodimenzionalnih analitičkih elemenata, tj. unutrašnji granični uslov, dominantno je na modelima bunara beogradskog izvorišta podzemnih voda bio predstavljen ravnomernim pijeziometarskim nivoom podzemnih voda. Uslov ravnomernog nivoa podrazumeva da su otpori na kretanje unutar konstrukcije drena zanemareni, odnosno da je nivo unutar drena jednak nivou podzemnih voda u bunarskom šahtu. Da se pretpostavka ravnomernog nivoa može smatrati utemeljenom za bunare na beogradskom izvorištu, a uopšteno i za sve bunare osim onih sa izrazito visokim kapacitetima, potvrdili su Božović et al., (2020a).

Sa graničnim uslovom ravnomernog nivoa unutar drenova i prostorno i vremenski promenljivim nivoima izdani u zoni uticaja bunara, dolazi se do značaja preostala dva parametra koji se odnose na same drenove, a koji utiču na veličinu ili intenzitet doticaja podzemnih voda. U pitanju su **debljina prifilterske zone** i njene **filtracione karakteristike**. Od ovih parametara zavisi propusnost prifilterske zone drenova, tj. hidraulička funkcionalnost ili sposobnost drenova da zahvataju podzemne vode sa manjim ili većim hidrauličkim otporima, promenljivim tokom vremena.

Kao što je rečeno u poglavlju o hidraulici i hidrodinamičkom modeliranju bunara sa horizontalnim drenovima, u zavisnosti od korišćenog softvera za matematičko modeliranje, koeficijent propusnosti drenova  $[K_{pz}/d_{pz}]$  se može ili direktno zadati na modelu ili se dve njegove komponente zadaju nezavisno, u kom slučaju se vrednost koeficijenta izračunava. U slučaju kada se geometrijske i filtracione karakteristike prifilterske zone zadaju direktno na modelu, unapred usvojena vrednost debljine prifilterske zone ostaje konstantna tokom simulacije perioda obuhvaćenog hidrodinamičkom analizom, budući da je opravdano pretpostaviti da se debljina prifilterske zone menja (tj. uvećava) sporijom dinamikom u odnosu na filtracione karakteristike (čije se vrednosti smanjuju, kao posledica procesa starenja). Koeficijent filtracije prifilterske zone drenova je, sa druge strane, parametar čija se veličina određuje kroz postupak kalibracije modela i koja je vremenski promenljiva (Božović et al., 2020a). Budući da se vrednosti koeficijenta propusnosti drenova na jednom bunaru menjaju tokom vremena, smanjenje vrednosti ovog hidrauličkog parametra uslovljava povećanje hidrauličkih otpora na drenovima, što predstavlja prepoznatljivu



manifestaciju napredovanja procesa starenja. Sa druge strane, uvećanje vrednosti koeficijenta propusnosti je rezultat (uspešno) primenjenih mera regeneracije drenova.

#### 4.3.2 Hidraulički ekvivalentna i hidraulički realna simulacija prifilterske zone drenova

Hidrodinamička istraživanja starenja bunara sa horizontalnim drenovima sprovedena u okviru izrade predmetne disertacije su pokazala da se drenovi na numeričkim modelima u odnosu na debljinu prifilterske zone mogu predstavljati hidraulički realno na dva načina. Oni će u ovoj disertaciji biti tumačeni kao:

- pristup hidraulički ekvivalentnih karakteristika prifilterske zone drenova i
- pristup konstruktivno i hidraulički realnih karakteristika prifilterske zone drenova.

Važno je istaći i da se dužine drenova mogu simulirati hidraulički ekvivalentnim pristupom. Razlog za ovakav pristup je činjenica da u slučaju starih drenova utisnutih prema (modifikovanoj) Reni metodi često nije moguće utvrditi aktuelnu dužinu drenova, iz razloga njihovog fizičkog, konstruktivnog stanja. Imajući u vidu da je konstrukcija drenova degradirana procesom korozije materijala od kojeg je izrađena, na njoj su često prisutni proboji, usled čega dolazi do zapunjavanja unutrašnjosti peskovito–šljunkovitim sedimentima vodonosne sredine, kao i do skraćivanja dužine drenova. U tim slučajevima, podvodnim snimanjem nije moguće utvrditi aktuelnu dužinu drenova, zbog čega je opravdano usvojiti i na modelu zadati prvobitnu dužinu, dok se karakteristike propusnosti drenova realizacijom numeričkih proračuna određuju kao hidraulički ekvivalentne njihovoj realnoj, aktuelnoj, a nepoznatoj dužini (ovaj pristup koriste Božović et al., 2015).

U slučaju predmetnog tipa bunara, istraživanja realne debljine prifilterske zone formirane na račun izmene granulometrijskog sastava materijala vodonosne sredine oko filterske konstrukcije drenova nisu realizovana, odnosno relevantni rezultati takvih istraživanja nisu dostupni. U svrhe definisanja debljine prifilterske zone neposredno nakon ugradnje i razrade drenova, kao i praćenja promene debljine tokom vremena eksploatacije bunara, bilo bi svrsishodno izvršiti odgovarajuća geofizička istraživanja. Rezultati ovih istraživanja bi se dalje mogli korelisati sa rezultatima modelskih hidrodinamičkih istraživanja promene propusnosti prifilterske zone drenova. Informacije vezane za istraživanja realne debljine prifilterske zone nisu česte ni u slučaju bušenih (vertikalnih) bunara, zbog čega istraživači u okviru hidrauličkih i hidrodinamičkih analiza po pravilu usvajaju teorijski verovatne vrednosti od  $d_{pz}=0,2-0,3$  m (kao npr.: Dimkić et al., 2013; Božović et al., 2016b).

U slučaju novih drenova na pet bunara izvorišta Beograda, formiranih prema Projsag metodi, dužine drenova su poznate, zbog čega se hidraulički realna i hidraulički ekvivalentna simulacija razlikuju samo u odnosu na aspekt numeričkog i hidrauličkog predstavljanja prifilterske zone. Hidrodinamička analiza bunara na kojima su utisnuti novi drenovi je vršena više puta, sa različitih aspekata istraživanja procesa kolmiranja drenova (Dimkić et al., 2007; 2010) i definisanja uslova rada bunara (Pušić & Dimkić, 2017; Dimkić & Pušić, 2018). Međutim, detalji o debljini prifilterske zone koju su autori usvojili i primenili u modelima neretko izostaju u predstavljenim pristupima i rezultatima simulacije obnovljenih bunara.

U okviru analize režima nivoa podzemnih voda u zoni uticaja bunara RB–46 (u eksploataciji sa starim drenovima), Božović et al., (2015) su drenove simulirali pristupom hidraulički ekvivalentnih karakteristika prifilterske zone, tako što su zadali prifiltersku zonu debljine jednog metra radijalno oko filterske konstrukcije drenova. Kao rezultat ovakvog pristupa, dobijene su vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone za svaki od drenova (koje su se međusobno razlikovale u širokom opsegu), kao i promena vrednosti koeficijenta filtracije za određene, karakteristične vremenske preseke. Za propusnost drenova simuliranih na ovaj način se može konstatovati da je hidraulički ekvivalentna realnim uslovima.

U okviru eksperimentalnih hidrodinamičkih istraživanja putem realizacije numeričkih proračuna uslova i efekata rada dva bunara, RB–46 i RB–7m, sa hipotetičkim novim drenovima formiranim prema dvema metodama, Božović et al. (2016b) su u slučaju Projsag metode zadali debljinu prifilterske zone od  $d_{pz}=0,1$  m oko drenova, što je generalno u skladu sa debljinom omotača filterskog zasipa koji je moguće ugraditi oko filterske konstrukcije drena. Autori su usvojili konzervativan pristup u smislu očekivanja od sprovođenja razrade drenova i poboljšanja filtracionih karakteristika sedimenata sredine na određenom rastojanju izvan omotača zasipa (iznošenjem sitnijih frakcija porozne sredine kroz filterski zasip i filtersku konstrukciju). U slučaju drenova utisnutih prema Reni metodi, autori su oko drenova zadali prifiltersku zonu debljine  $d_{pz}=1,0$  m, pretpostavljajući da je razradom drenova maksimalno moguće ostvariti izmenu granulometrijskog sastava, a time i filtracionih karakteristika materijala sredine, oko drenova na usvojenom rastojanju.

Podrazumeva se da izmena originalnog granulometrijskog sastava, bez obzira na metodu formiranja drenova, treba biti pozitivna, tj. takva da vodi poboljšanju filtracionih karakteristika prifilterske zone. Međutim, iskustva formiranja novih drenova na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda, u slučaju primene Projsag metode, govore drugačije. Prifilterska zona veće debljine i filtracionih karakteristika povoljnijih od ili, minimalno, jednakih originalnim karakteristikama sedimenata vodonosne sredine najčešće nije ostvarena (Božović et al., 2020a).

Na osnovu razlike između nivoa podzemnih voda unutar drenova i neposredno sa spoljašnje strane drenova (tj. hidrauličkog otpora na drenovima), Božović et al., (2020a) su konstatovali da su na bunarima na kojima su utisnuti novi drenovi u periodu od 2005. do 2008. godine postojali početni hidraulički otpori, u slučaju nekih bunara manji, a kod nekih bunara veći. Izvršeno je poređenje vrednosti hidrauličkih otpora u prifilterskoj zoni novih drenova sa rezultatima izučavanja hidrauličkog uticaja filterskog zasipa koje je na primeru bušenih bunara definisao Houben (2015b). Kao što je prethodno predstavljeno, zaključeno je da uzrok uvećanih početnih hidrauličkih otpora treba tražiti u nepovoljnim hidrauličkim karakteristikama prifilterske zone.

Budući da ugradnja filterskog zasipa, između ostalih zadataka, treba da rezultira povoljnijim hidrauličkim kontaktom vodozahvatnog objekta sa vodonosnom sredinom u odnosu na onaj koji bi se očekivao bez ugradnje zasipa, filtracione karakteristike filterskog zasipa trebaju biti povoljnije od prirodnih vodopropusnih svojstava sedimenata izdani. Na primeru detaljno simuliranog i analiziranog bunara RB–5m je utvrđeno da to nije bio slučaj, već da je hidraulička sposobnost drenova ograničena prisustvom hidrauličkih otpora u filterskom zasipu. Utvrđeno je da su početni hidraulički otpori na drenovima rezultat ugradnje filterskog zasipa neadekvatnih granulometrijskih karakteristika u odnosu na granulometrijski sastav sedimenata vodonosne sredine, kao i neadekvatnih dimenzija otvora na mostičavim filterskim konstrukcijama. Utvrđeno je da različita dinamika kolmiranja drenova ima uzrok u različitim tehničkim karakteristikama drenova.

Rečeno je da se hidrauličke karakteristike drenova na hidrodinamičkim modelima predstavljaju preko koeficijenta filtracije i debljine prifilterske zone. Dok je koeficijent filtracije prifilterske zone drenova parametar čije se vrednosti određuju kalibracijom hidrodinamičkog modela, debljina prifilterske zone je veličina koja se unapred određuje i zadaje na modelu. Rezultati predstavljenih istraživanja ukazuju da pitanje debljine prifilterske zone ima izuzetan značaj za identifikaciju uzroka kolmiranja drenova. Treba težiti usvajanju realnije debljine prifilterske zone, zbog toga što će takav pristup rezultirati identifikacijom filtracionih karakteristika prifilterske zone koje su bliže realnim (bez obzira na način, tj. metodu i materijal formiranja prifilterske zone drenova). Na ovaj način utvrđene početne vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone će jasno ukazati na eventualno prisustvo početnih otpora mehaničke geneze na drenovima.

### 4.3.3 Metodologija ispitivanja uticaja debljine i propusnosti prifilterske zone drenova

Sprovedeno istraživanje hidrauličkog uticaja debljine i filtracionih karakteristika prifilterske zone drenova na kapacitet i režim rada bunara je realizovano na etaloniranom modelu na kojem je prethodno ispitivana metodologija hidraulički realne reprezentacije ovog tipa bunara na hidrodinamičkim modelima, zajedno sa ispitivanjima uzroka hidrauličkih otpora na drenovima i dinamike porasta otpora tokom vremena eksploatacije bunara (Božović et al., 2020a). Za analizu je i ovog puta odabran bunar RB–5m, iako je istraživanje moglo biti sprovedeno na bilo kojem od modelom obuhvaćenih bunara, imajući u vidu da analiza predstavlja numerički eksperiment. Samim tim, na rezultate sprovedenih proračuna uticaja imaju specifični geološki, hidrogeološki i hidrološki uslovi prisutni u zoni odabranog bunara, kao što bi ih imali u slučaju bilo kog bunara na analiziranom izvorištu ili uopšteno, bilo kog bunara na bilo kom izvorištu. Rezultati proračuna nisu i ne mogu biti oslobođeni uticaja okruženja u kojem se realni bunar nalazi, kao što bi to bili u slučaju hipotetičkih modela, sa pretpostavljenim uslovima. Uticaj prisutnih uslova bunara RB–5m na dobijene rezultate se ogleda u vrednostima nivoa podzemnih voda u zoni uticaja rada bunara i vrednostima količina zahvaćenih podzemnih voda, koji su dobijeni kao rezultat proračuna, a koji bi za iste ispitivane uslove diskretnih vrednosti analiziranih veličina, ponovljene na nekom drugom bunaru, bili drugačiji, upravo iz razloga specifičnosti prisutnih u zoni tog drugog bunara.

Imajući u vidu da su na hidrodinamičkom modelu simulirani procesi kretanja podzemnih voda kroz prifiltersku zonu drenova kao specifičnu poroznu sredinu i procesi starenja bunara kao realni, fizički procesi, za primenjenu metodologiju i zaključke zasnovane na dobijenim rezultatima se može reći da imaju univerzalan značaj, i da, kao takvi, mogu služiti istraživačima ne samo u slučaju predmetnog tipa bunara, već i drugih vidova vodozahvatnih objekata (kao što je to slučaj sa rezultatima autora Park & Zhan, 2002 i Houben, 2015a).

Kako se eksperimentalnim istraživanjima najčešće analiziraju opšti slučajevi razmatranog problema, to će i u ovom slučaju biti podrazumevano da sva četiri drena na bunaru RB–5m imaju iste hidrauličke karakteristike kroz sve ispitivane varijante, iako u realnim uslovima bunara sa horizontalnim drenovima to najčešće nije slučaj, već se vodozahvatne sposobnosti pojedinih drenova na jednom bunaru međusobno mogu značajno razlikovati, bilo da su u pitanju drenovi koji već dugo u eksploataciji ili su u pitanju novoutisnuti drenovi (Božović et al., 2015; 2020a).

Predmetna hidrodinamička analiza je realizovana tako što su na drenovima bunara RB–5m menjane prethodno definisane diskretne vrednosti debljine prifilterske zone drenova i vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone. Dužine drenova nisu menjane, odnosno zadržane su stvarne dužine drenova bunara od 50,0 m (5,0 m punih cevi i 45,0 m filterskih konstrukcija). Usvojen je pristup da sva četiri drena imaju jednake debljine prifilterske zone i jednake vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone u jednoj ispitivanoj varijanti, tj. jednom proračunu. Takođe, usvojeno je da nema promena vrednosti koeficijenta filtracije niti debljina prifilterske zone duž drenova.

Za analizu je usvojen vremenski presek koji odgovara periodu sredine jula meseca 2012. godine, iako je mogao biti usvojen bilo koji trenutak u okviru vremenskog perioda obuhvaćenog hidrodinamičkom studijom trajanja gotovo 15 godina. Vremenski presek je odabran prvenstveno zbog njegovog simboličkog značaja za identifikaciju uzroka hidrauličkih otpora na novim drenovima analiziranog bunara. Proračuni su realizovani kao nestacionarni, kraćeg trajanja, u kojima su simulirani ostvareni uslovi režima podzemnih i površinskih voda koji su vladali u uslovima terena oko mesec dana uoči vremenskog preseka odabranog za očitavanje sračunatih vrednosti kapaciteta, vrednosti nivoa podzemnih voda i veličine otpora na drenovima neposredno uz drenove. Samim tim, simulirani su intenzivni uslovi rada bunara u hidrauličkom smislu, budući da je u analiziranom periodu nivo podzemnih voda u bunarskom šahtu bio na koti  $H_b=55,50$  mm, tj. svega pet metara iznad kote utisnutih novih drenova. Izborom kratkih nestacionarnih proračuna težilo se tome da se izbegnu svi oni nedostaci hidrodinamičke analize vezani za simulaciju stacionarnih uslova režima izdani (Polomčić, 2021).

Jedan od ciljeva analize je bio taj da se na osnovu kvantitativno definisanog uticaja propusnosti prifilterske zone na efikasnost rada bunara pruže snažni argumenti prepoznavanju hidrauličkog značaja uspešnog formiranja prifilterske zone prilikom projektovanja i izvođenja radova na utiskivanju i razradi drenova, odnosno prilikom njihove regeneracije. Iznošenjem objektivnih argumenata na osnovu kvantifikovanih veličina, težilo se afirmisanju napuštanja prakse prisutne među inženjerima u oblasti bunara sa horizontalnim drenovima da se o uspešnosti izvođenja radova na bunarima, bilo na utiskivanju drenova, bilo njihovoj kasnijoj regeneraciji, sudi na osnovu izvođačkih kriterijuma u vidu dostignutih dužina u odnosu na projektovane dužine drenova ili pravce njihovog utiskivanja, odsustva vertikalne devijacije ili pak na osnovu određenih kriterijuma iz oblasti hidraulike bušenih (vertikalnih) bunara čija primena nije relevantna u slučaju bunara sa horizontalnim drenovima, budući da ne ukazuju na hidrauličke karakteristike drenova (kao što je npr. „specifična izdašnost bunara“).

Za potrebe predmetne analize usvojen je širok spektar diskretnih vrednosti čiji su uticaji ispitivani na modelu, kako za debljinu prifilterske zone, tako i za koeficijent filtracije kao reprezentacionih karakteristika prifilterske zone (*tabela 1*). Odabrano je 10 vrednosti debljine prifilterske zone drenova i 29 diskretnih vrednosti koeficijenta filtracije. Vrednosti debljina su odabrane tako da obuhvate različite vidove prifilterske zone u pogledu genetskih uslova nastanka, od onih koje su formirane ugradnjom filterskog zasipa, preko onih koje su pod uticajem hemijskog i mikrobiološkog kolmiranja, do onih koje su nastale izmenama mehaničkog sastava originalnih sedimenata vodonosne sredine duž drenova i na određenom rastojanju radijalno oko filterske konstrukcije (engl. *naturally developed well*). Isto tako, vrednosti koeficijenta su usvojene tako da obuhvate praktično sve moguće scenarije filtracionih karakteristika koje geološka porozna sredina može imati, od suštinski vodonepropusnih do vrlo vodopropusnih hidrogeoloških svojstava.

Najniže ispitivane vrednosti debljine prifilterske zone od 1,0 do 5,0 mm su usvojene tako da simbolizuju moguću debljinu tankog filma na filterskoj konstrukciji drenova i unutar pornog prostora klastičnih sedimenata vodonosne sredine koji su u kontaktu sa filterskim cevima u slučaju taloženja produkata mikrobiološke aktivnosti. Debljine u dijapazonu od 5,0 mm do 75 mm generalno predstavljaju kolmiranu zonu hemijskih taloga, prvenstveno produkata taloženja gvožđa i mangana. Debljine od 75 mm do maksimalne ispitivane vrednosti od 200 mm načelno mogu odgovarati dimenzijama prifilterske zone nastale na račun ugradnje veštačkog filterskog zasipa i izmena granulometrijskog sastava sedimenata razradom drenova, pri čemu izmena može imati pozitivan efekat na rad bunara (kada se uvećava poroznost materijala prifilterske zone) ili negativan efekat, kada je reč o mehaničkom kolmiranju koje utiče na smanjenje propusnosti zone, a samim tim i na smanjenje vrednosti koeficijenta filtracije (kada dolazi do migracije i zadržavanja fino-zrnih komponenti materijala sredine između spoljašnje i unutrašnje konture prifilterske zone).

Tabela 1: Vrednosti debljine i koeficijenta filtracije prifilterske zone ispitivane u numeričkom eksperimentu uticaja na kapacitet i režim rada bunara

<i>Debljina prifilterske zone, <math>d_{pz}</math> (mm)</i>									
1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	25,0	50,0	75,0	100,0	200,0
<i>Koeficijent filtracije prifilterske zone, <math>K_{pz}</math> (m/s)</i>									
$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$		
$2,5 \times 10^{-9}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-3}$			
$5,0 \times 10^{-9}$	$5,0 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-3}$			
$7,5 \times 10^{-9}$	$7,5 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-7}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-4}$	$7,5 \times 10^{-3}$			

U skladu sa prethodnim rezultatima hidrodinamičkih istraživanja u okviru izrade doktorske disertacije, drenovi su simulirani hidraulički realnim pristupom, sa realnom debljinom prifilterske zone. U svakoj analiziranoj varijanti je kao unutrašnji granični uslov zadat uslov ravnog

pijezometarskog nivoa podzemnih voda unutar drena (tj. u bunarskom šahtu). U ovoj, drugoj fazi sprovedenih hidrodinamičkih istraživanja, težilo se maksimalnom približavanju simuliranog procesa zahvatanja podzemnih voda stvarnim uslovima koji se odvijaju u terenu. Iz tog razloga su u proces zahvatanja uključeni i unutrašnji otpori, tj. frikcionni otpori unutar drena.

Prethodno je ukazano da spoljašnji hidraulički otpori imaju daleko veći uticaj na kapacitet bunara, bili oni vertikalni, horizontalni ili bunari sa horizontalnim drenovima, u odnosu na otpore u unutrašnjosti konstrukcije bunara. U istraživanjima autora Houben (2015a) i Houben et al. (2018) je demonstrirano da među spoljašnjim otporima, otpori na filtraciju podzemnih voda kroz prifiltersku zonu vertikalnih bunara imaju višestruko veći značaj od otpora na filterskoj konstrukciji. Iz ovog razloga se u većini istraživanja bunara sa horizontalnih drenovima na numeričkim hidrodinamičkim modelima uticaj dve vrste spoljašnjih otpora uobičajeno predstavlja jedinstveno, preko hidrauličkog parametra koeficijenta propusnosti drenova, dok se unutrašnji otpori najčešće zanemaruju.

Za razliku od proračuna sprovedenih u prvoj fazi modelskih hidrodinamičkih istraživanja, u drugoj fazi je korišćena MODFLOW 6 verzija programa, dok je komunikacija sa njim vršena preko Groundwater Vistas 8 interfejs softvera. Groundwater Vistas podržava proračun unutrašnjih otpora prema jednačinama Darsi–Vajsbaha, Hazen–Vilijamsa i Maninga (Menon, 2005; Rushton, 2006; Munson et al., 2009). U prvoj fazi istraživanja kvantifikovan je uticaj unutrašnjih otpora na pad pijsometarskog nivoa unutar drenova bunara RB–5m preko jednačine Darsi–Vajsbaha, koristeći metodologiju koju su prethodno primenili Bakker et al. (2005) i Lee et al. (2010), prilikom čega je zaključeno da se prosečan gubitak u unutrašnjosti drenova od  $\Delta h=1,5$  cm ne treba smatrati relevantnim za režim rada i ostvareni kapacitet bunara. U ovoj, drugoj fazi, je primenjena jednačina Hazen–Vilijamsa za proračun pada energije unutar konstrukcije drenova. Dobijeni rezultati ( $\Delta h=0,41$  cm za prosečan kapacitet bunara ostvaren u eksploataciji nakon utiskivanja novih drenova i  $\Delta h=2,1$  cm za maksimalni proračunom ostvareni kapacitet bunara) su upoređeni sa rezultatima iz prve faze, na osnovu čega je konstatovano da unutrašnji otpori suštinski nemaju uticaja na efikasnost predmetnog bunara, kao ni bunara na izvorištu podzemnih voda Beograda uopšteno.

#### **4.4 Metodologija definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda**

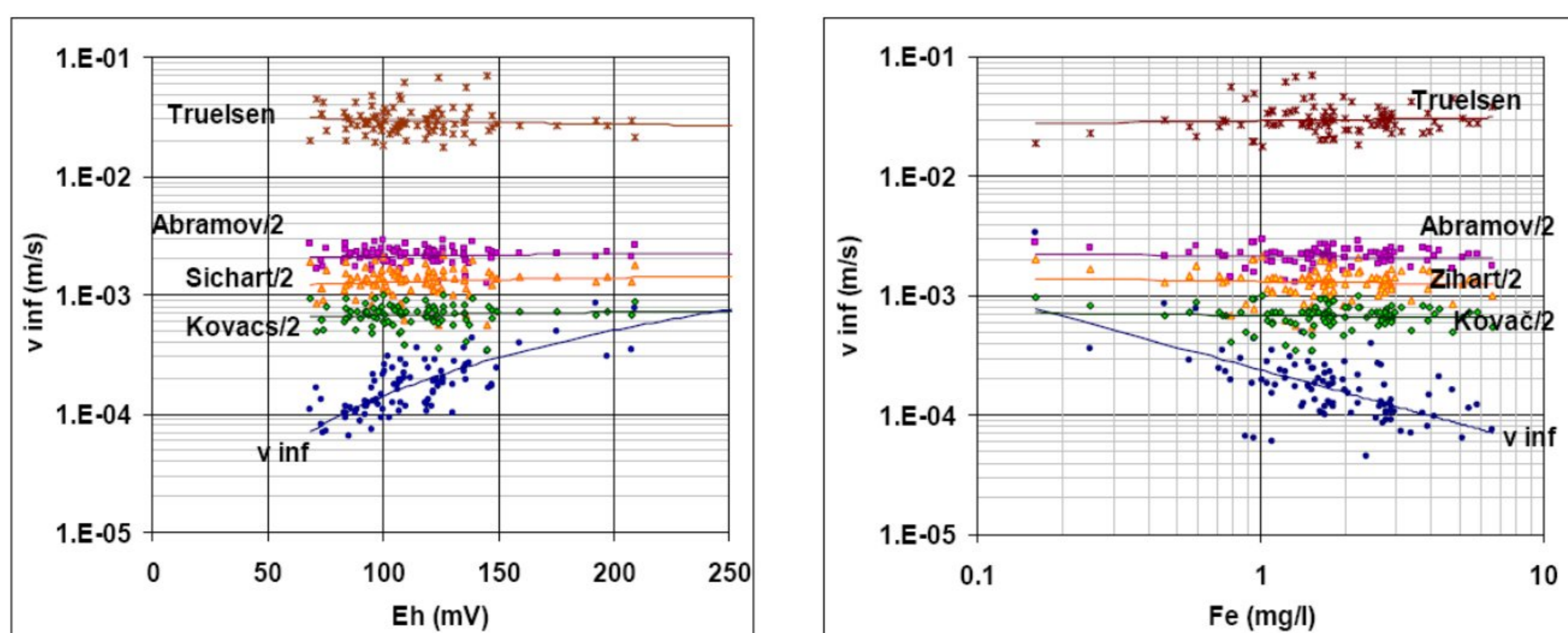
U dosadašnjim istraživanjima, početni kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda je određivan na osnovu rezultata istraživanja koja su u periodu od 2005. do 2010. godine realizovali istraživači Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (IJČ, 2005–2010). Utvrđivanjem funkcionalnih veza između sadržaja dvovalentnog gvožđa i redoks potencijala kao komponenti hemijskog sastava podzemnih voda kaptirane izdani koji čine *indikatore procesa starenja* (Dimkić & Pušić, 2008; 2011b) i kapaciteta bunara sa starim drenovima i bunara na kojima su utisnuti novi drenovi, istraživači Instituta su dali značajan naučni doprinos multidisciplinarnoj problematici izgradnje i održavanja bunara sa horizontalnim drenovima u izdanima kvartarne starosti, aluvijalne geneze, u kojima su prisutni nepovoljni hidrohemijski i mikrobiološki uslovi vodonosne sredine.

Suština rezultata i zaključaka obimnih istraživanja sprovedenih na izvorištu podzemnih voda Beograda od strane istraživača Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, kao i brojnih daljih istraživanja autora Dimkić & Pušić (2008; 2014) i Dimkić et al., (2011a; 2011b; 2011c), se sastoji u utvrđenoj korelaciji brzina podzemnih voda na ulasku u dren sa jedne i vrednosti redoks potencijala i sadržaja dvovalentnog gvožđa u podzemnim vodama sa druge strane, koji su prepoznati kao ključni hidraulički i hidrohemijski parametri od kojih zavisi dinamika procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima, odnosno brzina kolmiranja drenova (*slika 25*).

U teoriji hidraulike bunara je uobičajeno da se vrednosti maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina određuju prema kriterijumu filtracione stabilnosti prifilterske zone i kriterijumu laminarnog režima

filtracije podzemnih voda na ulasku u filtersku konstrukciju. Međutim, multidisciplinarna istraživanja realizovana na beogradskom izvorištu podzemnih voda su ukazala da se prilikom definisanja kapaciteta jednog drena, odnosno kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima, treba primenjivati znatno restriktivniji kriterijum – kriterijum biohemijskog kolmiranja. Prema ovom kriterijumu, u anaerobnim do blago aerobnim uslovima vodonosne sredine, vrednosti maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina u drenove su nekoliko puta niže od vrednosti dobijenih primenom tradicionalnih hidrauličkih kriterijuma.

Prema preporukama zasnovanim na istraživanjima Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (IJČ, 2005–2010), odnosno autora Dimkić & Pušić (2008; 2014) i Dimkić et al., (2011a; 2011b; 2011c), definisanje optimalnog kapaciteta drena na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda je zasnovano na analizi brzina filtracije podzemnih voda na konturi filterske konstrukcije drena. U uslovima beogradskog izvorišta, radi se o onim brzinama filtracije podzemnih voda koje će omogućiti takvu dinamiku procesa starenja do kojeg dolazi usled biohemijskog kolmiranja (aspekt korozije se eliminiše izborom nerđajućeg čelika kao materijala izrade filterskih cevi) pri kojoj će bunar raditi hidraulički efikasno duži niz godina do dolaska u režim kada je na njemu potrebno primeniti mere regeneracije drena.



Slika 25: Zavisnost maksimalno dozvoljenih (kritičnih) ulaznih brzina u dren prema kriterijumu biohemijskog kolmiranja (u odnosu na vrednost redoks potencijala i sadržaja gvožđa u podzemnim vodama), upoređena sa hidrauličkim kriterijuma (IJČ, 2005–2010, Završni izveštaj, knjiga 2, str. 150)

Uvažavanjem samo kriterijuma koji definiše maksimalno dozvoljene vrednosti ulaznih brzina sa aspekta hemijskog sastava podzemnih voda u vidu indikatora procesa starenja, dolazi se do toga da ovaj kriterijum nije primenljiv na velikom broju bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu. Razlog je taj što kriterijum biohemijskog kolmiranja ne predviđa analizu hidrogeoloških odlika i potencijala lokacije bunara u pogledu raspoloživosti resursa podzemnih voda. Samim tim, kapacitet jednog drena, odnosno jednog bunara sa horizontalnim drenovima, često neće biti adekvatan, tj. biće isuviše veliki u odnosu na količinu podzemnih voda koja se na lokaciji određenog bunara može zahvatati, optimalnim hidrauličkim uslovima rada vodozahvatnog objekta. Iz tog razloga su autori Božović et al. (2018) predložili da se definisanje optimalnog kapaciteta bunara sprovodi **analitičkim putem u prvom koraku** u kojem se uzima u obzir kriterijum biohemijskog kolmiranja, da bi se nastavilo **realizacijom numeričkog eksperimenta u vidu prognoznih proračuna na etaloniranom hidrodinamičkom modelu u drugom koraku** sa ciljem optimizacije vrednosti definisanih u prvom koraku i analize efekata rada bunara sa novim drenovima. Pored definisanja optimalnog jediničnog kapaciteta drena, kapaciteta bunara i početnog radnog nivoa, iterativnom realizacijom prognoznih proračuna dolazi se i do definisanja optimalnog broja i prostornog rasporeda novih drena. Kao pozitivna praksa primenjene

metodologije mogu služiti primeri obnavljanja drenova na bunarima RB–7m i RB–17 (Božović/BVK, 2016d; Polomčić et al, 2018; Đurković et al, 2019).

Primenom kriterijuma biohemijskog kolmiranja, kao prvog koraka u definisanju kapaciteta drenova prilikom projektovanja utiskivanja novih drenova, vrednosti ulaznih brzina trebaju biti prilagođene sadržaju parametara indikatora kolmiranja na lokaciji svakog od bunara. Važno je istaći da vrednosti ulaznih brzina definisane preko kriterijuma biohemijskog kolmiranja ne garantuju odsustvo procesa starenja drenova, odnosno bunara. Starenje drenova na beogradskom izvoristu podzemnih voda je suštinski neizbežan proces. Međutim, primenom kriterijuma biohemijskog kolmiranja, bunari će raditi u takvom hidrauličkom režimu koji će omogućiti da se proces kolmiranja drenova odvija relativno usporenom dinamikom tokom višegodišnjeg perioda rada bunara. U suprotnom, doći će do intenziviranja procesa kolmiranja drenova, što će voditi bržem dolasku vodozahvatnog objekta u režim intenzivne, usiljene eksploatacije. Više je faktora koji određuju za koje vreme, tj. koliko brzo će bunar doći u hidraulički nepovoljan režim rada. Radi se o periodu koji može trajati od nekoliko nedelja do nekoliko meseci od početka uključenja u eksploataciju nakon utiskivanja novih drenova ili nakon regeneracije postojećih drenova.

#### **4.5 Metodologija hidrodinamičkih ispitivanja rada grupe hidraulički realno simuliranih bunara sa horizontalnim drenovima u uslovima optimalnog kapaciteta drenova**

Svih šest bunara koji su prisutni u delu terena beogradskog izvorišta podzemnih voda koji je obuhvaćen predmetnom hidrodinamičkom analizom su u okviru prognoznih proračuna simulirani kao hidraulički realni bunari sa horizontalnim drenovima (zadavanjem bunarskog šahta i drenova, sa svakim drenom kao zasebnim analitičkim elementom i sa jedinstvenim unutrašnjim graničnim uslovom zadatim unutar šahta, odnosno unutar drenova u vidu pijezometarskog nivoa podzemnih voda, uključujući efekat unutrašnjeg otpora unutar filterske konstrukcije drena, prema Hazen–Vilijamsovoj jednačini). U skladu sa rezultatima istraživanja sprovedenim u okviru predmetne disertacije, drenovi su simulirani pristupom hidraulički realne debljine prifilterske zone.

Po svojoj prirodi, numeričkim eksperimentom ispitivanja uslova i efekata rada bunara nakon izvršene sanacije moraju se uvesti određene pretpostavke. One se odnose na broj, dužine, raspored i tehničke karakteristike drenova sa jedne strane, kao i početne hidrauličke karakteristike drenova relevantne za početni period kada bunar bude uključen u eksploataciju, sa druge strane. Međutim, pretpostavke vrednosti hidrauličkih karakteristika drenova, kao i debljine formirane prifilterske zone, zasnovane su na rezultatima istraživanja sprovedenim u okviru disertacije, kao i pozitivnim iskustvima stečenim obnavljanjem vodozahvatne funkcije bunara na beogradskom izvoristu (Polomčić et al., 2018, Đurković et al, 2019).

U cilju unifikacije, na svakom bunaru drenovi su zadati u istom rasporedu – tako što je hipotetički novi dren 1 (HND 1) zadat upravno na Savu (odnosno rukavac Save), dok su ostali drenovi raspoređeni radijalno oko bunarskog šahta sa međuuglom od 60 stepeni. Izvršena je dodatna diskretizacija prostora oko bunara, tako što je u zoni nešto široj od zone lepeze drenova zadata nestrukturirana pravilna pravougaona umetnuta mreža, sa najsitnijim poljima dimenzija 2 x 2 m.

Proračun je izvršen u odnosu na hidrološke uslove reke Save koji su egzistirali pri samom kraju višegodišnjeg perioda obuhvaćenog istraživanjima. U pitanju je period jeseni 2022. godine, konkretno od 12. 10. 2022. do 25. 11. 2022., u kojem je srednja vrednost vodostaja Save bila na koti  $H_{\text{save}}=70,15$  mm. Proračun je sproveden u nestacionarnim uslovima. Izborom niskih vodostaja i nepovoljnih uslova prihranjivanja izdani težilo se pružanju većeg stepena sigurnosti dobijenim rezultatima i preporukama koje su na njima zasnovane.

Na osnovu prethodnih modelskih hidrodinamičkih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima, čiji rezultati služe kao reper za definisanje optimalnih dužina i broja drenova koje je potrebno utisnuti prilikom sanacije bunara, usvojeno je da dužina filterske

konstrukcije na svakom od šest analiziranih bunara iznosi  $L_{fk}=50,0$  m (pri čemu se između filterske konstrukcije i bunarskog šahta nalazi pet metara punih cevi), dok je na svakom bunaru zadato po šest istovetnih drenova u konstruktivnom i u smislu hidrauličkih karakteristika. Svi hipotetički drenovi su na modelu zadati na kotama na kojima su utisnuti realni drenovi na analiziranim bunarima. Usvojeno je i da hipotetički drenovi imaju prečnik filterske konstrukcije  $\varnothing 200$  mm, odnosno poluprečnik  $r_{fk}=0,1$  m. Izbor metode utiskivanja drenova, odnosno formiranja prifilterske zone drenova nije imao naročit značaj u prognoznim modelskim ispitivanjima, zbog čega je između Reni i Felman metode sa jedne i Projsag metode sa druge strane, kompromisno usvojeno da prifilterska zona svakog drena ima debljinu  $d_{pz}=0,15$  m.

Usvojeno je da svaki od drenova ima vrednost koeficijenta propusnosti od  $[K_{pz}/d_{pz}]=1,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Imajući u vidu usvojenu vrednost debljine prifilterske zone, dolazi se od vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone od  $K_{pz}=1,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ , za koju se može reći da je u skladu sa filtracionim karakteristikama vodonosnih sedimenata aluvijalne izdani reke Save u granicama izvorišta podzemnih voda Beograda. Usvojene vrednosti hidrauličkih karakteristika drenova zadatah na hidrodinamičkom modelu su takve da je pretpostavljeno da bi utiskivanje i razrada drenova u realnim uslovima rezultirali formiranjem hidraulički funkcionalne prifilterske zone, unutar koje na samom početku rada bunara u novim uslovima ne postoje uvećani početni hidraulički otpori.



## 5 REZULTATI HIDRODINAMIČKIH ISTRAŽIVANJA PROCESA STARENJA BUNARA SA HORIZONTALNIM DRENOVIMA

### 5.1 Rezultat izrade 3D hidrogeološkog modela analiziranog dela izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda

Litološka građa analiziranog dela terena ukazuje na brze promene uslova taloženja sedimenata starijeg pleistocena, u kojima su utisnuti drenovi u slučaju svih šest hidrogeološkim modelom obuhvaćenih bunara. Budući da je opšta odlika izdani beogradskog izvorišta ta da vodonosnu sredinu predstavljaju aluvijalni sedimenti različite granulometrijske kompozicije zrna, sa čestim smenama u planu i profilu, koji su lokalno interkalirani proslojcima alevritskih glina, značajan genitet i tropija filtracionih karakteristika sredine posledica su kompleksnog litofacijalnog sastava.

Najmlađi sedimenti na istražnom prostoru su recentne aluvijalne tvorevine povodnja, glinovito–alevritskog litološkog sastava (sloj broj 1 na *slici 26*). Zbog slabih filtracionih karakteristika i debljine od oko 4 m u zoni bunara one u hidrogeološkom smislu predstavljaju slabije propusnu povlatu koja pruža solidnu zaštitu vodonosnoj sredini od zagađenja sa površine terena.

Sedimenti korita holocenske starosti (slojevi 2 i 3 na *slici 26*) su predstavljeni relativno uniformnim srednjozrnim do krupnozrnim peskovima, sa šljunkovitim peskovima u bazalnom delu.

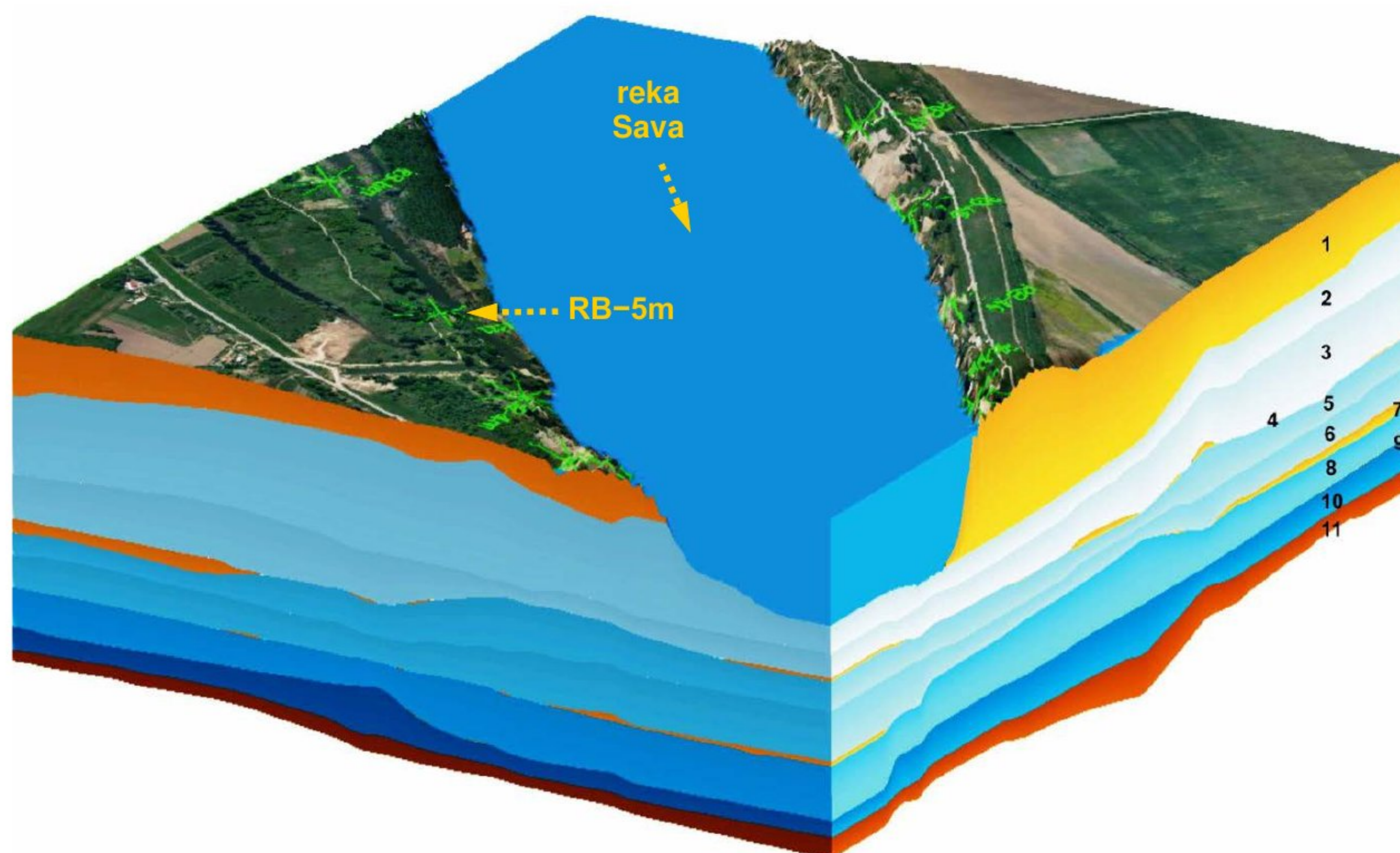
Pleistocenske rečne naslage su stvorene tokom toplih, odnosno umerenih faza donjeg i srednjeg pleistocena, kroz više sukcesivno taloženih ciklusa aluvijalne sedimentacije (Nenadić et al., 2016; Gaudenyi et al., 2015). Zajedničko za sve cikluse je da se po pravilu u bazi nalaze sedimenti šljunkovito–peskovitog sastava, koji sa smanjenjem dubine prelaze u peskove različite krupnoće zrna, eventualno sa manjim sadržajem sitnijeg šljunka i, gotovo bez izuzetka, uz određeno učešće alevrita. Na *slici 26* ove tvorevine su predstavljene slojevima: 5, 6, 8 i 10. Prosečna debljina pleistocenskih naslaga na istražnom prostoru je oko 12 m.

Kao završni članovi svakog ciklusa stvarani su sedimenti povodnja, koji se u terenu javljaju u vidu sočiva i proslojaka (slojevi: 4, 7 i 9 na *slici 26*). U pogledu litološkog sastava, izgrađeni su od alevritskih glina do peskovitih alevrita. Debljina im može biti od centimetarskih pa do metarskih dimenzija. Neretko se istražnim bušenjem konstatuje da neki od ciklusa sedimentacije nije zastupljen, odnosno da su oni nepotpuni, što ukazuje na intenzivnu eroziju baze na početku faze korita narednog ciklusa.

Prema rezultatima izrade 3D hidrogeološkog modela, među tvorevinama povodnja, sedimenti završnog dela drugog ciklusa sedimentacije (sloj broj 7) imaju najveće rasprostranjenje u planu u zoni bunara RB–5m (Božović et al., 2022). U pitanju su glinovito–peskoviti alevriti, prosečne debljine 0,2 m. U profilu izdani ovaj član je prisutan generalno oko kote 53,5 m, tj. 3 metra iznad kote novih drenova bunara RB–5m. Hidrogeološki članovi 4 i 9 su zanemareni u šematizaciji hidrodinamičkog modela u zoni detaljno analiziranog bunara RB–5m. Razlog je njihovo sasvim lokalno rasprostranjenje u zoni lepeze drenova, zbog čega je zaključeno da ne mogu imati značajnijeg uticaja na režim nivoa izdani u zoni ovog bunara.

Donju granicu rasprostranjenja aluvijalnih sedimenata i njihovu neposrednu podinu na prostoru istraživanja predstavljaju jezersko–barski sedimenti plio–pleistocenske starosti (sloj broj 11). Predstavljeni su različitim glinama, alevritima, zaglinjenim alevritskim peskovima, mestimično sa sočivima jako obogaćenim oolitima gvožđa i mangana. U zoni bunara RB–5m, prisutne su na dubini od oko 23,5 m (odnosno od kote 49 m).

Metodologija izrade 3D hidrogeološkog modela je obuhvatila postupak zadavanja realne geometrije korita reke Save na 3D hidrogeološkom modelu, što čini polaznu osnovu za analizu uslova prihranjivanja kaptirane izdani beogradskog izvorišta na hidrodinamičkim modelima.



Slika 26: Deo terena izvorišta podzemnih voda Beograda obuhvaćen 3D hidrogeološkim i hidrodinamičkim modelom (prema Božović et al., 2015)

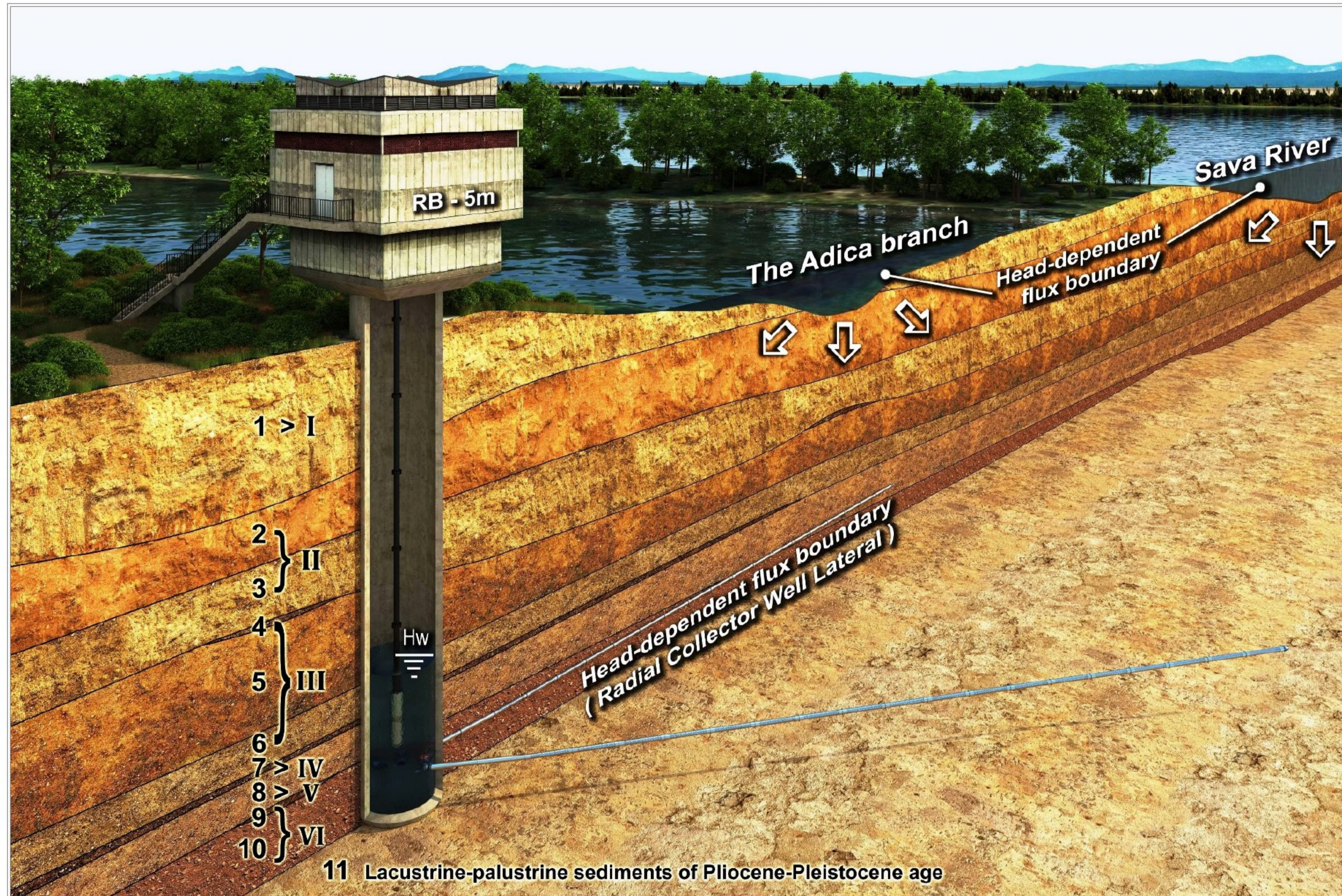
Šema prema kojoj je izvršeno prevođenje šematizovanih hidrogeoloških slojeva u slojeve na hidrodinamičkom modelu je predstavljena na slici 27. Na istoj slici je prikazan realni prostorni položaj konstruktivnih elemenata bunara sa horizontalnim drenovima RB-5m, sa geometrijom usecanja korita reke Save i rukavca Adica u šematizovane hidrogeološke slojeve.

Povlatni sloj predstavlja prvi, tj. *sloj I* na hidrodinamičkom modelu. Imajući u vidu da su sedimenti korita holocenske starosti vodonosni (slojevi 2 i 3 na slici 26), sličnog litološkog, odnosno granulometrijskog sastava, kao i da imaju kontinualno rasprostranjenje u zoni hidrogeološkog modela, na hidrodinamičkom modelu su predstavljeni jedinstvenim *slojem broj II*.

Po istom principu, naslage korita najmlađeg ciklusa pleistocenske sedimentacije (slojevi 5 i 6) su predstavljene *slojem broj III* u hidrodinamičkoj šematizaciji. Slabije propusni sedimenti facije povodnja šematizovani kao 7. sloj na hidrogeološkom modelu su u užoj zoni bunara RB-5m zadati kontinualno, u vidu hidrodinamičkog *sloja broj IV*.

U slučaju okolnih bunara sa horizontalnim drenovima, sledeći isti princip šematizacije slojeva, dominantno prisutan slabije propusan sloj je zadat na modelu (bio on četvrti, sedmi ili deveti sloj u hidrogeološkoj šematizaciji), a slojevi bez realnog prisustva ili sa sporadičnim pojavama u zoni bunara su izostavljeni.

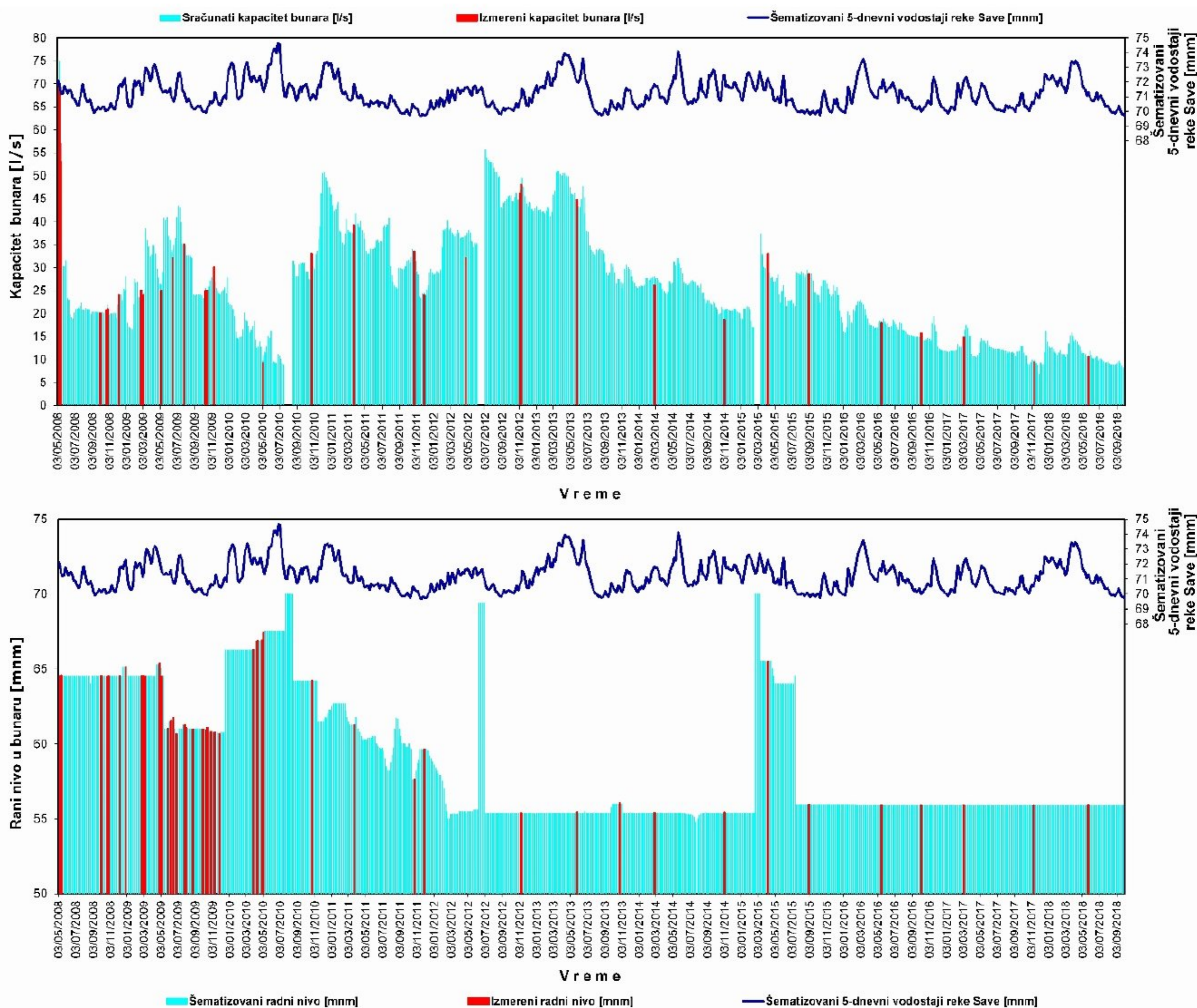
Litofacija korita drugog pleistocenskog ciklusa (sloj 8) je zadata kao *sloj broj V*, dok su najstariji rečni sedimenti (sloj 10) na hidrodinamičkom modelu predstavljeni *slojem broj VI*. Imajući u vidu litološki sastav i debljinu, tvorevine hidrogeološkog sloja broj 11 se sa sigurnošću smatraju vodonepropusnom podinom aluvijalnoj izdani, iz kog razloga su izostavljene na modelu.



Slika 27: Konceptualni model bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda (na primeru bunara RB-5m) sa proračunskom šemom i graničnim uslovima numeričkog modela (Božović et al., 2020a)

## 5.2 Rezultati rekonstrukcije hidrauličkog režima rada analiziranog bunara RB–5m

Da se testiranja bunara sa horizontalnim drenovima trebaju izvoditi u drugačijim uslovima od testiranja step–test postupkom ili crpenjem jednim sniženjem nedovoljno dugog trajanja, jasno je na osnovu testiranja realizovanog na samom početku perioda obuhvaćenog hidrodinamičkom analizom, početkom maja 2008. godine (slika 28). Tada je crpenje započeto kapacitetom od 70 l/s, koji je tokom sedam dana bio u padu do 55 l/s na kraju opita, sve vreme pri konstantnom nivou u bunaru. Opadanje kapaciteta je posledica širenja sniženja nivoa izdani u zoni uticaja bunara, kao i blažeg opadanja vodostaja reke. Zbog toga je smanjenje razlike između nivoa u bunaru i nivoa u izdani rezultiralo sve manjom količinom zahvaćenih podzemnih voda. Dakle, za širenje radijusa uticaja bunara sa horizontalnim drenovima i dostizanja kvazistacionarnih hidrodinamičkih uslova je potrebno određeno vreme (što ima karakter zakonitosti u slučaju analiziranog izvorišta).



Slika 28: Režim rada bunara: izmereni i sračunati kapaciteti bunara, „radni“ nivoi, srednji petodnevni vodostaji reke Save (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

Režim rada bunara je polovinom maja 2008. godine stabilizovan pri nivou u bunarskom šahtu na koti  $H_b=64,50$  mm, što je sa visinom vodenog stuba u bunaru od 14 m iznad kote novih drenova predstavljalo hidraulički rasterećen režim eksploatacije vodozahvatnog objekta. Takvi uslovi režima rada bunara su egzistirali tokom prve godine eksploatacije, da bi rezultirali prosečnim kapacitetom bunara od svega  $Q_b=20-25$  l/s. Ulazne brzine podzemnih voda, sračunate na konturi filterske konstrukcije drenova, su bile  $V_{ul}=1,40-1,75 \times 10^{-4}$  m/s.

Nakon godinu dana (krajem maja meseca 2009. g.) intenziviran je režim rada bunara spuštanjem nivoa u šahtu za dodatnih 3,5 metara, tj. na kotu  $H_b=61,00$  mm (što je predstavljalo svojevrsni test i bilo ispraćeno monitoringom ostvarenih efekata). Kapacitet bunara je kratkotrajno povećan na preko 35 l/s (sa ulaznim brzinama  $V_{ul}>2,50 \times 10^{-4}$  m/s). Sve do kraja 2009. g., radni nivoi su se kretali u granicama  $H_b=60,50-61,50$  mm, a kapacitet varirao u opsegu  $Q_b=25-30$  l/s, u zavisnosti od hidroloških uslova. Ovim kapacitetima su odgovarale ulazne brzine  $V_{ul}=1,75-2,25 \times 10^{-4}$  m/s.

Kapacitet bunara je nastavio da opada, zbog čega je kao mera usporavanja procesa starenja izvršeno podizanje nivoa u šahtu i njegovo održavanje u dijapazonu  $H_b=66,50-67,50$  mm. Međutim, uprkos rasterećenju režima rada bunara, pad kapaciteta bunara je nastavljen, tako da je on u proleće 2010. godine bio manji od 10 l/s. U leto 2010. godine realizovana je prva od tri mehaničke regeneracije novih drenova kojima se pokušalo uticati na povećanje kapaciteta bunara.

Regeneracija drenova na bunarima izvorišta podzemnih voda Beograda se već decenijama obavlja prema standardizovanom postupku, primenom različitih mehaničkih i hidrauličkih postupaka, pojedinačno na svakom od drenova. Regeneracija započinje ispiranjem filterske konstrukcije drena vodom pod pritiscima do 150 bar, uz upotrebu različitih rotacionih mlaznica. Zatim se vrši upumpavanje vode u dren kapacitetom od oko 35 l/s, istovremeno sa upumpavanjem komprimovanog vazduha u dren pod pritiskom od 7 bar. Na kraju postupka se vrši naglo otvaranje i zatvaranje drena pomoću specijalnog ventila koji se montira na njegovom zatvaraču (Božović et al., 2016c), *slika 29*. Primenom ove metode vrše se hidraulički udari na prifiltersku zonu i filtersku konstrukciju drena, na račun stvaranja višestruko većih ulaznih brzina od onih koje će se javiti u redovnoj eksploataciji bunara. Nakon primene ovog postupka, unutrašnjost filterske konstrukcije drenova se tretira ispiranjem *Woma* pumpom pod optimalnim pritiscima (i do 150 bara), uz upotrebu adekvatne mlaznice.

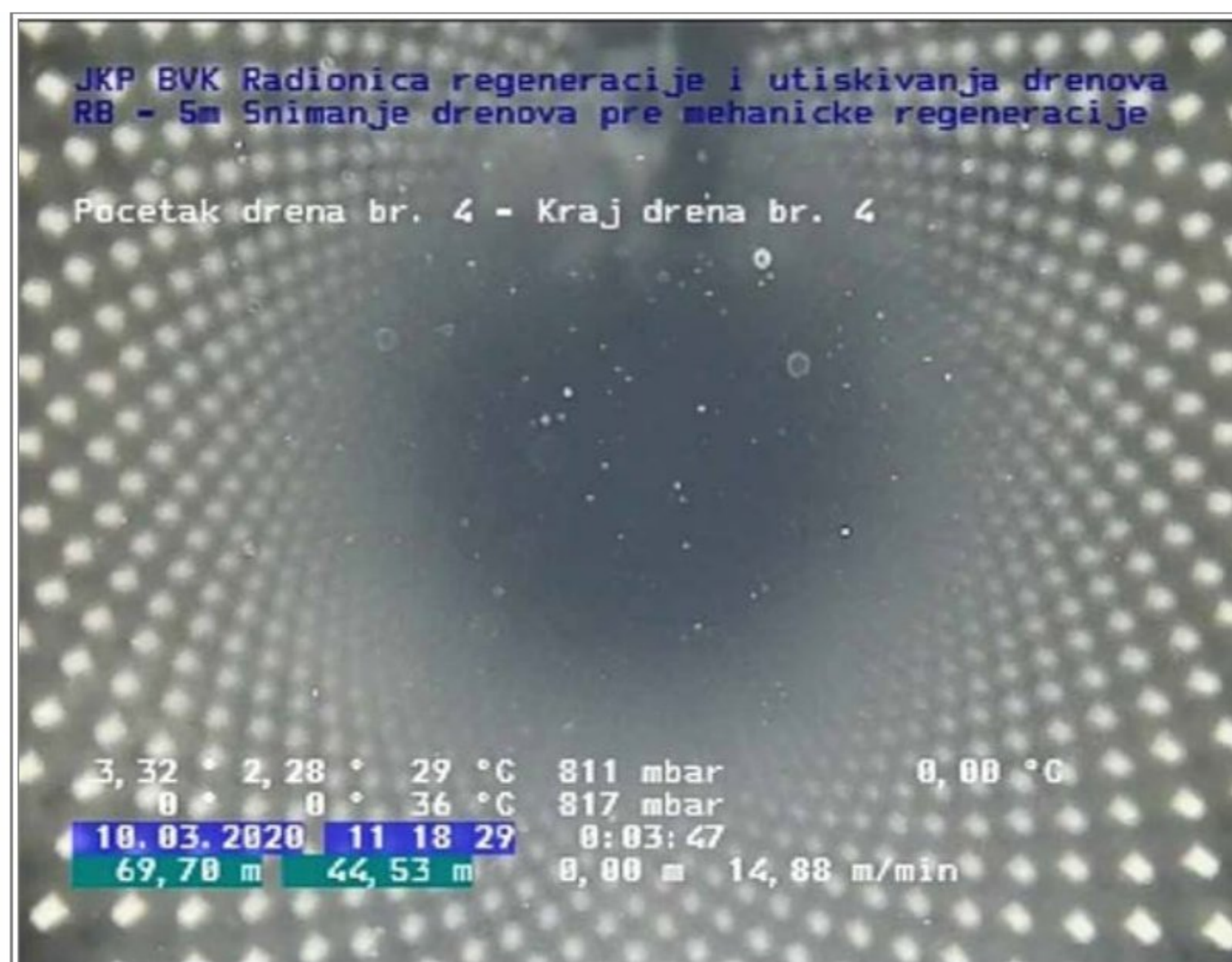
Regeneracija drenova se primenjuje sve do trenutka kada se utvrdi da su sa konstrukcije drenova uklonjene naslage gvožđa (što se ocenjuje analizom mutnoće vode, sve do njenog izbristrenja i snimanjem podvodnom kamerom), kao i trenutka kada se postigne stabilizacija prifilterske zone (što se vrši uzorkovanjem i ispitivanjem sadržaja fino-zrnog materijala u vodi). Ceo postupak regeneracije, uz prethodnu fazu pripreme za izvođenje radova i završnu fazu pripreme bunara za uključanje u eksploataciju, traje po pravilu oko mesec dana.



Slika 29: Izgled brzopoteznog zatvarača (levo), slobodno isticanje drenova (desno)

Uklanjanjem gvožđevitih inkrustacija sa filterskih cevi i iz pornog prostora filterskog zasipa se ostvaruje povećanje njihove efektivne poroznosti, što se odražava poboljšanjem hidrauličke funkcionalnosti drenova, relaksiranjem režima rada bunara i povećanjem kapaciteta. U slučaju predmetnog bunara RB-5m, sa *slike 30*, na kojoj je prikazan detalj snimanja drenova podvodnom kamerom uoči realizacije četvrte po redu regeneracije novih drenova, evidentno je da ne dolazi do kolmiranja filterske konstrukcije drenova, već da se celokupno kolmiranje odvija u prifilterskoj

zoni. Pojava je pažljivo analizirana u slučaju prve, druge i treće regeneracije i služila je kao utemeljenje postavljenoj hipotezi istraživanja prilikom definisanja metodologije izučavanja uzroka koji dovode do procesa starenja drenova, kao i realne simulacije procesa na modelu.



Slika 30: Izgled unutrašnjosti filterske konstrukcije drena broj 4 prilikom četvrte regeneracije novih drenova bunara RB-5m 2020. fodine (perforacije bez vidljivih znakova procesa kolmiranja)

Režim eksploatacije bunara je nakon prve regeneracije bio praktično isti kao nakon uključanja bunara u rad po utiskivanju novih drenova: od sredine avgusta do sredine novembra 2010. godine, nivo u šahtu je bio na koti  $H_b=64,50$  mm, dok je kapacitet iznosio  $Q_b=25-30$  l/s; potom dolazi do ponovnog povećanja sniženja nivoa u šahtu do  $H_b=61,25-62,70$  mm, što je rezultiralo povećanjem kapaciteta na preko 40 l/s (kratkotrajno i u sadejstvu sa visokim vodostajem Save i do 50 l/s). Međutim, ostvareno povećanje kapaciteta ne pokazuje tendenciju stabilnosti tokom vremena. U nastavku, iole relevantna eksploatacija u meri  $Q_b=25-35$  l/s se ostvaruje uz dalje snižavanje nivoa u šahtu. Od marta 2012. godine, režim rada bunara je maksimalno usiljen, sa nivoom podzemnih voda na manje od pet metara iznad kote drenova. Ovakvi uslovi rada bunara i eksploatacije podzemnih voda traju sve do juna 2012. godine kada je realizovana druga regeneracija drenova.

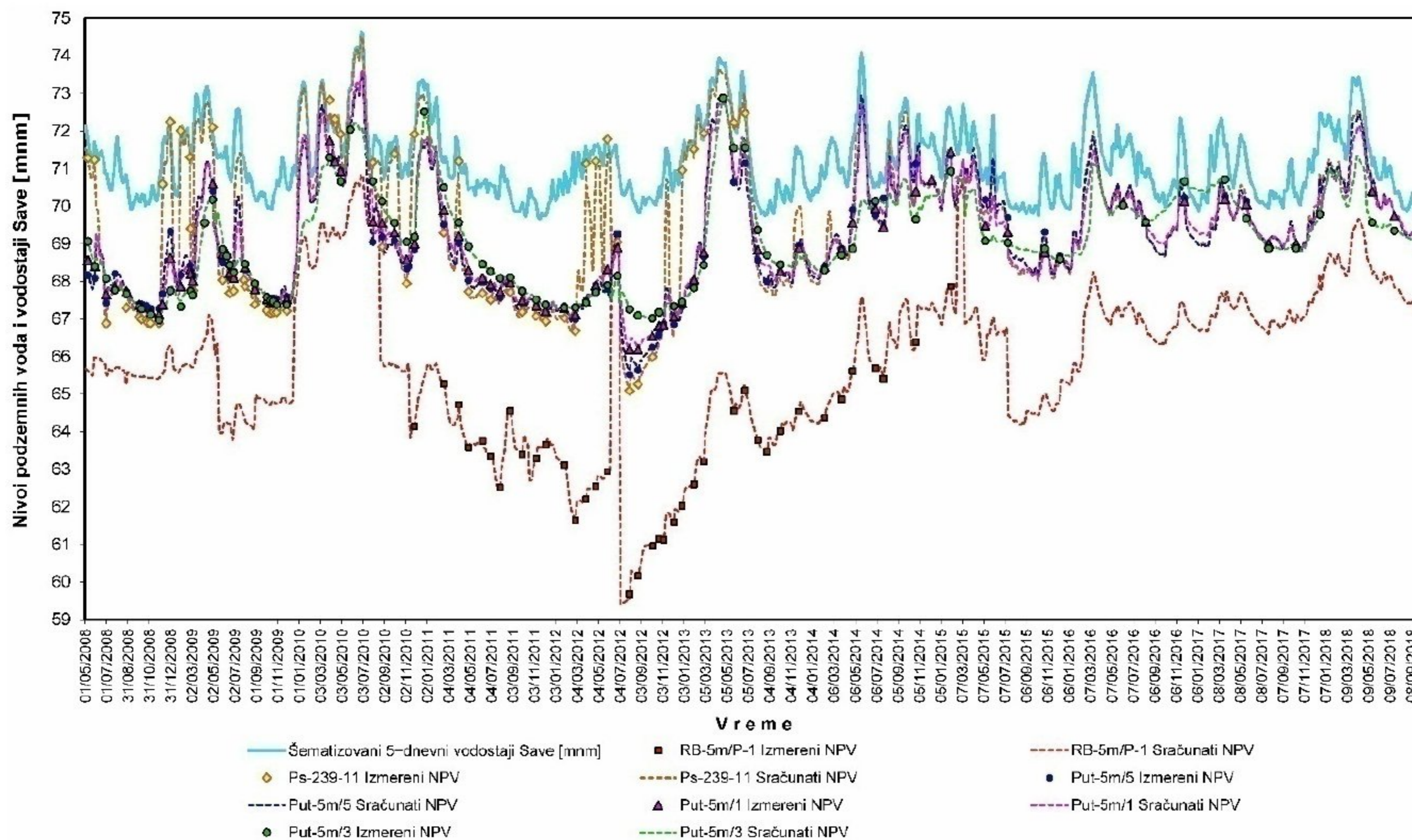
Nakon sprovođenja druge regeneracije zadržan je prethodni režim rada bunara, sa nivoom na koti  $H_b=55,40$  mm. Ovakav režim ostaje nepromenjen sve do kraja zime 2015. godine i sprovođenja treće regeneracije. Između druge i treće regeneracije, kapacitet bunara je u padu sa oko  $Q_b=55$  l/s (i tada odgovarajućim ulaznim brzinama  $V_{ul}>4,00 \times 10^{-4}$  m/s) na ispod 15 l/s.

Nakon treće regeneracije bunar je uključen u rad sa nivoom u šahtu na koti  $H_b=65,50$  mm i kapacitetom iznad 30 l/s. U narednih nekoliko meseci, radni nivo bunara se nalazio u dijapazonu  $H_b=64,00-65,00$  mm. Kapacitet bunara u tom periodu opada sa  $Q_b=30$  l/s na  $Q_b=15$  l/s. Imajući u vidu da je regeneracija sprovedena svega nekoliko meseci ranije, kao mera povećanja kapaciteta bunara sredinom 2015. godine je još jednom oborena kota nivoa u bunaru. Zadat je nivo na koti  $H_b=56,00$  mm, koji u nastavku eksploatacije nije menjan.

Od trenutka poslednjeg spuštanja kote u bunaru (sredinom 2015. godine), do kraja perioda obuhvaćenog prvom fazom hidrodinamičke analize (kraj septembra 2018. godine) kapacitet bunara opada sa gotovo 30 l/s na  $Q_b=10$  l/s. Četvrta regeneracija bunara je realizovana u martu 2020. g. Budući da su njeni efekti u sprovedenoj hidrodinamičkoj analizi služili za verifikaciju rezultata kalibracije modela i zasnovanih stavova o uzrocima starenja bunara obnovljenih u prvoj fazi utiskivanja novih drenova na pet bunara, kao i za dodatnu kalibraciju modela, o njoj će biti reči u završnom delu ovog poglavlja disertacije.

### 5.3 Rezultati analize režima nivoa izdani u zoni analiziranog bunara RB–5m

Predstavljeni režim rada bunara je rezultirao formiranjem kompleksnog nivoa izdani u zoni uticaja eksploatacije. U cilju jasnijeg prikaza, od devet raspoloživih piježometara, na *slici 31* su predstavljene oscilacije nivoa podzemnih voda u odabranim pet. Evidentno je da nivoi u piježometrima RB–5m/P–1 i Ps–239–11 imaju jedinstvene reakcije, dok među piježometrima Put–5m/1, Put–5m/3 i Put–5m/5 nema značajnih razlika u pogledu piježometarskog nivoa.



Slika 31: Režim nivoa izdani u zoni bunara RB–5m: izmereni i sračunati nivoi podzemnih voda, rezultat kalibracije modela (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

Uočeni efekat da je neposredno nakon druge regeneracije došlo do dodatnog sniženja nivoa podzemnih voda u plićem delu izdani (slojevima II i III na modelu) ukazuje na to da međusloj (sloj IV modela) nema kontinualno rasprostranjenje izvan zone drenova, kao i da nisu u pitanju sasvim vodonepropusni sedimenti. Stoga je sedimente međusloja na lokaciji bunara RB–5m opravdano posmatrati kao hidrogeološki slabije propusne tvorevine, koji značajno doprinose povećanju otpora na filtraciju podzemnih voda kroz izdan.

Filtracione karakteristike sedimenata međusloja čine da je u uslovima kada je bunar u funkciji, hidrodinamički režim takav da je plići deo izdani pod dominantnim uticajem hidroloških prilika – vodostaja reke Save, dok je dublji deo izdani (slojevi V i VI modela) pod uticajem rada bunara. Razlike u nivoima izdani u piježometrima koji imaju filter postavljen iznad (Ps–239–11, Put–5m/1, Put–5m/3 i Put–5m/5) i ispod međusloja (RB–5m/P–1) potvrđuju ovakav stav. U periodima kada bunar nije u funkciji (npr. prilikom izvođenja regeneracije), u svim piježometrima u užoj zoni bunara (izuzev piježometra Put–5m/3 koji se nalazi na rastojanju od 300 m u zaleđu), bez obzira u kojem delu vodonosne sredine je njihov filter, kvazistatički nivoi podzemnih voda su gotovo isti.

Neposredna posledica kolmiranja drenova na bunarima je povećanje otpora kretanju podzemnih voda na putu njihove filtracije kroz prifiltersku zonu i otvore na filterskoj konstrukciji. Tokom vremena eksploatacije, povećanje otpora se manifestuje sve većom razlikom između nivoa podzemnih voda u izdani i nivoa unutar drenova, što je praćeno padom kapaciteta bunara. Stoga je neophodan uslov za izučavanje procesa starenja i kvantifikovanje hidrauličkih otpora na drenovima postojanje reprezentativnih objekata za osmatranje režima nivoa podzemnih voda.

Reprezentativnim osmatračkim objektima se smatraju pijezometri izrađeni u zoni lepeze drenova (poželjno je neposredno uz drenove), koji imaju filter male dužine, čiji položaj u profilu izdani odgovara koti utisnutih drenova (Dimkić et al., 2010; Božović et al., 2016a; Polomčić et al., 2016).

Tek je izvođenje pijezometra RB-5m/P-1 krajem 2010. godine je otkrilo stvarni karakter režima izdani u zoni bunara. Razlika između nivoa u ovom reprezentativnom pijezometru i njemu najbližem plitkom pijezometru Put-5m/5 je vremenski promenljiva, u zavisnosti od kapaciteta bunara i vodostaja reke Save. Za kapacitet bunara od  $Q_b=25-30$  l/s, razlika u nivoima u ova dva pijezometra je oko četiri metara. Čak i pri malim kapacitetima bunara ( $Q_b < 20$  l/s), sniženje nivoa izdani u pijezometru RB-5m/P-1 je značajno. Ovakvo stanje upućuje na zaključak da su otpori na filtraciju kroz izdan veliki, odnosno da su prirodni hidrogeološki uslovi u zoni bunara RB-5m malog potencijala u pogledu zahvatanja podzemnih voda. Razlog ovakvog stanja su izražena slojevitost i skromne filtracione karakteristike deponovanih sedimenata, dok prirodne uslove dodatno ograničava visok sadržaj gvožđa u podzemnim vodama.

U periodu od sredine jula 2012. godine do kraja oktobra 2012. vodostaj Save je nizak ( $H_{Sava}=70,20$  mm, što odgovara vodostaju 85% trajanja). Za to vreme, nivo u svim pijezometrima u zoni bunara raste (u nekim manje, u nekim više – u zavisnosti od udaljenosti od drenova, kapaciteta najbližeg drena, ukupnog kapaciteta bunara, položaja filtera pijezometra u profilu geološke sredine i u odnosu na kotu drenova i dr.). Nivo raste na račun smanjenja kapaciteta bunara koji je posledica kolmiranja drenova taloženjem gvožđa rastvorenog u zahvaćenim podzemnim vodama.

Učešće podzemnih voda iz pravca zaleđa je analizirano preko odnosa nivoa izdani u pijezometrima Put-5m/1 i Put-5m/3, koji se nalaze u zaleđu bunarskog šahta na oko 70 m i 300 m, respektivno:

- U periodima kada je kapacitet bunara mali ( $Q_b < 20$  l/s), a Sava na srednjem višegodišnjem vodostaju ( $H_{Sava} \approx 71,20$  mm), tada je nivo podzemnih voda u ova dva pijezometra praktično isti;
- U periodima kada je vodostaj Save nizak, nivo podzemnih voda u pijezometru Put-5m/3 je viši od nivoa u Put-5m/1, što ukazuje na gradijent nivoa od zaleđa prema bunaru i reci, tj. na prihranjivanje zone bunara iz pravca zaleđa;
- Kada vodostaj u reci naglo opada, pad nivoa na lokaciji pijezometra Put-5m/1 je znatno strmijeg gradijenta od pada nivoa na mestu pijezometra Put-5m/3. Razlog je taj što se zahvatanjem podzemnih voda u uslovima smanjenog prihranjivanja na račun infiltracije površinskih voda reke „troše“ statičke rezerve podzemnih voda (koje će se nadoknaditi prilikom sledećeg porasta vodostaja), što je najviše izraženo u neposrednoj zoni bunara, a sa udaljenjem od njega je prisutno sve manje.
- Kada vodostaj u reci naglo raste, tada nivo u pijezometru Put-5m/1 raste znatno brže od nivoa u pijezometru Put-5m/3, što ukazuje da se izdan intenzivno prihranjuje iz reke, odnosno rukavca.

U periodima generalno nižeg vodostaja, nivo podzemnih voda u pijezometru Ps-239-11 je u saglasnosti sa nivoom izdani u ostalim plitkim pijezometrima. Tačnije, nivo u njemu je nešto niži od ostalih plitkih pijezometara, što se može objasniti najmanjim rastojanjem u odnosu na dren, najmanjim udaljenjem od šahta (imajući u vidu da nivo izdani opada sa približavanjem šahtu), kapacitetom najbližeg drena (drena ND4). Međutim, u periodima kada je vodostaj povišen ili visok, nivo podzemnih voda u ovom pijezometru je gotovo izjednačen sa vodostajem Save, bez obzira na kapacitet bunara (čak i pri kapacitetu bunara od oko  $Q_b=50$  l/s tokom jeseni 2012. godine). Sa slike 19 i slike 31 je uočljivo da se granica „aktiviranja“ naglog porasta nivoa u pijezometru Ps-239-11 nalazi oko kote 71,00 mm, što generalno odgovara srednjem višegodišnjem vodostaju Save.

Izražene amplitude oscilovanja nivoa u pijezometru Ps-239-11 ukazuju na aktivnu hidrauličku vezu između reke Save (zajedno sa rukavcem Adica) kao izvora prihranjivanja izdani i vodonosne sredine. Kako je reka Sava udaljena od bunara i kako su na njenom dnu istaloženi slabije propusni muljeviti sedimenti, došlo se do zaključka da se prihranjivanje zone bunara RB-5m u značajnoj meri vrši na račun infiltracije voda iz rukavca Adica. Budući da je rukavac u hidrauličkoj vezi sa

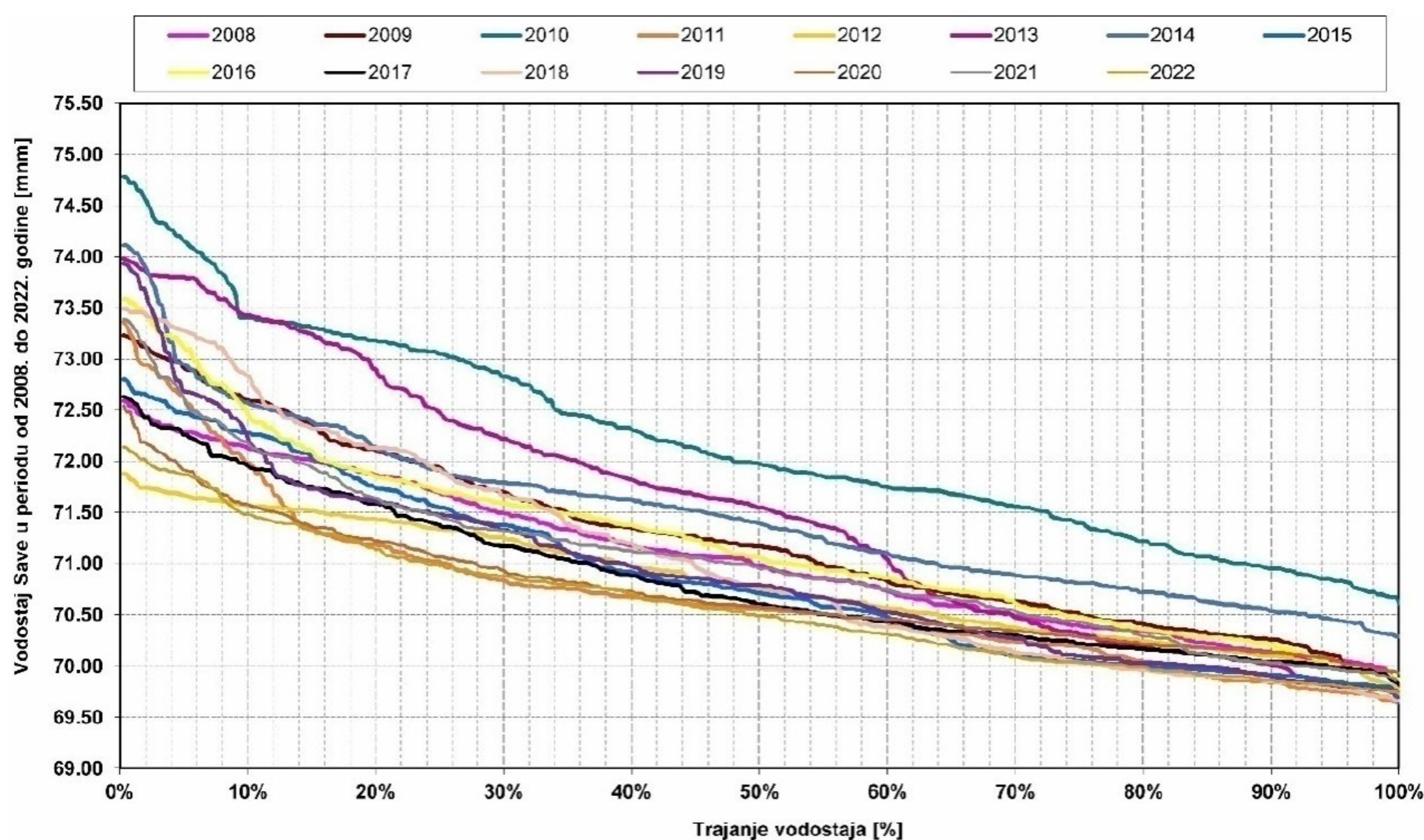


rekom, može se reći da on prenosi uticaj reke Save neposredno uz bunar RB–5m, kao i ostale bunare koji su izgrađeni uz korito rukavca.

Analizirajući stepen kalibracije modela na osnovu razlika izmerenih i sračunatih nivoa podzemnih voda u piježometrima u zoni bunara, može se konstatovati da su razlike najveće upravo kod piježometra Ps–239–11. U periodima nižih vodostaja reke, odnosno rukavca Adica, model dobro predstavlja hidrodinamički režim plićeg dela izdani na lokaciji piježometra. Međutim, u periodima naglih porasta i naglih povlačenja vodostaja, stepen kalibracije je skromniji. Razlog je taj što se u takvim hidrološkim uslovima stvarni dnevni vodostaji reke značajnije razlikuju od šematizovanih srednjih petodnevnih vodostaja zadatih na modelu. Drugi razlog je taj što ovaj piježometar ima najpliće ugrađen filter od svih piježometara u zoni bunara RB–5m. Na trećem mestu su promene širine vodnog ogledala rukavca pri višim vodostajima i lokalne promene geometrije korita rukavca (npr. erodovana desna obala neposredno u zoni piježometra Ps–239–11), koje nisu detaljno predstavljene na hidrodinamičkom modelu.

#### 5.4 Rezultati analize uticaja diskretizacije vremena na hidrodinamičkom modelu

U okviru sprovedene analize su konstruisani dijagram krivih trajanja vodostaja (*slika 32*) i dijagram oscilacija vodostaja reke Save (*slika 33*), što je pokazalo da je u analiziranom vremenskom periodu trajanja od 01. 05. 2008. do 31. 12. 2022. godine, ostvareni srednji vodostaj Save bio na koti  $H_{sr}=71,07$  mm, što odgovara višedecenijskom vodostaju 50% učešća od uspostavljanja režima nakon izgradnje HEPS „Đerdap I“. U istom periodu, maksimalni ostvareni vodostaj je iznosio  $H_{max}=74,78$  mm, dok je najniži vodostaj bio na koti  $H_{min}=69,64$  mm.



Slika 32: Krive trajanja vodostaja reke Save za period obuhvaćen hidrodinamičkom analizom (od 01. 05. 2008. do 31. 12. 2022. godine) na osnovu merenja na v. s. „Beograd“

Na osnovu analize dijagrama vodostaja i krivih trajanja, postupak definisanja optimalne dužine vremenskog koraka je nastavljen analizom dva diskretna intervala: dužine 10 dana i dužine 5 dana. Analiza je sprovedena tako što je definisani niz od 5358 dnevnih podataka o vodostajima reke Save podeljen na 536 šematizovanih srednjih desetodnevnih intervala i na 1071 srednji petodnevni interval. Potom su analizirane razlike između osrednjenih 10–dnevnih i 5–dnevnih vrednosti sa pojedinačnim dnevnim vrednostima ostvarenih vodostaja koje vremenski pripadaju odgovarajućim šematizovanim intervalima. Rezultati analize su predstavljeni i okviru *tabele 2* i na *slici 33*.

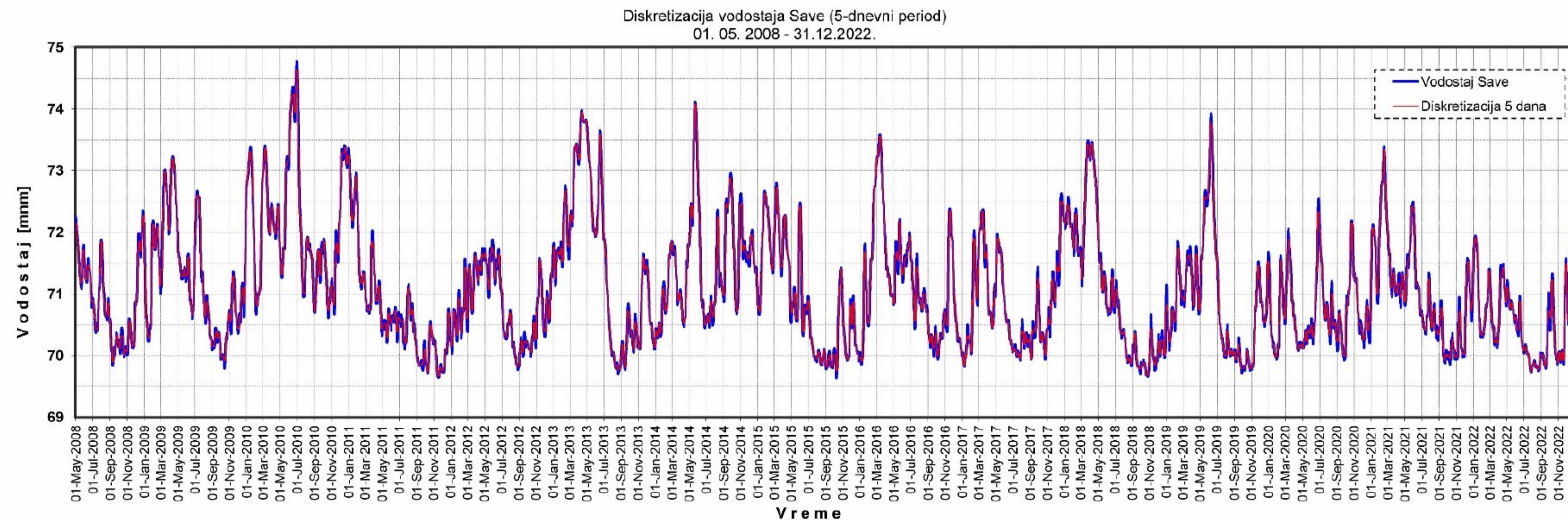
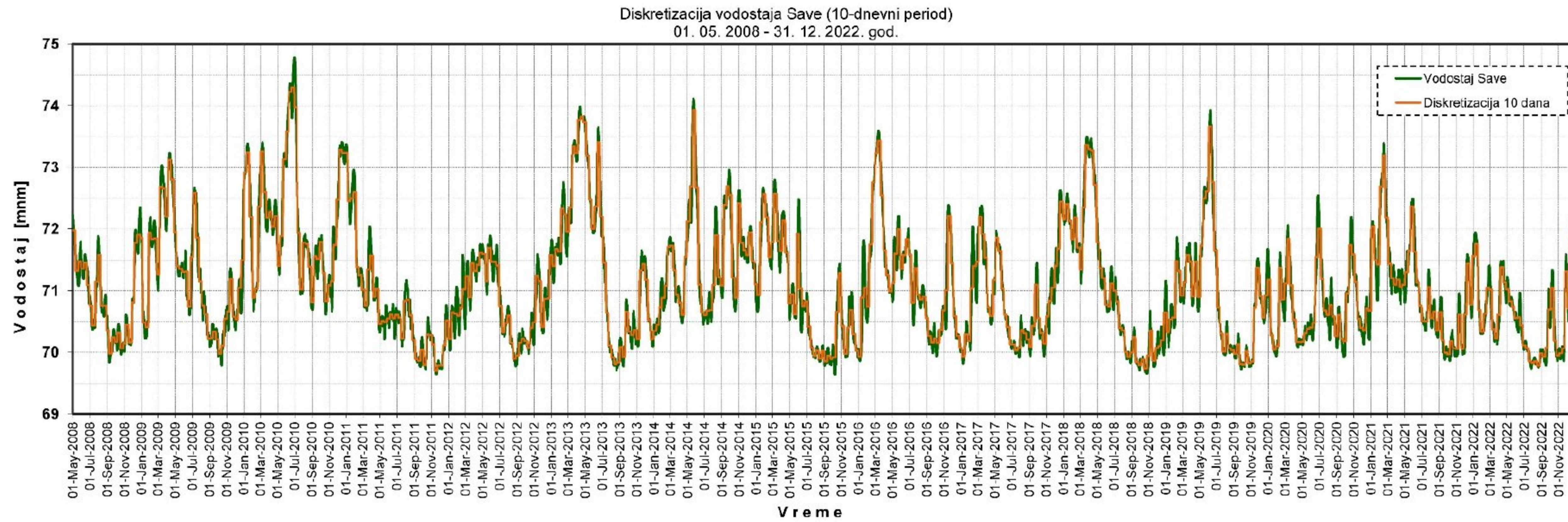
Tabela 2: Rezultati ispitivanja optimalne dužine trajanja proračunskog intervala u odnosu na ostvarene dnevne i šematizovane višednevne vrednosti vodostaja reke Save

Promena	Najveća razlika između:		
	dva uzastopna dnevna merenja vodostaja [m]	ostvarenog dnevnog i srednjeg <b>10-dnevnog</b> vodostaja [m]	ostvarenog dnevnog i srednjeg <b>5-dnevnog</b> vodostaja [m]
opadanje vodostaja (negativna promena)	-0,420	-1,294	-0,754
porast vodostaja (pozitivna promena)	0,650	1,249	0,706

Najveće međusobne razlike između dva odabrana intervala za šematizaciju vodostaja reke Save su značajne i iznose oko 0,5 m, dok je najveća razlika između ostvarenih dnevnih vodostaja i osrednjenih petodnevni vodostaja manja u odnosu na šematizovane desetodnevne vodostaje i ispoljena u slučaju naglih porasta i naglih opadanja nivoa u reci, koji nisu dugog trajanja (*slika 33*).

Uticaj razlike između šematizovanog petodnevnog vremenskog intervala i ostvarenih dnevnih vodostaja na režim nivoa izdani simuliran na hidrodinamičkom modelu je delimično ograničen i prisustvom slabije propusnog, alevritsko–glinovitog sloja na dnu korita reke Save, kao i uticajem eksploatacije podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima.

Na osnovu analize razlika ostvarenih dnevnih i šematizovanih višednevnih vrednosti vodostaja predstavljenih u *tabeli 2* i grafičkog prikaza na *slici 33* usvojeno je da dužina jednog diskretnog vremenskog koraka trajanja 5 dana adekvatnim stepenom reprezentativnosti predstavlja realne uslove vodostaja reke Save na modelu, što je ranije predstavljeno i prihvaćeno od strane naučne javnosti (Polomčić et al, 2022; Božović et al, 2020a; 2015). Samim tim, model je imao ukupno 1071 proračunski interval.



Slika 33: Razlike između dva analizirana proračunska intervala za diskretizaciju vremena na hidrodinamičkom modelu u funkciji vodostaja Save

## 5.5 Rezultati analize uticaja diskretizacije prostora na hidrodinamičkom modelu bunara sa horizontalnim drenovima

Analiza ispitivanja veličine proračunskih polja u zoni bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m je ukazala na izražen uticaj koji dimenzije polja imaju na rezultate kalibracije hidrodinamičkog modela. Rezultati ispitivanja predstavljeni u tabelama 3 do 6 ukazuju da je u cilju uspešne simulacije strmih gradijenata nivoa izdani u zoni najizraženijeg uticaja rada bunara (zoni nešto široj od zone lepeze drenova bunara) neophodno izvršiti dodatnu diskretizaciju prostora. Ispitivanje je ukazalo da se zadovoljavajući rezultati dobijaju primenom obe metode dodatne diskretizacije prostora u užoj zoni bunara sa horizontalnim drenovima – i sa sprovedenim ispitivanjem primene pravilne pravougaone umetnute mreže, *Nested grid*, (slika 20) i sa ranijom primenom nepravilne pravougaone umetnute mreže, koju su u svom istraživanju primenili autori Božović et al. (2020a), (slika 35), sve dok diskretna polja imaju dovoljno male dimenzije čiji adekvatan izbor rezultira zadovoljavajućim stepenom saglasnosti između nivoa podzemnih voda dobijenih proračunima na hidrodinamičkom modelu sa nivoima izmerenim u piježometrima.

Tabela 3: Rezultati ispitivanja uticaja veličine diskretnih polja: bez dodatne diskretizacije i sa nepravilnom pravougaonom umetnutom mrežom (prema: Božović et al., 2020a, sa najmanjim poljima 2 x 2 m; slika 35)

	Izmereni NPV (mm) na dan:			Varijanta diskretizacije prostora u užoj zoni bunara RB–5m					
	05. 11. 2012.	04. 10. 2013.	25. 10. 2014.	Nepravilna pravougaona umetnuta mreža ( <i>Quadtree refinement</i> , prema Božović et al., 2020a)			Osnovna mreža		
	Proračunski period na modelu			2 x 2 m			16 x 16 m		
Piježometar	SP 330	SP 397	SP 474	Sračunati nivo (mm)			Sračunati nivo (mm)		
RB–5m/P–1	61,13	64,02	66,39	61,1379	64,0426	66,3486	60,4278	63,5201	65,8930
Put–5m/3	67,18	68,45	69,65	67,2109	68,4700	69,6661	67,1414	68,4096	69,6257
Put–5m/1	66,84	68,27	70,40	66,8508	68,2941	70,3652	66,2518	67,8440	69,9955

Tabela 4: Rezultati ispitivanja uticaja veličine diskretnih polja: razlike između izmerenih i sračunatih vrednosti nivoa podzemnih voda (m) u slučaju bez dodatne diskretizacije i sa nepravilnom pravougaonom umetnutom mrežom (primenjenom od strane Božović et al., 2020a, sa najmanjim poljima 2 x 2 m)

	Izmereni NPV (mm) na dan:			Sračunati nivo podzemnih voda					
	05. 11. 2012.	04. 10. 2013.	25. 10. 2014.	Nepravilna pravougaona umetnuta mreža ( <i>Quadtree refinement</i> , prema Božović et al., 2020a)			Osnovna mreža		
	Proračunski period na modelu			od 16 x 16 m do 2 x 2 m			16 x 16 m		
Piježometar	SP 330	SP 397	SP 474	Razlika (m)			Razlika (m)		
RB–5m/P–1	61,13	64,02	66,39	-0.0079	-0.0226	-0.0414	-0.7022	-0.4999	-0.4970
Put–5m/3	67,18	68,45	69,65	-0.0309	-0.0200	-0.0161	-0.0386	-0.0404	-0.0243
Put–5m/1	66,84	68,27	70,40	-0.0108	-0.0241	0.0348	-0.5882	-0.4260	-0.4045

Postepen prelaz između polja osnovne mreže ka najmanjim poljima primenjenim unutar nepravilne umetnute pravougaone mreže (2 x 2 m) se može smatrati najzaslužnijim za najmanju konstatovanu razliku između računski dobijenih i stvarnih izmerenih vrednosti piježometarskih nivoa. Najmanja polja, dimenzija 2 x 2 m, primenjena u okviru pravilne umetnute mreže su rezultirala nešto većom, ali i dalje vrlo prihvatljivom prosečnom razlikom u nivoima podzemnih voda ( $\Delta H_{NPV}=5,17$  cm).

Tabela 5: Rezultati ispitivanja uticaja veličine diskretnih polja: primenom pravilne pravougaone umetnute mreže, Nested grid

Varijanta diskretizacije prostora u užoj zoni bunara RB–5m									
Pravougaona umetnuta mreža ( <i>Nested grid</i> )									
Pijezometar	SP 330	SP 397	SP 474	Sračunati nivo (mm)			Sračunati nivo (mm)		
RB–5m/P–1	60,7131	63,7072	66,1505	60,9576	63,8768	66,3696	61,0972	64,0301	66,3363
Put–5m/3	67,1618	68,4198	69,6438	67,1738	68,4294	69,6602	67,1959	68,4571	69,6575
Put–5m/1	66,3570	67,8987	70,1697	66,4545	67,9701	70,3269	66,6620	68,2160	70,2127

Tabela 6: Rezultati ispitivanja uticaja veličine diskretnih polja: razlike između izmerenih i sračunatih vrednosti nivoa podzemnih voda u slučaju primene pravilne pravougaone umetnute mreže, Nested grid

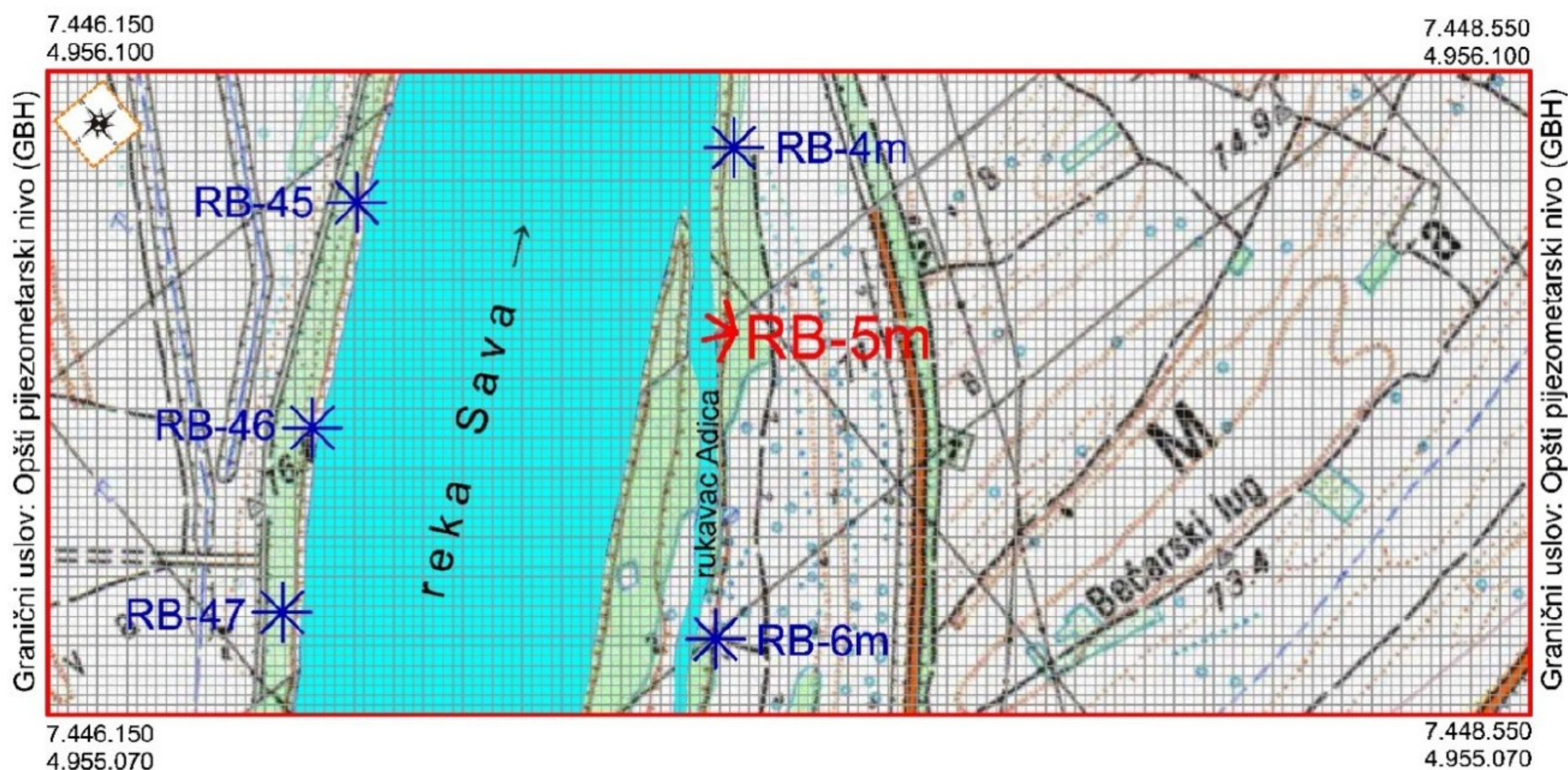
Sračunati nivoi podzemnih voda									
Pravougaona umetnuta mreža ( <i>Nested grid</i> )									
Pijezometar	Razlika (m)			Razlika (m)			Razlika (m)		
RB–5m/P–1	0.4169	0.3128	0.2395	0.1724	0.1432	0.0204	0.0328	-0.0101	0.0537
Put–5m/3	0.0192	0.0302	0.0062	0.0062	0.0206	-0.0102	-0.0159	-0.0071	-0.0075
Put–5m/1	0.4830	0.3713	0.2303	0.3855	0.2999	0.0731	0.1780	0.0540	0.1873

Sprovedena ispitivanja na numeričkom modelu nisu mogla biti oslobođena određenog uticaja koji je na dobijene rezultate imala primena krupnijih polja u zoni analiziranog bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m. Naime, osnovnim poljima modela dimenzija 16 x 16 m (bez dodatnog umanjenja), kao ni najkrupnijim dodatno diskretizovanim poljima (dimenzija 8 x 8 m) nije mogao biti postignut uslov preciznog zadavanja graničnog uslova „reka“ u okvirima geometrije korita rukavca Adica u zoni bunara (za koji je utvrđeno da ima značajan uticaj na uslove prihranjivanja bunara u zoni pružanja rukavca). Sa smanjenjem dimenzija polja na 4 x 4 m, a naročito na 2 x 2 m, konturni granični uslov je moguće precizno definisati u prostoru, zbog čega se i uticaj prostornog zadavanja graničnog uslova na rezultate modela umanjuje. Iako može delovati da je za potrebe ispitivanja uticaja različitih aspekata numeričkog aparata na rezultate modela adekvatnije vršiti ispitivanja na hipotetičkom modelu, rezultati sprovedene analize na modelu ispitivanog bunara RB–5m govore u prilog izbora realnih vodozahvatnih objekata u realnim hidrogeološkim uslovima.

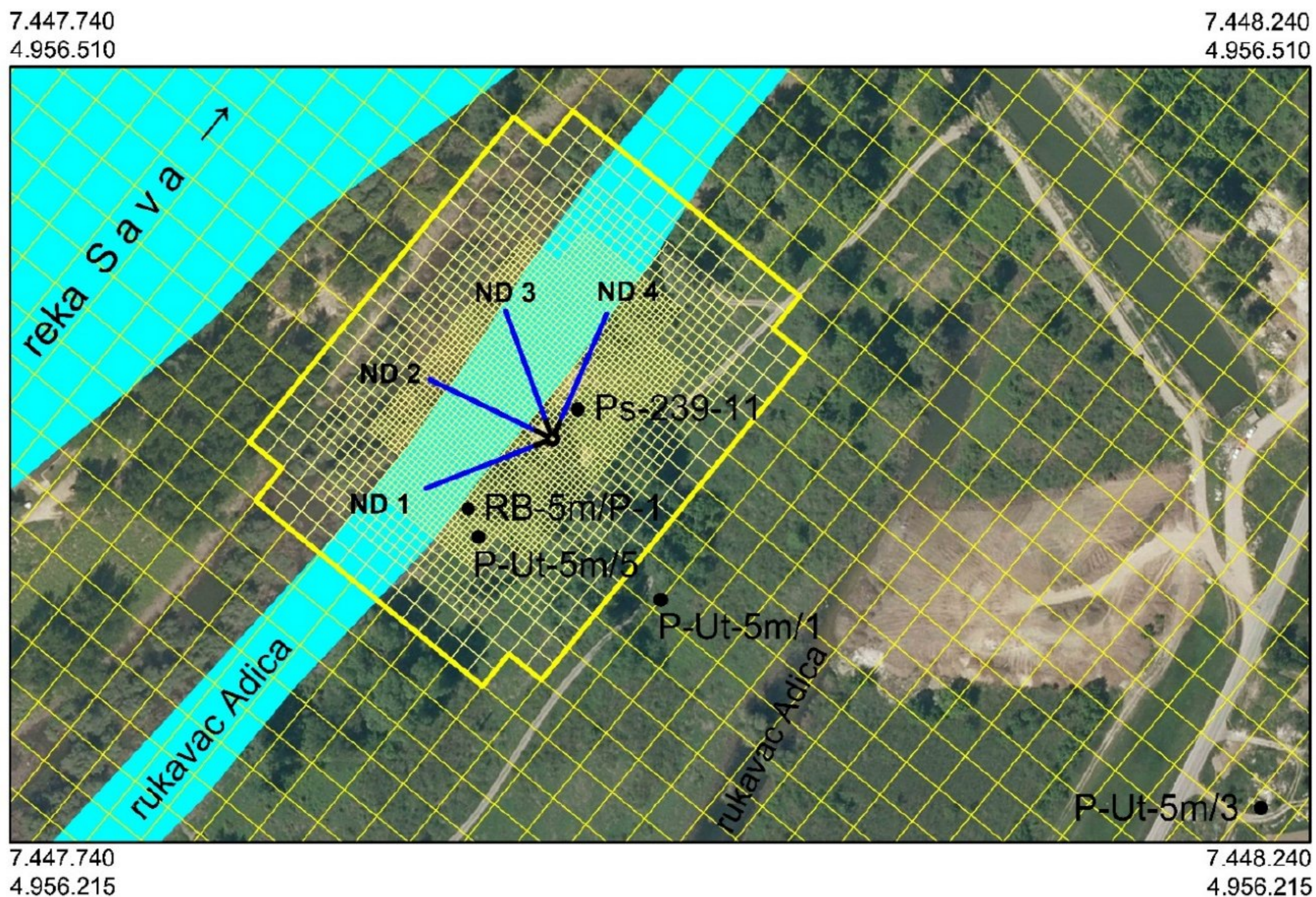
Na osnovu izvršene analize uticaja dodatne diskretizacije prostora u zoni bunara sa horizontalnim drenovima, moguće je izneti određenu preporuku, koja može služiti istraživačima prilikom izrade modela ovog tipa bunara na predmetnom i drugim izvorištima podzemnih voda. Kako je u hidrauličkom smislu jedino opravdano dovesti u vezu veličinu diskretnih polja sa vodozahvatnim delovima konstrukcije bunara, tj. drenovima, i to prvenstveno sa njihovim prečnikom, *na ovom mestu se daje preporuka da dodatna diskretizacija u užoj zoni bunara započne zadavanjem polja kvadratnog oblika u planu (u slučaju pravougaone mreže) čija je veličina stranice najviše 10 puta veća od prečnika konstrukcije drenova analiziranog bunara.*

## 5.6 Rezultati izrade hidrodinamičkog modela dela izdani beogradskog izvorišta

U skladu sa rezultatima prethodne analize uticaja diskretizacije prostora, u nastavku postupka izrade numeričkog modela, istražni prostor je diskretizovan osnovnom mrežom kvadrata dimenzija 16 x 16 m u planu (slika 34). U oblasti nešto većoj od zone lepeze drenova bunara RB-5m, u kojoj su najizraženiji gradijenti nivoa izdani i realno 3D strujanje, izvršena je dodatna diskretizacija zadavanjem umetnute nepravilne pravougaone mreže, *quadtree refinement* tipa, četvrtog nivoa diskretizacije. Tako su osnovna polja u zoni bunara umanjena do dimenzija 2 x 2 m (slika 35).



Slika 34: Granica hidrodinamičkog modela sa osnovnom mrežom diskretnih polja, položajem bunara sa horizontalnim drenovima i graničnih uslova (Božović et al., 2020a, izmenjeno)



Slika 35: Dodatna diskretizacija prostora u zoni bunara RB-5m upotrebom nepravilne pravougaone umetnute mreže sa trasama novih drenova i položajem pijezometara (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

Elementi režima izdani potrebni za kalibraciju modela su postojali u okviru 119 proračunskih intervala u prvoj fazi hidrodinamičkih istraživanja, odnosno u okviru 12 intervala (u drugom delu analize). Od elemenata režima podzemnih voda potrebnih za simulaciju hidrauličkih uslova rada bunara i procesa starenja njegovih drenova, raspolagalo se podacima o: kapacitetu bunara, hidrometrijskim krilima izmerenim pojedinačnim kapacitetima drenova, nivou u bunarskom šahtu, nivoima podzemnih voda u pijezometrima u užoj i široj zoni bunara.

Nivo u bunarskom šahtu ( $H_b$ ), tzv. radni nivo, nije osmatran kontinualno. Stoga je prethodno trebalo izvršiti njegovu šematizaciju. Šematizacija nivoa u bunaru je izvršena tako što je na modelu u okviru jednog vremenskog intervala zadata ona vrednost nivoa koja je registrovana na terenu određenog dana/datuma, koji se nalazi u okviru tog petodnevnog vremenskog koraka. Između dva terenska merenja (naročito u periodu kontinuiranog snižavanja radnog nivoa od sredine novembra 2012. do kraja marta 2013. godine), šematizacija radnog nivoa je vršena analizom podatka drugih, u međuvremenu izmerenih, elemenata režima izdani – nivoa u pijezometrima i vodostaja reke Save.

### 5.6.1 Početni i granični uslovi hidrodinamičkog modela

U skladu sa iskustvom hidrodinamičke analize bunara sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta podzemnih voda (Dimkić et al., 2010; Božović et al., 2015), okolni bunari su u prvoj fazi istraživanja predstavljeni pomoću graničnog uslova poznatog kapaciteta, kao ekvivalentni vertikalni bunari velikog prečnika, dok je predmetni bunar RB–5m simuliran kao realni bunar sa horizontalnim drenovima upotrebom graničnog uslova treće vrste „dren“ (engl. *Head-dependent flux* granični uslov. Graničnim uslovom treće vrste su simulirani još i hidrološki uticaji, odnosno pijezometarski nivoi na spoljnim konturama modela (Anderson & Woessner, 1992; Bear & Cheng, 2010). U drugoj fazi istraživanja, i okolni bunari su simulirani hidraulički realnim pristupom, uz hidraulički realno predstavljanje prifilterske zone drenova i sa kapacitetima pojedinačnih drenova proisteklim iz kriterijuma biohemijskog kolmiranja.

Graničnim uslovom treće vrste, uz upotrebu numeričkog paketa „reka“ su simulirani reka Sava, rukavac Adica i povremeno ispunjen kanal Mala Adica. Granični uslov je zadat na osnovu dnevnih podataka o vodostajima, bez pada vodnog ogledala (iz razloga dimenzija modela). Budući da se raspolagalo podacima o geometriji korita reke, definisana je usečenost korita u slojeve na hidrodinamičkom modelu. Izdvojene su dve zone različitih dubina usecanja korita u sedimente izdani. Obe zone su zadate u drugom sloju na hidrodinamičkom modelu. Plića zona je zadata sa dnom korita na koti 63,0 mm, dok je u dubljoj zoni dno korita zadato na koti 61,5 mm.

Tokom višegodišnjih multidisciplinarnih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda (IJČ, 2005–2010), na više lokacija u reci Savi su vršena istražna bušenja sa odgovarajućeg plovnog vozila, uz prateće kartiranje, uzimanje uzoraka nabušenog materijala i izradu laboratorijskih analiza. Tom prilikom je utvrđeno da sedimenti rečnog dna imaju debljinu oko  $d_{Sava}=1$  m. Iz ovog razloga su u slučaju obe zone u pogledu dubina usečenosti korita Save u sedimente aluvijalne izdani izvorišta, finozne naslage na dnu korita reke na modelu zadate sa debljinom od jednog metra.

Graničnim uslovom treće vrste, uz upotrebu numeričkog paketa „opšti pijezometarski nivo“, su simulirani još i vremenski promenljivi pijezometarski nivoi na spoljnim konturama modela, u zaleđu bunarskog niza na prostoru leve i desne obale Save. Lokacija zadavanja graničnog uslova je određena na osnovu položaja pijezometara koji se nalaze u zaleđu vodozahvatnih objekata. Na desnoj obali reke je granični uslov postavljen dublje u zaleđu u odnosu na granicu na levoj obali reke (slika 16). Na ovaj način su uticaji prihranjivanja izdani iz pravca zaleđa predstavljeni reprezentativnije. Za potrebe definisanja vrednosti zadatah nivoa u okviru graničnog uslova, izvršena je analiza gradijenta nivoa izdani od reke i bunara prema zaleđu, putem konstrukcije pijezometarskog profila i korelacije nivoa podzemnih voda u pijezometrima sa vodostajima Save.

Okolni bunari sa horizontalnim drenovima su predstavljeni nižim nivoom detaljnosti, kao ekvivalentni bušeni (vertikalni) bunari velikog prečnika, zadavanjem poznatog, vremenski promenljivog, kapaciteta bunara (*Neumann*-ovim graničnim uslovom). U slučaju da je istražnim bušenjem u zoni okolnih bunara konstatovano prisustvo slabije propusnog međusloja (ili više njih, u kom slučaju su predstavljeni jednim, litofacijalno i hidrodinamički dominantnim), on je na modelu zadat u skladu sa sprovedenom 3D hidrogeološkom šematizacijom. Izbor sloja na modelu u kojem je zadat ovaj granični uslov je određen u skladu sa kotom utisnutih drenova na datom bunaru. U zoni koja odgovara lepezi drenova okolnog bunara je vršeno prilagođavanje vrednosti koeficijenata filtracije sedimenata sredine, sve dok kao rezultat kalibracije za zadate ostvarene kapacitete crpenja nisu dobijena zadovoljavajuća sniženja nivoa izdani registrovana u pijeziometrima.

Sa aspekta rešavanja predmetnog zadatka, najvažniji granični uslov je bunar sa horizontalnim drenovima, odnosno dren kao njegov vodozahvatni deo. U prethodnom delu teksta je rečeno da se kapacitet drena ostvaruje kao funkcija razlike između pijeziometarskog nivoa u izdani i nivoa u unutrašnjosti drena, preko prifilterske zone čije hidrauličke karakteristike određuju intenzitet razmene podzemnih voda između vodonosne sredine i drena, a koja suštinski predstavlja doticaj u dren (*jednačina 7*). Dakle, i u ovom slučaju u pitanju je granični uslov treće vrste.

Za nivo unutar drenova je usvojeno da je ekvivalentan nivou u bunarskom šahtu (hidraulički otpori na kretanje kroz filterske cevi su zanemareni), na osnovu prethodno kvantifikovane veličine gubitaka unutar drena, a iz razloga niskih vrednosti brzina kretanja podzemnih voda (što je u skladu sa rezultatima do kojih je u svojem istraživanju došao Houben, 2015a).

Imajući u vidu da je izdan prekrivena slabije propusnim povlatnim sedimentima značajne debljine, kao i dubinu do nivoa podzemnih voda, prihranjivanje izdani na račun infiltracije voda atmosferskih taloga nema relevantan značaj. Iz tog razloga su elementi vertikalnog bilansa zanemareni prilikom izrade modela.

Kalibracija modela je vršena metodom pokušaja (engl. *trial and error*). Reprerentativnost modela je testirana proračunom veličine greške u kalibraciji modela u odnosu na rezidualne nivoa podzemnih voda i bilansa modela, ili drugim rečima, razlike između bilansa „ulaza“ i „izlaza“ modela (Anderson & Woesner, 1992). Statistički pokazatelji *Root Mean Squared Error* (RMS) and *Scaled Root Mean Squared Error* (SRMS) su korišćeni u kvantifikovanju sveukupne usklađenosti proračunskih sa osmotrenim nivoima podzemnih voda.

Kalibracija modela u odnosu na ostvareni i registrovani kapacitet bunara i nivoa izdani je rezultirala identifikacijom reprerentativnih vrednosti filtracionih karakteristika sedimenata izdani i naslaga korita Save i rukavca. Na kraju postupka, definisane su vrednosti početnih hidrauličkih karakteristika drenova i njihova promena tokom vremena. Dobijeni rezultati i njihova diskusija će u nastavku biti predstavljeni u odgovarajućim, zasebnim delovima predmetnog poglavlja disertacije.

## 5.6.2 Kalibracija modela

Kalibracija hidrodinamičkog modela je imala za cilj da obezbedi odgovore na pitanja u vezi sa prisustvom hidrauličkih otpora na novim drenovima nakon njihovog utiskivanja, kao i njihovu promenu tokom vremena rada bunara. Analiza reprerentativnosti hidrodinamičkog modela je ukazala na malu grešku u vrednostima reziduala. U odnosu na bilans podzemnih voda, statistički indikatori su pokazali da su greške daleko manje od 1%, što je vodilo zaključku da je kalibrisani model pouzdan. Rezultati kalibracije modela su prikazani u okviru *tabele 7*.



Tabela 7: Statistički pokazatelji greške hidrodinamičkog modela: reziduali nivoa podzemnih voda i bilansa (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

<i>Reziduali</i>		<i>Bilans</i>		
RMS Error [m]	Scaled RMS Error [%]	Min [%]	Max [%]	Ave [%]
1.060	0.071	0.0242	0.1929	0.1009

### 5.6.3 Identifikacija reprezentativnih vrednosti filtracionih karakteristika sedimenata izdani

Kroz kalibraciju hidrodinamičkog modela dobijene su reprezentativne vrednosti koeficijenata filtracije svakog sloja kojim je predstavljen deo šematizovane vodonosne sredine u zoni predmetnog bunara. Povlatnim sedimentima (sloju I na modelu) odgovara vrednost  $K=1,0 \times 10^{-7}$  m/s. Dobijeno je da su vrednosti koeficijenta filtracije sedimenata u plićem delu profila vodonosne sredine skromnije od sedimenata deponovanih na dubini drenova. Holocenske naslage (sloj II na modelu) i sedimenti korita najmlađeg pleistocenskog ciklusa aluvijalne sedimentacije (sloj III modela) se odlikuju vrednošću koeficijenta filtracije od  $K=9,0 \times 10^{-5}$  m/s. Sa vrednošću  $K=5,0 \times 10^{-7}$  m/s, sedimentima facije povodnja (sloj IV modela) svakako odgovara hidrodinamička uloga međusloja. Sedimente korita prvog i drugog pleistocenskog ciklusa (slojevi V i VI na hidrodinamičkom modelu, odnosno 8 i 10 u hidrogeološko–litostratigrafskoj šematizaciji) odlikuju vrednosti koeficijenta filtracije  $K=3,5 \times 10^{-4}$  m/s.

Utvrđeno je da postoji razlika u vertikalnoj i horizontalnoj komponenti koeficijenta filtracije u slučaju svih deponovanih aluvijalnih naslaga u zoni bunara RB–5m, izuzev recentnih povlatnih sedimenata (sloj I na modelu). Anizotropija je prisutna u odnosu  $K_z=0,1 \times K_{x,y}$ . Ostale filtracione karakteristike su: *specifična izdašnost izdani*  $S_y=0,1$ ; *specifično uskladištenje*  $S_s=1,0 \times 10^{-4}$  m<sup>-1</sup>; *poroznost*  $n=0,15$ . Razlog skromnih vrednosti filtracionih karakteristika porozne sredine i postojanja anizotropije se može tražiti u učešću alevritske frakcije u građi vodonosnih, pretežno peskovito–šljunkovitih sedimenata.

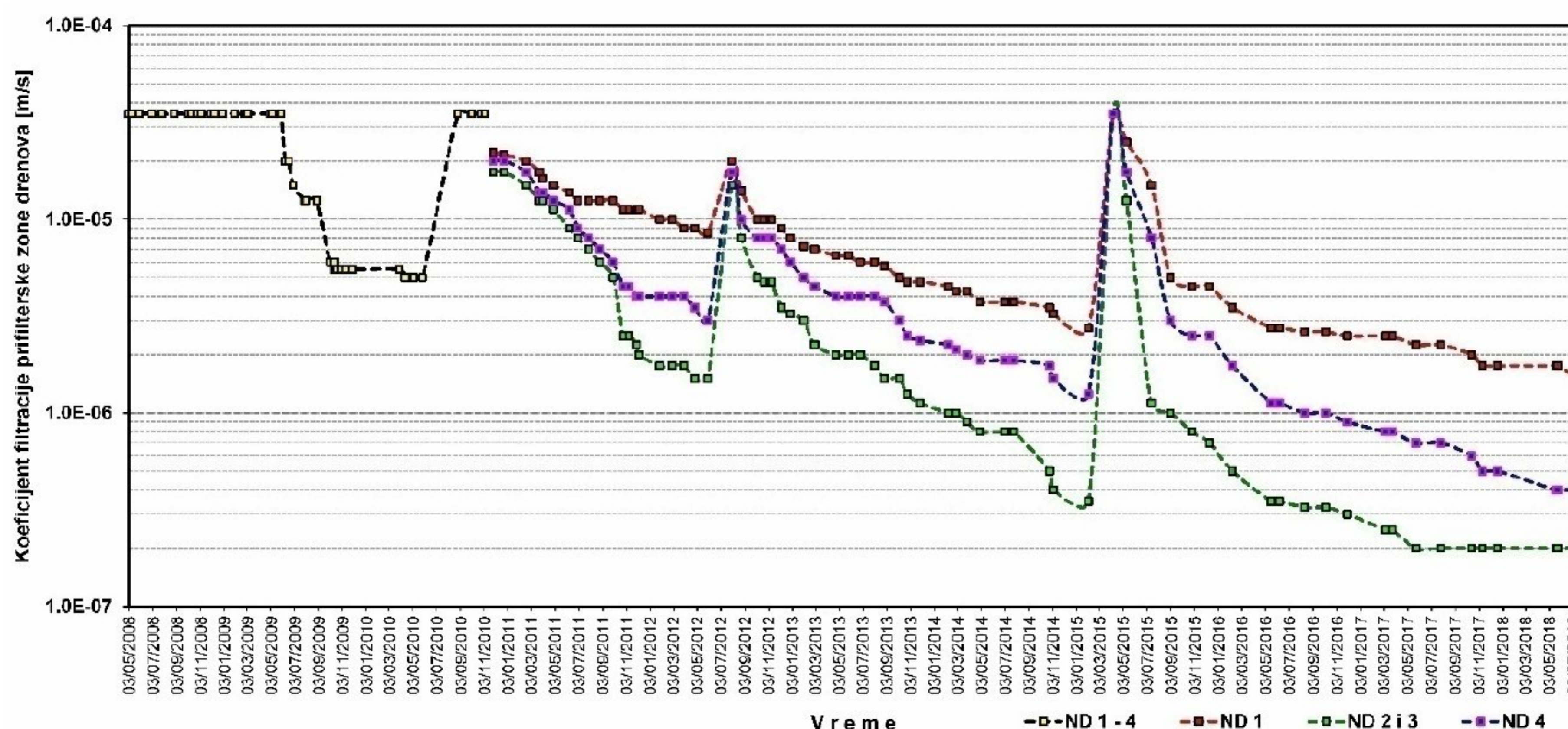
### 5.6.4 Identifikacija reprezentativnih vrednosti naslaga dna površinskih vodnih tela (reke Save i rukavaca Adica)

Kalibracijom modela je identifikovana reprezentativna vrednost koeficijenta propusnosti naslaga na dnu rečnog korita Save od  $[K_{Sava}/d_{Sava}]=3,75 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>. Rukavac Adica se odlikuje povoljnijom propusnošću korita,  $[K_{Adica}/d_{Adica}]=1,0 \times 10^{-6}$  s<sup>-1</sup>. Zaključeno je da je veća propusnost naslaga dna korita rukavca Adica rezultat toga što je rukavac (u vreme analizirano prvom fazom modelskih ispitivanja) bio povezan sa Savom na njegovom nizvodnom delu, zbog čega se „punjenje“ rukavca vodama reke odvija od njegovog nizvodnog prema uzvodnom kraju, tj. u suprotnom smeru od smera toka reke Save. Na taj način, suspendovane materije reke bivaju taložene na samom ulasku u rukavac, na mestu pada energije rečnog toka. Kao posledica, na dnu rukavca su u manjoj meri prisutni muljeviti, slabije propusni sedimenti, te je i hidraulički kontakt rukavca sa vodonosnim sedimentima direktniji.

### 5.6.5 Kvantifikovanje hidrauličkih karakteristika drenova tokom vremena

Tokom prve dve i po godine rada bunara RB–5m, u zoni drenova nije postojao adekvatan pijezometar za osmatranje nivoa podzemnih voda (sa kratkim filterom u delu profila izdani u kojem su utisnuti novi drenovi). Stoga su za ovaj period hidrauličke karakteristike drenova definisane preko podataka o nivoima podzemnih voda sa filterima u plićem delu izdani i kapaciteta bunara, a simulacija je vršena tako što su svi drenovi imali jednake vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone, (ovaj period je na slici 36 označen sa ND 1–4; „ND“ – novi dren). Promene otpora na drenovima su imale negativan i pozitivan smer. Pogoršavanje karakteristika drenova se odvijalo na račun procesa kolmiranja, dok je poboljšanje hidrauličke efikasnosti drenova nastajalo kao rezultat sprovedenih mehaničkih regeneracija drenova.

Na početku eksploatacije bunara, koeficijent filtracije prifilterske zone novih drenova je imao vrednost  $K^{1-4}_{pz}=3,5 \times 10^{-5}$  m/s. Nesumnjivo, radi se niskoj vrednosti, koja je za red veličine manja od reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije slojeva u kojima su utisnuti drenovi (konkretno, odgovara vertikalnoj komponenti koeficijenta filtracije).



Slika 36: Promena vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone novih drenova (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

Tokom prve godine rada bunara, hidrauličke karakteristike drenova nisu menjane. Promena, tj. smanjenje vrednosti hidrauličkih karakteristika započinje neposredno nakon intenziviranja režima rada bunara izazvanog spuštanjem radnog nivoa krajem maja meseca 2009. godine. Tada nastupa narušavanje početnih hidrauličkih karakteristika drenova. Da smanjenje vodozahvatne sposobnosti drenova ima intenzivan karakter vidi se po tome što je za četiri meseca rada bunara prosečna vrednost koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova smanjena gotovo 6 puta, na  $K^{1-4}_{pz}=6,0 \times 10^{-6}$  m/s. Usporavanje trenda smanjenja propusnosti drenova nastaje tek kada je kapacitet bunara smanjen na oko 25 l/s, tj. kada su ulazne brzine podzemnih voda smanjene na  $V_{ul}=1,50 \times 10^{-4}$  m/s.

Prva regeneracija drenova je dala pozitivne rezultate u smislu obnavljanja hidrauličke funkcionalnosti drenova. Vrednost koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova je „vraćena“ na početno stanje. Sve dok je režim rada bunara posle regeneracije bio rasterećen (kota nivoa vode u šahtu visoka), nije dolazilo do gubljenja postignutih efekata. Međutim, novo sniženje nivoa u bunaru iz novembra meseca 2010. godine još jednom je pokrenulo slabljenje hidrauličkih karakteristika drenova, što predstavlja ništa drugo do proces kolmiranja drenova putem taloženja gvožđa na račun povećanja ulaznih brzina podzemnih voda u drenove.

Od kraja novembra 2010. godine, izradom reprezentativnog osmatračkog objekta (pijezometra RB–5m/P–1) i početkom sticanja uvida u realni hidrodinamički režim izdani u zoni uticaja bunara, omogućeno je pojedinačno kvantifikovanje hidrauličkih karakteristika drenova. Definisane promene koeficijenta filtracije prifilterske zone drena broj 1 je vršeno preko nivoa u njemu najbližem pijezometru RB–5m/P–1, dok su hidrauličke karakteristike drena broj 4 sagledane preko pijezometra Ps–239–11, izgrađenog neposredno uz dren. Uz drenove 2 i 3 nije izgrađen pijezometar zbog toga što su izvedeni ispod rukavca Adica. Iz tog razloga nisu postojali uslovi da se hidrauličke karakteristike ovih drenova na modelu kvantifikuju zasebno i onako detaljno kao u slučaju drena ND 1 i ND 4. U nastavku hidrodinamičke analize oni su predstavljeni zajedničkom vrednošću koeficijenta filtracije (ND 2 i 3 na slici 36).

Od samog početka sagledavanja procesa starenja po pojedinim drenovima, evidentno je da postoje razlike u njihovoj hidrauličkoj funkcionalnosti. Tokom eksploatacije, razlike postaju sve izraženije. Tako je neposredno uoči realizacije druge regeneracije, dren broj 1 imao vrednost  $K_{pz}^1=8,5 \times 10^{-6}$  m/s, dren 4  $K_{pz}^4=3,0 \times 10^{-6}$  m/s, a drenovi 2 i 3  $K_{pz}^{2\&3}=1,5 \times 10^{-7}$  m/s.

Da li je i druga regeneracija drenova uspela da hidrauličke karakteristike poboljša do njihovog početnog stanja na modelu nije bilo moguće pouzdano utvrditi. Razlog je taj što je prvo merenje nivoa izdani u pijezometrima izvršeno mesec dana nakon uključanja bunara u rad (krajem jula meseca 2012. godine). Imajući u vidu trend smanjenja vodozahvatne sposobnosti drenova tokom prvih mesec dana nakon prve i nakon treće regeneracije, kao i vrlo usiljen režim rada bunara nakon druge regeneracije (sa ulaznim brzinama većim i od  $V_{ul}=4,00 \times 10^{-4}$  m/s), sasvim je verovatno da je i druga regeneracija bila podjednako uspešna. U tom slučaju je za prvih mesec dana došlo do smanjenja koeficijenta filtracije sa inicijalne na utvrđene vrednosti:  $K_{pz}^1=2,0 \times 10^{-5}$  m/s,  $K_{pz}^4=1,75 \times 10^{-5}$  m/s,  $K_{pz}^{2\&3}=1,5 \times 10^{-5}$  m/s.

Pre treće regeneracije otpori na drenovima su bili veliki, a razlika u otporima između drenova vrlo izražena. Tako je početkom februara 2015. godine dren ND 1 je imao vrednost koeficijenta filtracije  $K_{pz}^1=2,75 \times 10^{-6}$  m/s, dren ND 4:  $K_{pz}^4=1,25 \times 10^{-6}$  m/s, a drenovi ND 2 i ND 3:  $K_{pz}^{2\&3}=3,5 \times 10^{-7}$  m/s.

Realizacijom treće regeneracije su uspešno uklonjeni produkti hemijskog kolmiranja sa filterske konstrukcije i iz pornog prostora filterskog zasipa, pa je koeficijent filtracije zasipa ponovo uvećan do početne vrednosti. U nastavku eksploatacije, trend intenzivnog starenja bunara, tj, kolmiranja drenova traje do septembra meseca 2015., što još jednom odgovara kapacitetu od oko 25 l/s. Sve do kraja septembra 2018. godine, kolmiranje se nastavlja generalno ujednačenom dinamikom. Na kraju perioda obuhvaćenog hidrodinamičkom analizom, dren broj 1 ima koeficijent filtracije prifilterske zone svega  $K_{pz}^1=1,5 \times 10^{-6}$  m/s, dok drenovi 2, 3 i 4 imaju višestruko niže vrednosti.

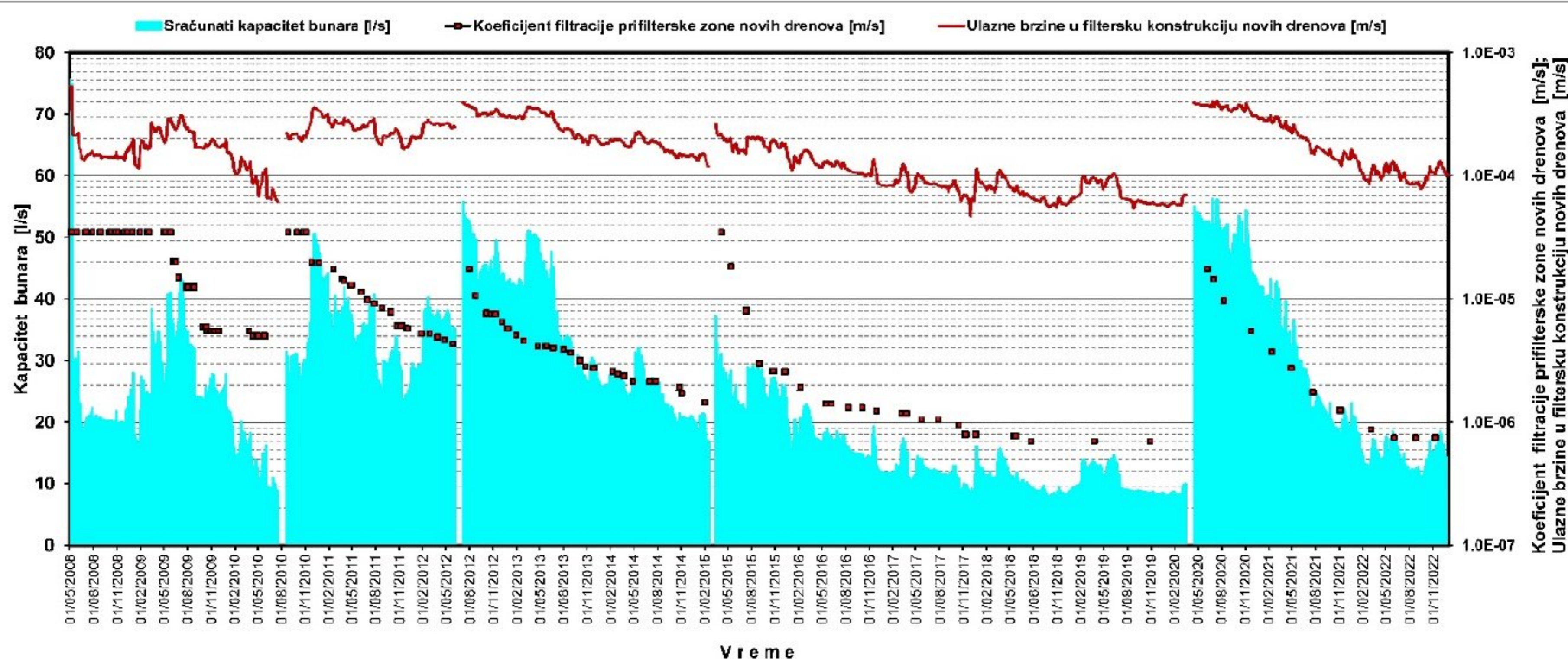
Četvrta regeneracija drenova bunara RB–5m je realizovana tokom marta meseca 2020. godine. Iz razloga epidemiološke situacije koja je u zemlji, kao i celom svetu, nastupila u sredinom meseca, aktivnosti merenja kapaciteta bunara i nivoa podzemnih voda u pijezometrima na prostoru beogradskog izvorišta su privremeno ukinute, što se nepovoljno odrazilo na mogućnosti daljeg detaljnog kvantifikovanja promena hidrauličkih karakteristika novih drenova na formiranom numeričkom modelu. Prvo merenje kapaciteta bunara na izvorištu je izvršeno sredinom leta 2020. godine, prilikom čega je izmeren kapacitet bunara RB–5m od  $Q_b=52,0$  l/s, pri radnom nivou na koti  $H_b=57,05$  mm (generalno uobičajenoj za prethodni višegodišnji period). Ovakav hidraulički režim rada bunara ukazuje da su i prilikom četvrte regeneracije drenova, hidrauličke karakteristike drenova uspešno vraćene na one vrednosti koje su postignute utiskivanjem i razradom drenova. Ovom stanju odgovaraju vrednosti koeficijenta filtracije prifilterskih zona novih drenova:  $K_{pz}^1=2,35 \times 10^{-5}$  m/s,  $K_{pz}^4=2,25 \times 10^{-5}$  m/s,  $K_{pz}^{2\&3}=1,85 \times 10^{-5}$  m/s.

Prvo merenje nivoa podzemnih voda u pijezometrima nakon četvrte regeneracije drenova je izvršeno tek nakon više od godinu dana (krajem maja meseca 2021. godine), do kada je kapacitet bunara značajno opao ( $Q_b=36$  l/s, pri radnom nivou na koti  $H_b=57,25$  mm, izmereno 15. 03. 2021. g.). Sredinom aprila meseca 2022. godine, kapacitet bunara je iznosio  $Q_b=14,3$  l/s i bio je ostvaren u vrlo usiljenom hidrauličkom režimu rada bunara od  $H_b=56,02$  mm (imajući u vidu da između maksimalnog teorijskog sniženja u bunaru i objektivno mogućeg sniženja postoji razlika uslovljena dubinom ugradnje bunarske pumpe, koja je za oko 2 m viša od kote drenova). Do kraja oktobra 2022. godine, kapacitet i radni nivo u bunaru su generalno ostali nepromenjeni.

Na osnovu celog analiziranog perioda eksploatacije bunara RB–5m sa novim drenovima, može se konstatovati da su hidrauličke karakteristike novih drenova ovog bunara, zajedno sa njima uslovljenim režimom eksploatacije bunara takve da se nakon godinu dana od sprovođenja regeneracije drenova efekat primenjenih mera umanja za 50%, dok se na isteku druge godine rada bunara nakon regeneracije, postignuti učinak u potpunosti izgubi.

### 5.6.6 Rezultati analize starenja bunara RB–5m u odnosu na kriterijum biohemijskog kolmiranja

Nakon što je definisana dinamika promena hidrauličkih karakteristika novih drenova na detaljno analiziranom bunaru sa horizontalnim drenovima RB–5m, stekli su se uslovi da se iznesu zaključci o dinamici starenja bunara putem biohemijskog kolmiranja. U ove svrhe je konstruisan odgovarajući dijagram na kojem su predstavljene vrednosti sračunatih kapaciteta bunara, ulaznih brzina podzemnih voda u filtersku konstrukciju drenova (u skladu sa kriterijumom biohemijskog kolmiranja) i vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova dobijene ispitivanjima na numeričkom hidrodinamičkom modelu (date kao prosečne vrednosti za sva četiri drena, *slika 37*).



Slika 37: Promena vrednosti ulaznih brzina podzemnih voda u filtersku konstrukciju novih drenova kao indikator njihovog kolmiranja

Sa dijagrama promena vrednosti ulaznih brzina podzemnih voda u drenove bunara RB–5m se može zaključiti da se ubrzano kolmiranje drenova nije odvijalo samo u početnom periodu rada bunara nakon utiskivanja novih drenova i uključenja u eksploataciju. U tim uslovima, kapacitet bunara je bio nizak  $Q_b = 20$  l/s, a ostvarivan je rasterećenim hidrauličkim režimom rada, tj. visokim radnim nivoom u šahtu bunara. Kako pojedinačni kapaciteti novih drenova nisu bili zadovoljavajući u smislu očekivanja od sprovedenih aktivnosti i uloženi sredstava, nastupilo je intenziviranje hidrauličkog režima eksploatacije bunara. Spuštanjem kote nivoa podzemnih voda u bunaru, privremeno je uvećavan kapacitet drenova, na račun uvećanja ulaznih brzina podzemnih voda u drenove. Sa dijagrama je jasno uočljivo da je pet puta ponovljen postupak snižavanja radnog nivoa iznova inhibirao proces dodatnog biohemijskog kolmiranja, prethodno inicijalno mehanički delimično kolmiranih drenova. Dodatno biohemijsko kolmiranje se odvijalo dominantno putem taloženja dvovalentnog gvožđa iz podzemnih voda unutar pornog prostora prifilterske zone formirane ugradnjom (neadekvatnog) filterskog zasipa drenova, što se može potvrditi snimcima stanja unutrašnjosti filterskih konstrukcija drenova (*slika 30*) prilikom svake od četiri sprovedene regeneracije drenova, na kojima nisu vidljivi produkti kolmiranja unutar drenova.

Jednom iniciran proces ubrzanog kolmiranja, uvećanjem vrednosti maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina sa  $V_{ul}^{max} = 1,25 \times 10^{-4}$  m/s prema kriterijumu, na  $V_{ul} = 4,0 \times 10^{-4}$  m/s ostvarenih u realnoj eksploataciji, neće biti zaustavljen, niti usporen onda kada se ulazne brzine vremenom umanje na kritičnu vrednost, imajući u vidu da do smanjenja vrednosti ulaznih brzina nije došlo rasterećenjem hidrauličkog režima rada bunara (tj. povećanjem nivoa u šahtu i smanjenjem kapaciteta bunara), već napretkom procesa kolmiranja. Kolmiranje drenova je umanjilo efektivnu poroznost prifilterske zone drenova, uvećalo hidrauličke otpore infiltraciji podzemnih voda iz izdani u drenove i u krajnjem oslabilo njihovu vodozahvatnu funkciju.

Rezultati hidrodinamičke analize jasno potvrđuju značaj uvažavanja i granice važenja kriterijuma biohemijskog kolmiranja bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda autora Dimkić & Pušić (2008; 2014). Uvećavanjem kritičnih, tj. maksimalno dozvoljenih vrednosti ulaznih brzina podzemnih voda u drenove za 3,2 puta nakon svake od regeneracija, kriterijum biohemijskog kolmiranja nije bio uvažan, usled čega je, očekivano, nastupalo intenzivno starenje drenova putem dominantno hemijskog kolmiranja. Budući da su definisane hidrauličke karakteristike novih drenova trajnog karaktera, dobijeni rezultati ne ostavljaju prostor optimizmu da su drugačiji i povoljniji ishodi eksploatacije predmetnog bunara mogući, osim u slučaju utiskivanja dodatnih drenova (treće generacije drenova).

Upravljanje radom ovog bunara, ali i svih bunara na izvorištu na kojima je proces starenja u odmakloj fazi je prvenstveno pitanje prioriteta: da li održavati nepovoljan režim rada bunara i veće kapacitete što će obezbeđivati veće zahvatanje pijaće vode za vodosnabdevanje Beograda (i češće pristupati merama regeneracije bunara) ili održavati vodozahvatne objekte u hidraulički optimalnom režimu eksploatacije. U cilju obezbeđenja potrebnog kapaciteta bunara, čest je slučaj da kompanije odgovorne za javno snabdevanje pijaćim vodama pristupaju intenziviranju režima eksploatacije bunara zadavanjem dodatnog sniženja nivoa u bunaru, što dovodi do uvećanja razlike u nivoima podzemnih voda unutar i neposredno izvan drenova, tj. uvećanja hidrauličkih gubitaka na drenovima. Nastojanjem da se održi kapacitet bunara dolazi do toga da se infiltracija podzemnih voda iz vodonosne sredine u prifiltersku zonu drenova ostvaruje dotadašnjim ulaznim brzinama podzemnih voda. Međutim, kretanje podzemnih voda se u novonastalim uslovima odvija kroz prifiltersku zonu drenova čija je propusnost smanjena u odnosu na prethodni period, a otpori kretanju kroz nju postali veći. Rezultati sprovedene analize ukazuju na očigledno – stanje bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda danas ne ostavlja prostor za odlučivanje u korist optimalnih uslova rada vodozahvatnih objekata. Stoga je uspešno utiskivanje novih drenova, prema metodologiji hidrodinamičkog aspekta hidrogeoloških istraživanja predloženoj u predmetnoj disertaciji, pristup naučno utemeljenog rešavanja složenog zadatka održanja beogradskog izvorišta podzemnih voda.

## 5.7 Rezultati ispitivanja geneze uvećanih početnih otpora na drenovima

U slučaju detaljno analiziranog bunara RB–5m, kao i ostalih bunara na kojima su utisnuti novi drenovi između 2005. i 2009. godine, autori Dimkić et al. (2011) su na osnovu praćenja napredovanja procesa starenja tokom prvih godina eksploatacije bunara zaključili da: a) nisu postojali inicijalni otpori na drenovima i b) da je kolmiranje drenova koje se odvijalo tokom analiziranog perioda rada bunara funkcija sadržaja gvožđa i redoks potencijala podzemnih voda. Ovakav zaključak autori zasnivaju na kvantifikovanju veličine otpora na drenovima preko periodično realizovanih testova crpenja bunara. Međutim, analiza rezultata testova crpenja prvog obnovljenog bunara (bunar RB–8), koje su na hidrodinamičkom modelu simulirali Dimkić et al. (2010), ipak ukazuje na postojanje značajnih inicijalnih otpora, kao i na drastičan porast otpora na drenovima ispitivanog bunara za veoma kratko vreme njegove eksploatacije.

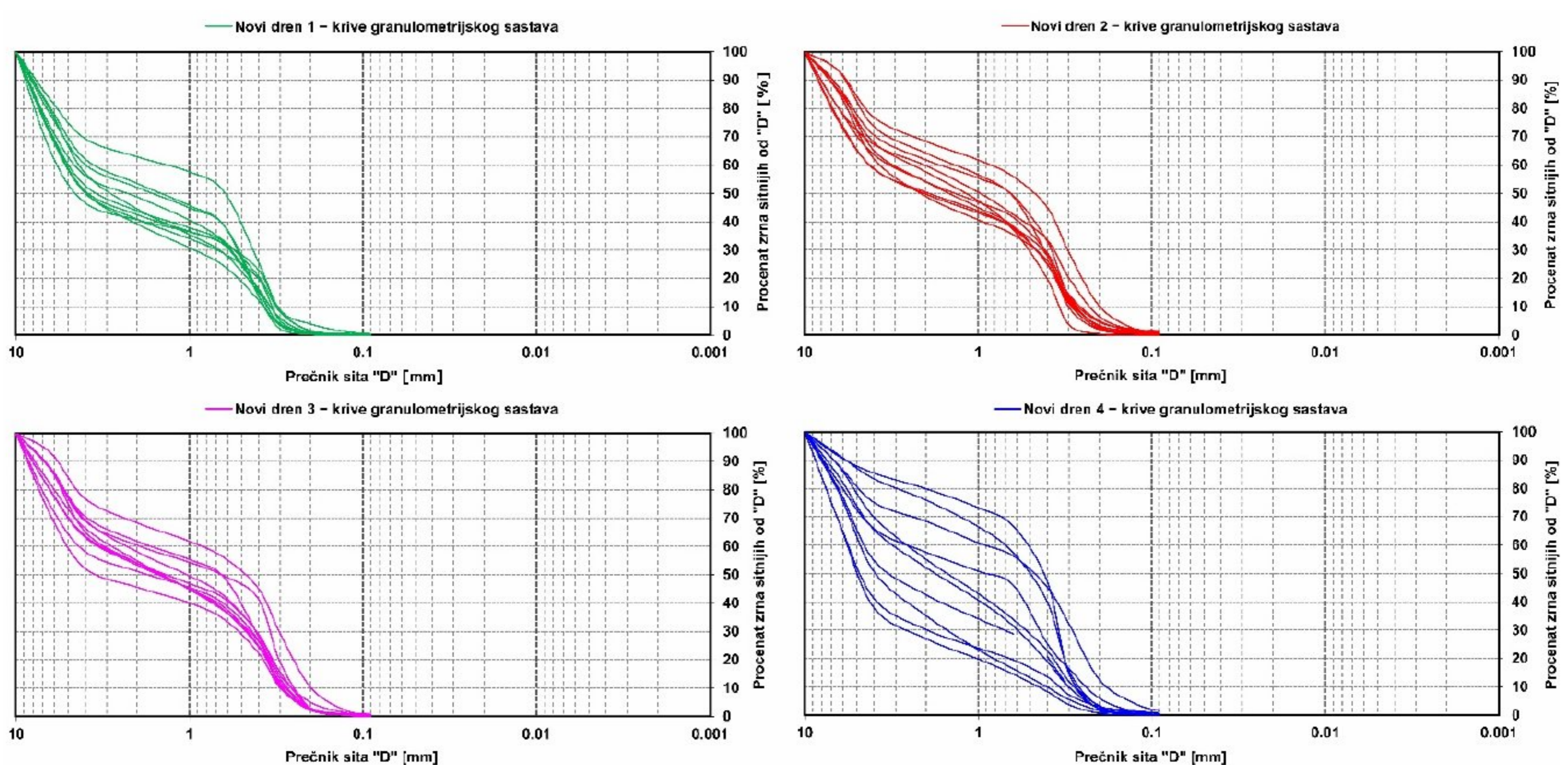
Samo na osnovu rezultata sprovedene hidrodinamičke analize moguće je argumentovano govoriti o genezi početnih otpora. Međutim, identifikacija uzroka početnih otpora na novim drenovima bunara RB–5m u okviru istraživanja koja su predmet ovog poglavlja disertacije je usmerena u pravcu analize drugih relevantnih uticaja – ugrađenog filterskog zasipa i filterske konstrukcije drenova, u skladu sa mogućim uzrocima otpora na bunaru koje razmatraju Barrash et al. (2006). Stoga je u cilju donošenja potpunog i jasnog zaključka o genezi početnih otpora, naredni korak u sprovedenim istraživanjima predstavljala analiza tehničkih karakteristika ugrađenog materijala drenova i stepen njihove usklađenosti sa karakteristikama sedimenata izdani prisutnih na koti i duž trasa drenova.

U skladu sa primenjenom Projsag tehnologijom formiranja novih drenova, prilikom izvođenja radova uzimani su uzorci geološkog materijala na svakih 5 metara utisnutih obložnih kolona. Potom

su vršene analize granulometrijskog sastava (u terenskim uslovima, prosejavanjem na standardnom setu sita). Na osnovu dobijenih rezultata definisane su tehničke karakteristike ugrađenog materijala.

Za potrebe analize tehničkih karakteristika drenova, raspolagalo se podacima o dimenzijama otvora na mostičavoj filterskoj konstrukciji i granulaciji zasipa. Procenat poroznosti filterske konstrukcije nije bio poznat. U cilju upoznavanja granulometrijskog sastava klastičnih sedimenata prisutnih na koti i duž trasa formiranih drenova, konstruisane su krive granulometrijskog sastava. Rezultati su prikazani u vidu dijagrama, pojedinačno za svaki od drenova (slika 38). Kako finozrnu, alevritsku frakciju nije moguće sačuvati uzorkovanjem u šahtu tokom utiskivanja obložnih kolona, reč je o poremećenim uzorcima.

Uvidom u rezultate izrade krivih granulometrijskog sastava sedimenata evidentno je da su u pitanju izraženo heterogeni, peskovito–šljunkoviti sedimenti, sa vrednostima karakterističnog prečnika zrna 50%–og učešća sa krivih granulometrijskog sastava od  $d_{50}=0,4-5,0$  mm, a u proseku  $d_{50}=1,4$  mm. Evidentno je i da su na koti drenova, prisutne brze bočne smene sedimenata.



Slika 38: Dijagrami krivih granulometrijskog sastava uzoraka sedimenata dobijenih prilikom utiskivanja novih drenova (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

U slučaju kada izgradnja bunara uključuje ugradnju filterskog zasipa oko filterske konstrukcije, karakteristike zasipa se određuju na osnovu granulometrijskog sastava sedimenata koji izgrađuju izdan (Blair, 1970; Williams, 1981). Postupak se svodi na definisanje odnosa veličine zrna zasipa i sredine (engl. *pack-aquifer ratio*), pri čemu sedimente izdani predstavlja određeni karakteristični prečnik zrna (u zavisnosti od koeficijenta nejednosrodnosti, najčešće je u pitanju  $d_{50}$ ). Opšteprihvaćeno pravilo je da vrednost koeficijenta odnosa zasipa i zrna sredine treba da bude između 4 i 6 (Saucier, 1974; Houben & Treskatis, 2007).

Imajući u vidu razlike u litološkom/granulometrijskom sastavu sedimenata duž drenova, kao i njihovu izraženu nejednodrodnost, granulacija zasipa duž drenova treba da bude promenljiva, što i jeste slučaj na novim drenovima (tabela 8). Uopšteno, u slučaju deonica drenova kod kojih je  $d_{50} \geq 1,0$  mm (kakvih je oko 72,5% uzoraka), odgovarajući komercijalni zasip bi trebao da ima granulaciju 4–8 mm. U slučaju sitnozrnijih intervala duž utisnutih drenova, adekvatan zasip bi bio 2–4 mm (eventualno 3–5 mm, uz nešto duži postupak razrade). Debljina omotača ugrađenog zasipa odgovara kriterijumima.

Tabela 8: Tehničke karakteristike filterskog zasipa i filterskih konstrukcija drenova (Božović et al., 2020a, izmenjeno)

<i>Filterski zasip</i>				
Granulacija zasipa [mm] u odnosu na [%] dužine filterske konstrukcije	Novi dren 1	Novi dren 2	Novi dren 3	Novi dren 4
1 – 2	0,00%	55,56%	44,44%	11,11%
2 – 3	94,44%	16,67%	55,56%	38,89%
3 – 5	5,56%	27,78%	0,00%	50,00%

<i>Konstrukcija drenova</i>				
Dužina [m] i karakteristike cevi	Novi dren 1	Novi dren 2	Novi dren 3	Novi dren 4
Puna cev	5	5	5	5
Mostić (perforacija): $h=0,8$ mm	0	25	20	5
Mostić: $h=1,5$ mm	42,5	7,5	25	17,5
Mostić: $h=2,5$	2,5	12,5	0	22,5

Dimenzije otvora na filterskoj konstrukciji se određuju tako da odgovaraju veličini zrna 10%–og učešća sa krive filterskog zasipa (Sterrett, 2007). Odgovarajuća dimenzija otvora na konstrukciji novih drenova na bunaru RB–5m bi bila  $h=4$  mm u slučaju krupnozrnijih intervala. U slučaju dominantno peskovitih deonica, visina otvora na filteru treba da iznosi  $h=2$  mm (tj.  $h=3$  mm za nešto krupniji zasip i dužu razradu drenova).

Na osnovu uvida u karakteristike ugrađenog materijala predstavljenih u tabeli 8, evidentno je da one ne odgovaraju kriterijumima definisanja granulacije filterskog zasipa, odnosno veličine otvora na filterskoj konstrukciji. Najsitnija frakcija zasipa, 1–2 mm, je ugrađena duž značajnog dela drenova 2 i 3. U deonicama ovakvog zasipa otvori na filteru imaju dimenzije  $h=0,8$  mm, što je isuviše malo. U proseku, koeficijent odnosa zasipa i sredine ima vrednost manju od 2, što prema Saucier (1974) rezultira smanjenom propusnošću zasipa.

Veći stepen usklađenosti dimenzija zasipa i otvora na filteru sa kriterijumima postoji na drenovima ND 1 i ND 4. U realizovanoj hidrodinamičkoj analizi je utvrđeno da zahvaljujući povoljnijim hidrauličkim karakteristikama drenovi ND 1 i ND 4 zahvatali pojedinačno veću količinu podzemnih voda i imali veće ulazne brzine podzemnih voda u odnosu na drenove ND 2 i ND 3. Suprotno očekivanom, drenovi ND 1 i ND 4 su imali sporiju dinamiku biohemijskog kolmiranja.

## 5.8 Rezultati analize definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima sa aspekta procesa starenja putem kolmiranja

U nastavku će biti prikazani rezultati metodologije definisanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima na primeru svih šest bunara obuhvaćenih formiranim hidrodinamičkim modelom, što je prva faza u postupku simulacije rada grupe hidraulički realno predstavljenih bunara sa horizontalnim drenovima. Postupak definisanja optimalnog kapaciteta bunara je započeo definisanjem vrednosti maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina u dren na osnovu kriterijuma biohemijskog kolmiranja. Imajući u vidu prethodno predstavljene zaključke o značaju i uticaju prifilterske zone drenova na kapacitet i hidraulički režim rada bunara, kao i uticaja prifilterske zone na proces starenja drenova putem njihovog mehaničkog i biohemijskog kolmiranja, u sprovedenim ispitivanjima su pod ulaznim brzinama podrazumevane ulazne brzine podzemnih voda u prifiltersku zonu drena, umesto ulaznih brzina u filtersku konstrukciju drena. Ovaj pristup predstavlja novinu u odnosu na dosadašnja numerička modelska hidrodinamička istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvoristu.

Sa vrednošću maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina na spoljašnjoj konturi prifilterske zone drenova, proisteklih iz kriterijuma biohemijskog kolmiranja i dobijenih na osnovu analize dijagrama predstavljenih na slici 25, postupak se nastavlja definisanjem kapaciteta jednog drena, prema analitičkom izrazu:

$$q_d = \omega_{pz} V_{ul}^{max} \quad [8]$$

$$q_d = (2 r_{pz} \pi L_{fk}) V_{ul}^{max} \quad [9]$$

gde su:

$q_d$  – kapacitet drena (l/s),

$\omega_{pz}$  – površina po spoljašnjoj konturi prifilterske zone drena (m<sup>2</sup>)

$V_{ul}^{max}$  – maksimalno dozvoljena (kritična) ulazna brzina podzemnih voda u prifiltersku zonu drena (m/s), na osnovu kriterijuma biohemijskog kolmiranja

$r_{pz}$  – poluprečnik spoljašnje konture drena (m);  $r_{pz} = r_{fk} + d_{pz}$

$L_{fk}$  – dužina filterske konstrukcije drena (m).

Ulazni podaci za parametre koji učestvuju u jednačini [9] za definisanje početne vrednosti kapaciteta drena u prvom koraku postupka su predstavljeni u tabeli 9. U datoj tabeli su sadržaj dvovalentnog gvožđa u podzemnim voda zahvaćenim bunarima, kao i vrednosti redoks potencijala, predstavljene kao prosečne vrednosti velikog broja podataka koji su bili na raspolaganju.

Tabela 9: Vrednosti ulaznih parametara za proračun kapaciteta drena u slučaju bunara obuhvaćenih hidrodinamičkom analizom, na osnovu kriterijuma biohemijskog kolmiranja

<i>Bunar sa horizontalnim drenovima</i>	<i>Sadržaj gvožđa Fe<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>Redoks potencijal Eh (mV)</i>	<i>Ulazne brzine V<sub>ul</sub><sup>max</sup> (m/s)</i>
RB-5m	2,51	90,70	1,25 x 10 <sup>-4</sup>
RB-4m	1,65	78,58	1,25 x 10 <sup>-4</sup>
RB-6m	1,42	149,56	2,50 x 10 <sup>-4</sup>
RB-45	2,37	122,70	1,50 x 10 <sup>-4</sup>
RB-46	1,58	112,42	1,50 x 10 <sup>-4</sup>
RB-47	1,62	117,70	1,75 x 10 <sup>-4</sup>

Primenom kriterijuma biohemijskog kolmiranja, dobijene su vrednosti maksimalno dozvoljenih ulaznih brzina podzemnih voda u prifiltersku zonu drenova. Dobijene vrednosti su niske, što je slučaj sa gotovo svim bunarima sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu (i što indikativno ukazuje na hidrohemijske uslove izdani) i, ujedno, variraju u uskom dijapazonu. Nakon što su definisane vrednosti svih parametara relevantnih za proračun kapaciteta jednog drena (za šest bunara), sproveden je proračun početnog kapaciteta drena i bunara prema jednačini 9. Rezultati su predstavljeni u tabeli 10.

Tabela 10: Vrednosti kapaciteta jednog drena i kapaciteta bunara dobijene primenom kriterijuma biohemijskog kolmiranja

<i>Bunar sa horizontalnim drenovima</i>	<i>Kapacitet drena q<sub>d</sub> (l/s)</i>	<i>Kapacitet bunara Q<sub>b</sub> (l/s)</i>
RB-5m	9,817	58,90
RB-4m	9,817	58,90
RB-6m	19,634	117,81
RB-45	11,781	70,68
RB-46	11,781	70,68
RB-47	13,744	82,46



## 5.9 Rezultati hidrodinamičke analize rada grupe hidraulički realno simuliranih bunara sa horizontalnim drenovima u cilju definisanja optimalnih kapaciteta bunara

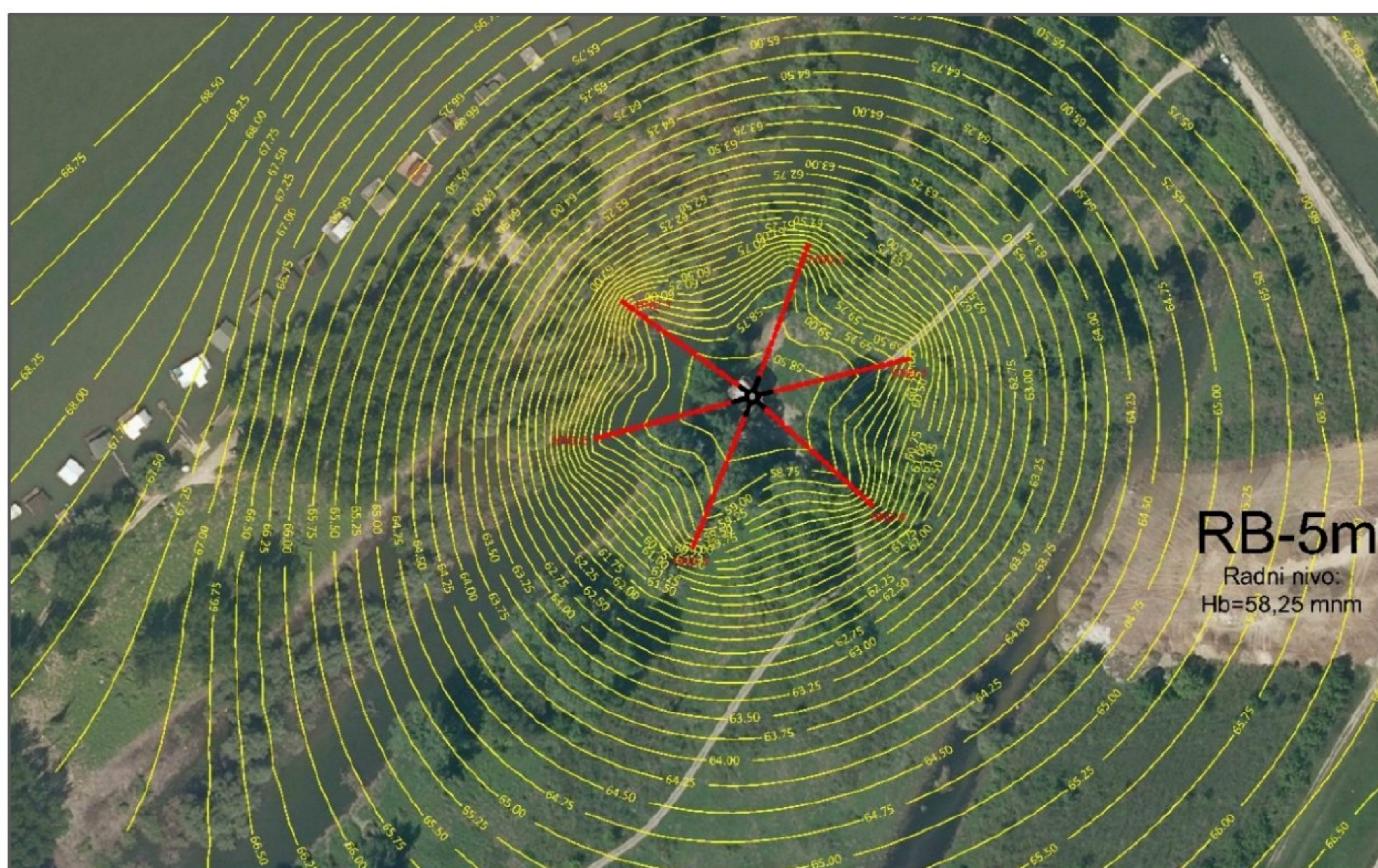
U nastavku hidrodinamičke analize izvršeno je modelsko ispitivanje uticaja rada bunara sa drenovima čiji je jedinični kapacitet definisan u prethodnom koraku, sprovođenjem analitičkih proračuna. Numerički proračuni na hidrodinamičkom modelu su znatno složeniji postupak, budući da se njihovom realizacijom vrši analiza svih onih uslova zadatah na modelu koji mogu uticati na režim i efekte rada vodozahvatnog objekta. Eventualni uticaji mogu biti prirodni (uticaj filtracionih karakteristika vodonosnih sedimenata, prisustva slabije propusnih međuslojeva, kvalitet hidrauličkog kontakta rečnog korita i izdani, dubine usecanja korita i dr.), kao i veštački, tj. antropogeni (tehničke karakteristike novih drenova, početna hidraulička funkcionalnost novih drenova, prostorna orijentacija drenova, međusobni uticaj drenova na jednom bunaru i dr.). Iz ovog razloga je važno pažljivo realizovati prognozne proračune, kako bi se vrednosti jediničnih kapaciteta drenova iz prvog koraka hidrodinamičke analize korigovale i prilagodile stvarnim uslovima terena, odnosno utvrđenoj količini raspoloživog resursa podzemnih voda na lokaciji svakog analiziranog bunara, što će za rezultat imati takve kapacitete drenova, odnosno sumarni kapacitet bunara, koji će biti ostvareni optimalnim hidrauličkim uslovima režima rada bunara.

Rezultat revitalizacije bunara utiskivanjem novih drenova treba da obezbedi ne samo zadovoljavajuće povećanje kapaciteta bunara u odnosu na vrednost pre utiskivanja ( $\Delta Q$ ), već da taj kapacitet bude ostvaren u optimalnim hidrauličkim uslovima režima rada vodozahvatnog objekta, što će voditi postizanju i druge komponente koja sanaciju bunara tek čini potpunom: **stabilnosti kapaciteta bunara tokom vremena eksploatacije**. Podrazumeva se da nije u pitanju višedecenijska stabilnost kapaciteta, već stabilnost u smislu procesa starenja prisutnog na bunarima sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu. U tom smislu, imajući u vidu i dosadašnje rezultate utiskivanja novih drenova sprovedenih na 13 bunara, pozitivnim rezultatom bi se mogao smatrati period duži od 7 godina rada bunara do ispunjenja hidrauličkih uslova za izvođenje prve regeneracije novih drenova (Đurković et al, 2019).

Budući da su broj, prostorni raspored, tehničke i hidrauličke karakteristike hipotetičkih novih drenova prethodno usvojene kao međusobno jednake i zajedničke za sve analizirane bunare, to je zadatak prognoznih proračuna na hidrodinamičkom modelu da pruže ocenu valjanosti definisanja početnog kapaciteta bunara na osnovu kriterijuma ulaznih brzina podzemnih voda, a u odnosu na potencijal hidrogeološke sredine za zahvatanjem određene količine podzemnih voda.

Tako su realizacijom brojnih iterativnih proračuna na hidrodinamičkom modelu (sa usklađivanjem kota radnog nivoa i, posledično, kapaciteta bunara) u slučaju bunara sa horizontalnim drenovima RB-5m i RB-46, koji su locirani tako da se nalaze jedan naspram drugog, tj. na levoj i desnoj obali reke, dobijeni su sasvim različiti i međusobno suprotstavljeni rezultati, koji su ujedno indikativni za veći broj bunara na beogradskom izvorištu. Naime, u slučaju bunara sa horizontalnim drenovima RB-5m, dobijeno je da se kapacitet proistekao primenom kriterijuma biohemijskog kolmiranja drenova od  $Q_b=58,90$  l/s može ostvariti u analiziranim uslovima ako se nivo podzemnih voda u šahtu bunara održava na koti  $H_b=58,25$  mm.

Budući da su drenovi zadati na koti 50,60 mm, u cilju zahvatanja date količine podzemnih voda, nivo podzemnih voda u bunarskom šahtu biće na visini od 7,65 m iznad kote drenova, što predstavlja hidraulički režim rada bunara na granici usiljenog (sa 60% ostvarenog maksimalno mogućeg teorijskog sniženja u bunaru). U datim uslovima, nivo podzemnih voda u reprezentativnom piježometru RB-5m/P-1 bi se nalazio na koti 59,35 mm. Ovaj podatak govori da su otpori filtraciji podzemnih voda kroz vodonosnu sredinu značajni, imajući u vidu da u prifilterskoj zoni, na filterskoj konstrukciji i u njenoj unutrašnjosti nisu zadati takvi hidraulički otpori koji bi dodatno opterećivali hidraulički režim rada ovog bunara. Prikaz piježometarskih nivoa u zoni bunara RB-5m je predstavljen na slici 39.



Slika 39: Prognozni raspored ekvipotencijalnih linija u zoni bunara RB–5m

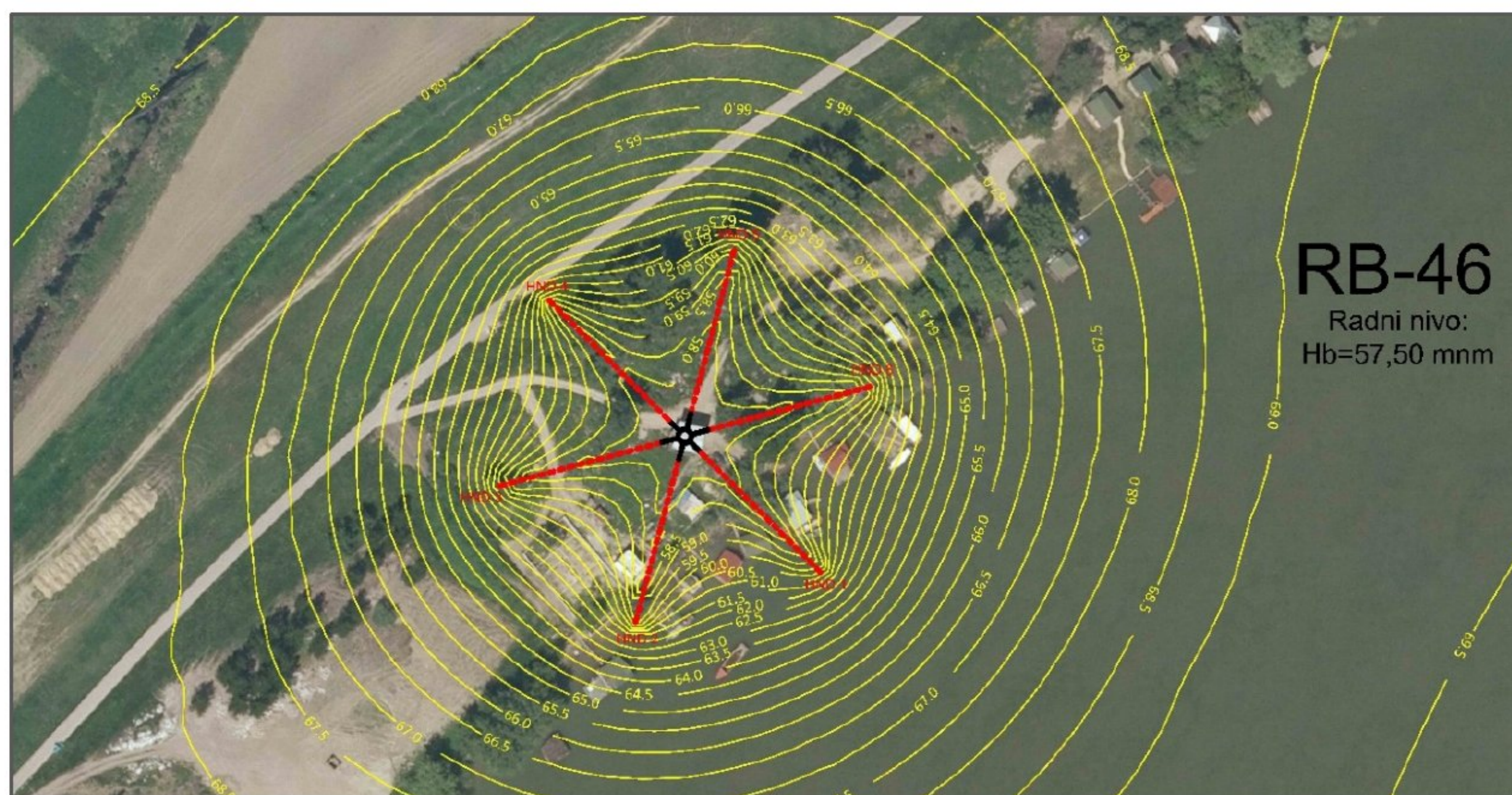
Najniži izmereni nivo u piježometru RB–5m/P–1 (na dan 31. 07. 2012. godine) je bio 59,68 mm, pri zahvatanju podzemnih voda u visini od  $Q_b=52,56$  l/s neposredno nakon izvršene regeneracije (6 l/s manjim kapacitetom u odnosu na analizirani), ali pri nivou u bunarskom šahtu na koti  $H_b=55,40$  mm. Podatak da je gotovo ista količina podzemnih voda zahvatana u realnim uslovima eksploatacije bunarom RB–5m pri 3,5 metra nižem nivou podzemnih voda u šahtu bunara, jasno ukazuje na činjenično stanje u pogledu kvaliteta radova na izvođenju i razradi drenova koji su svojevremeno rezultirali nepovoljnim hidrauličkim karakteristikama drenova. Istovremeno, ova činjenica ide u prilog reprezentativnosti rezultata dobijenih hidrodinamičkom analizom uslova nastanka i dinamike napretka procesa starenja drenova predmetnog bunara.

Potrebno je istaći i da je ispitivanje prognoznih uslova na hidrodinamičkom modelu u slučaju bunara RB–5m ukazalo da bi se utiskivanjem 6 novih drenova, umesto stvarno utisnuta 4 nova drena, pri istom kapacitetu, postigao određeni pozitivan efekat u vidu rasterećenja hidrauličkog režima rada bunara, tj. manjeg sniženja nivoa u šahtu.

U slučaju bunara sa horizontalnim drenovima RB–46, hipotetički drenovi su zadati (a realni drenovi utisnuti) nešto pliće, na koti 52,40 mm. Proračun kapaciteta bunara definisanog na osnovu kriterijuma biohemijskog kolmiranja drenova je u zadatim uslovima pokazao da očekivani kapacitet od  $Q_b=70,68$  l/s, odnosno kapacitet pojedinačnog drena od  $q_d=11,78$  l/s nije moguće dostići. Naime, maksimalno ostvariv kapacitet od  $Q_b=52,08$  l/s je na modelu dobijen pri nivou u šahtu bunara na koti  $H_b=57,50$  mm, što je nivo za 5,1 m viši od kote drenova bunara.

Proračuni sa većim zadatim kapacitetima (a i dalje manjim od  $Q_b=70,68$  l/s) su vodili izrazito usiljenom i hidraulički nepovoljnom režimu rada bunara, sa radnim nivoom u ispitivanim uslovima oko kote  $H_b=56,00$  mm, tj. svega 3,6 m iznad drenova. Zahvaljujući tome što su drenovi na modelu zadati sa jednakim hidrauličkim karakteristikama, ostvaren je značajan benefit u odnosu na realno stanje drenova koje su na numeričkom modelu simulirali Božović et al. (2015). Naime, u realnim uslovima jedan dren je bio dominantan u odnosu na ostale otvorene i aktivne drenove na bunaru RB–46 zbog čega je on bunaru obezbeđivao gotovo ceo kapacitet. U ispitivanim uslovima, kapacitet bunara je ravnomerno raspoređen po drenovima, što je rezultiralo strujnom slikom tipičnom za zonu uticaja bunara sa horizontalnim drenovima (slika 40). Stoga je i opravdano

očekivati da u sva tri piježometra u zoni bunara, koji imaju kratke filterske delove postavljene na dubini drenova, budu mereni generalno isti piježometarski nivoi izdani.



Slika 40: Prognozni raspored ekvipotencijalnih linija u zoni bunara RB-46

U slučaju ostalih bunara obuhvaćenih modelom prognoznih uslova, dobijeno je su kapaciteti definisani u prvom koraku analize (tj. na osnovu kriterijuma kolmiranja) mogući, tj. ostvarivi, ali se u slučaju tri bunara na levoj obali i bunara RB-4m na desnoj obali nalaze na samoj granici usiljenog režima eksploatacije bunara. Budući da održavanje režima rada bunara na granici uslova početka intenzivnog kolmiranja ne može dugo trajati do početka intenziviranja procesa, to se na ovom mestu takav režim ne može preporučiti. Iz tog razloga se preporučuje da u ovakvim, graničnim uslovima, maksimalno dozvoljene ulazne brzine podzemnih voda u drenove (tačnije u prifiltersku zonu drenova) proistekle iz razmatranog kriterijuma biohemijskog kolmiranja budu dodatno umanjene.

Za davanje utemeljenog predloga za koliko je ulazne brzine potrebno umanjiti kako bi i dalje bio uvažen kriterijum koji obezbeđuje uslove rada bunara sa aspekta usporenog kolmiranja potrebno je pristupiti dodatnim hidrodinamičkim istraživanjima. Kako takva istraživanja nisu predviđena izradom predmetne disertacije, ***moguće je dati samo određenu preporuku da se ulazne brzine, odnosno sračunati početni kapaciteti drenova, umanje za 20% u odnosu na inicijalno definisane vrednosti.*** Kao određeni argument u prilog datoj preporuci, može stajati i sama definicija ulaznih brzina od strane autora kriterijuma biohemijskog kolmiranja (Dimkić & Pušić, 2008; 2014), koji ulazne brzine posmatraju i definišu kao kritične, maksimalno dozvoljene ulazne brzine, zbog čega je i racionalno ne usvajati ih kao one sa kojima treba ulaziti u realnu eksploataciju bunara.

U slučaju bunara RB-6m, kojim je među svim analiziranim bunarima moguće zahvatiti najveću količinu podzemnih voda, utvrđeno je da bi optimalni hidraulički uslovi eksploatacije bili oni koji bi podrazumevali rad bunara sa osam, umesto ispitivanih šest drenova. Jasno je da bi utiskivanje dva dodatna drena zahtevalo značajno uvećanje investicije u sanaciju ovog bunara. Rezultati sprovedenih ispitivanja, međutim, potvrđuju ispravnost takve odluke. Imajući u vidu jedinični proticaj drena (tačnije, doticaj u dren) od  $q_d=19,63$  l/s definisan samo na osnovu uvažavanja kriterijuma biohemijskog kolmiranja za prisutne uslove kvaliteta podzemnih voda, realizacijom drugog koraka u predloženoj metodologiji određivanja optimalnog kapaciteta bunara, dobijeno je da bi se zamenom drenova na bunaru RB-6m mogao očekivati znatno skromniji, ali za uslove izvorišta i dalje natprosečan kapacitet oko  $Q=74,61$  l/s, kao tehno-ekonomski i hidraulički opravdan u pogledu ostvarenog povećanja kapaciteta i visine nivoa podzemnih voda u šahtu bunara.

U svim ostalim slučajevima, broj i dužine drenova su adekvatne, a određeni doprinos optimalnom režimu rada bunara i zahvatanja podzemnih voda bi bio postignut ispitivanjem drugačijeg međusobnog rasporeda drenova, naročito u slučaju bunara RB-47 i RB-4m.

Hidrodinamički prognozni proračuni su pokazali da bi u slučaju izvođenja utiskivanja i razrade drenova koji bi rezultirali hidrauličkim karakteristikama bliskim pretpostavljenim (a koji su dostižni, imajući u vidu dosadašnja iskustva i efekte obnavljanja bunara; Đurković et al., 2019), nivo podzemnih voda u eksploatacionim uslovima u užoj zoni analiziranih bunara bio na značajnoj dubini u odnosu na neporemećene uslove nivoa izdani, odnosno na relativno maloj visini u odnosu na utisnute drenove. Ova činjenica jasno ukazuje na ograničen potencijal vodonosne sredine u smislu raspoloživih količina podzemnih voda u slučaju najvećeg broja bunara na izvorištu, što zahteva dužnu pažnju istraživača prilikom projektovanja radova na revitalizaciji objekata.

Imajući u vidu rezultate proračuna, prema kojima se može očekivati da će početni kapaciteti analiziranih bunara u dijapazonu generalno od  $Q=45$  l/s do  $Q=75$  l/s u pretpostavljenim uslovima biti ostvareni održavanjem radnih nivoa u vodosabirnim šahtovima na oko 8,0 m iznad lepeze drenova, može se konstatovati da će *bunari raditi u hidraulički optimalnim uslovima*. Pri navedenim početnim kapacitetima bunara *neće doći do narušavanja kriterijuma biohemijskog kolmiranja novih drenova*. U realnim uslovima, biće potrebno da se efekti radova na utiskivanju i razradi drenova na bilo kom bunaru na izvorištu kvantifikuju prema pristupu koji koriste Polomčić et al. (2016) analitičkim putem ili eventualno preciznije definišu simulacijom višednevnog opita crpenja na formiranom hidrodinamičkom modelu. Tek na osnovu utvrđenih realnih vrednosti hidrauličkih karakteristika novih drenova, prema jednom ili drugom pristupu, steći će se uslovi za davanje preporuke početnog kapaciteta i radnog nivoa bunara, čije će uvažavanje u smislu upravljanja režimom rada bunara garantovati višegodišnji period rada bunara do dolaska u režim kada je potrebno sprovesti prvu regeneraciju novih drenova.

### ***Komentar primenjenih mera i hidrauličkih efekata revitalizacije dva analizirana bunara***

Na ovom mestu, na kraju predmetnih hidrodinamičkih istraživanja optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda, potrebno je obrazložiti hidraulički aspekt starenja drenova do kojeg dolazi uprkos aktivnosti koja se na bunarima sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta primenjuje već gotovo jednu deceniju. U tom periodu je u okviru regeneracije 22 bunara izvršena ugradnja plastičnih, PVC filterskih cevi prečnika  $\varnothing 140$ mm unutar postojećih čeličnih drenova unutrašnjeg prečnika  $\varnothing 200$  mm. Među ovim bunarima, *mere revitalizacije su primenjene i na dva bunara koji su obuhvaćeni predmetnim hidrodinamičkim modelom*. U pitanju su bunar RB-4m (na kojem je ugradnja plastičnih cevi unutar starih drenova izvršena tokom jeseni 2017. godine) i bunar RB-6m (na kojem su cevi ugrađene u jesen 2021. godine). Dužine ugrađenih PVC filterskih cevi su promenljive u slučaju svakog drena na svim bunarima na izvorištu na kojima je primenjena ugradnja filterskih cevi manjeg prečnika, što je prvenstveno zavisilo od njihovog konstruktivnog stanja. Po pravilu, perforirane cevi manjeg prečnika su ugrađivane sve do mesta preloma konstrukcije starog drena.

Upravo je konstruktivno stanje starih drenova argument u prilog primene tehničkog rešenja ugradnje plastičnih filterskih cevi. U slučaju kada su drenovi u lošem konstruktivnom stanju, očekuje se da će ugradnja filterskih cevi manjeg prečnika održati bunar u eksploataciji sve do trenutka kada se budu stekli prvenstveno materijalni uslovi da se na bunaru izvrši utiskivanje novih drenova od nerđajućeg čelika. Rezultati primene mera u pogledu ostvarenog povećanja kapaciteta bunara, režima rada i stabilnosti kapaciteta variraju u širokom dijapazonu, suštinski, od vrlo pozitivnih do sasvim ograničenih. Na ovom mestu je potrebno izvršiti adekvatno hidrauličko razmatranje opravdanosti primene ugradnje plastičnih cevi, očekivanja od njihovih efekata i dati objašnjenje određenoj, vrlo interesantnoj ispoljenoj pojavi konstatovanoj jedinstvenim terenskim

eksperimentom u dosadašnjim hidrogeološkim istraživanjima bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu.

Za analizu su uzeta tri bunara. Bunari RB-4m i RB-6m obuhvaćeni razmatranim modelom, koji su okolni bunari detaljno analiziranom bunaru RB-5m, kao i bunar RB-28 lociran na Novom Beogradu. Nakon ugradnje plastičnih filterskih cevi unutar starih drenova bunara RB-4m, uz istovremeno sprovedenu regeneraciju, kapacitet bunara je uvećan na  $Q_b=63$  l/s. Uoči sprovođenja mera kapacitet bunara je bio mali, oko 7 l/s (a poslednja regeneracija uoči ugradnje plastičnih cevi je na njemu realizovana 2007. godine). Stabilnost kapaciteta bunara je bila zadovoljavajuća, tako da je bunarom početkom 2019. godine zahvatano  $Q_b=36,9$  l/s (25. 03. 2019. godine), da bi krajem oktobra 2019. godine kapacitet iznosio  $Q_b=21$  l/s. Smanjenje kapaciteta se očekivano nastavilo, tako da je pri poslednjem merenju krajem oktobra 2022. godine utvrđen kapacitet od  $Q_b=12$  l/s. Slično stanje je i sa bunarom RB-6m, na kojem je tri godine uoči ugradnje PVC filterskih cevi urađena regeneracija drenova (početkom jeseni 2018. godine). Kao rezultat regeneracije, kapacitet bunara je uvećan na  $Q_b=62,8$  l/s, da bi postepeno opadao sve do  $Q_b=19,6$  l/s u periodu oktobar–novembar 2021. godine, kada se pristupilo ugradnji plastičnih cevi i ponovnoj regeneraciji. Kao i u slučaju regeneracije iz 2018. godine, kapacitet je ponovo uvećan na  $Q_b=63$  l/s.

Razmatrajući samo aspekt uvećanja kapaciteta bunara i privremenog doprinosa stabilnosti vodosnabdevanja grada, primenjene mere su svakako opravdale svoju svrhu. Međutim, kako se ova analiza vrši sa naučnog, hidrauličkog aspekta, potrebno je temeljno sagledati ostvarene efekte, analizom hidrauličkih stanja koja su do tih efekata i dovela. Naime, ni u slučaju dva detaljnije predstavljena bunara na Makišu, kao ni u slučaju većine navedenim merama obuhvaćenih bunara sa horizontalnim drenovima, nije došlo do relaksiranja hidrauličkog režima rada. Drugim rečima, nivoi podzemnih voda u šahtovima bunara su ostali generalno nepromenjeni, dakle, isti onakvi kakvi su bili dugi niz godina pre ugradnje plastičnih filterskih cevi. U slučaju da je na većini merama ugradnje filterskih cevi manjeg prečnika izvršeno rasterećenje hidrauličkog režima eksploatacije bunara, ne bi mogli biti ostvareni kapaciteti koji jesu ostvareni.

Značajan uticaj na ostvarene rezultate ima i to što se prilikom intervencija na bunarima ponovo otvaraju i u funkciju vraćaju oni drenovi koji su do tog trenutka bili zatvoreni ili blindirani. Naime, stanje sa zahvatanjem podzemnih voda na izvorištu se tokom poslednje dve decenije značajno promenilo, tako da su se promenili i kriterijumi valjanosti stanja drenova. Oni drenovi koji su tokom 1990-ih i početkom 2000-ih godina isključivani iz eksploatacije kao degradirani i nefunkcionalni, danas se vraćaju u eksploataciju, prilikom čega se unutar njih ugrađuju plastične filterske cevi. Ponovno aktivirani drenovi su po pravilu u boljem konstruktivnom i funkcionalnom stanju od drenova koji su u međuvremenu kontinualno bili u eksploataciji. Iz ovog razloga je opravdano postaviti pitanje da li se ostvareni efekti uvećanja kapaciteta trebaju pripisati dominantno starim drenovima ili plastičnim filterskim cevima ugrađenim unutar njih. Odgovor na pitanje je jasan kada se razmotre zakonitosti teorije hidraulike bunara sa horizontalnim drenovima detaljno predstavljene u predmetnoj disertaciji.

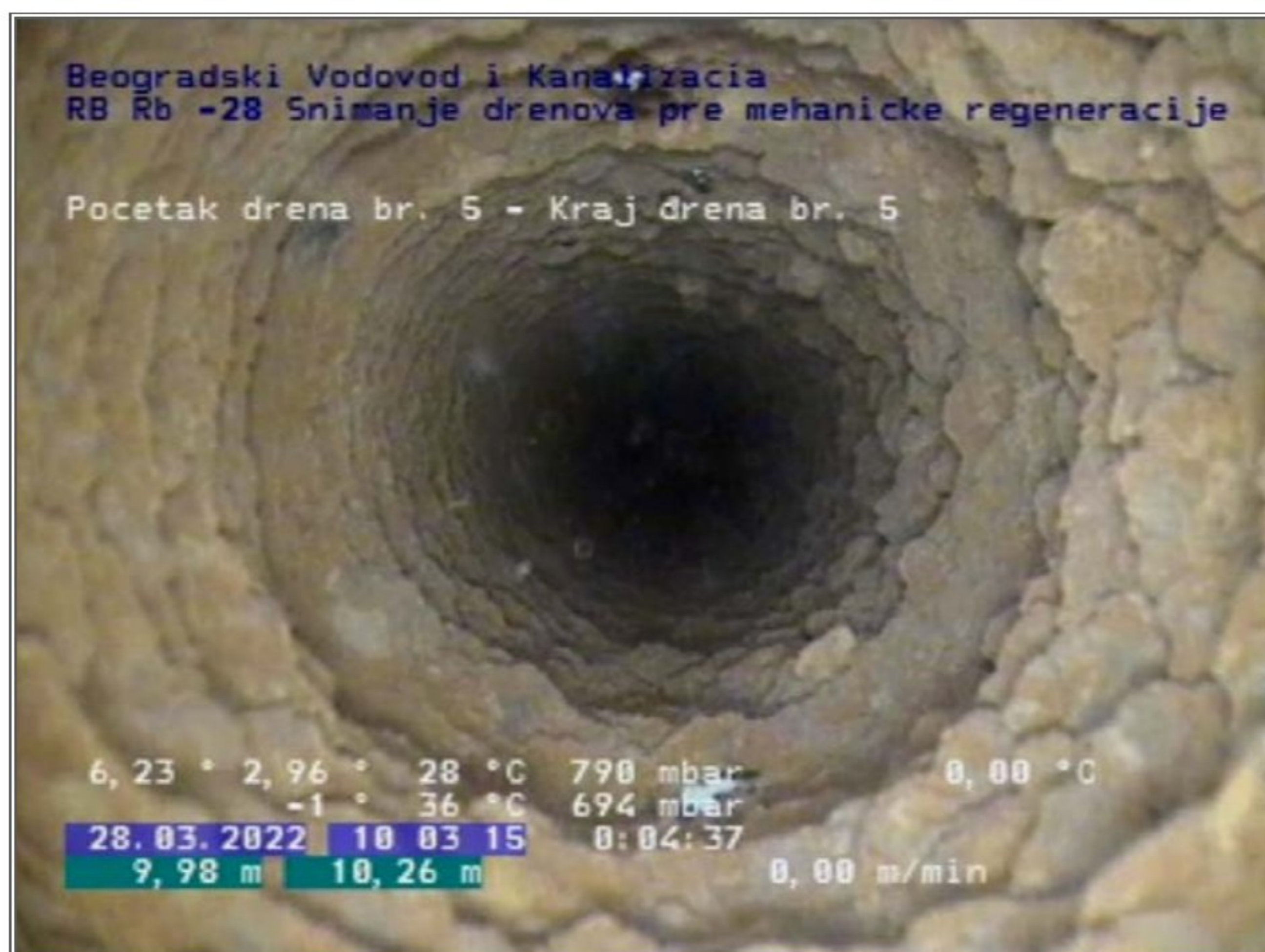
Naime, vodozahvatnu funkciju vrši onaj dren čija je prifilterska zona u neposrednom fizičkom i hidrauličkom kontaktu sa sedimentima vodonosne sredine. Izvan spoljašnje konture prifilterske zone, tj. u izdani, vladaju hidrodinamički uslovi koje predstavlja piježometarski nivo podzemnih voda neposredno uz dren. Unutar drena egzistira piježometarski nivo koji je načelno jednak nivou u bunarskom šahtu (ako se zanemare minimalni unutrašnji hidraulički otpori, kvantifikovani kao takvi u prethodnom delu disertacije). Do kretanja i zahvatanja podzemnih voda dolazi na račun razlike između dve sredine koje su u neposrednom fizičkom i hidrauličkom kontaktu. Koliki će biti intenzitet razmene voda, tj. kapacitet drenova i bunara, zavisi od propusnosti prifilterske zone drenova, tj. od njenih hidrogeoloških (filtracionih) karakteristika i debljine. Zbog toga, kada se unutar drena ugrade filterske cevi manjeg prečnika (ili čak i cevi manjeg prečnika unutar već

ugrađenih plastičnih cevi), onaj deo bunara sa horizontalnim drenovima koji vrši vodozahvatnu funkciju je uvek onaj koji je u hidrauličkom kontaktu sa vodonosnom sredinom.

Kao potvrda iznetog stava služi činjenica da u unutrašnjosti plastičnih filterskih cevi manjeg prečnika od drenova (ma koliko puta da se ugrade jedne unutar drugih) vladaju isti hidraulički uslovi: **pijezometarski nivo ekvivalentan nivou u vodosabirnom bunarskom šahtu**. Stoga, budući da nema razlike u energetske stanjima podzemnih voda unutar čeličnog drena i unutar plastičnih cevi (nema razlike u pijezometarskim nivoima), nema ni uslova za kretanje i zahvatanje podzemnih voda plastičnim filterskim cevima ugrađenim u unutrašnjosti originalnih, čeličnih drenova.

Onog trenutka kada stari dren bude toliko degradiran procesom korozije filterske konstrukcije da dođe do njegovog konstruktivnog preloma, usled čega će sedimenti izdani doći u neposredan fizički i hidraulički kontakt sa plastičnim filterskim cevima u unutrašnjosti drena, od tog trenutka se o plastičnim cevima ugrađenim unutar drenova može govoriti kao o vodozahvatnim objektima podzemnih voda. Dakle, hidraulička uloga primenjenog rešenja ugradnje filterskih cevi unutar starih drenova je još uvek upitna, dok je konstruktivna nesumnjiva.

Kao ilustracija procesa, u nastavku se daju fotografije izgleda plastičnih filterskih cevi koje su u sprovedenom namenskom eksperimentu izvađene iz drena broj 5 bunara RB-28, prilikom regeneracije bunara tokom proleća 2022. godine (pet godina nakon ugradnje plastičnih filterskih cevi u ovom bunaru, *slika 41*).



Slika 41: Detalj snimaka podvodnom kamerom unutrašnjosti PVC filterskih cevi ugrađenih u drenu broj 5 bunara RB-28 (ugrađenih pet godina pre snimanja izvršenog uoči regeneracije tokom marta i aprila 2022.)





Slika 42: Izgled izvađene PVC filterske cevi; detalj a) i b): debljina kolmiranog sloja u unutrašnjosti cevi; detalj c), d) i e): krupne perforacije na filterskoj cevi intenzivno zapunjene produktima kolmiranja gvoždem

Na datim ilustracijama su predstavljeni efekti pojave koja od samog početka multidisciplinarnih istraživanja procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima predstavlja pitanje koje je privlačilo pažnju istraživača izvorišta podzemnih voda Beograda. Naime, već je prvim istražnim radovima na bunarima realizovanim 2005. i 2006. godine primećeno da se na mnogim bunarima stanja drenova međusobno značajno razlikuju. Odgovor na otvoreno pitanje uzroka ovakvog stanja se neuspešno pokušavao pronaći u razlikama u hidrohemijskom i mikrobiološkom sastavu podzemnih voda zahvaćenim pojedinim drenovima, a potom i u litološkim, granulometrijskim i geohemijskim specifičnostima sedimenata vodonosne sredine prisutne na koti i duž trasa pojedinih drenova, uvažavajući značajne razlike u litološkom sastavu sedimenata koje su markantna odlika izdani beogradskog izvorišta.

Važno je istaći jedno od osnovnih ograničenja hidrogeoloških istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima, a to je nedostupnost drenova kao samog predmeta istraživanja. Raspoloživi istražni radovi su oduvek bili oni kojima se utvrđuje posledica, a ne neposredni uzrok hidrauličkog stanja vodozahvatnog objekta. Tako su mereni kapacitet i radni nivo bunara, vršena snimanja unutrašnjosti konstrukcije drenova podvodnom kamerom, izrađivani pijeometri i mereni nivoi izdani u njima, uzimani uzorci podzemnih voda za hidrohemijske analize, uzimani uzorci taloga na početku drena za geohemijske, mineraloške i mikrobiološke analize (Majkić–Dursun et al., 2013; 2015; Zarić, 2019), rađeni testovi crpenja i simulacije na modelima. Međutim, sve do realizacije predmetnog eksperimenta i vađenja filterskih cevi, nikada pre nije ostvaren neposredan uvid u uzroke hidrauličkog stanja drenova do kojeg je došlo procesom starenja, tj. biohemijskog kolmiranja.

Na ovom mestu će se izneti teorija o hidrauličkim i hidrodinamičkim uzrocima predmetne pojave. Teorija je zasnovana na činjenici koja je konstatovana podvodnim snimkom stanja drenova bunara RB–28 uoči regeneracije početkom 2022. godine, da su vizuelne razlike između stanja konstrukcije PVC filterskih cevi izrazito velike. Dok je dren broj 5 u potpunosti kolmiran, sa čvrstim slojem produkata taloženja gvožđa na filterskoj konstrukciji debljine 2 cm, ugrađene plastične cevi unutar ostalih 10 starih drenova su u stanju u kakvom su bile na dan ugradnje početkom 2017. godine (slika 43). Tom prilikom je zaključeno da su vizuelne razlike zapravo pokazatelj funkcionalnih razlika koje postoje između drenova, tj. razlika u hidrauličkoj, vodozahvatnoj funkcionalnosti.





Slika 43: Izgled stanja PVC cevi u drenu 1 i drenu 8 (napomena: oba drena su u potpunosti suva pri slobodnom isticanju u bunarski šaht)

Objasnjeno pojavu da drenovi na jednom broju bunara sa horizontalnim drenovima na beogradskom izvorištu podzemnih voda kolmiraju različitom dinamikom je zasnovano na značajnim razlikama u vrednostima hidrauličkih karakteristika drenova (koeficijenta propusnosti drenova i veličine hidrauličkih otpora na drenovima), koje su pokazatelj vodozahvatnih sposobnosti drenova. Da drenovi na nekim bunarima mogu imati različite kapacitete je predstavljeno u okviru disertacije na primeru merenja kapaciteta novih drenova detaljno analiziranog bunara RB-5m, kao i ranijim detaljnim hidrodinamičkim modelskim istraživanjima (na primeru bunara RB-46, Božović et al., 2015, kao i obnovljenog bunara RB-8m, Božović/BVK, 2016e).

Na osnovu hipoteze o razlikama u vrednostima hidrauličkih karakteristika čeličnih starih drenova (koji su vodozahvatni objekti predmetnog bunara), zasnovan je stav da ukupan kapacitet bunara RB-28 gotovo u potpunosti obezbeđuje dren broj 5. U tom slučaju, vrednosti koeficijenta propusnosti drena su visoke, dok se iz razloga održavanog hidrauličkog režima rada bunara ovaj dren nalazi u izrazito usiljenim hidrauličkim uslovima eksploatacije podzemnih voda. U takvim uslovima, drenom su nakon regeneracije sa početka 2017. i 2022. godine zahvatane podzemne vode u količini od oko  $q_d=50$  l/s, što je daleko izvan okvira kriterijuma dozvoljenih ulaznih brzina u drenove sa aspekta dinamike procesa biohemijskog kolmiranja.

Predstojeća detaljna hidrogeološka istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima RB-28 u okviru namenskog naučno-istraživačkog projekta, koja će se sastojati u: izradi reprezentativnih osmatračkih objekata u zoni bunara i kontinualnom merenju nivoa izdani u njima, merenju pojedinačnih kapaciteta drenova bunara hidrometrijskim krilima postavljenim na ulasku u svaki dren i detaljnom numeričkom hidrodinamičkom modeliranju prema metodologiji predloženoj u predmetnoj disertaciji, treba da omoguće davanje odgovora o utemeljenosti predstavljene hidrauličke teorije izrazito neujednačene dinamike kolmiranja drenova na ovom i drugim bunarima sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda.

## 5.10 Rezultati hidrodinamičke analize uticaja propusnosti prifilterske zone drenova na kapacitet i hidraulički režim rada bunara

Ispitivanje hidrauličkog uticaja debljine i filtracionih karakteristika prifilterske zone drenova na kapacitet i režim rada bunara je realizovano zadavanjem širokog dijapazona vrednosti kako za ispitivani parametar debljine prifilterske zone, tako i za vrednosti koeficijenta filtracije geološkog materijala od kojeg je izgrađena. Ispitivanja su vršena tako što je na modelu vršeno postupno zadavanje jedne od odabranih vrednosti debljine prifilterske zone oko drenova bunara RB-5m (ukupno 10 analiziranih debljina, od 1,0 mm do 200,0 mm), i sa tom vrednošću su vršeni proračuni za svaku od 29 ispitivanih vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone. Nakon sprovedenih

kratkim nestacionarnih proračuna i očitavanja podataka za ostvareno zahvatanje podzemnih voda (kapacitet bunara) za jednu vrednost debljine prifilterske zone, vršeno je zadavanje sledeće diskretne vrednosti nakon čega su proračuni i očitavanja podataka ponavljani.

Prethodnom analizom rezultata proračuna u postojećim, tj. ostvarenim uslovima eksploatacije podzemnih voda, utvrđeno je da se najniži nivoi podzemnih voda u užoj zoni bunara sa horizontalnim drenovima RB–5m ostvaruju neposredno uz dren ND 3. Nakon nekoliko prvih sprovedenih proračuna numeričkog eksperimenta izvršena je provera dobijenih rezultata u pogledu vrednosti pijeziometarskih nivoa u izdani neposredno uz drenove (kojima su u prognoznim proračunima zadate identične hidrauličke karakteristike), kada je potvrđeno da i u ovom slučaju uz dren ND 3 egzistiraju najniži nivoi podzemnih voda. Iz ovog razloga su rezultati modelskih ispitivanja za nivo izdani neposredno uz drenove i veličine hidrauličkog otpora na drenovima analiziranog bunara prikazani za dren ND 3.

U skladu sa opštim teorijskim slučajem, nivoi podzemnih voda opadaju duž drena, krećući se od vrha drena prema bunarskom šahtu, tako da su u konkretnom analiziranom slučaju najniži nivoi vezani za početak filterske konstrukcije drena ND 3, neposredno uz pune cevi. Međutim, uočeno je da nivoi nastavljaju da opadaju i dalje niz neperforirane cevi, što zahteva adekvatno objašnjenje. U cilju temeljnog razumevanja hidrauličkog principa rada bunara sa horizontalnim drenovima, važno je istaći da, u opštem slučaju, nivoi podzemnih voda opadaju (minimalno, ali ipak merljivo) i dalje niz pune cevi (kojima se ne vrši zahvatanje podzemnih voda), sve do bunarskog šahta. Razlog ove pojave leži u postojanju rezidualnog otpora na filtraciju podzemnih voda kroz poroznu sredinu prifilterske zone, koji nastaje na račun uticaja zahvatanja podzemnih voda drugim aktivnim drenovima na bunaru. U skladu sa tim, zaključeno je da na pad nivoa izdani duž punih cevi drena ND 3 utiče zahvatanje podzemnih voda ostalim drenovima bunara RB–5m.

Detaljnou analizom i ispitivanjem uže zone bunara RB–5m na hidrodinamičkom modelu je identifikovan i uzrok zbog kojeg uz ovaj dren egzistiraju najniži nivoi izdani, a ne uz, na primer, susedni dren ND 2 (razlika u nivoima je objektivno mala, centimetarskog reda veličine). Utvrđeno je da dren ND 3 ima nešto manju dužinu trase ispod rukavca u odnosu na dren ND 2 u uslovima niskih vodostaja (u kojima je izvršeno ispitivanje), a prethodno je istaknuto koliko značajnu ulogu u prihranjivanju izdani ima rukavac u zoni četiri bunara koji su izgrađeni duž njegove desne obale.

Iako su u prognoznim proračunima sva četiri drena na analiziranom bunaru imala iste hidrauličke karakteristike, ispitivanjem hidrodinamičkog modela uočeno je da drenovi ND 1 i ND 4 imaju nešto više nivoe podzemnih voda na konturama prifilterskih zona. I u ovom slučaju se težilo utvrđivanju uzroka uočene pojave. Zaključeno je da je razlog taj što na spoljašnjim stranama ovih drenova nema uticaja eksploatacije od strane drugih drenova, tj. zbog toga što se kod njih kao spoljašnjih drenova ovaj uticaj ostvaruje samo sa jedne, unutrašnje strane, dok se u slučaju drenova ND 2 i ND 3 uticaj ostvaruje i sa spoljašnje i sa unutrašnje strane.

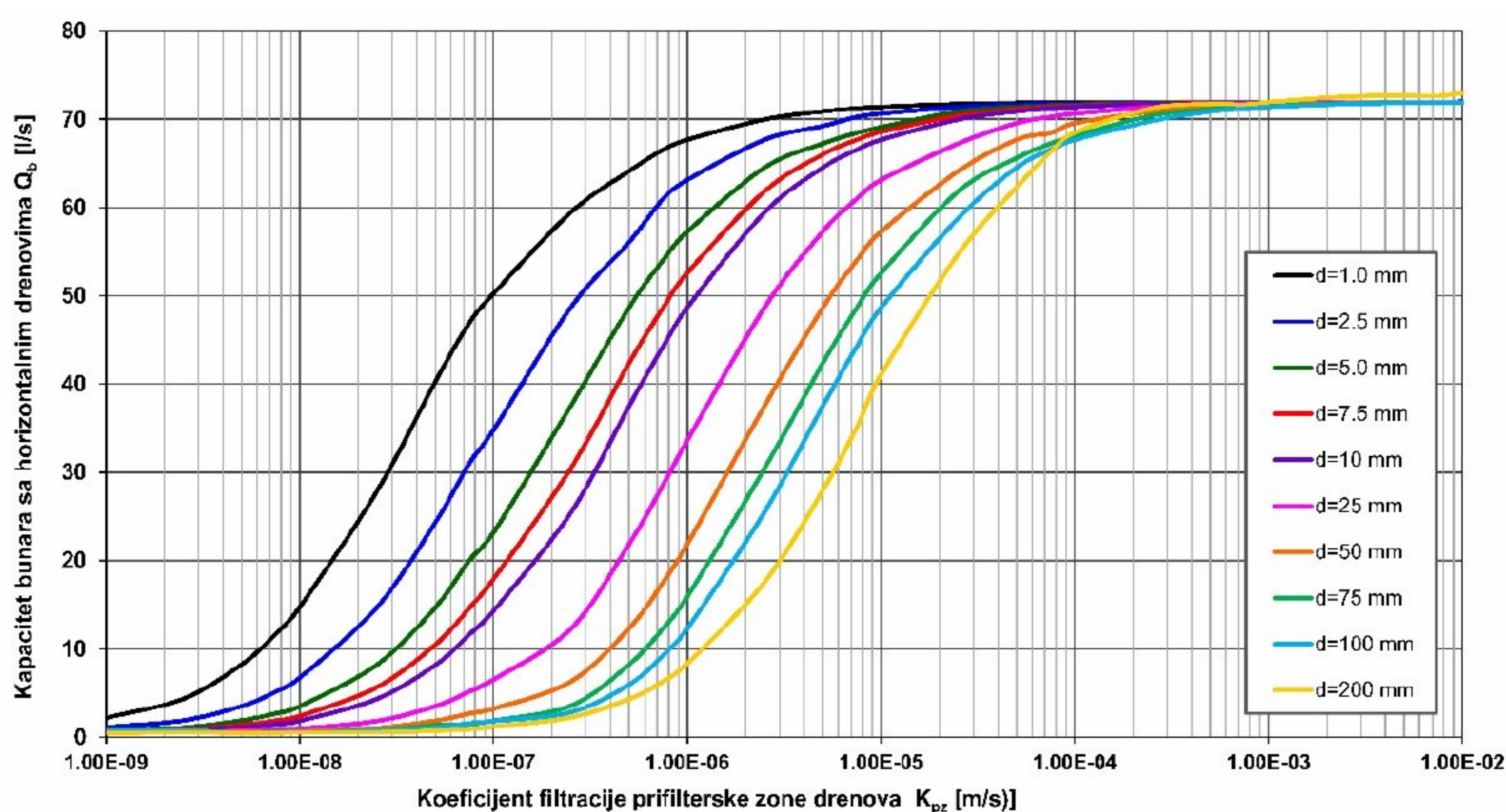
Izvršeno je ukupno 290 kratkih nestacionarnih proračuna, koji predstavljaju zasebne hidrodinamičke modele, da bi za svaki od njih bilo izvršeno očitavanje vrednosti nivoa podzemnih voda u jednoj istoj tački. U pitanju je tačka na spoljašnjoj konturi prifilterske zone, koja predstavlja kontakt perforiranih (filterskih) i neperforiranih (punih) cevi drena ND 3, na unutrašnjoj strani ovog drena, tj. prema drenu ND 2. Istovremeno, očitavani su rezultati za kapacitet bunara u svim ispitivanim varijantama. Kako bi se izbeglo unošenje greške subjektivnog karaktera u rezultate proračunatih vrednosti kapaciteta bunara, digitalizacijom prostora u planu u užoj zoni bunara kreiran je jedan poligon unutar kojeg je vršeno očitavanje dobijenih vrednosti (kroz opciju „*Mass balance polygon*“ u programu Groundwater Vistas).

Rezultati ispitivanja uticaja propusnosti i debljine prifilterske zone na kapacitet bunara ( $Q_b$ ) su predstavljeni grafički, u vidu semilogritamskog dijagrama zavisnosti kapaciteta bunara RB–5m od vrednosti filtracionih karakteristika prifilterske zone ( $K_{pz}$ ), za svaku od 10 analiziranih varijanti

njene debljine (slika 44). Zatim, rezultati ispitivanog uticaja propusnosti prifilterske zone na režim rada bunara su prikazani u vidu dijagrama zavisnosti nivoa podzemnih voda neposredno uz dren ND3 ( $H_{iz}$ ) od vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone (slika 45). Kako vrednosti nivoa izdani dobijene proračunima na modelu važe samo za slučaj bunara RB–5m, konstruisan je dijagram promene veličine hidrauličkih otpora na drenovima ( $\Delta H_d$ ) u zavisnosti od vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone ( $K_{pz}$ ), slika 46. Na ovaj način je sprovedenoj hidrodinamičkoj analizi dat opšti značaj, budući da se veličina otpora na drenovima može uporediti sa rezultatima do kojih su došli autori Park & Zhan (2002) analizirajući uticaj prifilterske zone na efikasnost rada horizontalnih bunara analitičkim metodama, kao i sa rezultatima do kojih je autor Houben (2015a) došao analizirajući uticaj hidrauličkih otpora na vertikalnim bunarima.

Predstavljeni rezultati ukazuju na presudan i podjednak značaj obe komponente propusnosti prifilterske zone drenova – debljine i filtracionih karakteristika, na kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima. U uslovima kada prifilterska zona ima veoma niske vrednosti koeficijenta filtracije, manje od  $K_{pz}=1,0 \times 10^{-8}$  m/s, bunar će iole ostvarivati zahvatanje podzemnih voda i imati kapacitet manji od 15 l/s samo u slučaju najtanje prifilterske zone, debljine od  $d_{pz}=1,0$  mm do maksimalno  $d_{pz}=2,5$  mm (slika 44). Kako se ovako tanka prifilterska zona drenova može vezati za početnu fazu procesa hemijskog kolmiranja drenova, odnosno za proces mikrobiološkog kolmiranja koji je već određeno vreme prisutan na bunaru, njen uticaj ne opterećuje rad bunara u značajnoj meri u hidrauličkom smislu. Tako će prifilterska zona debljine  $d_{pz}=2,5$  mm, a koeficijenta filtracije  $K_{pz}=5,0 \times 10^{-7}$  m/s u prvom slučaju i  $K_{pz}=1,0 \times 10^{-5}$  m/s u drugom, usloviti kapacitet bunara od  $Q_b=56,07$  l/s i  $Q_b=70,66$  l/s, respektivno, za šta se može reći da je značajna količina podzemnih voda u razmatranim uslovima: skromnih hidrogeoloških odlika izdani u zoni bunara, niskog nivoa u šahtu i povoljnog prihranjivanja na račun relativno visokog nivoa vodostaja reke Save i rukavca Adica u analiziranom periodu (jul mesec 2012. godine).

Za iste ispitivane uslove filtracionih karakteristika ( $K_{pz}=5,0 \times 10^{-7}$  m/s i  $K_{pz}=1,0 \times 10^{-5}$  m/s), a ovog puta za veću debljinu prifilterske zone od  $d_{pz}=10$  mm i  $d_{pz}=100$  mm, bunarom će se zahvatati podzemne vode u količini od  $Q_b=37,52$  l/s i  $Q_b=67,68$  l/s (za  $d_{pz}=10$  mm), odnosno svega  $Q_b=5,96$  l/s i  $Q_b=48,66$  l/s (za  $d_{pz}=100$  mm). Na ovom primeru se jasnije vidi značajan uticaj debljine prifilterske zone, odnosno zakonitost da sa povećanjem debljine prifilterske zone dolazi do značajnog ograničenja zahvatanja podzemnih voda, usled porasta hidrauličkih otpora kroz poroznu sredinu slabijih filtracionalnih karakteristika.

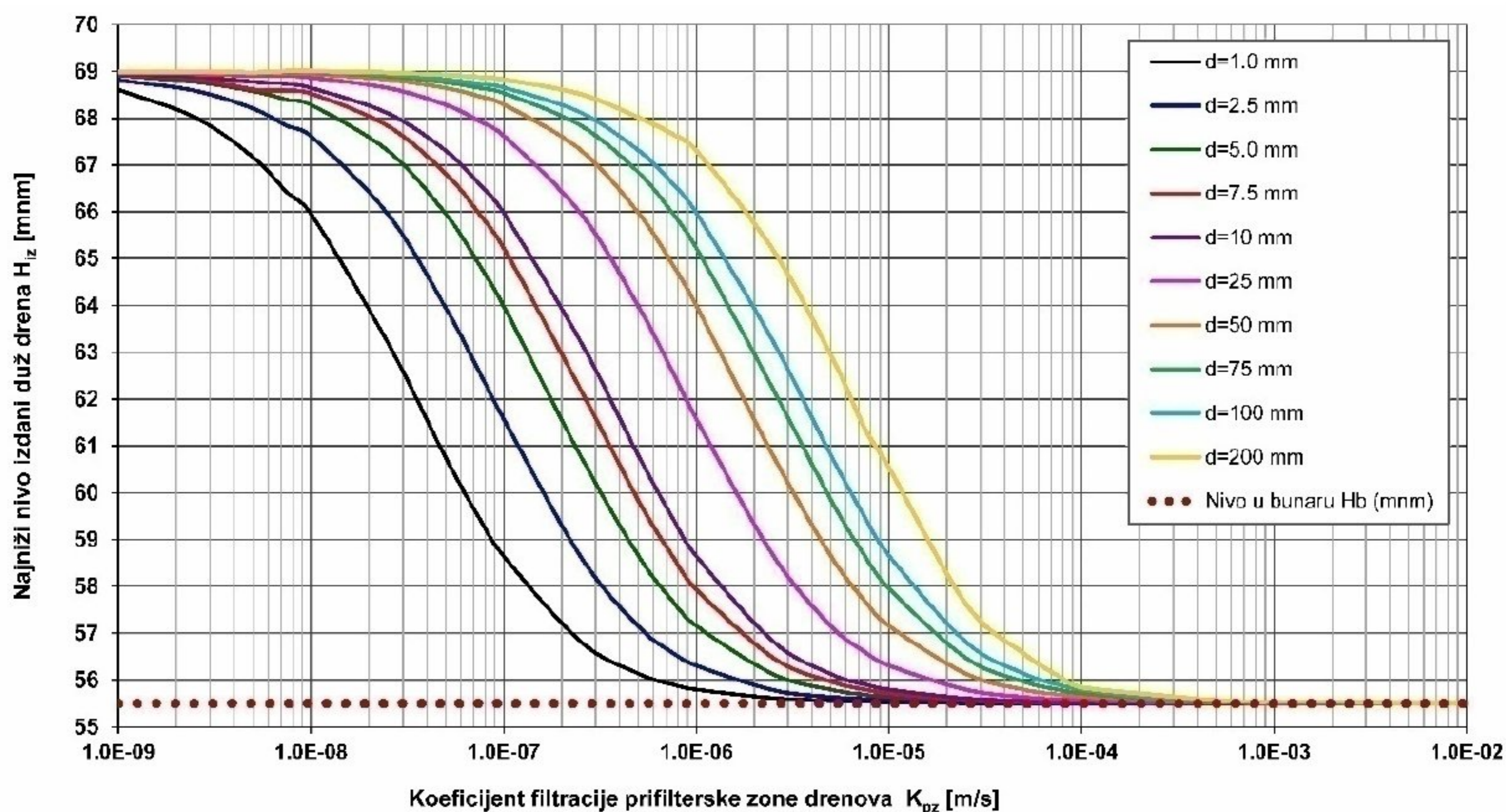


Slika 44: Promena kapaciteta bunara RB–5m u zavisnosti od vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova, za analizirane vrednosti debljine prifilterske zone

Uopšteno se može reći da uticaj filtracionih karakteristika prestaje da bude značajan pri vrednostima koeficijenta filtracije većim od  $K_{pz}=1,0 \times 10^{-4}$  m/s, bez obzira na debljinu prifilterske zone. Pri ovoj vrednosti koeficijenta filtracije, razlike u količini zahvaćenih podzemnih voda između najmanje i najveće ispitivane vrednosti debljine prifilterske zone su oko 4,5 l/s, što za ostvarene kapacitete bunara od  $Q_b=71,40$  l/s (za  $d_{pz}=1,0$  mm) i  $Q_b=67,18$  l/s (za  $d_{pz}=200$  mm) ne predstavlja značajnu razliku, ni u smislu hidrauličke efikasnosti rada vodozahvatnog objekta, ni u pogledu zahvaćenih količina podzemnih voda sa aspekta vodosnabdevanja.

Režim eksploatacije podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima podrazumeva takve hidrauličke uslove rada vodozahvatnog objekta pri kojima održavanje određenog nivoa podzemnih voda u bunarskom šahtu u datom trenutku rezultira zahvatanjem određene količine podzemnih voda. Svakako, zahvaćena količina podzemnih voda je rezultat hidrogeoloških odlika i uslova prihranjivanja izdani sa jedne i funkcionalnog stanja drenova sa druge strane.

Razmatrajući rezultate ispitivanja uticaja hidrauličkih karakteristika drenova na režim rada bunara (slika 45), moguće je zaključiti da je u slučaju nepovoljnijih hidrauličkih karakteristika drenova, za zahvatanje potrebne, očekivane količine podzemnih voda, potrebno održavati veće sniženje nivoa u šahtu, na račun dodatnih, nelinearnih laminarnih gubitaka koji nastaju u prifilterskoj zoni drenova. Veći hidraulički otpori na drenovima, izazvani nedovoljno visokim vrednostima koeficijenta propusnosti drenova, dovode do povećanja sniženja nivoa u bunarskom šahtu i, samim tim, do intenziviranja režima rada vodozahvatnog objekta, što pogoduje napretku procesa intenzivnog opadanja kapaciteta. Dakle, za jednu te istu količinu zahvaćenih podzemnih voda, nivo u izdani će neće promeniti, tj. ostaće konstantan, dok će se uvećati sniženje nivoa u bunaru, što govori da će hidraulički režim rada bunara biti sve više usiljen tokom vremena eksploatacije.



Slika 45: Uticaj koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova bunara RB-5m na režim rada bunara i režim nivoa izdani, za analizirane vrednosti debljine prifilterske zone

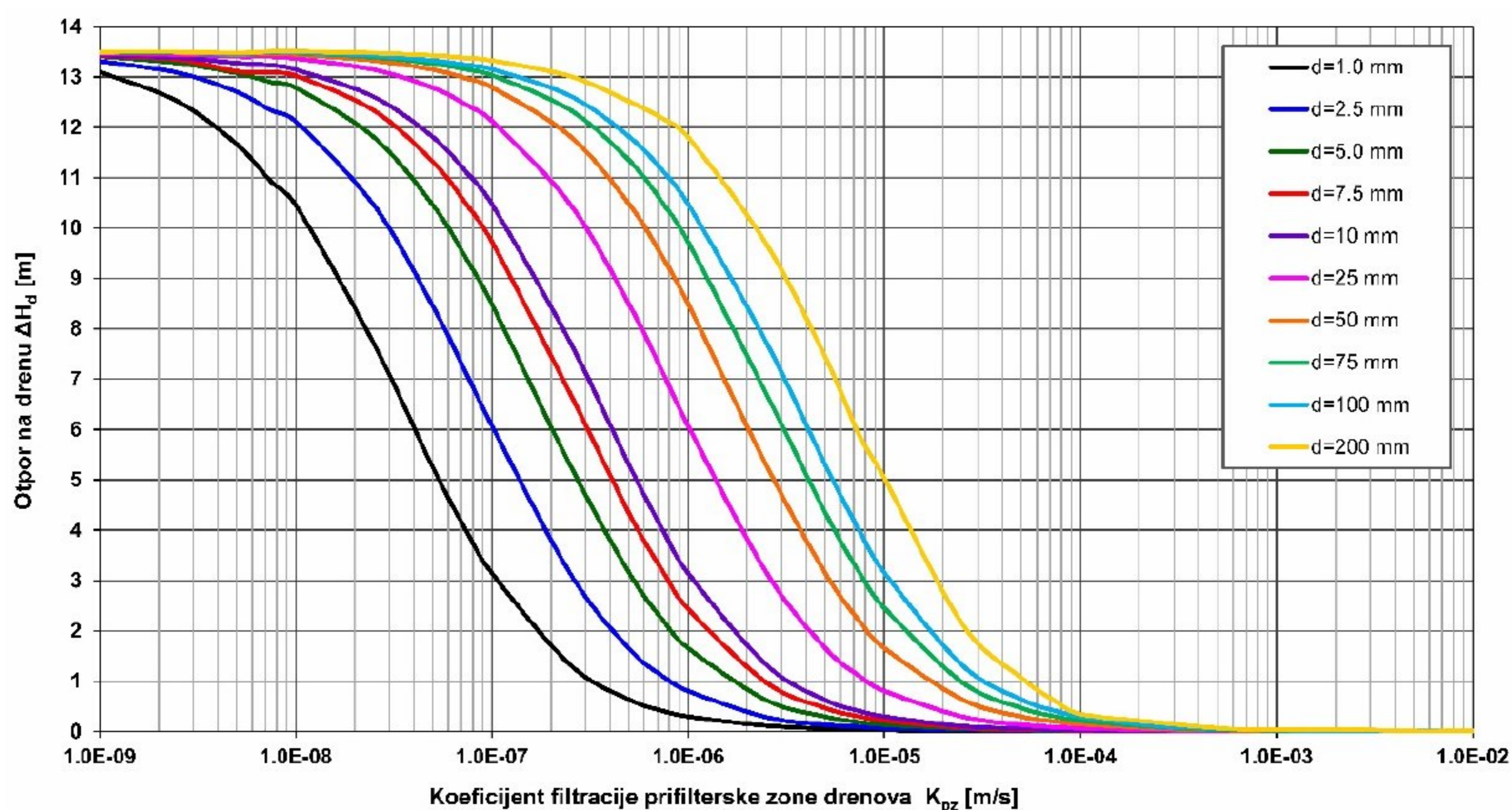
Rezultati ispitivanja na hidrodinamičkom modelu su pokazali da za najniže i najviše ispitivane vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova, debljina prifilterske zone suštinski nema značaja. Tako je za vrednost  $K_{pz}=1 \times 10^{-4}$  m/s dobijeno da se nivo podzemnih voda u izdani neposredno uz novi dren ND 3 nalazi na koti  $H_{iz}=55,50$  mm ili nešto iznad nje (suštinski, bez otpora na drenovima), što je vrednost koja odgovara nivou podzemnih voda koji je egzistirao u realnim uslovima u šahtu bunara u vremenskom periodu simuliranom na modelu i koji je zadat kao unutrašnji granični uslov. Pri vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone manjim za jedan red veličine ( $K_{pz}=1 \times 10^{-5}$  m/s), razlika u nivoima podzemnih voda u izdani neposredno uz drenove za

različite debljine prifilterske zone postaje evidentnija. Tako se za debljinu zone od  $d_{pz}=1,0$  mm nivo izdani nalazi na koti pjezometarskog nivoa u bunaru, dok se za debljinu zone od  $d_{pz}=200$  mm, nivo u izdani nalazi na koti  $H_{iz}=60,50$  mm, što ukazuje na prisustvo hidrauličkog gubitka veličine oko  $\Delta H_d=5,0$  m. Hidraulički otpor ove veličine uslovljava to da će se pri debljini zone od  $d_{pz}=200$  mm zahvatati oko  $Q_b=40$  l/s, dok će kapacitet bunara u slučaju zone debljine  $d_{pz}=1,0$  mm biti  $Q_b=72$  l/s.

Kao zaključak uticaja propusnosti drenova na hidraulički režim rada bunara može se konstatovati da u svakom konkretnom slučaju naspram određenih hidrauličkih karakteristika drenova stoje odgovarajući hidraulički gubici na drenovima. Dodatni otpori na drenovima doprinose ukupnom sniženju nivoa u šahtu bunara, za koje je rečeno da se u praksi uobičajeno naziva „radnim nivoom bunara“, a koji je u predmetnoj disertaciji definisan kao drugi značajan hidraulički faktor uticaja na kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima (uz hidrauličke karakteristike drenova). Iako je sniženje nivoa podzemnih voda u vodosabirnom bunarskom šahtu hidraulički tip uticaja na kapacitet bunara i element režima koji ukazuje u kakvim se hidrauličkim uslovima eksploatacije nalazi jedan bunar, on kao takav ipak ne govori ništa o razlozima prisutnog stanja. Hidrauličke karakteristike drenova, sa druge strane, ukazuju na i uzročno–posledično su povezane sa hidrauličkim gubicima na drenovima, koji utiču na veličinu sniženja u bunaru.

U uslovima teorijski savršenog hidrauličkog kontakta drenova sa geološkom poroznom sredinom, gradijent pjezometarskog nivoa u prifilterskoj zoni neće biti manifestovan. U realnim uslovima, pri prelasku podzemnih voda iz vodonosne sredine u drenove uvek su prisutni određeni, manji ili veći, hidraulički gubici, zbog čega se veličina gubitaka na drenovima može posmatrati kao pokazatelj srazmerne veličine uzročnih otpora.

Budući da se rezultati ispitivanja prikazani na *slici 45* odnose samo na analizirani bunar, kao i da se sračunate vrednosti nivoa izdani uz konturu prifilterske zone drenova mogu dovesti u vezu sa hidrauličkim otporima, tj. gubicima na drenovima, dodavanjem kote radnog nivoa u bunarskom šahtu, u cilju preglednosti dobijenih rezultata i analize uticaja ispitivanih parametara na veličinu otpora u prifilterskoj zoni, konstruisan je zaseban dijagram na kojem su prikazani hidraulički otpori na drenovima u funkciji filtracionih karakteristika prifilterske zone, i ovog puta za svaku od 10 usvojenih vrednosti njene debljine (*slika 46*).



Slika 46: Veličina hidrauličkih otpora na drenovima bunara RB–5m u zavisnosti od vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova, za analizirane vrednosti debljine prifilterske zone

Analizom rezultata proračuna na modelu predstavljenih na *slici 46*, može se uočiti da su, još jednom, pri vrednostima koeficijenta filtracije prifilterske zone većim od  $K_{pz} > 1 \times 10^{-4}$  m/s

hidraulički gubici manji do  $\Delta H_d=0,35$  m u slučaju svih analiziranih varijanti debljine prifilterske zone, odnosno manji od  $\Delta H_d=0,15$  m pri debljini zone manje od  $d_{pz}=50$  mm.

Hidraulički gubitak na drenu od svega jednog metra ( $\Delta H_d=1,0$  m) nastaje tek pri vrednosti koeficijenta filtracije  $K_{pz}=3 \times 10^{-7}$  m/s kod zone debljine  $d_{pz}=1,0$  mm, ali i pri solidnoj vrednosti koeficijenta filtracije od  $K_{pz}=5 \times 10^{-5}$  m/s u slučaju prifilterske zone debljine  $d_{pz}=200$  mm. Za istu vrednost koeficijenta filtracije od, na primer,  $K_{pz}=1 \times 10^{-6}$  m/s, koja se može usvojiti kao reprezentativna za proces kolmiranja drenova koji je u odmakloj fazi, dobijaju se vrednosti otpora u veoma širokom dijapazonu u zavisnosti od debljine prifilterske zone: svega  $\Delta H_d=0,3$  m za debljinu zone od  $d_{pz}=1,0$  mm do čak  $\Delta H_d=11,81$  m u slučaju zone debljine  $d_{pz}=200$  mm.

U slučaju analiziranog bunara RB-5m, rezultati ukazuju da bi pri nivou zahvaćenih podzemnih voda u šahtu bunara od svega pet metara iznad kote utisnutih drenova (na koti  $H_d=55,00$  mm, koji je već dugo godina prisutan u realnoj eksploataciji ovog bunara), oko kojih je formirana prifilterska zona postupkom ugradnje filterskog zasipa, tj. kvarcnog granulata, debljine  $d_{pz}=75$  mm i čijim filtracionim karakteristikama od  $K_{pz}=1 \times 10^{-6}$  m/s generalno odgovaraju hidrogeološke odlike slabije propusnih tvorevina (na šta je uticao proces hemijskog kolmiranja usled taloženja rastvornog gvožđa prisutnog u povišenom sadržaju u podzemnim vodama), bio ostvaren kapacitet bunara od svega  $Q_b=15,93$  l/s. Na objektivno nepovoljnu vodozahvatnu sposobnost drenova bi presudno uticala veličina hidrauličkih otpora u prifilterskoj zoni drenova od  $\Delta H_d=9,73$  m, usled koje bi nivoi podzemnih voda u izdani neposredno uz drenove bili visoki, na koti  $H_{iz}=65,23$  mm. Relativno nepovoljne hidrauličke karakteristike drenova onemogućavaju veće sniženje nivoa u izdani u zoni bunara, usled čega ne može biti ostvaren značajniji kapacitet čak i pri vrlo niskom radnom nivou, odnosno pri vrlo usiljenom režimu rada bunara.

Kao zaključak sprovedene hidrodinamičke analize se može konstatovati da dominantno od propusnosti prifilterske zone drenova zavise kapacitet i režim rada bunara, zbog čega ona u hidrauličkom i funkcionalnom smislu predstavlja najvažniji deo bunara sa horizontalnim drenovima. Težnja da se prilikom utiskivanja i razrade drenova formira prifilterska zona što veće debljine oko filterskih cevi je prisutna kao svojevrsno pravilo u praksi izgradnje ovog tipa vodozahvatnog objekta. Ukoliko izvođač radova na bunaru samo delimično bude imao uspeha u ovoj nameri i formira prifiltersku zonu debljine (svega)  $d_{pz}=200$  mm, čije će filtracione karakteristike pritom biti solidne (kao takve se mogu oceniti vrednosti porozne sredine sa  $K=5 \times 10^{-5}$  m/s) i tada će postojati inicijalni hidraulički otpori u prifilterskoj zoni (nesto veći od jednog metra), koji bi dalje u sadejstvu sa neadekvatnim režimom eksploatacije bunara (u skladu sa praksom da se od novih drenova očekuju visoki kapaciteti bunara, neretko i kao opravdanje uloženi značajnih finansijskih sredstava) vodili ubrzanom opadanju i nemogućnosti održanja stabilnosti kapaciteta bunara tokom vremena eksploatacije.

Uvećanje hidrauličkog prečnika bunara je još jedna od težnji prisutnih u praksi projektovanja i izrade bunara, koja potiče iz teorije hidraulike vertikalnih bunara i koja govori da će uspešna izrada bunara dovesti do toga da ne bude hidrauličkih gubitaka u prifilterskoj zoni. U slučaju da takva prifilterska zona oko filterske konstrukcije bunara (vertikalnog, horizontalnog ili bunara sa horizontalnim drenovima) bude formirana, to bi značilo da je pijezometarski nivo u prifilterskoj zoni jednak nivou u unutrašnjosti konstrukcije bunara, pa bi u takvim uslovima hidraulički prečnik bunara bio veći od prečnika konstrukcije ili zacevljenja bunara. Ovakvo stanje bi nesumnjivo imalo pozitivne efekte na rad bunara zbog toga što bi ulazne brzine u bunar (odnosno dren) bile najniže moguće za dati kapacitet zahvatanja podzemnih voda, gubici u prifilterskoj zoni na račun visoke efektivne poroznosti materijala od kojeg je izgrađena bi izostali, a proces starenja bunara putem biohemijskog kolmiranja prifilterske zone bio usporen sve do trenutka kada dimenzije pornog prostora u njoj postanu značajnije umanjene.

Dobijeni rezultati upućuju na kritičko ispitivanje postojećih očekivanja od izvođenja radova u fazi razrade drenova koji podrazumevaju da se uspešno formiranom prifilterskom zonom smatra ona

debljine od oko jednog metra. Treba istaći da su rezultati utiskivanja novih drenova na bunarima izvorišta podzemnih voda Beograda nakon 2005. godine, koji su kvantifikovani hidraulički realnim pristupom simulacije bunara na detaljnim hidrodinamičkim modelima, pokazali da ispunjenje očekivanja koja su već dugi niz decenija ustaljena u praksi i među stručnjacima u datoj oblasti, nije verovatno. Rezultati sprovedenih modelskih ispitivanja, predstavljeni u ovom završnom koraku hidrodinamičke analize, ukazuju da formiranje prifilterske zone takvih dimenzija nije ni potrebno.

Naime, rezultati sprovedene hidrodinamičke analize uticaja debljine i filtracionih karakteristika prifilterske zone na kapacitet i režim rada bunara, kao i prethodne analize identifikacije stvarnih uzroka procesa starenja bunara i dinamike razvoja ovog procesa u vremenu (Božović et al., 2020a) su ukazali da dva ispitivana elementa zajednički, u sadejstvu i u ravnopravnom međusobnom odnosu definišu hidrauličke karakteristike drenova, što je jasno i iz izraza za esencijalni hidraulički parametar koeficijent propusnosti drenova [ $K_{pz}/d_{pz}$ ].

Kako se na osnovu ostvarenih efekata formiranja novih drenova na predmetnom izvorištu od 2005. godine do danas ne može tvrditi da generalno dolazi do dostizanja rezultata kojima se teži, a ugradnja filterskog zasipa i/ili filterskih konstrukcija neadekvatnih tehničkih karakteristika neretko inhibira uslove za nastanak mehaničkog, a ubrzo i biohemijskog kolmiranja, to se na osnovu poznavanja činjeničnog stanja može zaključiti da:

- skromne hidrogeološke odlike izdani beogradskog izvorišta podzemnih voda (koje su posledica genetskih uslova) daju najveći „doprinos“ ukupnim gubicima na putu zahvaćenih podzemnih voda do unutrašnjosti drenova;
- težnja da se formira prifilterska zona u kojoj neće biti inicijalno uvećanih hidrauličkih gubitaka i koja će imati značajne dimenzije oko filterske konstrukcije drenova najčešće rezultira nepovoljnim ishodom, sa često prisutnim očekivanjem da se i kroz omotač ugrađenog filterskog zasipa oko drenova u fazi razrade vrši iznošenje sitnozrnih frakcija granulometrijskog sastava sedimenata izdani, što nema utemeljenje u relevantnoj literaturi iz predmetne oblasti i što je u suprotnosti sa osnovnom funkcijom zasipa kao stabilizatora u kontroli iznošenja sedimenata;
- projektovanje i izvođenje radova trebaju biti funkciji formiranja prifilterske zone koja neće imati lošije filtracione, a samim tim ni hidrauličke karakteristike u odnosu na sedimente izdani u kojima se dren utiskuje, bez obzira na primenjenu metodu formiranja drena.

## 6 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U priobalnim područjima većih rečnih dolina, rad sistema javnog snabdevanja podzemnim vodama najčešće je zasnovan na procesu obalske filtracije. Princip obalske filtracije podrazumeva intenziviranje prirodnih uslova prihranjivanja izdani površinskim vodama reke na račun eksploatacije podzemnih voda nizom vodozahvatnih objekata izgrađenih duž njenih obala. Drugi aspekt procesa podrazumeva transformaciju kvaliteta površinskih voda na putu njihove filtracije kroz sedimente dna rečnog korita i dalje kroz sedimente izdani sve do vodozahvatnih objekata, čime se uz stabilne količine resursa podzemnih voda obezbeđuje i postojanost njihovog kvaliteta.

Pitanje pouzdane identifikacije prisustva, geneze i uticaja početnih otpora na intenzivnu dinamiku procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta podzemnih voda je stajalo u temelju sprovedenih hidrodinamičkih modelskih istraživanja u okviru izrade predmetne doktorske disertacije. Istraživanja su realizovana simulacijom ostvarenog režima podzemnih voda na numeričkom hidrodinamičkom modelu, na kojem su drenovi i mehanizam zahvatanja podzemnih voda predstavljeni geometrijski i hidraulički realno. Predmetna istraživanja su započela kritičkom analizom različitih do danas korišćenih pristupa u simulaciji bunara sa horizontalnim drenovima, da bi rezultirala predlogom optimalne, hidraulički reprezentativne i hidrodinamički efikasne metodologije hidrodinamičkih istraživanja ovog tipa vodozahvatnog objekta, uključujući i procese njihovog starenja, što je bio drugi cilj istraživanja sprovedenih u okviru izrade disertacije.

U analiziranim prethodnim hidrodinamičkim istraživanjima procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima na izvorištu podzemnih voda Beograda, drenovi su na 3D numeričkim modelima predstavljeni kao nizovi diskretnih 1D analitičkih elemenata, sa unutrašnjim graničnim uslovom ravnog nivoa podzemnih voda. Dominantan pristup je bio taj da se drenovi simuliraju hidraulički ekvivalentnim karakteristikama. U slučaju novih drenova utisnutih prema Projsag metodi, pristup hidraulički ekvivalentnih karakteristika drenova je podrazumevao da je ugrađeni filterski zasip omogućio izmenu i poboljšanje filtracionih karakteristika originalnog materijala vodonosne sredine na određenom rastojanju oko drenova (predstavljenom cilindričnom konturom u prostoru). Tada su kroz proces kalibracije modela kvantifikovane početne vrednosti hidrauličkih karakteristika drenova za koje se smatralo da su ekvivalentne realnim. Istraživanjima realizovanim u okviru izrade disertacije je utvrđeno da hidraulički ekvivalentan pristup neadekvatno predstavlja realne uslove, kada oni ukazuju na prisustvo uvećanih hidrauličkih otpora na drenovima.

Pristup hidraulički realnih karakteristika drenova, koji je proistekao iz istraživanja u okviru izrade disertacije, polazi od toga da se na modelu prifilterska zona drenova predstavlja tehničkim karakteristikama koje u najvećoj mogućoj meri odgovaraju realnim uslovima, tj. izvedenom stanju vodozahvatnih delova konstrukcije objekta, što podrazumeva da u slučaju formiranja drenova prema Projsag metodi, prifiltersku zonu drenova predstavlja ugrađeni filterski zasip. Na ovim osnovama su kalibracijom numeričkog hidrodinamičkog modela definisane znatno niže vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova. Niže vrednosti ukazuju na nepovoljan hidraulički kontakt drenova sa vodonosnom sredinom u kojoj su formirani, tj. na prisustvo uvećanih početnih hidrauličkih otpora mehaničke geneze. Dalje narušavanje hidrauličke funkcionalnosti drenova je rezultat procesa biohemijskog kolmiranja (dominantno inkrustacije taloženjem produkata dvovalentnog gvožđa rastvorenog u povišenom sadržaju u zahvaćenim podzemnim vodama), koje je funkcija kvaliteta podzemnih voda i režima rada bunara. Efekti biohemijskog kolmiranja su dalje kvantifikovani na modelu praćenjem smanjenja početne vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova tokom vremena.

U cilju rešavanja definisanog zadatka, razvijena je i primenjena metodologija koja podrazumeva da se efekat smanjenja poroznosti zasipa i filterskih cevi simulira smanjivanjem vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova tokom vremena. Istovremeno, dinamika kolmiranja drenova



zavisi od režima eksploatacije bunara, koji je izražen preko ulaznih brzina podzemnih voda u drenove, a preko prifilterske zone.

Naročit značaj sa aspekta definisane i predložene metodologije je imalo sprovođenje hidrodinamičke analize u standardnim računarskim programima i kodovima, koji su dostupni istraživačima u oblasti predmetnih istraživanja, kako bi dobijeni rezultati mogli biti verifikovani, korišćeni i unapređivani daljom primenom na različitim izvorištima i terenima širom sveta.

Primenjene metode naučno–istraživačkog rada su se sastojale u realizaciji hidrodinamičke analize koja je podrazumevala izradu 3D numeričkog hidrodinamičkog modela. Hidrodinamički model je izrađen u MODFLOW programu, dok je simulacija drenova izvršena upotrebom *Connected Linear Network Process* (CLN) numeričkog paketa, što je bio prvi primer upotrebe globalno najpoznatijeg i najšire korišćenog računarskog programa za modeliranje podzemnih voda u svrhe simulacije i istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima u svetskim razmerama. Kompleksnost analiziranih realnih uslova u pogledu stratifikacije izdani, hidrogeoloških odlika deponovanih sedimenata, režima nivoa izdani, uslova prihranjivanja izdani, konstruktivnih karakteristika vodozahvatnih objekata, preporučuje širu upotrebu primenjene metodologije. Drenovi su na numeričkom modelu simulirani realnim geometrijskim i konstruktivnim karakteristikama (dužinom i prečnikom filterskih cevi, debljinom prifilterske zone), kao i realnim hidrauličkim mehanizmom eksploatacije podzemnih voda preko kontrolisanog sniženja nivoa u vodosabirnom bunarskom šahtu.

Polazna pretpostavka sprovedenih istraživanja je bila ta da će zadavanje realne debljine prifilterske zone drenova na hidrodinamičkom modelu omogućiti definisanje realnih vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone, a među njima i onih kritičnih – vrednosti koje su eventualno inicirale pojavu početnih otpora na drenovima. Odnos vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova neposredno po njihovom formiranju i koeficijenta filtracije sedimenata porozne sredine na koti utisnutih drenova je usvojen kao reprezentativan pokazatelj mehaničkog kolmiranja kao eventualnog uzroka početnih otpora na drenovima.

Numerička hidrodinamička analiza je rezultirala sledećim zaključcima:

- Od samog početka eksploatacije novih drenova na analiziranom bunaru sa horizontalnim drenovima RB–5m su prisutni uvećani početni otpori, koji su u značajnoj meri ograničili njihovu hidrauličku efikasnost u pogledu zahvatanja podzemnih voda. Početni otpori su predisponirali dalje intenzivno starenje bunara putem hemijskog kolmiranja drenova na račun visokog sadržaja dvovalentnog gvožđa rastvorenog u zahvaćenim podzemnim vodama i režima eksploatacije podzemnih voda izraženog preko vrednosti ulaznih brzina podzemnih voda u drenove.
- Početni otpori su rezultat neadekvatnog usklađivanja granulacije filterskog zasipa i dimenzija otvora na filterskoj konstrukciji sa granulometrijskim karakteristikama sedimenata izdani deponovanih na koti i duž trasa utisnutih drenova. Budući da je zasip kvarcnog mineralnog sastava, a drenovi izrađeni od čelika otpornog na koroziju, ograničenja funkcionalnosti drenova su trajnog karaktera.
- Krupnija granulacija filterskog zasipa je rezultirala većim dimenzijama poroznog prostora prifilterske zone, za čije je ispunjavanje produktima taloženja gvožđa bilo potrebno više vremena. Sa druge strane, manja granulacija zasipa od optimalne je uslovlila smanjenu efektivnu poroznost prifilterske zone i brže kolmiranje, čak i u uslovima manjih ulaznih brzina.

U cilju utvrđivanja uzroka i dinamike procesa starenja bunara sa horizontalnim drenovima, sprovedena istraživanja su ukazala da je kvantifikovanje vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone drenova pravilniji pristup u odnosu na definisanje koeficijenta propusnosti drenova. Razlog je taj što istovetna vrednost koeficijenta propusnosti drenova može biti rezultat sasvim različitih vrednosti koeficijenta filtracije i debljine prifilterske zone, koji mogu ukazivati na različite hidrauličke i vodozahvatne sposobnosti drenova.

U slučaju kada se na modelu zadaje poznata realna debljina prifilterske zone, rezultat su verodostojnije kvantifikovane vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone. Sa druge strane, definisanje hidraulički ekvivalentnih karakteristika drenova može rezultirati neadekvatnim, uvećanim vrednostima koeficijenta propusnosti drenova, koje mogu prikriti prisustvo uvećanih početnih otpora na drenovima i dati pogrešnu predstavu o fazi do koje je proces starenja bunara napredovao. Neadekvatna shvatanja propusnosti drenova mogu rezultirati neadekvatnim preporukama u pogledu režima rada bunara (intenziviranje režima eksploatacije povećanjem sniženja nivoa u bunaru) ili mera održavanja bunara (odlaganje sprovođenja regeneracije drenova). Definisanje hidrauličkih karakteristika drenova i analiza starenja putem kvantifikovanja vrednosti filtracionih karakteristika prifilterske zone drenova, doprinosi boljoj oceni ostvarenih efekata izvođenja radova na formiranju drenova putem njihovog kvantitativnog izražavanja. Primenjenom metodologijom hidrodinamičkih istraživanja je omogućeno donošenje adekvatnih preporuka u pogledu upravljanja režimom rada vodozahvatnih objekata, a time i izvorišta u celini.

Dobijeni rezultati vezani za poreklo hidrauličkih otpora na primeru detaljno analiziranog bunara sa horizontalnim drenovima su u suprotnosti sa ranijim stavovima, koji uzroke kolmiranja drenova na obnovljenim bunarima posmatraju kao funkciju hidrohemijskih i mikrobioloških uslova prisutnih na lokaciji bunara. Sprovedena hidrodinamička istraživanja su ukazala da se, za razliku od dosadašnjih shvatanja kolmiranja drenova na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda, ono ne može posmatrati samo sa aspekta prirodnih uslova izdani prisutnih u zoni bunara (parametara hemijskog i mikrobiološkog sastava podzemnih voda koji su indikatori potencijala za nastanak i razvoj procesa kolmiranja) i uslova eksploatacije bunara (suštinski, ulaznih brzina podzemnih voda), već se u hidrodinamičku analizu procesa moraju uzeti i geometrijske i hidrauličke karakteristike samih drenova (bili oni stari ili novoutisnuti, u bilo kom trenutku njihove eksploatacije), sagledane u funkciji hidrauličkih otpora. U prvom redu, reč je o debljini i propusnosti prifilterske zone drenova.

Istraživanje je ukazalo na podjednak uticaj i značaj debljine i koeficijenta filtracije prifilterske zone na vodozahvatnu sposobnost i hidrauličku efikasnost drenova. Budući da se debljina prifilterske zone u realnim uslovima terena menja ređe i sporije od promena njenih filtracionih karakteristika, to se može smatrati opravdanim da na hidrodinamičkom modelu prifilterska zona bude predstavljena konstantnom vrednošću debljine, a da se proces starenja drenova putem mehaničkog i biohemijskog kolmiranja simulira smanjenjem vrednosti koeficijenta filtracije.

Mehaničko kolmiranje bunara se uobičajeno posmatra kao proces pokretanja i akumulacije fino-zrnih čestica porozne sredine energijom filtracionog toka, usled nemogućnosti njihovog iznošenja kroz otvore na filterskoj konstrukciji. Rezultati istraživanja ukazuju da se ovaj vid kolmiranja bunara, iako genetski sasvim različit, po svojoj manifestaciji ne razlikuje od inicijalno narušene hidrauličke sposobnosti drenova nastale neadekvatnim dimenzionisanjem tehničkih karakteristika filterskog zasipa i otvora na filterskoj konstrukciji.

Prisustvo značajnijih hidrauličkih otpora, odnosno gubitaka na drenovima na početku uključenja bunara u eksploataciju, kao i njihov porast tokom vremena eksploatacije rezultat je prirodnih i tehničkih uticaja koji dovode do smanjenja prvenstveno efektivne poroznosti prifilterske zone. Smanjenje efektivne poroznosti podrazumeva smanjenje propusnosti drenova, usled čega dolazi do slabljenja njihove vodozahvatne sposobnosti, a ubrzo i do opadanja kapaciteta bunara.

Rezultati istraživanja su potvrdili izuzetno značajan uticaj ulaznih brzina podzemnih voda u drenove na dinamiku procesa starenja, koji je inicijalno prepoznat od strane autora kriterijuma biohemijskog kolmiranja bunara. Kada se dobijeni rezultati uporede sa rezultatima autora koji su istraživali hidraulički uticaj propusnosti prifilterske zone u slučaju bušenih (vertikalnih) bunara i horizontalnih bunara, dolazi se do visokog stepena saglasnosti veličine i uticaja hidrauličkog gubitka na drenovima sa vrednostima druga dva tipa vodozahvatnog objekta.

Predstavljeni pristup u hidrodinamičkoj analizi bunara sa horizontalnim drenovima, zajedno sa procesima starenja drenova, podrazumeva da se ulazne brzine kao hidraulički parametar ne mogu posmatrati sa aspekta njihovih apsolutnih vrednosti (bile one u okviru ili izvan okvira dozvoljenih/kritičnih vrednosti), već neizostavno u funkciji konkretnih hidrauličkih karakteristika prifilterske zone drenova kroz koju se kretanje podzemnih voda kvantifikovanim ulaznim brzinama u datom trenutku odvija. To suštinski znači da će pri istim ulaznim brzinama podzemnih voda u drenove jednog bunara – i onda kada su one određene kao dozvoljene u skladu sa ranijim kriterijumom biohemijskog kolmiranja, drenovi kolmirati dominantno u zavisnosti od hidrauličkih karakteristika njihove prifilterske zone.

Sprovedeno istraživanje je ukazalo i da hidrodinamička analiza uslova i efekata rada bunara sa horizontalnim drenovima treba biti utemeljena na permanentnom uvažavanju karakteristične prostorne heterogenosti litološkog sastava aluvijalnih klastita, filtracionih karakteristika sedimenata vodonosne sredine, hemijskog sastava podzemnih voda prisutnih u konkretnim uslovima terena u kojima se ovi objekti izvode, kao i hidraulički reprezentativnog načina predstavljanja drenova i njihovog starenja na hidrodinamičkim modelima.

Hidrodinamička analiza uticaja diskretizacije prostora obuhvaćenog numeričkim modelom je rezultirala preporukom u pogledu adekvatnih dimenzija diskretnih proračunskih polja modela u užoj zoni bunara. Utvrđeno je i istraživačima autorima budućih modela bunara sa horizontalnim drenovimaporučeno da se za dimenzioniranje optimalne veličine polja u zoni drenova bunara može koristiti odnos koji govori da veličina strane diskretnog polja kvadratnog oblika u planu bude najviše deset puta veća od prečnika konstrukcije drenova.

Analiza uticaja diskretizacije vremena na hidrodinamičkom modelu je ukazala da se dužinom jednog proračunskog vremenskog intervala trajanja pet dana hidrološki uslovi vodostaja reke Save mogu adekvatnim stepenom reprezentativnosti predstaviti na numeričkom modelu. Budući da se svaki vodotok odlikuje jedinstvenim režimom vodostaja, to je data preporuka relevantna samo za uslove reke Save i predmetnog beogradskog izvorišta podzemnih voda.

Konačno, formirani hidrodinamički model dela izvorišta je moguće dalje unapređivati sukcesivnim uključivanjem okolnih bunara, u skladu sa rezultatima analize adekvatnog stepena diskretizacije prostora modela u planu i profilu za reprezentativno predstavljanje uslova vodonosne sredine i samih bunara, sve dok u narastajući prostor modela ne budu uključeni svi vodozahvatni objekti jednog dela beogradskog izvorišta (npr. Donjeg polja i Makiša; Novog Beograda sa Adom Ciganlijom i bunarima uz Savsko jezero na Makišu, uzvodnog sektora). Mogućnosti upotrebe takvog modela (ili više modela za prostor celog izvorišta podzemnih voda Beograda) bile bi izuzetne, kako sa aspekta upravljanja radom vodozahvatnog sistema podzemnih voda, sa aspekta zaštite resursa podzemnih voda od zagađenja, tako i uticaja eksploatacije podzemnih voda na ostale sadržaje i aktivnosti prisutne ili planirane na prostoru izvorišta u budućnosti.

Imajući u vidu aktuelno stanje vodozahvatnih objekata i eksploatacije podzemnih voda na izvorištu Beograda, hidrodinamička istraživanja realizovana u okviru izrade doktorske disertacije se mogu posmatrati kao naučno–istraživački napor autora u pravcu očuvanja izvorišta podzemnih voda Beograda, kao jednog od najvećih ove vrste u svetu i jednog od najznačajnijih vodoprivrednih objekata u zemlji.

## 7 LITERATURA

- 1 Ahmed, N., Taylor, S.W., Sheng, Z., 2014. *Hydraulics of Wells: design, construction, testing, and maintenance of water well systems*. Task Committee on hydraulics of wells. DOI: 10.1061/9780784412732
- 2 Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport*. Academic Press, San Diego. DOI: 10.1016/C2009-0-21562-5
- 3 Anderson, M.P., Woessner W.W., Hunt R., J., 2015. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport, 2nd edition*. Academic Press, London, UK. DOI: 10.1016/C2009-0-21563-7
- 4 Appiah–Adjei, E.K., Shu, L., Amaning Adjei, K., Lu, C., Deng M., 2012. *Interpretation of pumping test with radial collector well using a reservoir model*. Journal of hydrologic engineering, 17 (12), 1397–1407. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000598
- 5 Babac, D., Babac, P., 2005. *Bunari sa horizontalnim drenovima. Teorija, praksa, problemi eksploatacije, opadanje izdašnosti, zone kolmiranja, regeneracija drenova, predlozi revitalizacije izvorišta*. Balby International, Beograd.
- 6 Babac, D., Babac, P., 2008. *Bunari sa horizontalnim drenovima. Teorija, praksa, primeri proračuna*. Balby International, Beograd.
- 7 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.
- 8 Bakker, M., Strack, O.D.L., 2003. *Analytic elements for multiaquifer flow*. Journal of Hydrology, Volume 271, Issues 1–4, 119–129. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00319-0
- 9 Bakker, M., 2004. *Modeling groundwater flow to elliptical lakes and through multi–aquifer elliptical inhomogeneities*. Advances in water resources, 27 (5), 497–506. DOI: 10.1016/j.advwatres.2004.02.015
- 10 Bakker, M., 2005. *Analytic element modeling of embedded multiaquifer domains*. Groundwater, 44 (1), 2006, 81–85. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.00080.x
- 11 Bakker, M., Kelson, V., Luther, K., 2005. *Multilayer analytic element modeling of radial collector wells*. Groundwater. 43 (6), 926–934. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.00116.x
- 12 Balke, K.D., Beims, U., Heers, W. & Matthes, G., 2000. *Lehrbuch der Hydrogeologie. Bd.4, Grundwassererschließung*. Borntraeger.
- 13 Barrash, W., Clemo, T., Fox, J.J., Johnson, T.C., 2006. *Field, laboratory, and modeling investigation of the skin effect at wells with slotted casing, Boise Hydrogeophysical Research Site*. Journal of Hydrology. 326 (1–4), 181–198. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.10.029
- 14 Bear, J., Cheng, A.H.–D., 2010. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*. DOI: 10.1007/978-1-4020-6682-5
- 15 Bear, J., 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier.
- 16 Bear, J., 1979. *Hydraulics of groundwater*. McGraw–Hill International.

- 17 Betancur, T., Palacio, C.A.T, Escobar, J.F.M, 2012. *Conceptual models in hydrogeology, methodology and results*; Kazemi, G.A. (Ed.), Hydrogeology – A Global Perspective.
- 18 Blair, A.H., 1970. *Well screens and gravel packs*. Groundwater. 8 (1), 10–21.  
DOI: 10.1111/j.1745–6584.1970.tb01297.x
- 19 Boreli–Zdravković, Đ., 2014. *Analiza problematike simulacije hidrauličkog uticaja vodotoka kod hidrauličkih proračuna*. Vodoprivreda, 46 (267–272), 155–161.
- 20 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.  
DOI: 10.5937/tehnika1505777B
- 21 Božović, Đ., Polomčić, D., Bajić, D., 2016a. *Characteristic groundwater level regimes in the capture zones of radial collector wells and importance of identification (case study of Belgrade Groundwater Source)*. Geološki anali Balkanskog poluost., 77, 43–53.  
DOI: 10.2298/GABP1677043B.
- 22 Božović, Đ., Polomčić, D., Bajić, D., 2016b. *Hidrodinamička analiza opravdanosti utiskivanja novih drenova na većoj dubini na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda*. Vodoprivreda, 48 (282–284), 221–233.
- 23 Božović, Đ., Polomčić, D., Bajić, D., 2016c. *Inovirana „budimpeštanska“ metoda revitalizacije bunara sa horizontalnim drenovima i mogućnosti njene primene na beogradskom izvorištu podzemnih voda*. Tehnika, 67, 5, 685–693.  
DOI: 10.5937/tehnika1605685B.
- 24 Božović, Đ., 2016d. *Idejni projekat sanacije bunara sa horizontalnim drenovima RB–7m na beogradskom izvorištu podzemnih voda, Elaborat o rezultatima hidrogeoloških istraživanja za potrebe sanacije bunara RB–7m na beogradskom izvorištu podzemnih voda*; JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“.
- 25 Božović, Đ., 2016e. *Hidrodinamička analiza sanacije bunara sa horizontalnim drenovima RB–8m na beogradskom izvorištu podzemnih voda. Stručna dokumentacija JKP BVK*.
- 26 Božović, Đ., Polomčić, D., Bajić, D., Ratković, J., 2018. *Definisanje optimalnog kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima u uslovima nepovoljnog hemijskog sastava podzemnih voda (primer izvorišta Beograda)*. XVII Kongres geologa Srbije, 18 – 20. maj 2018., Vrnjačka Banja, 433–438.
- 27 Božović, Đ., Polomčić, D., Bajić, D., Ratković, J., 2020a. *Hydrodynamic analysis of radial collector well ageing at Belgrade well field*. Journal of Hydrology, 582.  
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124463
- 28 Božović, Đ., Polomčić D., Bajić, D., 2020b. *Pregled hidrodinamičkih istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima numeričkim metodama*. Vodoprivreda, 52 (303–305), 93–110.
- 29 Božović, Đ., Polomčić, D., Bajić, D., 2022. *Metodologija izrade 3D konceptualnog hidrogeološkog modela za potrebe hidrodinamičkog modeliranja bunara sa horizontalnim drenovima*. 16. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 28. 09.–02. 10. 2022., Zlatibor.
- 30 Brunner, P., Simmons, C.T., Cook, P.G., Therrien, R., 2010. *Modeling surface water–groundwater interaction with MODFLOW: Some considerations*. Groundwater, Volume 48, Number 2, 174–180.  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2009.00644.x
- 31 Charlton, R., 2007. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge. DOI: 10.4324/9780203371084

- 32 Chen, C., Wan, J., Zhan, H., 2003. *Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well*. Journal of Hydrology, 281, 159–171.  
DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00207-5
- 33 Chen, X., 2003. *Analysis of pumping-induced stream–aquifer interactions for gaining streams*. Journal of Hydrology 275, 1–11.  
DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00320-7
- 34 Chiang, W–H., 2005. *3D–Groundwater modeling with PMWIN, A simulation system for modeling groundwater flow and transport processes*. Springer Berlin, Heidelberg.  
DOI: 10.1007/3-540-27592-4
- 35 Collins, S.L., Houben, G.J, 2020. *Horizontal and radial collector wells: simple tools for a complex problem*. Hydrogeology Journal, 28, 1925–1935.  
DOI: 10.1007/s10040-020-02120-2
- 36 Cullimore, D.R., 1999. *Microbiology of well biofouling*. CRC Press, Boca Raton.  
DOI: 10.1201/9780203747247
- 37 Cunningham, W.L., Bair, E.S., Yost, W.P., 1996. *Hydrogeology and simulation of groundwater flow at the South Well Field, Columbus, Ohio*; USGS, Water-Resources Investigations Report 95-4279.  
DOI: 10.3133/wri954279
- 38 Dahlstrom, D.J., Janzen, A.K., Rash, V.D., Mechenich, M.F., 2015. *Simulating radial collector wells - a comparison of methods*; Maxwell, R., Hill, M., Zheng, C., Tonkin, M., (Eds.), MODFLOW and More 2015: Modeling a Complex World – IGWMC, Integrated Groundwater Modeling Center, Colorado, 350–353.
- 39 Davis, K.W., Putnam, L.D., LaBelle, A.L., 2014. *Conceptual and numerical models of groundwater flow in the Ogallala and Arikaree Aquifers, Pine Ridge Indian Reservation Area, South Dakota, Water Years 1980–2009*. USGS, Scient. Investig. Rep. 2014–5241.  
DOI: 10.3133/sir20145241
- 40 Debrine, B.E., 1970. *Electrolytic model study for collector wells under river beds*. Water Resources Research, 971-978.  
DOI: 10.1029/WR006i003p00971
- 41 Delleur, J.W., 2007. *The handbook of groundwater engineering, second edition*. CRC Press, Boca Raton.  
DOI: 10.1201/9781420006001
- 42 Dimkić, M., Krstić, M., Filipović, N., Stojanović, B., Ranković, V., Otašević, L., Ivanović, M., Nedeljković, M., Tričković, M., Pušić, M., Boreli–Zdravković, Đ., Đurić, D., Kojić, M., 2007. *Comparison of different configurations of Ranney wells using finite element modeling*, Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics, 1 (1).
- 43 Dimkić, M., Pušić, M., 2008: *Indikatori starenja bunara – primer beogradskog izvorišta*; Dimkić, M., Brauch, H.J., Cavanaugh, M., (Eds.), Groundwater management in large river basins, IWA, Publishing Alliance House, London.  
DOI: 10.2166/9781780401843
- 44 Dimkić, M., Pušić, M., Vidović, D., Isailović, V., Majkić, B., Filipović, N., 2010. *Numerical model assessment of radial–well ageing*. ASCE's Journal of Computing in Civil Engineering. 25 (1), 43–49.  
DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000063
- 45 Dimkić, M., Pušić, M., Obradović, V., Djurić, D., 2011a. *Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade Groundwater Source, part 2*. Water Science &

- Technology. 63 (11), 2567–2574.  
DOI: 10.2166/wst.2011.564
- 46 Dimkić, M., Pušić, M., Majkić–Dursun, B., Obradović, V., 2011b. *Certain implications of oxic conditions in alluvial groundwater*. Water Resources and Manage., 1 (2), 27–43.
- 47 Dimkić, M., Pušić, M., Vidović, D., Petković, A., Boreli–Zdravković, Dj., 2011c. *Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade Groundwater Source, part 1*. Water Science & Technology. 63 (11), 2560–2566.  
DOI: 10.2166/wst.2011.590
- 48 Dimkić, M., Pušić, M., Obradović, V., Kovačević, S., 2012. *The effect of certain biochemical factors on well clogging under suboxic and mildly anoxic conditions*. Water Science & Technology. 65 (12), 2206–2212.  
DOI: 10.2166/wst.2012.129
- 49 Dimkić, M., Ranković, V., Filipović, N., Stojanović, B., Isailovic, V., Pušić, M., Kojić, M., 2013. *Modeling of radial well lateral screens using 1D finite elements*. Journal of Hydroinformatics, 15 (2): 405–415.  
DOI: 10.2166/hydro.2012.008
- 50 Dimkić, M., Pušić, M., 2014. *Correlation between entrance velocities, increase in local hydraulic resistances and redox potential of alluvial groundwater sources*. Water Research and Management, Vol. 4, No. 4, 3–23.
- 51 Dimkić, M., Pušić, M., 2016a. *Application of a 3D model to determine design criteria for radial wells at Belgrade's groundwater source*; Dimkić, M., (Ed.), IWA specialists groundwater conference, 09–11 June 2016, Belgrade
- 52 Dimkić, M., Pušić, M., 2016b. *Basis for determining critical screen entrance velocities where wells have a propensity for iron incrustation*; Dimkić, M., (Ed.), IWA specialists groundwater conference, 9–11 June 2016, Belgrade
- 53 Dotlić, M., Vidović, D., Dimkić, M., Pušić, M., Radanović, J., 2011. *Finite volume method for well-driven groundwater flow*. Finite volumes for complex applications, VI Problems & Perspectives, Conference paper. 361–368.  
DOI: 10.1007/978-3-642-20671-9\_38
- 54 Dotlić, M., Vidović, D., Pokorni, B., Pušić, M., Dimkić, M., 2013. *Second-order accurate finite volume method for well-driven flows*. Journal of Computatio. Physics, 307, 460–475.  
DOI: 10.1016/j.jcp.2015.12.021
- 55 Dotlić, M., 2014. *Finite volume methods for well-driven flows in anisotropic porous media*. Computational Methods in Applied Mathematics, 14 (4), 473–483.  
DOI: 10.1515/cmam-2014-0017
- 56 Dotlić, M., 2015. *Proračun podzemnog toka metodom konačnih zapremina*. Doktorska disertacija, Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 57 Dragišić, V., Polomčić, D., 2009. *Hidrogeološki rečnik (Dictionary of hydrogeology)*. Rudarsko–geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 58 Driscoll, F.G., 1986. *Groundwater and wells, second edit*. Johnson Division, St. Paul.
- 59 Đurković, M., Polomčić, D., Božović, Đ., 2019. *Primena budimpeštanske metode revitalizacije bunara sa horizontalnim drenovima*. 9. međunarodna konferencija o vodovodnim i kanalizacionim sistemima, 29–31. maj 2019, Jahorina.
- 60 Eberts, S.M., Bair, E.S., 1990. *Simulated effects of quarry dewatering near a municipal well field*. Groundwater, 28 (1), 37–47. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02227.x

- 61 Enemark, T., Peeters, L.J.M., Mallants, D., Batelaan, O., 2019. *Hydrogeological conceptual model building and testing: A review*. Journal of hydrology, 569, 310–329.  
DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.12.007
- 62 Fetter, C.W., 2010. *Applied hydrogeology, 4th edit.* Prentice Hall, Upper Saddle River.
- 63 Fitts C.R., 2002. *Groundwater science*. Academic Press.
- 64 Fox, G.A., DuChateau, P., Durnford, D.S., 2002. *Analytical model for aquifer response incorporating distributed stream leakage*. Groundwater, 40 (4), 378–384.  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2002.tb02516.x
- 65 Fox, G.A., Durnford, D.S., 2003. *Unsaturated hyporheic zone flow in stream/aquifer conjunctive systems*. Advances in water resources, 26, 989–1000.  
DOI: 10.1016/S0309-1708(03)00087-3
- 66 Gaudényi. T., Jovanović, M., 2012. *Stratigrafija kvartara – savremene promene*. Glasnik srpskog geografskog društva (Bulletin of the Serbian geograph. socie.), 4 (4).  
DOI: 10.2298/GSGD1204001G
- 67 Gaudényi, T., Nenadić, D., Jovanović, M., Bogićević, K., 2013. *The stratigraphical importance of the Viviparus boeckhi Horizon of Serbia*. Quaternary International, 292.  
DOI: 10.1016/j.quaint.2012.11.034
- 68 Gaudényi, T., Nenadić, D., Jovanović, M., Bogićević, K., 2014. *The stratigraphical position and the use of the term Eopleistocene in Serbian geological literature*. Quaternary International, 319, 150–159.  
DOI: 10.1016/j.quaint.2013.04.012
- 69 Gaudényi, T., Nenadić, D., Stejić, P., Jovanović, M., Bogićević, K., 2015. *The stratigraphy of the Serbian Pleistocene Corbicula beds*. Quaternary International. 357.  
DOI: 10.1016/j.quaint.2014.07.050
- 70 Grischek, T., Bartak, R., 2016. *Riverbed clogging and sustainability of riverbank filtration*. Water, 8 (12), 604. DOI: 10.3390/w8120604
- 71 Grischek, T., Schoenheinz, D., Ray, C., Melin, G., Linsky, R., 2002. *Siting and design issues for riverbank filtration schemes*; Ray, C., Melin, G., Linsky, R.B., (Eds.), Riverbank Filtration: Improving Source–Water Quality, 43, 291–302.  
DOI: 10.1007/0-306-48154-5\_15
- 72 Grubić, A., Obradović, J., Vasić, N., 1996: *Sedimentologija*. Univerzitet u Beogradu.
- 73 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, 6 (4).  
DOI: 10.4236/jwarp.2014.64032
- 74 Haitjema, H.M, Anderson, M.P., 2016. *Darcy velocity is not a velocity*. Groundwater.  
DOI: 10.1111/gwat.12386
- 75 Haitjema, H., Kuzin, S., Kelson, V., Abrams, D., 2010. *Modeling flow into horizontal wells in a Dupuit–Forchheimer model*. Groundwater. 48 (6), 878–883.  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2010.00694.x
- 76 Haitjema, H., 2010. *Analytic Element Modeling of groundwater flow*. Academic Press.  
DOI: 10.1016/B978-0-12-316550-3.X5000-4
- 77 Halford, K.J., Hanson, R.T., 2002. *User guide for the drawdown–limited, Multi–Node Well (MNW) Package for the U.S. Geological Survey’s modular three–dimensional finite–difference ground–water flow model, Versions MODFLOW–96 and MODFLOW–2000*.



- USGS, Numbered Series.  
DOI: 10.3133/ofr02293
- 78 Hantush, M.S., Papadopulos I.S., 1962. *Flow of ground water to collector wells*. Journal of the Hydraulics Division, 88 (5).  
DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000775
- 79 Hantush, M.S., 1964. *Hydraulics of wells*. Advances in Hydroscience, 1, 281–432  
DOI: 10.1016/B978-1-4831-9932-0.50010-3
- 80 Harbaugh, A.W., 2005. *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model – the Ground-Water Flow Process*. USGS Numbered Series, Book 6: Modeling techniques, Section A. Ground-water.  
DOI: 10.3133/tm6A16
- 81 van Heeswijk, M., Cox, S.E., Huffman, R.L., Curran, C.A., 2008. *Conceptual model of hydrologic and thermal conditions of the Eastbank Aquifer System near Rocky Reach Dam, Douglas County, Washington*. USGS, Numbered Series, Scientific Investigations Report.  
DOI: 10.3133/sir20085071
- 82 Houben, G.J., Batelaan, O., 2021. *The Thiem team – Adolf and Günther Thiem, two forefathers of hydrogeology*. Hydrology and Earth System Sciences, 26 (15), 4055–4091.  
DOI: 10.5194/hess-26-4055-2022
- 83 Houben, G.J., Sander, J., 2020. *Preventing the growth of iron bacteria in water wells by copper and silver coating*. Water Supply, IWA Publishing, 20 (4), 1195–1206.  
DOI: 10.2166/ws.2020.033
- 84 Houben, G.J., 2003. *Iron oxide incrustations in wells. Part 1: genesis, mineralogy and geochemistry*. Applied Geochemistry, 18, 927–939.  
DOI: 10.1016/S0883-2927(02)00242-1
- 85 Houben, G.J., 2006. *The Influence of well hydraulics on the spatial distribution of well incrustations*. Groundwater, 44 (5), 668–675.  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2006.00216.x
- 86 Houben, G.J., Treskatis, C., 2007. *Water well rehabilitation and reconstruction*. The McGraw–Hill, New York.
- 87 Houben, G.J., 2015a. *Review: Hydraulics of water wells – head losses of individual components*. Hydrogeology Journal, 23 (8), 1659–1675.  
DOI: 10.1007/s10040-015-1313-7
- 88 Houben, G.J., 2015b. *Review: Hydraulics of water wells—flow laws and influence of geometry*. Hydrogeology Journal, 23 (8), 1633–1657.  
DOI: 10.1007/s10040-015-1312-8
- 89 Houben et al. 2016. *Analysis of wellbore skin samples – typology, composition, and hydraulic properties*. Groundwater, 54 (5), 634–645.  
DOI: 10.1111/gwat.12403
- 90 Houben, G.J., Wachenhausen, J., Guevara, C., 2018. *Effects of ageing on the hydraulics of water wells and the influence of non–Darcy flow*. Hydrogeology Journal, 6, 1285–94.  
DOI: 10.1007/s10040-018-1775-5
- 91 Houben, G.J., Collins, S., Bakker, M., Daffner, T., Triller, F., Kacimov, A., 2022. *Review: Horizontal, directionally drilled and radial collector wells*. Hydrogeol. Jour., 30, 329–357.  
DOI: 10.1007/s10040-021-02425-w
- 92 Hughes, J.D., Langevin, C.D., Banta, E.R., 2017. *Documentation for the MODFLOW 6*

- framework*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A57.  
DOI: 10.3133/tm6A57
- 93 Hunt, H., Schubert, J., Ray, C., 2002. *Conceptual design of riverbank filtration systems*; Ray, C., Melin, G., Linsky, R.B. (Eds.), *Riverbank Filtration Improving Source–Water Quality*, Volume 43, Springer, Dordrecht, 19–27.  
DOI: 10.1007/0-306-48154-5\_2
- 94 Hunt, J., 2002. *American experience in installing horizontal collector wells*; Ray, C., Melin, G., Linsky, R.B., (Eds.), *Riverbank Filtration: Improving Source–Water Quality*, Water Science and Technology Library, Volume 43. Springer, Dordrecht, 29–34.  
DOI: 10.1007/0-306-48154-5\_3
- 95 Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources, R&D Center for Bioengineering, Kragujevac, 2004. *Program for pre- and postprocessing of models for ground water flow*. Belgrade, Serbia.
- 96 Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, grupa autora, 2005–2010. *Studija „Beogradsko izvoriste podzemnih voda – stanje i pravci razvoja“*. Beograd
- 97 Ismail, W.M.Z.W., Yusoff, I., Rahim, Be.E.A., 2012. *Simulation of horizontal well performance using Visual MODFLOW*. *Environmental Earth Sciences*, 68, 1119–1126.  
DOI: 10.1007/s12665-012-1813-x
- 98 JiaLu, X., XiaoMeng, C., Qian, G., 2013. *Analysis of water–taking effect of radial collector well in the Yellow River Valley*. *International Journal of Environ. Scien.*, 3 (6).  
DOI: 10.6088/ijes.2013030600022
- 99 Karanjac, J., 1986. *Hidrogeološki rečnik (Dictionary of hydrogeology)*. Beograd.
- 100 Kawecki, M.W., 2000. *Transient flow to a horizontal water well*. *Groundwater*. 38 (6).  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2000.tb00682.x
- 101 Kelly, S.E., Murdoch, L.C., 2002. *Measuring the hydraulic conductivity of shallow submerged sediments*. *Groundwater*, 41 (4). 431–439.  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2003.tb02377.x
- 102 Kelson, V., 2012. *Predicting collector well yields with MODFLOW*. *Groundwater*, 50 (6).  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x
- 103 Kim, B–W., 2014. *Effect of filter designs on hydraulic properties and well efficiency*. *Groundwater*, 52 (1), 175–185.  
DOI: 10.1111/gwat.12166
- 104 Knežević, S., Rundić, L.J., Ganić, M., 2012. *The subsurface geology along the route of the new bridge at Ada Ciganlija Island (Belgrade, Serbia)*. *Geološki anali Balkanskoga poluostrva*, 73: 9–19.  
DOI:10.2298/GABP1273009K
- 105 Knežević, S., Nenadić, D., Radulović, B., Bogićević, J., 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.  
DOI: 10.2298/GABP1879021K
- 106 Kojic, M., Filipovic, N., Slavkovic, R., Zivkovic, M., Grujovic, N., 1998. *PAK–P Finite element program for modeling of undergroundwater flow and seepage*. Faculty of Mech. Eng. Univ. of Kragujevac, Kragujevac, Serbia.
- 107 Konikow, L.F., Hornberger, G.Z., Halford, K.J., Hanson, R.T., 2009. *Revised Multi-Node Well (MNW2) Package for MODFLOW ground–water flow model*. U.S. Geological Survey,

- Techniques and Methods 6–A30. DOI: 10.3133/TM6A30
- 108 Kordas, B., 1961. *Contribution à l'étude des puits à drains rayonnants (Contribution to the study of shaft wells with radial drains)*. Ninth Conference Int. Assoc. Hydraulic Research (IAHR), Dubrovnik, Yugoslavia, 581–590.
- 109 Kresic, N., Mikszewski, A., 2012. *Hydrogeological conceptual site models. Data analysis and visualization*. CRC Press.  
DOI: 10.1007/s12665-014-3268-8
- 110 Kresic, N., 2009. *Groundwater resources: sustainability, management, and restoration, 1st Edition*. The McGraw-Hill.
- 111 Kresic, N., Panday, S., 2017. *Numerical groundwater modelling in karst*. Geological Society, London, Special Publications, Volume 466, 319–330.  
DOI: 10.1144/SP466.12
- 112 Kruseman, G.P., de Ridder, N.A., 1994. *Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd edition*, ILRI, Publication 47,
- 113 Kumar, C.P., 2019. *An overview of commonly used groundwater modelling software*. International journal of advanced research in science, Engineer. & Techn., 6 (1).
- 114 Langevin, C.D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, S., Provost, A.M., 2017. *Documentation for the MODFLOW 6 groundwater flow model*. USGS Numbered Series, Modeling techniques.  
DOI: 10.3133/tm6A55
- 115 Langevin, C.D., Provost, A.M., Panday, S., Hughes, J.D., 2022. *Documentation for the MODFLOW 6 groundwater transport model*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A61.  
DOI: 10.3133/tm6A61
- 116 Lee, E., Hyun, Y., Lee, K., 2010. *Numerical modeling of groundwater flow into a radial collector well with horizontal arms*. Geosciences Journal. 14 (4), 403–414.  
DOI: 10.1007/s12303-010-0037-x
- 117 Lee, E., Hyun, Y., Lee, K.–K., Shin, J., 2012. *Hydraulic analysis of a radial collector well for riverbank filtration near Nakdong River, South Korea*. Hydrog. Journ., 20 (3), 575–589.  
DOI: 10.1007/s10040-011-0821-3
- 118 Lohman, S.W., 1972. *Ground-water hydraulics*. USGS Professional paper 708.  
DOI: 10.3133/pp708
- 119 Long, A.J., Aurand, K.R., Bednar, J.M., Davis, K.W., Mckaskey, J.D.R.G., Thamke, J.N., 2014. *Conceptual model of the uppermost principal aquifer systems in the Williston and Powder River structural basins, United States and Canada*. USGS, Scientific Investigations Report 2014–5055.  
DOI: 10.3133/sir20145055
- 120 Majkić–Dursun, B., 2013. *Starenje bunara u aluvijalnim sredinama različitog stepena oksičnosti*. Doktorska disertacija. Rudarsko–geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 121 Majkić–Dursun, B., Vulić, P., Dimkić, M., 2015. *Clogging of water supply wells in alluvial aquifers by mineral incrustations, central Serbia*. Geološki anali Balkan. Polu. 76, 73–83.  
DOI: 10.2298/GABP1576073M
- 122 Majkić–Dursun, B., Petković, A., Boreli-Zdravković, Đ., 2016. *Potencijal korozivnosti aluvijalnih podzemnih voda u slivu Velike Morave*. Zaštita materijala, 57 (3), 404–411.  
DOI: 10.5937/ZasMat1603404M

- 123 Mansuy, N., 1998. *Water well rehabilitation. A practical guide to understanding well problems and solutions*. Layne GeoSciences, Inc., Lewis Publishers.  
DOI: 10.1201/9780203734063
- 124 Marović, M., Djoković, I., Pešić, L., Radovanović, S., Toljić, M., Gerzina, N., 2002. *Neotectonics and seismicity of the southern margin of the Pannonian basin in Serbia*. Stephan Mueller Special Publication Series. 3, 277–295.  
DOI: 10.5194/smsps-3-277-2002
- 125 Maroney, C. L., Rehmann, C.R., 2017. *Stream depletion rate for a radial collector well in an unconfined aquifer near a fully penetrating river*. Journal of Hydrology, 547, 732–741.  
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.010
- 126 McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. USGS Numbered Series, Techniques of Water–Resources Investigations, 06-A1.  
DOI: 10.3133/twri06A1
- 127 McDowell–Boyer, L.M., Hunt, J., Sitar, N., 1986. *Particle transport through porous media*. Water resources research, 22 (13), 1901–1921.  
DOI: 10.1029/WR022i013p01901
- 128 Menon, E.S., 2005. *Piping calculation manual, 1st edition*. McGraw-Hill Education.
- 129 Milašinović, M., Jaćimović, N., 2017. *Estimation of riverbed clogging layer filtration characteristics based on aquifer pumping test results*. Zbornik radova 5. međunarodne konferencije Savremena dostignuća u građevinarstvu, 33, 651–660.  
DOI: 10.14415/konferencijaGFS2017.070
- 130 Milojević, M., 1961. *Interference of radial collector well adjacent to river bank*. Symposium of International assoc. of scientific hydrology, Athens.
- 131 Milojević M., 1963a. *Radial collector wells adjacent to the riverbank*. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 89(6)
- 132 Milojević, M., 1963b. *Izdašnost niza bunara sa horizontalnim zrakastim drenovima pored obale reke*. Izgradnja, broj 12, Beograd.
- 133 Milojević, M., 1965a. *O racionalnom broju i dužini drenova i razmaku Ranney bunara pored obale reke*. Izgradnja, Beograd.
- 134 Milojević, M., 1965b. *Raspored ukupne izdašnosti na pojedine drenove i duž drenova Ranney bunara pored obale reke*. Izgradnja, Beograd.
- 135 Mitrinović, D., Pušić, M., Anđelković, O., Zarić, J., Dimkić, M., 2018. *Novel method for selection of Ranney wells for regeneration based on hydraulic modeling*. Water Research and Management, Vol. 8, No. 1, 35–58.
- 136 Mitrinović, D., Pušić, M., Popović, M., Kovačević, S., Dimkić, M., 2021. *Analysis of kinetics of local hydraulic losses on the laterals of radial wells at Belgrade groundwater source*. Water Supply, 22 (1), 812–832.  
DOI: 10.2166/ws.2021.234
- 137 Mohamed A., Rushton K., 2006. *Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model*. Journal of hydrology, 329 (1–2).  
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.006
- 138 Moore R., Kelson V., Wittman J., Rash V., 2011. *A modeling framework for the design of collector wells*. Groundwater, 50 (3).  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.2011.00850.x

- 139 Motz, L.H., 1998. *Vertical leakage and vertically averaged vertical conductance for karst lakes in Florida*. Water Resources Research, 34 (2), 159–167.  
DOI: 10.1029/97WR03134
- 140 Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., Huebsch, W.W., 2009. *Fundamentals of fluid mechanics, 6th edition*. Wiley, New York.
- 141 Nagy–Kovács Z., Balázs L., Simon E. and Fleit E., 2018. *Operational strategies and adaptation of RBF well construction to cope with climate change effects at Budapest, Hungary*. Water, 10 (12).  
DOI:10.3390/w10121751
- 142 Nagy–Kovács, Z., Davidesz, J., Czihat–Mártonné, K., Till, G., Fleit, E., Grischek, T., 2019. *Water quality changes during riverbank filtration in Budapest, Hungary*. Water, 11 (2).  
DOI: 10.3390/w11020302
- 143 Nastev, M., Morin, R., Godin, R., Rouleau, A., 2008. *Developing conceptual hydrogeological model for Potsdam sandstones in southwestern Quebec, Canada*. Hydrogeology Journal, Volume 16, 373–388.  
DOI: 10.1007/S10040-007-0267-9
- 144 Nemeček, E.P., 2006. *Horizontalfilterbrunnen*. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, 45.
- 145 Nenadić, D., Simić, V., Knežević, S., 2001. *Stratigraphical and lithological characteristics of preloess sediments in Eastern Srem, Serbia*. Geoloski Anali Balkan. Polu., 64, 53–62.  
DOI: 10.2298/GABP0264053N
- 146 Nenadić, D., 2003. *Pleistocenske naslage istočnog Srema*. Doktorska disertacija. Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 147 Nenadić, D., Knežević, S., Bogićević, K., 2009. *Stratigraphical and paleogeographical characteristics of Pleistocene series in the Sava riparian area at Belgrade (Serbia)*. Bulletin of the Natural History Museum, 2, 63–80.
- 148 Nenadić, D., Bogićević, K., Lazarević, Z., Milivojević, J., 2010. *Lower and Middle Pleistocene sediments of eastern Srem (Northern Serbia) – paleogeographical reconstruction*. Bulletin of the Natural History Museum in Belgrade 3, 7–25.
- 149 Nenadić, D., Gaudényi, T., Bogićević, K., Gulán, Z., 2011. *The Lower Quaternary boundary in the southeastern Srem (North Serbia) – paleogeographical reconstruction*. Bulletin of the Natural History Museum in Belgrade 4, 23–36.
- 150 Nenadić, D., Gaudényi, T., 2014. *Stratigrafski model kvartara za rečne policiklične sedimente na prostoru Srbije*. Zbornik radova VI Kongresa geologa Srbije, Donji Milanovac, 22–25 maj 2014.
- 151 Nenadić, D., Bogićević, K., 2014. *Pleistocenske fluvijalne naslage jugoistočnog Srema i dolina Dunava i Morave*. Zbornik VI Kong. geol. Srbije, Donji Milanovac, maj 2014.
- 152 Nenadić, D., Gaudényi, T., Tošović, R., Bogićević, K., 2015a. *Stratigraphical characteristics of pleistocene fluvial deposits of southeastern Srem near Belgrade (Serbia)*. Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences: sciences mathématiques et naturelles 68 (2), 225–230.
- 153 Nenadić, D., Gaudényi, T., Bogićević, K., Ganić, M., 2015b. *Stratigraphical position of pleistocene fluvial deposits of southeastern Srem and the Danube terraces in eastern Serbia*. Bulletin of the Natural History Museum, 8, 7–19.
- 154 Nenadić, D., Gaudényi, T., Bogićević, K., Tošović, R., 2016. *Stratigraphic and lithologic characteristics of Pleistocene fluvial deposits in the Danube and Sava riparian area near*

- Belgrade (Serbia)*. Stratigraphy and Geolog. Correl. 24 (4), 427–437.  
DOI: 10.1134/S0869593816040055
- 155 Newcomer, M.E., Hubbard, S.S., Fleckenstein, J.H., Maier, U., Schmidt, C., Thullner, M., Ulrich, C., Flipo, N., Rubin, Y., 2016. *Simulating bioclogging effects on dynamic riverbed permeability and infiltration*. Water Resources Research, 52 (4), 2883–2900.  
DOI: 10.1002/2015WR018351
- 156 Nichols, G., 2009. *Sedimentology and stratigraphy, 2<sup>nd</sup> edition*. Wiley–Blackwell.
- 157 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.  
DOI: 10.30955/gnj.000114
- 158 Oparušić, I., Božović Đ., 2012. *Definisanje devijacije drenova na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda*. 14. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 17–20. maj 2012., Zlatibor, 75–79.
- 159 Ophori, D.U., Farvolden, R.N., 1985. *A hydraulic trap for preventing collector well contamination: A case study*. Groundwater, 23 (5), 600–610.  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.1985.tb01508.x
- 160 Panday. S., Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, M., Hughes, J.D., 2013. *MODFLOW–USG Version 1: An Unstructured Grid Version of MODFLOW for Simulating Groundwater Flow and Tightly Coupled Processes Using a Control Volume Finite–Difference Formulation*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. DOI: 10.3133/tm6a45
- 161 Park, E., Zhan, H., 2002. *Hydraulics of a finite–diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect*. Advances in water resources. 25, 389–400.  
DOI: 10.1016/S0309-1708(02)00011-8
- 162 Patel, H.M., Eldho, T.I., Rastogi, A.K., 2010. *Simulation of radial collector well in shallow alluvial riverbed aquifer using Analytic Element Method*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136 (2).  
DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000141
- 163 Pholkern, K., Srisuk, K., Grischek, T., Soares, M., Schäfer, S., Archwichai, L., Saraphirom, P., Pavelic, P., Wirojanagud, W., 2015. *Riverbed clogging experiments at potential river bank filtration sites along the Ping River, Chiang Mai, Thailand*. Envir. Earth Sci., 73 (12).  
DOI: 10.1007/s12665-015-4160-x
- 164 Polomčić, D., 1995. *Hidrogeološki model kladovske izdani*. Zbornik radova Rudarsko–geološkog fakulteta, 34, 137–142, Beograd.
- 165 Polomčić, D., 2001. *Hidrodinamička istraživanja, otvaranje i upravljanje izvorištima izdanskih voda u intergranularnoj poroznoj sredini*. Rudarsko–geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 166 Polomčić, D., Bajić, D., Buhač, D., 2011. *3D hidrodinamički model površinskog kopa Polje E (Kolubarski ugljonosni basen)*. V međunarodna konferencija Ugalj 2011, 19–22. oktobar 2011, Zlatibor.
- 167 Polomčić, D., Hajdin, B., Stevanović, Z., Bajić, D., Hajdin, K., 2013a. *Groundwater management by riverbank filtration and an infiltration channel: the case of Obrenovac, Serbia*. Hydrogeology Journal, volume 21, 1519–1530.  
DOI: 10.1007/s10040-013-1025-9
- 168 Polomčić, D., Bajić, D., Ristić–Vakanjac, V., Čokorilo Ilić, M., 2013b. *MODFLOW na raskršću*. Zaspisnici sprskog geološkog društva, Srpsko geološko društvo.
- 169 Polomčić, D., Božović, Dj., Bajić, D., 2016. *Hydraulic characterization of laterals as*

- applied to selected radial collector wells at Belgrade groundwater source. Geološki anali Balkanskog poluostrva. 77, 33–42.*  
DOI: 10.2298/GABP1677033P
- 170 Polomčić, D., Ratković, J., Bajić, D., 2018. *Idejni projekat revitalizacije bunara RB–17 utiskivanjem novih drenova; Elaborat o hidrogeološkim uslovima sanacije bunara RB–17 na beogradskom izvoristu podzemnih voda.* Mautin - Infoservice.
- 171 Polomčić, D., 2021. *Izvorišta i zahvati podzemnih voda.* Univerzitet u Beogradu, Rudarsko–geološki fakultet.
- 172 Polomčić, D., Bajić, D., Ratković, J., Božović, Đ., 2022. *Šematizacija hidrograma i nivograma radnog nivoa kod bunara sa horizontalnim drenovima.* 16. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 28. 09.–02. 10. 2022., Zlatibor.
- 173 Przybyłek, J., Dragon, K., Kaczmarek, P.M.J., 2017. *Hydrogeological investigations of river bed clogging at a river bank filtration site along the River Warta, Poland.* Geologos 23, 3, 201–214.  
DOI: 10.1515/logos-2017-0021
- 174 Pušić M., Dimkić M., Vidović D., Dotlić M., Oparušić I., 2012. *Analiza uticaja nekih hidrogeoloških parametara na početni kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima.* Vodoprivreda. 44 (258–260), 175–180.
- 175 Pušić, M., Dimkić, M., 2016. *Primer analize uticaja propusnosti rečnog dna i međusloja izdani na strujanje podzemnih voda ka bunaru.* 15. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 14–17. septembar 2016., Kopaonik
- 176 Pušić, M., Dimkić, M., 2017. *Comparative assessment of radial collector well elements with a new approach.* Geološki anali Balkanskoga poluostrva, 78, 37–45.  
DOI: 10.2298/GABP1778037P
- 177 Radanović, J., Nikolić, I., Stojadinović, V., 2016. *Konceptualni hidrogeološki model aluvijalne izdani na primeru drenažnog sistema Kovin – Dubovac.* 15. srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, 14–17. septembar 2016., Kopaonik.
- 178 Rakić, M., 1977. *Pleistocen Srema i Banata;* Petković, K., (Ed.), Geologija Srbije (Stratigrafija, Kenozoik), 2 (3), 399–405., Zavod za Regionalnu geologiju i paleontologiju Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- 179 Ray, C., Grischek, T., Schubert, J., Wang, Z., Speth, T.F., 2002. *A perspective of riverbank filtration.* Journal of American Water Works Association. 94 (4), 149–260.  
DOI:10.1002/j.1551-8833.2002.tb09459.x
- 180 Reilly, T.E., 2001. *System and boundary conceptualization in ground-water flow simulation.* U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Applications of Hydraulics, Chapter B8.  
DOI: 10.3133/twri03B8
- 181 Rumbaugh, J.O., Rumbaugh, D.B., 2011. *Tutorial Manual for Groundwater Vistas, version 6; Command reference for groundwater vistas, version 6.* Environmental Simulations International, Ltd.
- 182 Rumbaugh, J.O., Rumbaugh, D.B., 2020. *Guide to using Groundwater Vistas, Version 8.* Environmental Simulations International, Ltd.
- 183 Rushton K.R., 2006. *Groundwater hydrology: Conceptual and computational models.* John Wiley & Sons Ltd., England
- 184 Rushton K.R., Brassington F.C., 2013a. *Hydraulic behaviour and regional impact of a*

- horizontal well in a shallow aquifer: example from the Sefton Coast, northwest England (UK)*. Hydrogeology Journal, 21, 1117–1128.  
DOI: 10.1007/s10040-013-0985-0
- 185 Rushton, K.R., Brassington, F.C., 2013b. *Significance of hydraulic head gradients within horizontal wells in unconfined aquifers of limited saturated thickness*. Journal of Hydrology, 492 (7), 281–289.  
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.006
- 186 Salehin, M., Packman, A.I., Paradis, M., 2004. *Hyporheic exchange with heterogeneous streambeds: Laboratory experiments and modeling*. Water Resources Research, 40 (11).  
DOI: 10.1029/2003WR002567
- 187 Saucier, R.J., 1974. *Considerations in gravel pack design*. Journal of Petroleum Technology, 26 (02), 205–212.  
DOI: 10.2118/4030-PA
- 188 Sawyer, C.S., Lieuallen–Dulam, K.K., 1998. *Productivity comparison of horizontal and vertical ground water remediation well scenarios*. Groundwater, 36 (1), 98–103.  
DOI: 10.1111/j.1745-6584.1998.tb01069.x
- 189 Schijven, J.F., Hassanizadeh, S.M., de Bruin, H.A.M., 2002. *Column experiments to study nonlinear removal of bacteriophages by passage through saturated dune sand*. Journal of Contaminant Hydrology, 58 (3–4), 243–259.  
DOI: 10.1016/s0169-7722(02)00040-2.
- 190 Schubert, J., 2002. *Hydraulic aspects of riverbank filtration – field studies*. Journal of Hydrology, 266 (3–4), 145–161.  
DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00159-2
- 191 Shantser, Y.V., 1951. *Alluvium of plain rivers of the temperate zone and its role in studies of the structure and formation of alluvial formations*. Proceedings of the Institute of Geology, USSR Academy of Sciences, Geology series, N 55.
- 192 Shoemaker, W.B., Kuniatsky, E.L., Birk, S., Bauer, S., Swain, E.D., 2007. *Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW–2005*. USGS Numbered Series, Techniques and Methods, 6-A24.  
DOI: 10.3133/tm6A24
- 193 Siergieiev, D., Ehlert, L., Reimann, T., Lundberg, A., Liedl, R., 2015. *Modelling hyporheic processes for regulated rivers under transient hydrological and hydrogeological conditions*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 329–340.  
DOI: 10.5194/hess-19-329-2015
- 194 Singhal, V., Goyal, R., 2012. *Development of conceptual groundwater flow model for Pali Area, India*. African Journal of Environmental Science and Technology, 5 (12), 1085–1092  
DOI: 10.5897/AJEST11.220
- 195 Sophocleous, M., 2002. *Interactions between groundwater and surface water: the state of the science*. Hydrogeology Journal, 10, 52–67.  
DOI: 10.1007/s10040-001-0170-8
- 196 Speake, R.C, Trojan, M., Wang, Z.Z., 1991. *Modeling the performance of a horizontal groundwater recovery well*. Fifth national outdoor action conference on aquifer restoration, ground water monitoring and geophysical methods, Las Vegas, USA, 13–16 May, 1991.
- 197 Spiridonoff, S.V., 1964. *Design and use of radial collector wells*. Journal of American Water Works Association, 56 (6), 689–698.  
DOI: 10.1002/j.1551-8833.1964.tb01259.x



- 198 Stauffer, P.H., 2006. *Flux flummoxed: A proposal for consistent usage*. Groundwater. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2006.00197.x
- 199 Sterrett, R.J., 2007. *Groundwater and wells, 3rd ed.* Johnson Screens, New Brighton.
- 200 Su, G.W., Jasperse, J., Seymour, D., Constantz, J., Zhou, Q., 2007. *Analysis of pumping-induced unsaturated regions beneath a perennial river*. Water Resour. Research, 43 (8). DOI: 10.1029/2006WR005389
- 201 Sweetkind, D.S.; Faunt, C.C., Hanson, R.T., 2013. *Construction of 3-D geologic framework and textural models for Cuyama Valley groundwater basin, California*. USGS, Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5127. DOI: 10.3133/SIR20135127
- 202 Toljić, M., Nenadić, D., Stojadinović, U., Gaudényi, T., Bogićević, K., 2014. *Quaternary tectonic and depositional evolution of eastern Srem (northwest Serbia)*. Geološki anali Balkanskoga poluostrva. 75, 43–57. DOI: 10.2298/GABP1475043T
- 203 Tsou, P.-R., Feng, Z.-Y., Yeh, H.-D. , Huang, C.-S., 2010. *Stream depletion rate with horizontal or slanted wells in confined aquifers near a stream*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 1477–1485. DOI: 10.5194/hess-14-1477-2010
- 204 van Beek, C.G.E.M., Breedveld, R.J.M., Juhász-Holterman, M., Oosterhof, A., Stuyfzand, P.J., 2009. *Cause and prevention of well bore clogging by particles*. Hydrogeology Journal, volume 17, 1877–1886. DOI: 10.1007/s10040-009-0537-9
- 205 van Beek, C.G.E.M., 2011. *Cause and prevention of clogging of wells abstracting groundwater from unconsolidated aquifers*. IWA Publishing, London. DOI: 10.2166/9781780400242
- 206 van Beek, C.G.E.M., 2018. *Well–screen and well–head clogging by hydrous ferric oxides*. Hydrogeology Journal. 26 (8), 2919–2932. DOI: 10.1007/s10040-018-1822-2
- 207 Veličković, B., 2005. *Colmation as one of the processes in interaction between the groundwater and surface water*. Facta universitatis – series Architect. & Civil Engin., 3 (2). DOI:10.2298/FUACE0502165V
- 208 Verstraeten, I.M.; Thurmanb, E.M.; Lindseyb, M.E.; Lee, E.C.; Smith, R.D., 2002. *Changes in concentrations of triazine and acetamide herbicides by bank filtration, ozonation, and chlorination in a public water supply*. Journal of Hydrology, 266 (3–4). DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00163-4
- 209 Vidović, D., Dotlić, M., Pušić, M., 2011. *Computing well–driven groundwater flow with a finite volume method*, 2011. IWA specialist groundwater conference. Belgrade
- 210 Wang, Q., Zhan, H., 2016. *Intrawellbore kinematic and frictional losses in a horizontal well in a bounded confined aquifer*. Water Resources Research, 53 (1), 127–141. DOI: 10.1002/2015WR018252
- 211 Wang, W., Chen, P., Zheng, Q., Zheng, X., Lu, K., 2013. *A modified calculation model for groundwater flowing to horizontal seepage wells*. Journal of Earth Sys. Sci., 122 (2). DOI: 10.1007/s12040-013-0283-1
- 212 Weidner C., Houben, G.J., Halisch, M., Kaufhold, S., 2016. *Wellbore skin in mine dewatering and drinking water supply: field observation, mineralogy and hydraulic effect*. Conference: International mine water association 2016 At: Leipzig, Germany, Volume: Mining Meets Water – Conflicts and Solutions.
- 213 Wels, C., Mackie, D., Scibek, J., 2012. *Guidelines for groundwater modelling to assess*

- impacts of proposed natural resource development activities*. British Columbia Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.
- 214 Wenzel, L.K., 1935. *The Thiem method for determining permeability of water-bearing materials*. U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Water Supply Paper. DOI: 10.3133/wsp679A
- 215 Wett, B., Jarosch, H., Ingerle, K., 2002. *Flood induced infiltration affecting a bank filtrate well at the River Enns, Austria*. Journal of hydrology, 266 (3–4), 222–234. DOI:10.1016/S0022-1694(02)00167-1
- 216 Wett, B., 2006. *Monitoring Clogging of a RBF-System at the River Enns, Austria*; Hubbs, S.A. (Ed.), Riverbank Filtration Hydrology. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 60. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-1-4020-3938-6\_12
- 217 Williams, E.B., 1981. *Fundamental concepts of well design*. Groundwater, 19 (5). DOI: 10.1111/j.1745-6584.1981.tb03504.x
- 218 Wilson, J.L., 1993. *Induced infiltration in aquifers with ambient flow*. Water Resources Research, 29 (10), 3503–3512. DOI: 10.1029/93WR01393
- 219 Yeh, H–D., Chang, Y.–C., 2013. *Recent advances in modeling of well hydraulics*. Advances in water resources, 51, 27–51. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.03.006
- 220 Yeh, H–D., Yang, S–Y., 2006. *A novel analytical solution for a slug test conducted in a well with a finite-thickness skin*. Advances in Water Resources, 29, 1479–1489. DOI: 10.1016/j.advwatres.2005.11.002
- 221 Yang, S–Y., Yeh, H–D., 2009. *Radial groundwater flow to a finite diameter well in a leaky confined aquifer with a finite-thickness skin*. Hydrological Process, 23, 3382–3390. DOI: 10.1002/hyp.7449
- 222 Zarić, J., 2019. *Formiranje i održivo korišćenje izvorišta podzemnih voda u funkciji geneze kvartarnih sedimenata donjeg toka reke Save*. Doktorska disertacija. Rudarsko–geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 223 Zengguang, X., Yanqing, W., Jun, W., Xiaoqing, Z., 2011. *A model of seepage field in the tailings dam considering the chemical clogging process*. Advan. in Eng. Soft, 42, 426–434. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.03.009
- 224 Zhan, H. Zlotnik, V.A., 2002. *Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer*. Water Resources Research, 38 (7), 13-1–13-11. DOI: 10.1029/2001WR000401
- 225 Zhan, H., 1999. *Analytical study of capture time to a horizontal well*. Journal of hydrology. 217 (1–2), 46–54. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00013-X
- 226 Zhang, Y., Hubbard S., Finsterle, S., 2011. *Factors governing sustainable groundwater pumping near a river*. Groundwater, 49 (3), 2011. DOI:10.1111/j.1745-6584.2010.00743.x
- 227 Zlotnik, V.A., 2004. *A concept of maximum stream depletion rate for leaky aquifers in alluvial valleys*. Water Resources Research, 40 (6). DOI: 10.1029/2003WR002932
- 228 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.

## BIOGRAFIJA AUTORA

Đorđije M. Božović je rođen 31. januara 1981. godine u Nikšiću, gde je završio osnovnu i srednju školu. Visoko obrazovanje je stekao 2005. godine na smeru za hidrogeologiju Rudarsko–geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Tokom studija je bio stipendista Elektroprivrede Crne Gore, sa kojom danas saraduje u svojstvu projektanta i savetnika.

Beogradsko izвориšte podzemnih voda i bunari sa horizontalnim drenovima se od nalaze u fokusu autorovog stručnog i naučnog rada, započetog u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, gde je tokom jedne decenije bio angažovan na višegodišnjim multidisciplinarnim projektima eksploatacije i zaštite podzemnih voda, zaštite od negativnog uticaja podzemnih voda, pitanjima smanjenja kapaciteta vodozahvatnih objekata, podlogama za izradu krupnih privrednih objekata.

Radni odnos nastavlja u JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, u kojem je angažovan na izradi projekata revitalizacije bunara utiskivanjem novih drenova, izradi različitih vrsta hidrogeoloških podloga i elaborata, pitanjima održavanja vodozahvatnih objekata, pitanjima zaštite izvorišta podzemnih voda, implementaciji savremenih metoda hidrodinamičkog modeliranja.

Učestvovao je u izradi tehničkog rešenja „*Metodologija sa matematičkim modelom za ocenu kapaciteta lokacije bunara sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta*“ (Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede R. Srbije, 2010.), kao i na projektu Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja R. Srbije „*Metodologija ocene, projektovanja i održavanja izvorišta podzemnih voda u aluvijalnim sredinama u zavisnosti od stepena aerobnosti*“. Autor je više naučnih i stručnih radova na temu hidrodinamičkog modeliranja i bunara sa horizontalnim drenovima.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Ђорђије Божовић

Број индекса Г813/14

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ХИДРОДИНАМИЧКА АНАЛИЗА ПРОЦЕСА СТАРЕЊА  
БУНАРА СА ХОРИЗОНТАЛНИМ ДРЕНОВИМА  
НА БЕОГРАДСКОМ ИЗВОРИШТУ ПОДЗЕМНИХ ВОДА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, 30. 03. 2023. године

---

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Ђорђије Божовић

Број индекса Г813/14

Студијски програм Хидрогеологија

Наслов рада ХИДРОДИНАМИЧКА АНАЛИЗА ПРОЦЕСА СТАРЕЊА БУНАРА СА ХОРИЗОНТАЛНИМ ДРЕНОВИМА НА БЕОГРАДСКОМ ИЗВОРИШТУ ПОДЗЕМНИХ ВОДА

Ментор Др Душан Полочичић, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, 30. 03. 2023. године

---

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ХИДРОДИНАМИЧКА АНАЛИЗА ПРОЦЕСА СТАРЕЊА  
БУНАРА СА ХОРИЗОНТАЛНИМ ДРЕНОВИМА  
НА БЕОГРАДСКОМ ИЗВОРИШТУ ПОДЗЕМНИХ ВОДА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, 30. 03. 2023. године

---

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.