

Definisanje hidrauličkih karakteristika drenova na primerima bunara beogradskog izvorišta podzemnih voda

DUŠAN POLOMČIĆ¹, DJORDJIJE BOŽOVIĆ², DRAGOLJUB BAJIĆ¹

APSTRAKT

Cilj rada je sagledavanje mogućnosti definisanja hidrauličkih karakteristika drenova na način koji ne podrazumeva prethodnu izradu hidrodinamičke analize simulacijom uslova eksploatacije podzemnih voda na numeričkom modelu. Prvi korak u predloženom pristupu predstavlja analiza režima nivoa podzemnih voda koji se formira u neposrednoj zoni i pod uticajem rada bunara, a koji ukazuje na funkcionalno stanje drenova i potencijal vodonosne sredine u pogledu raspoloživih količina podzemnih voda. U nastavku se analizira efikasnost drenova preko hidrauličke funkcije prifilterske zone, u zavisnosti od njenih filtracionih svojstava. Preko izraza za doticaj vode iz izdani u drenove (kojim se najčešće simuliraju drenovi na hidrodinamičkim modelima), definisane su reprezentativne vrednosti koeficijenta propusnosti prifilterske zone (kao pokazatelja njihove kolmiranosti) na primeru više analiziranih bunara beogradskog izvorišta podzemnih voda. Sprovedeno istraživanje ukazuje da se vrednost koeficijenta propusnosti drenova od $[K_{\text{prif}}/d]=1,0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ može smatrati graničnom vrednošću u odnosu na koju se ispoljavaju efekti kolmiranosti drenova, što je u saglasnosti sa rezultatima istraživanja autora koji su ispitivali uticaj propusnosti prifilterske zone na pojavu i karakter tzv. ranog sniženja kod horizontalnih bunara. Osim upoznavanja aktuelnog stanja drenova, predstavljenim pristupom se može pratiti napredovanje procesa kolmiranja drenova u različitim vremenskim trenucima, kao i kvantifikovani efekti regeneracije drenova.

Cljučne reči: bunar sa horizontalnim drenovima, režim nivoa podzemnih voda, prifilterska zona, koeficijent propusnosti drena

SUMMARY

Key words: radial collector well, groundwater level regime, skin zone, conductance coefficient

1. Uvod (aktuelno stanje bunara i eksploatacije podzemnih voda na beogradskom izvorištu)

Na beogradskom izvorištu podzemnih voda danas postoji 99 bunara sa horizontalnim drenovima i 47 vertikalnih, cevastih bunara (slika 1). Eksploatacija preko bunara sa horizontalnim drenovima učestvuje sa više od 90% u ukupnom zahvatanju podzemnih voda.

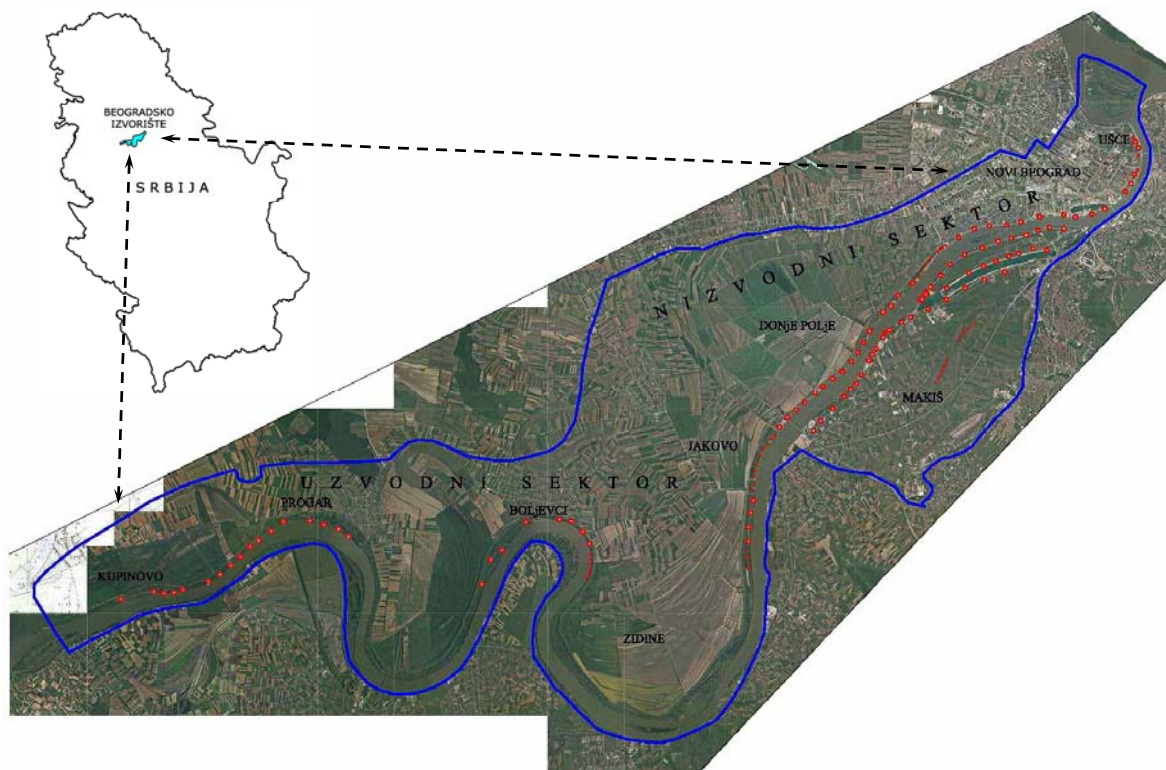
Proces starenja bunara je pojava koja prati eksploataciju podzemnih voda od samog početka njihove izgradnje, početkom 50-tih godina prošlog veka (Dimkić *et al* 2011a, Dimkić *et al* 2011b, Polomčić 2000). Tokom vremena eksploatacije, postepeno se odvijalo propadanje drenova, a samim tim i smanjenje kapaciteta bunara. Proizvodnja potrebnih količina pijaće vode je obezbeđivana stalnim sniženjem nivoa vode u šahtovima bunara (tj. sve intenzivnijim režimom eksploatacije), dok se povremenim mehaničkim regeneracijama drenova nastojao usporiti trend opadanja kapaciteta. U protekloj deceniji,

smanjenje eksploatacije podzemnih voda je imalo konstantan trend od oko 100 l/s godišnje, uprkos merama regeneracije.

U periodu hidrološkog minimuma na reci Savi, od sredine jula do sredine oktobra meseca 2015. godine, nivo vode u koritu reke je generalno bio ispod kote 70 mnm (na vodomernoj stanici „Beograd“, kod ušća Save u Dunav), što predstavlja vodostaj 95% obezbeđenosti. Pri ovakvim hidrološkim uslovima registrovana je rekordno niska eksploatacija podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima – svega oko 3 m³/s. Ostvarena je kao posledica veoma niskih nivoa podzemnih voda u bunarskim šahtovima. U slučaju 96 aktivnih bunara, nivo vode unutar vodosabirnih šahtova se u proseku nalazio na 4,75 m iznad drenova. Najveće sniženje nivoa je registrovano u šahtu bunara RB–28, gde je stub vode bio visok svega 1,0 m iznad utisnutih drenova.

¹ Rudarsko–geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Departman za hidrogeologiju, Đušina 7, Beograd, Srbija, E-mail: dusan.polomcic@rgf.bg.ac.rs; dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs

² JKP Beogradski vodovod i kanalizacija, Deligradska 28, Beograd, Srbija. E-mail: djbozovic@gmail.com



Slika 1: Granice beogradskog izvorišta podzemnih voda

Za vreme trajanja hidrološkog perioda niskih voda Save, prosečan kapacitet bunara je bio svega oko 30 l/s. Na više od 20% bunara, kapacitet je bio manji od 10 l/s, dok je isti procenat bunara imao kapacitet veći od 60 l/s. Svega tri bunara su imala kapacitet iznad 100 l/s.

Stanje sa drenovima je takvo da je od oko 800 utisnutih drenova približno jedna trećina duže vreme isključena iz eksploatacije, iz razloga krupnih oštećenja filterskih cevi i gubitka vodoprijemne funkcije. Na trećini je konstatovano manje ili veće skraćivanje dužine, oštećenja na filterskoj konstrukciji, zapunjenost materijalom prifilterske zone i vertikalna devijacija. Tako da danas svega jedna trećina od ukupnog broja utisnutih drenova ima dužinu blisku početnoj, zbog čega se smatra da su u dobrom stanju (iako su i neki od njih kolmirani i smanjene vodoprijemne sposobnosti, što se otklanja regeneracijom).

Predstavljeno stanje objekata i eksploatacije podzemnih voda ukazuje da je neophodno pristupiti sistematskoj sanaciji bunara na beogradskom izvorištu, kojom bi već sada bila obuhvaćena gotovo polovina od ukupnog broja izgrađenih bunara. Objektivno, moguće je revitalizovati 4–5 bunara na nivou jedne godine, zbog čega će period sanacije trajati čitavu jednu deceniju. Za to vreme će doći do pogoršanja stanja

jednog broja bunara koji danas imaju kapacitet veći od prosečnog, tako da će i na njima biti potrebno zameniti drenove. Ovo govori da zamena drenova ubuduće može predstavljati kontinualnu aktivnost u cilju obezbeđenja stabilnog vodosnabdevanja, kao što su to do sada bile regeneracije.

2. Kriterijumi selekcije bunara za sanaciju

Izbor i adekvatno rangiranje bunara „kandidata“ za sanaciju se ne može zasnivati samo na poznavanju postojećeg stanja njihovih drenova. Zaključak da su drenovi na nekom bunaru nefunkcionalni i da je gubitak kapaciteta na njemu drastičan, ne može predstavljati dovoljnu osnovu za pokretanje aktivnosti na projektovanju rešenja sanacije i obezbeđenju materijalnih sredstava za njenu realizaciju.

Pored poznavanja stanja vodozahvatnog objekta, neophodno je poznavati i osnovne prirodne odlike i uslove prihranjivanja vodonosne sredine u neposrednom okruženju bunara. Samo ovakvim pristupom u rešavanju aktuelnog pitanja stanja vodozahvatnih objekata na beogradskom izvorištu podzemnih voda može se vršiti izbor bunara na kojima je tehno–ekonomski opravdano utisnuti nove drenove, kao i rangiranje bunara

prema očekivanim rezultatima u pogledu povećanja kapaciteta.

Ukoliko je potencijal lokacije na kojoj je bunar izgrađen skroman, i valjano projektovano i izvedeno utiskivanje novih drenova neće dovesti do zadovoljavajućeg rezultata u pogledu povećanja kapaciteta bunara u odnosu na period pre sanacije (ΔQ , iskazan u okviru projektne dokumentacije). U cilju obezbeđenja potrebne količine pijaćih voda, biće potrebno revitalizovati još jedan bunar. Dakle, osim što će realizovana investicija biti samo delimično opravdana ostvarenim rezultatima, biće potrebno i da se ponovi, tj. da se udvostruči.

Sanacija drenova na bunarima beogradskog izvorišta u prethodnom periodu (na 6 bunara u periodu od 2005–2009. i na jednom početkom 2016. godine) je ukazala da ova aktivnost zahteva ulaganje značajnih finansijskih sredstava, kao i da je cena izvođenja radova generalno ista za sve bunare. Kako izdan u kojem je formirano izvorište vodosnabdevanja Beograda odlikuje velika heterogenost u pogledu raspoloživih količina podzemnih voda na lokacijama na kojima su izgrađeni bunari, to i rezultat zamene drenova na bunarima mogu biti (iskustvo potvrđuje i da jesu), sasvim različiti ostvareni kapaciteti.

Prioritet u sanaciji bunara na beogradskom izvorištu treba dati onim vodozahvatnim objektima, odnosno onoj vodonosnoj sredini prisutnoj na lokacijama bunara, čiji je potencijal za ostvarivanje značajnijih kapaciteta nakon sanacije veći. Ovakav pristup je zasnovan na tome da prvi cilj sanacije bunara treba da bude zaustavljanje trenda (sada već krajnje alarmantnog) pada eksploatacije podzemnih voda, a potom i njeno podizanje i održavanje na potrebnom nivou.

Najvažnije podloge koje čine osnovu za projektovanje sanacije bunara su informacije o:

- bunaru: koti utiskivanja, broju i stanju aktivnih drenova, istorijatu i efektima eksploatacije, radnim nivoima, efektima sprovedenih regeneracija;
- geološkoj građi i hidrogeološkim odlikama terena: litostratigrafskom i granulometrijskom sastavu deponovanih klastičnih sedimenata, filtracionim karakteristikama, geometriji usecanja korita reke u vodonosnu sredinu;
- hidrodinamičkim uslovima: kvalitetu hidrauličkog kontakta korita reke i izdani, intenzitetu prihranjivanja iz pravca reke i zaleđa, režimu izdani, lokalnim hidrauličkim gubicima na drenovima (prema Dimkić *et al* 2011b, Dimkić & Pušić 2014);
- hidrohemijskom i mikrobiološkom sastavu podzemnih voda: sadržaju gvožđa, rastvorenog

kiseonika, redoks potencijalu, intenzitetu aktivnosti određenih vrsta bakterija.

Do ovih informacija se dolazi realizacijom različitih vrsta istražnih radova i analiza.

Količina podzemnih voda koja se zahvata bunarom je funkcija vodopropusnosti sedimenata (svih litostratigrafskih slojeva u vertikalnom preseku kvartarnih sedimenata, a ne samo onog/onih u kojem su utisnuti drenovi) i uslova prihranjivanja vodonosne sredine kroz koju se vrši kretanje podzemnih voda pod uticajem rada bunara, tehničkih karakteristika i stanja vodoprijemnih delova konstrukcije bunara, režima rada i dr.

Bez obzira na aktuelni kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima, eksploatacija se manifestuje formiranjem određenog dinamičkog nivoa podzemnih voda u zoni uticaja. Površina nivoa podzemnih voda u zoni bunara sa horizontalnim drenovima ima karakterističan trodimenzionalan izgled. Iz razloga aktuelnog broja i stanja drenova, nivoi izdani u okruženju bunara beogradskog izvorišta imaju izrazito prostorno nepravilne površine.

Merenje kapaciteta bunara i nivoa vode u šahtu, utvrđivanje aktuelnog stanja drenova (snimanjem podvodnom kamerom sa definisanjem vertikalne devijacije), analiza hemijskog i mikrobiološkog sastava određenog obima parametara i izrada svega dve do tri pravilno locirane pijezometarske bušotine, uz redovno sprovođenje monitoringa režima nivoa podzemnih voda, predstavlja dovoljan obim istražnih radova potrebnih za upoznavanje stanja svakog od bunara i potencijala lokacije na kojoj su izgrađeni. Na bunarima odabranim za revitalizaciju drenova na ovaj način, u narednim fazama istraživanja (hidrodinamičkom simulacijom uslova režima osmatranih u dužem periodu) bi se vršilo detaljnije upoznavanje prisutnih uslova.

Navedenim pristupom se postiže racionalnije upravljanje istražnim radovima, odnosno troškovima, budući da svako istraživanje iziskuje utrošak određenih materijalnih sredstava, a realnost je takva da ista nije uvek lako obezbediti. Podjednako značaja je i to da se izvorište ravnomerno „pokriva“ istraživanjima, za razliku od realnog stanja gde za pojedine bunare godinama unazad postoje podloge dovoljne za projektovanje sanacije, dok se kod drugih ne poznaju ni litološki sastav sredine ili pijezometarski nivoi.

3. Analiza režima nivoa izdani kao mehanizam selekcije bunara za sanaciju

Analizom režima nivoa izdani se dolazi do potrebnih informacija o, na primer, tome da li je potencijalni kapacitet lokacije bunara skroman ili značajan, kao i da li vodonosna sredina ima relativno nepovoljna, solidna ili veoma dobra filtraciona svojstva. Za prethodni izbor bunara nije neophodno znati da li je skroman potencijal lokacije posledica litološke slojevitosti sredine, prisustva slabije propusnih proslojaka, anizotropije, smanjenog prihranjivanja iz pravca korita reke, uticaja okolnih bunara i dr. Upoznavanje takvih detalja biće zadatak daljih istraživanja, kada analizirani bunar dođe u fazu projektovanja sanacije (a prethodno budu revitalizovani svi bunari sa većim potencijalom za ostvarivanje značajnijeg kapaciteta). Ili, za izbor bunara je dovoljno utvrditi da li su drenovi kolmirani i ako jesu u kojoj meri. U okviru narednih aktivnosti bi se utvrdilo da li je kolmiranje drenova dominantno mehaničke ili biohemijske prirode.

Analizom funkcionalne celine „bunar sa horizontalnim drenovima – vodonosna sredina“ dobija se osnova za:

- donošenje odluka u pogledu aktivnosti koje treba preduzimati u cilju poboljšanja stanja bunara i izvorišta u celini,
- takvu selekciju bunara koja omogućava da se značajna sredstva koja je potrebno obezbediti za sanaciju utroše u početku na onim bunarima na kojima je moguće postići veći kapacitet kako bi se zaustavio trend opadanja eksploatacije podzemnih voda na izvorištu i osiguralo uredno vodosnabdevanje Beograda, a potom i na ostalim objektima na kojima je moguće ostvariti zadovoljavajuć i stabilan kapacitet (drugim rečima, umanjuje se rizik od dobijanja ograničenih ili negativnih rezultata),
- davanje preliminarne ali objektivne ocene kapaciteta lokacije/resursa podzemnih voda, kao i prognoze efekata utiskivanja novih drenova (kapaciteta bunara nakon sanacije, podrazumevajući pri tom uslov kvalitetnog izvođenja radova) i
- definisanje lokalnih hidrauličkih otpora na drenu (filteru i prifilterskoj zoni), kao i hidrauličkih karakteristika postojećih drenova.

4. Definisanje hidrauličkih karakteristika drenova

Koeficijent propusnosti drene ili koeficijent otpora drene $[K_{prif}/d]$, je parametar od najvećeg značaja za analizu uslova rada bunara sa horizontalnim drenovima. Preko njega se može sagledati efikasnost drenova, odnosno utvrditi u

kojoj meri su oni hidraulički funkcionalni (čime omogućavaju eksploataciju podzemnih voda) ili zatvoreni procesom kolmiranja, neadekvatnim izvođenjem radova na utiskivanju i razradi drenova, karakteristikama filterskih cevi i zasipa (čime je aktivno sprečavaju). U tom smislu, hidraulička uloga prifilterske zone, tzv. *skin effect* (Feng & Zhan 2016, Yeh & Chang 2013, Pasandi *et al* 2008, Yeh & Yang 2006, Barrash *et al* 2006, Kawecki 2000) može biti negativna ili pozitivna.

Do vrednosti koeficijenta propusnosti drenova se dolazi definisanjem filtracionih karakteristika prifilterske zone (reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije), iako on suštinski odražava meru hidrauličkih otpora koji nastaju na filterskoj konstrukciji drene i u njegovoj prifilterskoj zoni. Kvantifikacijom ovog parametra tokom vremena se prati napredovanje samog procesa starenja bunara.

Neophodan uslov za definisanje vrednosti koeficijenta propusnosti drenova, kao pokazatelja njihove efikasnosti, je postojanje pijezometra (sa filterom male dužine, do 1 m, postavljenim na dubini na kojoj su utisnuti drenovi), koji treba biti izgrađen što je moguće bliže samom drenu (do 1 m udaljenosti). Očigledno, potreban je oprez prilikom izvođenja istražnog bušenja za potrebe izrade pijezometra, kako ne bi došlo do oštećenja filterske konstrukcije drene (horizontalne devijacije drenova se po pravilu ne poznaju, ali je racionalno očekivati da postoje).

Poželjno je da se merenjima utvrdi pojedinačni kapacitet drenova u uslovima redovne eksploatacije (postavljanjem hidrometrijskog krila na početku drene), jer se na taj način može odrediti koeficijent propusnosti svakog od aktivnih drenova na jednom bunaru. U suprotnom, do približnog kapaciteta drenova se dolazi iz odnosa kapaciteta bunara i broja funkcionalnih drenova, uz analizu nivoa izdani kao indikativnog pokazatelja intenziteta eksploatacije.

U slučaju da adekvatan osmatrački objekat postoji, vrednost koeficijenta propusnosti drene se može odrediti prema izrazu koji se koristi za simulaciju graničnog uslova „dren“ u savremenoj hidrodinamičkoj analizi, odnosno matematičkom modeliranju kretanja podzemnih voda pod uticajem bunara sa horizontalnim drenovima (Božović *et al* 2015, Dimkić *et al* 2011c, Lee *et al* 2010, Mohamed & Rushton 2006, Bakker *et al* 2005, Park & Zhan 2002):

$$q = 2\pi L [K_{prif}/d](H_{BP} - H_{RB}) \quad [1]$$

pri čemu je:

$$2\pi L = \omega \quad i \quad [K_{prif}/d](H_{BP} - H_{RB}) = v$$

i gde su:

- q doticaj iz vodonosne sredine u dren (m^3/s)
- r poluprečnik drena (m)
- L utvrđena ili pretpostavljena dužina drena (m)
- K_{prif} koeficijent filtracije prifilterske zone (m/s)
- d debljina prifilterske (kolmirane) zone (m)
- H_{BP} nivo izdani u pijezometru pored drena (mm)
- H_{RB} nivo u bunarskom šahtu (mm)
- ω površina filterskog dela drena (m^2)
- v filtraciona brzina na konturi drena (na kontaktu prifilterske zone i filterske cevi) (m/s)

Napomena: Filtraciona brzina (eng. *approach velocity*) predstavlja Darsijevu brzinu, tj. filtracioni proticaj, a ne realnu brzinu kretanja podzemnih voda u analiziranoj zoni neposredno uz filtersku konstrukciju. Stvarna brzina kretanja podzemnih voda u prifilterskoj zoni (najčešće se podrazumeva i računa kao srednja linearna brzina), se dobija iz odnosa veličine doticaja u dren i poroznosti zone.

Evidentno je da se u slučaju hidrauličkih karakteristika drenova zapravo radi o definisanju hidrogeološke funkcije prifilterske zone, odnosno mere u kojoj ona predstavlja barijeru infiltraciji podzemnih voda iz izdani u drenove. Na osnovu Darsijevog zakona, intenzitet razmene podzemnih voda između vodonosne sredine i drena (određene dužine i prečnika), za razliku u pijezometarskim nivoima unutar drena i neposredno sa njegove spoljašnje strane predstavlja upravo funkciju vodopropusnosti prifilterske zone. Razlika u pijezometarskim nivoima koja se ostvaruje na putu kretanja podzemnih voda kroz prifiltersku zonu se može definisati kao lokalno sniženje nivoa (Dimkić & Pušić 2014).

Hidraulička „geneza“ i funkcija sedimenata prifilterske zone drenova je analogna sa naslagama istaloženim na dnu rečnog korita vodotoka, koje uslovljavaju intenzitet prihranjivanja izdani na račun infiltracije površinskih voda, a koja imaju slabija filtraciona svojstva od sedimenata vodonosne sredine sa kojima su u fizičkom kontaktu (Lee *et al* 2010, Sun & Zhan 2006, Polomčić 2001). Zbog toga, formiranje prifilterske zone slabijih filtracionih svojstava oko drenova po pravilu ima negativan uticaj na rad bunara.

U nastavku će biti predstavljeno definisanje vrednosti koeficijenta propusnosti drenova na bunarima koji su odabrani kao reprezentativni za analizu karakterističnih režima nivoa izdani u zoni bunara na beogradskom izvorištu, kao i poređenje dobijenih rezultata sa vrednostima dobijenim

ispitivanjima na detaljnim hidrodinamičkim modelima (Božović *et al* 2016).

Prvi primer je vezan za bunar RB–7m, na kojem su četiri otvorena drena u lošem stanju (oštećenih filterskih konstrukcija i zapunjeni materijalom sredine) i uz to kolmirani, što se prepoznaje po malom kapacitetu bunara, veoma niskom/oborenem radnom nivou vode u šahtu i visokom nivou podzemnih voda u zoni lepeze drenova. Za dren koji je praktično u čitavom profilu zapunjen na samom ulazu iz vertikalnog betonskog šahta se može usvojiti da ne učestvuje u eksploataciji podzemnih voda. Prema analizi režima nivoa izdani, ravnomerno sniženje nivoa u pijezometrima u zoni bunara upućuje na zaključak da je pojedinačni kapacitet drenova približno isti. Pretpostavku ekvivalentnih kapaciteta drenova uslovno može podržati i njihova zajednička odlika u pogledu lošeg stanja.

Upotrebom izraza [1], za npr. uslove režima konstatovane na dan 27.02.2014., kada je merenjem utvrđen kapacitet bunara od $Q=20$ l/s ($q\approx 6,65$ l/s), pri nivou u šahtu na koti $H_{RB}=55,88$ mm, za nivo podzemnih voda u pijezometru RB–7m/P–3 na koti $H_{BP}=68,15$ mm (koji se nalazi između aktivnih drenova br. 1 i br. 2) i uz pretpostavku da su drenovi zadržali najveći deo početne dužine, dobija se koeficijent propusnosti: $[K_{prif}/d]=2,6\times 10^{-5}$ s⁻¹. Vrednost dobijena na ovaj način je slična vrednosti do koje se došlo simulacijom uslova eksploatacije podzemnih voda na detaljnom hidrodinamičkom modelu (Božović *et al* 2016): $[K_{prif}/d]=2,5\times 10^{-5}$ s⁻¹.

Kako dužine drenova na mnogim bunarima nije moguće utvrditi, njihova hidraulički aktivna dužina se mora pretpostaviti. To znači da se pored pretpostavljenog kapaciteta drena u proračun ulazi i sa pretpostavljenim vrednostima njegove dužine, čime se stepen greške dobijenih rezultata uvećava. U tom slučaju je racionalnije primeniti drugačiji pristup, kojim se definiše reprezentativna vrednost svih aktivnih drenova preko poznatog kapaciteta bunara, a ne pojedinačna za svaki od drenova. Njegova primena je moguća samo u slučaju da se u pijezometrima registruju približno jednaki dinamički nivoi izdani. Tako relacija [1] dobija izgled:

$$Q = 2\pi L_{uk} [K_{rep. prif}/d](H_{BP} - H_{RB}) \quad [2]$$

$$\text{pri čemu } \omega \text{ postaje: } 2\pi L_{uk} = \omega_{uk}$$

i gde su:

- Q kapacitet bunara (m^3/s)
- L_{uk} ukupna dužina aktivnih drenova (m)
- $K_{rep. prif}$ reprezentativni koeficijent filtracije prifilterske zone aktivnih drenova (m/s)

ω_{uk} ukupna vodoprijemna površina aktivnih drenova (m^2)

Drugi primer se odnosi na bunar RB-42, na kom su poslednjih desetak godina evidentni efekti procesa kolmiranja. Kolmiranje je prisutno od poslednje regeneracije drenova (2004. godine). Nepovoljni hidrohemijski uslovi, istorijat eksploatacije i efekti mera održavanja ovog bunara ukazuju da je od samog početka uključanja u vodozahvatni sistem njegov rad bio praćen konstantnim opadanjem kapaciteta. Budući da se drenovi nalaze pod uticajem procesa kolmiranja, efekti kolmiranja u pogledu smanjenja koeficijenta propusnosti prifilterske zone su analizirani za dva vremenska stanja, sa tri godine međusobnog razmaka.

Početak novembra meseca 2011. godine nivo vode u šahtu se nalazio na koti $H_{RB}=53,80$ mm, što je rezultiralo kapacitetom od $Q=21,6$ l/s. Kao posledica ovakve eksploatacije, nivo izdani u piježometru Prb-42-1 se nalazio na koti $H_{BP}=62,23$ mm. Ukupna dužina tri drena, koji su zadržali najveći deo početne dužine, je $L_{uk}=125$ m. Koeficijent propusnosti, tj. kolmiranosti drenova u ovim uslovima ima vrednost $[K_{rep, pri}/d]=3,25 \times 10^{-5} s^{-1}$.

Tri godine kasnije, krajem oktobra 2014. godine, konstatovano je sledeće stanje: kapacitet bunara $Q=13,6$ l/s, nivo u šahtu $H_{RB}=55,49$ mm, nivo u piježometru Prb-42-1 $H_{BP}=67,06$ mm, dužina drenova nije promenjena. Vodoprijemna sposobnost drenova je tokom analiziranog perioda smanjena do vrednosti $[K_{rep, pri}/d]=1,50 \times 10^{-5} s^{-1}$. Dakle, promena vrednosti koeficijenta propusnosti drenova potvrđuje da se kapacitet bunara smanjuje kao posledica kolmiranja, zbog čega nivoi podzemnih voda u zoni bunara rastu.

Pristup poređenja vrednosti dobijenih proračunom za dva vremenska preseka se može primeniti i kod analize efekata sprovedene mehaničke regeneracije drenova.

Hidraulički gubici na drenovima predstavljaju samo jedan (vremenski promenljiv) deo ukupnih gubitaka koji nastaju pri kretanju podzemnih voda pod uticajem rada bunara (od konture na određenoj udaljenosti od bunara na kojoj uticaj eksploatacije prestaje, sve do ulaska u vode filtersku cev). Analizom režima nivoa podzemnih voda u zoni lepeze drenova bunara na beogradskom izvorištu, primećeno je da kada se filtracione karakteristike prifilterske zone drenova ne razlikuju značajno u odnosu na reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije litostratigrafskog

sloja u kojem su utisnuti drenovi, gubici koji nastaju u prifilterskoj zoni ne utiču značajno na pojavu dodatnih otpora, a samim tim ni na uslove rada bunara. To znači da prifilterska zona, u smislu tankog sloja smanjenog koeficijenta propusnosti koji hidraulički razdvaja dren i vodonosnu sredinu, kako je predstavljaju Park & Zhan (2002), suštinski ne postoji. Takvi uslovi su prisutni u prvo vreme nakon uspešno sprovedene mehaničke regeneracije starih drenova, pri dobroj usklađenosti karakteristika novoutisnutih drenova sa poroznom sredinom, kao i u slučaju postojećih drenova na kojima nisu vidljivi efekti procesa kolmiranja.

Analizom osetljivosti sniženja nivoa podzemnih voda (tzv. ranog sniženja, neposredno nakon uključanja bunara) u zavisnosti od vrednosti koeficijenta propusnosti prifilterske zone na hipotetičkom modelu, autori Park & Zhan (2002) su definisali određenu graničnu vrednost. Istraživanje koje su sprovedeli je pokazalo da se pri vrednosti koeficijenta filtracije prifilterske zone većoj od $[K_{pri}/d]=1,0 \times 10^{-4} s^{-1}$, uticaj prifilterske zone može zanemariti.

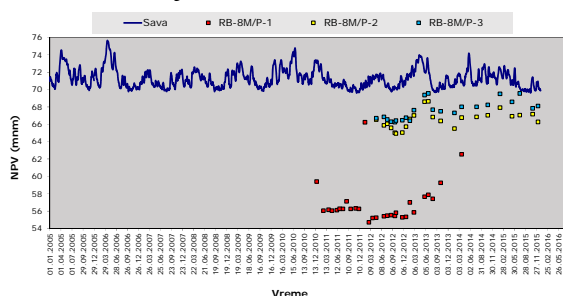
Za analizu rada bunara u realnim uslovima beogradskog izvorišta podzemnih voda, važno je utvrditi da li je navedena vrednost odgovarajuća, kao i da li se izrazima [1] i [2] može odrediti vrednost koeficijenta filtracije vodonosne sredine. Analiza hidrauličkih karakteristika drenova koji nisu (ili nisu u značajnijoj meri) pod uticajem procesa kolmiranja je predstavljena na primerima bunara RB-46 i RB-8m.

Analiza hidrauličkih karakteristika drenova bunara RB-46 je sprovedena za stanje režima registrovano u aprilu 2012. godine. Uslovi su sledeći: kapacitet bunara $Q=21,0$ l/s, nivo u šahtu $H_{RB}=55,22$ mm, nivo izdani u piježometru RB-46/P-1 (koji registruje najniže nivoe) na koti $H_{BP}=59,94$ mm, pretpostavljena dužina filterskog dela drena broj 8 $L=20$ m. Za date uslove, vrednost koeficijenta propusnosti analiziranog drena iznosi $[K_{pri}/d]=1,35 \times 10^{-4} s^{-1}$. Slična je vrednosti dobijenoj hidrodinamičkim ispitivanjima na modelu: $[K_{pri}/d]=1,25 \times 10^{-4} s^{-1}$ (Božović *et al* 2015). Reprezentativna vrednost koeficijenta filtracije sloja u kojem su utisnuti drenovi u zoni bunara RB-46 je na formiranom modelu kalibrisana na vrednost $K=1,0 \times 10^{-4} m/s$.

Poslednji primer se odnosi na bunar RB-8m. Nivo vode u šahtu bunara je godinama održavan oko kote 53,20 mm, što znači na 4 m iznad drenova. Evidentno, radni nivo vode u šahtu je veoma nizak, zbog čega bunar radi u prenapregnutom stanju. Kao rezultat ovakvog režima bunara ostvarivan je kapacitet od 35–40 l/s.

Na bunaru su nakon regeneracije u januaru 2012. godine ostala otvorena četiri drena. Snimanjem podvodnom kamerom je utvrđeno da dužina filterskih cevi iznosi 165 m, odnosno da su zadržali prvobitnu dužinu. Stanje filterskih konstrukcija je veoma loše.

Pri niskom nivou vode u šahtu, u neposrednom okruženju bunara nivoi podzemnih voda, osmatrani preko tri piježometra, se nalaze na različitim dubinama (slika 1). Svakako, registrovani nivoi su u funkciji udaljenja piježometara od drenova, kao i količine voda koju drenovi zahvataju.



Slika 1: Nivoi podzemnih voda u zoni RB-8m

Sa slike 1 se može uočiti da su krajem 2012. godine, sa porastom vodostaja Save, nastali takvi uslovi za konstruktivne karakteristike drenova koje pojedini od njih nisu mogli izdržati, zbog čega je došlo do zarušavanja. Ono je, očekivano, dovelo do smanjenja kapaciteta bunara, koji je od tada u konstantnom opadanju. Iz ovog razloga je za analizu koeficijenta propusnosti drenova odabrano stanje iz oktobra 2012. godine, budući da je ono poslednje reprezentativno pre promene režima.

Piježometarski nivo u osmatračkom objektu RB-8m/P-1, koji registruje najniže nivoe i koji je izgrađen neposredno uz dren broj 3, je duže vreme oscilovao između kota 55-56 mm. Kao posledica poslednje faze propadanja drenova, započete krajem 2012. godine, nastupa kontinualni porast nivoe (do kote 62,5 mm).

Za analizirane uslove iz oktobra 2012. godine, razlika od 2 m između nivoe u piježometru RB-8m/P-1 i nivoe u šahtu bunara ukazuje da je dren hidraulički otvoren, tj. da nije značajno kolmiran. Drugačije ne bi mogao da ostvari tako veliko sniženje nivoe u odnosu na kvazistatički nivo (oko 12 m), kao ni da obezbedi značajno učešće u sumarnom kapacitetu bunara. Da dren nije kolmiran govori i to da pre i posle regeneracije nije značajnije promenjen piježometarski nivo na njegovoj lokaciji (< 1 m), kao ni kapacitet bunara ($\Delta Q \approx 5$ l/s za isti radni nivo).

Vrednosti za proračun su sledeće: $Q=39,0$ l/s, nivo u šahtu $H_{RB}=53,30$ mm, nivo izdani u piježometru RB-8m/P-1 $H_{BP}=55,30$ mm, dužina filterskog dela drenova broj 3 $L=45,6$ m, kapacitet drenova nije poznat zbog čega se mora pretpostaviti.

Za procenu kapaciteta drenova se analizira stanje u ostalim piježometrima. Nivo u piježometru RB-8m/P-2, koji je izgrađen uz samu ivicu korita reke i između otvorenih drenova broj 1 i 2, ukazuje da ni njima nije značajnije promenjen kapacitet nakon regeneracije. Nivo u piježometru RB-8m/P-3, koji se nalazi u neposrednom zaleđu šahta, ukazuje da se on najmanje nalazi pod uticajem eksploatacije (registruje najviše nivoe).

Za potrebe definisanja hidrauličkih karakteristika drenova broj 3, usvojeno je da njegovo učešće u ukupnom izmerenom kapacitetu bunara iznosi $q \approx 15$ l/s. Vrednost koeficijenta propusnosti analiziranog drenova tada iznosi $[K_{prif}/d]=2,6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Iz razloga pretpostavljenog kapaciteta drenova, može se smatrati da vrednost reprezentativnog koeficijenta filtracije vodonosne sredine u zoni ovog bunara nije veća od $K=3,0 \times 10^{-4}$ m/s. U suprotnom, ne bi moglo nastati značajno sniženje nivoe izdani koje je prisutno na konturi drenova kao posledica filtracije podzemnih voda kroz poroznu sredinu skromnih filtracionih karakteristika.

Zaključak

Realno stanje bunara beogradskog izvorišta je takvo da se kapacitet polovine bunara može povratiti samo utiskivanjem novih drenova, zbog čega je od najvećeg značaja izvršiti adekvatan izbor bunara za sanaciju.

Režim nivoe podzemnih voda u zoni bunara sa horizontalnim drenovima je indikativan pokazatelj funkcionalnog stanja drenova na bunarima i potencijala vodonosne sredine u pogledu raspoloživih količina podzemnih voda. Analiza režima predstavlja prethodni korak u upoznavanju funkcionalnog stanja drenova preko definisanja hidrauličke funkcije prifilterske zone.

Rezultati proračuna sprovedeni prema predloženim izrazima i upoređeni sa rezultatima dobijenim prethodnim istraživanjima na detaljnim hidrodinamičkim modelima, ukazuju da se hidrauličke karakteristike drenova mogu kvantifikovati sa stepenom pouzdanosti dovoljnim za analizu i praćenje aktuelnog stanja drenova, kao i za prethodni izbor bunara za sanaciju.

Utvrđeno je da se definisanjem koeficijenta propusnosti drenova za različite vremenske preseke može pratiti napredovanje procesa

kolmiranja, što predstavlja osnovu za iznošenje prognoza u pogledu daljeg pada kapaciteta ili procene uslova režima kada će na bunaru biti potrebno primeniti mere održavanja, tj. regeneracije drenova. Pored toga, definisanje vrednosti ovog parametra, pre i posle sprovedene regeneracije može služiti kao valjan pokazatelj kvantitativne ocene njenih efekata.

Rezultati ukazuju da granična vrednost propusnosti prifilterske zone horizontalnog bunara, predložena od strane autora Park & Zhan (2002), od $[K_{prif}/d]=1,0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, pokazuje dobru saglasnost sa koeficijentom kolmiranosti drenova u slučaju bunara beogradskog izvorišta podzemnih voda, zbog čega se kao takva može prihvatiti. U uslovima kada prifilterska zona ima koeficijent propusnosti manji od deklarisanе vrednosti (primeri bunara RB–7m i RB–42), efekti kolmiranja su sasvim evidentni. Kada prifilterska zona ima povoljnija filtraciona svojstva od usvojene vrednosti (primeri bunara RB–46 i RB–8m), njeni efekti na rad bunara i eksploataciju podzemnih voda su praktično zanemarljivi. U tom slučaju se koeficijent filtracije vodonosne sredine (litostratigrafskog sloja u kojem su utisnuti drenovi) načelno može smatrati ekvivalentnim sa vrednošću koeficijenta filtracije prifilterske zone.

Proveru dobijenih vrednosti i dalju analizu hidrauličke efikasnosti drenova treba vršiti u fazi projektovanja optimalnog rešenja sanacije drenova na odabranim bunarima. Ona treba biti realizovana izradom detaljnog hidrodinamičkog modela. Na ovaj način biće verifikovana ili dodatno kalibrisana početna vrednost koeficijenta filtracije vodonosne sredine, prethodno orijentaciono određena preko hidrauličkih karakteristika drenova koji nisu kolmirani.

Zahvalnica

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

Literatura

- BAKKER, M., KELSON, V.A., LUTHER, K.H. 2005. Multilayer Analytic Element Modeling of Radial Collector Wells, *Ground Water*, 43(6), pp. 926–934.
- 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*, vol. 326, pp. 181–198.

- BOŽOVIĆ, Dj., POLOMČIĆ, D. & BAJIĆ, D. 2015. Hydrodynamic simulation and analysis of groundwater regime as impacted by radial collector wells (a case study of Belgrade's water supply source). *Tehnika*, 70 (5), 777–786 (In Serbian, English Summary).
- BOŽOVIĆ, Dj., POLOMČIĆ, D. & BAJIĆ, D. 2016a. Hydrodynamic analysis of justifiability of placing the new laterals at greater depth in the aquifer of Belgrade groundwater source. *Vodoprivreda*, submitted (In Serbian, English Summary).
- DIMKIĆ, M., PUŠIĆ, M., VIDOVIĆ, D., PETKOVIĆ, A. & BORELI–ZDRAVKOVIĆ, Dj. 2011a. Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade Groundwater Source, part 1. *Water Science & Technology*, IWA Publishing, London, 63 (11): 2560–2566.
- DIMKIĆ, M., PUŠIĆ, M., OBRADOVIĆ, V. & DJURIĆ, D. 2011b. Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade Groundwater Source, part 2. *Water Science & Technology*, IWA Publishing, London, 63 (11): 2567–2574.
- DIMKIĆ, M., PUŠIĆ, M., VIDOVIĆ, D., ISAILOVIĆ, V., MAJKIĆ, B., FILIPOVIĆ, N. 2011c. Numerical Model Assessment of Radial–Well Aging. *ASCE's Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 25(1), pp. 43–49.
- DIMKIĆ, M., PUŠIĆ, M. 2014. Correlation Between Entrance Velocities, Increase in Local Hydraulic Resistances and Redox Potential of Alluvial Groundwater Sources. *Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management“*, ISSN 2217–5237, 4 (4), pp. 3–23, 2014.
- FENG, Q., ZHAN, H. 2016. Integrated aquitard–aquifer flow with a mixed–type well–face boundary and skin effect. *Advances in Water Resources*, vol. 89, pp. 42–52.
- KAWECKI, MW. 2000. Transient flow to a horizontal water well. *Ground Water*, vol. 38(6), pp. 842–850.
- LEE, E., HYUN, Y., LEE, K. 2010. Numerical modeling of groundwater flow into a radial collector well with horizontal arms. *Geosciences Journal*, vol. 14, pp. 403–414.
- MOHAMED, A., RUSHTON, K. 2006. Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model. *Journal of Hydrology*, vol. 329, pp. 98–109.
- PARK, E., ZHAN, H. 2002. Hydraulics of a finite–diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect. *Advances in Water Resources*, vol. 25, pp. 389–400.
- PASANDI, M., SAMANI, N., BARRY, DA. 2008. Effect of wellbore storage and finite thickness skin on flow to a partially penetrating well in a phreatic aquifer. *Advances in Water Resources*, vol. 31, pp. 383–398.
- POLOMČIĆ, D. 2000. Contaminant problems during the exploitation of groundwater sources. *Hydrogeological Research of Litosphere In Serbia, Project 1996–2000*. Institute of Hydrogeology,

- Faculty of Mining and Geology. Belgrade, pp. 197–207.
- ПОЛОМЋИЋ D. 2001. Hydrodynamic research, opening and management of groundwater sources in intergranular porous media. *University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology*, 196 pp.
- SUN, D., ZHAN, H. 2006. Flow to a horizontal well in an aquitard–aquifer system. *Journal of Hydrology*, vol. 321, pp. 364–376.
- ЎЕН, HD., CHANG, YC. 2013. Recent advances in modeling of well hydraulics. *Advances in Water Resources*, vol. 51, pp. 27–51.
- ЎЕН, HD., YANG, SY. 2006. A novel analytical solution for a slug test conducted in a well with a finite–thickness skin. *Advances in Water Resources*, vol. 29, pp. 1479–1489.

Резиме

Дефинисање хидрауличких карактеристика дрена на примерима бунара београдског изворишта подземних вода

Функционално стање дрена данас има доминантан утицај на капацитет бунара београдског изворишта подземних вода. Стање филтерских цеви и хидрауличке карактеристике прифилтерске зоне су основни разлог значајног снижења нивоа у шахтовима бунара и скромних капацитета бунара. Узрок оваквог стања је процес старења, који представља појаву која прати експлоатацију подземних вода на изворишту од самог почетка изградње овог типа водозахватних објеката, почетком 50–тих година прошлог века.

Током времена експлоатације, на већини бунара се, у мањој или већој мери, одвијало пропадање дрена услед корозије филтерских цеви и биохемијског колмирања дрена. Производња потребних количина пијаћих вода се и даље обезбеђује значајним снижењем нивоа воде у шахтовима (тј. све интензивнијим режимом експлоатације), што подразумева услове који доприносе даљој деградацији и искључењу дрена из експлоатације.

У протеклој деценији, смањење експлоатације подземних вода је имало константан тренд од око 100 l/s годишње, упркос мерама регенерације. Тренутно стање је такво да је просечан капацитет бунара са хоризонталним дренама око 30 l/s, док је укупна експлоатација преко 96 активних бунара свега око 3 m³/s (на нивоу на ком је била пре 45 година).

Овакво стање објеката и експлоатације подземних вода указује да је неопходно приступити систематској санацији бунара на београдском изворишту, којом би већ сада била обухваћена готово половина од укупног броја изграђених бунара. Адекватан избор и рангирање бунара који су кандидати за санацију представља најважнији услов за успешно решавање питања стања водозахватних објеката на изворишту и обезбеђења стабилног водоснабдевања Београда.

Без обзира на актуелни капацитет бунара, експлоатација се манифестује формирањем одређеног динамичког нивоа подземних вода у зони утицаја. Површина нивоа подземних вода у зони бунара са хоризонталним дренама има по правилу карактеристичан тродимензионалан изглед. Из разлога актуелног броја и стања дрена, као и хетерогеног литолошког састава и филтрационих одлика седимената водоносне средине, нивои издани у окружењу бунара београдског изворишта имају изразито просторно неправилне површине.

Управо је режим нивоа издани у непосредној зони бунара индикативан показатељ потенцијала водоносне средине у погледу расположивих количина подземних вода. Анализа режима нивоа уједно представља претходни корак у упознавању функционалног стања дрена, преко дефинисања коефицијента њихове пропусности.

Дефинисањем вредности коефицијента пропусности се може сагледати ефикасност дрена, односно утврдити у којој мери су они хидраулички функционални (чиме омогућавају експлоатацију подземних вода) или затворени процесом колмирања, неадекватним извођењем радова на утискивању и разради дрена, карактеристикама филтерских цеви и засипа (чиме је активно спречавају). Евидентно је да се у случају дефинисања хидрауличких карактеристика дрена заправо ради о дефинисању хидрогеолошке функције прифилтерске зоне, односно мере у којој она представља баријеру инфилтрацији подземних вода из издани у дрена.

У случају да непосредно уз дрен постоји изграђен адекватан осматрачки објекат, вредност овог хидрауличног параметра се може одредити према изразу који се користи за симулацију граничног услова „дрен“ у савременој хидродинамичкој анализи, тј. математичком моделирању кретања подземних вода под утицајем бунара са хоризонталним дренама. Израз је заснован на Дарсијевом

закону, према ком интензитет размене подземних вода између водоносне средине и дрена (одређене дужине и пречника), за разлику у пијезометарским нивоима унутар дрена и непосредно са његове спољашње стране представља функцију водопропусности прифилтерске зоне.

Квантификацијом и поређењем вредности коефицијента пропусности дрена за различите временске пресеке, може се пратити напредовање процеса колмирања на неком бунару, што представља основу за изношење прогноза у погледу даљег пада капацитета или процене услова када ће на бунару бити потребно применити мере одржавања, односно регенерације дрена. Додатно, дефинисање вредности овог параметра пре и после спроведене регенерације, може служити као квантитативан показатељ реалне оцене њених ефеката.

Резултати спроведених прорачуна указују да гранична вредност пропусности прифилтерске зоне хоризонталног бунара предложена од стране аутора Park & Zhan (2002) од $[K_{\text{pif}}/d]=1,0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, показује добру сагласност са коефицијентом колмираности дрена у случају анализираних бунара београдског изворишта, због чега се као таква може прихватити.

У условима када прифилтерска зона има коефицијент пропусности мањи од наведене вредности (примери бунара РБ–7м и РБ–42), ефекти колмирања су сасвим евидентни. Када прифилтерска зона има повољнија филтрациона својства од декларисане вредности (примери бунара РБ–46 и РБ–8м), њени ефекти на рад бунара и експлоатацију подземних вода су практично занемарљиви. У том случају се коефицијент филтрације водоносне средине (литостратиграфског слоја у ком су утиснути дренави) начелно може сматрати еквивалентним са вредношћу коефицијента филтрације прифилтерске зоне.

Проверу добијених вредности и даљу анализу хидрауличке ефикасности дрена треба вршити у фази пројектовања оптималног решења санације дрена на одабраним бунарима. Она треба бити реализована израдом детаљног хидродинамичког модела. На овај начин биће верификована или додатно калибрисана почетна вредност коефицијента филтрације прифилтерске зоне, претходно оријентационо одређена представљеним изразом за дефинисање хидрауличких карактеристика дрена.