

Inovirana „budimpeštanska“ metoda revitalizacije bunara sa horizontalnim drenovima i mogu nosti njene primene na beogradskom izvorištu podzemnih voda

OR IJE M. BOŽOVI, JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, Beograd
 DUŠAN M. POLOM I, Univerzitet u Beogradu,
 Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
 DRAGOLJUB I. BAJI, Univerzitet u Beogradu,
 Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Pregledni rad
 UDC: 556.3:627.12(497.11)
 DOI: 10.5937/tehnika1605685B

Beogradsko izvorište podzemnih voda je suo eno sa rešavanjem složenog pitanja zaustavljanja daljeg opadanja kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima, što se može posti i zamenom dotrajalih drenova. Istraživanja koja su realizovana u prethodnom periodu su dala osnovu za pokretanje aktivnosti na revitalizaciji bunara. Jedno od pitanja na koje nije odgovoreno je kako prevazi i dosadašnje ograni enje konstrukcije bunara – plitko utisnute drenove. U Budimpešti se ve 15 godina uspešno primenjuje inovativni postupak revitalizacije po modifikovanoj Reni metodi. Drenovi se utiskuju ispod dna prvobitnog bunarskog šahta pri emu filterske cevi imaju mosti ave perforacije. Mogu nosti primene metode na beogradskom izvorištu su zna ajne.

Ključne reči: vodosnabdevanje, bunar sa horizontalnim drenovima, utiskivanje drenova

1. UVOD

Na beogradskom izvorištu podzemnih voda trenutno postoji 99 bunara sa horizontalnim drenovima (BHD) i 47 vertikalnih bušenih bunara. Bunari su izgra eni duž 55 km toka reke Save, uzvodno od njenog uš a u Dunav. Eksploatacija podzemnih voda je zasnovana na principu priobalne filtracije (eng. riverbank filtration). Budu i da obezbe uju više od 90% ukupne proizvodnje podzemnih voda, BHD ine okosnicu sistema eksploatacije podzemnih voda na beogradskom izvorištu.

Jedna od najvažnijih odlika beogradskog izvorišta podzemnih voda (može se re i i svojevrsni fenomen) je kompleksan proces permanentnog i intenzivnog opadanja kapaciteta bunara sa horizontalnim drenovima, u hidrogeološkoj nauci poznatog pod imenom „proces starenja bunara“ [1].

Tokom rada bunara, postepeno se odvijalo smanjenje broja aktivnih drenova i slabljenje njihovog vodoprijemnog potencijala, što je imalo za posledicu smanjenje eksploatacije podzemnih voda i njihovo sve

manje u eš e u ukupnom vodosnabdevanju grada [2]. Ovom pojavom se, sa razli itih aspekata sve do danas, bavio ve i broj institucija i istraživa a. Starenje bunara na beogradskom izvorištu je predisponirano prirodnim i antropogenim faktorima. Najzna ajniji antropogeni faktori su:

- injenica da su drenovi esto utisnuti plitko, tj. da nisu utisnuti u sloju najpovoljnijih filtracionih karakteristika,
- neadekvatan materijal izrade drenova i njegova negativna interakcija sa hemijskim i mikrobiološkim sastavom podzemnih voda,
- tehnologija formiranja drenova i tehni ke karakteristike filterskih cevi neprilago ene mehani kom sastavu vodonosne sredine u kojoj su utisnuti,
- neadekvatan režim eksploatacije bunara tokom decenija njihovog rada i dr.

U poslednjih deset godina eksploatacija podzemnih voda preko BHD je smanjena sa oko 4,5 m³/s na oko 3,5 m³/s, što govori da se na nivou jedne godine, kao direktna posledica starenja bunara, smanji u proseku za oko 100 l/s.

Prose an kapacitet BHD je trenutno oko 35 l/s, dok 15% bunara ima kapacitet manji od 10 l/s. Visok vodostaj reke Save, koja predstavlja glavni izvor prihranjivanja izdani, više nema o ekivani uticaj na

Adrea autora: or ije Božovi, JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, Beograd, Kneza Miloša 27

Rad primljen: 11.02.2016.

Rad prihva en: 04.04.2016.

povećanje proizvodnje vode, imaju i u vidu prirodu granicnog uslova „dren BHD“ [3].

Zaustavljanje daljeg opadanja kapaciteta bunara moguće je i jedino njihovom revitalizacijom utiskivanjem novih drenova [4]. Činjenica da se ne raspolaže tehničkim rešenjem koje bi omogućilo utiskivanje novih drenova na većoj dubini predstavlja objektivno ograničenje zahvatanju većih količina voda i usporavanju procesa starenja bunara.

Suočavajući se sa pitanjem opadanja kapaciteta BHD na budimpeštanskom izvoristu podzemnih voda, mađarski istraživači su postigli inovativno rešenje revitalizacije bunara, koje se uspešno primenjuje u praksi duže od jedne decenije [5], [6].

Cilj ovog rada je da detaljno predstavi mađarsku metodu revitalizacije bunara sa horizontalnim drenovima i da analizira uslove i mogućnosti njene primene na beogradskom izvoristu podzemnih voda, budući da su u pitanju vrlo slični hidrogeološki uslovi i slična vodoprivredna problematika. Takođe, namera je da se istraživačima u ovom smeru nauke i struke interesovanja nalazi ovaj tip vodozahvatnog objekta (a koji su izgrađeni i na drugim izvoristima podzemnih voda u Srbiji) pruži dovoljno informacija za istraživanje sa ciljem njene eventualne modifikacije u smislu prilagođavanja lokalnim hidrogeološkim uslovima terena u svakom konkretnom slučaju. Moguće je da bi se na ovaj način došlo do određenog teorijskog i praktičnog koncepta koji bi u budućnosti služio kao valjana, u ovom trenutku nedostajuća, osnova projektantima i izvođačima radova na uspešnoj revitalizaciji postojećih ili izgradnji novih bunara sa horizontalnim drenovima.

2. GEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ODLIKE IZVORIŠTA ZA VODOSNABDEVANJE BUDIMPEŠTE

Na širokom prostoru savremene aluvijalne doline Dunava, severno i južno od Budimpešte, deponovani su klastični sedimenti u kojima je formirana kaptirana izdan. Najveći deo bunara je izgrađen na rečnim ostrvima na Dunavu – Sentandrejskom ostrvu, Margitinom i Čepel ostrvu, a manjim delom na pojedinim lokacijama na jednoj ili obama obalama Dunava (slika 1) [7], [8].

Najvažniji deo vodozahvatnog sistema Budimpešte se nalazi na Sentandrejskom ostrvu (mađ. Szentendrei-sziget), neposredno severno od grada (dužina ostrva je oko 31 km, prosečna širina oko 2 km, površina oko 56 km²).

Ostrvo je sa istočne strane okruženo Dunavom, a sa zapadne njegovim rukavcem, Sentandrejskim Dunavom. Na njemu se vrši eksploatacija dve trećine ukupne proizvodnje vode (u proseku oko 4,5–5 m³/s).

Ujedno, ovo ostrvo je najveće pojedinačno izvoriste podzemnih voda u Evropi [9], [10].

Posle Sentandrejskog ostrva, najveći broj bunara je izgrađen na ostrvu Čepel (mađ. Csepel-sziget), koje se nalazi na samom južnom obodu Budimpešte i najveće ostrvo na reci Dunav u Mađarskoj (dužina ostrva je 48 km, širina 6–8 km, površina oko 257 km²). Granice ostrva su reka Dunav na zapadu i Dunavski kanal na istoku (pregrada i rukavac reke u kojem se vodostaj održava na generalno konstantnom nivou, slično jezeru na Adi Ciganliji u Beogradu) [11].



Slika 1 - Beogradsko i budimpeštansko izvoriste podzemnih voda u granicama Republike Srbije, odnosno Mađarske

Geološka građina terena budimpeštanskog izvorista je slična geološkom sastavu i sklopu terena beogradskog izvorista. Duboki paleoreljef savremene aluvijalne doline Dunava kod Budimpešte je predstavljen mezozojskim krečnjacima i dolomitima. Preko njih su nataloženi marinski glinovito-prašnasti sedimenti tercijarne (miocenske) starosti. Ove stene imaju funkciju hidrogeološkog izolatora i nepropusne podine aluvijalnim sedimentima Dunava, koji su deponovani direktno preko njih.

Aluvijalni sedimenti su stvarani u periodu kvartara. Krupnozrne, peskovito-šljunkovite naslage facije korita su deponovane tokom pleistocena, a sitnozrne sedimenti (peskovi, prašine i muljevi) savremenog korita Dunava tokom holocena. Prosečna debljina kvartarnih sedimenata je oko 20 m, od čega pleistocenskom kompleksu pripada oko 10 m. Eksploatacija podzemnih voda je vezana za ovaj kompleks. Završni ciklus sedimentacije predstavlja povlatu vodonosnoj sredini i obezbeđuje njenu zaštitu od zagađenja sa

površine terena. Ine ga recentni slabovezani prašino-glinoviti sedimenti, nastali u faciji povodnja. Debljina im je nešto manja u odnosu na povlatu u dolini Save, u proseku oko 2 m.

Sedimente vodonosne sredine odlikuju solidna filtraciona svojstva, dok tanak sloj slabo propusnog sedimenta po dnu reke nog korita predstavlja efikasan filter za prirodno poboljšanje kvaliteta infiltriranih rečnih voda. Horizontalni koeficijent filtracije varira u granicama $1 \cdot 10^{-4}$ m/s (za naslage izgrađene od srednjeznih peskova) do $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s (za dominantno šljunkovite naslage). Izdan je pod uticajem promene vodostaja u reci (kao i rukavcu i kanalu), eksploatacije podzemnih voda nizovima priobalnih vodozahvatnih objekata, kao i prihranjivanja na račun doticaja iz drugih izdani. Važna odlika budimpeštanskog izvorišta je to da podzemne vode ne prolaze kroz tretman na postrojenjima za preradu vode¹, kako bi se moglo oekivati, već se nakon elementarnog hlorisanja direktno distribuiraju potrošačima.

3. RAZVOJ VODOZAHVATNIH OBJEKATA NA BUDIMPEŠTANSKOM IZVORIŠTU

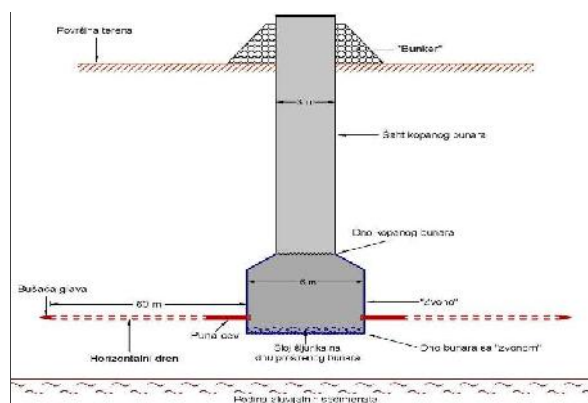
Danas se vodosnabdevanje Budimpešte (i 20-tak okolnih naselja oslonjenih na vodovod prestonice) zasniva u potpunosti na upotrebi podzemnih voda. Vodozahvatni sistem je koncipiran na infiltraciji površinskih voda reke Dunav, uvećanoj radom bunara, što je i suština procesa priobalne filtracije. Vodom se snabdeva oko dva miliona korisnika. Prosečna proizvodnja vode za piće u Budimpešti iznosi oko $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (neravnomernost se kreće u granicama $5,2\text{--}7,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Intenzivan razvoj Budimpešte, sa naglim povećanjem broja stanovnika i dinamičnom industrijalizacijom i modernizacijom privrede, je zahtevao pouzdano vodosnabdevanje. Obezbećenje potrebnih količina voda je prvobitno rešavano povećanjem broja bunara, a kada je to nije bilo dovoljno menjana je i njihova konstrukcija (više puta tokom 145 godina dugog centralizovanog vodosnabdevanja) (slika 2). Prvi period izgradnje bunara se odnosi na izradu 70 kopanih bunara, sa prečnikom konstrukcije od 3 m. Bunari su ranije plitki, do polovine debljine vodonosne zone.

Zahvatanje podzemnih voda se odvijalo kroz dno bunara. Nakon određene vremena ukupan kapacitet kopanih bunara je postao nedovoljan za potrebe konzuma, zbog čega se pristupilo njihovoj rekonstrukciji.

Rekonstrukcija je podrazumevala formiranje tzv. „zvona“ u izgrađenim kopanim bunarima (za ove bu-

nare je prisutan još jedan naziv koji je proistekao iz izgleda zemljanog nasipa oko nadzemnog dela konstrukcije: „bunkerasti“ bunari). Izvođenje „zvona“ se sastojalo od produbljivanja dna šahta do određene dubine (4–5 m ispod dna kopanog bunara) i povećanje prečnika u intervalu za koji je bunar produbljen. Smatralo se da će povećanje vodoprijemne površine dna bunara (kroz povećanje njegovog prečnika) obezbediti veći dotok vode u bunar, tj. povećati njegov kapacitet. Da bi se postiglo povećanje prečnika, vodonosna sredina radijalno oko produbljenog intervala je zamrzavana a potom je otkopavan njen materijal. Zamrzavanje tla je omogućavalo privremenu izmenu geotehničkih svojstava stena, prilikom čega bi one dobijale svojstva bliska koherentnim stenama. Početni prečnik kopanih bunara je na ovaj način povećan do prečnika 5, 6 ili 7 m.



Slika 2 - Šematski prikaz rekonstrukcije kopanog bunara

Novi period izgradnje bunara u Budimpešti je započeo izradom prvog bunara sa horizontalnim drenovima i trajao je sve do početka njihove savremene revitalizacije. Sa vertikalnim betonskim šahtom postavljenim uz samu liniju obale i horizontalnim drenovima ispod korita reke, većim površinama vodoprijemnih delova oni su ostvarivali znatno veće pojedinačne kapacitete od prvih dva tipa bunara. Samim tim, obezbeđivali su bolje iskorišćenje potencijala priobalne filtracije.

Poput bunara u Beogradu i u Budimpešti su Reni bunari ranije po modifikovanom postupku, zbog čega je metoda njihove izrade postala poznata pod imenom „budimpeštanska metoda“. Zajedničko za ove modifikacije originalne Reni metode je to da su drenovi utiskivani najpre radijalno, u okviru jedne lepeze. Dužina drenova je iznosila 50–60 m, od čega je puna cev imala dužinu 10 m. Perforacije na filteru su bile identične na svim izgrađenim bunarima: pravougaonog oblika, sa otvorima dimenzija 100·8 mm (u Beogradu: 80·6 mm). Reni bunari u Budimpešti, takođe, nisu ranije do podine kaptirane izdani, zbog čega nisu drenovi utisnuti u najperspektivnijem sloju. Kod

¹Izuzetak čini manji deo ostrva Čepel na kojem postoji potreba za tehnološkim procesom uklanjanja povišenog sadržaja gvožđa i mangana iz sirove vode.

njih betonski šaht ima prečnik 2 m (u Beogradu 4 m), zbog čega su poznati i kao „patuljasti“ bunari.

Nakon što je stečeno iskustvo utiskivanja novih drenova na Reni bunarima, došlo se na ideju da se drenovi utisnu i na bunarima sa „zvonom“. Postupak se sastojao u tome što je na dnu „zvona“ formiran sloj betona debljine 1 m, nakon čega su utiskivani drenovi (na isti način kao kod „patuljastih“ bunara).

Tokom više decenija rada bunara sa horizontalnim drenovima kontinuirano se odvijalo propadanje drenova, dominantno kao posledica korozije materijala od kojeg su izrađeni. Zahvaljujući i neadekvatnim dimenzijama otvora na filterskoj konstrukciji, a kasnije i pod uticajem korozije, eksploatacija bunara je sve vreme bila prava intenzivnim zapunjavanjem unutrašnjosti drenova i bunarskog šahta materijalom vodonojne sredine. Zid filterskih cevi je vremenom postajao sve tanji. Dolazilo je do proširivanja i spajanja pojedinačnih perforacija na filteru, što je stvorilo uslove i da krupniji materijal sredine dospe u dren. U jednom trenutku, pod uticajem težine sedimenata i vodenog stuba iznad dreva, dolazilo je do kolapsa na određenoj stacionaži i delimično skraćenja dreva. Mehanička regeneracija je izvođena ispiranjem drenova mlaznicom pod visokim pritiskom. Zbog narušenih konstruktivnih karakteristika ove pritiske drenovi nisu uvek mogli izdržati. Proces se nastavljao sve do trenutka kada je filterski deo dreva bio u potpunosti zarušen ili je unošenje materijala u šaht bilo nemoguće kontrolisati. Tada bi, jedan po jedan, drenovi bili zatvarani i isključivani iz eksploatacije. Kapacitet bunara je posledno opadao, što je vremenom ugrozilo i vodosnabdevanje. Samim tim su nastali uslovi za novi, četvrti po redu, period izgradnje/rekonstrukcije bunara.

4. INOVIRANA BUDIMPEŠTANSKA METODA REVITALIZACIJE BUNARA

Pred istraživače budimpeštanskog izvorišta podzemnih voda je bio postavljen kompleksan zadatak, da pronađu način (metodu, tehnologiju) revitalizacije bunara koji će omogućiti:

- da materijal od kojeg će biti izrađeni novi drenovi bude otporan na koroziju,
- da ima potrebnu vrstu u da izdrži pritiske prilikom utiskivanja kako ne bi došlo do deformacije i devijacije,
- da otvori na filteru imaju karakteristike koje omogućavaju efikasnu razradu i eksploataciju drenova,
- koji će minimalizovati uslove za nastanak procesa kolmiranja drenova,
- da revitalizacija bude jeftina.

Izbor materijala i veličina kao materijala za izradu drenova (punih cevi i filtera) je bio logičan, budući da

otklanja rizik od nastanka korozije, poseduje potrebnu vrstu u za ugradnju i obezbeđuje njihov „većinski“ radni vek.

Izbor tehnologije utiskivanja i tipa filterske konstrukcije nije bio tako jednostavan. Poznato je da su pored Reni postupka formiranja drenova, relativno često zastupljene i Felman (*Fehlmann*, prisutna od 1944.) i Projsag metoda (*Preussag*, prisutna od 1953. godine). Reni postupak se praktikuje u vodonosnoj sredini krupnijeg mehaničkog sastava. Kod nje se direktno utiskuju filterske cevi koje zbog veličine dimenzija otvora na filteru omogućavaju formiranje prirodnog obratnog filtera znatnih dimenzija oko samog dreva. Druge dve metode podrazumevaju prethodno utiskivanje zaštitnih cevi u kojima se naknadno ugrađuje filterska konstrukcija. Prednost ovih metoda se sastoji u tome da je moguće uskladiti dimenzije otvora na filteru prema granulometriji vodonosne sredine duž pravca u kojem se vrši utiskivanje. Zbog toga se ove dve metode praktikuju u sredinama sitnijeg mehaničkog sastava. Kod Projsag postupka se izmeću filterske konstrukcije i zaštitne cevi postavlja filterski zasip, koji sprečava prodor materijala sredine u unutrašnjost drenova. Praksa je pokazala da druge dve metode iziskuju veću regeneraciju. Nedostatak Projsag i Felman tehnologije u odnosu na Reni postupak je znatno veća cena formiranja drenova jer se utiskuju zaštitne cevi većeg prečnika i cela operacija formiranja drenova duže traje.

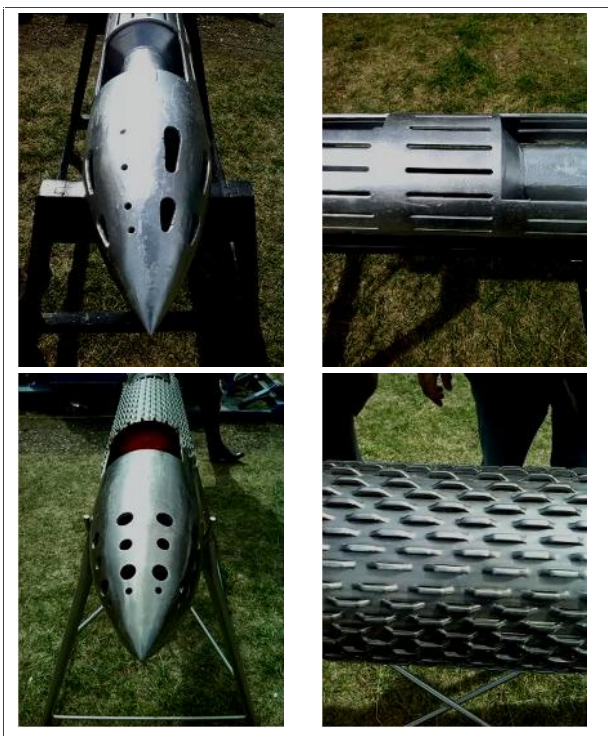
Imajući u vidu postavljene uslove, za revitalizaciju dotrajalih drenova na bunarima u Budimpešti je odabrana Reni metoda formiranja drenova, tj. direktno utiskivanje filterskih cevi. Međutim, kako prvobitno formiranje drenova po Reni metodi (modifikovanoj, „budimpeštanskoj“) nije dalo dobre rezultate, nije bilo prihvatljivo da se drenovi izvedu po istoj tehnologiji kao pre nekoliko decenija, sa jedinom razlikom da sada budu izrađeni od prohromskih cevi. Bilo je neophodno prilagoditi metodu postavljenim kriterijumima, zbog čega su pokrenuta obimna istraživanja. Odabrani su eksperimentalni bunari, koji su predstavljali reprezentativne objekte na izvorištu u pogledu stanja drenova, hidrogeoloških uslova sredine i eksploatacije podzemnih voda.

U odabrane bunare su utiskivani novi drenovi sa različitim dimenzijama otvora na filteru, kako bi se pronašao optimalan odnos efektivnog prečnika zrna vodonosne sredine i veličine otvora na filteru. Efekti eksploatacije eksperimentalnih drenova su brižljivo praćeni i analizirani.

Iskustvo izrade cevastih bunara na izvorištu je pokazalo da ugradnja bunarske konstrukcije sa mostovima filterom daje bolje rezultate od filtera sa prorezima (bez zasipa) u smislu većeg kapaciteta, dužeg vremena eksploatacije objekta i manje potrebe za održavanjem.

Ovo je odredilo tok daljih istraživanja koja su koncentrisana na iznalaženje tehničkih uslova koji omogućiti direktno utiskivanje cevi od nerastvorljivog eliksa mostavih filterom. Da bi to postalo moguće, potrebno je stvoriti uslove u kojima su pritisak težine slojeva neposredno oko vrha bušne glave i sila trenja koja nastaje prilikom utiskivanja redukovani u velikoj meri, kako ne bi doveli do deformacije i oštećenja mostavih perforacija. Konstruisana je specijalna buša a glava koja je omogućila uspešno utiskivanje mostavih filtera (slika 3).

Poslednja izmena Reni metode na izvorištu podzemnih voda Budimpešte, predstavlja njenu drugu porodu – inoviranu modifikaciju. Metoda je zaštićena meunarodnim patentom, koji su autori istraživa i iz kompanije Duna-Kút Kft., koji je osniva i suvlasnik Vodovod Budimpešte [5], [6].



Slika 3 - Izgled bušne glave i filterskih cevi po staroj (gore) i inoviranoj (dole) budimpeštanskoj metodi

Specifičnost nove bušne glave je u tome što je kroz cev za ispiranje nabušenog materijala provučena cev malog prečnika koja služi za dovod vode pod pritiskom do posebnih otvora na bušnoj glavi. To znači da se cirkulacija vode u toku utiskivanja drenova odvija u dva smera.

Podzemne vode se kreću iz vodonosne sredine prema otvorima na bušnoj glavi, prolaze kroz njih i zajedno sa nabušenim materijalom prifilterske zone nastavljaju da se kreću kroz cev za ispiranje sve do bunarskog šahta, odakle se iznose na površinu terena.

Sa površine terena se preko cevi koja se nalazi unutar cevi za ispiranje potiskuje voda pod visokim pritiskom sve do glave drene, odnosno do određenih otvora na njoj. Visok pritisak vode koja izlazi kroz ove otvore na glavi drene u vodonosnu sredinu omogućava stvaranje efekta „rastresanja“ litološkog sloja u kojem se vrši utiskivanje i na taj način olakšava postupak.

Oblik i veličina otvora na bušnoj glavi može biti različita za svaki od drenova na jednom bunaru. Pritisak vode za stvaranje efekta smanjenja otpora sredine pri utiskivanju se postiže Woma pumpom. Niži pritisci pumpe odgovaraju utiskivanju u peskovito-šljunkovitoj sredini i kreću se oko 200 bar. U sitnoznoj sredini pritisci se povećavaju, dok u slučaju prolaska kroz sova gline rastu do 400 bar. Pritisci prese kojom se vrši utiskivanje cevi iznose 120–240 bar.

Visina mostava na filteru predstavlja najvažniji tehnički uslov od kojeg zavisi uspešna razrada drenova, formiranje zone povoljnih filtracionih karakteristika oko filtera (obratni filter), stabilan kapacitet i što je moguće duži period rada do dolaska u režim kada je potrebno izvršiti regeneraciju. Tehničko rešenje iz Budimpešte omogućava da se, u skladu sa poznavanjem litološkog i mehaničkog sastava terena, utisnu drenovi maksimalno prilagođeni poroznoj sredini, sa promenljivom visinom mostava duž drene. Dakle, inoviranu budimpeštansku Reni metodu sada odlikuju prednosti Projsag i Felman metode. Ukoliko postoji dovoljan fond informacija o mehaničkom sastavu sredine, moguće je utisnuti takav dren kod kojeg bi svaki od pojedinačnih segmenata filtera imao različitu visinu mostava. U praksi se to, naravno, ne dešava, ali govori o potencijalu primene inovirane metode u praktično svim hidrogeološkim sredinama. Mehanički sastav aluvijalnih sedimenata budimpeštanskog izvorišta je takav da se najčešće utiskuju drenovi sa visinom mostava od 2–4 mm, mada je moguće utisnuti drenove sa visinom između 0,5 i 6 mm. Dužina otvora na filteru je obično 25 mm, širina 5 mm (slika 3).

Debljina zida filterske cevi zavisi od visine otvora mostava i kreću se od 4–6 mm. Spoljašnji prečnik filterskih i punih cevi je uvek isti, dok unutrašnji zavisi od debljine zida cevi. Najčešće se ugrađuju cevi prečnika 219/211 mm. Svi segmenti punih i drenažnih cevi su dužine jednog metra. Na krajevima filterskih cevi se ostavlja neperforirani deo koji služi za spajanje sa narednom cevju u nizu, dužine 10 cm. Cevi se međusobno spajaju zavarivanjem.

U bunarima koji su predmet revitalizacije se po pravilu utiskuje po 5 novih drenova. Ovaj broj predstavlja kompromis između uslova obezbeđenja potrebnog kapaciteta, optimalnih hidrauličkih uslova rada bunara i raspoloživih materijalnih sredstava. Formiranje jednog drene obično traje do 5 dana. U slučaju

svi drenovi se utiskuju prema reci i paralelno sa rekomb, osim u slu aju kada postoje odre ena ograni enja u pogledu litološkog sastava vodonosne sredine (prisustvo slabije propusnih so iva). U slu aju da se utiskivanjem utvrdi da na pravcu drena postoji so ivo glina koje nije identifikovano prethodnim istražnim bušenjem, utiskivanje se na toj stacionaži završava. Ukoliko je glina prisutna na po etku drena, zapo eti pravac utiskivanja se napušta i dren se utiskuje u drugom pravcu. Prisustvo slojeva fino-zrnog sastava ne predstavlja problem, jer se drenovi na tim deonicama mogu uspešno razraditi.

Postupak razrade obi no traje 8 asova po jednom drenu. Realizuje se naglim otvaranjem i zatvaranjem drena brzopoteznim zatvara em (slika 4). Kriterijum za prihvatanje drena kao uspešno razra enog je empirijske prirode i odnosi se na širinu sitnozrnog taloga na dnu drena. Podvodnom kamerom se snimi unutrašnjost drena i ukoliko se utvrdi da je širina fino-zrnog taloga na dnu drena u njegovom popre nom preseku manja od 5 cm (njegova visina je obi no nekoliko milimetara), dren se prihvata kao uspešno razra en.



Slika 4 - Postupak razrade drenova brzopoteznim zatvara em (preuzeto sa: www.layne.com)

Prilikom utiskivanja novih drenova, stari drenovi se zatvaraju, bez obzira na stanje u kojem se nalaze. Revitalizacija „patuljastih“ bunara se po pravilu vrši formiranjem drenova u okviru iste lepeze u kojoj su utisnuti stari drenovi, mada je na nekim bunarima izvršeno utiskivanje drenova u dve lepeze (sa po pet drenova u svakoj).

Praksa projektovanja predvi a izvo enje jedne nove istražne bušotine (koje se izvode i sa površine vodotoka) za svaki novi dren. U slu aju da postoji potreba za detaljnijom geometrizacijom i upoznavanjem mehani kog sastava sloja/proslojka nepovol nih filtracionih karakteristika, izvode se dodatne bušotine. Sve nove istražne bušotine se izvode na 25. metru od bunarskog šahta, što predstavl a empirijski kriterijum, koji je pokazao dobre rezultate u praksi. Uzorci nabušenog materijala se uzimaju na svakom metru

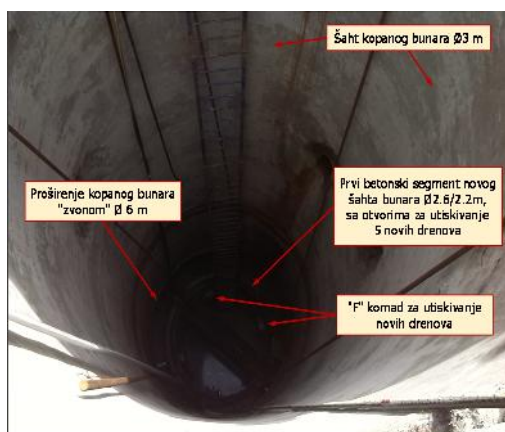
dužine jezgra, kao i na polovini debl ine svakog identifikovanog litološkog lana. Na ovaj na in se dolazi od fonda podataka, odnosno obima i kvaliteta podloga za izradu projekta revitalizacije koji se može smatrati dovol nim i reprezentativnim. Jedna od 5 izvedenih istražnih bušotina se privremeno oprema bunarskom konstrukcijom i služi za obezbe enje vode za Woma pumpu.

Svi drenovi koji su do sada utisnuti na obnovljenim bunarima se sastoje od pune cevi dužine 5 m i perforirane cevi dužine 25 m. Do usvajanja ovakve dužine novih drenova se došlo eksperimentalnim putem, tako što je u jednom od reprezentativnih bunara koji su bili predmet detaljnih istraživanja (prose an bunar na izvorištu u pogledu kapaciteta, ostvarene depresije u zoni lepeze drenova ali sa dobrim stanjem drenova), ispitivan doticaj podzemnih voda duž drenova. Bunar je imao drenove koji su o uvani tokom vremena eksploatacije (filteri su zadržali po etnu dužinu utiskivanja od 50 m). Za ispitivanje koli ine dotoka podzemnih voda je koriš en savremeni digitalni reometar. Postupak se sastojao u slede em: ure aj je postavl en na po etku drena na ulasku u bunarski šaht i beležio je zbirni doticaj u dren. Zatim je on postavl en na samom kraju drena, uz buša u glavu, i povla en prema bunarskom šahtu prilikom ega je na svakom metru dužine drena registrovan trenutni doticaj. Na taj na in je registrovan doticaj duž svake stacionaže drena. Kalibracija rezultata merenja je izvršena upore enjem sume svih jedini nih doticaja sa zbirnim merenjem doticaja na po etku drena. Postupak je ponovl en za sve aktivne drenove. Ispitivanja su pokazala da u slu aju analiziranog bunara, u duga kom intervalu od 30–50 metra, nema efektivnog doticaja.

U jednom trenutku je analizirana mogu nost utiskivanja novih drenova na bunarima sa „zvonom“ na nižim kotama u odnosu na postoje u lepezu (ispod dna „zvona“ a iznad podine). Prethodno je re eno da su kopani bunari završavani plitko u vodonosnoj sredini. Izgradnjom „zvona“ oni su delimi no postajali dublji ali i dalje nisu dopirali do najdubljeg litostratigrafskog sloja. Formiranje drenova u okviru litostratigrafskog sloja koji je deponovan direktno preko podinskih glina je kompleksan postupak, koji se sastoji se iz više operacija. Rezultat postupka je ugradnja novog vertikalnog šahta manjeg pre nika unutar postoje eg šahta i utiskivanje drenova iz novog šahta (slike 5 i 6).

U postupku revitalizacije bunara po principu „bunar u bunaru“ vrši se nalivanje vode u postoje i šaht tako da stub vode u njemu bude 4–6 m iznad stati kog nivoa podzemnih voda. Ovo se postiže instalacijom pumpe i creva (Ø150 mm) za dovod vode u susjednom bunaru. Nadsloj vode je potreban kako bi se spre io prodor materijala u postoje i šaht i obezbedila stati ka

stabilnost tokom ugradnje novog šahta. Nadsloj se održava sve vreme dok traju aktivnosti na izradi novog šahta. Nakon toga se vrši probijanje dna postojećeg šahta. Postupak se izvodi tako što u šahtu ispunjenom vodom ronilac vrši rezanje betona po kružnici određenog prenika. Beton se razbija i iznosi na površinu terena. U šaht se zatim spušta betonski element prenika Ø2600/2200 mm i visine 2,5 m. Ovaj prsten je prvi u nizu betonskih segmenata koji će formirati novi šaht bunara.



Slika 5 - Šaht kopanog bunara, proširenje „zvonom“ i prvi segment novog šahta sa otvorima za drenove

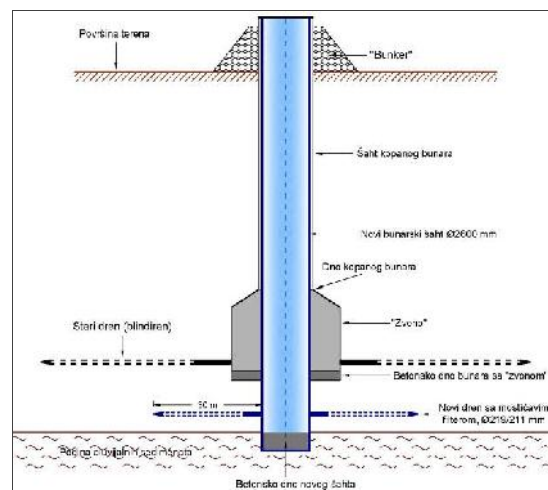
Prsten je na svom dnu opremljen sešivom koje ima ulogu da omogući njegovo utiskivanje u glinovitoj podini. Izošenje materijala sredine ispod dna „zvona“ se vrši podvodnim otkopavanjem, uz hidrauličku opterećenje segmenata novog šahta sa površine terena. Prstenom se ulazi u podinu u dubini od 1,5 m a zatim se dno prvog prstena betonira u ovom intervalu.

Betonski segmenti se spajaju posebnim mehanizmom kako bi se osiguralo da šaht bude vodonepropusan. Centriranje i stabilizacija novog šahta se vrši sidrenjem za dno starog šahta. Betonski segmenti mogu imati i drugačije dimenzije od navedenih, u zavisnosti od uslova u kojima se ugrađuju. Praktikuje se da svi budu iste visine osim poslednjeg (najvišeg) u nizu. Njegova visina se od proizvođača poručuje tako da prilikom ugradnje gornja ivica prstena bude u ravni sa podom zatvarnice bunara.

Na kraju izrade novog šahta, prostor između unutrašnjeg prenika starog i spoljašnjeg prenika novog šahta se popunjava materijalom iz otkopa. Nakon završetka radova na izradi novog bunarskog šahta, pristupa se utiskivanju drenova, na isti način kao u slučaju Reni bunara.

Novi drenovi se utiskuju u horizontalnoj ravni koja odgovara sredini debljine hipsometrijski najnižeg litoškog sloja, prema rezultatima istražnog bušenja. Najmanja visina na kojoj je moguće izvršiti utiskivanje u

odnosu na dno novog šahta je limitirana gabaritima opreme za utiskivanje i iznosi 0,7 m.



Slika 6 - Uprošćen prikaz formiranja novih drenova na veće dubini u rekonstruisanom bunaru

5. REZULTATI REVITALIZACIJE BUNARA U BUDIMPEŠTI

Na budimpeštanskom izvoru podzemnih voda se godišnje obnovi u proseku 4–5 bunara sa horizontalnim drenovima. Budući da je izgrađen veliki broj bunara, u svakom trenutku se može obezbediti stabilno vodosnabdevanje, zbog čega objektivno ne postoji potreba za obezbeđenjem dodatnih količina vode pa ni obnovljenjem većeg broja bunara. Ipak, planskim finansiranjem aktivnosti grad nedvosmisleno demonstrira razumevanje značaja revitalizacije bunara i održavanja celog izvorišta u dobrom stanju.

Rezultati revitalizacije bunara pokazuju da je inovirana metoda direktnog utiskivanja mostičavih filterskih cevi, zajedno sa tehnologijom produblivanja bunara i utiskivanja drenova na veće dubini, zadovoljila postavljene kriterijume. Do danas je na izvorištu obnovljeno 28 bunara po sistemu „bunar u bunaru“. Vreme potrebno za rekonstrukciju šahta i utiskivanje 5 novih drenova, sa instalacijom sve potrebne opreme, je 2 meseca. Na 17 Reni bunara su zamenjeni stari drenovi. Radovi na jednom bunaru ovog tipa se završe u roku od mesec dana. Zapunjavanje unutrašnjosti drenova i značajnije mehaničko kolmiranje nisu uoči zbog čega su i kapaciteti obnovljenih bunara stabilni.

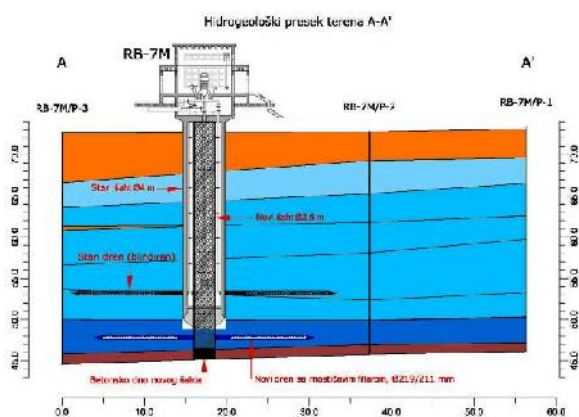
Kapacitet bunara nakon utiskivanja na nižim kotama je veći i u odnosu na bunare jedinstvenog prenika šahta. Utiskivanje u najdubljem sloju omogućava da se nivoi u bunarskom šahtu održavaju na nižoj koti. Veća razlika u pijezometarskim nivoima u izdani u zoni lepeze drenova i u unutrašnjosti drenova obezbeđuje postizanje većih kapaciteta bunara. Režim rada bunara u Budimpešti je takav da se nivoi u revitalizovanim

bunarima održavaju na visini od 4 m iznad kote drenova kod bunara u kojima je ugrađen novi šaht i 3 m kod Reni bunara. U cilju uporebnja rezultata prvobitne metode i inovirane metode, zamenjeni su stari ali oštećeni drenovi na nekim bunarima. Rezultati su pokazali da se formiranjem drenova na nižoj koti, kapacitet bunara uveća za 80% u odnosu na stare drenove. Ugradnja drenova sa mostovima filterom na istoj koti na kojoj su utisnuti stari drenovi na Reni bunarima, rezultira povećanjem kapaciteta za 30–40%.

Troškovi revitalizacije bunara po inoviranoj budimpeštanskoj metodi su 30–35% niži u odnosu na Projsag i Felman metodu. Prema tome, za određeni iznos materijalnih sredstava je moguće utisnuti veći broj drenova, tj. obnoviti više bunara.

6. MOGUĆNOSTI PRIMENE INOVIRANE METODE NA BEOGRADSKOM IZVORIŠTU PODZEMNIH VODA

Preko šahta Reni bunara u Budimpešti je predstavljao limitirajući faktor za produbljivanje bunara i formiranje drenova na većoj dubini. Bunari u Beogradu imaju dvostruko veći prečni, zbog čega postoje uslovi za primenu tehnologije ugradnje novog šahta i konačno otklanjanje ograničenja njihove konstrukcije – plitko utisnutih drenova. Utiskivanje drenova u okviru najstarijeg litostratigrafskog sloja u paketu poliklinalnih aluvijalnih naslaga će stvoriti uslove za puno iskorišćenje potencijala vodonosne sredine (slika 7).



Slika 7 - Konceptualni plan revitalizacije bunara u Beogradu sa ugradnjom novog šahta i drenova

Budimpeštansko rešenje u pogledu dužine novih drenova se ne može primeniti na bunarima u Beogradu bez prethodnih ispitivanja. Metoda merenja dotoka duž drena je jednostavna za primenu i materijalno minimalno zahtevna zbog čega je treba praktikovati (tokom istraživanja koja prethode ili su u sklopu izrade projektna dokumentacije) na svakom od bunara na kojem je to moguće. Međutim, mnogi od bunara koji su predviđeni za revitalizaciju gotovo da nemaju drenove ili su oni u toj meri oštećeni i oštećeni, da na njima nije

moguće izvršiti merenje doticaja. Iz tog razloga je potrebno izvršiti klasifikaciju bunara u više grupa prema parametrima koji reprezentuju stanje bunara i vodonosne sredine u njihovoj zoni (efektivni prečni prečnik i filtraciona svojstva sredine, hemizam i mikrobiološki sastav voda, stanje drenova, efekti regeneracija, parametri propusnosti drena i dr.). Za reprezentativni bunar svake od izdvojenih grupa bunara treba odabrati onaj objekat koji ima najbolje stanje drenova i na njemu izvršiti merenje doticaja.

U skladu sa rezultatima merenja doticaja i analize na detaljnom hidrodinamičkom modelu, obezbediće se dovoljno elemenata za usvajanje optimalne dužine drenova. Po analogiji sa bunarom reprezentom određene grupe, dobiće se podloge za projektovanje revitalizacije ostalih bunara u grupi. Budući da zamena drenova na bunarima podrazumeva ulaganje značajnih finansijskih sredstava, jasno je da se ovakvim pristupom vrši i optimizacija njenih troškova.

Mađarska istraživanja daju osnovu za još jedan značajan doprinos domaćoj hidrogeološkoj praksi istraživanja bunara sa horizontalnim drenovima. Rešenje o povećanju pouzdanosti detaljnih hidrodinamičkih modela, što se može postići i unapređenjem koncepcije prema kojoj se oni trenutno rade.

Naime, uobičajeno je da se na detaljnom hidrodinamičkom modelu usvaja jedna (reprezentativna) vrednost propusnosti i dužina celog drena (filtera i prifilterske zone) za određeni vremenski presek. Ona se iskazuje preko tzv. Parametra „K/d“ ili koeficijenta propusnosti drena. Dodatna kalibracija bunarskih drenova, kao najznačajnijeg i najdelikatnijeg granicnog uslova ovih hidrodinamičkih modela, se može ostvariti usklađivanjem doticaja duž stacionaža drena na modelu sa njihovim vrednostima izmerenim na terenu.

Dakle, elementarni doticaj (doticaj po jedinici dužine drena) je osnova za dobijanje promenljivih umesto jedinstvene vrednosti koeficijenta propusnosti drena. Rezultat dodatne kalibracije će biti realnija prognoza kapaciteta bunara kao objektivnog pokazatelja uspešnosti njegove revitalizacije. Tako će biti povećan stepen sigurnosti planirane investicije.

7. ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] Dimkić M, Pušić M, Majkić –Dursun B, Obradović V. Certain Implications of Oxidic Conditions in Alluvial Groundwater, *Water Research and Management*, Vol. 1, No. 2, pp. 27–43, 2011.

- [2] Oparuši I, Božovi . Definisanje devijacije drenova na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda. *XIV Srpski hidrogeološki simpozijum sa međunarodnim učešćem*, Zlatibor, pp. 75–79, 2012.
- [3] Puši M, Dimki M, Vidovi D, Dotli , M. Oparuši I. Analiza uticaja nekih hidrogeoloških parametara na po etni kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima. *Vodoprivreda*, Beograd, pp. 175–180, 2012.
- [4] Dimki M, Puši M. Correlation Between Entrance Velocities, Increase in Local Hydraulic Resistances and Redox Potential of Alluvial Groundwater Sources. *Water Research and Management*, Vol. 4, No. 4, pp. 3–23, 2014.
- [5] Csóka G., Bozóki, L. Radial collector well and method for constructing or improving radial collector wells. [Internet]. Dostupno: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2010013075>
- [6] Csóka G, Bíró Z. Method and measurement unit for monitoring the status of collectors in radial collector wells by measuring collector wall thickness and determining collector aging condition [Internet]. Dostupno: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2013167920>
- [7] Simonffy Z. Enhancement of groundwater recharge in Hungary, in particular bank filtration for drinking water supply, in: Albert Tuinhof and Jan Piet Heederik (Eds.), *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage – Making Better Use of Our Largest Reservoir*, Wageningen, Netherlands, pp. 39–41, 2002.
- [8] Laszlo F. The Hungarian Experience with Riverbank Filtration, in: Gina Melin (Ed.), *The Second International Riverbank Conference*, National Water Research Institute, Cincinnati, Ohio USA, pp. 193–195, 2003.
- [9] Homonnai F, Kaszab F, Szabo C. Experiences with riverbank–filtration on the Szentendre Island (Danube River, Hungary). *Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS International Conference on Water Resources, Hydraulics & Hydrology*, Portoroz, Slovenia, pp. 1–5, 2007.
- [10] Fórizs I, Deák J. Origin of bank filtered groundwater resources covering the drinking water demand of Budapest, Hungary. *Application of isotope techniques to investigate groundwater pollution*, IAEA–TECDOC–1046, Vienna, pp. 133–165, 1998.
- [11] Fórizs I, Berecz T, Molnár Z, Süveges, M. Origin of shallow groundwater of Csepel Island (south of Budapest, Hungary, River Danube): isotopic and chemical approach. *John Wiley & Sons, Ltd., Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 3299–3312, 2005.

SUMMARY

UPDATED “BUDAPEST METHOD” FOR REVITALIZING RADIAL COLLECTOR WELLS AND APPLICABILITY TO BELGRADE’S WATER SUPPLY SOURCE

Belgrade’s water supply source is faced with the complex issue of halting a continuing decline in radial well capacity. It is possible to counteract the problem by replacing worn-out laterals. Past research has provided a basis for undertaking radial well revitalization activities. One of the questions that remained unanswered was how to overcome structural limitations – shallow emplacement of laterals. In Budapest, an innovative revitalization procedure, applying a modified Ranney method, has been used effectively for about 15 years. The laterals are installed below the bottom of the original well shaft and the screen pipes have bridge-like slots. The possibility of applying this method at Belgrade’s water supply source is substantial.

Key words: *water supply, radial well, emplacement of laterals*