

## PRILOG UPRAVLJANJU PODZEMNIM VODNIM RESURSIMA BUNARIMA DVOJNE NAMENE - ASR (AQUIFER STORAGE AND RECOVERY)

Dr Dragan KALUĐEROVIĆ, dipl.ing.hidrogeologije  
Roscoe Moss Company, www.roscoemoss-srb.com  
email: advancedgwt@gmail.com

### REZIME

Od 1983. godine sistemi vodosnabdevanja u SAD se sve više oslanjaju na podzemno skladištenje vode za piće kako bi se zadovoljile rastuće raznovrsne potrebe u zavisnosti od lokacije. Skladištenje se ostvaruje preko bunara za "skladištenje podzemne vode i njeno zahvatanje - ASR" (engl. Aquifer Storage Recovery)" ili bunara dvojne namene. ASR bunari skladište vodu u odgovarajuće izdani tokom vlažnih meseci i uopšte u periodima kada je voda dostupna, i zahvataju uskladištenu vodu iz istih bunara tokom suša, vršnih potreba i uopšte kada je uskladištena voda potrebna. Preko 100 ASR bunarskih polja je sada u funkciji u najmanje 22 države USA. ASR se sada implementira u mnogim drugim zemljama. Glavni vodič ASR implementacije je bio ekonomski faktor s obzirom da ASR rešenja obično smanjuju troškove ulaganja u razvoj vodosistema za najmanje 50%.

Matematičke simulacije imaju značajan ulogu u projektovanju bunara dvojne namene. Da bi bunar dvojne namene bio uspešan potrebno je da su ispunjeni razni faktori a koeficijent filtracije izdani je jedan od glavnih. Ukoliko je koeficijent filtracije mali dolazi do velikih sniženja nivoa podzemne vode a ukoliko je koeficijent filtracije veliki telo injektirane vode može da "pobegne" od bunara i da ne bude zahvaćeno crpenjem. Numeričkim eksperimentom ovo je pokazano

**Ključne reči:** izvorišta podzemnih voda, bunar dvojne namene, MT3DMS, veštačko prihranjivanje, Groundwater Vistas, izdan

### UVOD

Na početku nove ere svetska populacija je brojala oko 300 miliona ljudi. Ukupno 1700 godina je bilo potrebno da se svetska populacija udvostruči na nešto preko 600

miliona ljudi. Do 1860. godine, za 160 godina, populacija se udvostručila ponovo na 1,2 milijarde ljudi. Do 1945. godine broj ljudi na zemlji je dostigao 2,4 milijarde, ponovo se udvostručio za period od 85 godina. Do 1984, za 39 godina, ponovo se udvostručio na 4,8 milijarde, i prema poslednjim podacima ponovo se udvostručio oko 2000. godine, za 16 godina (Pyne 2005). Takođe, potrošnja vode po stanovniku, naročito u razvijenim zemljama raste.

Takav veoma brzi demografski rast, praćen još ubrzanijim nepovoljnim antropogenim uticajima, vrlo se nepovoljno odrazio na izvorišta vode za snabdevanje naselja. Odigravaju se dva paralelna procesa suprotnih tendencija: brzo rastu potrebe za vodom za snabdevanje naselja sa vrlo visokom zahtevanom obezbeđenju podmirivanja potreba, dok se, istovremeno, zbog raznih vidova nepovoljnih antropogenih uticaja (nepoštovanje zaštićenih zona, izgradnja raznih neadekvatnih zagađujućih sadržaja u zaleđu izvorišta, itd.), smanjuju kapaciteti izvorišta u odnosu na one sa kojima se ranije računalo. Zbog takve nepovoljne situacije ubrzani su razni vidovi istraživanja izvorišta podzemnih i površinskih voda u raznim sredinama. Ta istraživanja se kreću u ranim pravcima. U radovima (Polomčić, 2012) i (Toholj, 2012) analiziraju se sve ozbiljniji problemi sa kapacitetima i zaštitom izvorišta u Srbiji i Republici Srpskoj. Neki autori istražuju hidrodinamičke mogućnosti proširenja izvorišta (Đurić, 2012), što je sve aktuelniji istraživački zadatak. Istražuju se i problemi uticaja hidrogeoloških parametara na početne kapacitete bunara sa horizontalnim drenovima (Pusić, 2012), ali i sve ozbiljniji problemi smanjivanja kapaciteta izvorišta podzemnih voda zbog fenomena starenja bunara, čemu su posvećena istraživanja (Majkić-Dursun, 2012). Problemi matematičkog modeliranja izvorišta u raznim sredinama su u centru pažnje niza istraživača (Milanović,S., 2011), (Milanović,S., 2012), pri čemu se posebno fokusira problem kalibracije modela

(Kaluderović, 2012). Pošto su zbog antropogenih i drugih uticaja sve izbiljniji problemi kvaliteta vode u izvorištima i površinskih i podzemnih voda, razmataju se razne savremene mogućnosti njihovog monitotinga (Kaluderović, 2010), kao i prečišćavanja (Ljubisa-vljević, 2012), (Jovanović, 2011). Matematičkim modelima se analizira i uticaj svih radova u slivu na režime površinskih i podzemnih voda, čak i u najslabijim uslovima karsta (Milanović P., 2012).

Da bi se u sve otežanim uslovima u izvorištima, i po kapacitetima (količinama) i po kvalitetu obezbedilo pouzdano snabdevanje vodom vodni resursi moraju efikasnije da se koriste. Veštačko prihranjivanje izdani je jedan od mnogih načina da se postigne efikasnije korišćenje ograničenih vodnih resursa. Ovde se mora napomenuti da se u literaturi na engleskom jeziku koristi izraz MAR (Managed Aquifer Recharge) za veštačko prihranjivanje.

Interes za veštačko prihranjivanje izdani se povećao u zadnje vreme kao odgovor na opadanje nivoa podzemne vode usled precipitiranja izdani, povećanje ranjivosti površinskih rezervoara na zagađenja i drugih razloga. Sistemi za veštačko prihranjivanje izdani sa površine terena preko basena koji se pune vodom, uglavnom tretiranim rečnom vodom, dobro funkcionišu kad je zemljište na površini terena dobro vodopropusno i kada je površina zone za prihranjivanje preko basena dostupna po povoljnoj ceni. Tokom rada, ovi baseni se povremeno čiste kroz seriju vlažnih i suvih ciklusa i tako se održava dugotrajni i efikasni intenzitet prihranjivanja. Ukoliko postoji slabopropusni sloj koji je veće dubine i ako je dostupnost zemljišta za infiltraciju mala, veštačko prihranjivanje sa površine terena nije moguće.

Kada je u pitanju veštačko prihranjivanje izdani, naročito dubljih izdani, u zadnjih par decenija postalo je jasno da se ovo može uraditi **bunarima dvojne namene**. Kada su u pitanju bunari dvojne namene prihranjivanje izdani se postiže sa bunarom (ili grupom bunara) kroz koje se voda i injektira i crpi sa jedne iste lokacije. David Pyne je inženjer koji je 1983. godine uveo u svetsku hidrogeološku praksu izraz **Aquifer Storage and Recovery wells** (ASR bunari). Ono što je kroz dugogodišnju praksu primećeno je da ukoliko se voda koja se injektira prečišćava (praktično do nivoa za piće) ne dolazi do kolmiranja bunara (što je jedan od glavnih problema ove metode) već se voda može injektirati u podzemni rezervoar i crpeti bez naknadnog tretmana osim dezinfekcije. Ovaj način, gde se jedan bunar koristi i za injektiranje i za crpenje vode je

ekonomski veoma isplativ i predstavlja značajan napredak u načinu kako upravljamo vodnim resursima.

## BUNARI DVOJNE NAMENE

Prihranjivanje izdani bunarima dvojne namene (ASR) može se definisati kao uskladištenje vode u pogodnoj izdani kroz bunar u periodu kada je voda dostupna i kada je mala potrošnja (zimi npr.) i crpenje te vode kad je ona potrebna (leti npr.). Ono što se mora napomenuti je da voda koja se injektira mora biti dobrog kvaliteta i nije slučajno da svi operativni ASR sistemi koriste praktično pijaću vodu za injektiranje (Pyne, 2005).

Pogodne izdani za ASR sisteme mogu biti izdani pod pritiskom ili izdani sa slobodnim nivoom ali većina izdani u kojoj su se koristili bunari dvojne namene su bili u izdanima pod pritiskom ili mešovitim tipu izdani (deo izdani je pod pritiskom a deo je sa slobodnim nivoom). Upotreba bunara dvojne namene u izdanima sa slobodnim nivoom je moguća ali nekoliko faktora otežava njihovu primenu:

- Brzina kretanja podzemne vode je znatno veća u izdanima sa slobodnim nivoom i postoji mogućnost da ukoliko je razmak između prihranjivanja i crpenja veći dođe do oticanja injektiranja vode i nemogućnosti da se ta voda crpi
- Ukoliko je trajanje injektiranja dugotrajno može doći do većeg povišenja nivoa podzemne vode i do njegovog izbijanja na površinu terena ili presecanje nivoa sa drenažnim sistemom
- Upotreba zemljišta u blizini ASR sistema može dovesti do zagađivanja injektirane vode

Kada je nivo podzemne vode na većoj dubini ovih problema nema.

Zapremina vode koja se uskladišti u izdani zavisi od nekoliko faktora kao što su izdašnost bunara, varijabilnost u potrebama vode, varijabilnost u snabdevanju vodom i kvalitetu vode. Tipična zapremina uskladištene vode je između 0,04 i 2 miliona m<sup>3</sup> (Pyne, 2005).

## ISTORIJSKI RAZVOJ PRIMENE VEŠTAČKOG PRIHRANJIVANJA IZDANI BUNARIMA DVOJNE NAMENE (ASR SISTEMI)

Bunari dvojne namene se koriste u mnogim zemljama u svetu a najviše u USA. U knjizi Davida Pyna iz 2005. godine dat je pregled projekata veštačkog prihranjivanja

izdani bunarima dvojne namene koji će ukratko i ovde biti navedeni.

### Sjedinjene Američke Države (USA)

Na slici 1 pokazane su lokacije oko 90 ASR projekta koji su operativni u USA do 2009. godine. Procenjeno je da je do danas još 100 ASR projekata u raznim fazama izrade.

#### Kanada

Mannheim projekat veštačkog prihranjivanja izdani je relizovan u gradu Kitchener nedaleko od Toronta. Voda iz reke Grand River se tretira i koristi za prihranjivanje lokalne izdani koja se crpi u letnjim mesecima kada je potrošnja veća. Konstrukcija i testiranje ASR bunara počelo je tokom 1994. godine.

#### Izrael

Od 1956. godine veštačko prihranjivanje izdani kroz bunare je bio važan element Nacionalnog Vodnog Sistema za Izrael. Mnoga praktična iskustva su dobijena iz izdani formirane u peščaru Coastal Plain i krečnjačko-dolomitom izdani u centralnom Izraelu.

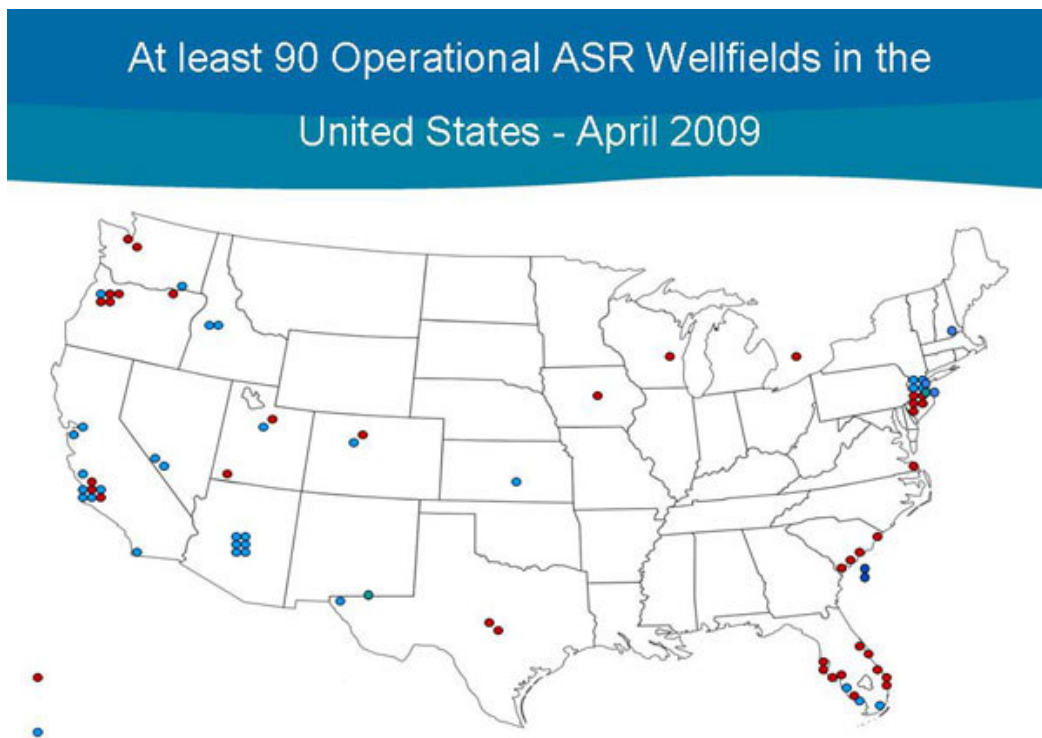
Izvor vode je jezero Kinneret ali su korišćeni i drugi izvori kao što je površinski oticaj i podzemna voda iz krečnjačke izdani.

#### Engleska

Thames Water Utility je privatna kompanija koja snabdeva klijente u Londonu i Thames dolini. Tokom zimskih meseci, deo proticaja iz reke Thames i reke Lee se tretira i injektira u nekoliko bunara u severnom Londonu. Rezervoarski prostor je delimično pod pritiskom izdani sastavljena od chalk-a preko koje se prostiru peskovi. Inicijalno testiranje je počelo tokom 1950ih godina i nedavno (2005.godina) bunarsko polje je prošireno. Bunari dvojne namene se koriste i na nekoliko drugih lokacija u Engleskoj.

#### Holandija

Intenzivan rad sa sistemom za prihranjivanje izdani kroz bunare je sproveden u Holandiji naročito u obalskim dinama blizu Amsterdama. Površinski bazeni su korišćeni godinama za prihranjivanje površinske izdani sa tretiranom vodom reke Rhine i reke Meuse. Usled



Slika 1. Lokacija operativnih ASR sistema u USA, (Pyne 2012).

potreba za povećanom zaštitom ovih basena i smanjenjem površine zemljišta koja je dostupna za prihranjivanje povećavala se potreba za prihranjivanjem izdani kroz bunare. Od 1994. godine dva sistema bunara dvojne namene su operativni i još dva sistema su u izradi.

### Australija

Farmeri u oblasti Adelaide koriste bunare za irigaciju za prihranjivanje njihovih izdani. Ova voda se koristi kao dodatni izvor vode tokom sušnih meseci. Postoje mnogi drugi sistemi bunara dvojne namene koji su operativni a jedan od njih, Calyton, koristi kao rezervoarski prostor za slanu izdan.

Mnogi drugi ASR sistemi su u upotrebi ili su projektovani u drugim zemljama sveta kao što su Italija, Španija, Kuvajt, Ujedinjeni Arapski Emirati, Katar, Japan, Tajvan, Kina, Indija, Indonezija, Južna Afrika, Namibia i Iran.

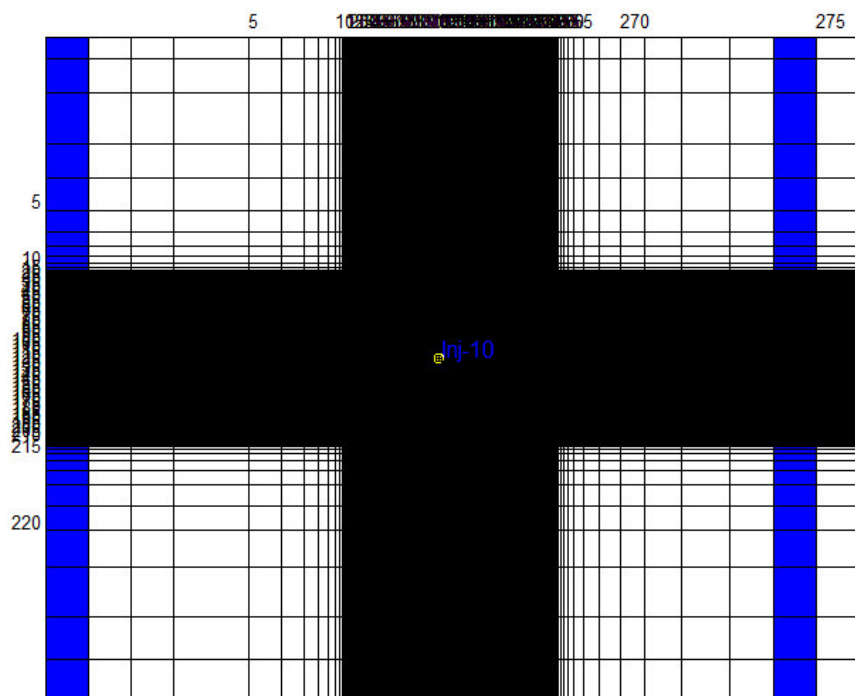
Pre 1970. godine upravljanje vodnim resursima kroz veštačku infiltraciju u USA je retko rađeno i to uglavnom površinskim metodama. Nekoliko eksperimenata sa injektionim bunarima je urađeno pre 1968. godina od kojih su najbolje dokumentovani oni od

strane Američkog Geološkog Društva (United States Geological Survey). Moglo bi se zaključiti da su potrebe za vodom zadovoljavane klasičnim oblicima vodosnabdevanja kao što su bunarska polja, brane, rezervoari i snabdevanjem iz reka. Veštačko prihranjivanje je bilo u svojim počecima i problemi sa kolmiranjem bunara su podržavali mišljenje da je neefikasno prihranjivati izdani kroz bunare.

Sa razvojem tretmana vode i nekoliko uspešnih projekata veštačko prihranjivanje izdani kroz bunare je dobilo svoj zamah. Kao što je već rečeno, do 2009. godine oko 90 ASR projekta su bili operativni u poređenju sa 3 u 1983. godini i 20 u 1994. godini. Velika većina ovih sistema koristi prečišćenu vodu za piće za uskladištenje u izdani

### NUMERIČKI EKSPERIMENT SA BUNAROM DVOJNE NAMENE

U cilju približavanja nekih aspekata rada ASR bunara urađena je jednostavna simulacija u programu USA firme Environmental Simulation Inc - Groundwater Vistas verzija 6. Model je dimenzija 9.5 km x 7.5 km a polja su veličine od 500 metara na obodu do 10 x 10 metara u centru modela (slika 2)



Slika 2. Prikaz modela sa diskretizacijom

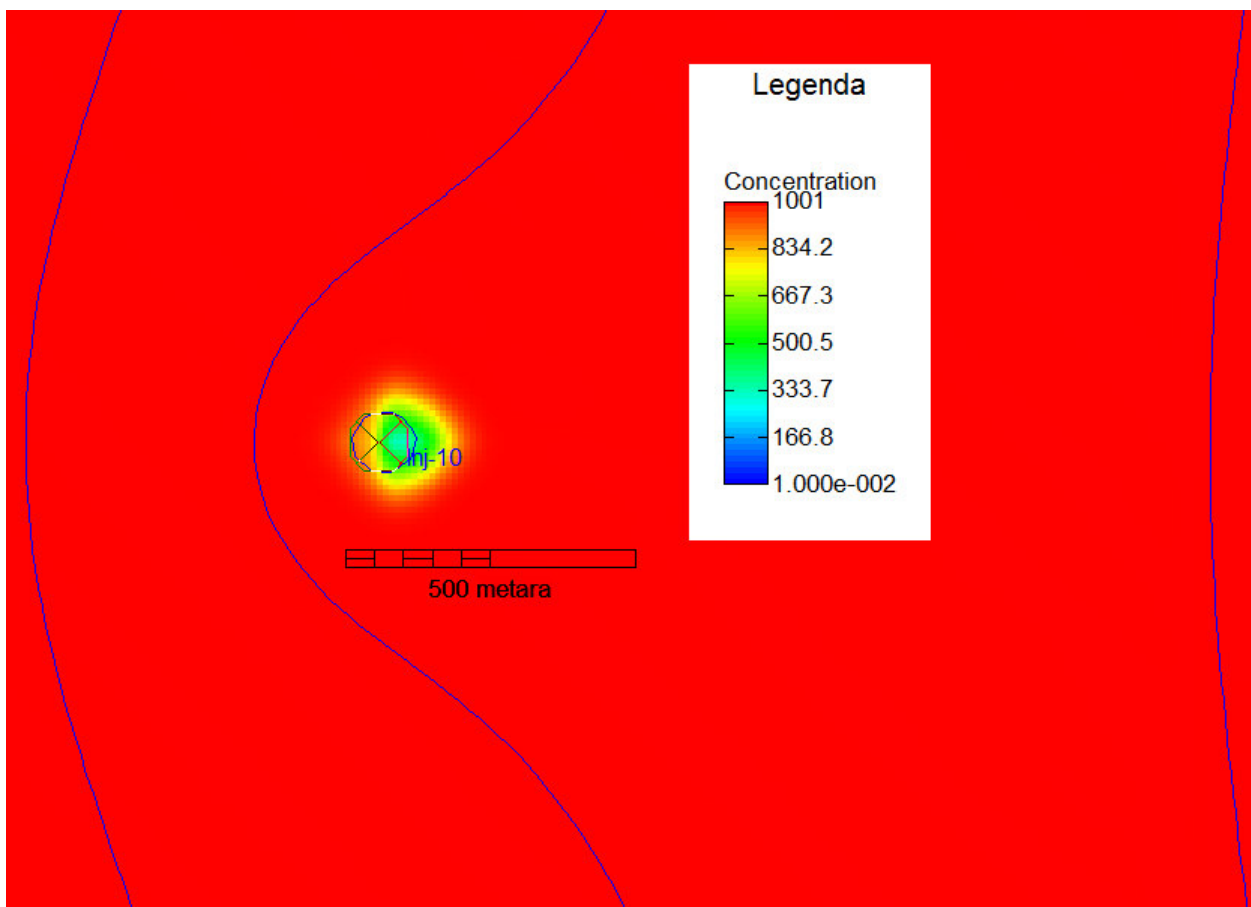
Da bi se izbegle dugotrajne simulacije razmatran je 2D slučaj sa samo jednim slojem koji ima kote povlate 35 mm i kote podine na 15 mm. Izolinije nivoa podzemne vode su sa gradijentom od 0,003 u pravcu zapad istok i kreću se od 75mm na zapadnom delu do 45mm na istočnom delu. Specifična izdašnost je  $S=1e-4$ , početni koeficijent filtracije je 8,64 m/d i longitudinalna disperzivnost je 2 metra. Pored programa MODFLOW korišten je i program MT3DMS i početna koncentracija za ceo model je zadata na vrednost 1000 mg/L i time će biti označena voda iz izdani.

Vremenski period koji je simuliran je prvo 60 dana nikakve aktivnosti, zatim bunar koji injektira svežu vodu koncentracije 0 mg/L 40 dana sa kapacitetom 20 l/s, zatim sledi prestanak rada bunara i uskladištenje

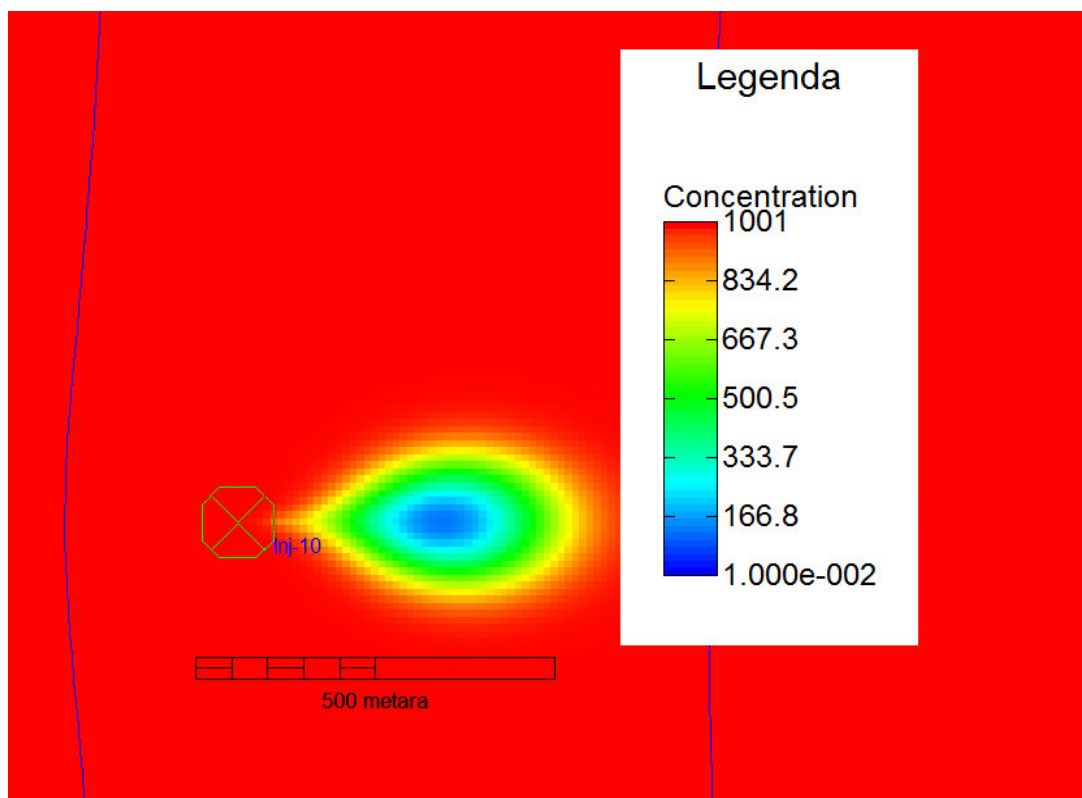
vode 40 dana i na kraju crpenje bunara sa 20 L/s 40 dana.

Kao što se može videti sa slike 3, telo sveže vode, koncentracije manje od 500 mg/L nije "pobeglo" od bunara i sva voda koja se injektirala mogla je da se ponovo iscrpi. Na taj način je izvršena uloga ASR bunara.

Kada je došlo do promene koeficijenta filtracije na 86.4 m/d u rezultatima simulacije (Slika 4) se lepo vidi da se telo sveže vode pomerilo od bunara i da bunar nije mogao da zahvati vodu koja je uskladištena. Ovim se pokazuje da izdani sa velikim koeficijentom filtracije nisu pogodni za ASR bunare jer usled velikih brzina dolazi do brzog kretanja injektirane sveže vode van domašaja crpenja bunara.



Slika 3. Telo sveže vode nakon 180 dana simulacije sa koeficijentom filtracije 8,64 m/d



Slika 4. Telo sveže vode nakon 180 dana simulacije sa koeficijentom filtracije 86.4 m/d

## ZAKLJUČAK

Bunari dvojne namene, ASR bunari, imaju veliku praktičnu primenu u USA i nekim drugim delovima sveta. Sama činjenica da je preko 100 ASR sistema urađeno u USA (oko 500 ASR bunara) ukazuje da je ova tehnologije uspešna u upravljanju podzemnim vodnim resursima i da nema razloga da se i kod nas ne primenjuje. Jednostavnom simulacijom je prikazan uticaj visokog koeficijenta filtracije na kretanje tela sveže vode koje je injektirano preko numeričkog bunara, tj. telo sveže vode se pomerilo od bunara i on jednostavno nije bio u mogućnosti da ga ponovo iscrpi. Naravno, pored koeficijenta filtracije i drugi parametri igraju ulogu prilikom projektovanja ASR bunara - regionalni gradijent, debljina izdani, geohemijske karakteristike vode koja se injektira i nativne podzemne vode i drugi.

## LITERATURA

[1] Anderson, M. P., and Woessner, W. W., 1992, Applied Groundwater Modeling: Simulation of

Flow and Advective Transport: New York, NY, Academic Press, 361 p.

- [2] Đurić, D. i drugi (2012): Hidrodinamička analiza proširenja izvorišta 'Petrovaradinska ada' u Novom Sadu, Vodoprivreda, 258-260, s. 265-272
- [3] Environmental Simulation, 2013: Groundwater Vistas 6, USA
- [4] Jovanović, B. i dugi (2011): Uklanjanje arsena iz vode adsorpcijom na nekonvencionalnim materijalima, Vodoprivreda, 252-254, s.127-150
- [5] Kaluderović D., 1998: Groundwater Flow and Contaminant Transport Model – Example of Velika Plana Groundwater Source, MODFLOW98 Conference, Denver, USA
- [6] Kaluderović D., 2008: 3D matematičko modeliranje kretanja podzemnih voda i transporta zagađenja u hidrogeologiji, Monografija, 190 strana A4 formata, Beograd
- [7] Kaluderović, D. (2010): Multilevel osmatranje kvaliteta podzemne vode u tradicionalnim

- osmatračkim objektima sa dugim filtrom, Vodoprivreda, 246-248, s.245-250
- [8] Kaluđerović,D. (2012): Prilog kalibraciji i i oceni parametara matematičkih modela podzemnih voda – poređenje manuelne, automatske i 'pilot point' metode sa regularizacijom, Vodoprivreda, 258-260, s. 233-240
- [9] Ljubisavljević,D. I V.Rajaković Ognjanović (2012): Uklanjanje nitrata iz vode za piće primenom biološke denitrifikacije, Vodoprivreda, 258-260, s. 163-168
- [10] Majkić-Dursun, B. i drugi (2012): Uticaj opadanja nivoa podzemnih voda na proces starenja vodozahvatnih objekata, Vodoprivreda, 258-260, s. 181-188
- [11] Milanovic,P. i drugi (2012): Uticaj delimičnog previđenja voda iz sliva Bune i sliva Bregave u sliv Trebišnjice, Vodoprivreda, 255-257, s.181-188
- [12] Milanović,S. i Lj.Vasić (2011): Hidrološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu, Vodoprivreda, 252-254, s.165-1174
- [13] Milanović, S. i drugi (2012): Formiranje 3D modela karstnih kanala u zoni isticanja vrela kao podloga za zahvatanje podzemih voda u karstu, Vodoprivreda, 258-260, s. 169-174
- [14] Polomčić,D. i drugi (2012): Vodosnabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursima Srbije, Vodoprivreda, 258-260, s. 225-232
- [15] Pusić, M. i drugi (2012): Analiza uticaja nekih hidrogeoloških parametara na početni kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima, Vodoprivreda, 258-260, s. 175-180.
- [16] Pyne David, *Aquifer Storage Recovery: A Guide to Groundwater Recharge Through Wells*. 2nd Edition, 2005. USA
- [17] Toholj,N. i drugi (2012): Pitka vode u sistemu vodosnabdevanja stanovništva u Republici Srpskoj, Vodoprivreda, 258-260, s. 241-246
- [18] Zheng, C., and P. P. Wang, 1999, MT3DMS: A modular three-dimensional multi-species model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems: documentation and user's guide, SERDP-99-1: U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

## CONTRIBUTION TO MANAGEMENT OF GROUNDWATER SOURCES WITH DUAL PURPOSE WELLS- ASR (AQUIFER STORAGE AND RECOVERY)

by

Dragan KALUĐEROVIĆ, Ph.D., senior hydrogeologist  
Roscoe Moss Company, www.roscoemoss-srb.com

### Summary

Since 1983. water supply systems in USA more and more rely on subsurface storage of drinking water. Storage of water is done by dual purpose wells or ASR (Aquifer Storage Recovery). ASR wells store water during the part of year when water is more available and recovery stored water during time when there is shortage in water, usually during summer months of the year. Over 100 ASR well fields are in use in at least 22 states in USA. Also ASR is implemented in many other countries in the world. Main guide in application of ASR technology was economical factor because it is accepted that investment in ASR system usually reduce the price for about 50 % (Pyne 2005) of developing source of water.

Mathematical simulations has important role in designing dual purpose wells. In order for dual purpose well to be successful different conditions must be met and one of the most important is hydraulic conductivity of aquifer. If the hydraulic conductivity is low, large drawdown is developed and if it is too high injected "bubble" of water can moved from recovery point. This is shown with numerical experiment

Ključne reči: dual purpose well, MT3DMS, artificial recharge, Groundwater Vistas, aquifer

Redigovano 15.11.2013.