

PRIMENA NUMERIČKIH MODELA ZA OPTIMIZACIJU RADA BUNARSKE ZAŠTITE EKSPLOATACIONIH BUNARA - PRIMER IZVORIŠTA KORBOVO

Emilija RADOVANOVIĆ¹⁾, Nenad JAĆIMOVIĆ²⁾, Vesna ILIĆ¹⁾

¹⁾ Institut za Vodoprivredu „Jaroslav Černi“

²⁾ Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

REZIME

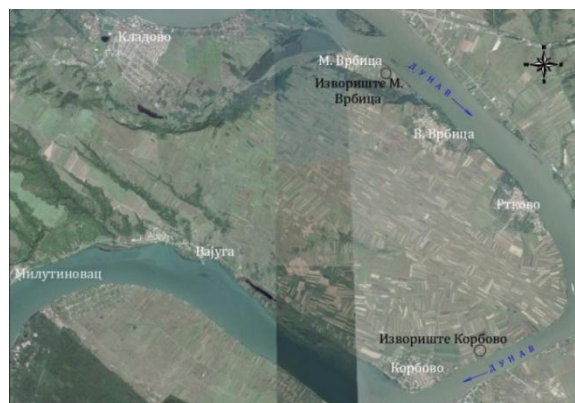
Savremeni matematički modeli strujanja podzemnih voda pružaju izuzetnu podršku kod projektovanja novih, ali i kod različitih optimizacija rada postojećih izvorišta podzemnih voda. Međutim, njihova primena u cilju pouzdanih prognoza zahteva obiman fond podataka do kojih se dolazi isključivo terenskim istraživanjima.

U radu se demonstrira primena naprednih matematičkih modela u cilju optimizacije rada bunarske zaštite izvorišta podzemnih voda na primeru izvorišta "Korbovo" pored Dunava. U tom smislu, prezentovana su neophodna istraživanja i podloge kao osnova za formiranje matematičkog modela. Na osnovu numeričkih analiza predloženo je rešenje rada bunarske zaštite kojom se ostvaruju značajne energetske uštede u odnosu na postojeće uslove.

Ključne reči: izvorišta podzemnih voda, matematički modeli, optimizacija rada bunara

1. UVOD

Izvorište "Korbovo" u priobalju HE "Đerdap 2" služi za vodosnabdevanje dva naselja, Korbovo i Rtkovo koja se nalaze u krajnjim istočnim delovima opštine Kladovo i Dunavskog ključa (Slika 1). Tokom 1995. godine promenjen je dotadašnji način vodosnabdevanja - postojeća kaptaza "Caribaša" je napuštena zbog nedovoljne količine vode potrebne tokom letnjeg perioda, kao i zbog značajno povišenog sadržaja nitrata, a izveden je bunar (BKO-1) na izvorištu „Korbovo“ kojim je trebalo obezbediti potrebnu količinu sanitarno ispravne pijaće vode. Bunar (BKO-1) dubine 20 m, sa pratećim pijezometrom (KO-P1),

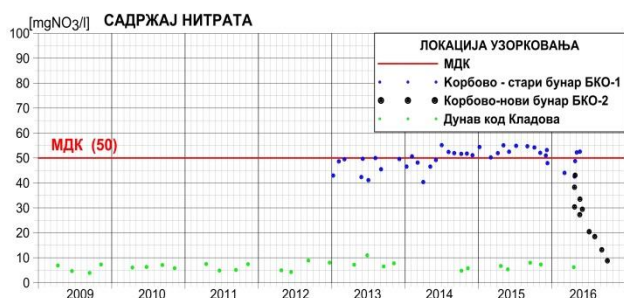


Slika 1. Pregledna karta dunavskog Ključa [1]

izveden je u okviru šljunkovito peskovitih materijala prve dunavske terase na udaljenosti 200 m od Dunava.

Bunarom je zahvatano oko 13 l/s vode koja se distributivnim cevovodima transportovala do potrošača u naseljima, a višak vode u rezervoarski prostor postavljen na višem terenu iznad naselja Korbovo [2]. Sa izvorišta „Korbovo“ pijaćom vodom se snabdeva oko 1500 stanovnika naselja Korbovo i Rtkovo.

Poslednjih godina na lokaciji ovog izvorišta, redovnim mesečnim analizama kvaliteta vode, registrovano je povećanje sadržaja nitrata veće od maksimalno dozvoljenih koncentracija (MDK) koja, prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće (Sl. glasnik SRJ 42/98 i 44/99), iznosi 50 mg NO₃/l. Sadržaj nitrata se od sredine 2014. godine kretao od 50-55 mg NO₃/l (Slike 2 i 3), a već početkom 2015. godine voda sa izvorišta koristila se samo kao tehnička voda [1].



Slika 2. Sadržaj nitrata na izvorištu [1]



Slika 3. Sadržaj nitrata na lokacijama šire zone izvorišta od 2014. do 2016. godine [1, 3]

Zbog toga je neophodno bilo hitno sprovođenje odgovarajućih hidrogeoloških i hidrohemijskih istraživanja, u cilju sagledavanja porekla загађивача i pravaca kretanja загађивача [1, 3]:

- Izvedena je jedna strukturno-pijezometarska bušotina, KO-P2, na izvorištu, na lokaciji bliže Dunavu.
- Izrađeno je više serija analiza kvaliteta vode na postojećem bunaru BKO-1 i na novoj strukturno-pijezometarskoj bušotini KO-P2.

Analize kvaliteta voda koje se zahvataju u široj zoni Dunavskog ključa su ukazale da je registrovanim загађењем obuhvaćen značajan prostor, kao posledica velikih poljoprivrednih površina tretiranih znatnim količinama azotnih đubriva i tankog, relativno propusnog, pokrovnog sloja u široj zoni izvorišta.

U skladu sa hidrogeološkim uslovima na terenu, rešenje je bazirano na zahvatanju podzemnih voda za vodosnabdevanje u zoni bliže Dunavu (izvođenjem

novog bunara BKO-2 kapaciteta ~13 l/s), uz formiranje hidrauličke zavese za dotok vode iz zaleđa (korišćenjem starog bunara BKO-1 sa povećanim protokom $Q \sim 30$ l/s).

Redovnim praćenjem efekata rada sistema zabeležen je eksponencijalni pad koncentracije nitrata u vodi koja se zahvata novim bunarom BKO-2 (Slika 2), dok su i dalje registrovane vrednosti veće od MDK na bunaru BKO-1, pijezometrima po obodu izvorišta, a naročito u zoni kaptaze Caribaša na visokom terenu u zaleđu. Stoga su se otvorile mogućnosti korekcije rada sistema: smanjenje količine vode koja se crpi ili skraćivanje vremena rada bunara BKO-1 u funkciji hidrauličke zavese, čime bi se smanjili troškovi rada sistema.

Za potrebe definisanja predloga optimizacije zaštite izvorišta Korbovo urađen je novi, detaljniji matematički model, na kome su sprovedeni varijantni hidrodinamički proračuni. Cilj je da se kroz matematičko modeliranje i sa više varijanti protoka na bunaru u hidrauličkoj zavesi odredi najekonomičnija varijanta rada bunara BKO-1 kojom će se obezbediti zahtevani uslovi u pogledu MDK nitrata u vodi za piće koja se zahvata na izvorištu „Korbovo“.

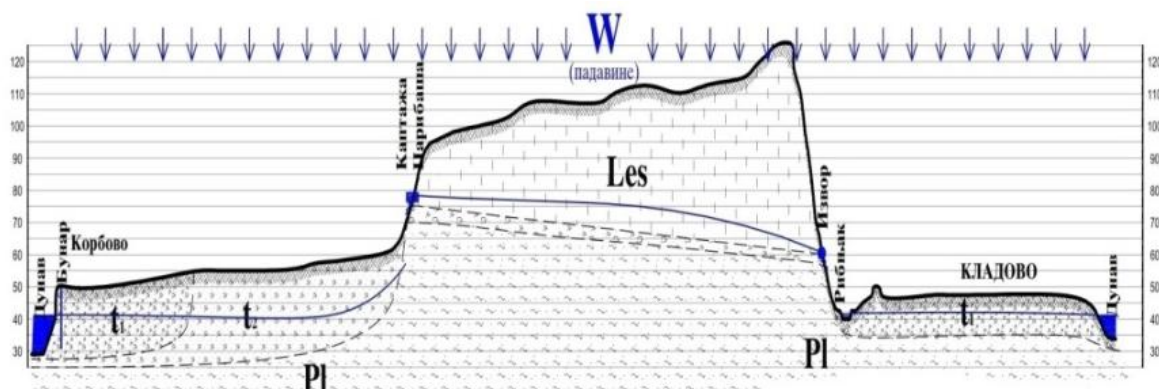
2. HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE

U jesen 2015. godine korišćenjem preliminarnog hidrodinamičkog proračuna sagledane su moguće varijante sanacije, a početkom 2016. godine izvedeni su potrebni radovi na terenu.

Naselje Korbovo leži na prvoj Dunavskoj terasi (t1), koja je eroziono-akumulacionog porekla i izgrađena od peskovito-šljunkovitih sedimenata maksimalne debljine i do 30 m (Slika 4).

U geološkoj građi aluvijalnih i terasnih naslaga izdvajaju se, prema granulometrijskom sastavu i prostornom položaju, tri osnovne hidrogeološke celine [1]:

1. **Povlatni sloj** je sačinjen uglavnom od prašinsto-glinovitih peskova. Koeficijent filtracije ovog slabopropusnog sloja, prema granulometrijskim analizama (USBR), kreće se oko 1×10^{-6} m/s. Debljina povlatnog sloja varira od 2,0-4,0 m, a prema zaleđu se povećava.
2. **Vodnosni sloj** je sačinjen od krupnozrnih šljunkova, malo peskovitih u donjem delu. Prema granulometrijskim analizama (USBR) koeficijent filtracije iznosi od $1,0 \times 10^{-3}$ do $5,0 \times 10^{-3}$ m/s.



Slika 4. Geološki profil terena Korbovo-Kladovo [1]

Debljina vodonosnih naslaga je relativno ujednačena na potezu od izvorišta prema Dunavu i kreće se od 12,0 do 15,0 m.

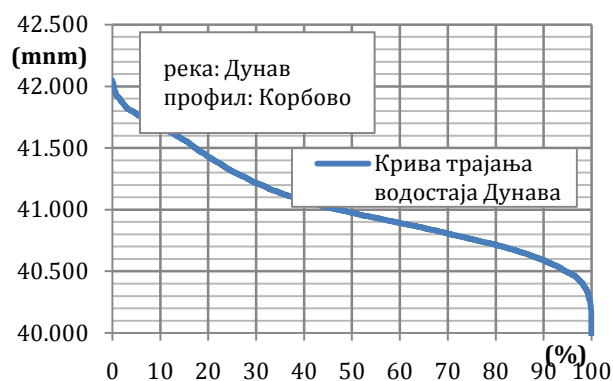
3. **Podinski sloj** koji je glinovit i praktično vodonepropustan. Kote podine vodonosnog sloja na istražnom prostoru su u granicama od 27-30 mm.

Strujanje u vodonosnom, izdankom sloju je u zoni izvorišta „Korbovo“ pretežno sa slobodnim nivoom. U priobalnoj zoni dominantno hranjenje izdani je infiltracijom iz Dunava, dok sa udaljavanjem od obale prevladava dotok iz visokog terena u zaleđu. Uz to, celo područje je u određenoj meri pod uticajem infiltracije padavina usled relativno male debljine povlatnog sloja. Prema rezultatima merenja, generalni smer tečenja podzemne vode je od zaleđa prema Dunavu.

Za razliku od terasnih kolektorskih sedimenata (t_1 i t_2) Dunavskog ključa, les koji se prostire u celom centralnom prostoru Dunavskog ključa, zbog svoje sunderaste (vertikalne) poroznosti, ima ulogu kolektora „sprovodnika“ podzemnih voda do glinovitih naslaga u podini, na čijem kontaktu sa terasnim sedimentima po obodu se registruju izvori. Time se omogućava prihranjivanje terasnih kolektora po obodu iz pravca visokih lesnih sedimenata centralnog dela Dunavskog ključa. Karakteristika ovog lesnog područja su značajne poljoprivredne, obradive površine koje se tretiraju velikim količinama veštačkog đubriva. Ta veštačka đubriva se kroz lesne naslage spiraju sa površine i poniru prema terasnim kolektorima u kojima je formirano izvorište „Korbovo“ [1, 4].

U zoni analiziranog izvorišta „Korbovo“ dominantan uticaj na nivoe podzemnih voda imaju formirani

vodostaji Dunava u akumulaciji HE „Đerdap 2“ (Slika 5) i doticaji iz višeg terena u zaleđu usled proceđivanja voda od padavina.



Slika 5. Kriva trajanja vodostaja Dunava za period 1985 - 2016. god. prema podacima merenja [5]

Analiza merenih koncentracija nitrata u Dunavu kod Kladova je pokazala da njihova vrednost u rečnoj vodi osciluje u granicama od samo 2-10 mgNO₃/l [6]. Ovako niska vrednost (u poređenju sa MDK u vodi za piće) predstavljala je prvi indikator da zagađenje nitratima do izvorišta dolazi sa višeg terena tj. strujanjem podzemne vode od zaleđa prema Dunavu.

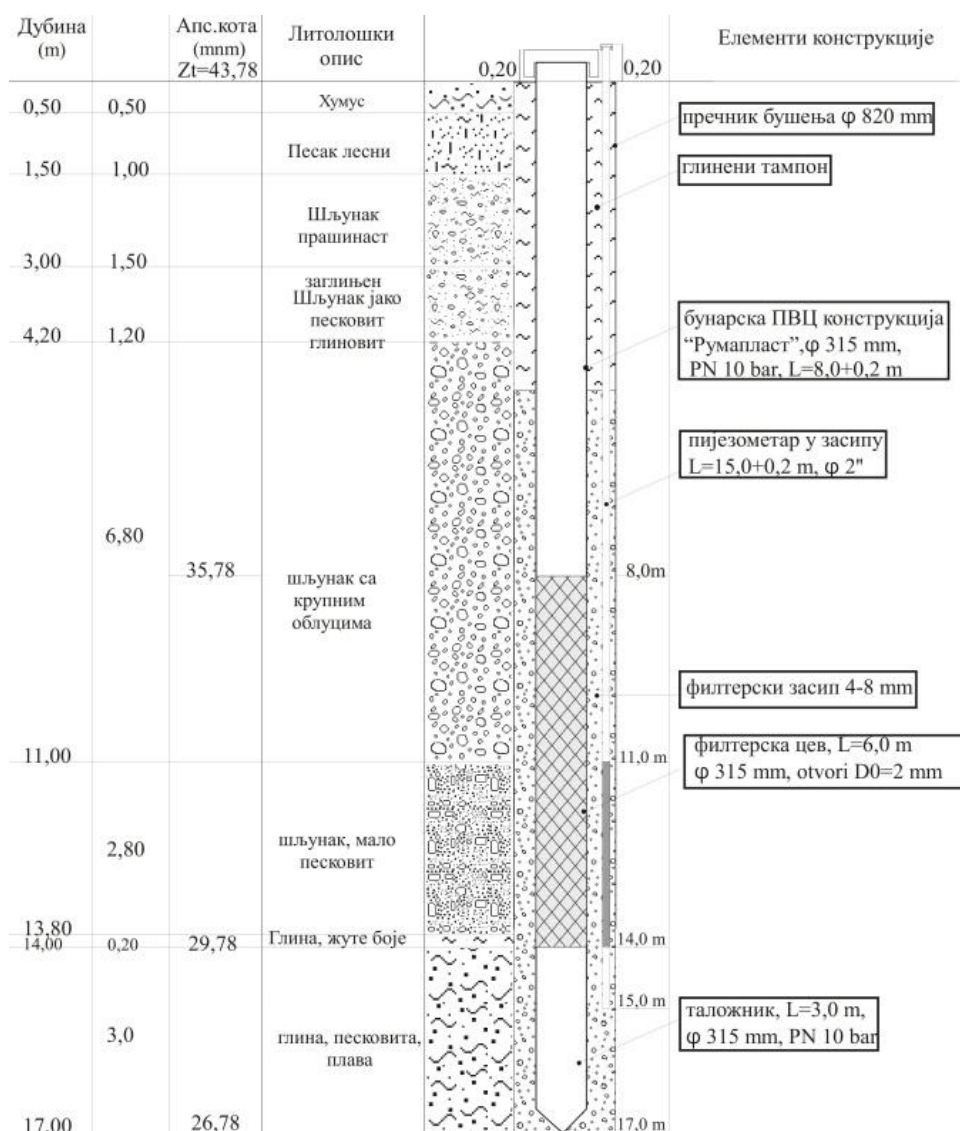
Detaljna merenja od 24.11.2016. pokazala su da izvorište „Korbovo“ radi na sledeći način: BKO-1 u hidrauličkoj zavesi projektovanim kapacitetom od 35 l/s, dok zbog smanjene potrošnje u hladnom periodu godine BKO-2 radi kapacitetom od 13,5 l/s 4 sata dnevno. Koncentracija nitrata na mestu stare kaptaze „Caribaša“ se povećala i dostiže 84 mg/l, što potvrđuje pretpostavke o dotoku zagađenja sa visokog terena u zaleđu (Slika 2).

Istražni radovi u zoni izvorišta Korbovo su obuhvatili izradu većeg broja strukturno-pijezometerskih bušotina i izvođenje jednog opitno-eksploatacionog bunara [4]. U cilju detaljnije identifikacije filtracionih karakteristika sredine u kojoj se odvija dominantno strujanje podzemnih voda izvedeni su tri strukturno-pijezometerske bušotine (KO-P2, KO-P3 i KO-P4), kao i opitno-eksploatacioni bunar bunar BKO-2 (Slika 6) čija je prva namena bila izvođenje testa opitnog crpenja, provera kvaliteta podzemnih voda, uz istovremeno osmatranje bliskih pijezometara. Nakon

završetka istražnih radova bunar je povezan na postojeći sistem za vodosnabdevanje.

Poštujući postojeće hidrodinamičke uslove, izrađen je opitno-eksploatacioni bunar BKO-2 prečnika bušenja Ø820mm sa ugradnjom bunarske konstrukcije od PVC cevi prečnika Ø315/285mm (Slika 6) [7].

Test probnog crpenja predstavlja eksperiment u prirodi, gde se crpenjem iz bunara inicira promena pijezometerskog nivoa izdani koja se prati i registruje u referentnim tačkama (pijezometrima).

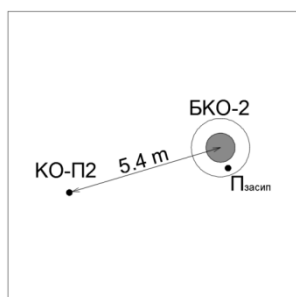


Slika 6. Tehničke karakteristike bunarske konstrukcije novog bunara BKO-2

Osnovni zadaci opitnog crpenja su:

- Utvrđivanje zavisnosti izdašnosti bunara od sniženja nivoa u bunaru,
- Ocena parametara porozne sredine: koeficijenta filtracije $K[L/T]$, transmisivnosti $T[L^2/T]$ i specifične izdašnosti $S_e[-]$,
- Ocena izdašnosti eventualnih budućih bunara.

Rezultati obrade podataka opitnog crpenja su po reprezentativnosti daleko ispred vrednosti koeficijenta filtracije dobijenih na osnovu empirijskih formula, koje se baziraju na granulometrijskom sastavu uzoraka porozne sredine.



Slika 7. Položaj bunara i bliskih piježometara

Za interpretaciju rezultata opitnog crpenja korišćeno je Theiss-ovo analitičko rešenje sa Jacob-ovom aproksimacijom za slučaj crpenja iz usamljenog savršenog bunara, sa konstantnim proticajem:

$$S(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S_e}\right) \quad (2.1)$$

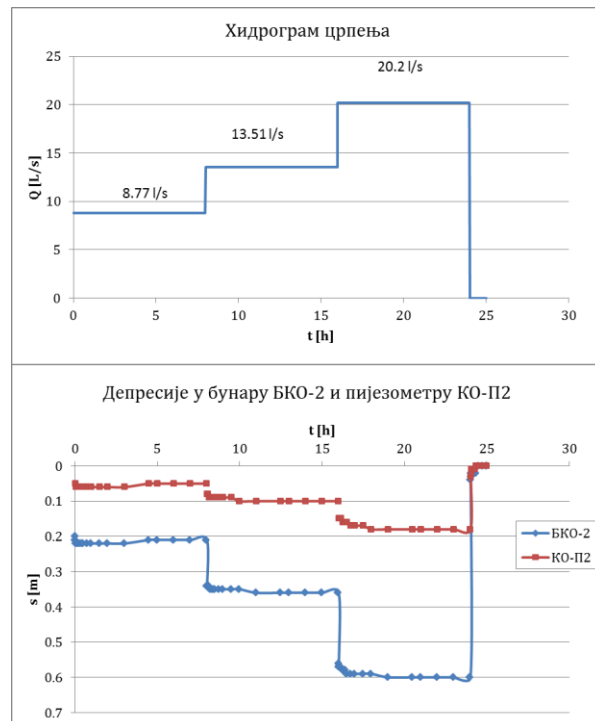
gde je:

- $S(r,t)$ - depresija na rastojanju r od bunara nakon vremena t od početka crpenja [m]
- Q - proticaj na bunaru [m^3/s],
- T - transmisivnost [m^2/s],
- S_e – specifična izdašnost izdani,
- r – udaljenost od bunara,
- t – tekuće vreme, računajući od početka crpenja.

Za poznate parametre izdani T i S_e , i za poznate proticaje, Theiss-ovo rešenje predstavlja sniženje nivoa na bilo kojoj udaljenosti od bunara (r), u bilo koje vreme (t) od početka crpenja. Ovo rešenje izvedeno je za uslove homogene, neograničene izdani.

Pošto se opit crpenja u bunaru izvodi step testom, sa tri različita proticaja u toku vremena, sniženja u bunaru i bliskim piježometrima računski se mogu odrediti primenom principa superpozicije u vremenu prema

kome depresija u referentnoj tački odgovara sumi pojedinačnih depresija za različite proticaje.



Slika 8. Hidrogram crpenja i prikaz osmotrenih depresija u bunaru i pratećem piježometru

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \frac{Q_1}{4\pi T} W(u_1) + \sum_{i=2}^n \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{4\pi T} W(u_i) \quad (2.2)$$

odnosno, za $u < 0.05$

$$S = \frac{Q_1}{4\pi T} \ln\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S_e}\right) + \sum_{i=2}^n \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{4\pi T} \ln\left(\frac{2.25T(t-t_i)}{r^2 S_e}\right) \quad (2.3)$$

gde je t_i vremenski trenutak između promene pražnjenja sa Q_i na Q_{i-1} .

U slučaju postojanja granica relativno jednostavnih geometrijskih oblika postavljeni problemi se mogu rešavati kao strujanje u izdani neograničenog prostiranja, primenom metode preslikavanja, odnosno uvođenjem fiktivnog bunara koji simulira efekte granica strujanja i uslove na njima [8].

Primena metode preslikavanja bunara i računskog prelaska sa ograničene na neograničenu izdan primenjen je za konkretan slučaj ograničene izdani

pravom ekvipotencijalnom linijom, što u ovom slučaju predstavlja strujanje prema bunaru pored reke. Za realni bunar uvodi se fiktivni bunar koji predstavlja nalivajući izvor sa proticajem koji ima negativan znak. Fiktivni bunar se od reke nalazi na jednakom rastojanju kao i bunar, sa obalom kao osom simetrije. Tako se postiže da na obali reke bude konstantna pijezometarska kota.

Za bunar pored reke koji radi sa promenljivim proticajima po vremenu, depresija se može sračunati iz sledećeg izraza:

$$S = \frac{Q_1}{4\pi T} [W(u_b) - W(u_i)] + \sum_{k=2}^n \frac{(Q_k - Q_{k-1})}{4\pi T} [W(u_b) - W(u_i)] \quad (2.4)$$

gde je:

- $W(u_b)$ - bunarska funkcija realnog bunara,
- $W(u_i)$ - bunarska funkcija fiktivnog bunara,
- k - redni broj proticaja, $n=4$.

Na osnovu izraza (2.4) obrađeni su podaci opitnog crpenja. Poređenjem osmotrene i sračunate depresije u pijezometru, procenjeni su parametri vodonosnog sloja (Tabele 2).

Tabela 2. Rezultati probnog crpenja iz bunara BKO-2

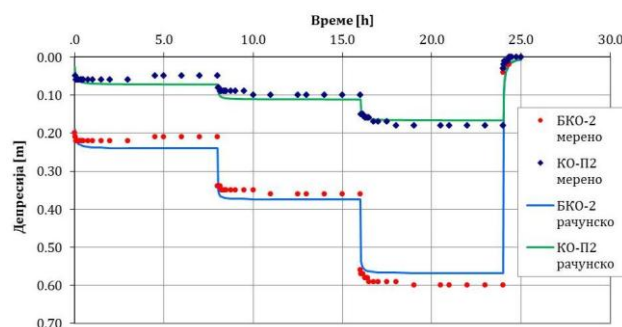
r_b (m)=	0.5	Време (h)	Q (l/s)
T (m ² /s)=	42.3x10 ⁻³	0	8.77
Se=	13.0x10 ⁻³	8	13.51
		16	20.2
		24	0

3. OPIS MATEMATIČKOG MODELA

Cilj izrade matematičkog modela (u nastavku MM) je da se sagleda sadašnji režim podzemnih voda i simuliraju budući, prognozni uslovi rada optimizovanog sistema kojim bi se naselju Korbovo obezbedila odgovarajuća količina vode za piće zahtevanog kvaliteta.

Za izradu MM korišćen je softverski paket Groundwater Vistas (ESI-Environmental Simulations, Incorporated) koji predstavlja integralni 3D sistem za matematičko modeliranje strujanja podzemnih voda. Za unos podataka i interpretaciju rezultata proračuna korišćena je verzija Groundwater Vistas 6.43 Build 4 (Jim Rumbaugh, Doug Rumbaugh).

Прорачунате и осмотрене депресије у бунару и пратећем пијезометру



Slika 9. Sračunate i osmotrene depresije u bunaru i pratećem pijezometru

Model rešava osnovnu jednačinu prostornog strujanja podzemnih voda, koja se može napisati u obliku:

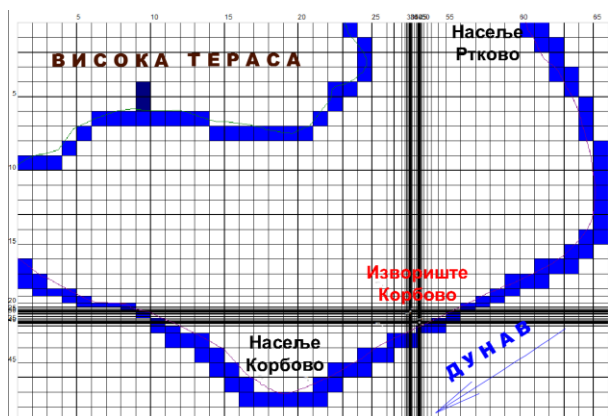
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

gde su:

- x, y, z - Dekartove koordinate,
- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} - vrednost koeficijenta filtracije u pravcu x, y i z ose (LT^{-1}),
- h - pijezometarski nivo,
- W - zapreminski tok po jedinici zapremine tj. prihranjivanje ili dreniranje izdani (T^{-1}),
- S_s - specifična izdašnost izdani (L^{-1}),
- t - vreme.

Hidrodinamički model šireg područja izvorišta je izrađen na osnovu raspoloživih podataka terenskih merenja, hidrogeoloških istraživanja i osmatranja NPV i padavina u višegodišnjem periodu. Strujna oblast je šematizovana kao dvoslojevita porozna sredina koja se sastoji od vodonosnog sloja (akvifera) i povlatnog sloja. Akvifer predstavlja osnovni vodonosni sloj heterogenih karakteristika u planu.

Horizontalno rasprostranjenje područja istraživanja, tj. modela, definisano je prirodnim i usvojenim hidrodinamičkim granicama strujne oblasti. Južnu i istočnu granicu strujne oblasti predstavlja Dunav, a severnu i severozapadnu kontakt terasnih kolektorskih sedimenata sa slabopropusnim glinovitim naslagama (koje predstavljaju podinu za visoki teren u središnjem delu dunavskog Ključa - Slika 4. Geološki profil terena Korbovo - Kladovo). Prikaz granica strujne oblasti u planu dat je na Slici 10.



Slika 10. Granice strujne oblasti (ujedno granični uslovi modela)

Diskretizacija strujnog polja u planu je izvršena mrežom kvadrata (polja) osnovne dimenzije 200x200m, koja je u zoni oko bunara metodom polovljenja postepeno usitnjena do polja dimenzija 3.125x3.125m u koje se smešta granični uslov „bunar“.

Početne vrednosti vodoprovodnosti vodonosnog sloja su usvojene na osnovu rezultata hidrogeoloških istraživanja i testiranja opitno-eksploatacionog bunara BKO-2. Kreću se od oko $30 \cdot 10^{-3}$ do $42 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Transmisivnost od $42 \cdot 10^{-3}$ m²/s u zoni bunara BKO-2 potvrđena je opitom crpenja, a ostale vrednosti su u procesu kalibracije modela korigovane kako bi se dobilo zadovoljavajuće slaganje računskih i merenih vrednosti.

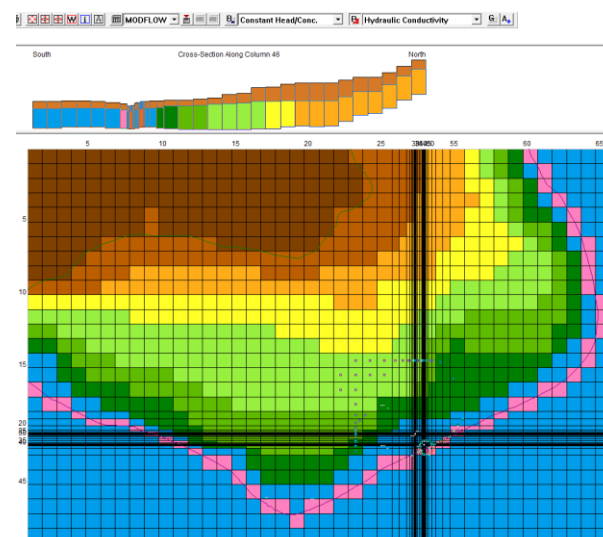
Na matematičkom modelu strujanje podzemnih voda je sa slobodnim nivoom, pa je vodoprovodnost kolektorskog sloja bilo potrebno zadati u vidu koeficijenta filtracije. Na celom modelu zadato je ukupno 10 zona sa različitim koeficijentima filtracije. Zona 1 sa koeficijentom filtracije $1 \cdot 10^{-8}$ m/s obuhvata slabopropusne glinovite naslage u visokom terenu.

Testom probnog crpenja za vodonosni sloj u užoj zoni izvorišta dobijena je vrednost $3,8 \cdot 10^{-3}$ m/s. Nakon kalibracije pomoću merenja NPV u široj zoni izvorišta usvojeno je da se vrednost koeficijenta filtracije u vodonosnom sloju kreće od $5 \cdot 10^{-5}$ do $3,5 \cdot 10^{-3}$ m/s i promenljiva je po zonama - od Zone 2 uz glinoviti visoki teren do Zone 8 u kojoj se nalazi izvorište.

Kolmirajući sloj uz Dunav zadat je Zonom 9. Zbog relativno krupnog koraka diskretizacije modela, koji je u ovoj zoni reda veličine 100x100m, usvojen je

koeficijent filtracije od $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, čime je ostvaren odnos $K\delta/\delta = 1 \cdot 10^{-5}$ s⁻¹.

Povlatni sloj zadat je Zonom 10 sa koeficijentom filtracije $5 \cdot 10^{-6}$ m/s.



Slika 11. Zoniranje modela prema kriterijumu vodoprovodnosti

Pri izradi matematičkog modela strujanja podzemnih voda korišćeni su sledeći granični uslovi:

- **definisane vrednosti nivoa - granice konstantnog potencijala** (Constant Head). Prva granica je zadata registrovanim nivoom Dunava. Istočno i južno od ove granice ćelije modela su označene kao neaktivne (No Flow). Zbog načina na koji je zadat kolmirajući sloj, granični uslov Dunav (kota dna ~31 mnm) predstavlja direktnu hidrauličku vezu sa udaljenom granicom konstantnog potencijala. Drugi granični uslov zadat je u severnom i severozapadnom delu područja takođe kao polja tipa Constant Head. Postavljanje granice konstantnog potencijala na ovom mestu dobro ilustruje i pojednostavljuje realnu sliku na terenu - mnoštvo izvora po obodu visokog lesnog platoa čiju je izdašnost i broj teško utvrditi. Vrednosti ovog graničnog uslova usvojene su u procesu kalibracije modela. Početna vrednost za kalibraciju bili su nivoi vode koja se pojavljuje u vidu zabarenja u neposrednom podnožju visokog lesnog platoa u središnjem delu Ključa (oko 55 mnm). Nakon dugotrajnog variranja uporedo sa koeficijentima filtracije izdani na celoj oblasti modela usvojena je vrednost konstantnog potencijala duž ove granice $H=57$ mnm.

- **zadat protok u bunarima BKO-1 i BKO-2** kao polja tipa Well. Uslov Well u modelu se zadaje iz editora u kome se definišu: 1) poluprečnik bunarske konstrukcije [L], 2) vrsta graničnog uslova – ustaljen (Steady State) ili sračunat (Computed), 3) protok na bunaru [L^3T^{-1}] (sa predznakom „ - “ jer je u pitanju crpenje).
- **infiltracija** koja je usvojena je kao 10% konstantnog intenziteta padavina za prosečnu godinu [LT^{-1}]. Prosečna vrednost godišnje sume padavina od 655 mm izražena preko intenziteta padavina iznosi $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ m/s. Infiltracija je zadata parametrom Recharge tako što je celom povlatnom sloju dodeljena zona sa vrednošću ovog parametra $2 \cdot 10^{-9}$ m/s.

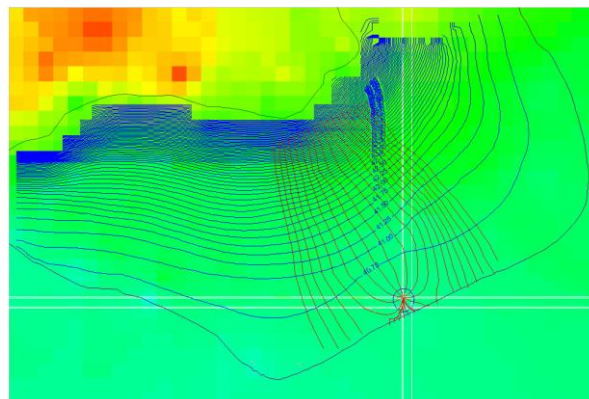
Kalibracija je obavljena u procesu rešavanja inverznog zadatka: iterativnom realizacijom hidrodinamičkih proračuna uz variranje parametara sredine i poređenjem rezultata proračuna sa piježometarskim nivoima koji su registrovani detaljnim merenjima na području.

Etaloniranje MM je izvršeno za tri datuma merenja: 2. januar, 24. novembar i 9. decembar 2016. god u stacionarnom režimu strujanja podzemnih voda, a na osnovu podataka dobijenih merenjima NPV na istražnom području i vodostaja Dunava (srednja vrednost nivoa za prethodnih 10 dana). Detaljnost merenja nije ista za sve usvojene datume:

- 2. januara bunar BKO-2 i piježometar KO-P2 nisu postojali i model za optimizaciju nije bio u planu, te postoje samo redovna merenja piježometara u zaleđu (KO-P3 i KO-P4);
- 24. novembra (za potrebe ovog MM);
- 9. decembra je merenje delimično srpovedeno.

Rezultati ovih proračuna (Slika 12) u široj zoni izvorišta za određene datume pokazuju relativno dobro slaganje računskih i merenih vrednosti nivoa podzemnih voda (Tabela 3).

Vrednosti sniženja u bunaru BKO-2 poređene su sa časovima rada bunara. S obzirom na to da pumpa u bunaru BKO-2 ne radi projektovanim (i na modelu zadatim, ustaljenim) kapacitetom sve vreme, već samo 4 sata dnevno, nivoi podzemne vode na mestu bunara i njegovom pratećem piježometru su nepouzdati, tako da su vrednosti* (Tabela 3) dobijene proračunom u skladu sa procenjenim i realnim mogućnostima bunara i filtracionim karakteristikama porozne sredine.



Slika 12. Rezultat proračuna u planu pri etaloniranju modela za 2. januar 2016. Bojama od zelene do narandžaste predstavljene su visinske zone terena (od 44 m do 94 m). Plave linije predstavljaju ekvipotencijale, a crvene strujnice čije su polazne tačke proizvoljno zadate.

Tabela 3. Izmereni i sračunati nivoi podzemnih voda u široj zoni izvorišta za određene datume [9]

Datum	02.01.2016.		24.11.2016.		09.12.2016.	
Rad bunara	Q _{BKO-1} =13,5 l/s, Q _{BKO-2} = 0 l/s		Q _{BKO-1} =35 l/s, Q _{BKO-2} = 13,5 l/s		Q _{BKO-1} =35 l/s, Q _{BKO-2} = 13,5 l/s	
Vodostaj Dunava [mnm] - merenja HE "Derdap"	40.53		41.21		40.95	
NPV [m]	мерено	модел	мерено	модел	мерено	модел
BKO-1	-	40.09	39.83	39.87	-	39.57
KO-P1	-	40.31	40.72	40.45	-	40.17
BKO-2	-	40.50	41	40.71*	-	40.43*
KO-P2	-	40.50	41.08	40.83*	40.87	40.56*
KO-P3	40.56	40.58	41.03	41.13	40.78	40.87
KO-P4	40.87	40.71	41.01	41.23	-	40.97

Za stanje na terenu od 2. januara 2016 urađena je i kalibracija modela pomoću koncentracije nitrata koja je u decembru izmerena na ključnim lokacijama. Analizom bilansa, uz praćenje strujnica oko tada jedinog bunara BKO-1(Q=13,5 l/s) dobijeno je da sa višeg terena dotiče 83,8% ukupnog dotoka (11,42 l/s), a iz Dunava 16,2% (2,2 l/s). Kada se uzmu u obzir koncentracije nitrata u tim dotocima ($\sim 60 \text{ mgNO}_3/\text{l}$ iz uzorka sa kaptaže Caribaša i $\sim 7 \text{ mgNO}_3/\text{l}$ u Dunavskoj vodi), korišćenjem formule za mešanje dva rastvora poznatih masenih koncentracija dobijena je koncentracija $\sim 51 \text{ mgNO}_3/\text{l}$, jednačina (3.2). Ta vrednost okvirno odgovara merenim koncentracijama NO_3 u bunarskoj vodi (poslednje merenje izvršeno 12. decembra 2016. godine).

$$\rho_3(NO_3) = \frac{60 \frac{mg}{L} - 11,42L + 7 \frac{mg}{L} - 2,2L}{13,62L} = 51,4 \frac{mg}{L} \quad (3.2)$$

Ovako kalibrisan model razmatranog područja predstavljao je osnovu za izradu prognoznih hidrodinamičkih proračuna i analiza varijantnih tehničkih rešenja korišćenja postojećeg izvorišta.

4. ANALIZA RAZULTATA I PREDLOG REŠENJA

U skladu sa uslovima na terenu pri karakterističnim vodostajima Dunava analizirano je koliko iznosi minimalni protok na bunaru BKO-1 koji obezbeđuje da sve strujnice koje „ulaze“ u BKO-2 potiču iz Dunava. Dakle, cilj je da i dalje postoji apsolutna zaštita od zagađenja koje dolazi iz zaleđa, uz maksimizovanje uštede električne energije koja se koristi za rad bunara BKO-1 u hidrauličkoj zavesi. Za takvo rešenje urađeni su prognozni hidrodinamički proračuni na kalibrisanom MM. Varijante su obuhvatile tri karakteristične kote nivoa vode Dunava kod profila Korbovo u aktuelnom režimu uspora (kriva trajanja sa Slike 5):

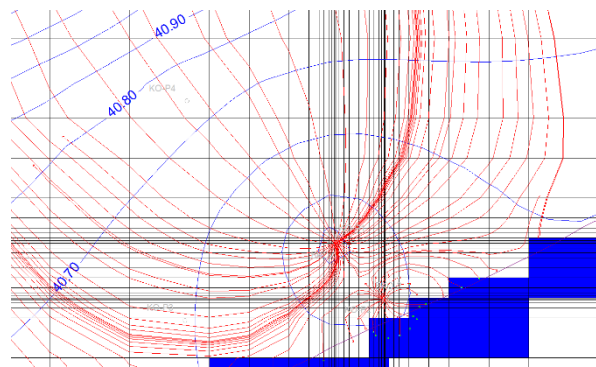
- kota 41,66 mnm - vodostaj trajanja 10%,
- kota 40,97 mnm - vodostaj trajanja 50%,
- kota 40,59 mnm - vodostaj trajanja 90%.

U svakoj je variran protok na bunaru BKO-1 i analizirana gusta slika strujnica u neposrednoj okolini bunara BKO-1 i BKO-2 kako bi se utvrdila minimalna vrednost protoka u hidrauličkoj zavesi kojim se BKO-2 štiti od zagađenja. Za sve tri karakteristične kote nivoa Dunava dobijen je protok $Q_{BKO-1,min} = 14,5$ l/s što predstavlja optimizovanu vrednost protoka. Time se došlo do važnog zaključka - da zahtevani protok na bunaru BKO-1 u hidrauličkoj zavesi vrlo malo zavisi od nivoa Dunava.

Prikaz prognoznog proračuna, za teorijski najnepovoljniji vodostaj $Z_{90\%} = 40,59$ mnm, dat je u krupnom planu na Slici 13.

Kao rešenje za optimalan rad izvorišta „Korbovo“ se predlaže izbor između dve opcije:

1. da se postojećoj pumpi protok smanji (priguši) na vrednost što bližu optimizovanoj tako da se ostvari što veća ušteda energije, ali tako da protok bude u skladu sa radnim karakteristikama pumpe koje garantuje proizvođač;
2. da se bunar opremi novim pumpnim agregatom i potrebnom hidromašinskom opremom, koji bi ispunjavali nove hidrauličke uslove formirane optimizovanim, manjim protokom.



Slika 13. Ekvipotencijale i strujnice u užoj zoni izvorišta za optimizovanu vrednost $Q_{BKO-1,min} = 14,5$ l/s, $Q_{BKO-2,min} = 13,5$ l/s i vodostaj Dunava $Z_{90\%} = 40,59$ mnm.

Pumpa koja je ugrađena u bunar BKO-1 pri sanaciji izvorišta „Korbovo“ početkom 2016. godine nije opremljena frekventnom regulacijom, a time ni za veće uštede u protoku i energiji. Jedino rešenje bez zamene pumpe jeste da se protok priguši zatvaračem na potisu. Ako se pumpa priguši na minimalni dozvoljeni kapacitet (prema katalogu proizvođača) od 60 m³/h ($16,7$ l/s), ista će raditi snagom koja je za $1,1$ kW manja od snage na vratilu pumpe pri postojećem režimu rada. Ako se pretpostavi da pumpa radi 24 časa dnevno, 365 dana u godini, smanjenjem snage od $1,1$ kW bi se na godišnjem nivou uštedelo 8760 h · $1,1$ kW = 9.636 kWh energije.

Analizom varijante sa ugradnjom nove pumpe, usklađene sa potrebama pumpanja prema ovoj studiji, ustanovljeno je da bi se ostvarila godišnja ušteda energije od 37.318 kWh.

5. ZAKLJUČCI

Izvorište "Korbovo" locirano u južnom delu područja Dunavski Ključ služi za vodosnabdevanje dva naselja: Korbovo i Rtkovo čije potrebe iznose ~ 10 l/s. Usled pojave nitrata u vodi, poreklom sa velikih poljoprivrednih površina prostranog lesnog platoa u centralnom delu Dunavskog Ključa zbog tretiranja zemljišta značajnim količinama azotnih đubriva, početkom 2016. godine su izvedeni hitni sanacioni radovi za zaštitu izvorišta. Izveden je novi bunar u zoni bliže Dunavu BKO-2 $\sim 13,5$ l/s kojim se zahvata sanitarno ispravna podzemna vode za vodosnabdevanje, uz formiranje hidrauličke zavesa za dotok vode iz zaleđa korišćenjem starog bunara BKO-1 čiji je kapacitet povećan na 35 l/s.

Redovnim praćenjem rada sistema i kvaliteta podzemne vode utvrđeno je da je za nekoliko meseci nakon sanacije koncentracija nitrata snižena značajno ispod MDK u vodi za piće. Time je otvorena mogućnost da se smanji količina vode koja se crpi bunarom BKO-1 u hidrauličkoj zavesi. Za potrebe definisanja predloga optimizacije zaštite izvorišta Korbovo urađen je detaljan matematički model sa prostorno promenljivim karakteristikama izdani koje su određene istražnim radovima i merenjima na terenu. Obavljena je kalibracija modela u stacionarnom režimu za tri stanja iz 2016. godine, a potom su sprovedeni varijantni hidrodinamički proračuni za karakteristične nivoe Dunava (trajanja 10%, 50% i 90%). Određena je najekonomičnija (optimizovana) varijanta rada bunara BKO-1 uz zahtev da on i dalje obezbeđuje apsolutnu zaštitu izvorišta „Korbovo“ od zagađenja koje dolazi iz zaleđa. Optimizovana vrednost protoka na bunaru BKO-1 iznosi $Q_{\text{BKO-1, min}}=14,5$ l/s i gotovo da ne zavisi od nivoa Dunava.

Na osnovu analize utroška energije na pumpanje, predloženo je da se bunar opremi novim pumpnim agregatom, koji bi bio usklađen sa novim hidrauličkim uslovima zahtevanog rada sa manjim protokom, čime bi se omogućile značajne uštede u potrošnji električne energije.

LITERATURA

- [1] Studija definisanja uzroka zagađenja sa predlogom rešenja sanacije izvorišta za vodosnabdevanje četiri naselja Korbovo-Rtkovo i Mala-Velika Vrbica, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 2016. Godine
- [2] Glavni projekat dogradnje sistema za snabdevanje vodom naselja Rtkovo i Korbovo, Geosondaprojekt, Beograd, 1996. god.
- [3] Dopunske analize kvaliteta podzemnih voda na pijezometrima i bunarima u široj zoni izvorišta u periodu 2015-2016. godina, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
- [4] Elaborat o rezultatima hidrogeoloških istraživanja za potrebe sanacije spoljnih vodovoda i kanalizacije i izradu bunara za vodosnabdevanje četiri naselja u zoni akumulacije HE „Đerdap 2“ na teritoriji opštine Kladovo - izvorište „Korbovo“ i „Mala Vrbica“, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 2016. godine
- [5] Program I osmatranja, merenja i analize uticaja Dunava na priobalje izazvanih izgradnjom i radom HE „Đerdap I“ i HE „Đerdap II“ – Praćenje režima površinskih voda – Osmatranje nivoa Dunava na sektoru Đerdapa zaključno sa 2016. godinom, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
- [6] Program VIII osmatranja, merenja i analize uticaja Dunava na priobalje izazvanih izgradnjom i radom HE „Đerdap I“ i HE „Đerdap II“ – Praćenje promena kvaliteta vode Dunava na sektoru Đerdapa zaključno sa 2016. godinom, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
- [7] Projekat izvedenog objekta – Sanacija spoljnih vodovoda i kanalizacija – Izrada bunara za vodosnabdevanje četiri naselja u zoni akumulacije „Đerdap 2“ na teritoriji opštine Kladovo, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Zavod za hidrogeologiju i izučavanje režima podzemnih voda, Beograd, 2016. god.
- [8] Milan Vuković, Anđelko Soro, Hidraulika bunara-Teorija i praksa - Posebno izdanje Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ Beograd 1995.godine
- [9] Program II osmatranja, merenja i analize uticaja Dunava na priobalje izazvanih izgradnjom i radom HE „Đerdap I“ – Osmatranje nivoa podzemnih voda zaključno sa 2016. godinom, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

APPLICATION OF NUMERICAL MODELS FOR IMPROVEMENT OF WELLHEAD PROTECTION MANAGEMENT - CASE STUDY: KORBOVO WELLHEAD

by

Emilija RADOVANOVIĆ¹⁾, Nenad JAĆIMOVIĆ²⁾, Vesna ILIĆ¹⁾

¹⁾ Institute for the Development of Water Resources „Jaroslav Černi“

²⁾ University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering

Summary

Advanced mathematical models of groundwater flow provide exceptional support in designing of new wellheads, but also optimization analyses of the existing groundwater resources management. However, for reliable forecasts their application requires a large data base that may be obtained exclusively through field research. The paper demonstrates the application of advanced mathematical models in an optimization analysis of the wellhead protection system management, with the case study of the wellhead "Korbovo", at the Danube riverbank. Required field investigations and

background data were presented as the basis for the formulation of mathematical model. On the basis of numerical analysis, a solution was proposed for the wellhead protection management, which generates significant energy savings in relation to the existing conditions.

Key words: groundwater resources management, mathematical models, optimization of the well management

Redigovano 15.10.2017.