

Primjeri međuutjecaja površinskih i podzemnih voda

Goran Gjetvaj, Goran Lončar, Davor Malus, Eva Ocvirk

Ključne riječi

površinske vode,
podzemne vode,
međuutjecaj,
Višenamjenski kanal
Dunav-Sava,
regionalno vodocrpilište

Key words

surface waters,
ground waters,
interdependence,
Danube-Sava
multipurpose canal,
regional water supply
area

Mots clés

eaux superficielles,
eaux souterraines,
interdépendance,
canal multi-usage
Danube - Sava,
zone régionale
d'alimentation en eau

Ключевые слова

поверхностные воды,
подземные воды,
взаимное влияние,
Многофункциональный
канал Дунай-Сава,
региональный источник
водоснабжения

Schlüsselworte

oberflächliche Gewässer,
unterirdische Gewässer,
Zwischeneinfluss,
mehranwendbarer Kanal
Donau - Save,
regionale Schöpfstelle

G. Gjetvaj, G. Lončar, D. Malus, E. Ocvirk

Prethodno priopćenje

Primjeri međuutjecaja površinskih i podzemnih voda

Projektima je predviđena izgradnja Višenamjenskog kanala Dunav Sava i regionalnog vodocrpilišta Istočne Slavonije na relativno maloj međusobnoj udaljenosti. Kako su oba sustava usječena u isti vodonosni sloj u provedenom istraživanju je analizirana mogućnost njihove hidrauličke povezanosti i međuutjecaja korištenjem trodimenzionalnog numeričkog modela toka podzemnih voda. Posebno su analizirane mogućnosti promjena količine i kvalitete podzemnih voda zahvaćanih na crpilištu.

G. Gjetvaj, G. Lončar, D. Malus, E. Ocvirk

Preliminary note

Example of interdependence between surface waters and ground waters

According to respective design documents, The Danube - Sava multipurpose canal and the regional water supply system for Eastern Slavonia are planned at a relatively small distance from one another. As both systems cut through the same water bearing layers, the possibility of their hydraulic connection and interdependence has been analyzed using a three-dimensional numerical model of ground water flow. Possible changes in the quantity and quality of ground water in the water bearing area are also studied.

G. Gjetvaj, G. Lončar, D. Malus, E. Ocvirk

Note préliminaire

L'exemple d'interdépendance entre les eaux superficielles et les eaux souterraines

Selon les projets respectifs, le canal multi-usage Danube - Sava et le système régional d'alimentation en eau de la Slavonie d'est sont planifiés à la distance assez faible l'un de l'autre. Etant donné que les deux systèmes traversent les mêmes couches aquifères, la possibilité de leur raccordement hydraulique et interdépendance a été analysée en utilisant un modèle numérique tridimensionnel d'écoulement des eaux souterraines. Les changements possibles dans la quantité et la qualité des eaux souterraines dans la zone aquifère ont également été étudiés.

Г. Гъетвај, Г. Лончар, Д. Малус, Е. Оцвирк

Предварительное сообщение

Пример взаимного влияния поверхностных и подземных вод

Проектами предусматривается сооружение Многофункционального канала Дунай-Сава и регионального источника водоснабжения в Восточной Славонии на относительно небольшом расстоянии друг от друга. Поскольку в обеих системах используется один и тот же водоносный слой, в проведенном исследовании выполнен анализ возможности их гидравлической связанности и взаимного влияния с использованием трехкоординатной цифровой модели течения подземных вод. Отдельно проанализированы возможности изменения объемов и качества подземных вод, забираемых из источника водоснабжения.

G. Gjetvaj, G. Lončar, D. Malus, E. Ocvirk

Vorherige Mitteilung

Beispiel des Zwischeneinflusses der oberflächlichen und unterirdischen Gewässer

Mit Projekten ist der Ausbau des mehranwendbaren Kanals Donau - Save und der regionalen Schöpfstelle des östlichen Slavonien mit relativ kleiner gegenseitiger Entfernung vorgesehen. Da beide Systeme in die selbe wasserführende Schicht eingeschnitten sind ist in der durchgeführten Untersuchung die Möglichkeit deren hydraulischer Verbindung und dessen Zwischeneinflusses analysiert, mit den dreidimensionalen numerischen Modellen des unterirdischen Wasserlaufs. Besonders analysierte man die Möglichkeiten der Veränderung des Quantums und der Qualität der unterirdischen Gewässer gefasst an der Schöpfstelle.

Autori: Prof. dr. sc. **Goran Gjetvaj**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Goran Lončar**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Davor Malus**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Eva Ocvirk**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

1 Uvod

Za potrebe vodoopskrbe u trima istočnoslavonskim županijama - Vukovarsko-srijemskoj, Osječko-baranjskoj i Brodsko-posavskoj gradi se regionalni vodoopskrbni sustav. U sklopu regionalnog sustava na području općine Sikirevci gradi se crpilište te planira izgradnja uređaja za kondicioniranje vode i centralne crpne stanice maksimalnog kapaciteta 2000 l/s. Dosad su u pogon puštena tri zdenca na crpilištu Sikirevci ukupne izdašnosti 375 l/s. U idućim fazama se planira proširenje crpilišta do izdašnosti od 1000 l/s. Proširenjem vodoopskrbe predviđa se i uključivanje vodocrpilišta na lokaciji Gundinci izdašnosti 1000 l/s (slika 1.). S obzirom da je izgradnja

gućeg utjecaja kanala na razine i kvalitetu vode na crpilištima. Dosadašnja su istraživanja razmatrala interakciju vodonosnika i crpilišta [1, 2, 3] ili utjecaj izgradnje kanala na režim podzemnih voda [4, 5]. U ovom se radu istraživao međuutjecaj dvaju hidrotehničkih građevina koje se nalaze u istom vodonosniku, a težište je stavljeno na činjenicu da su rijeka Sava i višenamjenski kanal usječeni u površinski dio vodonosnika, dok zdenci zahvaćaju cijeli sloj te je bilo nužno koristiti se trodimenzij-skim modelom toka podzemnih voda i pronosa tvari.

Istraživanjem je obuhvaćeno tečenje podzemnih voda u širem području vodocrpilišta Gundinci i Sikirevci do granica rasprostiranja vodonosnog kompleksa te rijeka



Slika 1. Šire područje vodocrpilišta Gundinci i Sikirevci te hidročvora Sava za koje je uspostavljen model strujanja podzemnih voda (modelom obuhvaćeno područje omeđeno je pravokutnikom svijetlozelene boje)

plovnog puta izuzetno složen i financijski zahtjevan projekt, u prvoj fazi se predviđa izgradnja melioracijskog kanala koji je po dimenzijama manji od plovnog puta, ali prolazi istom trasom. U idućim fazama izgradnje melioracijski će se kanal dograditi da bi zadovoljio kriterije za plovni put.

Projektom predviđena crpilišta i višenamjenski kanal usječeni su u isti vodonosni sloj te će među njima postojati hidraulička veza. Cilj istraživanja je određivanje mo-

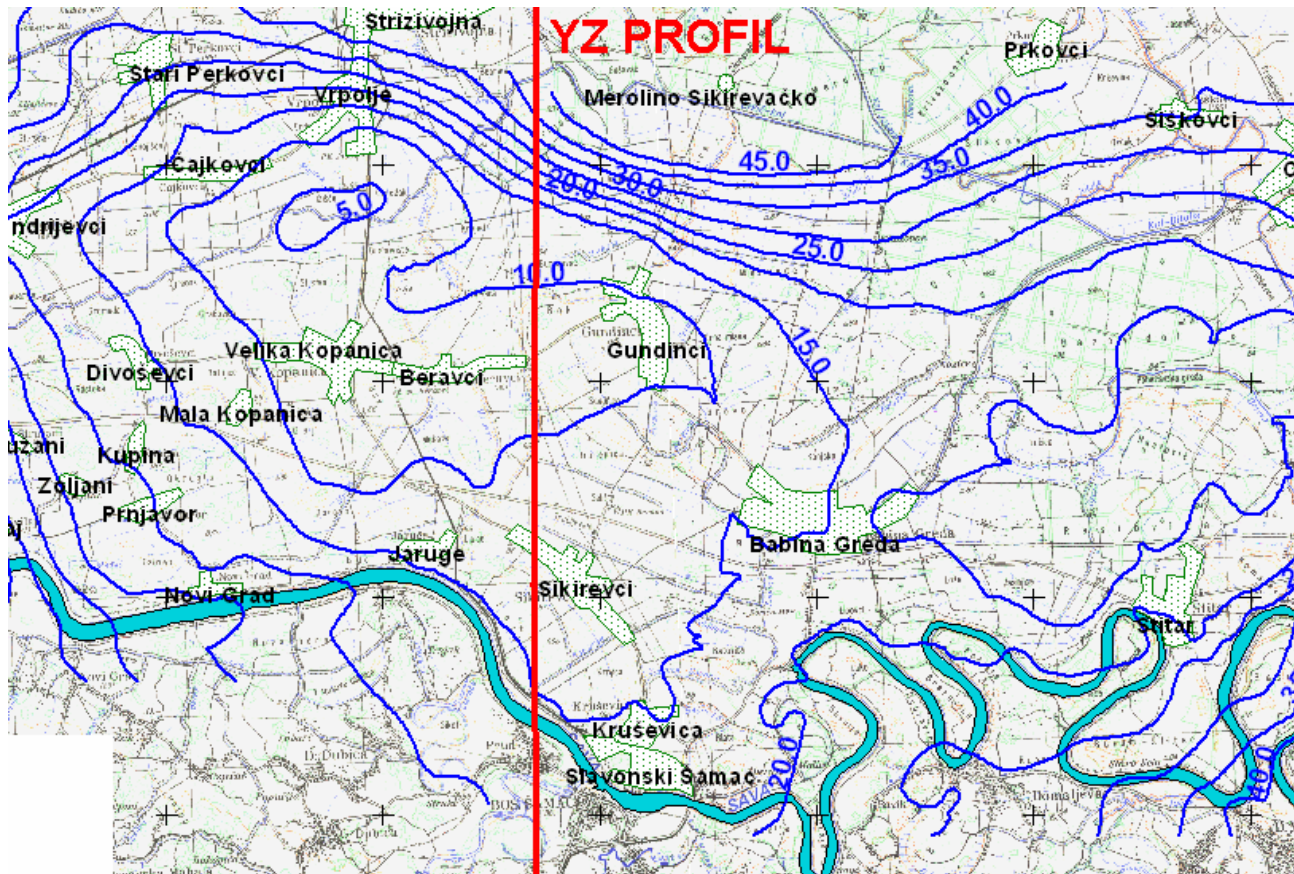
Sava, melioracijski kanal i Višenamjenski kanal Dunav-Sava (VKDS) sa pripadajućim hidročvorom, kako bi se odredili njihovi međusobni hidraulički utjecaji u raznim stupnjevima izgrađenosti. Područje obuhvaćeno numeričkim modelom prikazano je na slici 1.

2 Hidrogeološke značajke područja

Za potrebe ovog istraživanja upotrijebljena je postojeća baza hidrogeoloških podataka. Istražni su radovi na pro-

matranom području započeli sredinom 1970-ih godina izvedbom 17 strukturno-opažaćkih bušotina radi dobivanja osnovnih podataka o hidrogeološkoj strukturi vodonosnih slojeva. Pokusni zdenci na području Velike Kopanice i Babine Grede pokazali su da na istraživanom području postoji vodonosni kompleks čija podina doseže kotu 5 m n.m. (slika 2.), a čine ga dobro propusni pjeskoviti šljunci s pjeskovitim interkalacijama i proslojcima prašinih glina. Krovina se sastoji od glinovo-prašinih naslaga s proslojcima pijesaka [1].

vaćanja 1000 l/s vode uz pomoć osam zdenaca, pri čemu usvajaju pretpostavku nestacionarnog toka u sloju koji je na sjeveru ograničen linijom isklinjavanja šljunčanih naslaga koje čine vodonosni kompleks, a na jugu rijekom Savom kao granicom stalnog potencijala [2]. Obnavljanje podzemnih voda u uvjetima eksploatacije na crpilištima Sikirevci i Gundinci ostvarit će se dotokom iz Save i podređenom infiltracijom oborina. Za potrebe izrade numeričkog modela geološka je struktura vodonosnog kompleksa usvojena primjenom baze



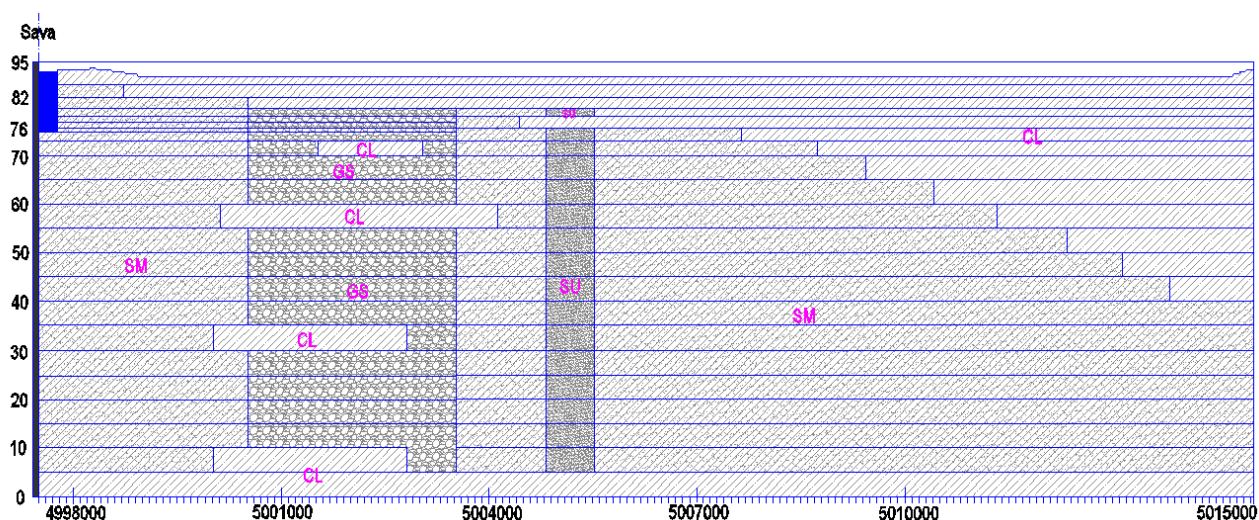
Slika 2. Izostrate podine vodonosnog sloja [1, 2] s ucrtanim položajem karakterističnoga poprečnog profila

Rezultati prvih provedenih hidrogeoloških istraživanja na području vodocrpilišta upućivali su na postojanje triju vodonosnih slojeva, međusobno odvojenih nepropusnim i neprekinutim slojem prašinate gline. Kasnija su istraživanja pokazala da postoji veza između pojedinih slojeva, tj. da se nepropusni slojevi ne prostiru kontinuirano po promatranom prostoru [2]. Takva geološka struktura pokazuje postojanje znatne anizotropije unutar vodonosnog kompleksa.

Rijeka Sava je dominantni čimbenik vodne bilance u promatranom vodonosniku. Prve procjene eksploatacijskih zaliha podzemnih voda na područja između Velike Kopanice i Babine Grede pokazuju na mogućnost zah-

hidrogeoloških podataka na analiziranom području [1, 2]. Na slici 3. prikazan je presjek u vertikalnoj ravnini (profil YZ) kroz modelirano područje s grafičkom interpretacijom prostorne raspodjele pojedinih slojeva. Pri formiranju numeričkog modela diskretizacija je u vertikalnom smjeru napravljena usvajanjem 21 sloja s varijabilnim debljinama (slika 3.) da bi se što bolje opisao raspored slabo propusnih leća.

Pokrovni sloj vodonosnog kompleksa čine zaglinjene, slabo propusne naslage praha. Agronomsko istraživanje pokrovnog sloja detaljno je provedeno [4, 5, 6]. Krovina vodonosnog kompleksa sa hidrogeološkog se stajališta može usvojiti vodonepropusnom.



Slika 3. Vertikalni presjek kroz modelirano područje s grafičkom interpretacijom prostorne raspodjele litoloških članova prema geomehaničkoj klasifikaciji tla u profilu YZ prikazanom na slici 2. (CL – glina male do srednje plastičnosti; GS - šljunak s primjesama pijeska, SM – pijesak s muljem; SU – pijesak uniformno graduiran)

U horizontalnoj je ravnini usvojena izotropnost koeficijenta filtracije ($k_x = k_y$) dok je u vertikalnom smjeru uporabljen koeficijent anizotropije 10 ($10k_z = k_{x,y}$). U modelu su usvojene homogene vrijednosti koeficijenta efektivne poroznosti $n_{eff} = 0,2$ i koef. ukupne poroznosti $n_{tot} = 0,25$. Koeficijenti filtracije litoloških članova prikazanih na slici 3 u numeričkom modelu usvojeni su sa sljedećim vrijednostima CL - $k_{x,y} = 1 \times 10^{-7}$ m/s, $k_z = 1 \times 10^{-8}$ m/s; SM - $k_{x,y} = 8 \times 10^{-3}$ m/s, $k_z = 8 \times 10^{-4}$ m/s; GS - $k_{x,y} = 1,8 \times 10^{-2}$ m/s, $k_z = 1,8 \times 10^{-3}$ m/s; SU - $k_{x,y} = 1,3 \times 10^{-2}$ m/s, $k_z = 1,3 \times 10^{-3}$ m/s.

3 Izmjena vode između vodotoka i vodonosnika

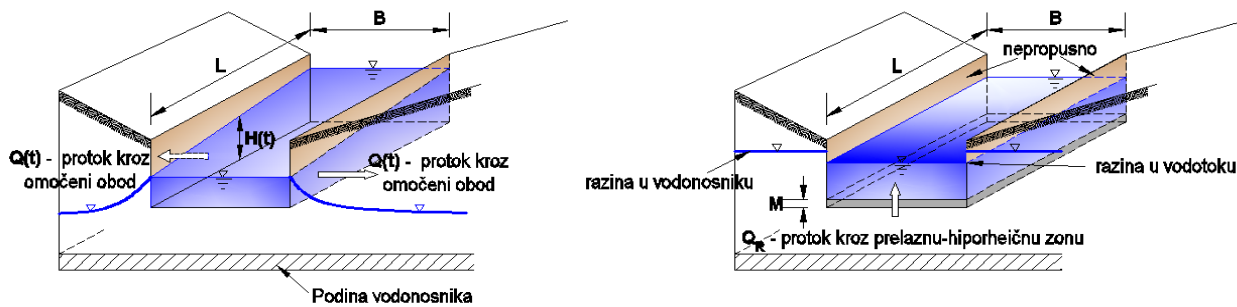
Površinske i podzemne vode u slučajevima kada je vodotok usječen u saturirani dio vodonosnika dugo su se vremena promatrale i istraživale zasebno, a jedina veza bilo je definiranje zajedničkoga (istovjetnog) rubnog uvjeta na njihovu kontaktu što se najčešće svodilo na usvajanje jednake razine vodnog lica.

Određivanje protoka (izmjene) vode između vodotoka i vodonosnika još je uvijek veliki izazov za inženjere zbog heterogenosti geoloških formacija i problema osrednjavanja. Metode određivanja protjecajnih količina mogu se podijeliti na metode koje se zasnivaju na upotrebi trasera, direktne metode mjerenja protoka te na proračune zasnovane na Darcyjevom zakonu i zakonu održanja mase. Analiza izmjene vode između vodotoka i vodonosnika se može zasnivati i na praćenju postojećih trasera u vodotoku, kao što je, na primjer, kvantificiranje količine eutrofikata [7]. Posebnu pažnju pri odabiru prikladnih metoda treba usredotočiti na ispravno uzimanje u obzir prostorne i vremenske dimenzije procesa infiltracije, kao i nepouzdanosti i ograničenja pri uporabi pojedinih metoda [8, 9, 10].

Kemijske, biološke i fizikalne karakteristike površinskih i podzemnih voda se razlikuju. Područje u kojem dolazi do miješanja površinskih i podzemnih voda može se nazvati prijelaznom ili kontaktnom zonom (engl. *hyporheic zone*). Izmjena vode kroz prijelaznu zonu može imati važnu ulogu u promjeni kvalitete vode u oba ekosustava. Ova zona može biti biološki i kemijski vrlo aktivna, uz odvijanje niza hidrogeokemijskih procesa vezanih uz pronos, razgradnju, transformaciju, taloženje i sorpciju raznih supstancija. Prijelazna zona može u pojedinim slučajevima imati izražena autopurifikacijska svojstva [11,12] isto kao što može propustiti znatne količine zagađivala kao što su, na primjer, teški metali iz vodotoka u vodonosnik [11]. Radi održivoga gospodarenja vodnim resursima presudno je razumijevanje i kvantificiranje procesa izmjene vode u prijelaznoj zoni.

I u Hrvatskoj se pri infiltraciji pojedinih površinskih voda u vodonosnik mijenja kvaliteta podzemnih voda, a to ugrožava rad pojedinih crpilišta. Da bi se procesi koji se odvijaju u prijelaznoj zoni mogli spoznati i na taj način predvidjeti učinci pojedinih hidrotehničkih zahvata u koritu, potrebno je sustavno provoditi ciljana istraživanja koja obuhvaćaju analize promjene kvalitete vode nakon pojedinih hidrotehničkih zahvata i formiranja baza podataka te izrade i baždarenja odgovarajućih hidro-kemijskih modela.

Do sada se za potrebe modeliranja utjecaja vodotoka na razine podzemnih voda u Hrvatskoj uglavnom primjenjivao prisilni (Dirichletov) rubni uvjet kao zadana razina u vodotoku. Iznimno je u slučajevima modeliranja utjecaja akumulacijskih jezera, koja imaju razinu vode iznad kote okolnog terena i pojave vertikalnih komponenata vektora brzine, definiran i prirodni rubni uvjet.



Slika 4. Shematski prikaz izmjene vode između vodotoka i vodonosnika

Osim spomenutoga prisilnoga rubnog uvjeta, izmjena vode kroz prijelaznu zonu sve se češće zasniva na analizi protoka kroz kontaktni sloj ili na primjeni jednadžbe kontinuiteta pojedine dionice vodotoka. U prvom se pristupu određivanju protoka između vodotoka i vodonosnika usvaja pretpostavka da je tok posljedica razlike potencijala u vodotoku i vodonosniku. Protok se računa na osnovi usvojenih razina vodnog lica u vodotoku i vodonosniku, kote dna vodotoka te debljini, širini i propusnosti prijelazne zone usvajajući pritom da vrijedi Darcyjev zakon (slika 4. lijevo).

Drugi se pristup zasniva na računanju protoka kroz vodotok po pojedinim dionicama (segmentima), pri čemu se pri formiranju modela definira protok na ulazu u modelom obuhvaćenu dionicu vodotoka i protok na izlazu iz nje [13]. Razlika između ulaza i izlaza ravnomjerno se infiltrira u vodonosnik (slika 4. desno).

Ni za jedan od navedenih novijih pristupa modeliranju toka u prijelaznoj zoni ne postoje odgovarajući podaci za rijeku Savu u istočnoj Slavoniji, pa je u ovom istraživanju iskorišten pristup proračuna protoka kroz kontaktni sloj jer je u tom pristupu greška prilikom usvajanja nepoznatih hidrogeoloških parametara manja.

4 Numerički model

Rijeka Sava i kanal usječeni su u površinski dio vodonosnog kompleksa, a zdenci zahvaćaju cijeli kompleks pa Dupitova hipoteza nije u potpunosti zadovoljena. U samom je vodonosniku izražena anizotropija kao posljedica mehanizma taloženja pojedinih čestica i kao posljedica postojanja slabo propusnih leća unutar vodonosnog kompleksa. Opisani hidrogeološki uvjeti ukazuju na potrebu upotrebe trodimenzijskog modela toka i pronosa.

U ovom je istraživanju primijenjen programski paket MODFLOW koji je prikladan za opisivanje trodimenzijskog strujanja, strujanja u višeslojnim sredinama, kao i za opisivanja međuutjecaja vodotoka i vodonosnika [14, 15, 16] te se često rabi za modeliranje toka podzemnih voda u raznim hidrogeološkim uvjetima [17, 18, 19].

Model toka podzemnih voda zasniva se na rješavanju jednadžbe oblika:

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

pri čemu su:

- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} - vrijednosti koeficijenta filtracije u smjeru koordinatnih osi x, y i z
- h - piezometarska razina
- W - protok (volumetrijski) po jedinici volumena koji predstavlja ponore i/ili izvore
- S_s - koeficijent specifičnog uskladištenja porozne sredine
- t - vrijeme

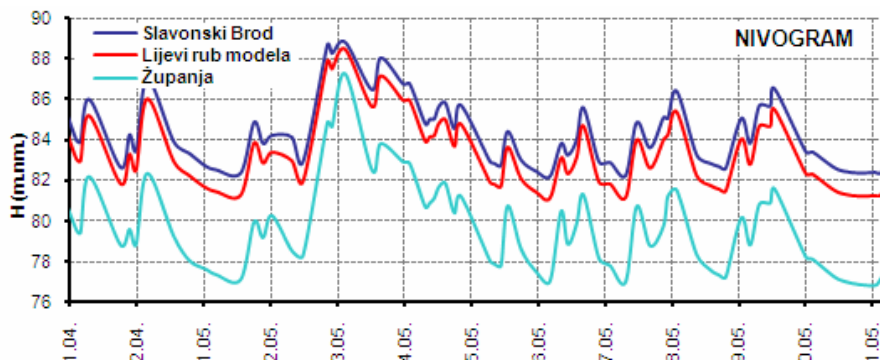
Jednadžba se za zadane početne i rubne uvjete rješava metodom konačnih diferencija. Ovaj se program ubraja u češće primjenjivane modele i u svijetu i u Hrvatskoj [18].

U formiranom je modelu usvojena diskretizacija promatranog prostora kao ortogonalna ekvidistantna mreža razmaka 100x100 m u horizontalnoj ravnini, dok je po vertikali vodonosnik razdijeljen na 21 segment (podsloj). Hidrogeološke karakteristike u svakoj ćeliji definirane su na osnovi usvojene geološke strukture vodonosnika. Početni je uvjet dobiven tako da je inženjerskom procjenom usvojen raspored hidroizohipsa te je simulirano strujanje uz rubni uvjet izmjerenih varijacija rijeke Save u trajanju od jedne godine. Raspored razina podzemne vode dobiven na opisani način poslužio je kao početni uvjet u modelu toka i pronosa. Konvektivni pronos tvari modeliran je programom MODPATH.

4.1 Baždarenje modela

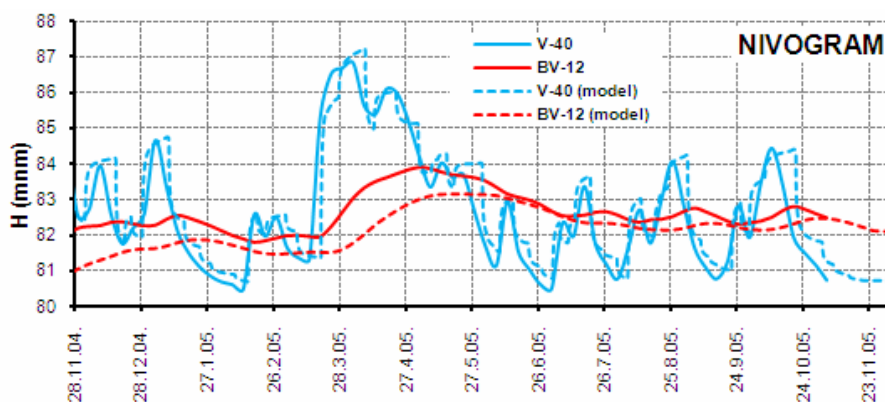
Radi određivanja hidrogeoloških karakteristika promatranoga vodonosnog kompleksa i njegove interakcije s rijekom Savom provedeno je baždarenje modela. Dinamika razine vodnog lica Save predstavlja osnovni nestacionarni rubni uvjet uporabljen u provedbi baždarnog postupka, a model je kalibriran rješavanjem inverznog problema metodom pokušaja i pogrešaka. Razina vodnog lica Save usvojena je kao linearno promjenjiva uzduž

modelirane dionice Save. U provedbi baždarenja upotrijebljen je nivogram Save, dobiven na temelju mjerenja na postajama Slavonski Brod i Županja tijekom razdoblja 28. 11. 2004. do 28. 11. 2005. (slika 5.) i razine podzemne vode u piezometrima.



Slika 5. Nivogram Save na postajama Slavonski Brod i Županja tijekom razdoblja 28.11.04. do 28.11.05. i usvojeni nivogram Save na lokaciji lijevog ruba modeliranog područja

Širina korita Save na analiziranoj dionici usvojena je s jednolikom vrijednosti od 250 m. Kote dna Save na modeliranoj dionici usvojene su kao linearno promjenjive od kote 78,3 m n. m. na lijevom (zapadnom) rubu modela do kote 72,1 m n.m. na desnom (istočnom) rubu modela (Županja). Na svim rubovima modelske domene (slika 1.) primijenjen je uvjet nepropusne granice. Pri rješavanju inverznog problema simuliran je i tok podzemnih voda, uz pretpostavku da postoji dotok iz smjera zapada i sjevera, ali su količine koje dotječu u odnosu na doprinos rijeke Save u prihranjivanju vodonosnika zanemarive. Numeričke ćelije položene južno od korita Save tretirane su kao neaktivne. Prilikom kalibracije Sava je usvojena kao poznati rubni uvjet, a mijenjane su karakteristike prijelaznoga – hiporheičnoga sloja te je promatran utjecaj dotoka iz smjera zapada i sjevera na promjene razine podzemnih voda.



Slika 6. Usporedba izmjerenih i izračunanih nivograma za piezometre na pozicijama V-40 (crpna stanica hidročvora Sava) i BV-12 (Velika Kopanica) tijekom analiziranoga baždarnog razdoblja od 28.11.04. do 28.11.05.

Rezultati usporedbe izmjerenih i izračunanih nivograma za piezometar V-40 i zdenac BV-12 baždareni modeli prikazani su na slici 6. Analiza promjena razina u piezometru V40 pokazuje da rijeka Sava ima jako dobar kontakt s vodonosnikom te da se promjene razina vode u

Savi vrlo brzo i intenzivno prenose u vodonosnik. Usporedba izmjerenog i izračunanog nivograma pokazuje da numerički model dobro opisuje promjene razine podzemne vode zbog varijacija razina u rijeci Savi. Piezometar BV 12 pokazuje da su promjene razina u području Velike Kopanice pod dominantnim utjecajem Save, ali i da su oscilacije manje izražene.

Za potrebe modeliranja pronosa tvari nije bilo odgovarajućih podataka o koeficijentu disperzivnosti i retardacije, kao ni podataka o razgradnji, adsorpciji i kemijskim reakcijama mogućih zagađivača pa je za modeliranje usvojeno da se kreće idealni traser.

4.2 Rubni uvjeti za buduće stanje

Rezultati baždarenja numeričkog modela i spoznaje o rasprostriranju vodonosnog kompleksa pokazuju da je dotok iz smjera zapadne, sjeverne i istočne granice zanemarivo malen, pogotovo u odnosu na predviđenu maksimalnu izdašnost regionalnog crpilišta od 2 m³/s. Zbog toga je pri modeliranju budućeg stanja usvojeno da nema protoka kroz zapadnu, sjevernu i istočnu granicu modela.

Trodimenzijski numerički model omogućio je da se za svaki pojedini zdenac definira interval u kojem je ugrađen filtar odnosno dubina s koje zahvaća vodu.

Razine vodnog lica Save na promatranoj dionici usvojene su kao nestacionarne i istovjetne razinama primijenjenim u provedbi baždarenja modela, odnosno na osnovi rezultata mjerenja na limnigrafima Slavonski Brod i Županja u razdoblju od 28. 11. 04. do 28. 11. 05 (slika 5.). Melioracijski kanal i VKDS usvojeni su s projektom predviđenim dimenzijama i razinom vodnog lica na koti 80 m n.m. Dno melioracijskog kanala usvojeno je na koti 78 m.n. m., dok je dno VKDS-a usvojeno na koti 76 m n.m.

Proračuni su provedeni pod pretpostavkom postupnog povećanja izdašnosti crpilišta Sikirevci od sadašnjeg stupnja izgrađenosti ($Q_{SIK} = 3 \times 125 = 375$ l/s) do maksimalne projektom predviđene izdašnosti crpilišta Sikirevci i Gundinci sa po 8 zdenaca pojedinačne izdašnosti 125 l/s odnosno ukupno 2000 l/s ($Q_{SIK} = 8 \times 125 = 1000$ l/s i $Q_{GUN} = 8 \times 125 = 1000$ l/s).

5 Rezultati modeliranja toka podzemnih voda

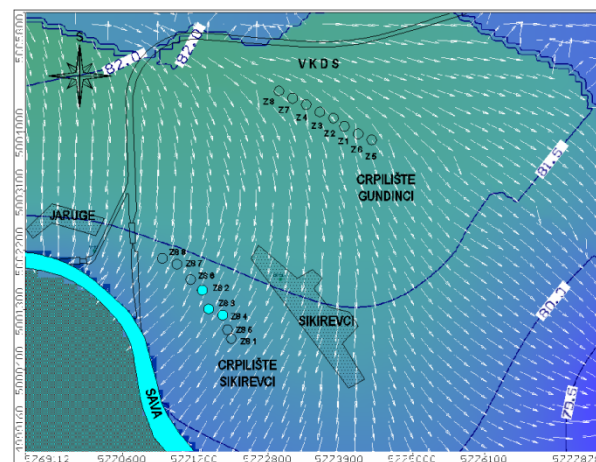
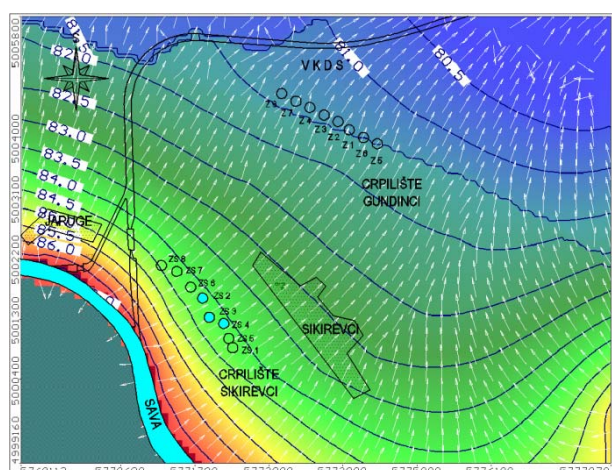
Kao karakteristične strujne slike mogu se usvojiti strujne slike za visoke vode rijeke Save pri vodostaju Save kod Slavenskog Broda od 88,80 m n.m i za niske vode pri vodostaju Save 82,21 m n.m.. Na slici 7. prikazan je detalj izračunane strujne slike u blizini crpilišta i višenamjenskog kanala za postojeći stupanj izgrađenosti sustava.

Analiza rezultata dobivenih numeričkim modelom pokazuje da u prirodnom stanju nema znatnih razlika u smjerno-

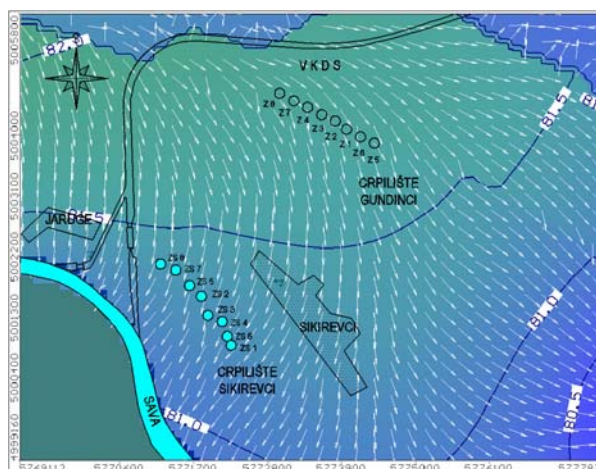
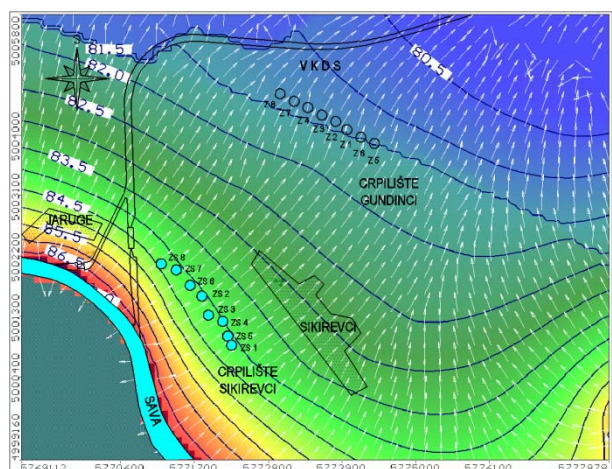
vima toka podzemnih voda po dubini vodonosnika, ali postoje manje razlike u vrijednostima tlaka, tj. raspored tlakova po vertikali nije u potpunosti hidrostatski. Za prikaz položaja hidroizohipsa i normiranih vektora brzina odabrana je horizontalna ravnina na koti 77,0 m n.m. koja približno odgovara koti dna Save jer se može pretpostaviti da će se eventualna zagađivala iz Save zbog anizotropije i postojanja horizontalnih slabo propusnih leća kretati prema crpilištu dominantno kroz potpovršinske slojeve.

Na slici 8. prikazane su strujne slike za slučaj crpenja iz svih osam projektom predviđenih zdenaca na crpilištu Sikirevci, dok su na slici 9. prikazane strujne slike za maksimalnu izdašnost obaju crpilišta za visoke (lijevo) i niske vode (desno).

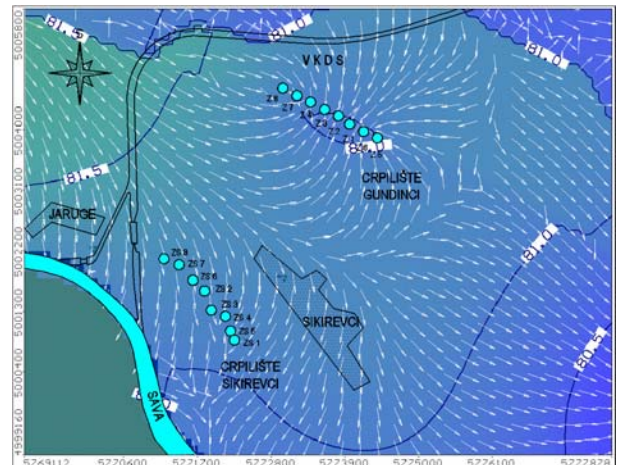
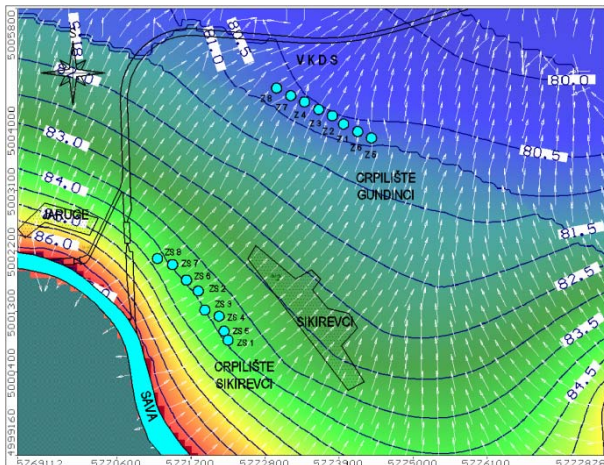
Sava se za visokih voda intenzivno prihranjuje, a za niskih voda drenira vodonosnik za sve stupnjeve izgrađenosti crpilišta.



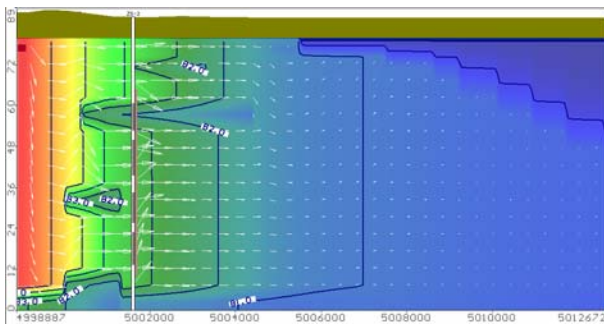
Slika 7. Hidroizohipse i vektori brzina u horizontalnoj ravnini na 77 m n.m. za visoke (lijevo) i niske vode (desno) rijeke Save za postojeći stupanj izgrađenosti, tj. izdašnost Sikirevaca $Q_{SIK} = 375$ l/s (aktivni zdenci imaju svijetloplavi ispun unutar kruga)



Slika 8. Hidroizohipse i vektori brzina za visoke (lijevo) i za niske vode rijeke Save (desno) za maksimalnu projektom predviđenu izdašnost crpilišta Sikirevci od $Q_{SIK} = 1000$ l/s



Slika 9. Hidroizohipse i vektori brzina za visoke (lijevo) i za niske vode rijeke Save (desno) za maksimalnu projektom predviđenu izdašnost crpilišta Sikirevci od $Q_{SIK} = 1000$ l/s i maksimalnu izdašnost crpilišta Gundinci od $Q_{GUN} = 1000$ l/s



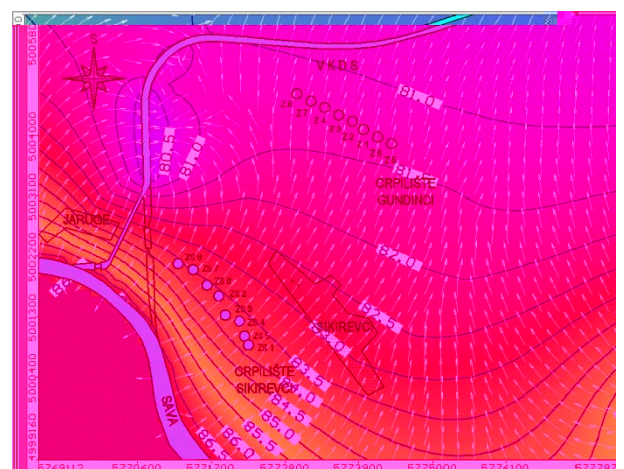
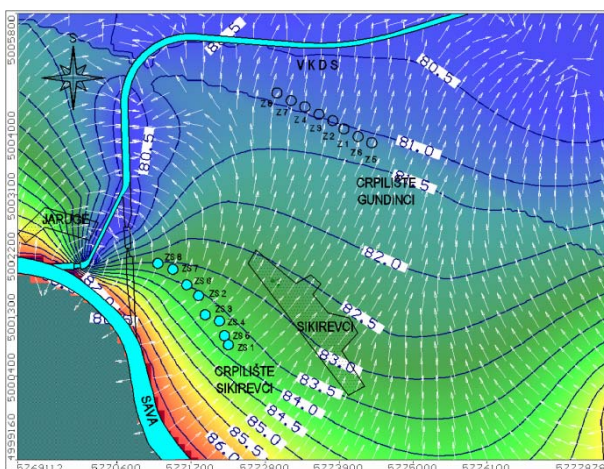
Slika 10. Ekvipotencijale i vektori brzina u vertikalnoj YZ ravni modela koje prolaze kroz zdenac ZS-2 u Sikirevcima za visoke vode rijeke Save za maksimalnu projektom predviđenu izdašnost crpilišta Sikirevci od $Q_{SIK} = 1000$ l/s i maksimalnu izdašnost crpilišta Gundinci $Q_{GUN} = 1000$ l/s

Analiza ekvipotencijala i vektora brzina u vertikalnom presjeku kroz vodonošni sloj (slika 10.) pokazuje postojanje vertikalne komponente brzine u uskom području uz rijeku Savu i djelomično uz zdence. Također se može

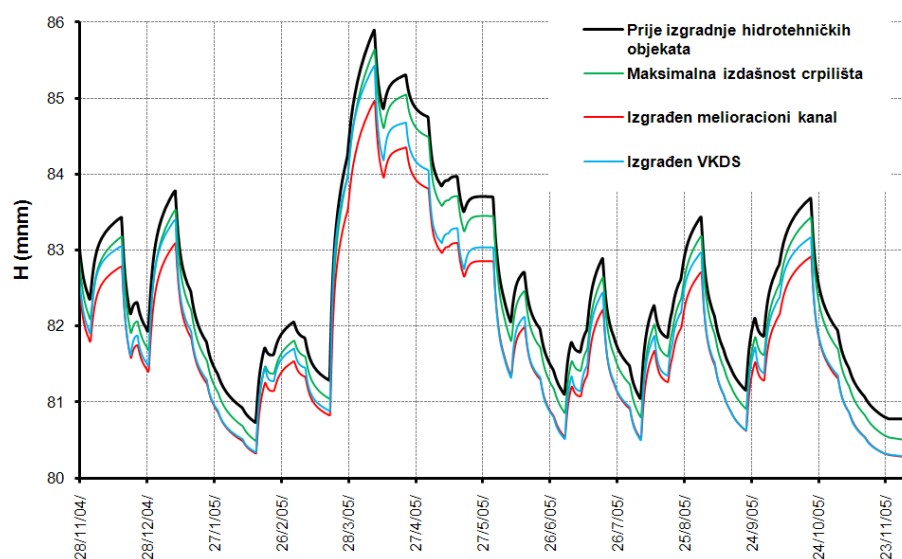
očitati da su gradijenti u uvjetima visoke Save relativno veliki, dok su gradijenti (a time i brzine) sjevernije od crpilišta znatno manji.

Strujna mreža za slučaj izgrađenosti melioracijskog kanala (slika 11.) pokazuje drenažno djelovanje projektom predviđenog kanala. Drenažno je djelovanje kanala uočljivije u sloju na koti 77 m n.m. (slika 11. lijevo), nego u sloju na koti 62,5 m n.m. (slika 11. desno) što potvrđuje da Dupuitova hipoteza u ovom području nije potpuno zadovoljena.

Izgradnja hidrotehničkih građevina uzrokuje promjene razine podzemnih voda na području crpilišta Sikirevci (slika 12.). Najviše su razine podzemne vode u prirodnom – zatečenom stanju. Crpilište očekivano snižava razine podzemnih voda. S obzirom da je razina vode u projektom predviđenim kanalima niža od razina podzemnih voda i kanali će dodatno snižavati razine podzemnih voda pri čemu će pri niskim vodama rijeke Save i melioracijski kanal i VKDS snižavati približno jednako, dok



Slika 11. Ekvipotencijale i vektori brzina u horizontalnim ravninama na 77 m n.m. (lijevo) i 62,5 m n.m. (desno) za visoke vode rijeke Save pri $Q_{SIK} = 1000$ l/s te izgrađen melioracijski kanal

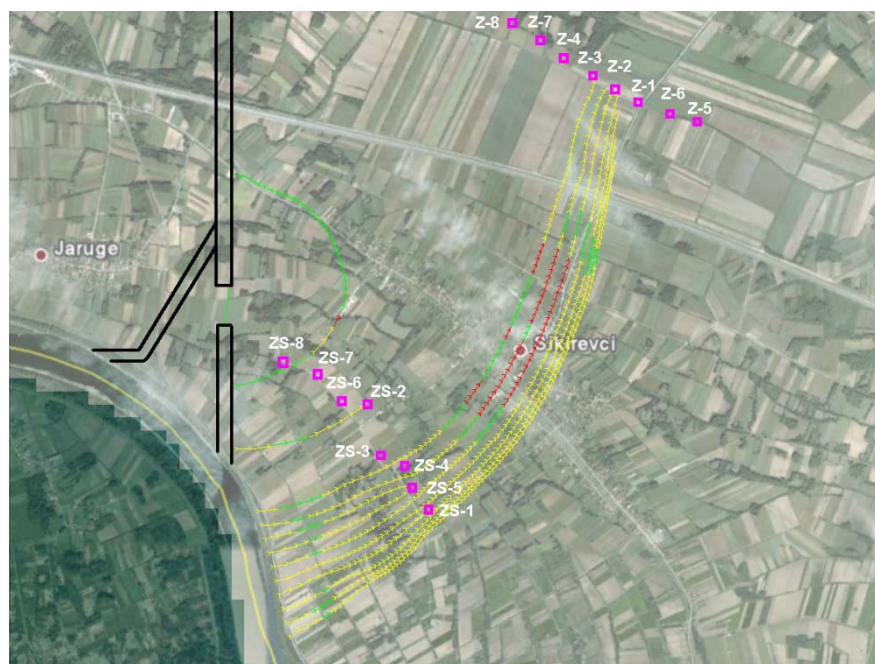


Slika 12. Razine podzemne vode na crpilištu Sikirevci za razne stupnjeve izgrađenosti sustava

će pri visokim vodama rijeke Save infiltracija u području predluke umanjiti utjecaj drenažnog djelovanja VKDS-a. Prikazana sniženja zbog izgradnje VKDS-a neće ugroziti izdašnost crpilišta Sikirevci i Gundinci.

5.1 Rezultati modeliranja pronosa tvari

Iz rezultata dosadašnjih istraživanja može se utvrditi da je kvaliteta vode u zdencima dobra, osim što su kod nekih uzoraka utvrđene povišene koncentracije željeza i mangana. Planom razvoja crpilišta je predviđeno da se u sljedećoj fazi izgradi uređaj za kondicioniranje vode crpilišta "Istočna Slavonija".



Slika 13. Napredovanje tvari iz Save prema zdencima crpilišta u Sikirevcima i Gundincima

U okviru istraživanja mogućeg širenja zagađivala iz melioracionog kanala, VKDS-a ili rijeke Save prema crpilištima Sikirevci i Gundinci, modelirane su i trajektorije putovanja pojedinih čestica iz smjera površinskih voda prema zdencima. Pritom su upotrijebljene traserke čestice, inicijalno upuštene pri dnu korita. Za ovu su se analizu rabili stacionarni rubni uvjeti Save definirani srednjim vodostajem i shemom napredovanja čestica prema naprijed.

Trajektorije pojedinih čestica u uvjetima srednje razine rijeke Save i izdašnosti crpilišta Sikirevci i Gundinci od po 1000 l/s (slika 13.) pokazuju da pojedine čestice tijekom svog puta od vodotoka do zdenca mjestimično poniru (žute strelice), zadržavaju se u istom sloju (zeleno), a ponegdje i uzdižu prema površini terena (crvene strelice). Razmak između pojedinih sukcesivnih strelica je 50 dana pa se može očitati da je putovanje čestica od Save do zdenaca u Sikirevcima dulje od jedne godine a do crpilišta Gundinci znatno dulje. Može se primijetiti da će dio čestica iz spojnog kanala putovati izravno u VKDS.

Vrijeme zadržavanja u vodonosniku za pojedine čestice koje se kreću iz Save (područja predluke) u zdenca nakon izgradnje VKDS-a bitno će se skratiti zbog dvaju razloga:

- nakon izgradnje spojnog kanala između prevodnice i korita Save osjetno će se skratiti udaljenost koju čestica trebaju prevaliti od vodotoka do zdenca i
- s obzirom da će površinske vode u spojnom kanalu biti na približno istoj koti kao i u vodotoku, skraćivanjem puta čestica za istu razliku razina između kanala i zdenaca povećat će se hidraulički gradijent, a time i brzine toka podzemne vode.

Tijekom vremena će zbog manjih brzina u spojnom kanalu doći do procesa kolmatacije i taloženja čestica, a to će smanjiti količinu

infiltrirane vode te produljiti vrijeme zadržavanja čestica u vodonosniku.

Temeljna činjenica vezana uz podrijetlo onečišćenja zahvaćenih pitkih voda iz zdenaca crpilišta Sikirevci i Gundinci jest da nisu antropogenog podrijetla, već iz samog vodonosnika. Onečišćenja koja prelaze propisane maksimalno dopuštene koncentracije u crpljenoj vodi povezana su uz lokacije određenih eksploatacijskih zdenaca i istražnih bušotina. Budući da je temeljni izvor prihranjivanja vodonosnika rijeka Sava, proizlazi da se različita kvaliteta vode na pojedinim zdencima i piezometrima može isključivo pripisati uvjetima koji vladaju u vodonosniku.

Promjena kvalitete vode na zahvatima ne prati promjenu kvalitete u rijeci Savi kao temeljnom izvoru prihranjivanja, već se može pripisati stohastičkoj prirodi procesa pronosa pri čemu dominantnu ulogu ima neravnomjernost polja brzina u vodonosniku i njegova nehomogenost.

Numeričkim je modelom pokazano da je pretežiti režim strujanja od rijeke Save prema kanalu, što znači da je kanal prijammnik eventualnog onečišćenja iz vodonosnika, a ne izvor onečišćenja. U uvjetima vrlo niskih razina podzemnih voda moguće je da kanal na nekim dijelovima prihranjuje vodonosnik, ali je trajanje te pojave tako kratko da je nemoguća uspostava režima u kojem bi voda iz kanala, a s njom i eventualno onečišćenje dospjeli na veću udaljenost od kanala te nastavili napredovanje prema zdencima iz kojih se zahvaća pitka voda.

Uza sve propisane mjere zaštite vode u plovnom kanalu i/ili melioracijskom kanalu, voda se ne bi smjela kvalitetom bitno razlikovati od savske vode, što ove građevine ne izdvaja kao poseban rizik za vodonosnik. Dugoročno gledano, na kvalitetu vode u vodonosniku presudno može utjecati rijeka Sava pod pretpostavkom da se njezina kvaliteta bitno i trajno naruši pronosom velikih količina nerazgradivog ili teško razgradivog, lako pokretnog onečišćenja koje bi moglo promijenjeno ili nepromijenjeno svladati izuzetno povoljnu prirodnu zaštitu vodonosnika. Takvo potencijalno onečišćenje sigurno ne bi bilo iz kategorije pokazatelja koji sada povremeno prelaze propisane MDK.

6 Zaključak

Višenamjenski kanal Dunav-Sava i regionalno crpilište istočne Slavonije bit će izgrađeni na maloj međusobnoj udaljenosti te će utjecati na promjene razine vode u istom vodonosnom sloju. U ovom su radu opisana istraživanja mogućeg utjecaja projektom predviđenoga melioracijskog odnosno višenamjenskog kanala Dunav-Sava na razine i kvalitetu podzemnih voda, s posebnim osvrtom na regionalno crpilište istočne Slavonije u Sikirevcima.

U radu je istaknuta potreba primjene trodimenzijskog modela toka podzemnih voda i pronosa tvari. Vodotoci (rijeka Sava i višenamjenski kanal) usječeni su relativno plitko u vodonosni kompleks, a zdenci zahvaćaju propusnije slojeve po cijeloj dubini vodonosnog kompleksa pa Dupuitova hipoteza o horizontalnom strujanju nije u potpunosti ispunjena, što su potvrdili i rezultati modeliranja. Ova je činjenica izuzetno važna u slučaju pojave zagađivala u podzemnim vodama koja bi se kretala prema zdencima i potrebe njihove sanacije. Trodimenzijski su modeli nužni pri modeliranju pronosa tvari koje imaju različitu gustoću od vode (LNAPL ili DNAPL) ili se zbog izražene anizotropije kreću samo kroz dio vodonosnog kompleksa.

Razina vode u kanalu u većem će dijelu godine biti niža od razina podzemnih voda te će kanal drenirati u vodonosnik i uzrokovati sniženja razine podzemnih voda na crpilištima. Intenzitet dreniranja nije velik jer je kanal usječen u slabije propusne pokrovne slojeve te sniženja zbog izgradnje VKDS-a neće ugroziti izdašnost crpilišta Sikirevci i Gundinci.

U području projektom predviđene predluke, koja je u stvarnosti novosagrađeni rukavac Save između korita za srednju vodu i prevodnice, uspostaviti će se ista razina vode kao u Savi. U tom će se području za srednjih i visokih voda odvijati intenzivno prihranjivanje vodonosnika savskom vodom. Promatrajući putovanje čestica vode i eventualnih zagađivala iz Save prema crpilištu Sikirevci, može se konstatirati da će se za neke čestice vrijeme putovanja do zdenaca nakon izgradnje VKDS-a bitno skratiti zbog razloga navedenih u točki 5.1.

Čestice vode koje iz Save kreću prema zdencima i u najnepovoljnijim će se hidrološkim i eksploatacijskim uvjetima relativno dugo zadržavati u vodonosniku te su po tom kriteriju ispunjeni uvjeti zaštitnih zona.

Razina vode u višenamjenskom kanalu pretežni je dio godine niža od razina u Savi i vodonosniku te će kanal biti prijammnik eventualnog onečišćenja iz vodonosnika, a ne izvor onečišćenja. U uvjetima vrlo niskih razina podzemnih voda moguće je da kanal na nekim dijelovima prihranjuje vodonosnik ali je trajanje te pojave vrlo kratko pa je nemoguća uspostava režima u kojem bi voda iz kanala, a s njom i eventualno onečišćenje dospjeli na veću udaljenost od kanala te nastavili napredovanje prema zdencima iz kojih se zahvaća voda za potrebe vodoopskrbe.

Uza sve propisane mjere zaštite vode u plovnom i/ili melioracijskom kanalu, voda iz njih se ne bi smjela kvalitetom bitno razlikovati od savske vode, što ove građevine ne izdvaja kao posebni rizik za vodonosnik. Dugoročno gledano, na kvalitetu vode u vodonosniku može presudno utjecati rijeka Sava pod pretpostavkom

da se njezina kvaliteta bitno i trajno naruši pronosom velikih količina nerazgrađivog ili teško razgrađivog, lako pokretnog onečišćenja koje bi moglo, promijenjeno ili nepromijenjeno, svladati iznimno povoljnu prirodnu zaštitu vodonosnika. Takvo potencijalno onečišćenje sigurno ne bi bilo iz kategorije pokazatelja koji sada povremeno prelaze propisane MDK.

I u Hrvatskoj se pri infiltraciji pojedinih površinskih voda u vodonosnik mijenja kvaliteta podzemnih voda što ugrožava rad pojedinih crpilišta. Da bi se procesi koji se odvijaju u prijelaznoj zoni mogli spoznati i na taj način predvidjeti učinci pojedinih hidrotehničkih zahvata u koritu vodotoka, potrebno je sustavno provoditi ciljana hidrokemijska istraživanja. Istraživanjima treba obuhvatiti mjerenja količine vode koja se infiltrira (ili drenira)

iz vodotoka u vodonosnik i kemijske procese koji se odvijaju o prijelaznoj zoni. U suprotnom bi se provedbom nepromišljenih i nedovoljno istraženih građevinskih zahvata mogla smanjiti kvaliteta podzemne vode koja se rabi za vodoopskrbu.

Sustavni pristup praćenju hidrogeokemijskih procesa u kontaktnom sloju i u vodonosniku nužan je da bi se mogli predvidjeti eventualni negativni učinci projektom predviđenih građevinskih zahvata na kvalitetu podzemnih voda i prema potrebi projektirati i izgraditi uspješne sanacije onečišćenja *in situ*.

U ovome se radu istraživani šljunkovito-pjekoviti vodonosnik proteže i južno od Save te bi trebalo istražiti mogućnost pronosa zagađivala iz bosanskog dijela vodonosnika prema predviđenim crpilištima Sikirevci i Gundinci.

LITERATURA

- [1] Hrvatski geološki institut: *Hidrogeološka istraživanja u cilju definiranja eksploatacijskih zaliha podzemne vode na potencijalnom regionalnom crpilištu Gundinci-Sikirevci*, 2005.
- [2] Bačani, A.: *Značajke hidrauličkih granica vodonosnih slojeva na vododjelnici Savskog i Dravskog porječja u istočnoj Slavoniji*, disertacija, Rudarsko-naftno-geološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1997.
- [3] Pekaš, Ž.; Brkić, Ž.: *Crpilište regionalnog vodovoda istočne Slavonije – rezultati tridesetogodišnjeg istraživanja*, 4. hrvatska konferencija o vodama, pp 787-796, Opatija 2007.
- [4] Mustać, I.: *Modeliranje utjecaja višenamjenskog kanala Dunav-Sava na dinamiku podzemnih voda*, disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb, 2009.
- [5] Gjetvaj, G.; Petošić, D.; Mustać, I.: *Prediction of Water Balance Change After Construction of the Danube-Sava Multipurpose Canal*, XXIV Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Conference Abstracts pp. 98, Bled 2008.
- [6] Mustać, I.; Gjetvaj, G.; Petošić, D.; Tomić, F.: *Impact of the future multipurpose Danube-Sava Canal on Groundwater dynamics*, Tehnički vjesnik (Technical Gazette), No 2, Vol 18, pp. 211- 218 (Izvorni znanstveni članak), 2011.
- [7] Eglin, I.; Roeck, U.; Robach, F.; Tremolieres, M.: *Macrophyte biological methods used in the study of the exchange between the Rhine river and the groundwater*, Water Resources, Vol.31, No. 3, pp. 503-514, 1997
- [8] Sophocleous, M.: *Interactions between groundwater and surface water: the state of the science*, Hydrogeol. J. 10,52-67, 2002
- [9] Kalbus, E.; Reinstorf, F.; Schirmer, M.: *Measuring methods for groundwater-surface water interaction: a review*, Hydrology and Earth System Science, Vol 10, pp 873-887, 2006
- [10] Bereslavskii, E. N.: *Groundwater Flow to a System of Drainage Canals*, Water Resources, Vol. 22, No 4, pp 417-420, 2006
- [11] Carbiener, R.; Tremolueres, M.: *The Rhine rift valley ground water- river interactions: Evolution of the susceptibility to pollution*, Regulated Rivers: Research & Management, Vol 5., No 5, pp 375-389, 2006
- [12] Hinke, S. R.; Duff, J. H.; Triska, F. J.; Laenen, A.; Gates, E. B.; Bencala, K. E.; Wentz, D. A.; Silva, S. R.: *Linking hyporheic flow and nitrogen cycling near the Willamette River- a large river in Oregon, USA*, Journal of Hydrology Vol. 244, pp157-180, 2001
- [13] Hantush, M. M.: *Modeling stream-aquifer interaction with linear response function*, Journal of Hydrology, Vol. 311, pp. 59-79, 2005
- [14] Trescott, P. C.: *Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional groundwater flow*, U.S. Geological Survey Open-File Report 75-438, 32 p., 1975.
- [15] Trescott, P. C., Larson, S. P.: *Supplement to Open-File Report 75-438, Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground-water flow*, U.S. Geological Survey Open-File Report 76-591, 21 p., 1976.
- [16] Trescott, P. C.; Pinder, G. F.; Larson, S. P.: *Finite-difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments*, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 7, chap. C1, 116 p., 1976.
- [17] El Yaouti, F.; El Mandour, A.; Khattach, D.; Kaufmann, O.: *Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco)*, Journal of Hydro-environment Research, 2, pp.192-209, 2008
- [18] Posavec, K.; Mustać, I.: *Zone sanitarne zaštite međimurskih vodocrpilišta*, Hrvatske vode, Vol.17, No 68, pp.113-124, 2009.
- [19] Cho, J.; Barone V.A.; Mostghimi, S.: *Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed*, Agricultural Water Management, online, 96, 2009