

Međutjecaj površinskih i podzemnih voda na primjeru Save, kanala Dunav-Sava te crpilišta Gundinci i Sikirevci

SAŽETAK:

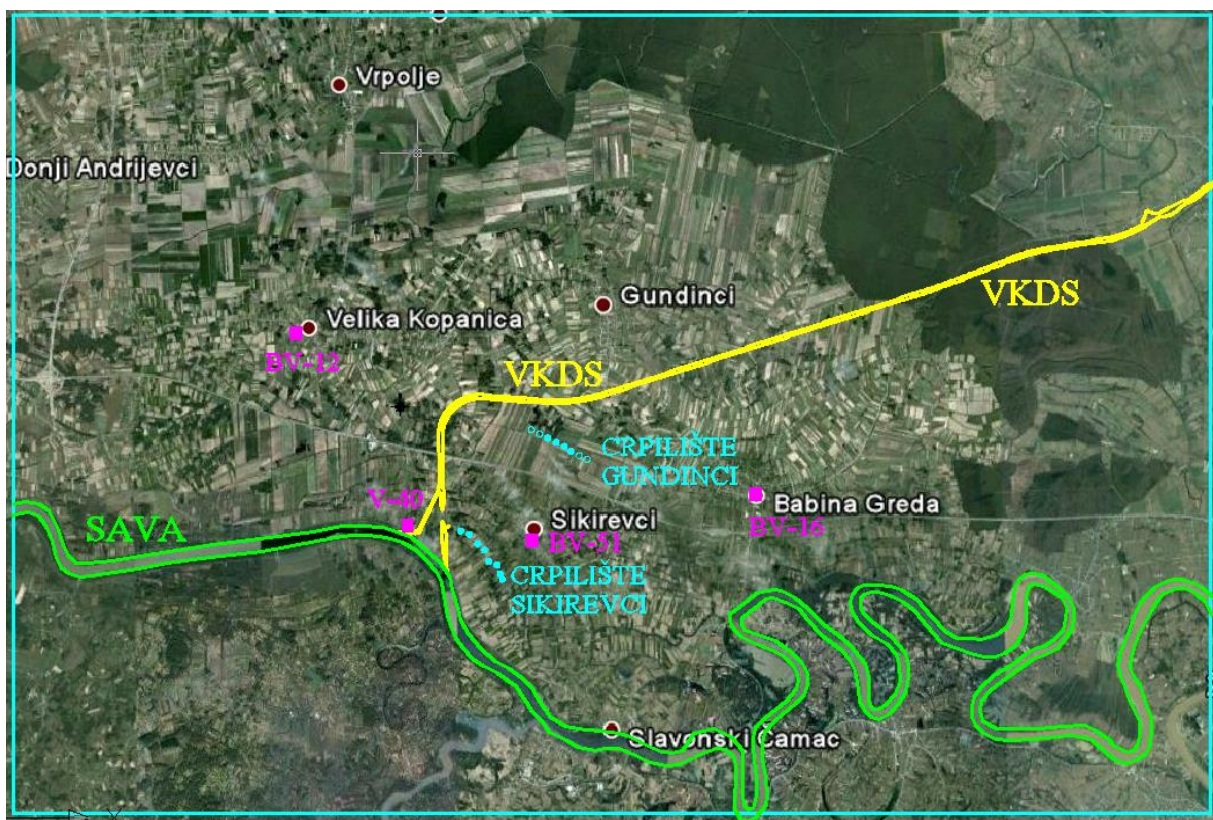
Za potrebe vodoopskrbe stanovništva u tri istočnoslavonske županije; Vukovarsko-srijemske, Osječko-baranjske i Brodsko-posavske se grade vodocrpilišta Sikirevci i Gundinci. Nedaleko od crpilišta se za potrebe navodnjavanja predviđa izgradnja melioracionog kanala. Projektima je predviđeno da se u idućim fazama izgradnje melioracioni kanal proširi i produbi kako bi mogao služiti i za potrebe plovidbe. Obzirom da se crpilište, kanal i rijeka Sava nalaze u istom vodonosnom sloju na relativno maloj udaljenosti, pojavila se potreba za analizom njihovog međudjelovanja. Istaknuta je važnost kvalitetnog opisivanja fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa koji se odvijaju u kontaktnom sloju između vodotoka (Save i kanala) i vodonosnog kompleksa. Hidrotehnički zahvati u vodotoku mogu utjecati na količinu i kvalitetu vode koja se iz vodotoka infiltrira u vodonosnik. U okviru provedenih istraživanja je izrađen trodimenzionalni numerički model toka podzemnih voda na kojem je simuliran utjecaj izgradnje višenamjenskog kanala Dunav-Sava (VKDS) na crpilišta Sikirevci i Gundinci za sadašnje stanje izgrađenosti i pri planiranim fazama proširenja zajedno sa faznom izgradnjom VKDS-a. Sava i kanal su usječeni relativno plitko u pokrovne slojeve a zdenci zahvaćaju cijeli vodonosni sloj pa je posebna pažnja posvećena činjenici da Dupuitova hipoteza koja pretpostavlja horizontalni tok i hidrostatski raspored tlakova po vertikali nije u potpunosti zadovoljena. Odnos površinskih i podzemnih voda je vrlo složen i relativno slabo istražen proces te je u radu istaknuta važnost potrebe provođenja odgovarajućih mjerenja protoka kroz prelaznu zonu kao i hidrokemijskih procesa u prelaznoj zoni – hiporheičnom sloju.

1. Uvod

Za potrebe vodoopskrbe u tri istočnoslavonske županije; Vukovarsko-srijemske, Osječko-Baranjske i Brodsko-posavske se gradi Regionalni vodoopskrbni sustav. U sklopu regionalnog sustava, se na području općine Sikirevci gradi 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 izdašnost 375 l/s. U idućim fazama se planira proširenje crpilišta do izdašnosti od 1000 l/s. Proširenjem vodoopskrbe se predviđa uključivanje i vodocrpilišta na lokaciji Gundinci izdašnosti 1000 l/s (slika 1). Obzirom da je izgradnja plovnog puta izuzetno složen i financijski zahtijevan projekt, u prvoj fazi se predviđa izgradnja melioracionog kanala koji je po dimenzijama manji od plovnog puta ali prolazi istom trasom. U idućim fazama izgradnje će se melioracioni kanal dograditi kako bi zadovoljio kriterije za plovni put.

Projektom predviđena crpilišta i višenamjenski kanal su usječeni u isti vodonosni sloj te će postojati hidraulička veza među njima. Cilj istraživanja je određivanje mogućeg utjecaja kanala na razine i kvalitetu vode na crpilištima. Dosadašnja istraživanja su razmatrala interakciju vodonosnika i crpilišta (HGI, 2005; Bačani, 1997; Pekaš i Brkić, 2007) ili utjecaj izgradnje kanala na režim podzemnih voda (Mustač, 2009; Gjetvaj i sur., 2008). U ovom primjeru istraživani su među utjecaj dva hidrotehnička objekta koji 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 trodimenzionalni model toka podzemnih voda i pronosa tvari.

Istraživanjem je obuhvaćeno tečenje podzemnih voda u širem područje vodocrpilišta Gundinci i Sikirevci do granica rasprostiranja vodonosnog kompleksa te rijeka Sava, melioracioni kanal i VKDS-a sa pripadajućim hidročvorom kako bi se odredio njihov međusobni hidraulički utjecaji u raznim stupnjevima izgrađenosti. Područje obuhvaćeno numeričkim modelom je prikazano na slici 1.



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

2. Hidrogeološke značajke područja

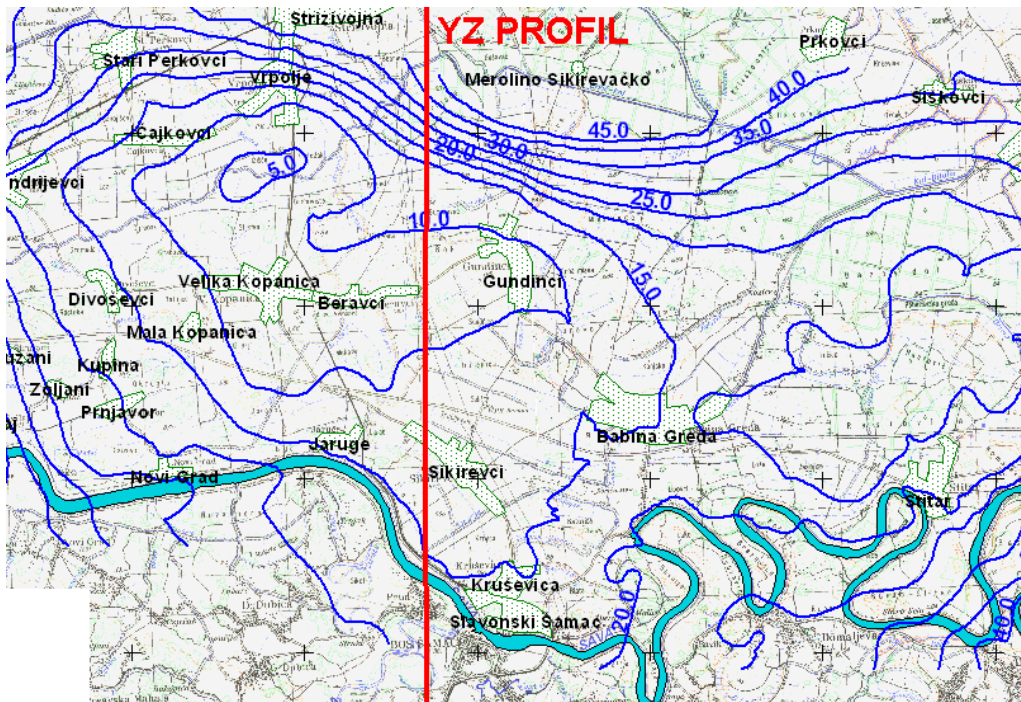
Za potrebe ovog istraživanja je korištena postojeća baza hidrogeoloških podataka. Istražni radovi na promatranom području su započeli sredinom 1970-tih godina izvedbom 17 strukturno-opažачkih bušotina s ciljem dobivanja osnovnih podataka o hidrogeološkoj strukturi vodonosnih slojeva. Pokusni zdenci na području Velike Kapanice i Babine Grede su pokazali da na istraživanom području postoji vodonosni kompleks čija debljina mjestimično prelazi i 70 m a čine ga dobropropusni pjeskoviti šljunci s pjeskovitim interkalacijama i proslojcima prašinstih glina. Krovina se sastoji od glinovito-prašinstih naslaga s proslojcima pijesaka (HGI, 2005).

Rezultati prvih provedenih hidrogeoloških istraživanja na području vodocrpilišta su ukazivali na postojanje tri vodonosna sloja, međusobno odvojena nepropusnim i neprekinutim slojem prašinstih glina. Kasnija istraživanja su pokazala da postoji veza između pojedinih slojeva tj. da se nepropusni slojevi ne prostiru kontinuirano po promatranom prostoru (Bačani, 1997). Ovakova geološka struktura ukazuje na postojanje značajne anizotropije unutar vodonosnog kompleksa.

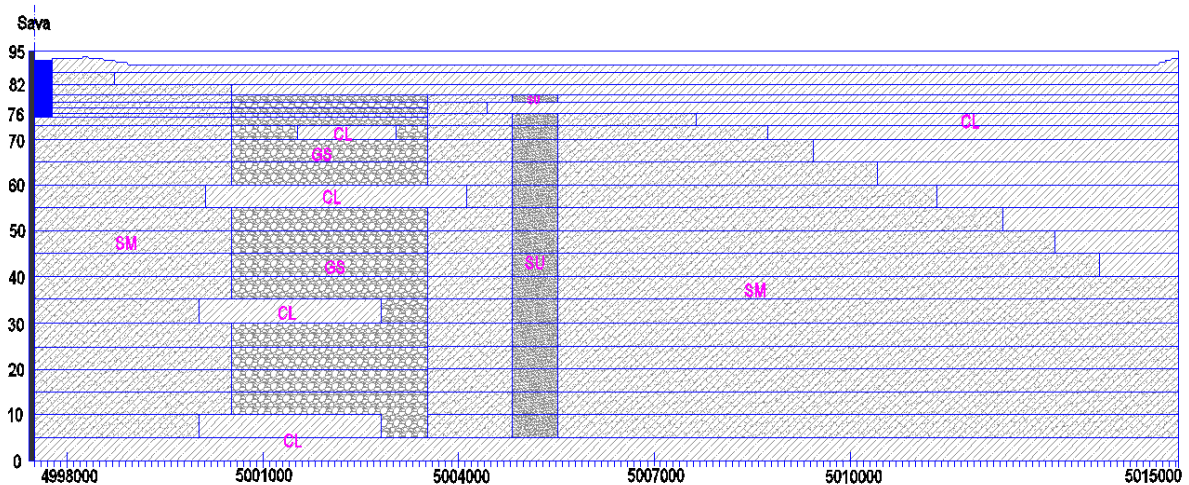
Rijeka Sava je dominantni čimbenik vodne bilance u promatranom vodonosniku. Prve procjene eksploatacijskih zaliha podzemnih voda na područja između Velike Kapanice i Babine Grede ukazuju na mogućnost zahvaćanja 1000 l/s vode uz pomoć osam zdenaca pri čemu usvajaju pretpostavku nestacionarnog toka u sloju koji je na sjeveru ograničen linijom isklinjavanja šljunčanih naslaga koje čine vodonosni kompleks, a na jugu rijekom Savom kao granicom stalnog potencijala (Bačani, 1997). Obnavljanje podzemnih voda u uvjetima eksploatacije na crpilištima Sikirevci i Gundinci vršit će se dotokom iz Save i podređeno infiltracijom oborina.

Za potrebe izrade numeričkog modela je geološka struktura vodonosnog kompleksa usvojena korištenjem baze hidrogeoloških podataka na analiziranom području (HGI, 2005; Bačani, 1997). Na slici 3 je prikazan presjek u vertikalnoj ravnini (*YZ- profil*) kroz modelirano područje s grafičkom interpretacijom prostorne raspodjele pojedinih slojeva. Prilikom formiranja numeričkog modela je diskretizacija u vertikalnom smjeru napravljena usvajanjem 21 sloja sa varijabilnim debljinama (slika 3) kako bi se što bolje opisao raspored slabo propusnih leća.

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



Slika 2 Izostrate podine vodonosnog sloja [1,2] sa ucrtanim položajem karakterističnog poprečnog profila



Slika 3 Vertikalni presjek kroz modelirano područje sa 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 sa primjesama pijeska, SM – pijesak s muljem; SU – pijesak uniformno graduiran)

U horizontalnoj ravnini je usvojena izotropnost koeficijenata filtracije ($k_x=k_y$) dok je u vertikalnom smjeru korišten 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 slijedećim vrijednostima CL - $k_{x,y} = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s, $k_z = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s; SM - $k_{x,y} = 8 \cdot 10^{-3}$ m/s, $k_z = 8 \cdot 10^{-4}$ m/s GS - $k_{x,y} = 1,8 \cdot 10^{-2}$ m/s, $k_z = 1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s; SU - $k_{x,y} = 1,3 \cdot 10^{-2}$ m/s, $k_z = 1,3 \cdot 10^{-3}$ m/s.

3. Izmjena vode između vodotoka i vodonosnika

Površinske i podzemne vode su u slučajevima u kojima je vodotok usječen u saturirani dio vodonosnika dugo vremena bile promatrane i istraživane zasebno a jedina veza je bilo definiranje zajedničkog (istovjetnog) rubnog uvjeta na njihovom kontaktu što se najčešće svodilo na usvajanje jednake razine vodnog lica.

Određivanje protoka (izmjene) vode između vodotoka i vodonosnika je još uvijek veliki izazov za inženjere zbog heterogenosti geoloških formacija i problema osrednjavanja. Metode određivanja proticajnih količina se mogu podijeliti na metode koje se zasnivaju na korištenju trasera, direktne metode mjerenja protoka te na proračune zasnovane na Darcy-evom 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 eutrofikanta (Eglin i sur, 1997). 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 korištenju pojedinih metoda (Sophocleous, 2002; Kalbus i sur.2006; Bereslavskii, 2006).

Kemijske, biološke i fizikalne karakteristike površinskih i podzemnih voda se razlikuju. Područje u kojem dolazi do miješanja površinskih i podzemnih voda se može nazvati prelazna ili kontaktna zona (eng: *hyporheic zone*). Izmjena vode kroz prelaznu zonu može imati značajnu 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 supstanci. Prelazna zona može u pojedinim slučajevima imati izražena autopurifikacijska svojstva (Carbiener i Tremolueres, 2006; Hinke i sur. 2001) isto kao što može propustiti znatne količine zagađivala kao što su na primjer teški metali iz vodotoka u vodonosnik (Carbiener i Tremolueres, 2006). U cilju održivog gospodarenja vodnim resursima od presudnog je značaja razumijevanje i kvantificiranje procesa izmjene vode u prelaznoj zoni.

I u Hrvatskoj smo svjedoci da se prilikom infiltracije pojedinih površinskih voda u vodonosnik mijenja kvaliteta podzemnih voda što ugrožava rad pojedinih crpilišta. Da bi se procesi koji se odvijaju u prelaznoj zoni mogli spoznati i na taj način predvidjeti učinci pojedinih hidrotehničkih zahvata u koritu, potrebno je sistematski provoditi ciljana istraživanja koja obuhvaćaju analize promjene kvalitete vode nakon pojedinih hidrotehničkih zahvata i formiranja baza podataka te izrade i baždarenja odgovarajućih hidrokemijskih modela.

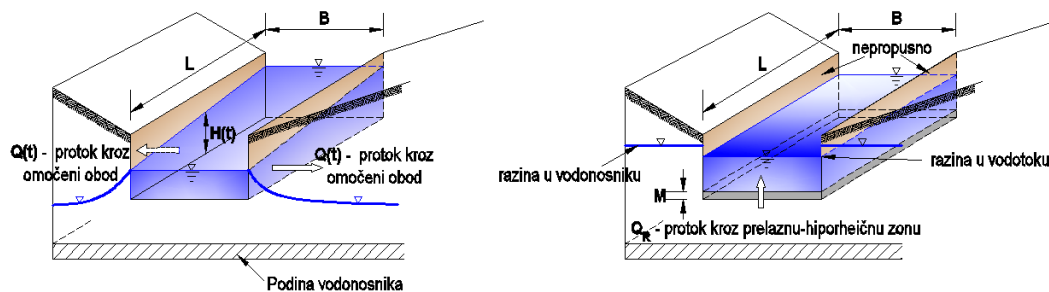
Do sada se za potrebe modeliranja utjecaja vodotoka na razine podzemnih voda u Hrvatskoj uglavnom koristio prisilni (Dirichletov) rubni uvjet u vidu zadane razine u vodotoku. Iznimno su u slučajevima modeliranja utjecaja akumulacionih jezera koja imaju razinu vode iznad

kote okolnog terena i pojave vertikalnih komponenata vektora brzine definiran i prirodni rubni uvjet.

Osim spomenutog prisilnog rubnog uvjeta se izmjena vode kroz prelaznu zonu sve češće zasniva na analizi protoka kroz kontaktni sloj ili na primjeni jednadžbe kontinuiteta pojedine dionice vodotoka. Prvo spomenuti pristup određivanja protoka između vodotoka i vodonosnika usvaja pretpostavku da je tok posljedica razlike potencijala u vodotoku i vodonosniku. Protok se računa na osnovu usvojenih razina vodnog lica u vodotoku i vodonosniku, kote dna vodotoka, te debljini, širini i propusnosti prelazne zone usvajajući pritom da vrijedi Darcyev zakon (Slika 4 lijevo).

Drugi pristup se zasniva na računanju protoka kroz vodotok po pojedinim dionicama (segmentima) pri čemu se prilikom formiranja modela definira protok na ulazu u modelom obuhvaćenu dionicu vodotoka i protok na izlazu iz nje (Hantush, 2005). Razlika između ulaza i izlaza se ravnomjerno infiltrira u vodonosnik (slika 4 desno).

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



Slika 4 Shematski prikaz izmjene vode između vodotoka i vodonosnika

4. Numerički model

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

U ovom istraživanju je korišten programski paket MODFLOW koji je prikladan za opisivanje trodimenzionalnog strujanja, strujanja u višeslojnim sredinama kao i za opisivanja među

utjecaja vodotoka i vodonosnika (Trescott, 1975, 1976) te se često koristi za modeliranje toka podzemnih voda u raznim hidrogeološkim uvjetima (El Yaouti i sur., 2008; Posavec i Mustač, 2009; Cho i sur., 2009). Konvektivni pronos tvari je modeliran programom MODPATH. Model toka podzemnih voda se zasniva na rješavanju jednadžbe oblika:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

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

Vladajuća jednadžba se za zadane početne i rubne uvjete rješava metodom konačnih diferencija. Ovaj program se ubraja u češće korištene modele kako u svijetu tako i u Hrvatskoj (Posavec i Mustač, 2009).

U formiranom modelu je 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 su definirane na osnovu usvojene geološke strukture vodonosnika. Početni uvjet je dobiven na način 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 je poslužio kao početni uvjet u modelu toka i pronosa.

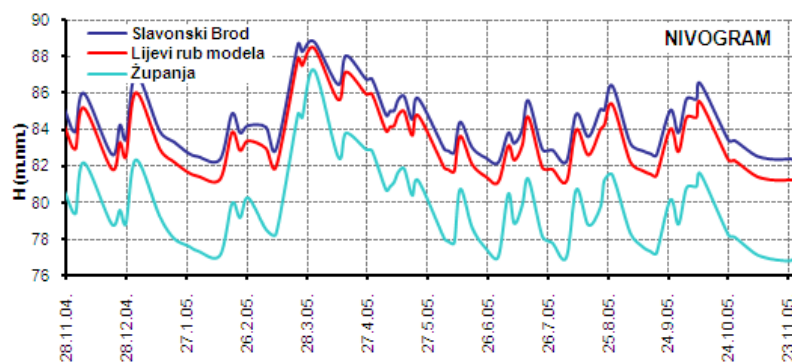
4.1 Baždarenje modela

U cilju određivanja hidrogeoloških karakteristika promatranog vodonosnog kompleksa kao i njegove interakcije sa rijekom Savom je provedeno baždarenje modela. Dinamika razine vodnog lica Save predstavlja osnovni nestacionarni rubni uvjet korišten 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 korišten je nivogram Save, dobiven temeljem mjerenja na postajama Slavonski Brod i Županja, tijekom perioda 28.11.2004.-28.11.2005. prikazan je na slici 5 i razine podzemne vode u piezometrima.

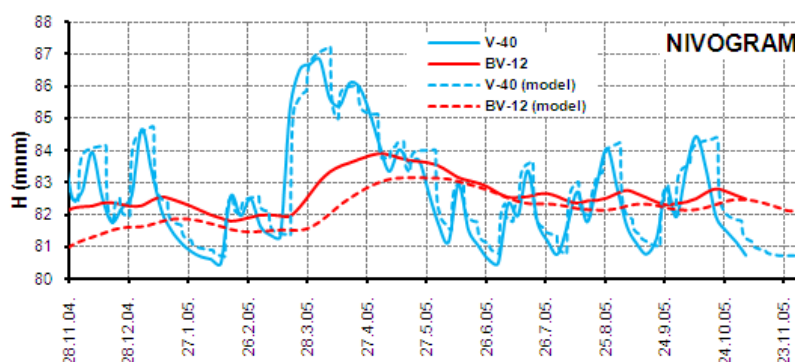
Širina korita Save na analiziranoj dionici usvojena je sa jednolikom vrijednosti od 250m. Kote dna Save na modeliranoj dionici su usvojene kao linearno promjenjive od kote 78,3 m n.m. na lijevom (zapadnom) rubu modela do kote 72,1 m n.m. na desnom (istočnom) rubu modela (Županja). Na svim rubovima modelske domene (slika 1) korišten je uvjet nepropusne granice. Prilikom rješavanja inverznog problema je simuliran i tok podzemnih

voda uz pretpostavka da postoji dotok iz smjera zapada i sjevera ali su količine koje dotiču u odnosu na doprinos rijeke Save u prihranjivanju vodonosnika zanemarive. Numeričke ćelije položene južno od korita Save tretirane su kao neaktivne. Prilikom kalibracije je Sava usvojena kao poznati rubni uvjet a mijenjane su karakteristike prijelaznog – hiporheičnog sloja te je promatran utjecaj dotoka iz smjera zapada i sjevera na promjene razine podzemnih voda.

Rezultati usporedbe izmjerenih i izračunatih nivograma za piezometar V-40 i zdenac BV-12 baždareni model su prikazani su na slici 6. Analiza propmjena razina u piezometru V40 pokazuju da rijeka Sava ima jako dobar kontakt sa vodonosnikom te da se promjene razina vode u Savi vrlo brzo i intenzivno prenose u vodonosnik. Usporedba izmjerenog i izračunatog nivograma pokazuje da numerički model dobro opisuje promjene razine podzemne vode uslijed varijacija razina u rijeci Savi. Piezometar BV 12 pokazuje da su promjene razina u području Velike Kopanice pod diominantnim utjecajem Save ali i da su oscilacije manje izražene.



Slika 5 Nivogram Save na postajama Slavonki Brod i Županja tijekom perioda 28.11.04.-28.11.05. i usvojeni nivogram Save na lokaciji lijevog ruba modeliranog područja



Slika 6 Usporedba izmjerenih i izračunatih nivograma za piezometre na pozicijama V-40 (crpna stanica hidročvora Sava) i BV-12 (Velika Kopanica) tijekom analiziranog baždarnog perioda 28.11.04.-28.11.05.

Za potrebe modeliranja pronosa tvari nije bilo odgovarajućih podataka o koeficijentu disperzivnosti i retardacije, kao niti 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 kao i spoznaje o rasprostiranju vodonosnog kompleksa ukazuju da je dotok iz smjera zapadne, sjeverne i istočne granice zanemarivo mali, pogotovo u odnosu na predviđenu maksimalnu izdašnost regionalnog crpilišta od 2 m³/s. Iz tog razloga je prilikom modeliranja budućeg stanja usvojeno da je nema protoka kroz zapadnu, sjevernu i istočnu granicu modela.

Trodimenzionalnost numeričkog modela je omogućila da se za svaki pojedini zdenac definira interval u kojem je ugrađen filter odnosno dubina sa koje zahvaća vodu.

Razine vodnog lica Save na promatranj dionici su usvojene kao nestacionarne i identične razinama korištenim u provedbi baždarenja modela, odnosno na osnovu rezultata mjerenja na limnigrafima Slavonski brod i Županja u vremenskom periodu 28.11.04.-28.11.05 (slika 5). Melioracijski kanal i VKDS su usvojeni sa projektom predviđenim dimenzijama i razinom vodnog lica na koti 80 m n.m. Dno melioracijskog kanala je usvojeno na koti 78 m.n.m., dok je dno VKDS usvojeno na koti 76 m n.m.

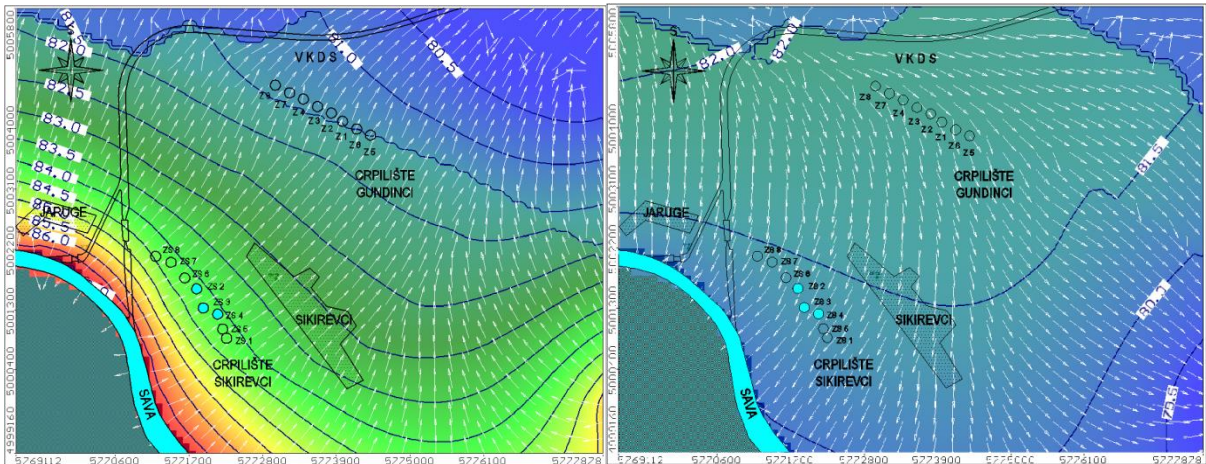
Proračuni su provedeni pod pretpostavkom postupnog povećanja izdašnosti crpilišta Sikirevci od sadašnjeg stupnja izgrađenosti ($Q_{SIK} = 3 \cdot 125 = 375$ l/s) do maksimalne projektom predviđene izdašnosti crpilišta Sikirevci i Gundinci sa po 8 zdenaca pojedinačne izdašnosti 125 l/s odnosno ukupno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

5. Rezultati modeliranja toka podzemnih voda

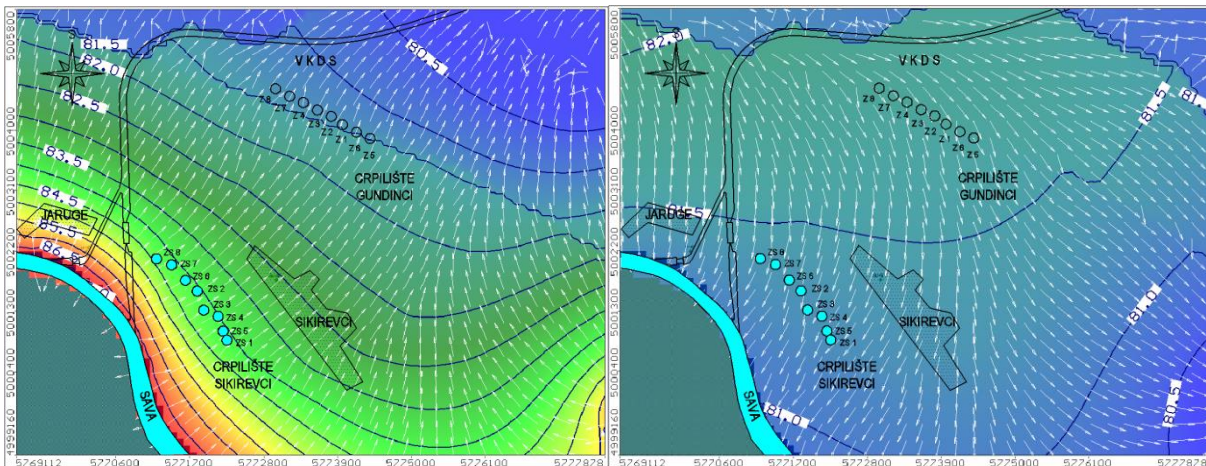
Kao karakteristične strujne slike se mogu usvojiti strujne slike za visoke vode rijeke Save pri vodostaju Save kod Slavenskog broda od 88.80 m n.m i za niske vode pri vodostaju Save 82.21m n.m.. Na slici 7 je prikazan detalj izračunate strujne slike u blizini crpilišta i višenamjenskog kanala za postojeći stupanj izgrađenosti sustava.

Analiza rezultata dobivenih numeričkim modelom pokazuje da u prirodnom stanju nema značajnijih razlika u smjerovima 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 hidroizohipsi i normiranih vektora brzina je odabrana 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 slabopropusnih leća, kretati prema crpilištu dominantno kroz podpovršinske slojeve.

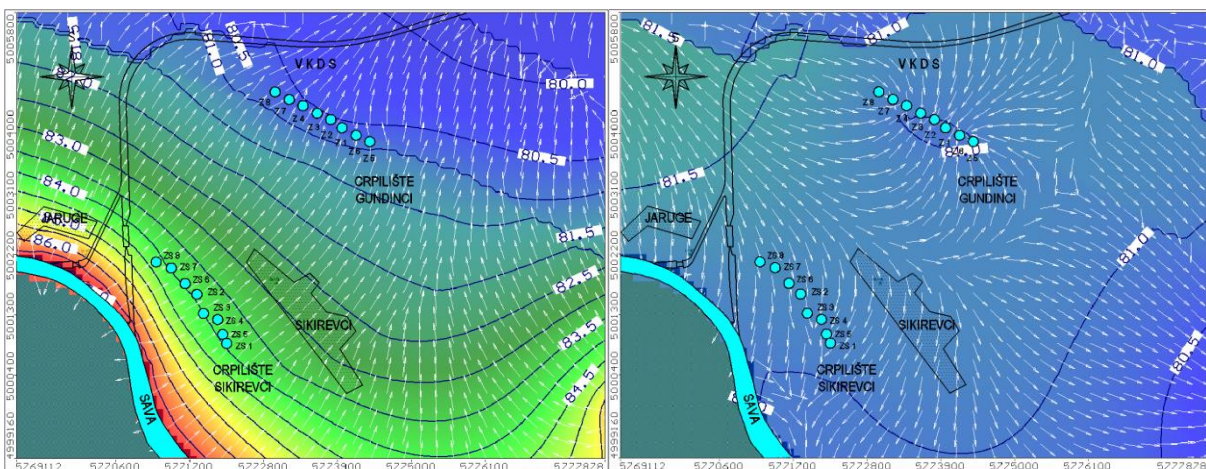
Na slici 8 su prikazane strujne slike za slučaj crpljenja iz svih osam projektom predviđenih zdenaca na crpilištu Sikirevci dok su na slici 9 prikazane strujne slike za maksimalnu izdašnost oba crpilišta za visoke (lijevo) i niske vode (desno).



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 svjetloplavu ispunu unutar kruga)

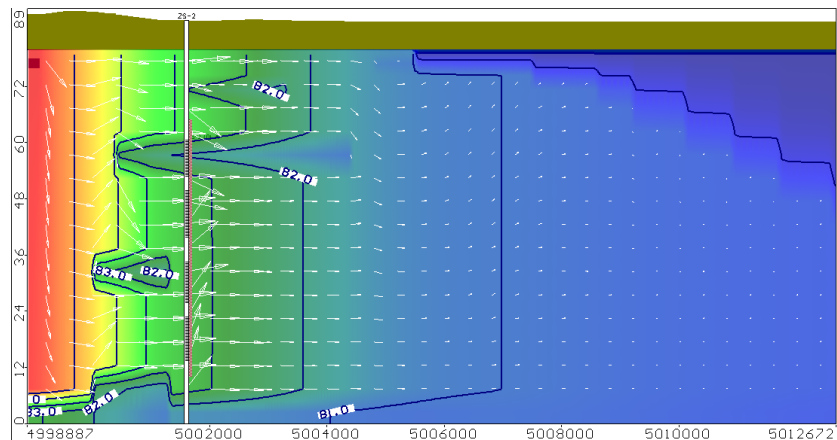


Slika 8 Hidroizohipse i vektori brzina za visoke (lijevo) i za niske vode rijeke Save (desno) za maksimalnu projektom predviđenu izdašnost crpilišta Sikirevci od $Q_{SIK} = 1000$ l/s



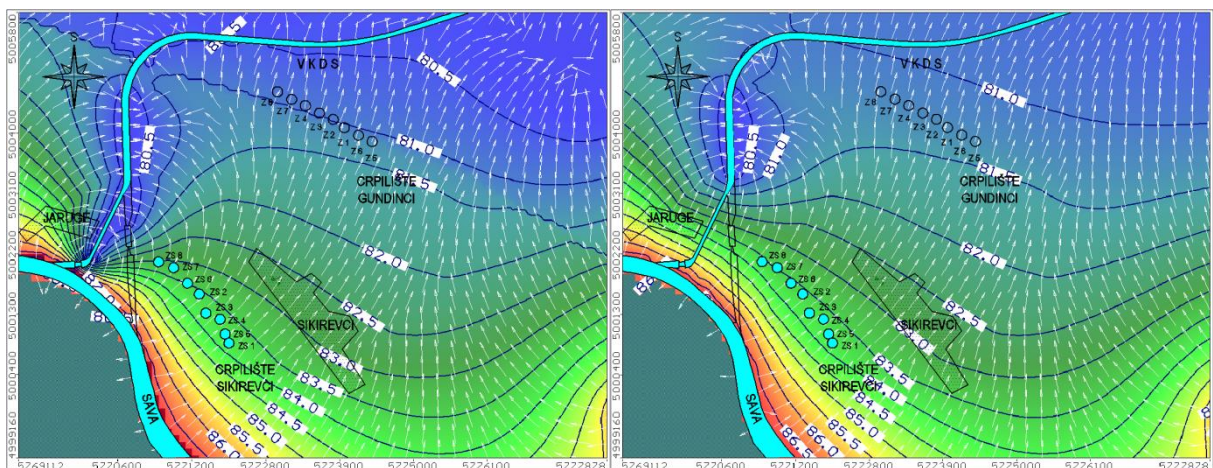
Slika 9 Hidroizohipse i vektori brzina za visoke (lijevo) i za niske vode rijeke Save (desno) za maksimalnu projektom predviđenu izdašnost crpilišta Sikirevci od $Q_{SIK} = 1000$ l/s i maksimalnu izdašnost crpilišta Gundinci od $Q_{GUN} = 1000$ l/s

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



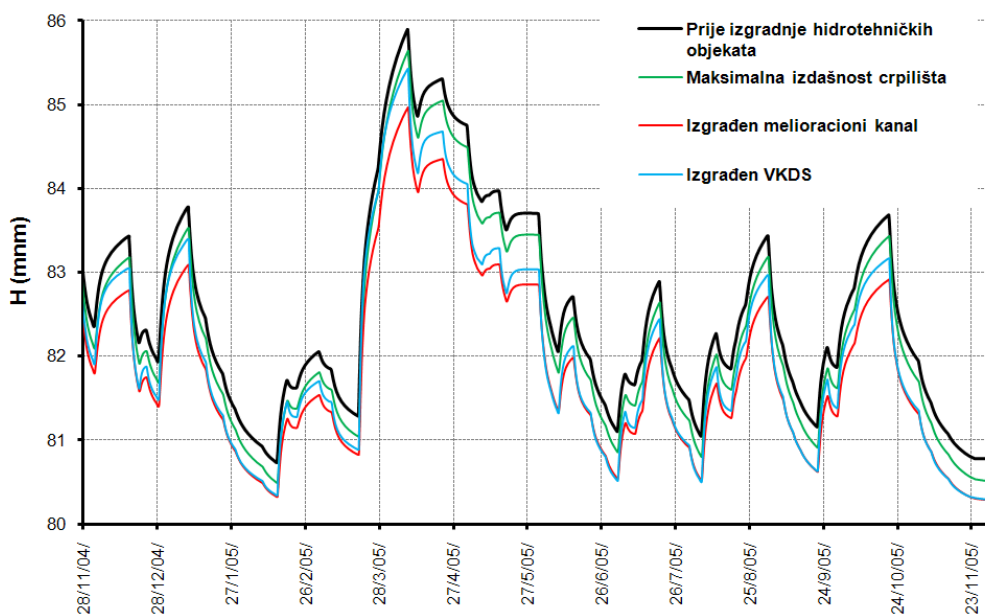
Slika 10 Ekvipotencijale i vektori brzina u vertikalnoj YZ ravnini modela koje prolaze kroz zdenac ZS-2 u Sikirevcima za visoke vode rijeke Save za maksimalnu projektom predviđenu izdašnost crpilišta Sikirevci od $Q_{SIK} = 1000$ l/s i maksimalnu izdašnost crpilišta Gundinci $Q_{GUN} = 1000$ l/s

Analiza ekvipotencijala i vektorima brzina u vertikalnom presjeku kroz vodonosni sloj (slika 10) ukazuje na 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 manje.



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 i izgrađen melioracijski kanal

Strujna mreža za slučaj izgrađenosti melioracijskog kanala (slika 11) ukazuje na drenažno djelovanje projektom predviđenog kanala. Drenažno djelovanje kanala je 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 u potpunosti zadovoljena.



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

Izgradnja hidrotehničkih objekata uzrokuje promjene razine podzemnih voda na području crpilišta Sikirevci (Slika 12). Najviše razine podzemne vode su u prirodnom – zatečenom stanju. Crpilište očekivano snižava razine podzemnih voda. Obzirom da je razina vode u projektu predviđenim kanalima niža od razina podzemnih voda i kanali će dodatno snižavati razine podzemnih voda pri čemu će pri niskim vodama rijeke Save i melioracioni i VKDS kanal snižavati približno jednako dok će pri visokim vodama rijeke Save infiltracija u području predluke umanjiti utjecaj drenažnog djelovanja VKDS-a. Prikazana sniženja usljed izgradnje VKDS-a neće ugroziti izdašnost crpilišta Sikirevci i Gundinci.

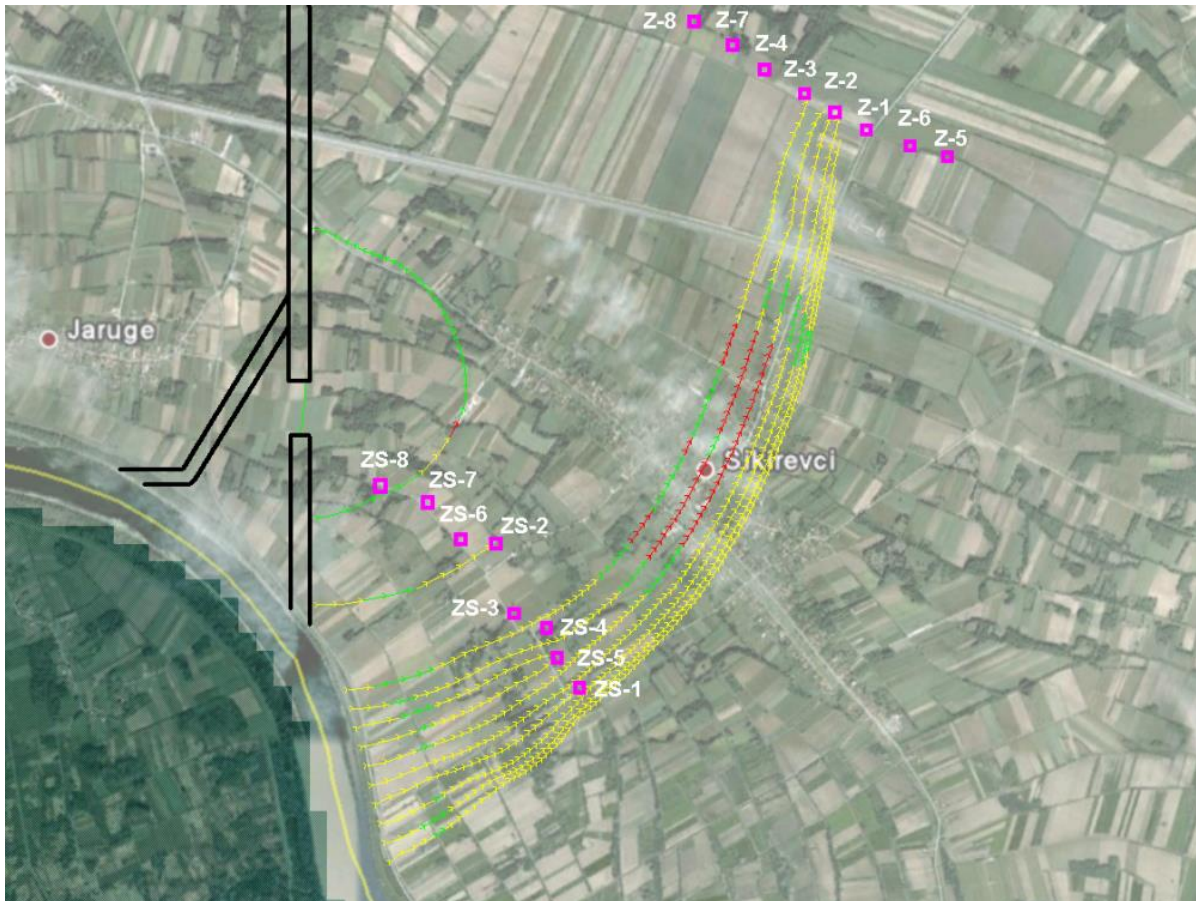
5.1 Rezultati modeliranja pronosa tvari

Iz rezultata dosadašnjih istraživanja može se utvrditi da je kakvoća voda 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”.

U okviru istraživanja mogućeg širenja zagađivala iz melioracionog kanala, VKDS-a ili rijeke Save prema crpilištima Sikirevci i Gundinci su modelirane i trajektorije putovanja pojedinih čestica iz smjera površinskih voda prema zdencima. Pri tomu su korištene traserske čestice, inicijalno upuštene pri dnu korita. Za ovu analizu korišteni su 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 strjelice). 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 primjetiti da će dio čestica iz spojnog kanala putovati direktno u VKDS.



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

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

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

Tijekom vremena će zbog manjih brzina u spojnog kanalu doći do procesa kolmatacije i taloženja čestica što će smanjiti količinu infiltrirane vode te produljiti vrijeme zadržavanja čestica u vodonosniku.

Temeljna činjenica vezana uz porijeklo onečišćenja zahvaćenih pitkih voda iz zdenaca crpilišta Sikirevci i Gundinci je da ista nisu antropogenog porijekla, već iz samog vodonosnika.

Onečišćenja koja prelaze propisane maksimalno dozvoljene koncentracije u crpljenoj vodi povezana su uz lokacije određenih eksploatacijskih zdenaca i istražnih bušotina. Pošto je temeljni izvor prihranjivanja vodonosnika rijeka Sava, proizlazi da se različita kakvoća vode na pojedinim zdencima i piezometrima može isključivo pripisati uvjetima koji vladaju u vodonosniku.

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

Numeričkim je modelom pokazano da je pretežiti režim strujanja od rijeke Save prema kanalu, što znači da je kanal prijemnik eventualnog onečišćenja iz vodonosnika, a ne izvor onečišćenja. U uvjetima vrlo niskih razina podzemnih voda je moguće da kanal na nekim dijelovima prihranjuje vodonosnik ali je trajanje te pojave toliko 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.

Uz sve propisane mjere zaštite vode u plovnom kanalu i/ili melioracijskom kanalu, voda iz istih ne bi se smjela bitno kakvoćom razlikovati od savske vode, što ove objekte ne izdvaja kao posebni rizik za vodonosnik. Dugoročno gledano na kakvoću vode u vodonosniku može utjecati presudno rijeka Sava pod pretpostavkom da se njezina kakvoća bitno i trajno naruši pronosom velikih količina nerazgradivog ili teško razgradivog, lako pokretnog onečišćenja koje bi bilo u stanju 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.

5. Zaključak

Višenamjenski kanala Dunav-Sava i regionalno crpilište istočne Slavonije će biti izgrađeni na maloj međusobnoj udaljenosti te će utjecat na promjene razine vode u istom vodonosnom sloju. U ovom radu su opisana istraživanja mogućeg utjecaja projektom predviđenog melioracionog odnosno višenamjenskog kanala Dunav-Sava na razine i kvalitetu podzemnih voda sa posebnim osvrtom na regionalno crpilište istočne Slavonije u Sikirevcima.

U radu je istaknuta potreba korištenja trodimenzionalnog modela toka podzemnih voda i pronosa tvari. Vodotoci (rijeka Sava i višenamjenski kanal) su usječeni 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 činjenica je od izuzetne važnosti u slučaju pojave zagađivala u podzemnim vodama koje bi se kretalo prema zdencima i potrebe njihove sanacije. Trodimenzionalni modeli su nužni kod modeliranja pronosa tvari koji imaju značajno različitu gustoću od vode (LNAPL ili DNAPL) ili se zbog izražene anizotropije kreću samo kroz dio vodonosnog kompleksa.

Razina vode u kanalu će u većem dijelu godine biti niža od razina podzemnih voda te će kanal drenirati vodonosnik i uzrokovat sniženja razine podzemnih voda na crpilištima. Intenzitet dreniranja nije velik jer je kanal usječen u slabije propusne pokrovne slojeve te sniženja usljed 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 će se uspostaviti ista razina vode kao u Savi. U tom području će se za vrijeme srednjih i visokih voda odvijati intenzivno prihranjivanje vodonosnika savskom vodom. Promatrajući putovanje čestica vode i eventualnih zagađivala iz Save prema crpilištu Sikirevci se može konstatirati da će se za neke čestice vrijeme putovanja do zdenaca nakon izgradnje VKDS-a bitno skratiti iz dva razloga:

- a) nakon izgradnje spojnog kanala između prevodnice i korita Save će se bitno skratiti udaljenost koju čestica trebaju prevaliti od vodotoka do zdenca i
- b) 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 će se povećati hidraulički gradijent a time i brzine toka podzemne vode

Ova zapažanja se odnose na stanje neposredno nakon izgradnje kanala. Tijekom vremena će zbog manjih brzina u spojnom kanalu doći do procesa kolmatacije i taloženja čestica što će smanjiti količinu infiltrirane vode i produljiti vrijeme zadržavanja čestica u vodonosniku.

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

Razina vode u višenamjenskom kanalu je pretežni dio godine niža od razina u Savi i vodonosniku te će kanal biti prijemnik eventualnog onečišćenja iz vodonosnika, a ne izvor onečišćenja. U uvjetima vrlo niskih razina podzemnih voda je moguće 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.

Uz sve propisane mjere zaštite vode u plovnom i/ili melioracijskom kanalu, voda iz njih se ne bi smjela kakvoćom bitno razlikovati od savske vode, što ove objekte ne izdvaja kao posebni

rizik za vodonosnik. Dugoročno gledano na kakvoću vode u vodonosniku može utjecati presudno rijeka Sava pod pretpostavkom da se njezina kakvoća bitno i trajno naruši pronosom velikih količina nerazgradivog ili teško razgradivog, lako pokretnog onečišćenja koje bi bilo u stanju 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.

I u Hrvatskoj smo svjedoci da se prilikom infiltracije pojedinih površinskih voda u vodonosnik mijenja kvaliteta podzemnih voda što ugrožava rad pojedinih crpilišta. Da bi se procesi koji se odvijaju u prelaznoj zoni mogli spoznati i na taj način predvidjeti učinci pojedinih hidrotehničkih zahvata u koritu vodotoka, potrebno je sistematski provoditi ciljana hidrokemijska istraživanja. Istraživanjima treba obuhvatiti mjerenja količinu vode koja se infiltrira (ili drenira) iz vodotoka u vodonosnik i kemijske procese koji se odvijaju o prelaznoj zoni. U suprotnom bi se moglo provedbom nepromišljenih i nedovoljno istraženih građevinskih zahvata smanjiti kvalitetu podzemne vode koja se koristi za vodoopskrbu.

Sistematski pristup praćenju hidrogeokemijskih procesa u kontaktnom sloju i u vodonosniku je nužan kako bi se mogli predvidjeti eventualni negativni učinci projektom predviđenih građevinskih zahvata na kvalitetu podzemnih voda i po potrebi projektirati i izgraditi uspješne sanacije zagađenja in situ.

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

Literatura:

Hrvatski geološki institut (2005): *Hidrogeološka istraživanja u cilju definiranja eksploatacijskih zaliha podzemne vode na potencijalnom regionalnom crpilištu Gundinci-Sikirevci*, Zagreb.

Bačani, A. (1997): *Značajke hidrauličkih granica vodonosnih slojeva na vododjelnici Savskog i Dravskog porječja u istočnoj Slavoniji*, Disertacija, Rudarsko-naftno-geološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Bereslavskii, E.N. (2006): Groundwater Flow to a System of Drainage Canals, *Water Resources*, Vol.22, No 4, pp 417-420.

Carbiener, R., Tremolueres M. (2006): The rine rift valley ground water- river interactions: Evolution of the susceptibility to pollution, *Regulated Rivers:Research &Management*, Vol 5.,No 5, pp 375-389.

Cho, J., Barone, V.A., Mostghimi, S. (2009): Simulation of land use impacts on groundwaterlevels and streamflow in a Virginia watershed, *Agricultural Water Management*, online, 96.

- Eglin, I., Roeck, U., Robach, F., Tremolieres, M. (1997): 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.
- El Yaouti, F., El Mandour., A., Khattach, D., Kaufmann, O. (2008): Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Marocco), *Journal of Hydro-environment Research*, 2, pp.192-209.
- Gjetvaj, G, Petošić, D., Mustač.I (2008): 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.
- Hantush, M.M.(2005): Modeling stream-aquifer interaction with linear response function, *Journal of Hydrology*, Vol. 311, pp. 59-79.
- Hinke, S.R., Duff, J.H., Triska, F.J. ,Laenen, A., Gates, E.B., Bencala, K.E., Wentz, D.A., Silva S.R. (2001): Linking hyporheic flow and nitrogen cycling near the Willamette River- a large river in Oregon, USA, *Journal of Hydrology*, Vol. 244, pp157-180.
- Kalbus E.,Reinstorf F., Schirmer M (2006): Measuring methods for groundwater-surface water interaction: a review, *Hydrology and Earth System Science*, Vol 10, pp 873-887.
- Mustač, I. (2009): *Modeliranje utjecaja višenamjenskog kanala Dunav-Sava na dinamiku podzemnih voda*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb.
- Mustač I., Gjetvaj G., Petošić,D.,Tomić,F. (2011): Impact of the future multipurpose Danube-Sava Canal on Groundwater dynamics, *Tehnički vjesnik (Technical Gazette)*, No 2, Vol 18, pp. 211- 218.
- Pekaš, Ž., Brkić, Ž. (2007): Crpilište regionalnog vodovoda Istočne Slavonije – rezultati tridesetgodišnjeg istraživanja, *4. Hrvatska konferencija o vodama*,pp 787-796, Opatija.
- Posavec, K., Mustač, I. (2009): Zone sanitarne zaštite međimurskih vodocrpilišta, *Hrvatske vode*, Vol.17, No 68, pp.113-124.
- Sophocleous, M. (2002): Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeol. J.*, 10,52-67.
- Trescott, P.C. (1975): *Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional groundwater flow*, U.S. Geological Survey Open-File Report 75–438, 32 p.
- Trescott, P.C., Larson, S.P. (1976): *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.
- Trescott, P.C., Pinder, G.F., Larson, S.P. (1976): *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.