

Prikaz izrade matematičkog modela na potezu Trnovče – Miloševac-Lozovik u cilju određivanja eksploatacionog kapaciteta izvorišta za potrebe vodosnabdevanja Velike Plane

mr. Dragan Kaluđerović dipl.ing. hidrogeologije

Ključne reči. podzemna voda, aluvion, reka Velika Morava, izvorište, matematičko modeliranje, Modflow, Visual MODFLOW, inverzno modeliranje, WinPest

Kratak sadržaj. Aluvion reke Velike Morave godinama je bio predmet hidrogeoloških izučavanja. Na potezu sela Trnovče-Miloševac-Lozovik vršena su obimna izučavanja u periodu 1968 – 1975. Problemi vezani za vodosnabdevanje gradova Velike Plane, Smederevske Palanke i okolnih naselja aktuelizovali su ovaj deo izdani tokom 1997. godine. Vršena su dodatna istraživanja i uz postojeće podatke formiran je kompleksni matematički model kojim je vršena analiza i prognoza tog dela aluviona. Zbog male debljine izadani, oko 8 metara, preporučena je izrada posebnog matematičkog modela u cilju procene neodređenosti sistema što je i delimično urađeno prilikom testiranja programa za inverzno modeliranje, WinPest, tokom 2000 godine u kanadskoj kompaniji Waterloo Hydrogeologic, Inc.

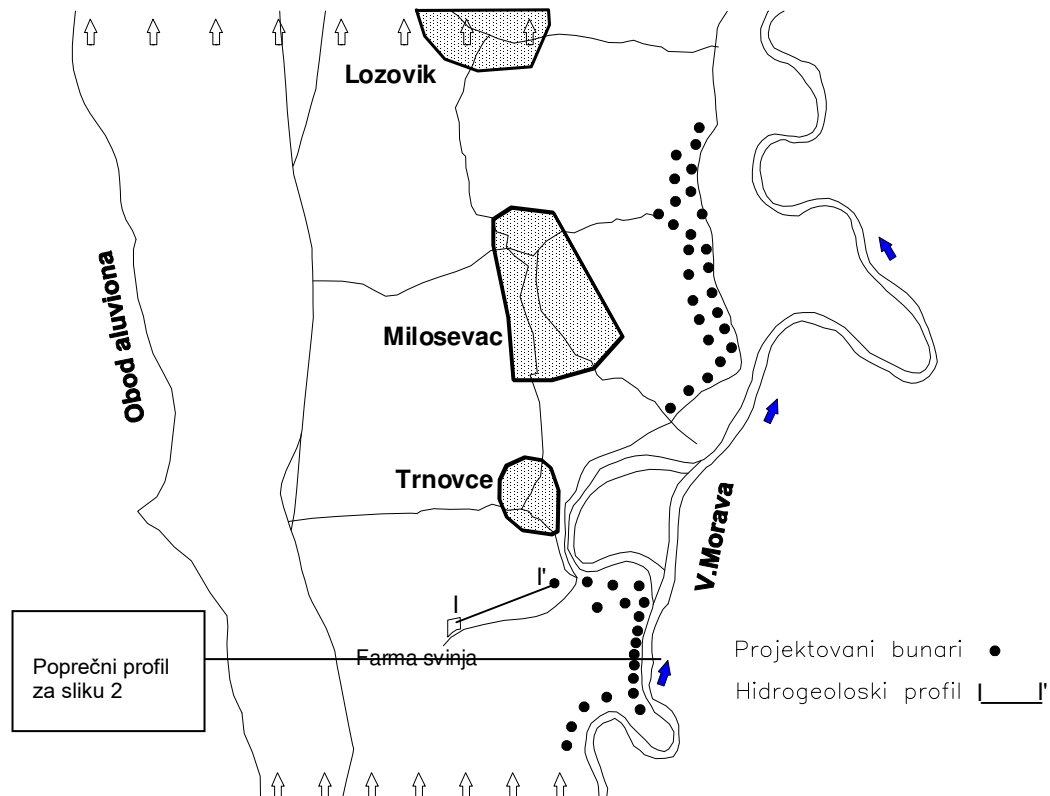
Uvod

U aluvijalnim naslagama reke Velike Morave, na potezu sela Trnovče-Miloševac-Lozovik (slika 1), u periodu od 1968-1975 godine izvedena su obimna hidrogeološka istraživanja namenjena rešavanju problema vodosnabdevanja gradova Velike Plane, Smederevske Palanke i okolnih naselja. Kapacitet potencijalnog izvorišta procenjen je na oko 600-700 l/s ali do otvaranja novog izvorišta nije došlo. Matematičkim modelom koji je izrađen 1994. za stacionarne uslove ("Geozavod"), u području sela Trnovče, količine vode koje se mogle crpeti u toj zoni su procenjene na 250 l/s.

Usled ugroženosti pomenutih gradova u pogledu kvantiteta i kvaliteta pitke vode, tokom 1997. godine ponovo je aktuelizovano ovo izvorište. Glavni cilj novih istraživanja je bio da se odredi količina vode koja se može eksploatirati iz područja sela Miloševac uz reku V.Moravu. Ukupni broj, raspored i namena istražnih objekata omogućili su primenu matematičkog modela MODFLOW kojim bi se adekvatno simulirali hidrodinamički uslovi u istražnom području.

Hidrogeologija aluviona reke Velike Morave na istražnom području

Aluvion reke Velike Morave na potezu sela Trnovče - Miloševac – Lozovik, slika 1, bio je godinama predmet geoloških i hidrogeoloških istraživanja. U periodu od 1968-1975. godine izvedeno je blizu 200 istražnih radova, piježometara, istražnih bušotina i bunara, koji su omogućili sagledavanja osnovnih karakteristika izdani formirane u aluvionu. Istražni radovi su najgušće locirani uz reku i prema obodu njihov broj opada. Nažalost, kontinuirano osmatranje nivoa podzemne vode na piježometrima i bunarima nije vršeno, što predstavlja osnovni nedostatak dosadašnjim istraživanjima. Ovo se takođe odnosi i na kvalitet voda.

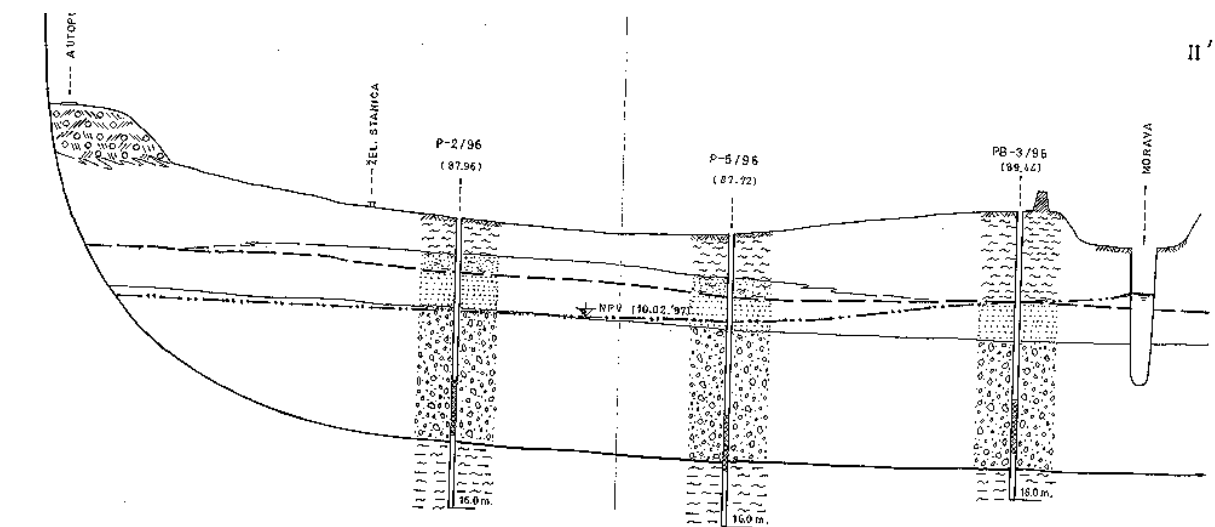


Slika 1. Pregledna karta istražnog područja

Istražno područje na potezu sela Trnovče - Miloševac - Lozovik u hidrogeološkom smislu predstavlja tipičnu aluvijalnu sredinu (slika 2). Gornji, slabopropusni sloj, čine prašinsto-peskovito-glinoviti sedimenti, čija debljina varira 4-6 metara. Povlata izdani, a podina slabopropusnog sloja, generalno pada prema severu (od 87 m.n.m. do 78 m.n.m.) a isto je i sa kotama podine izdani (od 78.5 do 70.5 m.n.m.). Koeficijent filtracije gornjeg sloja određen je na osnovu granulometrijskih analiza i kreće se u rasponu od $K=10^{-6}$ - 10^{-7} m/s. U šljunkovito-peskovitim naslagama formirana je aluvijalna izdan čija debljina varira u granicama od 7-12 metara. Izdan se odlikuje relativno visokim vrednostima koeficijenta filtracije, $0.8-5 \times 10^{-3}$ m/s, koje su određene kako iz brojnih opita crpenja tako i na osnovu granulometrijskih analiza. Podinu peskovito-šljunkovitim sedimentima čine vodonepropusne laporovite gline pleistocenske starosti.

Režim aluvialne izdani

Organizovana osmatranja režima izdani u dužem vremenskom periodu do sada na istražnom području nisu rađena. Za potrebe izrade matematičkog modela, u periodu od Januara-Jula 1997.god., nivo podzemne vode je osmatran na oko 50 pijeziometara svakih 10 dana. Analizom povlate izdani i nivoa podzemne vode merenim u pijeziometrima došlo se do zaključka da je izdan u većem delu sa slobodnim nivoom osim u priobalnom delu gde su nivoi podzemne vode iznad povlate izdani tj. izdan je pod pritiskom. Kvalitativna analiza nivoa podzemne vode ukazuje da pijeziometri (svi su izbušeni u osnovnom sloju) prate oscilacije Velike Morave sa amplitudama koje zavise od udaljenosti od reke. Pijeziometri u središnjem delu aluvijona i bliže njegovom obodu pokazuju relativno ujednačen nivo, tj. uticaj Velike Morave je veoma mali. Takođe, na režim izdani značajan uticaj ima vertikalni bilans, infiltracija od padavina i manjim delom evapotranspiracija.



Slika 2. Karakteristični hidrogeološki profil

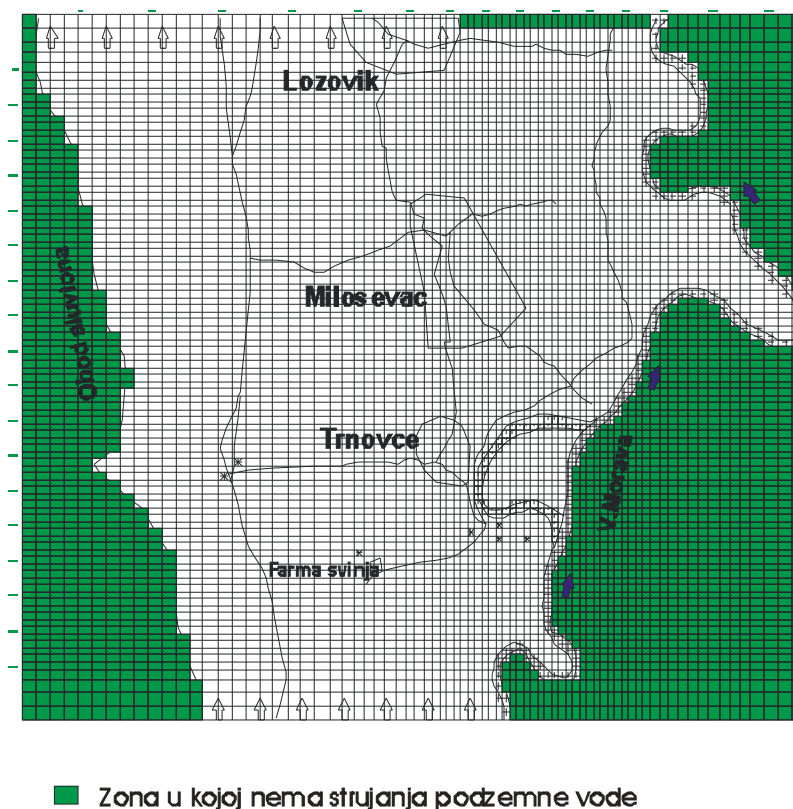
Dominantni faktor prihranjivanja aluvijalne izdani je reka V. Morava koja je dužinom celog toka na izučavanom terenu usečena u vodonosni sloj oko 3m što predstavlja skoro jednu trećinu debljine izdani. Za nivo reke Morave karakteristično je da je u periodu od 1984-1995. opao za oko 1 m što treba imati u vidu u hidrodinamičkoj analizi - reka Velika Morava je glavni izvor vode za potencijalno izvorište.

Hemizam podzemnih voda u području izvorišta karakteriše uglavnom visok sadržaj gvožđa i mangana kao i povišen sadržaj amonijaka. Utroška kalijum permanganata je takodje povišen kao i prisustvo nekih bakterija, što ukazuje na prisustvo organskih zagađenja. Kvalitet vode Velike Morave je zadovoljavajući, ali zbog aktivne hidrauličke veze reka izdana, važno je da se ne naruši. S obzirom na kvalitet, prečišćavanje podzemnih voda za njihovu upotrebu za piće se podrazumeva, tj., bez prethodnog tretmana one se ne mogu koristiti za piće. Vrlo nepovoljna činjenica je da na istražnom prostoru ne postoji kanalizaciona mreža, područje obuhvata naselja Miloševac, Trnovče i Lozovik sa više hiljada stanovnika. Takođe, u ovom kraju je

razvijena poljoprivredna proizvodnja a postoji i nekoliko potencijalnih izvora zagađenja. Hidrodinamički model će poslužiti i kao osnova za izradu modela transporta zagađenja koji će uključiti i transport zagađenja u vadoznoj zoni (Kaludjerovic, 1998).

Matematički model aluviona reke Velike Morave na potezu sela V. Orašje-Trnovče – Miloševac

Matematički model je približno kvadratnog oblika (10x11 km) i obuhvata aluvion na potezu od sela Veliko Orašje do Lozovika pri čemu aluvion zauzima oko 75 km². Diskretizacija modela je izvršena sa 77x94 polja dimenzija od 100x100 do 200x200 metara (slika 3). Zbog male debljine a velikog horizontalnog rasprostranjenja aluvijalne izdani korišten je 2D pristup. Na jugu modela granični uslovi su zadati kao dotok vode preko fiktivnih bunara, tj granični uslov II reda tj. Neuman-ov granični uslov, a za kontrolu vrednosti doticaja služio je pijezometar koji je lociran na granici modela. Oticaj iz modela je simuliran na isti način kao na jugu modela, preko fiktivnih bunara. Na zapadnoj strani modela pretpostavljen je mali doticaj, oko 1 l/s/km a reka je simulirana kao granični uslov III reda tj. Cauchy uslov, gde doticaj u reku iz izdani ili obrnuto zavisi od nivoa vode u reci, kolmiranosti rečnog dna i nivoa podzemne vode u izdani. Takođe, bunari koji kaptiraju izdan, bušeni ili kopani, kojih ima dosta u selima uneti su u model.



Slika 3. Pregledna mapa modela sa diskretizacijom i graničnim uslovima

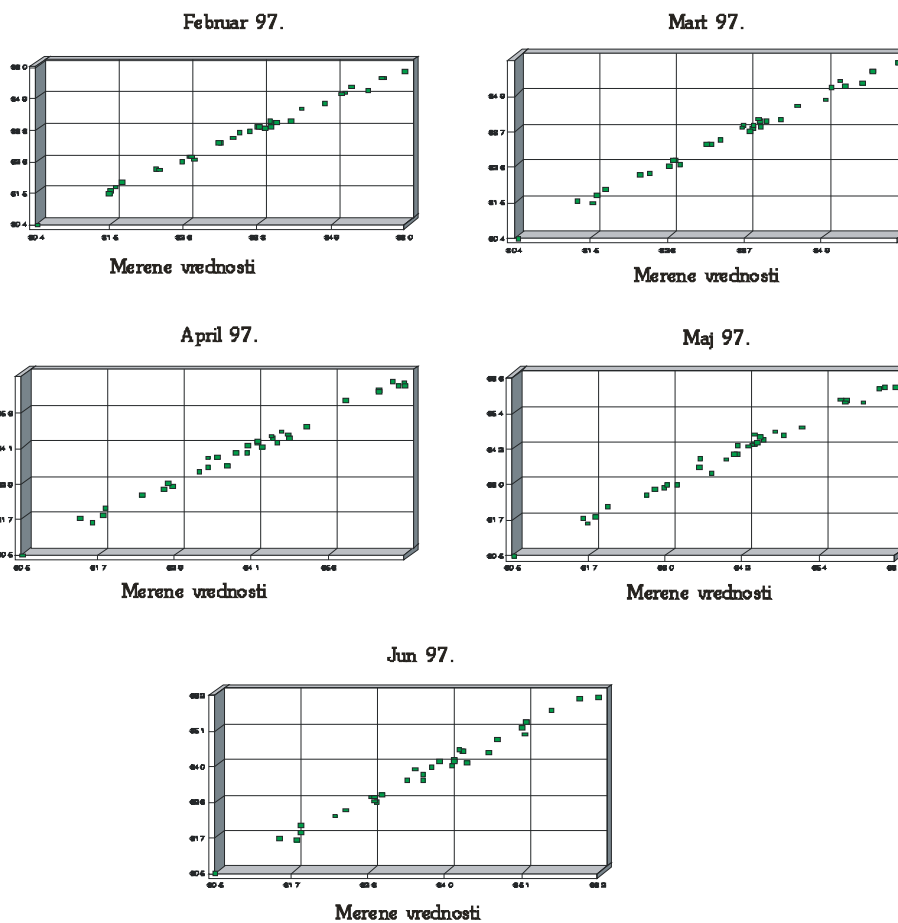
Imajući u vidu da se u programu Modflow zadaje neto infiltracija a da studije o vertikalnom bilansu nisu rađene za određivanje vertikalnog bilasa korištena je empirijska jednačina M.Vukovića, Saopštenje Instituta J.Černi br.39 1967, dobijena za slične uslove. Na početku simulacije usvojena je uniformna vrednost koeficijenta filtracije za ceo model od 2.5×10^{-3} m/s.

Nivoi podzemnih voda u ovom delu aluviona registrovani su na oko 50 pijezometara i kontinualno su praćeni od 30.1.1997. do 10.7.1997. a služili su za proveru uspešnosti tariranja modela.

Tariranje modela

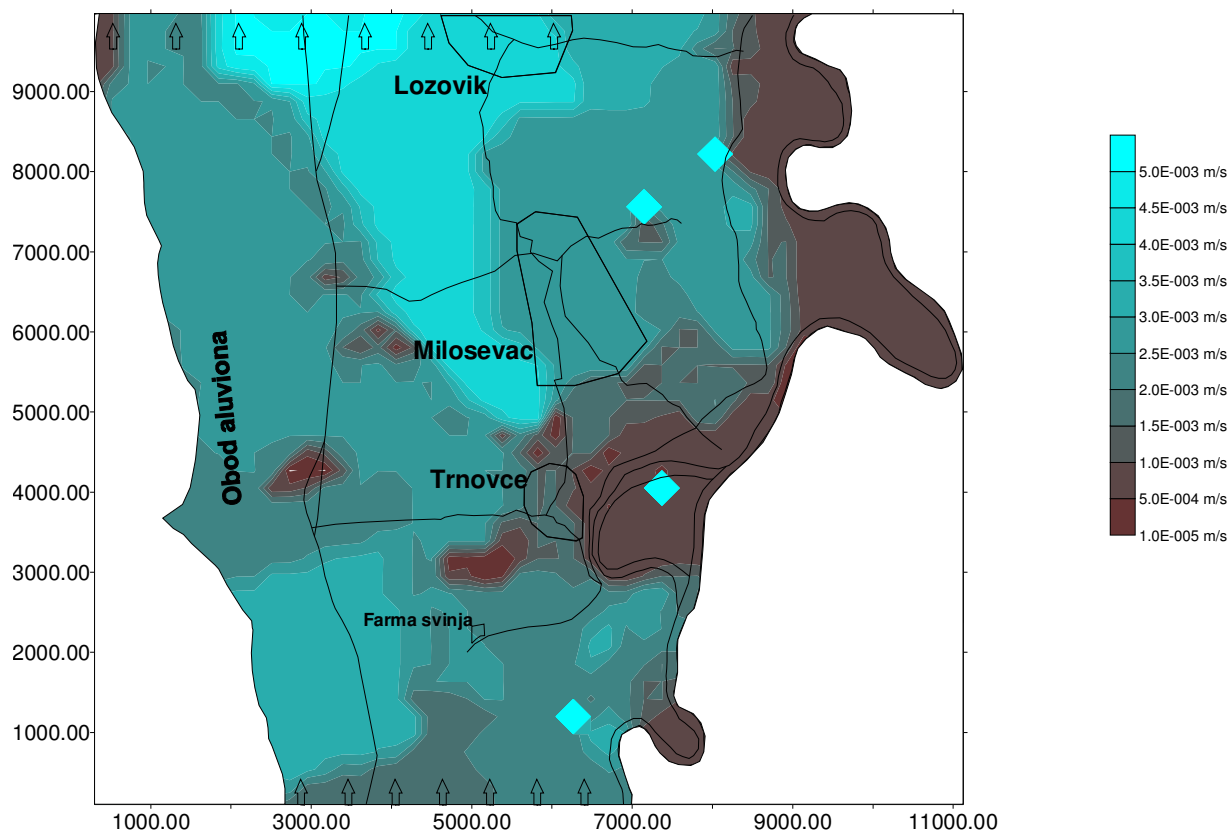
Prvi korak u simulaciji hidrogeološkog sistema je bila simulacija u stacionarnim uslovima za Februar 1997. sa osrednjenim vrednostima nivoa podzemne vode u pijezometrima kao ciljevima tariranja i u reci kao graničnom uslovu za taj mesec. Ovaj mesec je izabran jer nivo u reci V.Moravi nije značajnije oscilovao ni za vreme tog meseca ni mesec pre. Za vreme tariranja menjane su vrednosti koeficijenta filtracije, kolmiranosti rečnog dna i dotok (otica) iz modela na granicama. Zbog malih padavina, a prema jednačini prof M. Vukovića, vertikalni bilans nije uzet u obzir što je veoma povoljno jer je u procesu tariranja smanjen broj parametar koji su menjani. Za većinu pijezometara postignuta razlika merenog i računskog nivoa je ispod 20 cm za pijezometre pored reke (oscilacije su oko 1.5 metar) a za pijezometre u središnjem i obodnom delu aluviona je ispod 10 cm - u obodnom delu aluviona oscilacije su znatno manje nego pored reke (slika 4) i iznose oko 20 cm.

Sa početnim nivoima iz prethodne, stacionarne simulacije započeta je simulacija u nestacionarnim uslovima za period od pet meseci. Nivo vode u reci V.Moravi je za to vreme oscilirao između vrednosti koje su bliske ekstremnim min. i max. vrednostima za 14 godišnji period što je omogućavalo kvalitetno tariranje modela. Za ovu, nestacionarnu simulaciju zadržani su isti tipovi graničnih uslova a vrednosti koeficijenta filtracije (i zona koeficijenta filtracije) ostali su isti. Podaci o mesečnim padavinama su poslužili kao ulaz za empirijsku formulu M.Vukovića a za bunare koji su bili u eksploataciji tokom pet meseca zadati su odgovarajući kapaciteti. Ukupni kapacitet kopanih bunara po selima iz kojih se vrši crpenje aprkosimiran je na osnovu broja stanovnika a nekoliko pijezometara je bilo locirano po ovim selima i oni su poslužili za kontrolu vrednosti nivoa podzemne vode u ovim zonama.



Slika 4. Usaglašenost merenih i računskih nivoa podzemne vode (vrednosti na ordinati su računске)

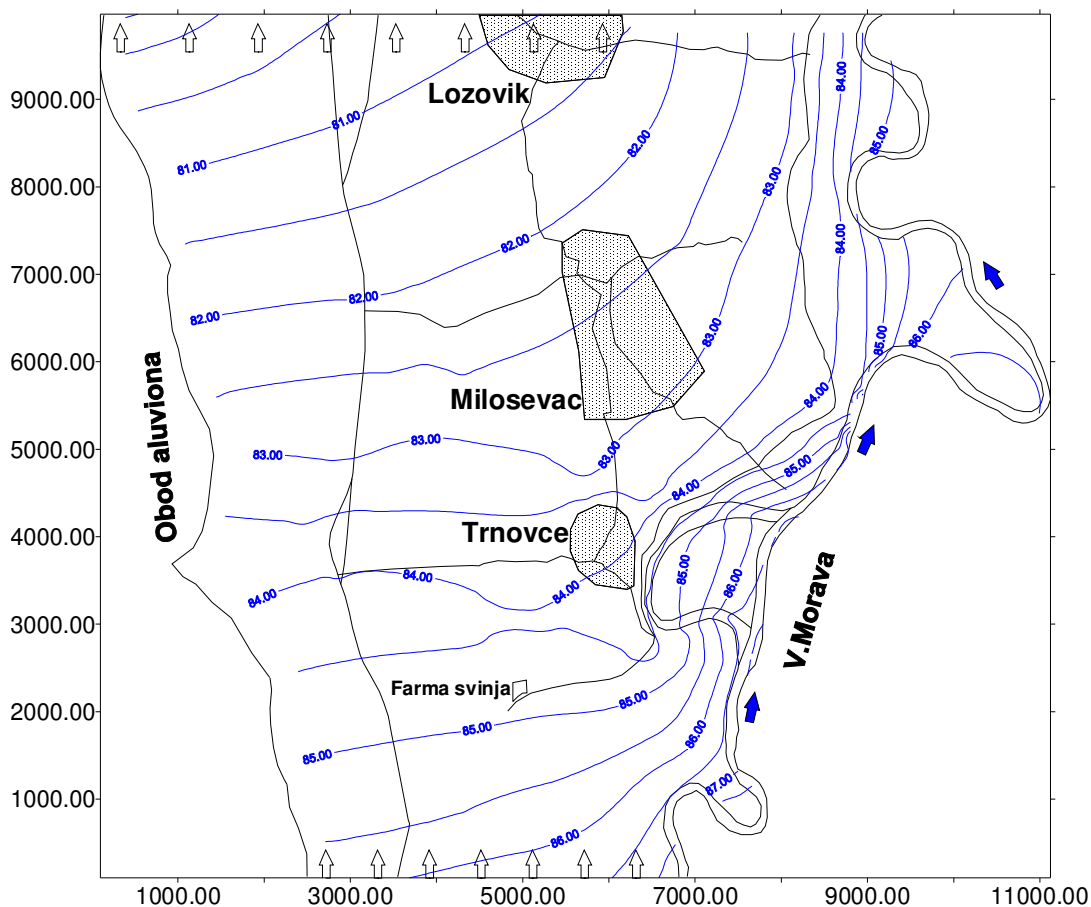
Smanjivanje razlike merenih i računskih nivoa vršeno je izmenama doticaja i otcicaja na granicama, (na severnoj i južnoj granici kao kontrola postajali su pijezometri) promenom specifične izdašnosti i kolmiranosti rečnog dna. Takođe, u jednoj fazi tariranja menjane su vrednosti koeficijenta filtracije kao i oblik zona koeficijenta filtracije ali je prilikom ovih promena novi raspored vraćan u stacionarnu simulaciju i prihvatatan ili odbacivan u zavisnosti da li su razlike merenih i računskih nivoa zadržane u prihvaćenim kriterijumima za stacionarne uslove.



Slika 5. Raspored koeficijenata filtracije dobijenih u postupku tariranja

Spuštanjem razlike merenih i računskih nivoa podzemnih voda na manje od 20 cm u delovima pored reke a za ostale na manje od 10 cm proces tariranja u nestacionarnim uslovima je završen (slika 4). Mora se napomenuti da je u pitanju aluvion i da je osmatranje vršeno na preko 30 piježometara.

Strujana slika nakon tarirnja modela a za mesec April data je na slici 6. Tokom nestacionarne simulacije, Februar-Juni 1997, doticaj u model sa južne strane iznosi od 50-60 l/s dok je oticaj na severu bio 80-95 l/s. Doticaj sa oboda aluviona se nije mogao kvantifikovati zbog slabe osetljivosti modela na promenu tog parametra tako da je zadržana vrednost od 1 l/s/km. Kolmiranost rečnog dna simulirana je kao hidrauličko udaljenje reke i ona je iznosila od 500-1700 m. Procenjeno je da su različite vrednosti kolmatacije dobijene usled bujičnog toka reke.



Slika 6. Izolinije nivoa podzemne vode za april 1997.

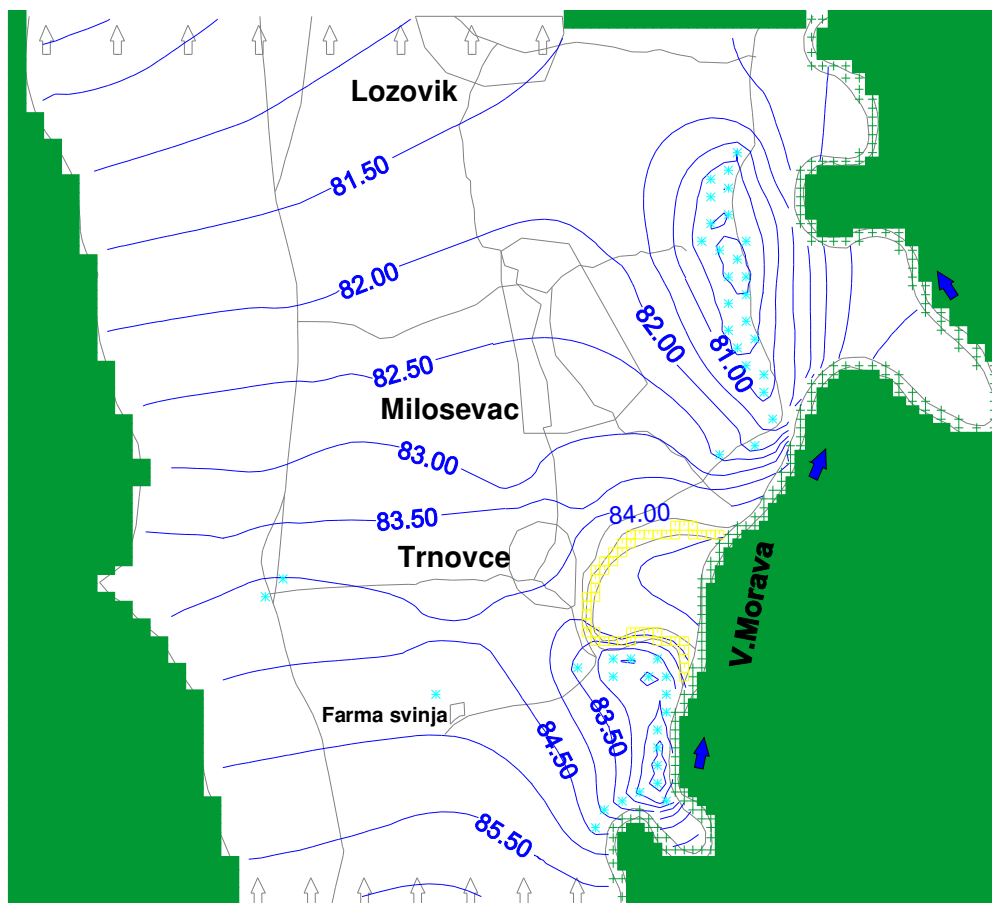
Neto infiltracija se poklapa sa vrednostima dobijenim iz empirijske formule M.Vukovića i iznosi od 1mm-16mm/mesec. Vrednosti specifične izdašnosti dobijene proračunom su $\mu=0.18$ za veći deo aluviona a za deo gde je strujanje pod pritiskom dobijene vrednosti su $\mu=0.003$.

Prognoza eksploatacionih kapaciteta izvorišta Miloševac

Cilj izrade matematičkog modela je određivanje eksploatacionih mogućnosti aluviona reke Velike Morave pored sela Miloševac. Prethodnim istraživanjima i izradom matematičkog modela u stacionarnim uslovima (Geozavod, 1994.) procenjeno je da se sa lokacije južno od sela Trnovče može crpeti oko 250 l/s.

Za izvorište Miloševac planirano je da bunari budu locirani severno od meandra kod Ade kod sela Trnovče jer je taj deo izdani slabijih filtracionih karakteristika. Sa druge strane bunarski niz treba da bude što bliži fabrici za prečišćavanje vode za koju je projektovano da bude locirana u Trnovču. Takodje bunari su odmaknuti od reke da bi se izbegla zona sa slabijim filtracionim karakteristikama neposredno pored reke (slika 1 i 5) a time se i omogućilo prirodno prečišćavanje rečne vode pre crpenja iz bunara. Pored postojećih 10 već izbušenih bunara u modelu je dodato još 15 bunara a svaki bunar je pušten da radi sa 15 l/s. Ukupno 25 bunara je raspoređeno u dva niza na

medjusobnom rastojanju od oko 200 metara. Za proračun eksploatacionih mogućnosti izvorišta nivo u V.Moravi je aproksimiran sa 95 % nivoom vode uzete sa krive trajanja za 24 godišnji period. Zadatao hidrauličko udaljenje od reke je 2500 metara, skoro udvostručena vrednost od one dobijene tariranjem, elementi vertikalnog bilansa su isključeni iz proračuna a usvojeni dotok sa granica je minimalan. Ovako koncipiran prognozni model je pušten da radi 90 dana sa ukupno 16+25 bunara sa po 15 l/s.



Slika 7. Izolinije nivoa podzemne vode – prognoza ukupno crpenje 250 l/s

Rezultati proračuna dati su na slici 7 i to nakon simulacije od 90 dana kada je praktično došlo do stabilizacije strujne slike naravno za date uslove. Strujna slika je deformisana usled rada bunara i najveće sniženje je u centru bunarskog polja je 3.9 metara a najmanja debljina zasićenog dela je 4.6 metara što je oko polovine debljine izdani. Uticaj rada grupe bunara ne prelazi oko 1500 metara i van ove zone crpenje nema bitnog uticaja. Uticaj svinjogojске farme koja se nalazi u blizini cela Trnovče je prikazan u prethodnom radu (Kaludjerović 1998).

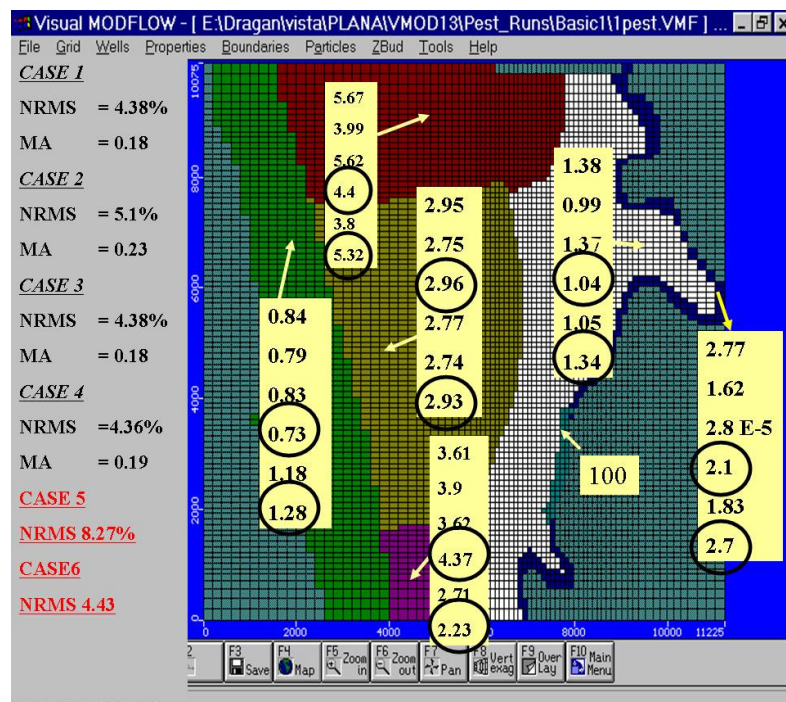
Zaključak

Hidrodinamička analiza aluviona Velike Morave primenom matematičkog modela Modflow pokazala je da se na potezu od sela V.Orašje pa do sela Lozovik a uz reku Veliku Moravu može crpeti 625 l/s. Broj i vrsta istražnih radova omogućili su pouzdano definisanje geometrije izdani na istražnom prostoru a brojni opiti crpenja značajno su suzili raspon vrednosti koeficijenta filtracije na istražnom terenu. Takođe, zone sa manjim (većim) vrednostima koeficijenta filtracije su grubo mogle da se definišu.

Za vreme tariranja modela u periodu od 5 meseci V.Morava je oscilovala u opsegu koji je blizak minimalnim i maksimalni vrednostima za 14-godišnji period osmatranja nivoa u reci a samim tim i oscilacije u pijezometrima, naročito u onim pored reke su bile dovoljno velike da bi parametri mogli relativno pouzdano da se odrede.

Ovakva sredina, dvoslojevita, pogodovala je primeni empirijske jednačine M.Vukovića što je doprinelo jednoznačnosti dobijenih vrednosti koeficijenta filtracije – poznato je da postoji jaka korelacija između koeficijenta filtracije izdani i vrednosti neto infiltracije. Ovome doprinosi i činjenica da je simulacija urađena u nestacionarnim uslovima.

I pored toga što se rezultati modela mogu smatrati veoma pouzdanim, dodatna analiza, analiza neodređenosti modela tj. dobijenih parametara bi znatno poboljšala kvalitet prognoze i ocene količine voda koje se mogu crpeti. Ovo je veoma bitno jer je izdan relativno male debljine.



Slika 8. Rezultati analize neodređenosti korišćenjem inverznog modela WinPest

Tokom rada u kanadskoj kompaniji Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2000. godine, testirao sam program za inverzno modeliranje, WinPest, a kao primer uzeo sam model koji je opisan u ovom tekstu. Sa smanjenim brojem zona koeficijenta filtracije, a istim brojem pijezometara, vršio sam upredjivanje različitih varijanti koje su praktično imale isti nivo istariranosti ali različite vrednosti koeficijenta filtracije. Kao što se vidi na slici br. 8 parametri tariranja modela su bili normalizovani koren sume kvadrata svih odstupanja (NRMS - Normalised Root Mean Squared Residual) i absolutna vrednost odstupanja (MA - Mean Absolute). Vrednosti koeficijenta filtracije na slici 8 su dati kao $\times 10^{-3}$ m/s. Ako se uporede slučajevi 1, 3 i 4, koje imaju praktično isti nivo istariranosti, vrednosti koeficijenta filtracije su različiti i do 30 % u zoni izvorišta što u ovom slučaju može da znači ima ili nema izvorišta sa projektovanim kapacitetom. Ovakava analiza neodređenosti, samo detaljnija, znatno bi doprinela kvalitetetu prognoze i pouzdanosti rezultata i preporuka je da se ovo analiza uradi. Programski paket WinPest omogućuje ovu kompleksnu analizu koja praktično do pojave brzih kompjutera, zadnjih dve - tri godine godina, nije mogla da se uradi.

Literatura:

- Saopštenje Instituta Jaroslav Černi br.39, 1967.
- Scheidegger E. Adrian, The physics of flow through porous media, Third edition, University of Toronto Press, 352 p., Toronto, 1972.
- Vrba, J./Romijn, E. Impact of Agricultural Activities on Ground Water. 332 strana. International Contributions to Hydrogeology. 1986.
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W., A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 p. (1988)
- Meyer, P.D., Valocchi, A.J., Ashby, S.F. A numerical investigation of the conjugate gradient method as applied to three-dimensional groundwater flow problems in randomly heterogeneous porous media: Water Resources Research, v. 25, no. 6, p. 1440-1446. (1989)
- Idejni projekt Miloševac – Hidrogeološki deo sa matematičkim modelom, Geozavod, 1994.
- Idejni projekat PPV "Trnovče" - Velika Plana, knjiga II: Hidrogeološki deo sa matematičkim modelom. 1997. god., "Energoprojekt" - Beograd,
- Isakovic Dj., Kaludjerovic D., Contaminant transport model - Vrbas groundwater source, International Conference - Groundwater as Water Supply Resource, held in Belgrade, Yugoslavia, 1997.
- Kaludjerovic D., Simulation of nitrate movements in variable saturated porous medium, Water Economy, Yugoslav Society for Dewatering and Irrigation, Belgrade, Yugoslavia, 1998.

- Kaludjerovic D., Groundwater Flow and Contaminant Transport Model – Example of Velika Plana Groundwater Source, MODFLOW98 Conference, Denver, USA, 1998
- Komatina S., Kaludjerovic D., Some comments on common groundwater modeling codes, 13. Geological Congress, Herceg Novi, Montenegro, Yugoslavia, 1999.
- Kaludjerovic D., Mathematical modeling using Modflow, 12. Yugoslavian Symposium on Hydrogeology and Engineer Geology, Subotica, Yugoslavia, 1999.
- Visual MODFLOW v.3.0 User's Manual, Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2001.
- WinPest User's Manual, Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2001.