

## **PRILOG KALIBRACIJI I OCENI PARAMETARA MATEMATIČKIH MODELA PODZEMNIH VODA - POREĐENJE MANUELNE, AUTOMATSKE I "PILOT POINT" METODE SA REGULARIZACIJOM**

Dr Dragan KALUĐEROVIĆ, dipl.ing.hidrogeologije  
nezavisni konsultant  
email: advancedgw@gmail.com  
web strana: www.advancedgw.com

### **REZIME**

Jedna od najkomplikovanih faza u modeliranju kretanja podzemnih voda je faza kalibracije. Ispitivanje raznih varijanti i konceptualnih modela sa promenama velikog broja parametara je iscrpljivala modelara što je kao rezultat imalo da modelar veoma često nije bio u mogućnosti da u potpunosti sagleda hidrogeološki sistem kroz koji struji podzemna voda. Nakon obično dugotrajnog rada na kalibraciji davana je samo jedna varijanta hidrogeološkog sistema i zaboravljalo se na nejednoznačnost dobijenog rešenja i njegovog uticaja na prognozne rezultate.

Sistem koji je i danas često u upotrebi prilikom kalibracije modela je sistem "pokušaja i grešaka" i on se praktično koristi od početka numeričkog modeliranja krajem 60ih godina. Mora se napomenuti da tadašnji računari nisu dozvoljavali formiranje komplikovanih konceptualnih modela kao i kalibraciju većeg broja parametara. Krajem 90ih godina, u praksu se uvodi automatska kalibracija i to najviše zahvaljujući programu PEST. Postupak prilikom automatske kalibracije modela je bio da se model izdela na zone sa jednakim vrednostima parametara, da se startuje model PEST, koji preuzima kontrolu na programom (najčešće MODFLOW) i koji uradi automatsko podešavanje računskih i merenih vrednosti. Ukoliko rezultat nije zadovoljavajući dodaje se još nekoliko zona i postupak se ponavlja sve dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje merenih i računskih podataka. I pored toga što je automatska kalibracija brža od metode "pokušaja i grešaka" i dalje je veoma zahtevna i spora. Pored toga, praktično je nemoguće da se odredi da položaj zona odgovara heterogenostima sistema već se zone dodaju uglavnom na osnovu intuicije.

Trenutno je u programu PEST implementirana nova metoda, "pilot point" metoda sa regularizacijom koja bi trebalo da nadomesti sve nedostatke prethodnih metoda kalibracije. Tehnika ove nove metode kalibracije je da se u modelu postavi više "pilot" tačaka kojim je dodeljena početna vrednost koeficijenta filtracije i da se onda startuje nova opcija u programu PEST koja određuje vrednosti tih parametara u "pilot" tačkama na osnovu merenih vrednosti nivoa podzemnih voda npr. Nakon toga, interpolacijom između pilot tačaka se dodeljuje vrednost koeficijenta filtracije ostalim poljima u modelu. Na ovaj način se određuje i oblik zona hidrauličkih parametara. Ovaj postupak znatno skraćuje vreme potrebno za kalibraciju modela. Sa upotrebom brzih kompjutera koji su nam dostupni danas model može da se startuje i nekoliko stotina puta pre nego što se postigne zadovoljavajuće poklapanje merenih i računskih vrednosti.

Ove tri metode kalibracije, metoda "pokušaja i grešaka", metoda automatske kalibracije i "pilot point" metoda sa regularizacijom biće primenjeni na model aluviuma kod sela Trnovče koji je rađen u cilju određivanja kapaciteta projektovanog izvorišta. Ove tri metode biće analizirane i međusobno upoređene.

Ključne reči: MODFLOW, Groundwater Vistas, PEST, aluvion, reka Velika Morava

### **1. 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. 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.

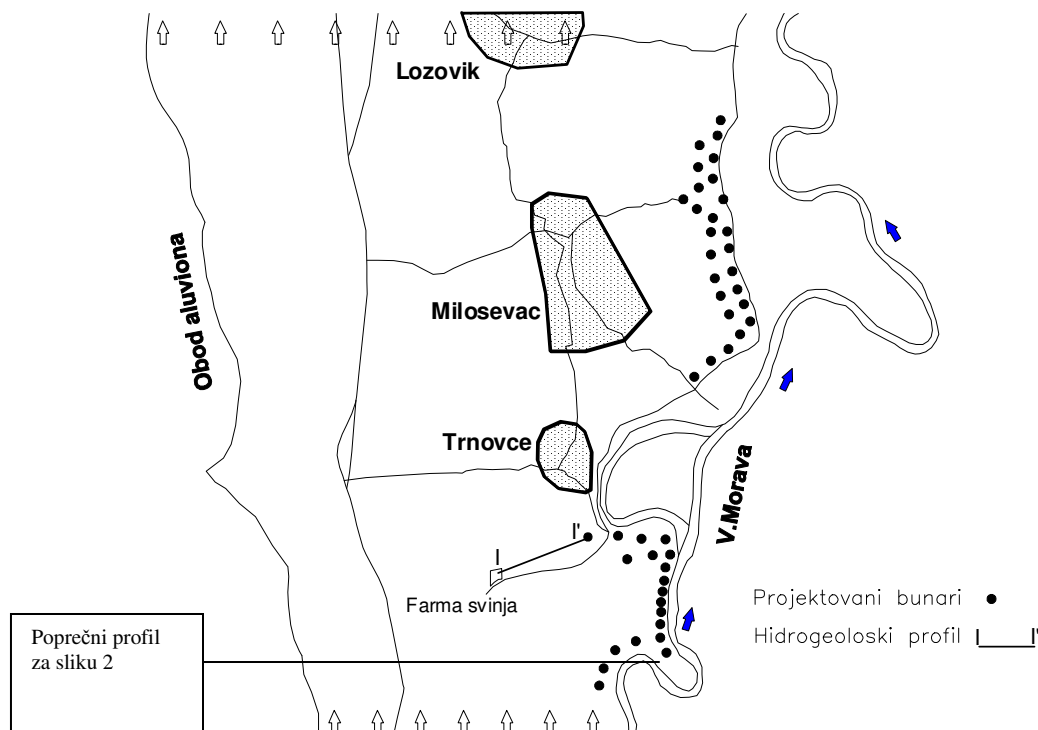
## 2. HIDROGEOLOGIJA ALUVIONA REKE VELIKE MORAVE NA ISTRAŽNOM PODRUČJU

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

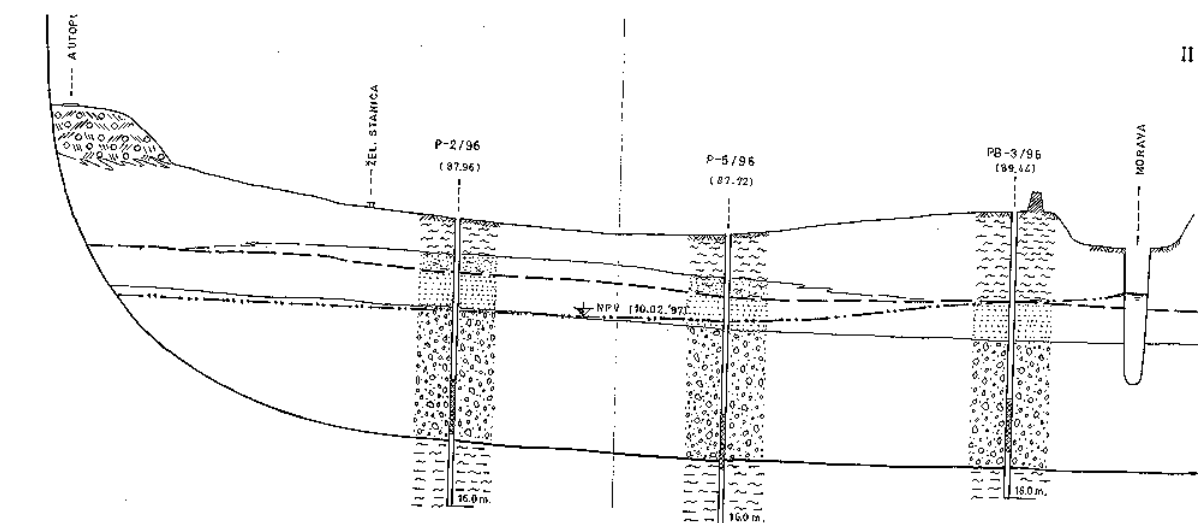
aluvijalna izdan čija debljina varira u granicama od 7-12 metara. Izdan se odlikuje relativno visokim vrednostima koeficijenta filtracije,  $0.8-5 \times 10^{-3}$  m/s, koje su određene kako iz brojnih opita crpenja tako i na osnovu granulometrijskih analiza. Podinu peskovito-šljunkovitim sedimentima čine vodonepropusne laporovite gline pleistocenske starosti.

Za potrebe izrade matematičkog modela, u periodu od Januara-Jula 1997.god., nivo podzemne vode je osmatran na oko 50 pijezometara svakih 10 dana. Kvalitativna analiza nivoa podzemne vode ukazuje da pijezometri (svi su izbušeni u osnovnom sloju) prate oscilacije Velike Morave sa amplitudama koje zavise od udaljenosti od reke. Pijezometri u središnjem delu aluvijona i bliže njegovom obodu pokazuju relativno ujednačen nivo, tj. uticaj reke Velike Morave je veoma mali. Takođe, na režim izdani značajan uticaj ima vertikalni bilans, infiltracija od padavina i manjim delom evapotranspiracija.

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.



Slika 1. Pregledna karta istražnog područja



Slika 2. Karakteristični hidrogeološki profil

Hemizam podzemnih voda u području izvorišta karakteriše uglavnom visok sadržaj gvožđa i mangana kao i povišen sadržaj amonijaka. Utrošak kalijum permanganata je također povišen kao i prisustvo nekih bakterija, što ukazuje na prisustvo organskih zagađenja. Kvalitet vode reke 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 je poslužio i kao osnova za izradu modela transporta zagađenja koji će uključiti i transport zagađenja u vadoznoj zoni (Kaluderović, 1998).

### 3. 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 km<sup>2</sup>. 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. Na početku simulacije usvojena je uniformna vrednost koeficijenta filtracije za ceo model od  $2.5 \times 10^{-3}$  m/s.

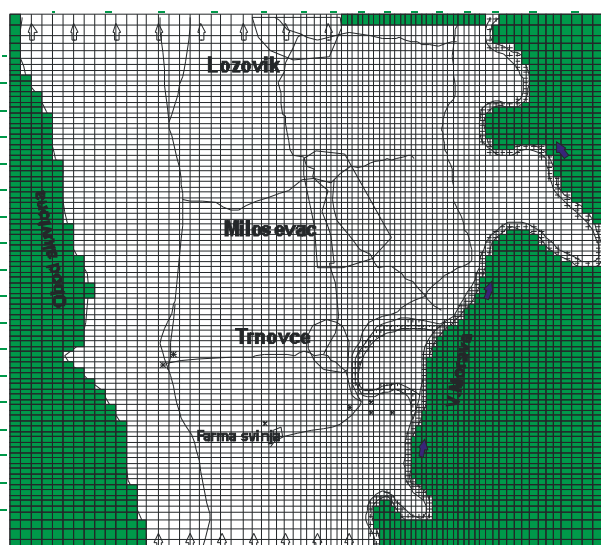
### 4. TARIRANJE MODELA - MANUELNI METOD "POKUŠAJA I GREŠAKA"

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 (oticaj) iz modela na granicama. Zbog malih padavina 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 a za pijezometre u središnjem i obodnom delu aluviona je ispod 10 cm - u obodnom delu aluviona oscilacije podzemne vode su znatno manje nego pored reke. Dobijene zone koeficijenta filtracije za ovako istarirano stanje date su na slici 4.

Ono što je značajno napomenuti za ovaj metod tariranja je da je tariranje bilo veoma teško, usled heterogenosti sredine i da je trajalo veoma dugo, oko mesec dana. Takođe, mora se voditi računa da je to bilo 1997. godine i da tada automatsko tariranje nije bilo u široj upotrebi pa je tariranje moralo da se radi metodom "pokušaja i greške".



■ Zona u kojoj nema strujanja podzemne vode

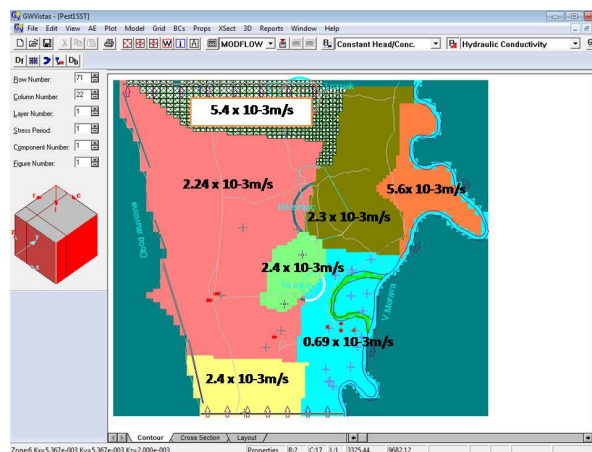
Slika 3. Pregledna mapa modela sa diskretizacijom i graničnim uslovima

## 5. TARIRANJE MODELA - AUTOMATSKO TARIRANJE SA PROGRAMOM PEST

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.

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.

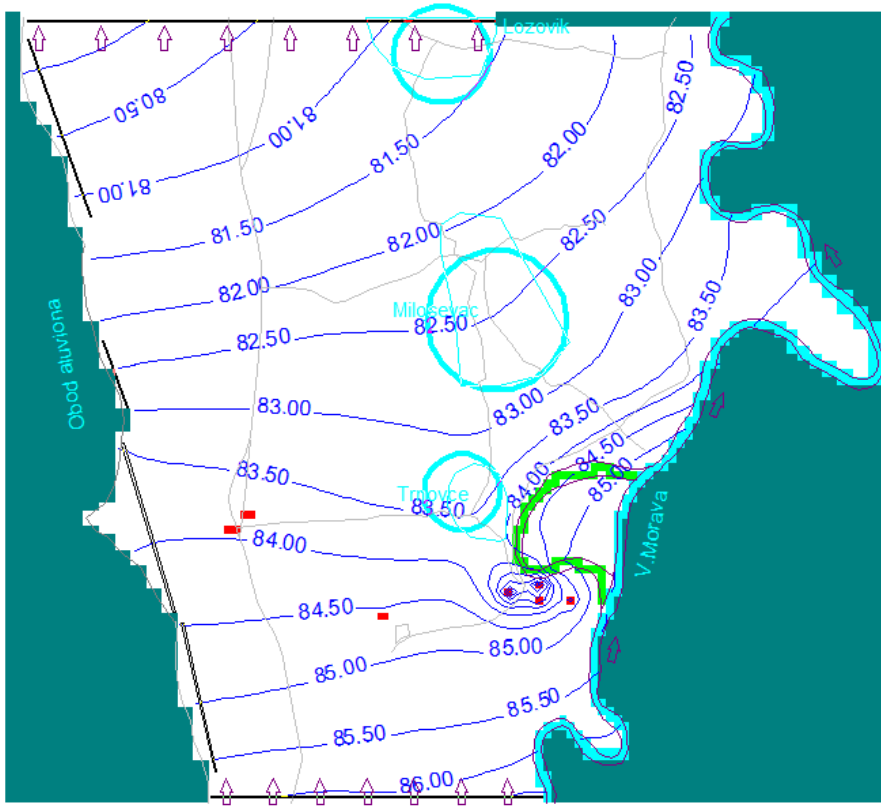
Sa smanjenim brojem zona koeficijenta filtracije, a istim brojem pijezometara, radio sam upoređivanje različitih varijanti koje su praktično imale isti nivo istariranosti ali različite vrednosti koeficijenta filtracije u zonama.



Slika 4. Raspored koeficijenta filtracije dobijenih u postupku manualnog tariranja

Izolinije nivoa podzemne vode date su na Slici 5. Kao što se vidi na slici br. 6 ciljevi 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 6 su dati kao  $\times 10^{-3}$  m/s. Ako se uporede slučajevi 1, 3 i 4, (slika 6) 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 kvalitetu 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 par godina, nije mogla da se uradi.

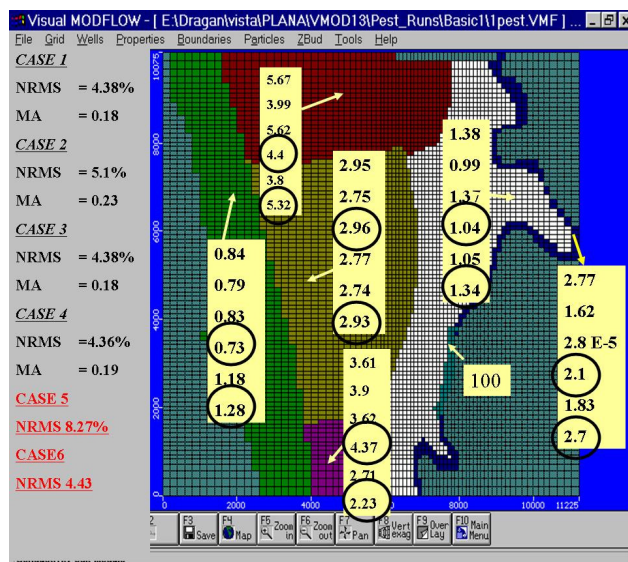
Trajanje automatske kalibracije sa WinPestom je bilo znatno kraće od manualne metode "pokušaja i grešaka" ali je ipak trajalo nekoliko dana. Jedan od problema prilikom ove vrste tariranja je podešavanje oblika i broja zona sa istim koeficijentima filtracije do kojih se došlo eksperimentalnim putem. Naravno, oblik zona filtracije nema svoju prirodnu osnovu već je zadat proizvoljno, što je i jedna od glavnih mana ove metode.



Slika 5. Izolinije nivoa podzemne vode

**6. TARIRANJE MODELA - TARIRANJE METODOM PILOT POINT SA REGULARIZACIJOM, OPCIJA IMPLEMENTIRANA U PROGRAM GROUNDWATER VISTAS, VER.6**

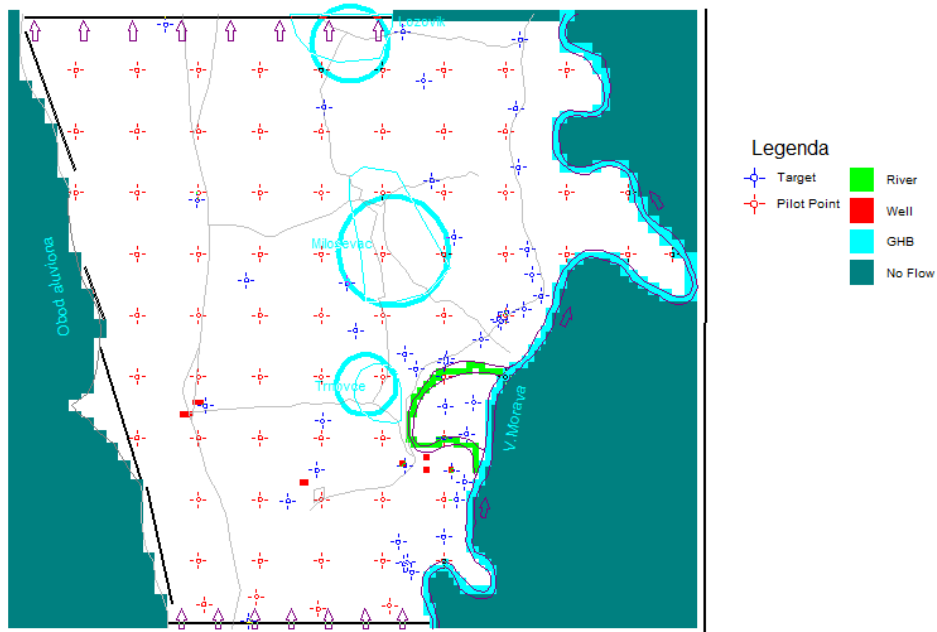
Trenutno je u programu PEST implementirana nova metoda, "pilot point" metoda sa regularizacijom koja bi trebalo da nadomesti sve nedostatke prethodnih metoda kalibracije. Tehnika ove nove metode kalibracije je da se u modelu postavi više "pilot" tačaka (slika 7) kojima je dodeljena početna vrednost koeficijenta filtracije i da se onda startuje nova opcija u programu PEST koja određuje vrednosti tih parametara u "pilot" tačkama na osnovu merenih vrednosti nivoa podzemnih voda. Nakon toga, interpolacijom između pilot tačaka se dodeljuje vrednost koeficijenta filtracije ostalim poljima u modelu. Na ovaj način se određuje i oblik zona hidrauličkih parametara. Ovaj postupak znatno skraćuje vreme potrebno za kalibraciju modela. Sa upotrebom brzih kompjutera koji su nam dostupni danas, model može da se startuje i nekoliko stotina puta pre nego što se postigne zadovoljavajuće poklapanje merenih i računskih vrednosti.



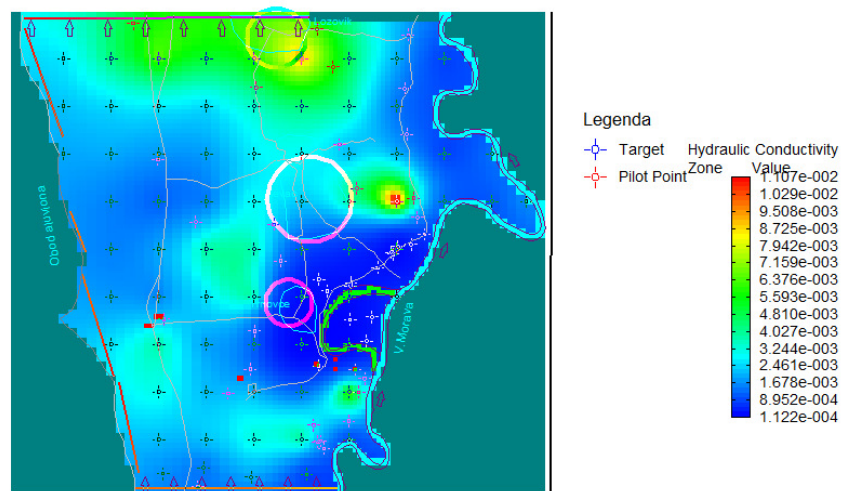
Slika 6. Rezultati analize neodređenosti korišćenjem inverznog modela WinPest

Na slici 7 dat je raspored pilot point tačaka a na slici 8 je data raspodela koeficijenta filtracije u prostoru dobijenih ovom metodom. Ono što zaista impresionira

je da je za kompletnu simulaciju trebalo samo 20 minuta. Ovo je drastična razlika u odnosu na manualni metod "pokušaja i grešaka".



Slika 7. Raspored pilot point tačaka u modelu



Slika 8. Raspored zona koeficijenta filtracije dobijene metodom pilot point sa regularizacijom

## 7. ZAKLJUČAK

Sa razvitkom kompjutera i programa za kalibraciju, kao što je Pest, moguće je uraditi mnogo više za kraći vremenski period. U ovom konkretnom slučaju manualna metoda tariranja je zahtevala mnogo truda i vremena tako da nije bilo praktično moguće uraditi bilo koji oblik analize neodređenost. Sa automatskom kalibracijom u kojoj je jedini manualni deo određivanje oblika zona koeficijenta filtracije, postalo je moguće veoma brzo uraditi nekoliko varijanti sa različitim vrednostima koeficijenta filtracije, držeći istariran model, i na taj način uraditi analizu neodređenosti sistema. Ovaj način se još i zove "rapid fire recalibration" kada se testira nekoliko modela i brzim programima za automatsku kalibraciju istariraju na željeni nivo. Na ovaj način se mogu testirati ne samo zone koeficijenta filtracije već i različiti konceptualni modeli.

Vrhunac u tariranju predstavlja metoda pilot point sa regularizacijom koja daje ne samo vrednosti koeficijenta filtracije već i oblik zona, čime znatno skraćuje vreme tariranja. U program Groundwater Vistas ver.6 ugrađena je i metoda Null Space Monte Carlo metoda koja daje i neodređenost modela.

Ono što mora da se napomene je da je i za automatsku kalibraciju i za metodu pilot point sa regularizacijom potrebno držati kratko vreme izvršavanja modela jer je pogotovo za metodu pilot point sa regularizacijom

potrebno i po nekoliko stotina puta izvršavati program. Na slici 7 vidi se veliki broj pilot point tačaka koje svaka za sebe predstavlja jedan parametar za koji je potrebno izvršiti barem jednu simulaciju u zavisnosti kako se inverzni model, Pest, približava rešenju.

## LITERATURA

- [1] Environmental Simulation inc, 2012: Groundwater Vistas 6, USA
- [2] Grupa autora, Geozavod, 1994: Idejni projekt Miloševac – Hidrogeološki deo sa matematičkim modelom, Beograd.
- [3] Kaluđerovic D., 1998: Simulation of nitrate movements in variable saturated porous medium, Water Economy, Yugoslav Society for Dewatering and Irrigation, Belgrade
- [4] Kaluđerovic D., 1998: Groundwater Flow and Contaminant Transport Model – Example of Velika Plana Groundwater Source, MODFLOW98 Conference, Denver, USA
- [5] Kaluđerović D., 2008: Prirodno prečišćavanje izdani, Rudarsko Geoloski Fakultet, Doktorska disertacija, Beograd
- [6] Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2001: Visual MODFLOW v.3.0 User's Manual, Waterloo
- [7] Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2001: WinPest User's Manual, Waterloo

## CONTRIBUTION TO CALIBRATION AND PARAMETER ESTIMATION OF GROUNDWATER MATHEMATICAL MODELS - COMPARISON OF MANUAL, AUTOMATIC AND "PILOT POINT" METHOD WITH REGULARIZATION

Dr Dragan KALUĐEROVIĆ, senior hydrogeologist  
independent consultant  
email: advancedgwt@gmail.com  
web site: www.advancedgwt.com

### Summary

One of the most complicated phases in groundwater modeling process is phase of its calibration. Examining different variants and conceptual models with changes of number of parameters can exhaust modelers which as result has consequence that groundwater modeler was not in possibility to fully understand the hydrogeological system and its dynamics. Usually after long work on calibration only one variant of hydrogeological system and its parameter distribution was given not considering non uniqueness of solution and its influence on prediction.

First approach to groundwater calibration, which is still often use today, is "trail and error" approach and it was in use from the beginning of numerical modeling since the end of 60s. At the end of 90s, mostly due to appearance of program PEST, automatic calibration was started to be used more often. The procedure of automatic calibration was that the model was subdivided on zones of constant hydraulic conductivities ex., then the PEST was started, which would then take the control of the program (MODFLOW most often) and let the PEST to achieve good calibration of measured and computed ground water levels ex. If the result was not satisfactory more zones were added until the good fit was not achieved. Although automatic calibration was much faster than "trail and error" method it is still demanding and laborious.

At this moment, new method of calibration is implemented in PEST - pilot point method with regularization. This method should overcome some of the difficulties of previous two methods. This new techniques is working on such way that number of pilot points with assigned values of hydraulic conductivities is assigned to model, then PEST is run and based on matching the measured and observed values of groundwater level, calibrated parameters are assigned to pilot points. After that, hydraulic conductivities between pilot points are interpolated and assigned to other cells in the model. Although the model could be run for several hundred times to finish calibration, if the running time of the model is not high the whole process can be shorter than other two methods. Moreover, the shape of hydraulic conductivity zones is given by pilot point method.

These three methods of calibration, method of "trail and error", automatic calibration and pilot point with regularization will be applied on groundwater model of alluvium near the village Trnovce in the Serbia. The purpose of the model is to determine the capacity of new groundwater source and the mentioned different methods of calibration will be compared and analyzed.

Key words: MODFLOW, Groundwater Vistas, PEST, alluvion, river Velika Morava

Redigovano 22.08.2012.