

# Одређивање просторне дистрибуције вредности хидрауличких параметара издани: primer површинског копа „Radljevo“

Dragoljub Bajić, Dušan Polomčić, Jelena Ratković, Predrag Pajić



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Одређивање просторне дистрибуције вредности хидрауличких параметара издани: primer површинског копа „Radljevo“ | Dragoljub Bajić, Dušan Polomčić, Jelena Ratković, Predrag Pajić | 9. Међународни симпозијум о управљању подземним ресурсима, Зaječар 2019. | 2019 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007273>

# ODREĐIVANJE PROSTORNE DISTRIBUCIJE VREDNOSTI HIDRAULIČKIH PARAMETARA IZDANI: PRIMER POVRŠINSKOG KOPA “RADLJEVO”

## DETERMINATION OF SPATIAL DISTRIBUTION VALUES OF HYDRAULIC PARAMETERS OF AQUIFERS: CASE STUDY OF THE OPEN-CAST MINE “RADLJEVO”

Dragoljub Bajić <sup>1</sup>  
Dušan Polomčić <sup>2</sup>  
Jelena Ratković <sup>3</sup>  
Predrag Pajić <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs

<sup>2</sup>Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, dusan.polomcic@rgf.bg.ac.rs

<sup>3</sup>Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, jelena.ratkovic@rgf.bg.ac.rs

<sup>4</sup>Institut za Vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, Beograd, predrag.pajic@jcerni.co.rs

### REZIME

Najčešće se kalibracija hidrodinamičkih modela vršila manuelno - „probanjem“ sa različitim vrednostima hidrauličkih parametara i hidrauličkih karakteristika graničnih uslova. Ovakav način rada zahteva veliko znanje i iskustvo eksperta, pri čemu ostaje otvoreno pitanje da li dobijeno rešenje ima optimalan skup parametara. Primenom optimizacione metode, koja se zasniva na Gauss-Marquardt-Levenberg-ovom algoritmu, i PEST softvera, uvodi se automatska kalibracija modela sa regularizacijom, kojom se znatno smanjuje subjektivni uticaj eksperta na rezultat. Primenom pomenute metodologije, određene su prostorne distribucije horizontalne ( $K_x=K_y$ ) i vertikalne ( $K_z$ ) komponente koeficijenata filtracije na površinskom kopu „Radljevo“.

### KLJUČNE REČI

kalibracija hidrodinamičkog modela, PEST, koeficijent filtracije

### ABSTRACT

Hydrodynamic models have usually been calibrated manually, by trial-and-error, with different values of hydraulic parameters and hydraulic characteristics of boundary conditions. This method of calibration and estimation of hydraulic parameters requires extensive knowledge and experience of experts, but whether the resulting solution includes an optimal set of parameters still remains an open question. An optimization method founded upon the Gauss-Marquardt-Levenberg algorithm along with PEST software introduces automation of model calibration with regularization, which substantially reduces the effect of expert judgment on the result. Applying the proposed method, the spatial distributions of the horizontal ( $K_x=K_y$ ) and vertical ( $K_z$ ) components of hydraulic conductivity are determined in the open-cast mine “Radljevo”.

### KEYWORDS

calibration of the hydrodynamic model, PEST, hydraulic conductivity

## 1. UVOD

Određivanje prostorne distribucije vrednosti određenih hidrauličkih parametara, u hidrogeološkoj praksi, najčešće se vrši tokom kalibracije hidrodinamičkog modela. Kalibracija hidrodinamičkog modela predstavlja najdelikatniji proces tokom izrade modela, koji podrazumeva usklađivanje rezultata simulacije strujanja podzemnih voda sa podacima registrovanim u prirodi (pijezometrijski nivo i elementi bilansa podzemnih voda).

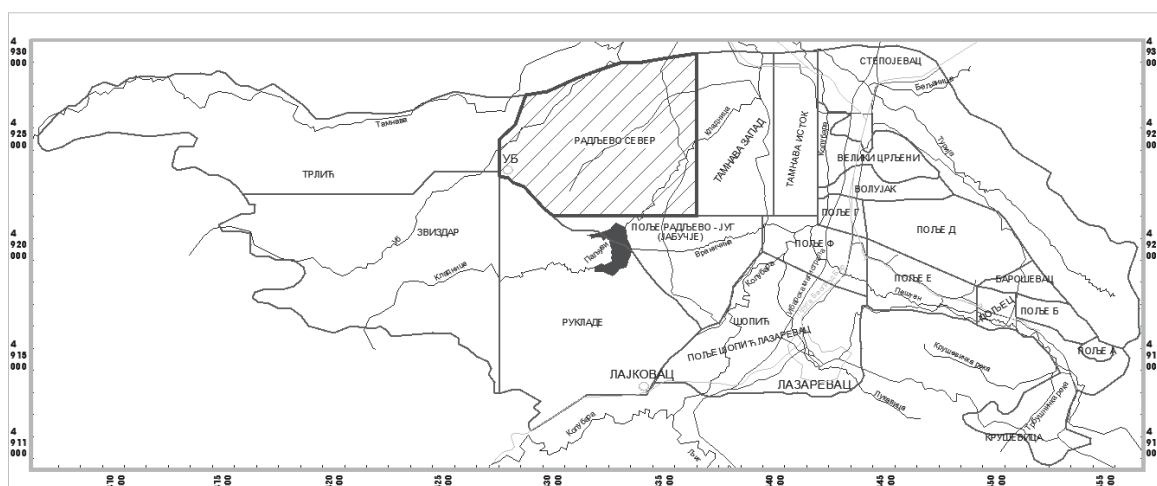
Ranijih godina bio je znatno zastupljeniji proces manuelne kalibracije, koji se zasniva na nizu probanja sa različitim kombinacijama vrednosti parametara modela u procesu usaglašavanja proračunatih vrednosti parametara modela sa onim registrovanim u prirodi. Ovakav pristup kalibracije hidrodinamičkih modela podrazumeva veliko iskustvo i znanje eksperta, pri čemu konačno rešenje ima jasno prisutnu subjektivnu notu autora (Polomčić et al., 2014).

U skorije vreme, u širu upotrebu ulazi automatska kalibracija modela koja podrazumeva upotrebu namenskih softvera. Primenom ove metode, optimizuju se vrednosti izabranih parametara hidrogeološkog sistema: koeficijenta filtracije, specifične izdašnosti izdani, specifičnog uskladištenja, a takođe vrši se i optimizacija vrednosti graničnih uslova - intenzitet infiltracije i evapotranspiracije, proticaji ili pižeometrijski nivoi itd. Optimizaciona metoda se zasniva na Gauss-Marquardt-Levenberg-ovom algoritmu pronalazača minimuma sume kvadrata reziduala - razlika između merenih podataka i rezultata simulacije iz modela (Nocedal & Wright, 2006).

U svetu se kao standard za automatsku kalibraciju modela sa regularizacijom koristi softver PEST (Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis) (Doherty, 2010; Doherty, 2013). Ovo je najnapredniji programski paket za optimizaciju parametara bilo kojeg simulacionog modela i analizu neizvesnosti prognoznih proračuna (Doherty & Hunt, 2010). PEST je pronašao veliku primenu u oblasti geonauke (Doherty et al., 2011; Tonkin & Doherty, 2005; Bahremand & De Smedt, 2010).

Najkompleksniji slučaj hidrodinamičkog modeliranja režima izdani jesu rudnici. Kompleksnost problematike ovakvih područja ogleda se u njihovoj dinamičnosti, odnosno, u kontinuiranim promenama strujne oblasti modela koje su vidne u stalnom širenju rudnika. U ovom radu, optimizacione metode za procenu hidrauličkih parametara kod hidrodinamičkog modeliranja su primenjene na površinskom kopu u Srbiji - ležištu lignita „Radljevo“. Kompleksna analiza urađena je za procenu vrednosti koeficijenta filtracije (K).

Površinski kop „Radljevo“ pripada kolubarskom ugljunosnom basenu (slika 1). Ležište „Radljevo“ je podeljeno na dva dela: „Radljevo-sever“ i „Radljevo-jug“. Nalazi se u zapadnom delu kolubarskog ugljunosnog basena. Severna granica ležišta je prirodna i predstavlja granicu isklinjena ugljene serije. Ostale granice su veštačke: na zapadu se graniči sa ležištima Trlič i Zvizdar, na jugu sa ležištem Ruklade, a na istoku sa ležištem Tamnava-Zapadno polje.



Slika 1. Položaj površinskog kopa „Radljevo“ u odnosu na kolubarski ugljunosni basen

## 2. METODOLOGIJA

Optimizaciona metoda koja je primenjena u radu za određivanje prostorne distribucije koeficijenata filtracije prilikom kalibracije hidrodinamičkog modela je Gauss-Marquardt-Levenberg-ov algoritam (Nocedal & Wright, 2006). Za proračune je korišćen program PEST, koji se zasniva na pomenutom algoritmu.

Primenom PEST programa postoji i mogućnost uvođenja kontrolnih tačaka - "pilot points" (Doherty, 2010; Doherty, 2013; Doherty & Hunt, 2010; Doherty et al., 2011). Te kontrolne tačke ne označavaju nužno fiktivne tačke, mada su znatno ređe u pitanju tačke u kojima su neki parametri koji se određuju poznati. Svaka kontrolna tačka predstavlja parametar čija vrednost treba da se odredi. Koncept mernih tačaka se ne ograničava samo na vrednosti koeficijenta filtracije već na sve vrste parametara koji se određuju tokom etaloniranja modela.

Postoji više načina zadavanja kontrolnih tačaka na modelu: preko regularne mreže i preko triangulacije (Doherty, 2010). Sam proces primene kontrolnih tačaka u PEST-u naziva se regularizacija, odnosno regulisanje distribucije određenih parametara i/ili vrednosti graničnih uslova. Rezultat ovakvog pristupa u PEST kalibraciji daje rezultat koji uključuje heterogenost sredine (strujne oblasti) po pitanju distribucije parametara sredine koji su određivani (u ovom slučaju koeficijent filtracije).

## 3. PRIKAZ REZULTATA I DISKUSIJA

Trodimenzionalni hidrodinamički model ležišta lignita „Radljevo“, baziran na metodi konačnih razlika, izrađen je korišćenjem koda MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) sa grafičkim korisničkim interfejsom Groundwater Vistas Advanced verzija 64-Bit 6.74 b.24 (Rumbaugh & Rumbaugh, 2011). Koncipiran je i izrađen kao višeslojeviti model, sa ukupno sedam slojeva (tabela 1). Svaki od ovih slojeva odgovara određenom realnom sloju, šematizovanom na osnovu rezultata sprovedenih analiza terenskih istražnih radova. Unos inicijalnih vrednosti koeficijenata filtracije izvršen je na osnovu rezultata namenskih terenskih hidrogeoloških istraživanja za sve litološke članove.

Osnovne dimenzije matrice kojom je obuhvaćen izučavani teren su 6,2 km x 8 km, odnosno 49,6 km<sup>2</sup>. Diskretizacija strujnog polja u planu izvedena je sa osnovnom veličinom ćelija 100 m x 100 m, koja je u delovima od većeg interesa poguščena mrežom kvadrata dimenzija 25 m x 25 m. Teren obuhvaćen modelom je izdeljen mrežom kvadrata i pravougaonika dimenzija 171 reda x 131 kolone. Prostor obuhvaćen modelom sastoji se od 156.807 aktivnih ćelija. Ovi detalji su prikazani na slici 2.

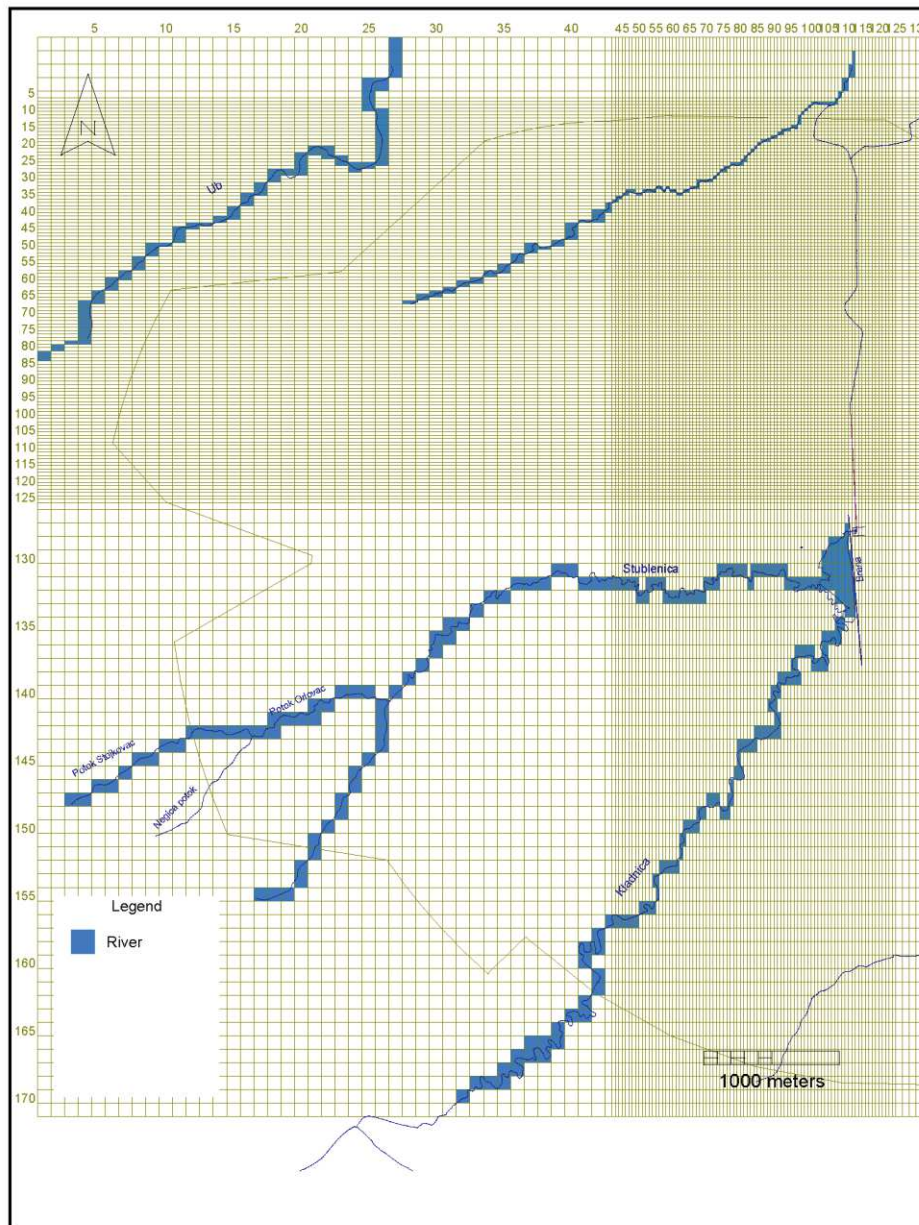
**Tabela 1.** Šematizacija strujne oblasti - prikaz litoloških članova u modelskim slojevima

Modelski sloj	Litološki članovi
prvi izolatorski sloj	glinoviti i alevritični povlatni sedimenti
drugi vodonosni sloj	peskovi i šljunkovi krovinske izdani, koji delimično na severu i jugu prelaze u glinovite sedimente
treći izolatorski sloj	peskovite gline i alevriti
četvrti izolatorski sloj	ugljevi sa proslojcima gline
peti vodonosni sloj	međuslojni peskovi
šesti izolatorski sloj	ugljevi sa proslojcima gline
sedmi vodonosni sloj	podinski peskovi

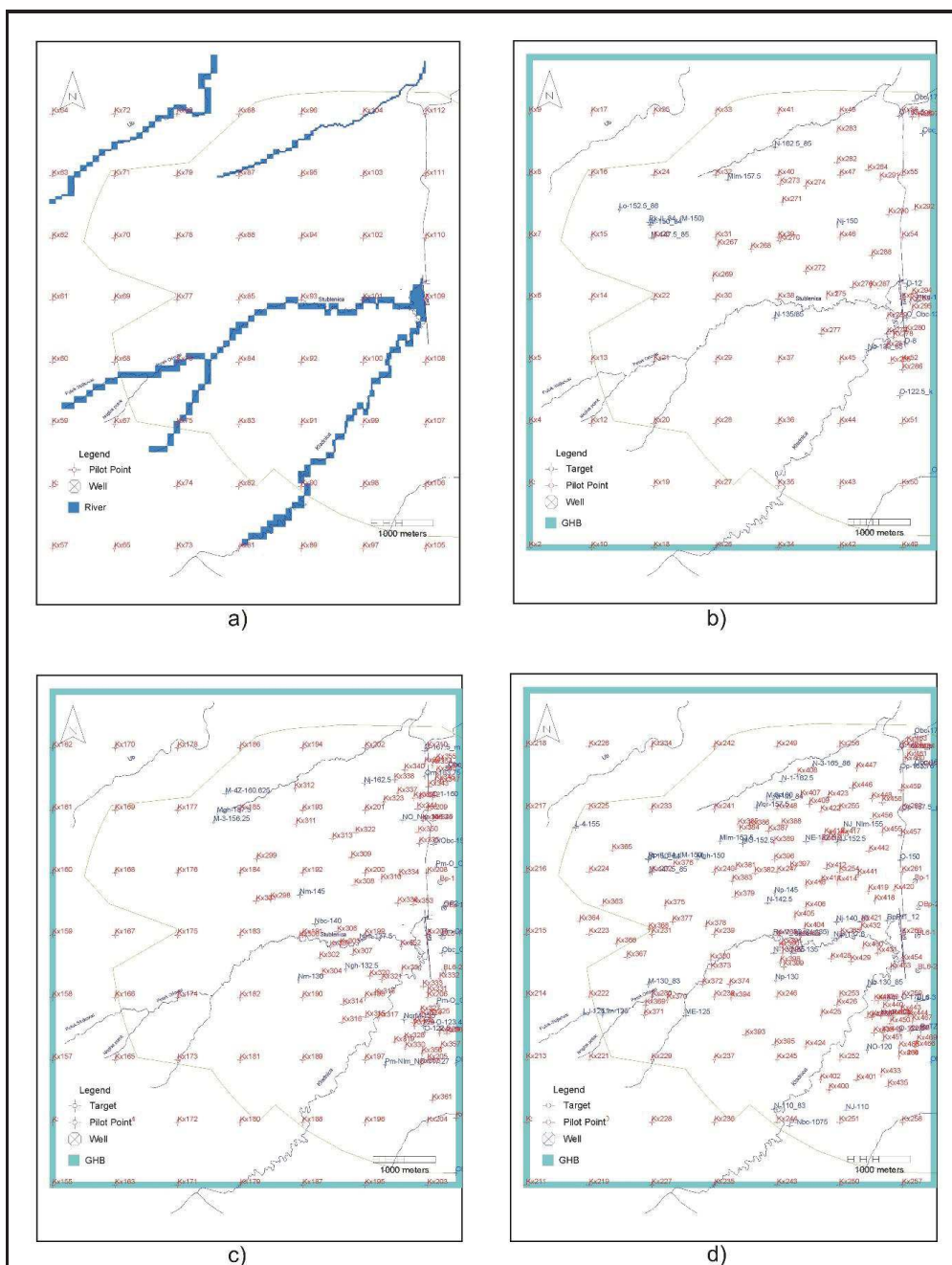
Kalibracija modela rađena je manuelno i automatski uz pomoć programa PEST sa opcijom regularizacije. Ovakav način kalibracije hidrodinamičkog modela podrazumeva zadavanje kontrolnih tačaka koje omogućavaju zadavanje heterogenih zona sa vrednostima hidrauličkih parametara sredine.

Na Slici 3. prikazani su modelski slojevi u kojima su zadate kontrolne tačke za horizontalnu komponentu koeficijenta filtracije ( $K_x$ ). U četvrtom i šestom modelskom sloju, koji su predstavljeni samo ugljenim slojem, kontrolne tačke nisu zadate. Kontrolnim tačkama određene su prostorne distribucije horizontalne ( $K_x=K_y$ ) i vertikalne ( $K_z$ ) komponente koeficijenata filtracije. Ukupno je zadato 469 kontrolnih tačaka sa

horizontalnom komponentom i 266 kontrolnih tačaka sa vertikalnom komponentom koeficijenta filtracije. Način zadavanja kontrolnih tačaka zavisio je od hidrogeološkog značaja pojedinih sedimenata i broja i rasporeda pijezometara u vodonosnim sredinama. Za slabije vodopropusne sedimente zadata je homogena mreža kontrolnih tačaka za svaki izdvojeni litološki član (prvi i treći modelski sloj). S druge strane, za vodonosne sredine u kojima postoje pijezometri, zadate su kontrolne tačke preko tzv. triangulacije između pijezometara, sa dodatnom kontrolnom tačkom u centru svakog trougla koji čine tri susedna pijezometra. Zatim, vršena su pugušćenja u delovima u kojima se ne nalaze kontrolne tačke. Kontrolne tačke kojima se određuju distribucija vrednosti vertikalne komponente koeficijenta filtracije pomerene su u odnosu na horizontalnu komponentu za  $\Delta x = \Delta y = 50$  m.

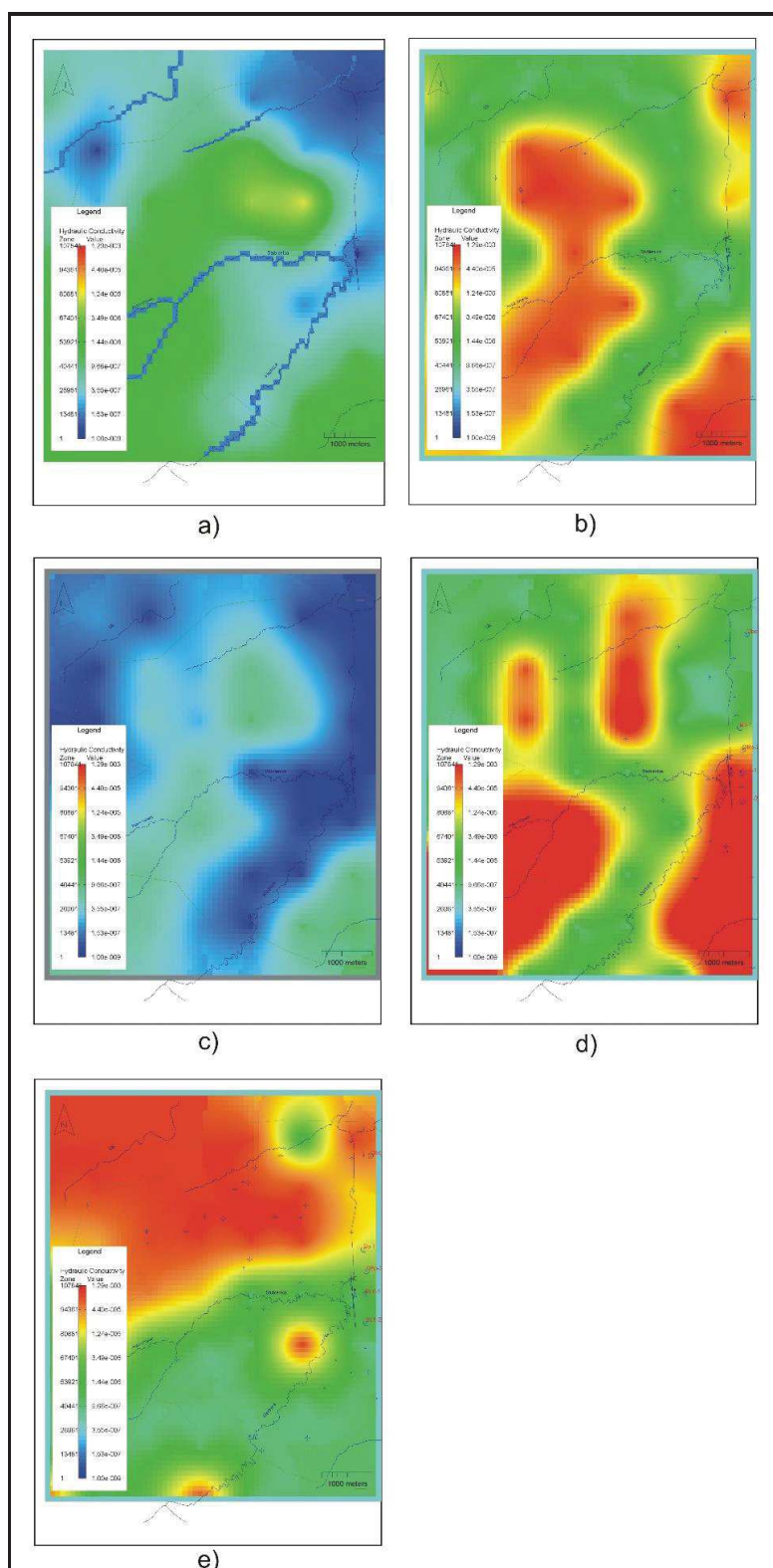


Slika 2. Prikaz izvedene diskretizacije strujnog polja na površinskom kopu „Radljevo“



**Slika 3.** Rasprostranjenje kontrolnih tačaka za horizontalnu komponentu koeficijenta filtracije ( $K_x=K_y$ ) i osmatračkih objekata ("target") na površinskom kopu „Radljevo“: a) prvi modelski sloj, b) drugi modelski sloj, c) peti modelski sloj, d) sedmi modelski sloj

Krajnji rezultat predstavljaju determinisane reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije. Na hidrodinamičkom modelu površinskog kopa „Radljevo“ ukupno je izdvojeno 106.904 zona sa vrednostima horizontalne, odnosno 68.301 zona sa vrednostima vertikalne komponente koeficijenta filtracije. Na Slici 4. prikazane su vrednosti horizontalne komponente koeficijenta filtracije u okviru modelskih slojeva. Rezultati su predstavljeni kao karte rasporeda koeficijenta filtracije, u vidu polja obojenih različitom bojom, u zavisnosti od njegove vrednosti prema prikazanoj skali. Takođe, podaci dobijeni u ovom softveru mogu i da se izvezu u „xls“ formatu i na taj način prikažu tabelarno.



Slika 4. Rasprostranjenje zona sa vrednostima horizontalne komponente koeficijenta filtracije ( $K_x=K_y$ ) na površinskom kopu „Radljevo“: a) prvi modelski sloj, b) drugi modelski sloj, c) treći modelski sloj, d) peti modelski sloj, e) sedmi modelski sloj

## 4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana primena optimizacione metode, zasnovane na Gauss-Marquardt-Levenberg-ovom algoritmu, koja se primenjuje tokom automatske kalibracije hidrodinamičkog modela. Tokom procesa automatske kalibracije sa regularizacijom određena je prostorna distribucija vrednosti koeficijenata filtracije. Primenom ove metode se znatno smanjuje subjektivni uticaj na rezultat. Za optimizaciju parametara tokom procesa automatske kalibracije modela korišćen je program PEST. Uvođenjem koncepta kontrolnih tačaka prevazilazi se zadavanje homogenih zona sa vrednostima parametara sredine ili zona sa zadatim graničnim uslovima. Iako je korišćenje ovakvog koncepta doprinelo do velikog pomaka što se tiče procene hidrauličkih parametara tokom hidrodinamičkog modeliranja, postoje i određeni problemi. Jedan od najvećih problema sa upotrebom kontrolnih tačaka u PEST-u je vreme potrebno za proračune. Svako povećanje broja kontrolnih tačaka koje se unose u model, uslovljava znatno produženje vremenskog perioda koji je potreban za kalibraciju modela. To znači da svaku kontrolnu tačku PEST posmatra kao parametar čija se optimalna vrednost određuje. Treba naglasiti da svaki parametar u PEST-u zahteva jednu ili dve simulacije po iteraciji. Prikazani model ležišta uglja „Radljevo“ sadrži ukupno 735 kontrolnih tačaka, što znači da je potrebno 735 simulacija (ili 1470 ako se primenjuje centralno diferenciranje) samo po jednoj iteraciji. Veći broj iteracija je često potreban za svaki prolaz proračuna tokom kalibracije modela. Ako svaki prolaz proračuna traje nekoliko minuta, onda je potrebno mnogo vremena da se ceo proces završi. Vreme trajanja kalibracije na ovaj način meri se časovima, a nekada i danima. Svakako, postoji rešenje i za ovaj problem, pa se ekspanzivno širi i korišćenje modula koji omogućavaju skraćenje vremena proračuna - “Parallel PEST”, “BeoPEST”, korišćenje tzv. “Cloud Computing”-a i modula “Singular Value Decomposition”.

## ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansiranje projekata OI-176022, TR-33039 i III-43004.

## REFERENCE

- Bahreman A. & De Smedt F. (2010). Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model. *Water Resources Management*, 24(12): 2869-2880
- Doherty J. (2010). PEST - Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition, Watermark Numerical Computing, pp. 1-336
- Doherty J. (2013). Addendum to the PEST Manual, Watermark Numerical Computing, pp. 1-294.
- Doherty E.J., Hunt J.R. (2010). Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration, Scientific Investigations Report 2010–5169, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia
- Doherty E.J., Hunt J.R. & Tonkin M.J. (2011). Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Model-Parameter and Predictive-Uncertainty Analysis. Scientific Investigations Report 2010–5211. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia
- Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C. & McDonald M.G. (2000) MODFLOW-2000: The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, Reston, VA, USA
- Nocedal J. & Wright J.S. (2006). Least-Squares Problems, In *Numerical Optimization*, 2nd Edition. Springer: Berlin, pp. 245-269
- Polomčić D., Bajić D., Ristić-Vakanjac V. & Čokorilo Ilić M. (2014). Automatic calibration of hydrodynamic models using PEST program. *Zapisi Srpskog Geološkog Društva*, pp. 13-27
- Rumbaugh J.O. & Rumbaugh D.B. (2011). Guide to using Groundwater Vistas: version 6. New York: Environmental Simulations
- Tonkin M.J., & Doherty E.J. (2005). A hybrid regularized inversion methodology for highly parameterized environmental models. *Water Resources Research*, DOI: 10.1029/2005WR003995