

## ANALITIČKA OPTIMIZACIONA METODA U MODELIRANJU VODOVODNIH SISTEMA

**APSTRAKT:** Posledica neodređenosti parametara modela vodovodnih sistema je razlika između rezultata simulacije i podataka dobijenih merenjem. Najbolje vrednosti parametara do kojih se može doći na osnovu raspoloživih merenja i zadatih kriterijuma nazivaju se optimalne ili merodavne vrednosti, a postupak kalibracija modela. U ovom radu se, na primeru matematičkog modela vodovoda Bečej, prikazuje postupak optimizacije hrapavosti cevi primenom PEST metode. Takođe, analizira se uticaj izbora mernih mesta u sistemu na rezultat optimizacije i daju se preporuke za buduća istraživanja. Iskustvo je pokazalo da, bez obzira na sve raspoložive alate za automatizaciju procesa, uspešnost kalibracije najviše zavisi od ljudskog faktora. Pravilan izbor optimizacionih parametara, uz razumevanje dobijenih rezultata, je preduslov za kvalitetan proces kalibracije.

**KLJUČNE REČI:** matematičko modeliranje, optimizaciona metoda, kalibracija

### ANALYTICAL OPTIMIZATION METHOD FOR WATER SUPPLY SYSTEMS MODELLING

**ABSTRACT:** The consequence of an uncertainty of water supply systems models' parameters is the discrepancy between simulation results and measurement data. The best values of parameters that can be obtained from available measurement data and given criteria are defined as optimal or relevant values, and the procedure is defined as model's calibration. The paper presents the procedure for pipe roughness optimization using PEST method, in the case study of Bečej Water Supply System. The influence of a sampling design for calibration on the optimization results is analyzed as well, and recommendations for future investigations are presented. The gained experience showed that no matter what tools for the process automation are available, the human factor is still the most important. The selection of optimization parameters and the understanding of obtained results are postulates for the quality calibration procedure.

**KEY WORDS:** mathematical modelling, optimization method, calibration

### 1 UVOD

Projektovanje i upravljanje vodovodnim sistemima dobilo je sasvim novu dimenziju upotrebom simulacionih modela, koji su matematička predstava realnog fizičkog sistema. Njihovom izradom formira se sređena baza podataka o elementima sistema. Modeli se koriste za razumevanje složenih procesa u sistemu i analizu ponašanja sistema u različitim operativnim i ekscitacionim situacijama. Oni se mogu koristiti za projektovanje novih, kao i za upravljanje i plani-

ranje rekonstrukcije i razvoja postojećih vodovodnih sistema.

Ključno pitanje je: koliko verno model može da predstavlja stvarni fizički sistem? Model daje rezultate simulacije (protoke i pritiske) na osnovu zadatih ulaznih parametara kao što su prečnik, dužina i hrapavost cevi, čvorne potrošnje, nivoi u rezervoarima i režimi rada pumpi. Dakle, on je realna predstava sistema onoliko koliko korisnik uspe da podesi parametre modela tako da minimizira odstupanje dobijenih rezultata simulacije sa terenskim merenjima u granicama fizič-

ki mogućih vrednosti parametara. Ovaj postupak naziva se kalibracija matematičkih modela.

U domaćoj praksi proces kalibracije se uglavnom bazira na nizu probanja sa različitim kombinacijama vrednosti parametara. Ovaj način zahteva veliko iskustvo korisnika, a ne garantuje rešenje sa optimalnim skupom parametara. Veliki broj potencijalnih kombinacija parametara nameće potrebu za efikasnijim pristupom procesu kalibracije. Jedno od rešenja je i primena analitičkih optimizacionih metoda. Optimiziraju se vrednosti izabranih parametara sistema, odnosno matematičkog modela, a kriterijum, ili ciljna funkcija, je minimiziranje razlika između rezultata merenja na pravom sistemu i rezultata simulacija na matematičkom modelu. Ovakav postupak se često naziva i automatska kalibracija.

Važnu ulogu u procesu kalibracije, a i kasnije u procesu upravljanja sistemom, ima izbor mernih mesta. Osnovni cilj planiranja na kojim mestima u sistemu će se prikupljati terenski podaci jeste da se, uz minimalne troškove merenja, dobiju podaci koji će dati najbolje rezultate kalibracije modela. Optimizacione metode pomažu u izboru mernih mesta tako što analiziraju osetljivost pojedinih parametara modela na rezultate merenja.

U radu se prikazuju postupak i rezultati kalibracije hrapavosti svih cevi prečnika  $\varnothing 400$  matematičkog modela vodovoda Bečej, primenom analitičkog optimizacionog modela PEST. Izbor optimalne vrednosti parametra modela obavljen je na osnovu merenja pritiska i protoka. Preko osetljivosti optimiziranog parametra, analizira se uticaj izbora mernog mesta u sistemu na konačan rezultat kalibracije hrapavosti jedne cevi. Na kraju rada se daju smernice za dalji razvoj postupka automatske kalibracije, koji još uvek nije dovoljno robustan za jednostavnu primenu i koji zahteva visok stepen predznanja korisnika.

## 2 PROCES AUTOMATSKE KALIBRACIJE

Kalibracija matematičkih modela vodovodnih sistema je osetljiv i mukotrpan postupak. Sa druge strane, ona je neophodna, jer prilikom izbora vrednosti parametara modela postoji dosta neizvesnosti. U zavisnosti od raspoloživih podataka, jedan broj parametara se usvaja na osnovu procene. Drugi, izabrani set parametara

se određuje postupkom kalibracije, koji se svodi na određivanje optimalnih vrednosti parametara modela, pod uslovom da se minimiziraju odstupanja simulacija od izmerenih podataka.

Do konačnog cilja procesa kalibracije se može stići na više načina. Ručnom kalibracijom se do vrednosti parametara modela dolazi probanjem, uglavnom na osnovu iskustva. Postupak je jednostavan, ali korisnik nije siguran da je pronašao optimalan set parametara. Optimizacioni algoritmi, sa druge strane, omogućavaju automatizaciju procesa, uz davanje određene mere kvaliteta kalibraciji modela. Na žalost, primena optimizacionih metoda je još uvek složena i zahteva dobro poznavanje internih algoritama.

Izbor metode, kao i izbor parametara za koje se traže optimalne vrednosti, zavisi od inženjera koji kalibriše model. Za iste ulazne podatke (fiksirani parametri modela i izabrani rezultati merenja) mogu se dobiti potpuno drugačiji rezultati simulacije. To znači da proces kalibracije zahteva dobro poznavanje hidraulike sistema pod pritiskom i pravilan izbor parametara koje treba optimizirati. Iako se kalibracijom dobijaju merodavne vrednosti parametara modela, rezultati ne smeju biti iznenađenje, već samo potvrda pretpostavki o ponašanju sistema, do kojih se došlo na osnovu raspoloživih ulaznih podataka.

Proces automatske kalibracije počinje izradom modela vodovodne mreže. Na osnovu raspoloživih podloga i podataka definišu se elementi sistema (cevi, čvorovi, ventili, pumpe, rezervoari, itd.) i određuju parametri modela (hrapavosti cevi, čvorna potrošnja, gubici u mreži) [11]. Analizom prvih rezultata simulacije na nekalibrisanom modelu otklanjaju se uočene grube greške. Takođe se, za realne granične uslove, proverava logičnost dobijenih podataka.

Sledeći korak je identifikacija, odnosno izbor parametara modela čija vrednost će se dobiti optimizacionim postupkom. Za te parametre potrebno je odrediti njihove početne vrednosti kao i dozvoljeni opseg promene vrednosti. Pri izboru parametara modela za optimizaciju treba voditi računa o njihovoj osetljivosti, tj. da li se variranjem vrednosti izabranog parametra dešavaju značajnije promene u rezultatu simulacije. Parametri modela vodovodnih sistema čije se vrednosti najčešće optimizuju su hrapavost cevi, čvorna potrošnja i operativne karakteristike pumpe.

Kalibracija matematičkih modela uključuje i prikupljanje podataka merenja sa terena, njihovu primarnu obradu (uniformisanje mernih jedinica, korekcija nultog hidrostatskog pritiska, itd) i selekciju (odabir onih delova vremenskih serija koje će se koristiti u procesu kalibracije). Položaj mernih mesta u sistemu ima veliki uticaj na rezultate kalibracije modela, tako da njihov izbor treba da bude u skladu sa rezultatima analize osetljivosti modela na podatke sa određenog mernog mesta.

U izboru metode za automatsku kalibraciju modela moguća su dva pristupa. Jedan pristup je korišćenje nekog od analitičkih optimizacionih metoda. U ovom radu prikazan je model PEST, pomoću kojeg se traži minimum ciljne funkcije. Drugi pristup je baziran na teoriji evolucije. Takvi algoritmi se nazivaju genetski algoritmi i njihova generalna osobina je postizanje više lokalnih optimuma (takozvani optimalni front rešenja problema). Bez obzira koji optimizacioni model se izabere, on zahteva određivanje svojih parametara rada, kojima korisnik definiše postupak kako se od početnih dolazi do optimalnih vrednosti parametara simulacionog modela.

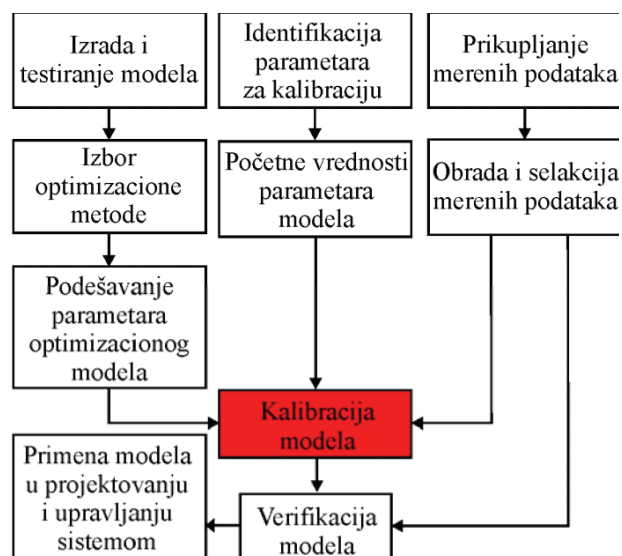
Nakon pripreme svih ulaznih podataka, pristupa se samom postupku kalibracije. Od svih raspoloživih rezultata merenja potrebno je izabrati one koji će se porediti sa rezultatima simulacije. Kalibracija se prvo vrši za samo jedan vremenski trenutak u toku dana (ustaljeno stanje). Preporučuje se da to bude trenutak maksimalne časovne potrošnje, kada parametri modela u najvećoj meri utiču na raspodelu pritiska i protoka u mreži [6]. Kalibracijom modela u ustaljenom stanju proverava se prostorna raspodela čvorne potrošnje i hrapavost cevi.

Kada se obavi kalibracija modela u ustaljenom stanju, radi se kalibracija za kontinualnu simulaciju, za izabrani vremenski interval. U toku ove kalibracije se, uglavnom, vrši korekcija vrednosti čvorne potrošnje.

Postupak kalibracije se ponavlja sve dok se ne dobiju zadovoljavajući rezultati. Kriterijum koliki je opseg dozvoljenih razlika između rezultata merenja i simulacije modela korisnik mora da definiše kao jedan od kontrolnih parametara optimizacionog algoritma.

Proces kalibracije završava se postupkom verifikacije modela. Za postupak verifikacije bira se novi skup podataka merenja. Simulacija modela pušta se sa dobijenim optimalnim skupom pa-

rametara, i dobijeni rezultati se porede sa merenim podacima [10]. Ukoliko je i za ove podatke dobijeno zadovoljavajuće poklapanje, model se može primeniti u projektovanju i upravljanju realnim sistemom. Proces kalibracije šematski je prikazan na slici 1.

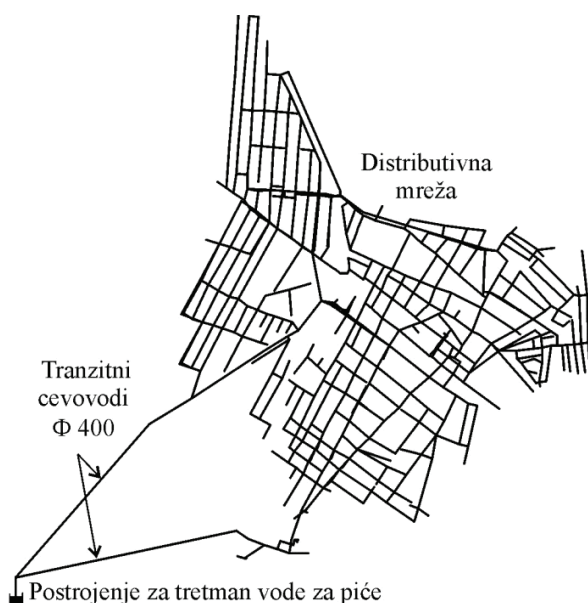


Slika 1. Prikaz procesa kalibracije

### 3 MATEMATIČKI MODEL VODOVODA BEČEJ

Matematički model vodovoda Bečej urađen je u 3DNet-EPANET okruženju [3, 9]. Centralni vodovodni sistem sastoji se od izvorišta (Postrojenje za tretman vode za piće) sa rezervoarskim prostorom, iz kojeg se voda pumpanjem kroz dva tranzitna cevovoda šalje u distributivnu mrežu. Mreža se sastoji od cevi prečnika  $\varnothing 40$  -  $\varnothing 400$ , ukupne dužine oko 130 km. Model vodovoda Bečej je prikazan na slici 2. Sastoji se od 616 cevi, 453 čvorova mreže i 1 rezervoara [7].

Karakteristika distributivne mreže vodovoda Bečej je da nema rezervoarskog prostora. Pritisak u mreži, nizvodno od pumpi, održava se ručnom regulacijom rada pumpi na potisu postrojenja za tretman vode za piće [7]. Međutim, za potrebe kalibracije modela, postrojenje za tretman vode za piće je modelirano kao jedan čvor, rezervoar u kojem se nivo tokom dana menja prema podacima dobijenim merenjem pritiska na izlazu iz postrojenja. Tako definisan ulaz u sistem može se koristiti samo za analizu podataka u jednom, izabranom danu. Za taj dan se, na osnovu merenih podataka o protoku, definiše i odgovarajući dijagram neravnomernosti potrošnje.



Slika 2. Matematički model vodovoda Bečeja

## 4 OPTIMIZACIONI MODEL PEST

Za kalibraciju matematičkog modela vodovoda Bečeja korišćen je analitički optimizacioni model PEST (Parameter ESTimation) [2]. PEST je programski paket koji se može koristiti za optimizaciju parametara bilo kojeg simulacionog modela, uz uslov da se ulazni i izlazni podaci za simulacioni model zadaju u formi tekstualnih datoteka. Drugo, veoma značajno ograničenje je da se pomoću PEST-a može optimizovati maksimalno onoliko parametara koliko postoji različitih merenih veličina. To znači da ukoliko korisnik želi da optimizuje vrednost hrapavosti jedne cevi, potreban je samo jedan mereni podatak. Isti je slučaj ako se za više cevi (isti prečnik, ista starost, slični hidraulički uslovi) usvoji ista hrapavost. Svako dalje povećanje broja parametara koji se optimizuju zahteva odgovarajuće povećanje broja podataka merenja.

Na osnovu zadatih kriterijuma (kontrolni parametri optimizacionog modela), PEST menja parametre modela sve dok se izlazni rezultati simulacije ne poklope sa merenim podacima. Optimizaciona metoda se zasniva na Gauss-Marquardt-Levenbergovom (Gauss-Marquardt-Levenberg) algoritmu pronalaženja minimuma ciljne funkcije [5]. Ciljna funkcija (1) predstavlja sumu kvadrata razlika između merenih podataka i rezultata simulacije modela.

$$\Phi = \sum_{i=1}^m \left( \rho_{i, \text{mereno}} - \rho_{i, \text{model}} \right)^2 \quad (1)$$

Svatom rezultatu simulacije modela može se dodeliti određeni težinski koeficijent, u zavisnosti od toga koliki se želi uticaj tog rezultata na ciljnu funkciju. Izbor vrednosti težinskih koeficijenata zavisi od poverenja u određeni izmereni podatak, odnosno, od procenjene greške merenja.

Rad PEST-a kontrolišu tri ulazne datoteke: šablonska, kontrolna i datoteka sa instrukcijama (slika 3 desno). Šablonska datoteka (Template file) je kopija ulazne datoteke modela i pomoću nje PEST "prepoznaje" parametre koje treba da optimizuje. Datoteka sa instrukcijama (Instruction file) definiše gde se u izlaznoj datoteci modela nalaze podaci simulacije koji se porede sa merenjima. U kontrolnoj datoteci (Control file) nalaze se kontrolni parametri PEST-a, podaci o parametrima koji se optimizuju, podaci o merenjima i definiše se veza između PEST-a i simulacionog modela.

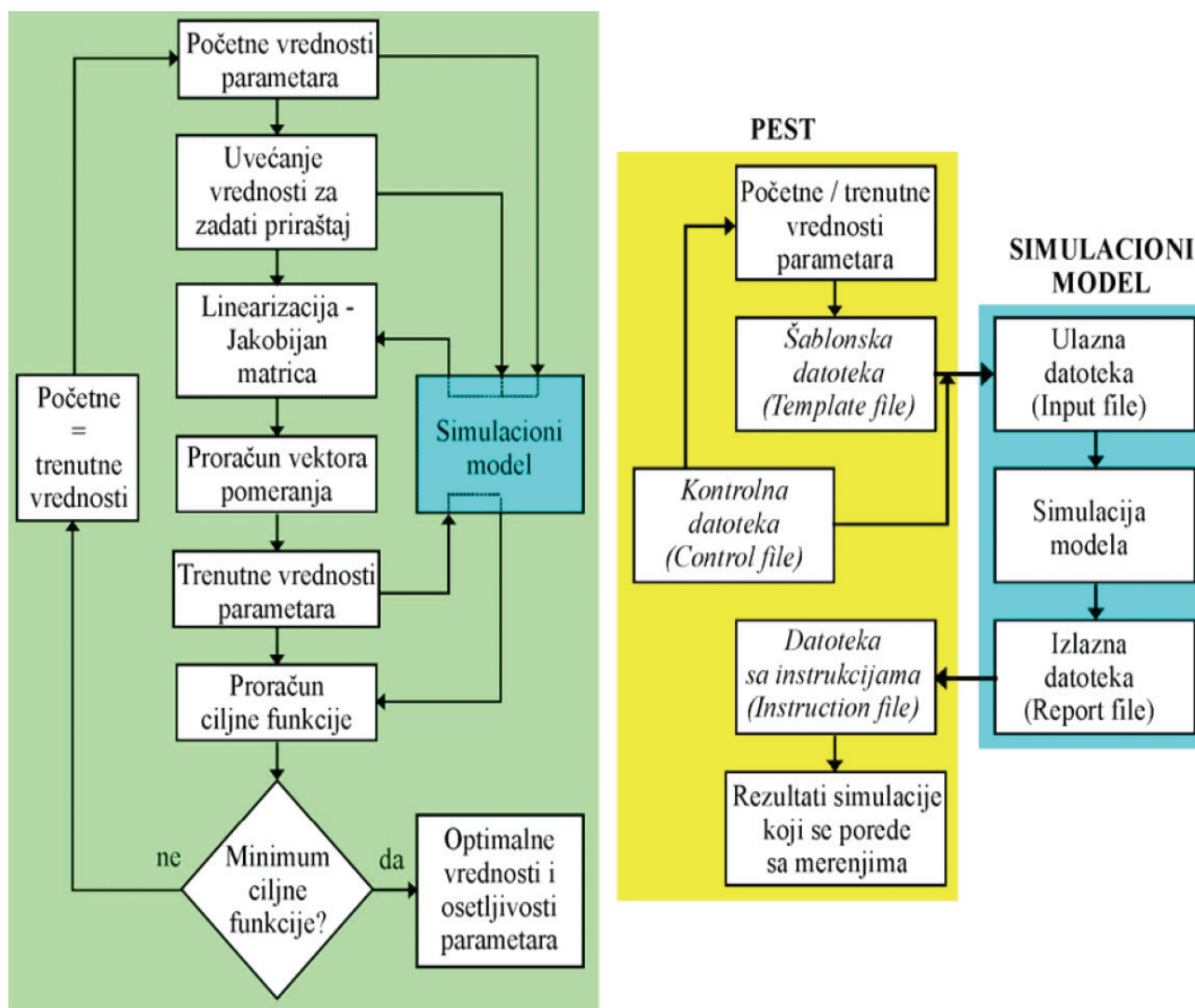
Za nelinearne modele, a većina hidrauličkih modela spada u tu kategoriju, optimizacija parametara je iterativni proces. Prva iteracija počinje sa zadatim početnim vrednostima parametara koji se optimizuju. Te podatke PEST preuzima iz kontrolne datoteke i njihov izbor ima veliki uticaj na konačni rezultat kalibracije.

Na početku svake  $i$ -te iteracije (slika 3 levo), dva puta se vrši proračun rezultata simulacije: za početnu vrednost parametara iz  $i$ -te iteracije i za vrednost koja je u odnosu na početnu uvećana za zadati priraštaj, zadan u kontrolnoj datoteci. Rezultati simulacije koji se porede sa merenjima dobijaju se pozivanjem matematičkog modela (slika 3 desno). Na osnovu dobijenih podataka (vrednosti parametara koje su korišćene za simulaciju i rezultata proračuna modela) problem optimizacije se linearizuje. Linearizacija se vrši formiranjem Jakobijan matrice, čiji elementi su izvodi svih rezultata simulacije modela u odnosu na sve parametre. Ovim postupkom se dobija podatak koliko se menjaju rezultati simulacije modela ako se određeni parametar promeni za zadati priraštaj, tj. kolika je osetljivost rešenja na promenu vrednosti parametara.

Do minimuma ciljne funkcije, tj. optimalnih vrednosti parametara, dolazi se putem vektora pomeranja. On predstavlja promenu vrednosti pa-

parametara. Trenutne vrednosti parametara u  $i$ -toj iteraciji dobijaju se uvećanjem početnih vrednosti za veličinu vektora pomeranja. Vrednost vektora pomeranja se računa u svakoj iteraciji i posebno za svaki od izabranih parametara. Sa trenutnim vrednostima parametara modela računaju se rezultati simulacije rada vodovodnog sistema, i računa ciljna funkcija za  $i$ -tu iteraciju. Poređenjem vrednosti ciljne funkcije u trenutnoj iteraciji sa onom koja je dobijena u prethodnoj, određuje se da li se proces nastavlja ili je dobijeni skup parametara optimalan. Ukoliko se optimizacioni ciklus nastavlja, sledeća iteracija počinje sa trenutnim vrednostima parametara dobijenim u prethodnoj iteraciji.

Proces optimizacije određuju zadati kontrolni parametri PEST-a, od kojih su najbitniji: veličina priraštaja parametara za proračun izvoda, vrednost maksimalne dozvoljene promene vrednosti parametara između dve iteracije i vrednost Markarovog koeficijenta  $\epsilon$ . Prva dva kriterijuma ograničavaju intenzitet vektora pomeranja i njihovim definisanjem kontroliramo "kretanje" po ciljnoj funkciji. Markarov koeficijent  $\lambda$  utiče i na smer i na intenzitet vektora pomeranja. Njegov zadatak je da rotira vektor pomeranja tako da se najkraćim putem dođe do minimuma ciljne funkcije. Zadana početna vrednost Markarovog koeficijenta  $\lambda$  se tokom iterativnog postupka smanjuje.



Slika 3. Levo – PEST algoritam ( $i$ -ta iteracija);  
Desno – Ulazne datoteke PEST-a i veza sa simulacionim modelom

## 5 IDENTIFIKACIJA PARAMETARA ZA OPTIMIZACIJU

Parametri modela čija se vrednost najčešće optimizuje su hrapavost cevi i čvorna potrošnja [1, 11]. Za potrebe kalibracije matematičkog modela vodovoda Bečej kao parametar za optimizaciju izabrana je apsolutna hrapavost cevi  $k$ . Ona je ulazni podatak koji se u EPANET simulacionom modelu zadaje za proračun linijskih gubitaka energije po Darsi-Vajsbahovoj (Darcy-Weisbach) formuli:

$$\Delta E = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = \lambda \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{2g \cdot \pi^2} \quad (2)$$

Apsolutna hrapavost ulazi u proračun kroz koeficijent trenja  $\lambda$ . On je funkcija relativnog odnosa  $k/D$  i Reynoldsovog (Reynolds) broja  $Re$ . Vrednost  $\lambda$  se računa po različitim formulama u zavisnosti od režima tečenja. Za razvijenu turbulenciju ( $Re > 4000$ ), u programskom paketu EPANET koeficijent trenja se računa po Svami i Džerinovoj (Swamee and Jain) aproksimaciji Kolbruk-Vajtove (Colebrook-White) jednačine:

$$\lambda = \frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

Reynoldsov broj za karakterističnu dužinu uzima prečnik cevi:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4)$$

Teoretski, apsolutna hrapavost cevi je visina izbočina na zidu cevi [4]. U literaturi postoje tabele sa preporučenim vrednostima, koje se odnose na nove cevi, prema kvalitetu i tehnologiji izrade i one su dobijene uglavnom na osnovu opsežnih laboratorijskih merenja. U praktičnim slučajevima hrapavost cevi je nejednolika i po prečniku cevi i po dužini. Takođe, u proračunima ona treba da obuhvati i lokalne gubitke energije koji nastaju kao posledica otpora na spojevima komada cevi i mestima priključivanja potrošača. Neodređenost vrednosti apsolutne hrapavosti cevi je posledica i kompleksnog procesa starenja cevi, koji obuhvata promene tokom vremena usled rđanja, oštećenja površina, lepljenja taloga, ispupčenja i ugibanja zida cevi. Hrapavost koja obuhvata sve navedene uticaje

se može nazvati računskom, ili ekvivalentnom hrapavošću. Mora se voditi računa i o tome da je kod iste vrste obloge računska hrapavost veća ako je veći prečnik cevi, što je posledica uticaja spojeva cevi, koji su kod većih prečnika učestaliji.

Jedan od parametara modela koji ima značajan uticaj na veličinu linijskih gubitaka energije je prečnik cevi  $D$ . Ovaj podatak se usvaja na osnovu raspoložive projektne dokumentacije i podataka sa terena, i u njegovu ispravnost se obično ne sumnja. U praksi se neodređenost podataka o prečniku u procesu kalibracije često kompenzuje optimizovanjem vrednosti hrapavosti cevi. Efekat ovakve prakse se može ilustrovati na primeru PVC cevi starosti 10 godina, dužine 200 m, prečnika  $\varnothing 200$  i hrapavosti 0.5 mm. Za tako usvojene vrednosti parametara, pri protoku vode od 35 L/s, dobija se vrednost linijskog gubitaka energije duž deonice od  $\Delta E = 1.63$  m. Međutim, ako se usled procesa starenja prečnik te iste cevi smanji za samo 1 cm (sa  $\varnothing 200$  na  $\varnothing 190$ ), vrednost stvarnih gubitaka koji se ostvaruju u mreži biće veća od dobijenih u modelu.

Zamenom vrednosti prečnika cevi ( $\varnothing 190$ ), uz nepromenjene vrednosti protoka (35 L/s) i hrapavosti cevi (0.5 mm), dobija se vrednost linijskih gubitaka od  $\Delta E = 2.13$  m. Ako bi se dobijena razlika u visinama pritisaka u potpunosti pripisala nepoznavanju vrednosti hrapavosti cevi, da bi se sa prečnikom cevi od  $\varnothing 200$  postigao gubitak energije od 2.13 m, hrapavost mora da se poveća na fizički nerealnu vrednost od 1.34 mm. Procentualno izraženo, nepoznavanje vrednosti prečnika cevi od 5% (stvarnih  $\varnothing 190$  se menja sa pogrešnih  $\varnothing 200$ ) izaziva grešku u povećanju hrapavosti od celih 270%.

Iz izloženog primera može se zaključiti da prečnik cevi ima mnogo veći uticaj na linijske gubitke od vrednosti hrapavosti cevi. Optimizacijom vrednosti hrapavosti tokom postupka kalibracije nije korektno kompenzovati neodređenosti vezane za prečnik cevi. Ipak, ukoliko se tokom optimizacionog postupka dobiju velike vrednosti hrapavosti cevi, treba posumnjati na dva uzroka: 1) neodgovarajuće podatke o prečnicima cevi, i/ili 2) postojanje neevidentiranih lokalnih gubitaka energije (npr. delimično ili potpuno zatvoreni zatvarači).

U modelu vodovoda Bečej zastupljene su azbest-cementne (AC) i plastične (PVC) cevi prečnika od  $\varnothing 40$  -  $\varnothing 400$ . U tabeli 1 dat je pregled ce-

vi sa usvojenim vrednostima računске hrapavosti. Teorijske vrednosti apsolutne hrapavosti za određeni materijal cevi preuzete su iz literature [11]. Za cevi prečnika  $\varnothing 400$ , merodavna vrednost hrapavosti će se dobiti kalibracijom modela na osnovu terenskih merenja (tabela 3).

*Tabela 1. Pregled cevi u matematičkom modelu vodovoda Bečej*

Materija l	Teoretski $k$ [mm]	Starost cevi	Prečnik cevi [mm]	Broj cevi u modelu	Usvojeni računski $k$ [mm]
AC	0.4 – 1.2	> 35 god.	80	43	0.5
			100	72	0.5
			150	44	0.5
			400	13	1.0*
PVC	0.0015	~ 20 god.	40	1	0.1
			50	318	0.1
			65	1	0.1
			90	68	0.1
			200	31	0.5
			250	5	0.5
			300	19	1.0

\* parametar koji se optimizira

## 6 IZBOR MERNIH MESTA ZA KALIBRACIJU

Za kalibraciju matematičkih modela neophodni su podaci merenja, prikupljeni sa određenih lokacija u okviru sistema. Postavlja se pitanje: ako su definisani parametri modela koje treba optimizirati, koja su to mesta u sistemu na kojima treba vršiti merenja? Odgovor nije ni malo jednostavan. Da bi proces kalibracije bio uspešan, treba odrediti mesta i veličine na koje je model najosteljiviji, odnosno mesta i veličine na kojima se prilikom male promene vrednosti parametara koji se optimizuju, dešavaju značajne promene u rezultatima simulacije. Međutim, da bi se odredila osetljivost modela na pojedine merne podatke, neophodan je funkcionalan model mreže koji daje logične rezultate.

Jedan od pristupa rešavanju ovog problema jeste da se u sistemu izaberu merna mesta na kojima se postave logeri pritiska ili protoka, i kalibracija modela obavi na osnovu dobijenih podataka. Ukoliko se ne dobiju dobri rezultati, ili se ispostavi da se podaci ne mogu iskoristiti za kalibraciju (neosetljiv model), merenja se ponavljaju na drugim lokacijama u mreži.

Druga mogućnost, finansijski i vremenski manje zahtevna, je da se navedeni postupak utvrđivanja optimalnim mernih mesta na mreži uradi

samo na osnovu rezultata simulacije modela. Podaci fiktivnih "merenja" u izabranim čvorovima se dobijaju kao rezultat simulacije modela sa usvojenim (odnosno pretpostavljenim na osnovu iskustva) "tačnim" vrednostima optimizacionih parametara. Zatim se definišu početne vrednosti i granice dozvoljene promene vrednosti parametara. Kalibracija modela se uradi za svako od definisanih mernih mesta, uzimanjem fiktivnih rezultata merenja kao optimizacionog kriterijuma. Analizom dobijenih rezultata utvrđuju se optimalna merna mesta za izabrane parametre modela.

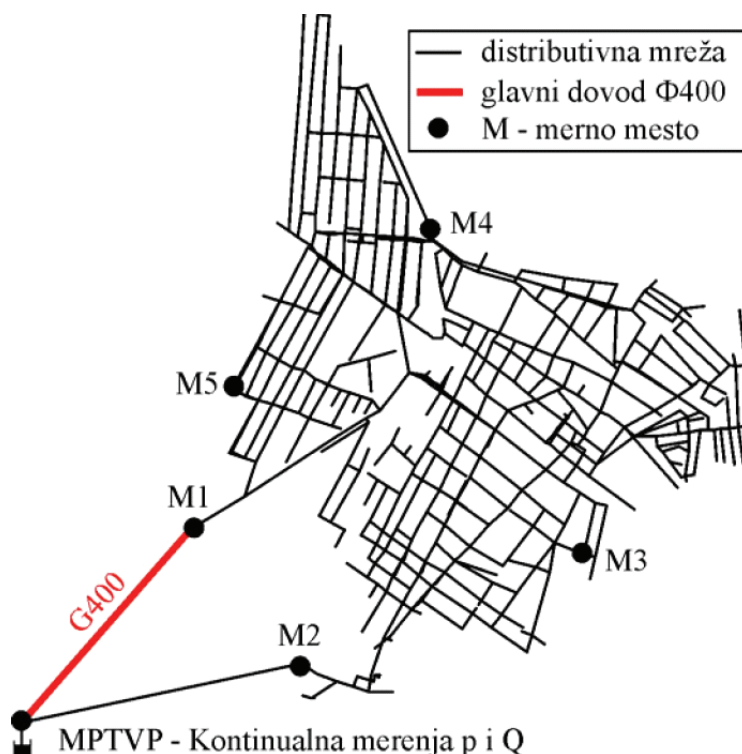
Navedeni postupak je primenjen na modelu vodovoda Bečej. Analiziran je uticaj izbora mernog mesta na rezultate optimizacije hrapavosti glavnog dovoda  $\varnothing 400$ , dužine 1850 m (oznaka cevi G400), od postrojenja za tretman vode za piće do ulaza u gradsku mrežu. Na sistemu je izabrano pet tačaka u kojima bi se mogli postaviti logeri pritiska, i njihov položaj je prikazan na slici 4.

Hrapavosti svih cevi osim razmatrane usvojeni su prema vrednostima u tabeli 1. Za cev G400 je usvojena "tačna" vrednost hrapavosti od 1.0 mm. Vrednosti pritisaka (fiktivni izmereni rezultati) u izabranim tačkama su dobijeni simulacijom modela za čas maksimalne potrošnje i prikazani su u tabeli 2. Usvojeni su parametri optimizacionog modela PEST, i sa početnom vrednošću hrapavosti cevi G400 od 0.1 mm se ušlo u proces automatske kalibracije. U tabeli 2 prikazani su dobijeni rezultati kalibracije hrapavosti cevi G400 na osnovu pritisaka u pet izabranih mernih mesta zajedno sa dobijenim osetljivostima hrapavosti na svaki od fiktivnih izmerenih podataka.

*Tabela 2. Rezultati kalibracije koeficijenta hrapavosti cevi G400*

Merno mesto	"Mereni" pritisak [m]	$k_{G400}$ kalibrisan [mm]	Računski pritisak [m]	Osetljivost parametra
M1	31.92	0.88	31.97	0.59
M2	33.04	0.10	33.11	0.00
M3	24.39	0.685	24.49	0.46
M4	29.67	0.955	29.68	0.64
M5	29.30	0.94	29.32	0.63

Rezultati u tabeli 2 pokazuju da se, u zavisnosti od izabranog mernog mesta za kalibraciju, dobijaju različiti rezultati za vrednost koeficijenta hrapavosti cevi G400. Pokazatelj koje merno



Slika 4. Izabrana merna mesta u sistemu

mesto bi dalo najbolje rezultate kalibracije je osetljivost parametara. Vrednost ovog pokazatelja je izlazni podatak optimizacionog modela PEST i on sublimira sve uticaje u modelu na rezultate simulacije. Iz tabele se vidi da, što je vrednost koeficijenta hrapavosti cevi bliža "tačnoj" vrednosti od 1.0 mm, raste i vrednost osetljivosti parametara.

Pokazani primer jasno ilustruje važnost obavljanja modelske analize izbora mernih mesta pre postavljanja mernih uređaja na terenu. Umesto da se usvoje ona merna mesta koja imaju najveću osetljivost izabranog parametra modela, u našoj praksi je čest slučaj organizovanja kampanjskog i masovnog merenja po sistemu, bez ikakve prethodne analize o svrsishodnosti izbora pojedinih mernih lokacija. Takvim pristupom se ionako skup posao terenskih merenja dodatno poskupljuje, a ideja o neophodnosti kalibracije destimuliše.

## 7 OPTIMIZACIJA HRAPAVOSTI CEVI

Za potrebe kalibracije modela vodovoda Bečej, u periodu od 18.6. – 7.7.2004. godine obavljena su kontinualna merenja pritiska u šest čvorova mreže. Istovremeno su vršena merenja

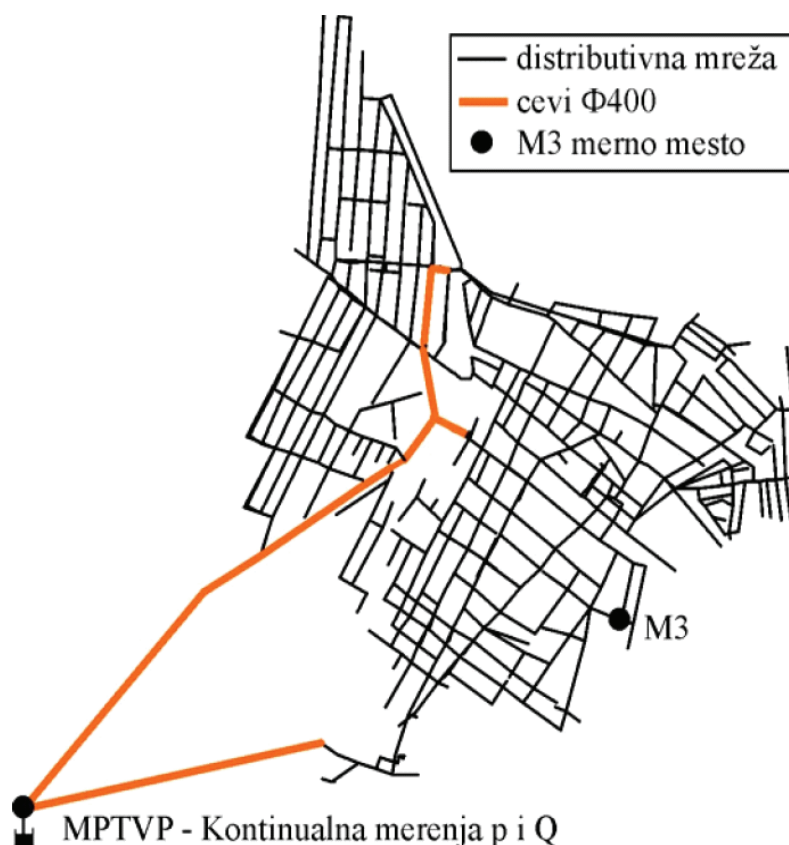
protoka i pritiska na postrojenju za tretman vode za piće, čime je definisan ulaz u sistem. Na osnovu dobijenih podataka urađena je optimizacija hrapavosti svih cevi  $\varnothing 400$  matematičkog modela (slika 5), uz pretpostavku da se za koeficijente hrapavosti ostalih cevi mogu usvojiti vrednosti iz tabele 1. Za sve cevi usvojena je ista početna vrednost hrapavosti od 1.0 mm.

Pre samog postupka kalibracije, potrebno je odrediti koji će se od dobijenih merenih podataka koristiti. Kako se kalibracija radi za ustaljeno stanje sistema, izabran je dan sa maksimalnom dnevnom potrošnjom vode u toku perioda merenja (26.6.2004.), sa merenjem pritiska u čvoru mreže M3 (slika 5). Odabran je pritisak u času kada su minimalni pritisci u mreži (18:00) i tada je vrednost izmerene visine pritiska iznosila 18.8 m.

Poređenjem rezultata simulacije sa izmerenim pritiskom u izabranom čvoru mreže, dobijena je vrednost hrapavosti svih cevi  $\varnothing 400$  modela Bečej od 1.55 mm.

U tabeli 3 prikazani su dobijeni rezultati optimizacije. Optimizacija je pokazala da je merodavna vrednost hrapavosti cevi  $\varnothing 400$  veća od pretpostavljene. To znači da se pri definisanju po-





Slika 5. Cevi prečnika Ø400 i izabrano merno mesto

četnih parametra modela nisu uzeli u obzir svi gubici energije u sistemu, koji su postali evidentni nakon poređenja sa izmerenim podacima.

Tabela 3. Rezultati optimizacije hrapavosti svih cevi Ø400

Merno mesto	Mereni pritisak [m]	Početna vrednost $k$ [mm]	Merodavna vrednost $k$ [mm]	Simulirani pritisak [m]	Osetljivost parametra
M3	18.8	1.00	1.55	18.8	0.62

## 8 BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

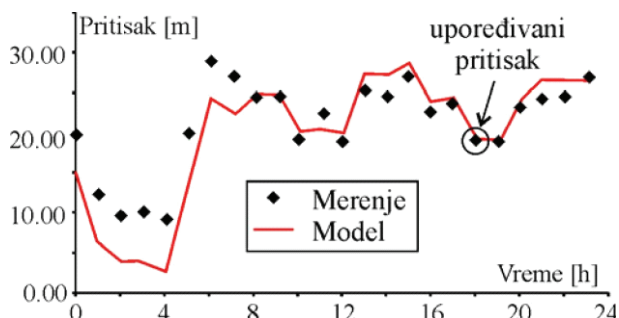
Kod određivanja početnih vrednosti hrapavosti cevi nije uzet u obzir mogući uticaj brzine tečenja vode. Može se pretpostaviti da je u cevima istog prečnika hrapavost veća gde su brzine tečenja vode manje, odnosno gde je veća mogućnost istaložavanja čestica. Posmatrajući problem optimizacije hrapavosti iz tog ugla, mogle bi se usvojiti različite početne vrednosti parametra

za određene deonice cevovoda, u zavisnosti od količine vode koja kroz nju prolazi. Deonice koje obuhvataju glavne dovode imale bi manju hrapavost u odnosu na deo cevovoda koji se nalazi u distributivnoj mreži. Poređenje na ovaj način dobijenih rezultata simulacije modela sa podacima merenja dokazalo bi ili oborilo hipotezu o uticaju brzine vode na vrednost hrapavosti cevi. Treba napomenuti i to da je posledica malih brzina vode u cevovodima proces starenja vode. Ovaj termin se odnosi na smanjenje kvaliteta vode usled stajanja i taloženja čestica.

Kalibracijom hrapavosti svih cevi Ø400 modela Bečej dobijeni su zadovoljavajući rezultati simulacije modela u ustaljenom stanju. Nakon toga obavljena je verifikacija modela poređenjem rezultata simulacionog modela i merenja u vremenskom intervalu od 24 časa. Na slici 6 prikazani su izmereni i simulirani pritisci u čvoru M3 modela. Vidi se da su tokom dana i večeri dobijena veoma dobra slaganja podataka. U noćnom periodu model pokazuje manje pritiske u odnosu na merenja. To može biti posledica pre-

dimenzionisane noćne potrošnje vode u modelu, koja smanjuje pritiske u sistemu koji se u praksi ne javljaju.

Na osnovu prvih rezultata verifikacije modela, očigledno je da u drugoj fazi kalibracije modela treba izvršiti korekciju vrednosti zadate čvorne potrošnje u noćnom periodu. Na taj način bi model u potpunosti ispratio stvarnu promenu pritiska u izabranom čvoru mreže.



Slika 6. Izmereni i simulirani pritisci u čvoru M3

Jasno je da se ne može govoriti o kalibrisanom modelu na osnovu optimizacije samo jednog parametra. Druga faza kalibracije treba da obuhvati istovremenu optimizaciju više parametara modela. Proces postaje mnogo složeniji i primena optimizacionih modela dobija svoju punu opravdanost.

Povećanje broja parametara za optimizaciju uslovljava povećanje potrebnog broja upotrebljivih podataka merenja. Na osnovu analize raspoloživih podataka utvrđuje se da li je potrebno ponoviti neke od serija merenja. Ukoliko se zaključuje da se postojeći podaci ne mogu upotrebiti za kalibraciju, neophodno je napraviti novi plan merenja, koji bi trebao da se bazira na analizi osetljivosti. Na rezultat kalibracije se može uticati i zadavanjem različitih težinskih koeficijentata rezultatima merenja, u zavisnosti od poverenja koje imamo u određeni podatak.

## 9 ZAKLJUČAK

Kalibracijom matematičkih modela vodovodnih sistema postiže se slaganje rezultata simulacije sa terenskim merenjima, čime se model osposobljava za podršku pri donošenju važnih projektantskih i upravljačkih odluka. Samom postupku kalibracije prethodi niz aktivnosti koje su usmerene na prikupljanje i izbor podataka koji će se koristiti, kao i alata kojim će se sam postu-

pak izvesti. Na primeru optimizacije hrapavosti cevi modela vodovoda Bečeja pokazano je da na rezultate značajno utiče izbor mernih mesta na kojima se prikupljaju terenski podaci. Njihovim pravilnim izborom dobijaju se bolji rezultati kalibracije i smanjuju troškovi merenja, čija se realizacija svodi samo na unapred definisane lokacije. U zavisnosti od količine i pouzdanosti raspoloživih podataka, ulazni parametri simulacionog modela imaju manju ili veću neodređenost. Ovaj problem se prevazilazi odabirom parametara za optimizaciju, čijom korekcijom, na osnovu terenskih merenja i zadatih kriterijuma, dobijamo model koji je dovoljno verna slika stvarnog sistema. Primenom numeričkih modela za dobijanje optimalnih vrednosti parametara, teorijsko znanje i inženjersko iskustvo stavljamo u funkciju jednog moćnog alata, koji nam omogućava efikasnije rešavanje datog problema.

## LITERATURA

- [1] De Marinis, G., Gargano, R., Leopardi, A., (2003), *Inverse Problems in Hydraulic Network Modelling: Parameter Identification in a Real Case Study*, PEDS 2003, Valencia, Spain.
- [2] Doherty, J., (2002), *User's Manual: PEST Model-Independent Parameter Estimation*, Watermark Numerical Computing, USA.
- [3] Građevinski fakultet, (2002-04), *Razvoj programskog paketa 3DNet za prostorno projektovanje i upravljanje radom kanalizacionih i vodovodnih sistema*, Naučno-istraživački projekat u okviru programa Tehnološkog razvoja, finansiran od strane Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj.
- [4] Hajdin, G. (2002), *Mehanika fluida. Knjiga 2, Uvodjenje u hidrauliku*, Građevinski fakultet, Beograd.
- [5] Madsen, K., Nielsen, H.B., Tingleff, O., (2004), *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University, Denmark.
- [6] Obradović, D., (1998), *Savremeni vodovodi, informatika i operativno upravljanje*, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd.
- [7] Petrašković, J., (2004), *Hidraulička analiza vodovodne mreže za grad Bečeja*, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Beograd.
- [8] Price, R.K. and Osborne, M.P., (1986), *Verification of Sewer Simulation Models*, Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data, UDM '86, Dubrovnik Yugoslavia, 99-106.
- [9] Rossmann, L., (2000), *EPANET 2 Users Manual*, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, USA.
- [10] Yen, B.C., (1986), *Rainfall-runoff Process on Urban Catchment and Its Modeling*, Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data, UDM '86, Dubrovnik Yugoslavia, 3-26.
- [11] Walski, T.M., Chase, D.V., Savić, D., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E., (2003), *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, Haested Methods,