

Prethodno priopćenje (Preliminary report) | UDK: 628.1(497.5)
Primljeno (Received): 29.01.2023.; Prihvaćeno (Accepted): 24.10.2023.

LOKALIZACIJA CURENJA VODE IZ VODOOPSKRBNIH MREŽA TEMELJEM KOMPARACIJE IZMJERENIH I PROJEKTIRANIH TLAKOVA

prof. dr. sc. Vanja Travaš, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
Radmile Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska
vanja.travas@uniri.hr

Ivana Lučin, dipl. ing. stroj.

Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
Vukovarska 58, Rijeka, Hrvatska

prof. dr. sc. Lado Kranjčević, dipl. ing. stroj.

Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
Vukovarska 58, Rijeka, Hrvatska

doc. dr. sc. Danko Holjević, dipl. ing. građ.

Hrvatske vode, VGO Rijeka
Verdijeva ul. 4, Rijeka, Hrvatska

Gubitak vode u vodoopskrbnim sustavima se mjeri razlikom volumena zahvaćene vode na izvoru/vodozahvatu i volumena vode koji je u istom vremenu isporučen potrošačima. Racionalno gospodarjenje vodnim resursima nameće obvezu redukcije gubitaka vode (curenja). Štoviše, tema redukcije gubitaka vode u vodoopskrbnim sustavima je u posljednje dvije dekade prepoznata i kroz prizmu mjera prilagodbe klimatskim promjenama te se tako i EU Direktivom o vodama propisuje primjena načela povrata troškova od vodnih usluga odnosno ostvarivanje dobiti javnih isporučitelja vodnih usluga temeljem zahvaćenih količina vode, a ne isporučenih. Obzirom na to da se u Republici Hrvatskoj izgubi više od 50% vode zahvaćene za potrebe javne vodoopskrbe, primjena prethodnog načela zahtijeva urgentnu redukciju gubitaka vode vodoopskrbnih sustava. U ovom radu izložen je sistematičan pregled te su prikazani proračunski obrasci direktnih i iterativnih metoda lokalizacije gubitaka vode temeljeni na komparaciji radnih tlakova izmjerenih u vodoopskrbnom sustavu i onih predviđenih projektnim rješenjem istog vodoopskrbnog sustava. Naime, ovakva metoda lokalizacija curenja vode u vodoopskrbnim sustavima može biti vrlo atraktivna za redukciju gubitaka vode jer je selektivna čime se izbjegavaju troškovi cjelovite obnove svih suspektnih tlačnih dionica. U kontekstu navedenoga, u nastavku je prikazana primjena navedenih metoda na primjeru hipotetske simetrične vodoopskrbne mreže pri čemu su proračunski obrasci implementirani u računalni kod izrađen u programskom jeziku Python. Na kraju rada provela se kritička rasprava te smjernice za buduća istraživanja.

Ključne riječi: lokalizacija gubitaka, matrica osjetljivosti tlakova, optimizacija, PSO

1. UVOD

Uredbom o visini naknade za korištenje voda (Narodne novine, br. 32/20) je propisano da javni isporučitelji vodnih usluga moraju što racionalnije koristiti vodu koja je zahvaćena za potrebe javne vodoopskrbe. Štoviše,

člankom 4. predmetne Uredbe predviđeno je da se naknada za isporučenu vodu mora temeljiti na količini zahvaćene vode što trenutno nije slučaj, već se naknada određuje temeljem volumena isporučene vode, odnosno volumena vode dopremljene do potrošača. S

obzirom na to da bi primjena ove Uredbe u trenutnim okolnostima vodoopskrbnih sustava u većem dijelu Republike Hrvatske uzrokovala značajno poskupljenje vode, radi objektivno velikih gubitaka (koji u pojedinim slučajevima prelaze i 70% zahvaćenih količina vode), primjena koja je bila zakazana za 1. siječnja 2023. godine je krajem prošle godine odgođena. S druge strane, prema Strategiji upravljanja vodama Republike Hrvatske, prihvatljiv iznos gubitaka vode se kreće u rasponu od 15 do 20%, te je stoga prije početka primjene Uredbe o visini naknade za korištenje voda potrebno gubitke reducirati u navedeni raspon.

Veliki gubici vode u vodoopskrbnim sustavima diljem Republike Hrvatske posljedica su relativno velike starosti tlačne infrastrukture koja u mnogim slučajevima prelazi projektirani vijek ovakvih građevina te se u pojedinim slučajevima radi o cijevima ukopanih prije više od 70 godina. Postoji više faktora koji utječu na pojavu curenja vode iz tlačnih sustava odnosno pojavu popuštanja cijevnog materijala ili spojeva cijevi kao što su prometna opterećenja, kemijski sastav tla, blizina podzemnih voda, blizina mora, varijacije u tlaku i temperaturi, itd. (Rajani i Kleiner 2001) no starost cijevi je u većini slučajeva dominantan uzrok te se u mehaničkom smislu može tumačiti kao posljedica zamora samog cijevnog materijala ili spojeva cijevi. Redukcija gubitaka vode koja bi se temeljila na kriteriju zamjene cijevi određene starosti nije u trenutnim okolnostima prihvatljiva jer se samo ovim kriterijem prepoznaje veći dio postojećih vodovodnih ogranaka u Hrvatskoj. Navedeno bi bilo prihvatljivo da je politika održavanja vodovodnih ogranaka uravnotežena s politikom izgradnje novih vodovodnih ogranaka, što proteklih dekada nije bilo prikladno uravnoteženo pa je i dovelo do trenutne situacije. Iz tog razloga, redukcija gubitaka vode se dosada najčešće provodila mjerama redukcije tlaka u sustavu. Pritom, iako se ovakvim mjerama ostvaruje redukcija gubitaka (Sterling i Bargiela 1984), istima se ne uklanja polazni problem, već se samo prolongira za određeno vrijeme ili na sljedeću generaciju korisnika. Štoviše, isključivo oslanjanje na ovakve mjere redukcije gubitaka vode nije održivo te u pogledu redovitih održavanja vodoopskrbnih sustava treba aktivno uvesti i mjere selektivne zamjene cjevovoda koje se temelje na analizama provedenim u svrhu određivanja neevidentiranih lokacija curenja vode.

Više je metoda za lokalizaciju oštećenja cijevi u vodoopskrbnim sustavima te se u najopćenitijem smislu iste mogu svrstati u: (i) terenske metode lokalizacije curenja koje se temelje na mjerenjima fizikalnih veličina prikupljene akustičnim i elektromagnetskim mjerenjima koje se implicitno dovode u vezu s gubicima te (ii) proračunske metode lokalizacije curenja koje se temelje na mjerenjima fizikalnih veličina koje se eksplicitno dovode u vezu s gubicima odnosno hidrauličkim karakteristikama toka (Adedeji et. al. 2017; Gupta i Kulat 2018; Ismail et. al. 2018). Terenske metode zahtijevaju cjeloviti obilazak svih suspektnih tlačnih dionica čime se

generiraju značajno veći troškovi za lokalizaciju curenja. S druge strane, proračunske metode ne zahtijevaju cjeloviti obilazak, već se temelje na određenom broju terenskih mjerenja tlakova i protoka čime se ostvaruju pretpostavke za inverznim modeliranjem kojim se zatim mogu odrediti lokacije curenja vode. S obzirom na to da je u tom slučaju obim terenskih mjerenja najčešće znatno manji (po pitanju vremenskog angažmana, ali i po pitanju prostorne rasprostranjenosti mjernih mjesta) te da se za iste koriste relativno konvencionalna mjeriteljska oprema, proračunske metode lokalizacije curenja mogu u financijskom smislu biti mnogo atraktivnije, te su stoga predmet ovog rada. Pritom treba napomenuti da prikupljanje terenskih podataka radnih tlakova i protoka mora isto tako udovoljiti nekim unaprijed definiranim kriterijima (Pérez et al. 2009) te ovako prikupljene veličine predstavljaju samo ulazne veličine proračunskih modela lokalizacije curenja. Naime, iako proračunske metode lokalizacije curenja imaju svoje očite prednosti, primjena istih nije trivijalna jer se temelji na metodi inverznog modeliranja. Dok se konvencionalno modeliranje sustava najčešće svodi na rješavanje matricne jednadžbe $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$, u kojoj su poznate karakteristika sustava \mathbf{A} (npr. geometrijske karakteristike tlačnih dionica) i pobuda sustava \mathbf{b} (npr. protoci u čvorovima), a potrebno je odrediti odziv sustava opisan vektorom \mathbf{x} (što bi za navedeni primjer značilo odrediti tlakove u čvorovima), u inverznom modeliranju vrijedi da se iz izmjerenih tlakova grupiranih u vektor \mathbf{x} i protoka grupiranih u vektor \mathbf{b} mora rekonstruirati pripadajuća matrica sustava \mathbf{A} . Navedeno nije nimalo jednostavno jer se odmah prepoznaje da rješenje problema ne mora biti jednoznačno. Kako bi se reducirao broj potencijalnih rješenja, te tako izdvojilo ono najvjerojatnije, potrebno je pažljivo odabrati broj i mjesta provedbe terenskih mjerenja protoka i tlaka (Santos-Ruiz et al. 2022).

Ishod inverznog modeliranja vodoopskrbnih sustava se očituje u koordinatama lokacije curenja (x,y) i iznosu protočne površine \tilde{A} odnosno veličine oštećenja kroz koje se curenje odvija. Na taj način je protok vode \tilde{q} na lokaciji curenja promjenjiv te zavisao o trenutnom tlaku na predmetnoj lokaciji i protočnoj površini \tilde{A} koja najčešće nije jednaka površini pukotine na cijevi već je manja i to iz razloga što ju okolni porozni materijal djelomično zatvara (materijal nasipan oko cijevi). Radi navedenoga, modeliranje protoka curenja \tilde{q} se najčešće temelji na empirijskim obrascima (Zyl 2014) kojima se isti dovodi u vezu s karakteristikama puknuća i lokalnog tlaka (Greyvenstein 2007; Clayton i Van Zyl 2007). Kako bi se prostor svih mogućih rješenja inverznog modela reducirao, a time i povećala vjerojatnost lokalizacije oštećenja, protoci i tlakovi u vodoopskrbnom sustavu se najčešće mjere kroz duži vremenski period tako da se na lokaciji curenja mogu očekivati različiti iznosi protoka gubitka \tilde{q} pa se samim time i reducira broj mogućih rješenja matrica sustava \mathbf{A} kojom se uspostavlja veza između izmjerenih tlakova \mathbf{x} i protoka \mathbf{b} .

Kako mjerenje tlaka i protoka u DMA zonama (engl.

District Metering Area) u kojima je poznat kumulativni ulaz i izlaz vode može biti kontinuirano, proračunske metode lokalizacije curenja su posebno atraktivne za ostvarivanje pretpostavki za pravovremeno detektiranje promjena u sustavu. Takve promjene mogu upućivati na novonastale gubitke te omogućiti lokaliziranje istih odnosno u konačnici biti indikator za selektivno saniranje sustava. U tu svrhu se proračunski modeli lokalizacije curenja koriste za razvoj tzv. digitalnih blizanaca vodoopskrbnih sustava (engl. digital twins) odnosno računalnih modela vodoopskrbnih sustava. Kalibrirani modeli (Koppel i Vassiljev 2009 i Vassiljev et al. 2015) mogu u realnom vremenu omogućiti prikaz relevantnih hidrauličkih karakteristika toka. Istima se tako mogu detektirati promjene hidrauličkih parametara toka koje mogu biti posljedica nastalih puknuća odnosno curenja vode (Bonilla et al. 2022).

Sve veću zastupljenost imaju metode lokalizacije oštećenja temeljene na primjeni metoda strojnog učenja. Navedene metode su atraktivne jer ne zahtijevaju dublje razumijevanje fizike same pojave ili procesa od strane korisnika, ne zahtijevaju izradu i kalibraciju računalnih modela, već se baziraju na tome da algoritam sam pronalazi relevantne poveznice između podataka. Primjerice, na temelju izmjerenih tlakova u sustavu moguće je dobiti informaciju o lokaciji mjesta oštećenja cjevovoda. Nedostatak je što je za učenje modela koji će imati veliku točnost potrebna velika količina podataka, koji su za slučaj curenja vode iz vodoopskrbnog sustava najčešće u malom broju. Iz tog razloga metode strojnog učenja se najčešće primjenjuju na podatke dobivene iz računalnih simulacija vodoopskrbnih sustava. Primjerice u radu Soldevila et al. 2016 primijenjena je metoda najbližih susjeda (engl. Nearest Neighbors), a u radu Soldevila et al. 2017 Bayesov klasifikator za određivanje lokacije oštećenja cijevi. Kako bi se uzelo u obzir nesigurnosti samog modela vodoopskrbnog sustava, u Lučin et al. 2021a razmatrala se primjena klasifikatora nasumične šume (engl. Random Forest) za lokalizaciju oštećenja cijevi trenirana na velikom broj sintetskih scenarija generiranih za različite uvjete oštećenja cjevovoda, nesigurnosti u potrošnjama vode u čvorovima itd. Navedeno je slično pristupu koji je primijenjen u radu Grbčić et al. 2020 gdje se određivala lokalizacija unosa zagađenja u vodoopskrbni sustav. Navedeni je problem srodan problemu lokalizacije oštećenja cijevi s razlikom da se kao promatrana varijabla ne koristi tlak već koncentracija otopljene tvari. Navedene metode mogu imati značajne zahtjeve za računalnim resursima te zahtijevaju dodatnu validaciju na realnim vodoopskrbnim sustavima kako bi se počele koristiti u praksi.

U ovom radu provest će se inverzno modeliranje tlačnih sustava temeljem poznatih protoka na mjestima potrošnje vode i tlakova u odabranim točkama vodoopskrbnog sustava. Navedeno će se prikazati primjenom: (i) triju direktnih metoda lokalizacije oštećenja koje koriste matricu osjetljivosti tlakova (Pérez

et al. 2009a; Pérez et al. 2011; Casillas Ponce et al., 2014) te (ii) iterativnih metoda lokalizacije oštećenja koja se temelji na rješavanju ekvivalentnog optimizacijskog problema (Sherali i Smith 1997). U nastavku će se iznijeti teoretski pregled korištenih metoda te zatim prikazani numerički primjeri nakon kojih slijedi diskusija i zaključak.

2. DIREKTNE METODE LOKALIZACIJE

U nastavku će se prikazati tri direktne metode lokalizacije curenja vode u vodoopskrbnim sustavima temeljene na konstrukciji matrice osjetljivosti tlakova $S(t)$ koja objedinjava informacije promjena tlaka na karakterističnim mjestima u tlačnoj mreži s obzirom na promjenu položaja lokacije i iznosa protoka curenja \dot{q} . U tu svrhu treba primijetiti da je primjena ovakvih pristupa opravdana samo u slučajevima kad postoji jedno dominantno curenje odnosno curenje koje je po protoku \dot{q} značajno veće od eventualno ostalih gubitaka na istoj tlačnoj dionici (što se dominantno mora odraziti na piezometarsku visinu). Za zadanu potrošnju u čvorovima vodoopskrbne mreže q_j , članovi matrice $S(t)$ u odabranom trenutku vremena t predstavljaju mjeru osjetljivosti tlaka u čvoru i obzirom na normirani protok gubitka (\dot{q}_j) ostvaren u čvoru j , odnosno vrijedi (Perez et al. 2009a,b)

$$S(t) = S_{ij}(t) = \frac{\partial p_i}{\partial \dot{q}_j} t$$

Lako je prepoznati da analitički izračun članova matrice $S(t)$ nije posve jednostavan zbog toga što je raspored tlakova p_i u čvorovima i definiran nelinearnim funkcijama $p_i(\dot{q}_j)$, odnosno sustavom nelinearnih algebarskih jednadžbi. Iz tog razloga se konstrukcija matrice $S(t)$ provodi numerički tako da se za zadani položaj jediničnog protoka curenja (\dot{q}_j) određuje nastala promjena tlaka u svim čvorovima i u kojima je poznat izmjereni radni tlak $p_i(t, \dot{q}_j)$ te projektirani radni tlak $\hat{p}_i(t)$ pa tako vrijedi (Casillas Ponce et al. 2014):

$$S_{ij}(t) \approx \frac{p_i(t, \dot{q}_j) - \hat{p}_i(t)}{\dot{q}_j}$$

Iz prethodno navedenog treba prepoznati da konstrukcija matrice $S(t)$ u prvom redu zahtijeva poznavanje projektiranih radnih tlakova ($p_i(t)$) odnosno radnih tlakova koji bi se za zadani raspored potrošnje vode $q_j(t)$ trebali ostvariti za predviđeno projektno rješenje vodoopskrbne mreže odnosno za slučaj da u istoj nema vodnih gubitaka (Swamee i Sharma 2008). Jednom kada je za zadanu potrošnju $\dot{q}_j(t)$ poznat raspored projektiranih tlakova, u nastavku je potrebno ispitati kako položaj jediničnog gubitka \dot{q}_j utječe na promjenu istih. U tu svrhu se na zadani iznos potrošnje $\dot{q}_j(t)$ dodaje jedinični gubitak \dot{q}_j u prvom čvoru mreže te zatim ponavlja proračun tlakova u mreži čime će se dobiti manji iznos tlaka odnosno tlak $p_i(t, \dot{q}_j)$. Razlika tlaka $p_i(t, \dot{q}_j)$ i projektiranog tlaka (p definira

nastalu promjenu u polju tlaka u čvoru i koju je prema aproksimaciji derivacije (2) još potrebno normirati s obzirom na iznos zadanog vodnog gubitka \tilde{q}_j . Za zadani položaj vodnog gubitka se predmetna razlika tlakova može odrediti za sve čvorove vodoopskrbne mreže pa je time i određena prva kolona matrice $S(t)$. Kako bi se odredila druga kolona matrice $S(t)$, zadani gubitak \tilde{q}_j se pomiče u naredni čvor vodoopskrbne mreže te se opisani postupak ponavlja sve dok se aproksimacija članova matrice $S(t)$ ne odredi za sve položaje vodnog gubitka \tilde{q}_j . Posebno je važno primijetiti da matrica $S(t)$ ne zavisi o provedenim terenskim mjerenjima i postojećim gubicima vode u vodoopskrbnoj mreži već oslikava karakteristike osjetljivosti tlaka u tlačnom sustavu s obzirom na položaj nekog karakterističnog zadanog protoka u istome (u ovom slučaju jediničnog vodnog gubitka). S obzirom na to da konstrukcija matrice $S(t)$ zahtijeva progresivno pomicanje zadanog vodnog gubitka (\tilde{q}_j), po svim čvorovima vodoopskrbne mreže, njena konstrukcija može u proračunskom smislu biti zahtjevna. Naime, vrijeme potrebno za konstrukciju matrice $S(t)$ raste eksponencijalno porastom broja čvorova vodoopskrbne mreže. S druge strane, kako se metoda lokalizacije gubitaka temelji na komparaciji izmjerenih i projektiranih tlakova, konstrukcija matrice $S(t)$ se najčešće provodi samo u čvorovima i u kojima je prethodno provedena terenska izmjera tlaka. Na taj način, matrica $S(t)$ u općem obliku poprima oblik:

$$S(t) = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & \cdots & S_{1m}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & \cdots & S_{2m}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(t) & S_{n2}(t) & \cdots & S_{nm}(t) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{p_1(t, \tilde{q}_1) - \hat{p}_1(t)}{\tilde{q}_1} & \frac{p_1(t, \tilde{q}_2) - \hat{p}_1(t)}{\tilde{q}_2} & \cdots & \frac{p_1(t, \tilde{q}_m) - \hat{p}_1(t)}{\tilde{q}_m} \\ \frac{p_2(t, \tilde{q}_1) - \hat{p}_2(t)}{\tilde{q}_1} & \frac{p_2(t, \tilde{q}_2) - \hat{p}_2(t)}{\tilde{q}_2} & \cdots & \frac{p_2(t, \tilde{q}_m) - \hat{p}_2(t)}{\tilde{q}_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{p_n(t, \tilde{q}_1) - \hat{p}_n(t)}{\tilde{q}_1} & \frac{p_n(t, \tilde{q}_2) - \hat{p}_n(t)}{\tilde{q}_2} & \cdots & \frac{p_n(t, \tilde{q}_m) - \hat{p}_n(t)}{\tilde{q}_m} \end{bmatrix}$$

u kojem se indeks i kreće u rasponu od 1 do n odnosno ukupnog broja mjernih mjesta tlakova te indeks j u rasponu od 1 do m odnosno ukupnog broja čvorova vodoopskrbne mreže. Kako bi se minimizirali troškovi provedbe terenskih mjerenja, treba napomenuti da najčešće vrijedi $n \ll m$ što onda i zahtijeva oprezan odnosno promišljen izbor lokacija za mjerenje tlaka (Pérez et al. 2009b; Blesa et al. 2015.). Kako bi se u nastavku provela lokalizacija curenja vode, dobro je primijetiti da se kolone j matrice $S(t)$ mogu asociirati na

karakteristike tlakova za slučaj da se gubitak vode nalazi u čvoru j. Na taj način, lokalizacija curenja vode se svodi na kvantifikaciju sličnosti svake kolone j matrice $S(t)$ s vektorom reziduala tlakova:

$$r(t) = \begin{Bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_n(t) \end{Bmatrix} \text{ gdje je } r_i(t) = p_i(t) - \hat{p}_i(t)$$

koji ima isti broj članova n koliko matrica $S(t)$ ima redova te u kojem je $\hat{p}_i(t)$ ostvareni odnosno izmjereni tlak u čvoru i, a $\hat{p}_i(t)$ projektom predviđeni radni tlak koji je prethodno određen za poznati raspored protoka $q_j(t)$ s kojim je zadana potrošnja u čvorovima vodoopskrbne mreže. U vremenu t poznatog rasporeda tlakova $p_i(t)$ te $\hat{p}_i(t)$, za poznati raspored potrošnje vode $q_j(t)$, kvantitativna komparacija vektora reziduala $r(t)$ i kolone j matrice $S(t)$ će rezultirati veličinom d kojom se mjeri magnituda usvojenog kriterija različitosti vektora $r(t)$ i kolone j matrice $S(t)$. Naime, treba prepoznati da vektor $r(t)$ predstavlja obrazac rasporeda radnih tlakova koji su na terenu izmjereni i koji time uključuju utjecaj nepoznatog gubitka \tilde{q}_j , dok kolone j matrice $S(t)$ predstavljaju rasporede tlakova za slučaj da se jedinični

vodni gubitak nalazi u čvoru j. Komparacija vektora $r(t)$ i kolone j matrice $S(t)$ se provodi temeljem unaprijed definiranog komparativnog kriterija (kojih ima više, a odabrani se obrađuju u nastavku) te će rezultirati s m veličinama koje se mogu po rednom broju čvorova vodoopskrbne mreže grupirati u vektor $d(t) = \{d_1(t), d_2(t), \dots, d_m(t)\}^T$. Indeks j komponente vektora $d(t)$ s najmanjom veličinom predstavlja redni broj čvora s najvećom vjerojatnosti lokacije curenja vode. Pritom, kako bi se problem višeznačnih rješenja inverznog modeliranja u

što većoj mjeri reducirao, sve prethodno navedeno se provodi za veće vremensko razdoblje unutar kojeg su za čvorove vodoopskrbne mreže poznate funkcije $q_j(t)$ te u čvorovima mjerenog tlaka funkcije $p_i(t)$. U tom slučaju se uvode srednje vrijednosti \bar{d}_j vektora \bar{d} prema obrascu

$$\bar{d} = \bar{d}_j = \frac{1}{n_t} \cdot \sum_{t=1}^{n_t} d_j(t)$$

te kriteriji lokalizacije ostaju isti kao i ranije (indeks j najmanje komponente vektora). Ovim se lokalizacija curenja svodi na odabir kriterija komparacije vektora reziduala $r(t)$ i kolone j matrice $S(t)$ te se u tu svrhu u nastavku prikazuju tri kriterija. Kriterij komparacije se može tumačiti i u geometrijskom smislu obzirom na to da se radi o komparaciji vektora (kolone j matrice $S(t)$ se mogu tumačiti kao vektori). Pritom, samo u slučaju da vrijedi $m \leq 3$ se radi o vektorima koji se mogu vizualizirati dok se za veći broj mjernih mjesta tlakova radi o višedimenzionalnim vektorima što onemogućuje vizualizaciju istih, ali omogućuje primjenu uobičajene vektorske algebre s većim brojem prostornih dimenzija.

2.1. Kriterij vektorskog otklona

Sličnost vektora reziduala $r(t)$ i vektora $S_j(t)$ danog kolonom j matrice $S(t)$ se može mjeriti s obzirom na razliku pravaca nosioca ovih vektora odnosno kutom između vektora $\alpha_j(t)$. Na taj način, komponente vektora $d(t)$ se mogu odrediti koristeći skalarni produkt vektora iz kojeg slijedi kut između vektora $\alpha_j(t)$ dan u obliku:

$$\alpha_j(t) = \arccos \left(\frac{r^T(t) \cdot S_j(t)}{|r(t)| \cdot |S_j(t)|} \right)$$

u kojem su $|r(t)|$ i $|S_j(t)|$ norme sudjelujućih vektora. Ovim su ujedno i određene vrijednosti komponenti vektora $d(t)$, odnosno vrijedi:

$$d_j(t) = \alpha_j(t)$$

2.2. Kriterij korelacijskog koeficijenta

Ukoliko se komponente vektora reziduala $r(t)$ i vektora $S_j(t)$ shvate kao serije numeričkih podataka, sličnost između istih se može ocijeniti primjenom linearne korelacije pa se u tu svrhu može koristiti Pearsonov koeficijent korelacije dan u obliku:

$$r_j(t) = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i(t) - \bar{r}(t)) \cdot (S_{ij}(t) - \bar{S}_j(t))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i(t) - \bar{r}(t))^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{ij}(t) - \bar{S}_j(t))^2}}$$

u kojem je $\bar{r}(t)$ srednja vrijednost vektora reziduala te $\bar{S}_j(t)$ srednja vrijednost kolone j matrice $S(t)$. Valja primijetiti da će se ishod ovog kriterija kretati u rasponu od -1 do 1 te ga je prikladno normirati tako da se očuva prethodno uvedeni koncept da indeks komponente vektora $d(t)$ s minimalnim iznosom predstavlja redni broj čvora j s najvjerojatnijim ishodom lokalizacije curenja. U tu svrhu se komponente vektora $d(t)$ definiraju

$$d_j(t) = 1 - (r_j(t))^2$$

obrascem:

te treba primijetiti da će se komponente kretati u rasponu od 0 za čvor j s velikom vjerojatnosti pojavljivanja curenja, a 1 za suprotni slučaj.

2.3. Kriterij Euklidove norme

Slično kriteriju vektorskog otklona (6), sličnost između vektora $r(t)$ i vektora $S_j(t)$ se može ispitati koristeći kriterij Euklidove norme vektora dobivenog kao razlika ovih vektora. Pritom, treba primijetiti da u izvornom obliku nije opravdano oduzimati predmetne vektore jer vektori nisu dimenzionalno homogeni odnosno vektor $S_j(t)$ ima članove tlaka normirane na protok curenja (3). Iz tog razloga je vektor $S_j(t)$ potrebno uvećati za iznos protoka \tilde{q}_j ranije korištenog za konstrukciju matrice $S(t)$

$$l_j(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i(t) - S_{ij}(t) \cdot \tilde{q}_j)^2}$$

te će tako norma predmetnog vektora biti:

čime će se i definirati komponente vektora $d(t)$ u obliku:

$$d_j(t) = l_j(t)$$

te će kao i ranije indeks komponente s najmanjim iznosom predstavljati redni broj čvora j u kojem postoji najveća vjerojatnost curenja vode.

3. ITERATIVNE METODE LOKALIZACIJE

Za razliku od prethodno ilustriranih direktnih metoda, kod kojih je rješenje za dani slučaj vodoopskrbnog sustava direktno određeno, iterativnim metodama se rješenje nastoji progresivno unaprijediti iz iteracije u iteraciju tako da se profinjaju koordinate curenja i sam iznos \tilde{q}_j protoka curenja. Za razliku od prethodnih metoda, ovim pristupom se omogućuje lokalizacije više istovremenih gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži. S obzirom na to da porastom broja lokacija vodnih gubitaka raste i broj potencijalnih rješenja inverznog problema, može se konstatirati da time opada i pouzdanost rezultata. Ovakav pristup lokalizacije curenja se najčešće svodi na rješavanje ekvivalentnog optimizacijskog problema za koji je u prvom redu potrebno definirati funkciju cilja.

3.1. Funkcija cilja

Ukoliko se koordinate (x,y) pretpostavljenog položaja curenja vode i iznos protoka curenja \tilde{q} objedine u vektor x , funkcija cilja $G(x)$ se može definirati u obliku:

$$G(x) = \sum_{i=1}^n (p_i - \tilde{p}_i(x))^2$$

gdje su p_i tlakovi na izmjerenim mjernim mjestima i te $\tilde{p}_i(x)$ tlakovi izračunati na istim mjestima za pretpostavljeni položaj i iznos protoka curenja vode \tilde{q} . Iz navedenog slijedi da se lokalizacija curenja vode svodi na minimizaciju funkcije cilja $G(x)$, odnosno pronalazak koordinate (x,y,\tilde{q}) u prostoru pretraživanja kod koje je iznos funkcije cilja $G(x)$ minimalan. S obzirom da analitički zapis funkcije cilja $G(x)$ nije unaprijed poznat, njen minimum je potrebno pronaći numerički tako da se polazna pretpostavka rješenja u iterativnom postupku progresivno unaprjeđuje.

3.2. PSO metoda

U svrhu minimizacije funkcije cilja (12), pretraživanje njene domene definirane varijablama (x,y,\tilde{q}) će se u nastavku provesti primjenom PSO optimizacijske metode (engl. Particle Swarm Optimization). Primjena metode započinje zadavanjem konačnog broja n_p nasumičnih pretpostavki rješenja koja se zatim tijekom iteracijskih ciklusa na odgovarajući način ažuriraju kako bi se u konačnici izdvojilo jedno najpovoljnije rješenje. Pretpostavljena rješenja se u kontekstu PSO metode najčešće tumače kao čestice ili agenti (Clerc, 2010) koji tijekom iteracija pretražuju domenu funkcije cilja. Ako se za razlikovanje čestica uvede indeks p te za razlikovanje iteracijskih ciklusa indeks e , tada se za svaku pretpostavku rješenja može pisati vektor:

$$x_{p,e} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \tilde{q} \end{pmatrix}$$

koji sadrži pretpostavljeni položaj gubitka (x,y) te iznos protoka curenja \tilde{q} . Ukoliko se pomicanje čestica u prostoru pretraživanja shvati kao gibanje materijalnih točaka, tada se za položaj istih u svakoj narednoj iteraciji može pisati:

$$x_{p,e+1} = x_{p,e} + v_{p,e+1} \cdot l_r$$

gdje je $v_{(p,e+1)}$ brzina kretanja čestica te l_r parametar fiktivnog vremena koji se najčešće tumači kao vrijeme potrebno za učenje odnosno vrijeme potrebno za razmjenu informacija između čestica (Clerc, 2010). Naime, kako se prepoznaje i u samom nazivu metode, PSO metoda se temelji na oponašanju dinamike jedinki različitih kolonija kao npr. gibanje ptica prilikom pretraživanja prostora za hranom. Motivacija za navedeno slijedi iz učinkovitosti ovakvo procesa koji se može lako prepoznati evolucijskom argumentacijom.

U tom slučaju je gibanje svake jedinke opisano s dvije komponente: (i) komponenta odlučivanja temeljena na individualnom iskustvu prethodnih pretraživanja prostora te (ii) komponenta odlučivanja temeljena na kolektivnom iskustvu pretraživanja prostora. S obzirom na navedeno, u PSO metodi se ažuriranje brzine kretanja provodi modelom (Simon, 2013):

$$v_{p,e+1} = w \cdot v_{p,e} + c_1 \cdot \hat{r}_1 \circ (x_{opt,e} - x_{p,e}) + c_2 \cdot \hat{r}_2 \circ (x_{opt,g} - x_{p,e})$$

u kojem je $v_{p,e}$ brzina čestice p na kraju trenutne iteracije, $v_{p,e+1}$ brzina čestice p na početku sljedeće iteracije, w faktor inercije s kojim se opisuje svojstvo održavanja smjera i brzine kretanja, c_1 parametar modela s kojim se opisuje utjecaj individualnog iskustva u odlučivanju narednog smjera pretraživanja, c_2 parametar modela s kojim se opisuje utjecaj kolektivnog iskustva u odlučivanju narednog smjera pretraživanja, $x_{p,e}$ koordinate čestice p u iteracijskom koraku e , $x_{opt,e}$ najbolje koordinate koje je do trenutne iteracije imala čestica p (lokalni optimum), $x_{opt,g}$ najbolje koordinate do trenutne evaluacije (globalni optimum), \hat{r}_1 i \hat{r}_2 slučajni vektori s komponentama u rasponu od 0 do 1 pri svakom ažuriranju brzine čestice p te se uvode kako bi se oponašala slučajna komponenta pretraživanja (za ove brojeve je važno da se u proračunskom algoritmu određuju temeljem uniformne distribucije te se tako ne favorizira pojedini smjer kretanja čestica). Treba primijetiti da model (15) koristi Hadamardov produkt vektora \circ kojim će komponente a_i vektora a , nastalog umnoškom $b \circ c$ biti definirane umnoškom $b_i c_i$. Faktor inercije w se najčešće smanjuje porastom broja iteracija jer se uvodi pretpostavka da se s vremenom prilazi optimalnom rješenju. Ovaj parametar se koristi za balansiranje globalnog pretraživanja (s relativno velikim iznosima npr. 1,0 se modelira istraživanje prostora dok se relativno malim iznosima npr. 0,2 modelira eksploatacija prostora). Drugi član desne strane Jed. (15) se može tumačiti kao utjecaj "samouvjerenosti" jedinke kolonije u pretraživanju prostora te se njegovom magnitudom modelira favoriziranje najboljeg položaja čestice. S druge strane, posljednji član desne strane se može tumačiti kao značaj povjerenja u pretraživanju drugih čestica pa se njegovom magnitudom favorizira globalno najbolje rješenje. S obzirom na navedeno, prvi član desne strane se najčešće tumači kao faktor diversifikacije odnosno član putem kojeg se modelira favoriziranje pretraživanja drugih područja u kojima čestica još nije bila dok se zbroj druga dva člana na desnoj strani najčešće tumači kao faktor intenzifikacije, odnosno član putem kojeg se modelira favoriziranje pretraživanja već poznatog područja u kojem se čestica kreće (te ima individualnu i kolektivnu komponentu). Programaska implementacija PSO metode se za predmetni slučaj lokalizacije curenja vode u vodoopskrbnoj mreži može sažeto rezimirati pseudo-kodom prikazanim u nastavku.

Korak 1: Inicijalizacija

Zadaj broj čestica n_p za pretraživanje prostora funkcije cilja

Inicijaliziraj redni broj evaluacije $e=0$

Postavi granice prostora pretraživanja x, y, q

Za svaku česticu $p = 1, \dots, n_p$ provedi

a) Inicijaliziraj položaja i protok curenja

b) Inicijaliziraj lokalni optimum $x_{opt,e}$ čestice p

c) Inicijaliziraj brzinu čestice $v_{p,e}$

Inicijaliziraj globalni optimum $x_{opt,g}$

Korak 2: Iteracijska petlja

Ponavljaj evaluacije e sve dok se ne dosegne minimum funkcije cilja

Za svaku česticu $p = 1, \dots, n_p$ provedi:

a) Odredi slučajne vektore \hat{r}_1 i \hat{r}_2

b) Ažuriraj brzinu čestice $v_{p,e+1}$ prema Jed. 15

c) Ažuriraj položaj čestice $x_{p,e+1}$ prema Jed. 14

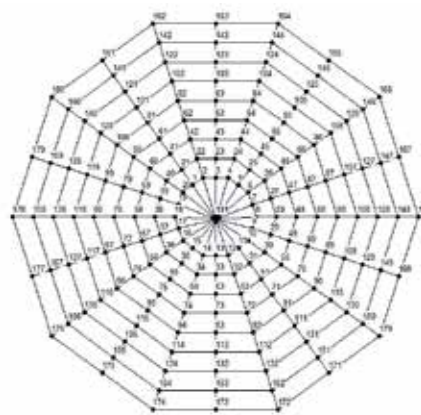
d) Ako je $x_{p,e+1} < x_{opt,e}$
Ažuriraj lokalni optimum $x_{opt,e} = x_{p,e+1}$

e) Ako je $x_{p,e+1} < x_{opt,g}$
Ažuriraj globalni optimum $x_{opt,g} = x_{p,e+1}$

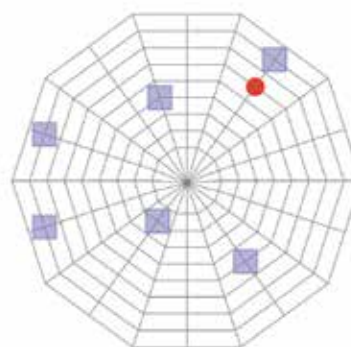
4. NUMERIČKI PRIMJER

U svrhu izrade numeričkog primjera, prethodno prikazane metode lokalizacije curenja vode su implementirane u računalni kod napisan koristeći programski jezik Python. S druge strane, za zadavanje relevantnih hidrauličkih i geometrijskih parametara vodoopskrbne mreže je korišten program EPANET (Rossman 2000), dok je za izračun tlakova u mreži, temeljem zadanih protoka u čvorovima mreže, korišten Python paket wntr (engl. The Water Network Tool for Resilience) razvijen za potrebe izrade analiza stacionarnog toka u tlačnim sustavima. Naime, wntr paket je u predmetne svrhe posebno interesantan iz razloga što se istim iterativna analiza tlačnog sustava može automatizirati odnosno ciklički ponavljati za različite parametre toka. U kontekstu iterativne metode je navedeno neophodno dok je u kontekstu direktne metode posebno atraktivno za konstrukciju matrice $S(t)$ jer je u tu svrhu potrebno sukcesivno modeliranje polja tlaka za različite pretpostavke lokacije curenja.

Lokalizacija curenja vode će se primjenom prikazanih metoda u nastavku ilustrirati na hipotetskom primjeru simetrične vodoopskrbne mreže prikazane na slici 1. Mreža sadrži 181 čvor i 360 dionica unutarnjeg promjera 100 mm. Centralnim čvorom se modelira vodosprema na koti 60 m n.m. dok se preostali čvorovi nalaze na koti 0 m n.m. Čvorovi na vanjskom rubu mreže su od vodospreme udaljeni 1 km. Protoci potrošnje vode q_j u čvorovima mreže su zadani uniformnom statističkom raspodjelom te se kreću u rasponu od 0 do 0,5 l/s. Ovim je definirano projektirano stanje vodoopskrbne mreže kojem odgovaraju tlakovi p_i koji će se iz tog razloga u nastavku tumačiti kao očekivani tj. projektirani tlakovi sustava. Kako bi se u nastavku simulirao gubitak vode (curenje vode u čvoru mreže), te zatim isti i lokalizirao



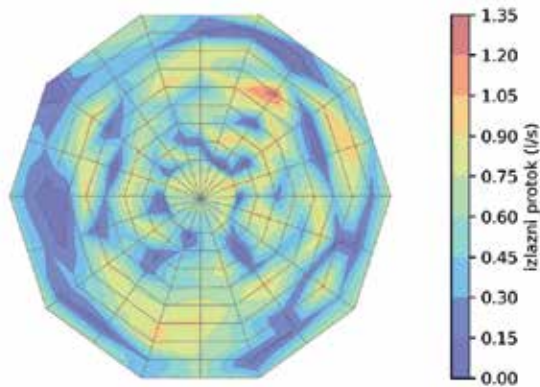
Slika 1: Shema čvorova i dionica vodoopskrbne mreže korištene za izradu numeričkih primjera.



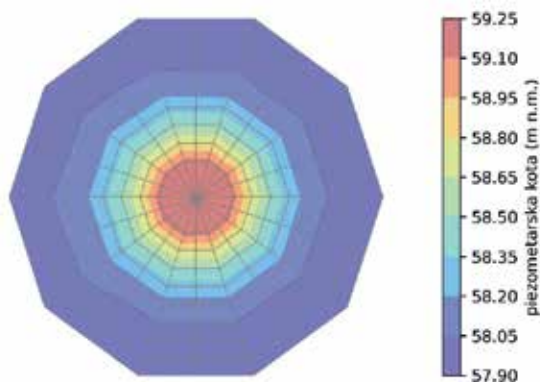
Slika 2: Prostorni raspored čvorova u kojima su poznati tlakovi (plavi markeri) te položaj curenja vode (crveni marker).

primjenom direktne i iterativne metode, u odabranom čvoru mreže će se na iznos prethodno zadanog protoka potrošnje vode q_j nadodati protok curenja vode \tilde{q} u iznosu od 1 l/s čime će se modelirati oštećeno stanje izvedene vodoopskrbne mreže. Iz tog razloga će se i pripadajući tlakovi $p_i(\tilde{q})$ u čvorovima mreže tumačiti kao ostvareni, odnosno izmjereni tlakovi sustava (jer uključuju vodni gubitak koji se ostvaruje u vrijeme eksploatacije građevine). Položaj zadanog curenja vode i položaji čvorova mjernih mjesta tlakova su prikazani na slici 2. Lokalizacija čvora sa zadanim curenjem vode \tilde{q} će se u nastavku temeljiti na komparaciji tlakova $p_i(\tilde{q})$ asociраних на изведено, odnosno oštećeno stanje mreže i tlakova p_i asociраних на idealno, odnosno projektirano stanje mreže (i to samo u čvorovima mjernih mjesta tlakova). Iako se protoci, tlakovi i komponente vektora d odnose na čvorove mreže, u nastavku će se za grafički prikaz istih koristiti linearna interpolacija u prostoru koji zauzima vodoopskrbna mreža te je navedeno prvenstveno motivirano preglednijim uvidom u prostorni raspored ovih točkastih veličina.

Raspored zadanog protoka potrošnje vode q_j i protoka curenja vode \tilde{q} je prikazan na slici 3. Ovakvom distribucijom protoka su dobiveni tlakovi $p_i(\tilde{q})$ koji će se sukladno prethodno navedenome tumačiti kao tlakovi dobiveni provedenim terenskim mjerenjima. Pritom, za potrebe lokalizacije curenja vode će se izdvojiti samo



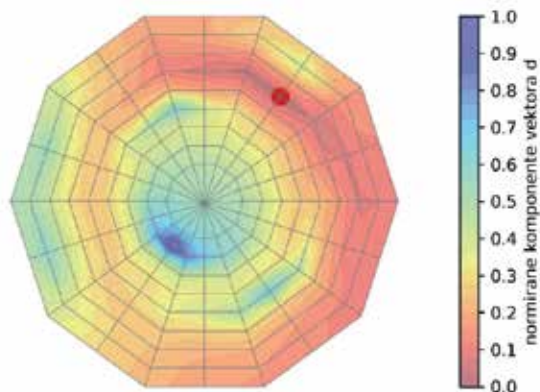
Slika 3. Zadani raspored protoka na izlazu čvorova mreže koji uključuje protok potrošnje vode q_j i protok curenja vode \bar{q} od 1 l/s u čvoru ilustriranom na slici 2 (crveni marker).



Slika 4. Ostvareni raspored piezometarske kote za zadani izlazni protok iz mreže sastavljen od protoka potrošnje q_j i curenja vode \bar{q} prikazan na slici 3.

oni koji se odnose na čvorove vodoopskrbne mreže označene plavim markerima na slici 2. Cjeloviti prostorni raspored piezometarske kote je za predmetni slučaj protoka potrošnje q_j i curenja vode \bar{q} prikazan na slici 4.

U prikazanoj raspodjeli piezometarske kote (slika 4) može se prepoznati da zadani protok curenja vode \bar{q} , i s dvostruko većim iznosom od maksimalnog protoka potrošnje vode q_j , nije uzrokovao nagib piezometarske plohe u pravcu zadanog gubitka vode (što bi značajno olakšalo lokalizaciju curenja). Naime,

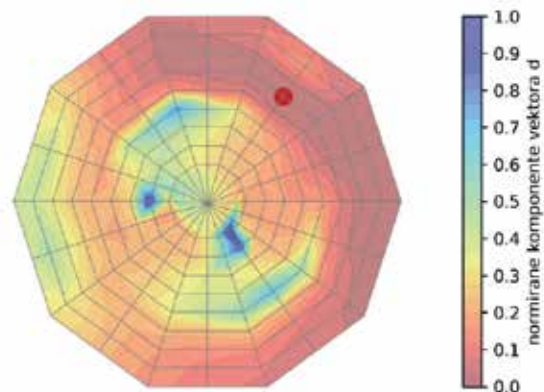


Slika 5: Ishod lokalizacije curenja dobiven primjenom kriterija vektorskog otklona.

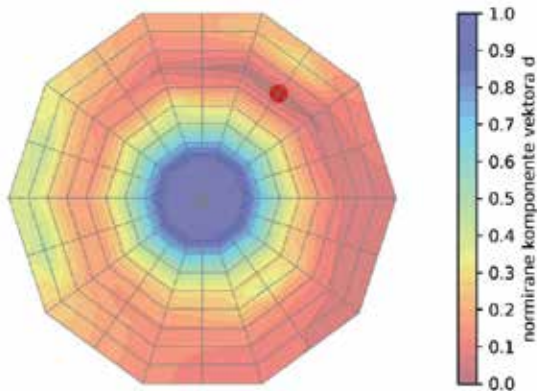
stohastički zadana potrošnja vode q_j u čvorovima vodoopskrbne mreže (kakvu je i opravdano očekivati u realnim eksploatacijskim uvjetima) je uzrokovala vrlo nejednoliko polje tlaka (slika 4) koje se s obzirom na zadani protok curenja \bar{q} neznatno razlikuje od polja tlaka dobivenog za projektirano stanje vodoopskrbne mreže (bez gubitaka vode). Iz tog razloga će razlike u tlakovima biti vrlo male pa se time i prepoznaje izazov lokalizacije curenja. Štoviše, lokalizacija curenja će se temeljiti na usporedbi ovih tlakova i to u svega nekoliko čvorova mreže (u onim čvorovima u kojima su tlakovi poznati provedenim terenskim mjerenjima). S druge strane, za realne slučajeve lokalizacije curenja vode treba napomenuti da je raspored protoka potrošnje q_j rijetko unaprijed poznat u svim čvorovima mreže te da je u tim slučajevima potrebno isti kalibrirati temeljem poznatih protoka i izmjerenih tlakova (Sanz i Pereza 2014; Do et al. 2017).

4.1. Primjena direktne metode lokalizacije curenja

Za predmetni slučaj primjene direktne metode lokalizacije curenja valja primijetiti da matrica osjetljivosti tlakova S ima 6 redova (što odgovara broju čvorova u kojima su poznati tlakovi) te 180 kolona (jer se pretpostavlja da se curenje vode ne događa u centralnom čvoru u kojem je zadana vodosprema). Na taj način i vektor reziduala r ima 6 komponenti definiranih razlikom ostvarenih odnosno izmjerenih tlakova p_i i predviđenih odnosno projektiranih tlakova \hat{p}_i u čvorovima mreže (4). Primjenom prethodnih kriterija komparacije vektora reziduala r te kolona S_j matrice osjetljivosti tlakova će se definirati vektor d čije će komponente biti normirane u rasponu od 0 do 1 te će, prema usvojenom kriteriju lokalizacije curenja, predstavljati kvantificiranu mjeru različitosti ovih vektora. Manji iznos komponente vektora d upućuje na manju različitost između vektora reziduala r i kolone S_j matrice osjetljivosti tlakova odnosno iskazuje veću vjerojatnost da se curenje vode nalazi u čvoru j za koji je i dobivena kolona S_j . Na taj način, prostorni raspored komponenti vektora d , u kojem redni broj komponente



Slika 6: Ishod curenja lokalizacije dobiven primjenom kriterija korelacijskog koeficijenta.

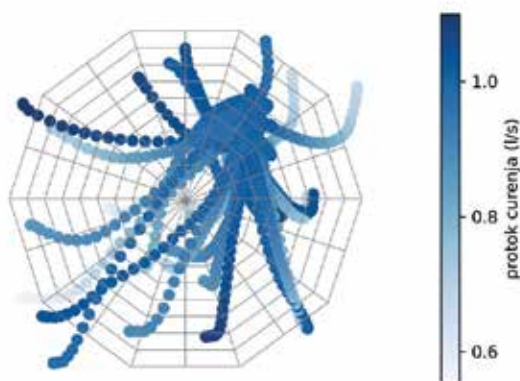


Slika 7: Ishod lokalizacije curenja dobiven primjenom kriterija Euklidove norme.

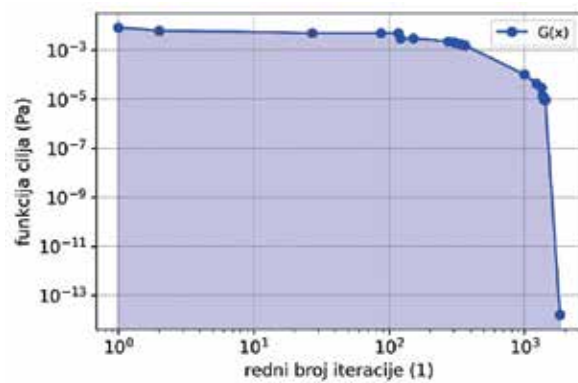
odgovara rednom broju čvora mreže, koristiti će se za grafičko iskazivanje područja vodoopskrbne mreže s najvećom vjerojatnosti lokacije curenja vode. U skladu s navedenim, za predmetni primjer su rezultati lokalizacije curenja vode prikazani na slici 5 za slučaj kriterija vektorskog otklona (6), na slici 6 za slučaj kriterija korelacijskog koeficijenta (8) te na slici 7 za slučaj kriterija Euklidove norme (10). Redni broj najmanje komponente vektora d se u svim primijenjenim kriterijima podudara s rednim brojem čvora j u kojem je prethodno zadano curenje vode (slika 2). Pritom, treba prepoznati da se područja s najmanjim iznosima komponenti vektora d međusobno razlikuju (žarko crvena područja na slikama 5, 6 i 7), ali se isto tako može prepoznati da se protežu oko čvora u kojem je zadano curenje vode. Za predmetni slučaj je najuže područje lokalizacije curenja vode dobiveno Euklidovom metodom (slika 7) i to prvenstveno iz razloga što je protok q u kriteriju (10) zadan s istim iznosom protoka curenja. Za praktičnu primjenu ovog kriterija je preporučljivo varijablu q u kriteriju (10) mijenjati po iznosu te time i pratiti veličinu područja lokalizacije curenja.

4.2. Primjena iterativne metode lokalizacije curenja

Na istom primjeru vodoopskrbne mreže (slika 2) će se u nastavku prikazati primjena iterativne metode



Slika 9: Ispitani iznosi i rasporedi položaja curenja vode.



Slika 8: Vrijednost funkcije cilja tijekom iteracija.

lokalizacije curenja vode. Lokalizacija curenja vode je provedena primjenom PSO metode i to na način da se s ukupno 20 čestica (13) pretraživala domena funkcije cilja (12) kako bi se pronašao čvor mreže u kojem se događa curenje vode i iznos protoka curenja vode q za koje funkcija (12) ima najmanju vrijednost. Pritom, važno je prepoznati da se položaj curenja vode nije mogao direktno modelirati rednim brojem čvora jer se radi o ordinalnoj ljestvici numeracije čvorova kojom prostorni položaj čvora nije unaprijed poznat već samo njegov redni broj u odnosu na druge čvorove. Iz tog razloga je ordinalna ljestvica numeracije čvorova transformirana u kardinalnu ljestvicu tj. brojevni pravac. Na taj način položaj curenja vode modeliran je Kartezijevim koordinatama (x,y) , koje ne moraju koincidirati s položajem čvorova i dionica vodoopskrbne mreže, te se zatim za iste provodi pretraživanje najbližeg čvora u kojem se potom definira curenje vode. Na taj način je omogućeno da se redni broj čvora mreže s curenjem vode indirektno koristi u modelu (15) ažuriranja pretpostavke rješenja. Osim navedenoga, posebno je važno napomenuti da se primjenom PSO metode ne provodi samo lokalizacija koordinate curenja vode već se isto tako određuje i iznos protoka curenja q . Počevši od nasumičnog rasporeda čestica p (13) u domeni funkcije cilja, te koristeći parametre modela $c_1=1$, $c_2=1$ i $l_r=0,05$, na slici 8 su prikazana rješenja optimizacijskih varijabli (odnosno položaja čvora curenja i protoka q curenja vode) koja su tijekom iteracija progresivno reducirala iznos funkcije cilja te tako konvergirala optimalnom rješenju koji ujedno odgovara položaju i iznosu prethodno zadanog curenja vode. Za lokalizaciju curenja vode je trebalo nešto više od 130 iteracijskih ciklusa nakon kojih je iznos funkcije cilja bio manji od $(10)^{-5}$ Pa (slika 9).

5. DISKUSIJA

U navedenom radu prikazana je mogućnost primjene direktnih i iterativnih metoda za problem određivanja lokacije oštećenja cjevovoda. Može se primijetiti da su sve metode uspješno primijenjene na problem lokalizacije curenja za promatrani primjer hipotetske simetrične vodoopskrbne mreže. Prilikom

provođenja iterativnih metoda uspješno je primijenjena transformacija kategorijske varijable u kontinuiranu varijablu. To je osobito važno jer se na taj način pojednostavljuje optimizacijski proces kreiranjem manje zahtjevne optimizacijske varijable. S druge strane, važno je napomenuti da numeričke metode bazirane na modelima vodoopskrbnih sustava najčešće koriste pojednostavljenje gdje se curenje može dogoditi samo u čvorovima numeričkog modela. S obzirom na to da je poznato da se curenje (kvar) može dogoditi na bilo kojem dijelu cijevi, a da udaljenosti između pojedinih segmenata u modelu mogu biti velike, navedeno pojednostavljenje može značajno reducirati efikasnost lokalizacijske metode. U nedavnom istraživanju (Lučin et al. 2021b) korištena je dodatna segmentacija cijevi, gdje su se u numeričkom modelu dodali novi čvorovi po segmentu cijevi kako bi se povećala preciznost lokalizacije curenja. Kombiniranjem metode primijenjene u ovom radu i metode segmentacije, u budućim istraživanjima moglo bi se značajno poboljšati lokalizaciju curenja.

Važno je primijetiti da se provedene metode baziraju na usporedbi s projektiranim tlakovima u vodoopskrbnim sustavima, tj. pretpostavci stacionarnog toka u tlačnim sustavima što predstavlja određeno pojednostavljenje problema koje može dovesti do pogrešnih rezultata. Iz tog razloga se kao relevantna često uzimaju noćna mjerenja između 2 i 4 sati ujutro kada su najmanje potrošnje krajnjih korisnika, a tlakovi u sustavu su visoki s intenzivnijim curenjima vode (Thornton et al. 2008). Također, navedene metode se uglavnom testiraju na slučaju jedne lokacije curenja cijevi, dok je realnije da u sustavu istovremeno postoji više curenja na različitim lokacijama.

6. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane direktna i iterativna metoda lokalizacije curenja vode u vodoopskrbnim sustavima. Prikazane metode se temelje na komparaciji izmjerenih tlakova na terenu te tlakova dobivenih za projektirano stanje vodoopskrbnog sustava (bez pojave gubitaka vode). Pritom, za razliku od direktne metode, koja u iznijetom obliku nije namijenjena za lokalizaciju

većeg broja lokacija curenja, iterativna metoda se u tu svrhu može koristiti, ali primjena iste u tom slučaju postaje mnogo zahtjevnija u pogledu potreba za računskom snagom. U tom slučaju je broj mogućih rješenja mnogo veći (što progresivno raste s brojem optimizacijskih varijabli) pa se i u tom slučaju ovakva primjena metode ne preporuča ili se pak lokalizacija može pokušati uz mnogo veći broj mjernih točaka tlaka. U tom smislu valja primijetiti da porastom broja točaka u kojima je tlak poznat opada i broj mogućih rješenja optimizacijskog problema. Za izradu primjera lokalizacije curenja vode korištena je simetrična vodoopskrbna mreža. Za zadani raspored protoka potrošnje vode u čvorovima mreže, modelom su određene vrijednosti očekivanih tj. projektiranih tlakova u istima. Nakon toga je u odabranom čvoru zadan protok curenja vode, čime se modelirao gubitak vode te je ponovno proveden izračun tlakova kako bi se dobili tlakovi koji su se u nastavku interpretirali kao veličine izmjerene na terenu. Važno je napomenuti kako je uspješnost lokalizacije curenja vode zavisna o iznosu protoka curenja. Naime, s većim protok curenja su ujedno i veće razlike između projektiranih i izmjerenih tlakova te je stoga i broj mogućih rješenja lokalizacije manji. Isto tako, treba i spomenuti kako je u primjeru pretpostavljeno da se curenje vode odvija u čvoru u kojem se susreću više dionica vodoopskrbne mreže te da ovo nije ograničavajući uvjet lokalizacije. Naime, lokalizacija curenja vode se može provesti i uzduž samih dionica tako da se modelom predvidi veći broj čvorova vodoopskrbne mreže (čvorova uzduž samih dionica koji nemaju ulogu račvi). U daljnjim istraživanjima nužno je uzeti u obzir i mogućnost višestrukih lokacija curenja kako bi navedene računalne metode bile prikladne za korištenje u realnom slučaju.

Zahvale: Ovaj rad je nastao kao rezultat rada na projektu *Računalni model strujanja, poplavlivanja i širenja onečišćenja u rijekama i obalnim morskim područjima* (referentni broj KK.05.1.1.02.0017) koji financira Ministarstvo zaštite okoliša i energetike iz operativnog programa Konkurentnost i kohezija sufinanciranim sredstvima iz Europskog fonda za regionalni razvoj. ■

LITERATURA

Adedeji, K. B.; Hamam, Y.; Abe, B. T.; Abu-Mahfouz, A. M. 2017: Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. *IEEE Access*, 5, 20272-20285.

Blesa, J. Nejjari, F. & Sarrate, R. 2015. Robust sensor placement for leak location: analysis and design. *Journal of Hydroinformatics*, 18(1), 136-148.

Bonilla, C.A.; Zanfei, A.; Brentan, B.; Montalvo, I.; Izquierdo, J. 2022: A Digital Twin of a Water Distribution

System by Using Graph Convolutional Networks for Pump Speed-Based State Estimation, *Water*, Vol. 14, pp. 514.

Casillas Ponce, M. V.; Garza Castañón, L. E.; Puig Cayuela, V. 2014: Model-based Leak Detection and Location in Water Distribution Networks considering an Extended-horizon Analysis of Pressure Sensitivities, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 16., No. 3, pp. 649-670.

Clayton, C.; Van Zyl, J. E. 2007: The effect of pressure on leakage in water distribution systems, *Water Management*, Vol. 160, No. June, pp. 109-114.

- Clerc, M. 2010: *Particle swarm optimization*, John Wiley & Sons Inc., Vol. 93.
- Do, N.; Simpson, A.; Deuerlein, J.; Piller, O. 2017: Demand Estimation in Water Distribution Systems: Solving Underdetermined Problems Using Genetic Algorithms. *Procedia Engineering*. Vol. 186, pp. 193-201.
- Grbčić, L.; Lučin, I.; Kranjčević, L.; Družeta, S. 2020: A Machine Learning-based Algorithm for Water Network Contamination Source Localization. *Sensors*. Vol. 20, pp. 2613.
- Greyvenstein, B. 2007: An Experimental Investigation Into the Pressure-Leakage Relationship of Some Failed Water Pipes. *Journal of Water Supply*. Vol. 56.
- Gupta, A.; Kulat, K. D. 2018. A selective literature review on leak management techniques for water distribution system. *Water Resources Management*, 32, 3247-3269.
- Ismail, M. I. M.; Dziauddin, R. A.; Salleh, N. A. A.; Muhammad-Sukki, F.; Bani, N. A.; Izhar, M. A. M.; Latiff, L. A. 2019. A review of vibration detection methods using accelerometer sensors for water pipeline leakage. *IEEE access*, 7, 51965-51981.
- Koppel, T.; Vassiljev, A. 2009. Calibration of a model of an operational water distribution system containing pipes of different age. *Advances in Engineering Software*, 40(8), 659-664.
- Lučin, I.; Lučin, B.; Čarija, Z.; Sikirica, A. 2021a: *Data-Driven Leak Localization in Urban Water Distribution Networks Using Big Data for Random Forest Classifier*, *Mathematics*, Vol. 9, pp. 672.
- Lučin, I.; Čarija, Z.; Družeta, S.; Lučin, B. 2021b. Detailed Leak Localization in Water Distribution Networks Using Random Forest Classifier and Pipe Segmentation. *IEEE Access*. 9, 155113-155122.
- Pérez, R.; Puig, V.; Pascual, J. 2009a: Leakage detection using pressure sensitivity analysis, Computing and Control in the Water Industry Conference, Sheffield, UK.
- Pérez, R.; Puig, V.; Pascual, J.; Peralta, A.; Landeros, E.; Jordanas, L. 2009b: Pressure sensor distribution for leak detection in Barcelona water distribution network, *Water Science and Technology Eater Supply*. Vol. 9, No. 6, pp. 715-721.
- Pérez, R.; Puig, V.; Pascual, J.; Quevedo, J.; Landeros, E.; Peralta, A. 2011: Methodology for leakage location using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. *Control Engineering Practice*. Vol. 19, No. 10, pp. 1157-1167.
- Rajani, B.; Kleiner, Y. 2001. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban water*. 3(3), 151-164.
- Rossman, L. A. 2000. Epanet 2: Users manual, Nat. Risk Manage. Res. Lab., Office Res. Develop., U.S. Environ. Protection Agency, Cincinnati, OH, USA, Tech. Rep. EPA/600/R-00/057/2000.
- Santos-Ruiz, I.; López-Estrada, F.R.; Puig, V.; Valencia-Palomo, G.; Hernández, H.R. 2022: Pressure Sensor Placement for Leak Localization in Water Distribution Networks Using Information Theory, *Sensors (Basel)*. Vol. 7, No. 22(2), pp. 443.
- Sanz, G.; Perez, R. 2014: Demand pattern calibration in water distribution networks, *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 1495-1504.
- Sherali, H.; Smith, E. 1997: Global Optimization Approach to a Water Distribution Network Design Problem. *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, No. 2, pp. 107-132.
- Simon, D. 2013: Evolutionary optimization algorithms: biologically-inspired and population based approaches to computer intelligence. Hoboken, John Wiley & Sons Inc. Jul. 17.
- Soldevila, A.; Blesa, J.; Tornil-Sin, S.; Duviella, E.; Fernandez-Canti, R. M.; Puig, V. 2016. Leak localization in water distribution networks using a mixed model-based/data-driven approach. *Control Engineering Practice*. 55, 162-173.
- Soldevila, A.; Fernandez-Canti, R. M.; Blesa, J.; Tornil-Sin, S.; Puig, V. 2017. Leak localization in water distribution networks using Bayesian classifiers. *Journal of Process Control*, 55, 1-9.
- Sterling M.; Bargiela, A. 1984. Leakage reduction by optimised control of valves in water networks, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 6, No. 6, pp. 293-298.
- Swamee, P. K.; Sharma, A. K. 2008. Design of Water Supply Pipe Networks. John Wiley & Sons Inc., No. 1.
- Thornton, J.; Sturm, R.; Kunkel, G. 2008. Water loss control. McGraw-Hill Education.
- Van Zyl, J. E. 2014: Theoretical modeling of pressure and leakage in water distribution systems, *Procedia Engineering*, Vol. 89, pp. 273-277.
- Vassiljev, A., Koor, M.; Koppel, T. 2015. Real-time demands and calibration of water distribution systems. *Advances in Engineering Software*. 89, 108-113.

LOCALISATION OF WATER LEAKAGE FROM WATER SUPPLY NETWORKS BASED ON COMPARING MEASURED AND PROJECTED PRESSURES

Abstract: Water losses in water supply systems is measured by the difference between the volume of water abstracted at the source/water intake and the volume of water delivered to consumers at the same time. Rational management of water resources imposes the obligation to reduce water losses (leakage). Moreover, in the last two decades the topic of water loss reduction in water supply systems has been considered in the context of climate change adaptation measures. The EU Framework Water Directive prescribes the implementation of the principle of cost recovery from water services, i.e. the realization of profits by public water services providers based on abstracted (not on delivered) water quantities. Since more than 50% of water abstracted for public water supply in the Republic of Croatia is lost, the application of the mentioned principle requires an urgent reduction of water losses in water supply systems. The paper provides a systematic review and calculation patterns of direct and iterative methods for localising water losses based on the comparison of working pressures measured in a water supply system and those predicted by the design solution for the same water supply system. Namely, this method of localizing water leaks in water supply systems can be very attractive for reducing water losses because it is selective, thus avoiding the costs of complete rehabilitation of all suspect pressure sections. In this context, the application of the mentioned methods is shown on the example of a hypothetical symmetrical water supply network, where the calculation forms are implemented in the computer code created in the Python programming language. In conclusion, the paper provides a critical discussion and guidelines for future research.

Keywords: localisation of losses, pressure sensitivity matrix, optimisation, PSO

LOKALISIERUNG VON WASSERLECKS IN WASSERVERSORGUNGSNETZEN ANHAND DES VERGLEICHS DES GEMESSENEN UND AUSGELEGTEN WASSERDRUCKS

Abstrakt: Der Wasserverlust in Wasserversorgungssystemen wird anhand der Differenz zwischen der an der Quelle entnommenen Wassermenge und der an die Verbraucher gelieferten Wassermenge gemessen. Eine rationelle Bewirtschaftung der Wasserressourcen bedeutet, dass Wasserverluste (Leckagen) reduziert werden müssen. Darüber hinaus wurde das Thema der Reduzierung von Wasserverlusten in Wasserversorgungssystemen in den letzten zwei Jahrzehnten durch das Prisma von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel betrachtet, und so schreibt die EU-Wasserrichtlinie die Anwendung des Prinzips der Kostendeckung aus Wasserleistungen vor, d. h. die Gewinnerwirtschaftung für öffentliche Wasserversorger auf Basis der entnommenen, aber nicht gelieferten Wassermengen. Angesichts der Tatsache, dass in Kroatien mehr als 50 % des für die öffentliche Wasserversorgung erfassten Wassers verloren geht, ist die Anwendung des vorherigen Grundsatzes dringend erforderlich. In diesem Artikel werden eine systematische Übersicht und Berechnungsmuster direkter und iterativer Methoden zur Lokalisierung von Wasserverlusten vorgestellt, die auf dem Vergleich der im Wasserversorgungssystem gemessenen Arbeitsdrücke und den geplanten Arbeitsdrücken im selben Wasserversorgungssystem basieren. Diese Methode kann nämlich sehr attraktiv für die Reduzierung von Wasserverlusten sein, da sie selektiv ist und damit keine Kosten entstehen, die bei einer vollständigen Sanierung aller verdächtigen Druckabschnitte notwendig wären. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden die Anwendung der genannten Methoden am Beispiel eines hypothetischen symmetrischen Wasserversorgungsnetzes vorgestellt, wobei die in der Programmiersprache Python erstellten Berechnungsformeln in den Computercode implementiert werden. Am Ende des Projekts wurden kritische Diskussionen geführt und Leitlinien für zukünftige Forschungen erstellt.

Schlüsselwörter: Lokalisierung von Wasserverlusten, Druckempfindlichkeitsmatrix, Optimierung, PSO