

## ODABRANI ASPEKTI PRIMJENE DIGITALNIH BLIZANACA ZA LOKALIZACIJU CURENJA VODE IZ VODOOPSKRBNIH SUSTAVA

ELVIS ŽIC<sup>1</sup>, IVANA LUČIN<sup>2</sup>, EMANUEL GAL<sup>1</sup> i VANJA TRAVAŠ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Hrvatska

<sup>2</sup> Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Hrvatska

### Sažetak

U radu se prikazuje metodologija detekcije i lokalizacije curenja vode u tlačnim vodoopskrbnim sustavima primjenom koncepta digitalnog blizanca. Problem lokalizacije formuliran je kao optimizacijski zadatak minimizacije razlike između izmjerenih i simuliranih tlakova, pri čemu se koristi algoritam optimizacije roja čestica. Razvijeni sustav objedinjuje hidrauličko modeliranje, prikupljanje podataka u realnom vremenu te njihovu obradu pomoću programskih alata EPANET i Python paketa WNTR. Metodologija je ispitana u laboratorijskim uvjetima na fizičkom modelu cjevovodne mreže s kontroliranim curenjima različitog intenziteta. Predloženi pristup predstavlja temelj za daljnji razvoj digitalnih alata za upravljanje vodoopskrbnim sustavima.

### Ključne riječi

digitalni blizanac, vodoopskrbni sustavi, lokalizacija curenja, optimizacija roja čestica, hidrauličko modeliranje, mjerenje tlaka i protoka, upravljanje gubicima vode.

## 1 Uvod

Gubitak vode u vodoopskrbnim sustavima predstavlja jedan od ključnih problema upravljanja vodnim resursima, s izraženim društvenim, gospodarskim i okolišnim posljedicama. U kontekstu klimatskih promjena i održivog razvoja, racionalno korištenje vode postaje sve važnije. Procjenjuje se da se iz vodoopskrbnih sustava na globalnoj razini godišnje gubi više od 126 milijardi kubičnih metara vode (Liemberger i Wyatt, 2019). Gubici su najčešće posljedica oštećenja cijevi i spojeva, a njihova se učestalost povećava sa starošću infrastrukture i nedostatnim održavanjem. Smanjenje gubitaka vode često se provodi upravljanjem radnim tlakom, budući da niži tlak smanjuje protok curenja. Međutim, ovaj pristup ima ograničenja jer ne smije ugroziti minimalne uvjete propisane protupožarnom zaštitom te predstavlja privremeno rješenje koje ne uklanja uzrok problema. Dugoročno održiviji pristup temelji se na selektivnom popravku infrastrukture, koji zahtijeva pouzdano otkrivanje i preciznu lokalizaciju curenja vode.

## 2 Metode

Metode lokalizacije curenja mogu se podijeliti na lokalne i globalne. Lokalne metode, poput vizualnih, akustičnih i termografskih inspekcija, često su skupe i zahtijevaju opsežan terenski rad. Zbog toga se sve veća pozornost posvećuje globalnim metodama temeljenima na analizi mjerenih podataka tlaka i protoka (Chan i sur., 2018). Unutar ove skupine razlikuju se pristupi temeljeni na prijelaznim, odnosno tranzijentni pojavama, na obradi velike baze prikupljenih podataka te na matematičkim modelima izvedenih sustava. Pristupi temeljeni na prijelaznim procesima analiziraju širenje fluktuacija tlaka kroz sustav, pri čemu brzina širenja zvuka u cijevima zahtijeva sofisticiranu i vrlo osjetljivu mjernu opremu (Lee i sur., 2006). Metode temeljene na podacima koriste tehnike strojnog i dubinskog učenja za prepoznavanje anomalija u velikim skupovima podataka, no njihova primjena u stvarnim sustavima, osobito kod višestrukih curenja, još je uvijek ograničena

(Fang i sur., 2019). Pristupi temeljeni na modelu sustava, kakav se primjenjuje u ovom radu, uspoređuju izmjerene vrijednosti tlaka s rezultatima hidrauličkog modela u istim uvjetima protoka. Lokalizacija curenja provodi se analizom razlika između izmjerenih i predviđenih vrijednosti, primjerice uporabom matrice osjetljivosti na tlak ili Bayesovih klasifikatora (Soldevila i sur., 2017). Takav pristup omogućuje sustavno i objektivno određivanje vjerojatne lokacije curenja.

U ovom radu lokalizacija curenja vode formulirana je kao optimizacijski problem minimizacije razlike između izmjerenih i simuliranih tlakova. Zbog multimodalne prirode problema (Wu i Sage, 2006) primijenjen je metaheuristički algoritam optimizacije roja čestica (Simon, 2013). Time se omogućuje uspostava digitalnog blizanca tlačnog cjevovodnog sustava, koji u stvarnom vremenu obrađuje podatke i omogućuje detekciju položaja i intenziteta curenja vode. Iako se digitalni blizanci sve više primjenjuju u upravljanju vodnim sustavima (Bonilla i sur., 2022), istraživanja njihove primjene u lokalizaciji curenja još su ograničena. Dosadašnji radovi uglavnom se temelje na simulacijama ili ograničenom broju mogućih lokacija curenja vode (Brahmbhatt i sur., 2023; Gómez-Coronel i sur., 2023).

## 2.1 Detekcija i lokalizacija curenja vode

Problem lokalizacije curenja vode formuliran je kao inverzni problem, u kojem matrica sustava nije unaprijed poznata. Predložena metoda omogućuje lokalizaciju curenja vode u realnom vremenu te se temelji na ekvivalentnom optimizacijskom problemu u kojem se minimizira razlika između izmjerenih i izračunatih tlakova pod istim uvjetima toka. Softverski dio digitalnog blizanca razvijen je pomoću programa EPANET (Rossman, 2000) i Python paketa WNTR, namijenjenog modeliranju, simulaciji i analizi tlačnih mreža.

Lokalizacija curenja vode provodi se iterativnom usporedbom izmjerenih tlakova s vrijednostima dobivenima kalibriranim hidrauličkim modelom, koji uključuje dodatne potrošnje za simulaciju potencijalnih curenja. Kada pretpostavljena lokacija i protok odgovaraju stvarnim vrijednostima, razlika između izmjerenih i simuliranih tlakova postaje minimalna, čime se identificira položaj curenja (Travaš i sur., 2025). Postupak se svodi na minimizaciju funkcije cilja definirane kao  $L^2$  norma vektora preostalog tlaka, koji opisuje razlike između izmjerenih i predviđenih tlakova na odabranim čvorovima mreže. Optimizacijske varijable uključuju koordinatu lokacije curenja vode duž cjevovoda i pripadni protok, čime se formira dvodimenzionalni prostor pretraživanja. Budući da analitički oblik funkcije cilja nije poznat, njezin se minimum određuje numerički, postupnim poboljšanjem početne pretpostavke.

Zbog multimodalne prirode postavljenog optimizacijskog problema, primjena algoritma optimizacije roja čestica (engl. PSO) bila je nužna (Clerc, 2010; Simon, 2013). Algoritam započinje generiranjem konačnog broja slučajnih rješenja, koja se tijekom iteracija ažuriraju na temelju individualnog i kolektivnog iskustva čestica. Kretanje čestica opisano je jednadžbama položaja i brzine, pri čemu se brzina određuje faktorom inercije te parametrima individualnog i globalnog učenja. Faktor inercije postupno se smanjuje tijekom iteracija, čime se ostvaruje ravnoteža između globalnog istraživanja prostora rješenja i lokalne optimizacije. Njegove se vrijednosti obično kreću od približno 1,0 u početnoj fazi do oko 0,2 u završnoj fazi konvergencije. Hardverski dio digitalnog blizanca temelji se na programibilnom mikrokontroleru koji u realnom vremenu prikuplja podatke senzora tlaka i protoka postavljenih na model tlačnog sustava u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci. Prikupljeni podatci se putem A/D pretvornika prosljeđuju računalu, gdje se obrađuju pomoću Python skripte u realnom vremenu.

Predložena metodologija omogućuje uvođenje dodatnih ograničenja radi sužavanja prostora pretraživanja, kao i razmatranje više istodobnih lokacija curenja, uz povećanje računalnih zahtjeva. Opisani postupak čini temelj digitalnog blizanca tlačnog cjevovodnog sustava, koji omogućuje pouzdanu detekciju i lokalizaciju curenja u stvarnom vremenu, u skladu s ciljevima ovoga rada.

Rješavanje ovako postavljenog problema uključuje inverzno modeliranje sustava. U konvencionalnom slučaju sustav se opisuje matricnom jednadžbom  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ , gdje je  $\mathbf{A}$  poznata matrica karakteristika sustava,  $\mathbf{x}$  vektor nepoznatih tlakova  $p_i$ , a  $\mathbf{b}$  vektor potreba za vodom  $q_i$ . Pritom, kod lokalizacije curenja vode matrica sustava  $\mathbf{A}$  nije unaprijed poznata, jer su lokacija i intenzitet curenja nepoznati.

Brzina toka iz područja curenja mijenja se s promjenama tlaka (Clayton i Van Zyl, 2007), pa površina otvora curenja predstavlja dodatnu nepoznanicu. Za zadani raspored potreba za vodom  $q_i$ , lokalizacija se provodi iterativnom usporedbom izmjerenih tlakova s vrijednostima dobivenima kalibriranim hidrauličkim modelom, koji uključuje dodatne potrošnje vode  $\tilde{q}_i$  za simulaciju curenja vode. Ako pretpostavljena lokacija i količina dodane potrošnje vode odgovaraju curenju, razlika između izmjerenih  $p_i$  i predviđenih tlakova  $\tilde{p}_i$  bit će minimalna. Time se problem lokalizacije svodi na minimizaciju funkcije cilja:

$$G(\mathbf{x}) = \|\mathbf{r}(\mathbf{x})\|_2, \quad (1)$$

zavisna o vektoru reziduala tlaka

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \mathbf{p} - \tilde{\mathbf{p}}(\mathbf{x}), \quad (2)$$

koji ima  $m$  komponenti, znatno manje od ukupnog broja spojeva, te služi za grupiranje razlika između vektora izmjerenih tlakova  $\mathbf{p}$  i vektora tlakova predviđenih hidrauličkim modelom  $\tilde{\mathbf{p}}(\mathbf{x})$  na spoju  $k$ , za pretpostavljeni položaj curenja  $x$  i protok  $\tilde{q}$ , objedinjene u vektoru optimizacijskih varijabli

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x \\ \tilde{q} \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Lokacija curenja određena je koordinatom  $x$ , koja se kontinuirano mijenja duž cjevovoda, čime se formira dvodimenzionalni prostor pretraživanja. Budući da analitički oblik funkcije cilja nije poznat, njezin se minimum određuje numerički, iterativnom korekcijom početne pretpostavke. Za minimizaciju funkcije cilja traži se vektor  $\mathbf{x}$  koji minimizira vrijednost funkcije cilja, a postupak se provodi primjenom metode optimizacije roja čestica ili kraće PSO metoda (Clerc, 2010). Algoritam započinje generiranjem konačnog broja  $n_p$  slučajnih rješenja  $\mathbf{x}_{p,e}$ , koja se za  $p = 1, \dots, n_p$  iterativno ažuriraju tijekom iteracija  $e$ . U okviru PSO metode se pretpostavljena rješenja interpretiraju kao čestice koje se postupno kreću kroz prostor pretraživanja u potrazi za optimalnim rješenjem. Promatrajući njihovo gibanje kao gibanje materijalnih točaka, položaj čestice  $\mathbf{x}_{p,e+1}$  na početku sljedeće iteracije  $e+1$  može se odrediti sa

$$\mathbf{x}_{p,e+1} = \mathbf{x}_{p,e} + \mathbf{v}_{p,e+1} \cdot l_r, \quad (4)$$

gdje  $\mathbf{x}_{p,e}$  označava trenutni položaj čestice,  $\mathbf{v}_{p,e+1}$  njezinu brzinu, a  $l_r$  fiktivni vremenski parametar koji predstavlja vrijeme potrebno za učenje i razmjenu informacija između čestica. PSO metoda oponaša gibanje jedinki u kolonijama, poput gibanja mrava pri potrazi za hranom, čija je učinkovitost objašnjiva evolucijskim načelima. Kretanje svake čestice opisano je individualnom komponentom temeljenom na vlastitom iskustvu i kolektivnom komponentom temeljenom na „iskustvu“ roja, što se matematički modelira jednadžbom brzine (Simon, 2013):

$$\mathbf{v}_{p,e+1} = w \cdot \mathbf{v}_{p,e} + c_1 \cdot \hat{\mathbf{r}}_1 \circ (\mathbf{x}_{\text{opt},e} - \mathbf{x}_{p,e}) + c_2 \cdot \hat{\mathbf{r}}_2 \circ (\mathbf{x}_{\text{opt},g} - \mathbf{x}_{p,e}), \quad (5)$$

gdje  $\mathbf{v}_{p,e+1}$  označava brzinu čestice  $p$  u iteraciji  $e+1$ ,  $\mathbf{v}_{p,e}$  njezinu brzinu u prethodnoj iteraciji,  $w$  faktor inercije,  $c_1$  i  $c_2$  parametre individualnog i kolektivnog učenja,  $\mathbf{x}_{p,e}$  trenutne koordinate čestice,  $\mathbf{x}_{\text{opt},e}$  njezin lokalni optimum te  $\mathbf{x}_{\text{opt},g}$  globalni optimum. Vektori  $\hat{\mathbf{r}}_1$  i  $\hat{\mathbf{r}}_2$  slučajne su veličine iz intervala  $[0,1]$ , a u izrazu se koristi Hadamardov produkt. Faktor inercije  $w$  postupno se smanjuje tijekom iteracija, obično od oko 1,0

do približno 0,2, čime se postiže ravnoteža između globalnog istraživanja i lokalne konvergencije. Prvi član jednadžbe potiče diverzifikaciju pretraživanja, dok preostala dva člana omogućuju intenzifikaciju oko lokalnog i globalnog optimuma.

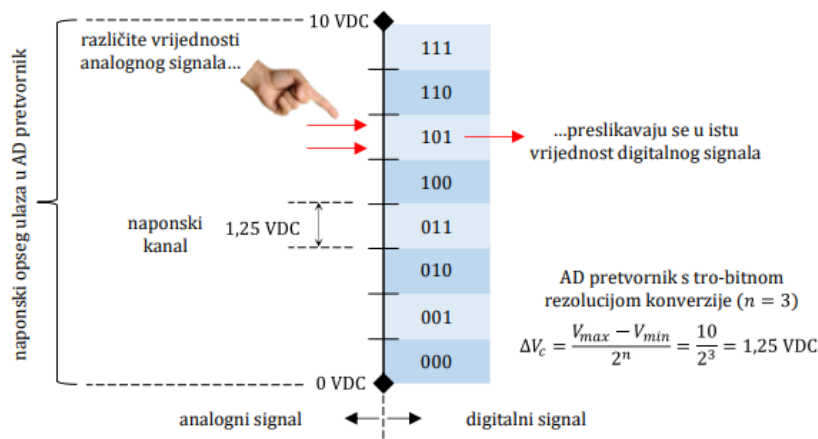
### 3 Kalibracija matematičkog modela

Digitalni bliznac fizičkog sustava zahtijeva kalibrirani računalni model (Koppel i Vassiljev, 2009). U ovom radu primijenjen je hidraulički model vodoopskrbnog sustava, pri čemu su hrapavost cijevi  $\varepsilon$  i koeficijenti lokalnih gubitaka  $\zeta$  kalibrirani tako da se pri istim potrebama za vodom  $q_i$  izmjereni i simulirani tlakovi podudaraju (Vassiljev i sur., 2015). Time se uspostavlja početno stanje sustava bez pretpostavljenih curenja, dok se eventualna postojeća curenja odražavaju na vrijednosti parametara  $\varepsilon$  i  $\zeta$ . Kalibracija se temelji na neizravnom određivanju hrapavosti stjenki cijevi, budući da se ona ne može izravno izmjeriti.

Vrijednost  $\varepsilon$  određuje se preko hidrauličkih parametara protoka, povezivanjem s Darcyjevim koeficijentom trenja  $\lambda$ , promjerom cijevi  $D$  i Reynoldsovom brojem  $N_{Re}$  pomoću Swamee-Jainove jednadžbe (Swamee i Jain, 1976) koja vrijedi u raspon  $10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2}$  i  $5000 < N_{Re} < 10^8$ , pri čemu je odstupanje od Colebrook-Whiteove jednadžbe manje od 1%. Za izmjereni pad tlaka u sustavu, poznavajući geometrijske i kinematičke karakteristike toka, hrapavost cijevi se može odrediti iz predmetne jednadžbe te je u tu svrhu neophodno uvažiti njenu nelinearnost (Travaš i sur., 2025).

#### 3.1 AD konverzija signala

U okviru hardverske postavke digitalnog blizanca posebnu pozornost potrebno je posvetiti točnosti mjerenja. Iz tog razloga u nastavku će se detaljnije razmotriti analogno-digitalna (AD) konverzija prikupljenih signala, pri čemu se tlakovi i protoci u obliku naponskih signala dovode na računalo radi daljnje obrade, Slika 1. Analogni signali koji dolaze sa spojenih senzora moraju se najprije diskretizirati u vremenu, za što se primjenjuje Nyquistov teorem uzorkovanja, prema kojem frekvencija uzorkovanja mora biti najmanje dvostruko veća od frekvencije analognog signala (Travaš, 2023).



Slika 1. Ilustracija AD pretvorbe signala s osnovnim karakteristikama pretvorbe (Travaš, 2023).

Osim vremenske diskretizacije, u trenutku uzorkovanja potrebno je provesti i kvantizaciju signala. U tu se svrhu koristi sklop za uzorkovanje i zadržavanje (Sample & Hold, S&H), koji zadržava trenutačnu vrijednost analognog signala tijekom trajanja AD pretvorbe. Time se omogućuje preciznija pretvorba analognog signala u digitalni oblik, što je osobito važno u mjeriteljstvu, budući da AD konverzija ima značajan utjecaj na ukupnu točnost mjerenja. Pri pretvorbi analognog signala u digitalni oblik ključnu ulogu ima broj bitova koje koristi AD pretvornik. Kao što je prikazano na Slici 1, u pojednostavljenom slučaju 3-bitnog AD pretvornika moguće je razlikovati osam diskretnih razina napona, odnosno reproducirati osam binarnih vrijednosti. Drugim riječima, ukupni naponski raspon signala koji dolazi sa senzora u tom se slučaju dijeli na osam razina.

Povećanjem broja bitova povećava se i razlučivost mjerenja, što je u ovom radu od posebne važnosti. Za mjerenje tlakova i protoka u fizikalnom modelu koriste se senzori kompatibilni s Arduino pločicom, koja omogućuje 10-bitnu AD konverziju. Time se analogni signali dobiveni sa senzora dijele na 1024 diskretna inkrementa, čime se postiže visoka razina preciznosti mjerenja. Arduino pločica je programirana narednim instrukcijama:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Inicijalizacija serijske komunikacije na 9600 baud rate
  // Postavke za senzore tlaka
  for (int i = 0; i < numPressureSensors; i++) {
    pinMode(pressureSensorPins[i], INPUT);
  }
  // Postavke za senzore protoka
  for (int i = 0; i < numFlowSensors; i++) {
    pinMode(flowSensorPins[i], INPUT);
    switch(i) {
      case 0: attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowSensorPins[i]), ISR0, RISING); break;
      case 1: attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowSensorPins[i]), ISR1, RISING); break;
      case 2: attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowSensorPins[i]), ISR2, RISING); break;
      case 3: attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowSensorPins[i]), ISR3, RISING); break;
      case 4: attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowSensorPins[i]), ISR4, RISING); break;
    }
  }
}
```

U prikazanom programu mikrokontroler u funkciji setup() inicijalizira serijsku komunikaciju brzinom 9600 bps te konfigurira ulazne pinove za senzore tlaka i protoka. Posebno je važno što se za senzore protoka koristi prekidni način rada (attachInterrupt), čime se impulsi s mjerača bilježe odmah pri pojavi brida signala, neovisno o tome što se u glavnoj petlji trenutno izvršava. Time se postiže pouzdano brojanje impulsa i pri većim frekvencijama, što je ključno za točan izračun protoka. Ovakav pristup povećava vremensku točnost sustava, što je posebno važno kod dinamičkih promjena protoka. Osim toga, razdvajanje prikupljanja podataka putem prekida i njihove obrade u glavnoj petlji doprinosi stabilnosti programa i omogućuje pouzdan rad sustava u realnom vremenu (Gal, 2024).

```
void loop() {
  // Očitavanje podataka sa senzora tlaka i protoka

  if (millis() - lastMeasurementTime >= measurementInterval) {
    lastMeasurementTime = millis();
    String dataString = "";

    // Prikupljanje prosječnih vrijednosti tlaka
    for (int i = 0; i < numPressureSensors; i++) {
      float averagePressure = (pressureSums[i] / pressureReadingsCount) - correctionValues[i];
      dataString += "PS";
      dataString += (i + 1);
      dataString += ":";
      dataString += String(averagePressure, 3);
      if (i < numPressureSensors - 1) {
        dataString += ",";
      }
      pressureSums[i] = 0.0;
    }
    pressureReadingsCount = 0;

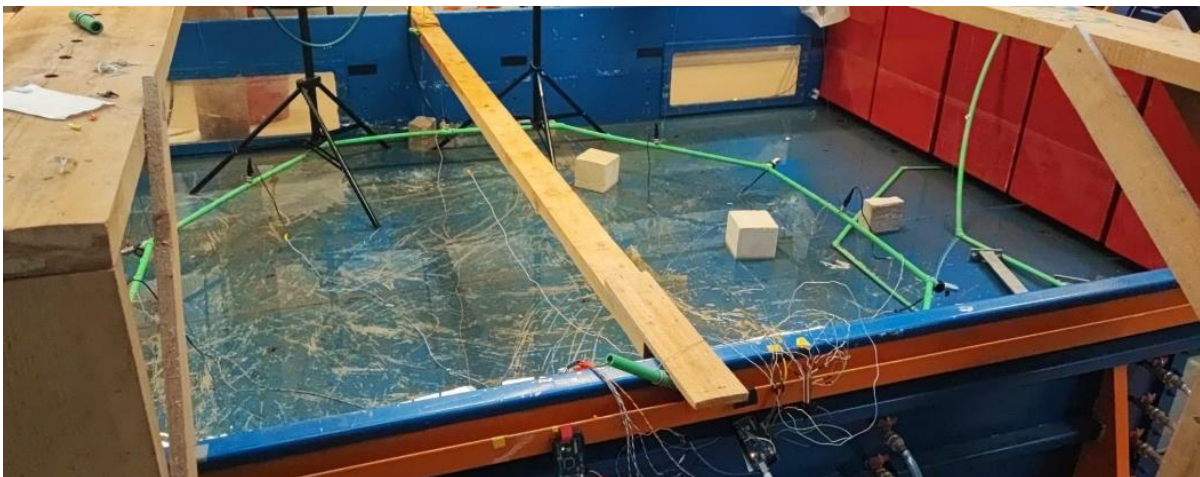
    // Prikupljanje vrijednosti protoka
    for (int i = 0; i < numFlowSensors; i++) {
      float flowRateLMin = calculateFlowRate(flowPulseCounts[i], calibrationFactors[i]);
      flowPulseCounts[i] = 0;
      float flowRateM3Sec = flowRateLMin * 0.001 / 60;
      dataString += ",";
      dataString += "FS";
      dataString += (i + 1);
      dataString += ":";
      dataString += String(flowRateM3Sec, 6);
    }
    // slanje podataka preko serijskog porta kao jedne linije
    Serial.println(dataString);
  }
  delay(100); // Kratka pauza kako bi se spriječilo preopterećenje serijskog porta
}
```

U funkciji loop() podaci se obrađuju periodički na temelju vremenskog uvjeta (millis()), pa se u svakom mjernom intervalu formira jedna tekstualna linija s rezultatima: za tlakove se šalju prosječne vrijednosti dobivene iz akumuliranih suma (uz korekciju pomoću correctionValues), dok se protoci računaju iz broja impulsa i kalibracijskih faktora, te se zatim pretvaraju iz L/min u m<sup>3</sup>/s. Na kraju se svi podatci šalju serijskim portom u jednoj liniji, što pojednostavljuje sinkronizaciju i parsiranje na računalu te olakšava integraciju mjerenja u obradu u realnom vremenu unutar digitalnog blizanca. Korištenje vremenskog upravljanja mjerenjima omogućuje da se očitavanja provode u pravilnim intervalima bez blokiranja izvođenja programa, čime se postiže bolja kontrola nad učestalošću slanja podataka. Resetiranjem akumuliranih vrijednosti nakon svakog mjernog ciklusa osigurava se da svako izvješće predstavlja neovisno i ažurno stanje sustava.

Nakon prikupljanja podataka o potrošnji vode  $q_i$  i tlakovima  $p_i$ , oni se u stvarnom vremenu prenose u središnju računalnu jedinicu i obrađuju prema razvijenoj metodologiji. Za računalnu implementaciju posebno je prikladan programski jezik Python (Van Rossum i Drake, 2009), koji omogućuje korištenje paketa WNTR (engl. *Water Network Tool for Resilience*, Klise i sur., 2020) te povezivanje s hidrauličkim modelima razvijenima u programu EPANET (Rossman, 2000). U tom okruženju algoritam lokalizacije implementira se iterativnim postupkom, pri čemu se različite pretpostavke položaja i intenziteta curenja testiraju sve dok se ne postigne minimum ciljne funkcije. Time se ostvaruje integracija mjernih podataka, hidrauličkog modela i optimizacijskog algoritma unutar jedinstvenog sustava digitalnog blizanca.

#### 4 Laboratorijska ispitivanja i rezultati

Predložena metodologija ispitana je u laboratorijskim uvjetima na fizičkom modelu tlačnog cjevovodnog sustava prikazanom na Slici 2. Radi simulacije zatvorene zone mjerenja, cjevovod je oblikovan u pravilni oktaedar s unutarnjim kutovima od 135°. Stranice duljine 1 m izrađene su od PPR cijevi unutarnjeg promjera 13,2 mm, koje se uobičajeno primjenjuju u kućnim instalacijama. Zbog male hrapavosti i kratke duljine cijevi, u njih je ugrađeno tanko uže radi povećanja trenja, pri čemu je kalibracijom određena ukupna hrapavost od 0,11 mm. Tlakovi su mjereni manometrima raspona 0-0,35 bar, s točnošću od 1% punog raspona i izlaznim naponom 0-5 V (Gal, 2024).



**Slika 2.** Fotografija izrađenog sustava s mjernim uređajima u Laboratoriju za hidrotehniku.

Stalni ulazni tlak u fizikalnom modelu osiguran je korištenjem otvorenog spremnika vode postavljenog na kontroliranoj visini iznad modela. Spremnik je bio montiran na modularne nosače koji omogućuju jednostavno podešavanje njegove visine, čime se mogla precizno definirati piezometarska visina, odnosno ulazni tlak u sustav. Razina vode u spremniku održavana je konstantnom pomoću principa prelijevanja. Voda se u spremnik dovodila gumenim crijevom, dok je višak vode kontinuirano otjecao preko prelijevnog otvora, čime je

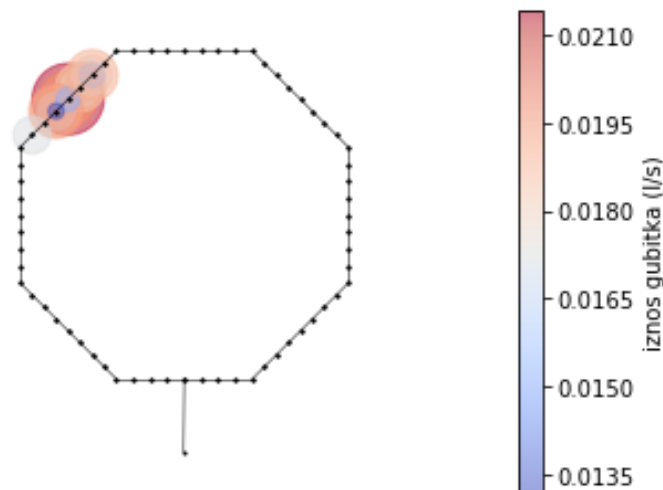
osigurano da razina vodnog lica ostane stabilna bez obzira na manje promjene u dotoku. Takvo rješenje omogućilo je održavanje konstantne piezometarske visine i time stabilnog ulaznog tlaka tijekom eksperimenata. Dodatno, razina vode u spremniku tijekom rada sustava kontinuirano se pratila kako bi se osiguralo da ostane na zadanoj visini. U postupku kalibracije model je bio spojen na spremnik postavljen na visinu od približno 2,45 m, čime je osiguran stabilan hidrostatski tlak u sustavu. Protok na izlazu, koji predstavlja potražnju za vodom  $q_i$ , mjereno je pomoću mjerača protoka postavljenih na suprotnim stranama mreže. Korišteni su mjerači raspona 1-30 l/min, s točnošću od 2%. Dodatni mjerač na ulazu služio je za određivanje razlike između dotoka i izlaza, čime je procijenjen protok povezan s curenjem. Ova razlika korištena je za validaciju rezultata dobivenih optimizacijskim postupkom.

Radi simulacije curenja, na cijevima su izrađeni kružni otvori promjera 5,0 mm, površine 20 mm<sup>2</sup>, koji su zatvarani gumenim čepovima. Otvori su postavljeni na vanjskoj strani oktaedra kako bi voda slobodno otjecala u bazen. Duž sustava, počevši od ulazne točke, otvori su raspoređeni u razmacima od 12,5 cm, čime je formirano ukupno 64 numerirana položaja za simulaciju curenja. Uklanjanjem pojedinih zatvarača omogućeno je generiranje curenja na različitim lokacijama.

Primjenom modularnih poklopaca simulirani su otvori površine 2, 4, 6 i 12 mm<sup>2</sup>, kao i potpuno otvoreni otvori od 20 mm<sup>2</sup>, čime je analiziran utjecaj intenziteta curenja na točnost lokalizacije. Hidraulički model sustava izrađen je u programu EPANET, pri čemu su spojevi postavljeni na istim lokacijama kao i otvori za curenje. Model obuhvaća 64 spoja i 65 cijevi duljine 12,5 cm. Takva struktura omogućuje simulaciju različitih scenarija curenja pomoću paketa WNTR te određivanje minimuma funkcije cilja. U fizikalnom modelu predviđeno je ukupno 64 potencijalne lokacije curenja, raspoređene duž sustava u razmacima od 12,5 cm čime je omogućeno generiranje velikog broja mogućih scenarija curenja.

U numeričkom modelu izrađenom u programu EPANET ulaz vode u sustav definiran je kao granični čvor s poznatom piezometarskom visinom, koja odgovara visini vodnog lica u otvorenom spremniku korištenom u laboratorijskom modelu. Na taj način je ulazni tlak u numeričkom modelu izravno povezan s hidrostatskim uvjetima eksperimentalnog sustava. Tlak u sustavu u fizikalnom modelu određen je visinskom razlikom između vodnog lica u spremniku i pojedinih točaka mreže, uz uvažavanje hidrauličkih gubitaka. Isti princip prenesen je i u EPANET model kako bi numerička simulacija vjerno reprodukcirala uvjete eksperimenta.

U okviru eksperimentalnog dijela validacije predložene metodologije za detekciju i lokalizaciju curenja vode, provedena su mjerenja na laboratorijskom tlačnom sustavu opremljenom senzorima tlaka i protoka te pripadajućom hardverskom i softverskom infrastrukturom za kontinuirano prikupljanje podataka, Slika 3. Mjerenja su provedena u kontroliranim hidrauličkim uvjetima za različite režime rada sustava, pri čemu su analizirane promjene tlakova uzrokovane prisutnošću lokalnih gubitaka. Dobiveni skupovi mjerenih tlakova korišteni su kao ulaz u postupak detekcije i lokalizacije curenja vode, a rezultati su interpretirani u odnosu na očekivano ponašanje sustava bez gubitaka.



**Slika 3.** Detektirani čvor s najvećom vjerojatnošću lokalizacije odgovara stvarnom položaju curenja.

Analiza je pokazala da se i vrlo male promjene tlaka mogu konzistentno povezati s pojavom lokalnih curenja vode, pri čemu je metodologija omogućila procjenu njihovog položaja i intenziteta. Kao ilustracija mogućnosti predložene metodologije, na Slici 3 prikazan je tipičan ishod lokalizacije curenja dobiven za jedan simulacijski scenarij, pri čemu je metodologija ispravno identificirala područje pojave gubitka u blizini stvarne lokacije curenja u mreži. Detektirani čvor s najvećom vjerojatnošću lokalizacije odgovara stvarnom položaju curenja, dok se manja odstupanja u okolnim čvorovima mogu pripisati vrlo malim razlikama u tlakovima duž sustava. Slični rezultati ostvareni su i u ostalim analiziranim scenarijima, pri čemu je uočeno da se točnost lokalizacije povećava s porastom intenziteta curenja vode, odnosno većim iznosima protoka gubitka. Za manje protoke curenja lokalizacija ostaje konzistentna, ali je prostorna razlučivost smanjena, što je u skladu s očekivanim ponašanjem sustava uslijed slabije izraženih hidrauličkih odstupanja.

## 5 Zaključak

Predstavljena je metodologija detekcije i lokalizacije curenja u tlačnim cjevovodnim sustavima u svrhu razvoja digitalnog blizanca, pri čemu je problem formuliran kao optimizacijska zadaća temeljena na minimizaciji razlike između izmjerenih i simuliranih tlakova pri zadanoj raspodjeli potrošnje vode. Metodologija se oslanja na preciznu kalibraciju hidrauličkog modela, pri čemu se postojeća manja curenja implicitno uzimaju u obzir kroz parametre hrapavosti cijevi i lokalnih gubitaka, koji se određuju neizravnom optimizacijom primjenom PSO metode. Predloženi pristup omogućuje istodobno određivanje položaja i intenziteta curenja te je pokazao obećavajuće mogućnosti u pogledu osjetljivosti na male promjene tlaka i točnosti procjene protoka. Unatoč tome, za potpunu procjenu robusnosti i opće primjenjivosti metodologije potrebno je provesti dodatna istraživanja na širem rasponu protoka i različitim geometrijskim karakteristikama sustava, kao i njezinu validaciju na stvarnim vodoopskrbnim sustavima, što je predviđeno u daljnjem razvoju istraživanja.

## Zahvale

Istraživanje je rezultat rada u okviru UNIRI Institucionalnog istraživačkog projekta „Izazovi upravljanja vodnim resursima u vrijeme klimatskih promjena s obzirom na proizvodnju pitke vode“ (uniri-iz-25-18) odobrenog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i mladih (financira Europska unija-NextGenerationEU).

## Literatura

- Bonilla, C.A., Zanfei, A., Brentan, B., Montalvo, I. and Izquierdo, J. (2022) “A digital twin of a water distribution system by using graph convolutional networks for pump speed-based state estimation”, *Water*, 14 (4), 514. <https://doi.org/10.3390/w14040514>.
- Brahmbhatt, P., Maheshwari, A. and Gudi, R.D. (2023) “Digital twin assisted decision support system for quality regulation and leak localization task in large-scale water distribution networks”, *Digital Chemical Engineering*, 9, 100127. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100127>.
- Chan, T.K., Chin, C.S. and Zhong, X. (2018) “Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection”, *IEEE Access*, 6, 78846-78867. doi:10.1109/ACCESS.2018.2885444.
- Clayton, C. and Van Zyl, J.E. (2007) “The effect of pressure on leakage in water distribution systems”, *Water Management*, 160, 109-114. <https://doi.org/10.1680/wama.2007.160.2.109>.
- Clerc, M. (2010) *Particle Swarm Optimization*. Hoboken, New Jersey, USA. John Wiley and Sons Inc. doi:10.1002/9780470612163.
- Fang, Q.S., Zhang, J.X., Xie, C.L. and Yang, Y.L. (2019) “Detection of multiple leakage points in water distribution networks based on convolutional neural networks”, *Water Supply*, 19 (8), 2231-2239. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.105>.
- Gal, E. (2024) “Digitalni blizanac fizikalnog modela tlačnog sustava namijenjen lokalizaciji gubitaka vode”, Diplomski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 81 strana.
- Gómez-Coronel, L., Santos-Ruiz, I., Torres, L., López-Estrada, F.R., Gómez-Peñate, S. and Escobar-Gómez, E. (2023) “Digital twin of a hydraulic system with leak diagnosis applications”, *Processes*, 11 (10), 3009. <https://doi.org/10.3390/pr11103009>.
- Klise, K.A., Hart, D.B., Bynum, M., Hogge, J., Haxton, T., Murray, R. and Burkhardt, J. (2020) *Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual: Version 0.2.3*. Washington, DC: U.S. EPA Office of Research and Development. EPA/600/R-20/185, 82.
- Koppel, T. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.11.015>.
- Lee, P.J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Vitovský, J.P. and Liggett, J. (2006) “Experimental verification of the frequency response method for pipeline leak detection”, *Journal of Hydraulic Research*, 44 (5), 693-707. <https://doi.org/10.1080/00221686.2006.9521718>.
- Liemberger, R. and Wyatt, A. (2019) “Quantifying the global non-revenue water problem”, *Water Supply*, 19 (3), 831-837. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>.
- Rossman, L.A. (2000) *EPANET 2.0 User's Manual*. Cincinnati, Ohio, USA U.S. Environmental Protection Agency.
- Simon, D. (2013) *Evolutionary Optimization Algorithms: Biologically-Inspired and Population Based Approaches to Computer Intelligence*. Hoboken, New Jersey, USA. John Wiley and Sons Inc.
- Soldevila, A., Fernandez-Canti, R.M., Blesa, J., Tornil-Sin, S. and Puig, V. (2017) “Leak localization in water distribution networks using Bayesian classifiers”, *Journal of Process Control*, 55, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2017.03.015>.
- Swamee, D.K. and Jain, A.K. (1976) “Explicit equations for pipe flow problems”, *Journal of the Hydraulics Division*, 102, 657-664. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004542>.
- Travaš, V. (2023) “Eksperimentalna hidraulika”, skripta iz kolegija Eksperimentalna hidraulika, Sveučilišni diplomski studij, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka.
- Travaš, V., Gal, E., Lučin, I. and Žic, E. (2025) „Digital twin for real-time leakage detection and localization in pressurized piping systems“. *Journal of Hydroinformatics*, 27 (3), 455-472.

- Van Rossum, G. and Drake, F.L. (2009) *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.
- Vassiljev, A., Koor, M. and Koppel, T. (2015) "Real-time demands and calibration of water distribution systems", *Advances in Eng. Software*, 89, 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.06.012>.
- Wu, Z.Y. and Sage, P. (2006) "Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration", *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, Cincinnati, Ohio, USA, pp. 1-11, [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)180](https://doi.org/10.1061/40941(247)180).