

Detekcija i lokalizacija gubitaka u cjevovodnim mrežama temeljena na numeričkoj optimizaciji

Bujačić, Jakov

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:904534>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**DETEKCIJA I LOKALIZACIJA GUBITAKA U CJEVOVODNIM
MREŽAMA TEMELJENA NA NUMERIČKOJ OPTIMIZACIJI**

Rijeka, ožujak 2024.

Jakov Bujačić

0069083645

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**DETEKCIJA I LOKALIZACIJA GUBITAKA U CJEVOVODNIM
MREŽAMA TEMELJENA NA NUMERIČKOJ OPTIMIZACIJI**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Stefan Ivić

Komentor: dr. sc. Ivana Lučin

Rijeka, ožujak 2024.

Jakov Bujačić

0069083645

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. VODOVODNO STANJE U HRVATSKOJ.....	2
3. METODE DETEKCIJE OŠTEĆENJA	6
4. MATEMATIČKI MODEL.....	13
4.1 EPANET	14
4.1.1 Princip fiksne potrošnje u čvorovima	14
2.1.2. Princip potrošnje čvorova ovisne o tlaku sustava	17
4.2 WNTR.....	19
5. DETEKCIJA I LOKALIZACIJA OŠTEĆENJA.....	21
5.1 DETEKCIJA OŠTEĆENJA.....	21
5.2 LOKALIZACIJA OŠTEĆENJA	23
5.2.1 Distribucija curenja u vodovodnoj mreži.....	23
5.2.2 Princip numeričke optimizacije	28
5.2.3 Granice pretraživanja i tijek optimizacije	31
5.2.4 Podjela mreže na manje segmente	38
5.2.5 Dvostruki cilj optimizacijske funkcije	40
5.2.6 Završna lokalizacija metodom zlatnog reza.....	41
6. REZULTATI.....	42
7. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA	53
POPIS SLIKA.....	54
POPIS TABLICA	56

SAŽETAK	57
ABSTRACT.....	58

IZJAVA

Izjavljujem da sam prema članku 7. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija samostalno izradio diplomski rad naslova „Detekcija i lokalizacija oštećenja u gubitaka u cjevovodnim mreža temeljena na numeričkoj optimizaciji“ pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Stefana Ivića i komentorice dr. sc. Ivane Lučin.

Jakov Bujačić, 12.03.2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Stefanu Iviću i komentorici dr. sc. Ivani Lučin na pomoći pri izradi diplomskog rada i završavanju sveučilišnog diplomskog studija strojarstva. Velike zahvale mojim roditeljima i obitelji koji su uvijek bili potpora u mom obrazovanju. Naravno veliko hvala i mojoj djevojci Lari na potpori i motivaciji pri izradi diplomskog rada i završavanju diplomskog studija.

1. UVOD

Cjevovodna mreža je sustav sastavljen od cijevi, pumpi, vodosprema i ostale infrastrukture dizajnirane za opskrbljivanje urbanog područja vodom. Izvor vode može biti iz postrojenja za pročišćavanje vode ili nekog prirodnog izvora vode. Glavni cilj vodovodnog sustava je osigurati pouzdanu i učinkovitu opskrbu vodom različitim infrastrukturama. Veliki problem kod vodoopskrbnih sustava predstavljaju gubici vode curenjem. Navedeni gubitci uzrokuju smanjenje učinkovitosti sustava i stvaraju značajne financijske gubitke. Dodatan problem predstavlja potencijalno onečišćenje vode uslijed ulaza onečišćenja kroz lokaciju oštećenja cijevi. S vremenom navedena oštećenja mogu se samo povećavati te u konačnici mogu dovesti do puknuća cijevi.

Detekcija takvih oštećenja vrši se analizom očitavanja tlakova i protoka na mjernim mjestima u cjevovodnoj mreži. Iako je lakše detektirati oštećenje usporedbom izmjerenih protoka, detekcije se općenito temelje na podacima izmjerenih tlakovima u vremenu. Detekcija i lokalizacija oštećenja u ovom radu temelji se na optimizacijskoj prilagodbi hidrauličkog modela, stoga je bitno osigurati da su ulazni podaci visoke kvalitete. Također, uređaji za mjerenje tlaka vode su jednostavniji i jeftiniji u odnosu na uređaje za mjerenje protoka. Jedno od mogućih pristupa jest detekcija uz pomoć strojnog učenja na temelju neuronskih mreža. Za taj pristup potrebno je pažljivo pripremiti model koji će na temelju trening podataka konfigurirati parametre neuronske mreže. Takav model omogućuje gotovo trenutačnu procjenu rješenja od strane modela. Navedeni princip nije apsolutno točan za problem detekcije i lokalizacije, ali omogućuje jako brzu evaluaciju sustava i vrlo je efikasan po pitanju računalnih resursa.

Ovaj rad obuhvatiti će drugo alternativno rješenje koje se temelji na numeričkim optimizacijama i korištenju algoritama za minimizaciju. Osnovni princip je uspostaviti funkciju koja evaluira pretpostavljenu lokaciju i intenzitet oštećenja na temelju već poznatih izmjerenih vrijednosti tlakova. Minimum funkcije biti će postignut ako parametri modela najbolje predstavljaju oštećenje u sustavu. U teoretski savršenom poklapanju stvarnog i simuliranog oštećenja, izmjereni tlakovi u vodoopskrbnom sustavu i tlakovi dobiveni iz simulacije biti će jednaki. Naravno, nužno je uzeti u obzir greške u mjerenju tlakova, devijacije u pretpostavljenim parametrima vodoopskrbne mreže, te variranja u potrošnji vode svakog potrošača u mreži.

2. VODOVODNO STANJE U HRVATSKOJ

Prema podacima iz Izvješća o stanju u sektoru vodnih usluga i radu vijeća za vodne usluge 2021. [1], podaci o potrošnji i isporučenosti vodovodnih usluga su sljedeći:

Tablica 1 Podaci o potrošnji i isporuci vode od 2016. do 2020. [1]

Godina	Zahvaćeno (m³)	Isporučeno kućanstvima i poslovnim korisnicima (m³)	Gubici (m³)	Gubici
2016.	458 124 280,00	237 311 733,28	220 812 546,72	48,20%
2017.	477 648 488,46	243 610 367,62	234 038 120,84	49,00%
2018.	476 947 018,65	244 732 358,91	232 210 321,99	48,69%
2019.	476 947 018,65	244 732 358,91	232 214 659,74	48,69%
2020.	467 975 418,94	234 603 334,59	233 372 084,35	49,87%
2021.	478 904 881,04	243 912 064,30	234 992 816,74	49,07%

Iz navedene tablice moguće je uočiti kako su gubici vode u sustavima gotovo 50%, što znači da pola volumena vode namijenjeno za potrošnju kućanstava ili poslovnim korisnicima istječe kroz cjevovodni sustav u okolinu. Potencijalni problem takve učinkovitosti vodovodnog sustava može biti kontaminacija koja ulazi u sustav kroz pukotine. Prema navedenom izvješću, kvaliteta vode je i dalje visoka i adekvatna za ljudsku uporabu. Drugi problem lošije kvalitete vodovodnog sustava je povećanje cijene vode. Cijena vode varira ovisno o lokaciji, prema podacima iz 2021. na lokacijama s najnižim cijenama, m³ vode je iznosio 9,47 kn (~1,26 €), dok je najviša cijena iznosila 33,21 kn (~4,41 €) po m³ vode. Prosječna cijena je iznosila 16,16 kn (2,15 €).

Također dani su podaci i o prosječnoj potrošnji vode po stanovniku, podatke je moguće uočiti u Tablici 2:

Tablica 2 Prosječna potrošnja vode od 2016. do 2021. [1]

Potrošnja vode	Dnevno po stanovniku (L)	Mjesečno po kućanstvu (m³)
2016.	131	11
2017.	134	11,26
2018.	127	10,67
2019.	132	11,10
2020.	135	11,34
2021.	143	12,05

Ukoliko vrijedi pretpostavka da je prosječna učinkovitost vodovodnog sustava 50%, prema danim podacima u 2021. godini, Hrvatski vodovod mora pumpati 286 litara dnevno vode po glavi stanovnika od kojih 143 isteče iz sustava uslijed oštećenja.

Ovaj rad obuhvaća lokalizaciju oštećenja na sustavima s 100 do 500 potrošača, pojedine vodovodne mreže mogu sadržavati do nekoliko stotina tisuća priključaka po vodovodnoj mreži, ovisno o veličini grada i potrebama stanovništva. U 2019. godini je u Hrvatskoj zabilježen ukupan broj od 1 276 129 vodovodnih priključaka. Povećanjem broja potrošača raste kompleksnost mreže vodovodnog sustava i zahtjevnost lokalizacije brojnih oštećenja, što ukazuje na potrebu za korištenjem jake računalne moći i superračunala.

Razlog lošije učinkovitosti može se pripisati zastarjeloj infrastrukturi koja je podložna oštećenjima zbog starosti materijala, teškim vozilima koja uzrokuju velika naprezanja na tlo ispod kojeg se nalaze cijevi, građevinskim radovima i slično. Starost infrastrukture moguće je uočiti pri usporedbi učinkovitosti modernih mreža, odnosno količini gubitaka u sustavu. Primjerice, vodovodni sustav u gradu Londonu ima učinkovitost od 30%, odnosno gubitke od 70% volumena vode. London je jedan od prvih Europskih gradova koji je imao funkcionirajući vodoopskrbni sustav. Uslijed tako stare infrastrukture grad trpi velike vodovodne gubitke uz veću opasnost od onečišćenja vode u cijevima [2].

Primjerice, 17. srpnja 2022. u Rijeci dogodilo se puknuće vodovodne cijevi koje je uzrokovalo obustavu vodoopskrbe u dijelu grada. Navedena cijev je proizvedena u Austro-Ugarskoj te se pretpostavlja da je do puknuća došlo uslijed starosti materijala cijevi [3].



Slika 2.1 Prikaz puknute cijevi [3]



Slika 2.2 Prikaz zahvaćenog područja radovima [3]



Slika 2.3 Prikaz poplavljenog područja u Zagrebu [4]

Puknuće cijevi ima velike financijske posljedice. Osim samog gubitka volumena vode kroz pukotinu, troškovi hitne sanacije i ponovno pročišćavanje zahvaćenog područja čine većinu financijskih opterećenja na Hrvatski Vodovod. Na slici 2.3 moguće je uočiti poplavljeno područje u Zagrebu uslijed puknuća cijevi. Iz tog razloga ulaganje u opremu za detekciju i lokalizaciju oštećenja može dovesti do dugoročnih pogodnosti za vodovodni sustav, kvalitetu vode i cijenu vode. U sljedećem poglavlju su opisane trenutno najčešće metode detekcija oštećenja.

3. METODE DETEKCIJE OŠTEĆENJA

Radi poboljšanja sustava i ograničavanja gubitaka vode iz vodovodnih sustava, razvijene su metode za detekciju oštećenja. Osnovna podjela metoda detekcija mogu se opisati kao pasivne i aktivne metode detekcija. Pod pasivne metode detekcije spadaju vizualno zapažanje oštećenja i korištenje senzora. Senzorima je moguće preciznije odrediti lokaciju oštećenja korištenjem prijenosne opreme na područje za koje se sumnja da sadrži oštećenu cijev. Princip rada takve opreme temelji se na detekciji zvuka ili vibracija koje uzrokuje istjecanje vode iz cijevi ili vizualnim senzorima (CCTV) [5].

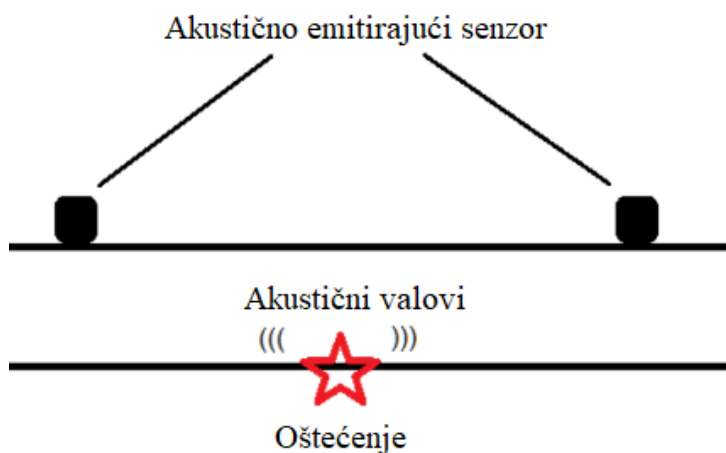


Slika 3.1 CCTV senzor [5]

Iako su pasivne metode precizne i točne, sa sobom nose mnogo mana kao što su cijena izvođenja, vrijeme izvođenja i potreba za iskusnim korisnicima opreme.

Alternativne metode detekcije oštećenja temelje se na akustičnim sensorima, radarima za pregled cijevi kroz tlo, praćenje injektirane supstance u cijevi, korištenje termografskih kamera, mjerenje protoka u nekoliko točaka na području, sensorima s optičkim vlaknima i daljinsko vrtložno strujanje polja (RFEC).

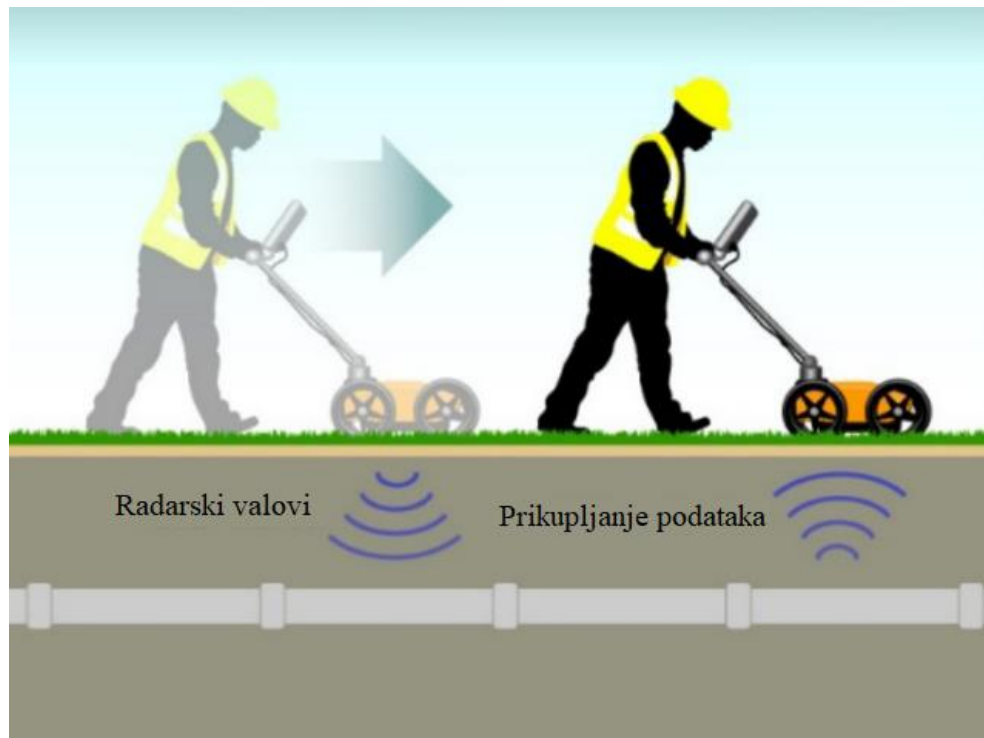
Tehnika emisije akustike temelji se na širenju elastičnih valova koji se oslobađaju iz aktivnog izvora. Voda koja istječe stvara akustički signal dok prolazi kroz oštećenje. Pri slučaju oštećenja, akustički signal se širi duž cjevovoda koji je detektiran od strane akustičkih senzora instaliranih duž cjevovoda, ako je signal primljen od jednog senzora jači i ima veću magnitudu tada se lokacija curenja može jednostavno izračunati. Na slici 3.2 je prikazan princip rada ove metode.



Slika 3.2 Senzori za detekciju oštećenja putem akustičnog slušanja [5]

Ova tehnika ima prednost detekcije curenja u stvarnom vremenu, visoke točnosti detekcije i lokalizacije, te je općenito brža od drugih metoda. Međutim, signali ovise o vrsti materijala cijevi, mijenjajući uvjete širenja zvuka iz jednog dijela cjevovoda u drugi. Vanjski izvori kao što su pozadinska buka također utječu na signal. Također metoda nije primjenjiva za dugačke cjevovode jer zahtijeva veliki broj senzora što znatno povećava troškove. Nadalje, mnoge akustičke tehnike su neosjetljive na velika curenja jer ne generiraju dovoljno vibracija u visokim frekvencijama.

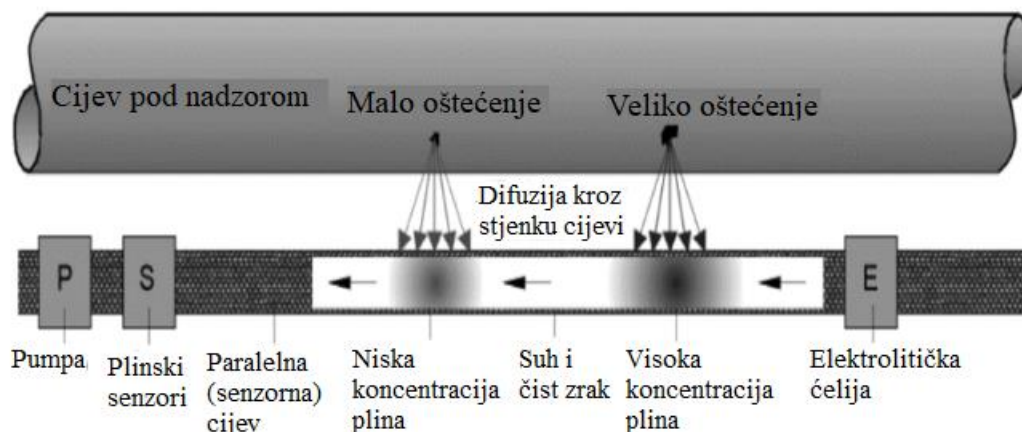
Princip radara za pregled cijevi kroz tlo temelji se na snimanju cijevi pod zemljom gdje se elektromagnetski uzorci regija curenja detektiraju u snimljenim slikama. Lokacija oštećenja se zatim može locirati kroz izravnu interpretaciju slika.



Slika 3.3 Radar za pregled cijevi kroz tlo [5]

Na ovu metodu detekcije utječe vrsta tla u kojem su cijevi zakopane. Rezultati ukazuju da su refleksije ispod regija curenja značajno slabije od okolnog tla za većinu homogenog tla, te zbog toga nije moguće promatrati fenomen praznina za na nehomogenom tlu. Također primjenjivost ove metode za duboko zakopane cijevi je ograničena, iz razloga što vlaga u tlu ili nehomogenost tla ne mogu pružiti dovoljno visoke razine snage signala koji bi bili veći od granice šuma.

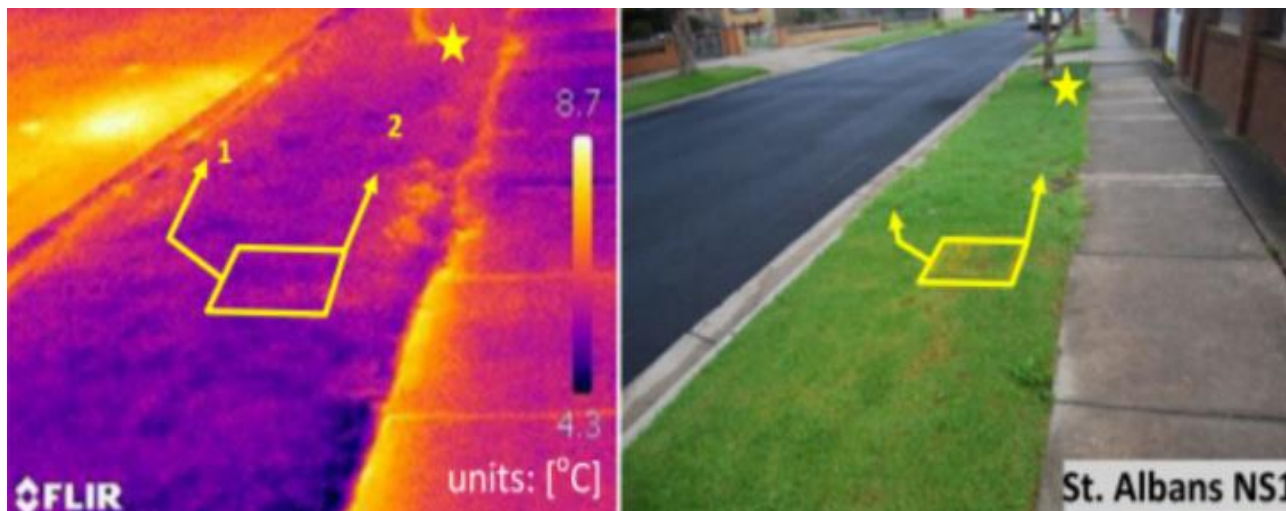
Praćenje injektirane supstance je efikasna i dokazana metoda koja može detektirati čak i najmanja curenja. Pomoćni cjevovod s ugrađenim sensorima obično se umeće paralelno s cjevovodom koji zahtijeva praćenje, tako da u slučaju curenja, senzori mogu odmah poslati upozorenje inženjerima.



Slika 3.4 Metoda praćenja injektirane supstance [5]

Mana ove metode jest moguća potreba za filtracijom vode prije upotrebe. Također može postojati rizik od ekološke kontaminacije u slučaju oštećenja i curenja supstance u okoliš. Metoda nije prigodna za česte i velike pretrage injektiranjem plina radi visoke cijene plina. Instalacija ugrađenih senzora zajedno s postojećim podzemnim sustavom distribucije zahtijeva puno ručnog rada za iskopavanje tla što je prilično nepraktično.

Metoda infracrvene termografije se temelji na mjerenju infracrvenog zračenja prostornih površina i teoriji prijenosa energije za identifikaciju termičkih anomalija. Obzirom da curenje vode uzrokuje razlike u temperaturi u blizini curenja, termografska kamera može detektirati curenja snimanjem termičkog profila površine iznad cjevovoda.

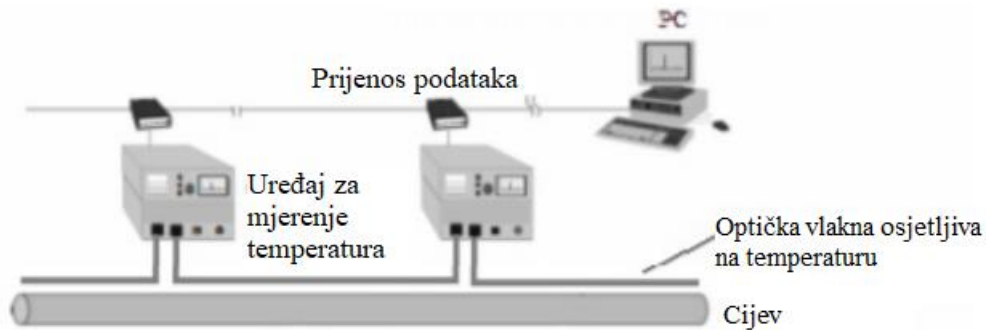


Slika 3.5 Metoda infracrvene termografije [5]

Detekcija curenja korištenjem infracrvene termografije ima nisku stopu uspjeha. Infracrvena termografija je pod utjecajem mnogih faktora kao što su vremenski uvjeti, uvjeti tla i površine. Da bi se povećala vjerojatnost detekcije, termički kontrast između curenja i okolnog okruženja trebao bi biti maksimalan. Stoga se detekcija može provoditi isključivo prije izlaska sunca kada je utjecaj Sunčevog zračenja zanemariv.

Mjerenje protoka i tlakova u određenim točkama je dio velike složene mreže distribucije. Ova sektorizacija se provodi zatvaranjem ventila ili od spajanjem cijevi mreže s mjerenim protokom na ulazu i izlazu. Time je omogućeno kontinuirano praćenje mjerenja protoka na ulazu i izlazu. Naknadnom analizom se izračunava razina curenja unutar područja. Ukoliko dođe do oštećenja i curenja vode iz sustava, brzina toka vode se povećava uz primjetan pad tlaka. Ova metoda omogućava trenutačno upozorenje na bilo koje prisutno oštećenje u sustavu. Optimalan pristup u analizi ovom metodom je pri minimalnom protoku. Ova metodu je najefikasnije provoditi noću kada je potražnja potrošača najniža. Na taj način je magnituda curenja nad ukupnim protokom u sustavu na najvišoj stopi. Mana metode je ta da granica i veličina područja ovisi o topografskim uvjetima i broju korisnika vode, područje ne može biti previše veliko radi teže lokalizacije curenja.

Distribuirani senzori optičkih vlakana imaju visoku toleranciju na električni šum i stabilnost mjerenja, otpornost na koroziju i pružaju mogućnost detekcije na velikim udaljenostima s mnogo mjernih točaka kroz jedan optički vod. Curenja iz cjevovoda uzrokuju lokalne temperaturne anomalije u blizini, instalirana optička vlakna koja mjere temperaturu preko cijelog cjevovoda mogu detektirati curenje u kratkom vremenu.

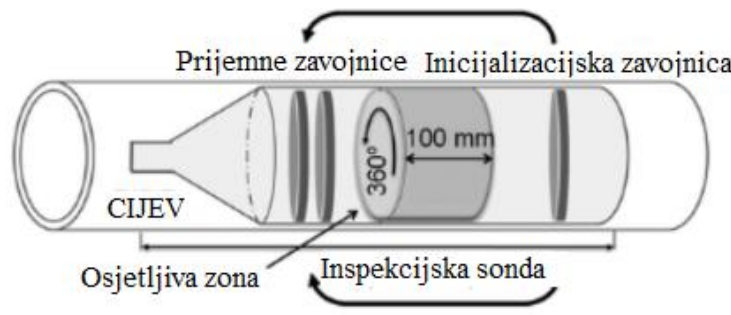


Slika 3.6 Metoda primjene senzora s optičkim vlaknima [5]

Iako ih to čini jako pogodnima za detekciju oštećenja, ova metodologija može se primijeniti samo za nadzor linearnih cjevovoda. Također, trošak implementacije takvog sustava je vrlo visok.

Tehnika daljinskih vrtložnih struja (RFEC) temelji se na niskofrekventnoj izmjeničnoj struji i transmisiji kroz stjenku za pregled cijevi uz pomoć prolaska sonde kroz stjenku cijevi. Navedeni pristup omogućava detekciju i vanjskih i unutarnjih oštećenja korozijom koja nisu vidljiva golim okom.

Iako RFEC metoda pruža pouzdane informacije o oštećenjima uslijed korozije, ne može detektirati curenje. Curenje kroz korozivna oštećenja pogodnije je detektirati prethodno navedenim metodama detekcije oštećenja. Ova metoda je primjenjiva samo na materijale s dobrom vodljivošću električne struje.



Slika 3.7 RFEC metoda [5]

Ovaj rad obuhvaća prilagodbu rezultata računalne simulacije na dostupna mjerenja. Pri prisutnosti otvora oštećenja dolazi do pada tlaka u okolnom mediju koji proizvodi fenomen nestacionarnog vala tlaka. Metoda zasnovana na nestacionarnim simulacijama predviđa lokaciju o prisutnosti oštećenja iz mjerene ili modelirane tlakove unutar mreže cjevovoda.

Nestacionarnim simulacijama analiziraju se podaci o tlaku prikupljeni tijekom prisutnosti oštećenja u sustavu. Zatim se metodom minimizacije razlike između promatranih i izračunatih parametara pronalazi stanje najbližije inicijalnom. Takav model uključuje korištenje zakona o očuvanju i jednadžbi koje opisuju fizičke pojave u radu mreže cjevovoda. Glavni cilj je izrada modela koji s visokom preciznošću može simulirati stvarnu mrežu cjevovoda.

Glavni nedostatak metode je taj što se temelji na redovitom prikupljanju podataka u cjevovodu, što zahtjeva višu cijenu infrastrukture. Također, metoda je osjetljiva na utjecaje šumova ili drugih smetnji u složenoj mreži. Uslijed tih razloga, metoda ima nisku točnost detekcije u slučaju mikroprozornog curenja.

4. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model kojim se može opisati ponašanje cjevovodnih mreža temelji se većinski na Bernoullijevim hidrostatičkim jednažbama. Na model utječe jako puno konstanti sustava koje aproksimiraju fizičke vrijednosti elemenata poput hrapavosti površine, položaja cijevi, koeficijenta lokalnih gubitaka i slično. Jasno je kako velika odstupanja tih aproksimacija od stvarnih vrijednosti mogu rezultirati velikim odstupanjima u rezultatima, stoga je bitno što je moguće preciznije aproksimirati navedene vrijednosti. Bernoullijeva jednažba za dvije točke ima sljedeći oblik:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + h_L + h_D + h_P \quad (4.1)$$

Gdje je:

p – hidrostatički tlak

v – brzina

ρ – gustoća

h – visina

g – konstanta ubrzanja sile teže

h_D – lokalni gubici energije

h_L – duljinski gubici energije

h_P – dobavna visina pumpe

4.1 EPANET

EPANET (eng. *Environmental Protection Agency Network Evaluation Tool*) je softverski paket za modeliranje vodoopskrbnih sustava razvijen od strane Agencije za Zaštitu Okoliša Sjedinjenih Američkih Država (*EPA – Enviromental Protection Agency*). EPANET omogućuje hidrauličke simulacije vodoopskrbnih sustava, čime je moguće dobiti uvid u fizikalne vrijednosti poput tlaka, protoka i razine vode u svim točkama u mreži. Također moguće je izvršiti analizu kvalitete vode simuliranjem transporta onečišćenja i aditiva u vodoopskrbnom sustavu, što pomaže procijeniti kvalitetu vode i otkriti potencijalne probleme zagađenja [7].

Postoje dva osnovna pristupa za hidrauličke simulacije vodoopskrbnih sustava: princip fiksne potrošnje u čvorovima i princip varijabilne potrošnje u čvorovima ovisno o tlaku u sustavu.

4.1.1 Princip fiksne potrošnje u čvorovima

Prvi princip temelji se na fiksnoj potrošnji čvorova (potrošača), dok protoci i tlakovi u sustavu variraju. Relacija gubitaka hidrauličke visine uslijed trenja i protoka između dva čvora opisuje se sljedećim izrazom:

$$h_{Lij} = r \cdot q_{ij} \cdot |q_{ij}|^{n-1} + m \cdot q_{ij} \cdot |q_{ij}| \quad (4.2)$$

Gdje je:

h_{Lij} – gubitak hidrauličke visine

q_{ij} – protok između dva čvora

r – koeficijent otpora

n – eksponent protoka

m – koeficijent lokalnih gubitaka

Dobitak hidrauličke visine uslijed djelovanja pumpe, računa se po sljedećem izrazu:

$$h_{Lij} = -\omega^2 \cdot \left(h_0 - r \cdot \left(\frac{q_{ij}}{\omega} \right)^n \right) \quad (4.3)$$

Gdje je:

h_0 – pogonska visina pumpe

ω – relativna postavka brzine

r, n – karakteristični koeficijenti pumpe

Kako bi se upotpunio sustav jednažbi, zakon o očuvanju mase u svakom čvoru mora biti zadovoljen. Zbroj svih protoka vode koji ulaze u čvor mora biti jednak protoku potrošnje istog čvora. Sljedećom jednažbom opisan je zakon o očuvanju mase za jedan čvor:

$$\sum_j q_{ij} - D_i = 0 \quad (4.4)$$

Gdje q_{ij} predstavlja protok u čvor. Konvencionalno se smatra da je protok prema čvoru pozitivan, dok je protok od čvora negativan. Varijabla D_i predstavlja potrošnju i-tog čvora.

Postavljanjem inicijalnih uvjeta dobiven je sljedeći sustav jednažbi:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{h} = \mathbf{F} \quad (4.5)$$

Gdje je \mathbf{A} kvadratna simetrična matrica dimenzija $N \times N$. Broj N predstavlja broj čvorova u sustavu. Vektor \mathbf{h} dimenzija $N \times 1$ je vektor nepoznatih hidrauličkih visina u čvorovima. \mathbf{F} je vektor desne strane dimenzija $N \times 1$.

EPANET koristi Todinijev Globalni Gradijentni Algoritam za rješavanje ovog sustava jednadžbi (*Todini and Pilati – Global Gradient Algorithm – GGA, 1988.*). Algoritam se temelji na linearizaciji jednadžbi očuvanja uz iterativnu Newton-Rhapsonovu metodu rješavanja sustava jednadžbi. GGA algoritam sastoji se od dva koraka rješavanja sustava po iteraciji. Prvi korak je rješavanje inicijalnog sustava linearnih jednadžbi za hidrauličke visine u čvorovima. Drugi korak podrazumijeva korekciju protoka u svakoj cijevi čime se dobije ažurirani protok.

Svaki element vektora \mathbf{F} predstavlja zbroj neto razlike ukupnog protoka na čvoru (koji treba težiti u nulu) i korekcijskog faktora protoka:

$$F_i = \sum_j \left(q_{ij} + \frac{h_{Lij}}{g_{ij}} \right) - D_i + \sum_f \frac{H_f}{g_{if}} \quad (4.6)$$

Pojavljuju se neke nove varijable koje predstavljaju:

H_f – hidraulička visina čvora

g_{ij} – gradijent (prva derivacija) gubitka hidrauličke visine u cijevi između čvorova i i j

Varijabla g_{ij} za cijevi se računa po izrazu:

$$g_{Lij} = r \cdot n \cdot |q_{ij}|^{n-1} + \frac{\partial r}{\partial q_{ij}} \cdot |q_{ij}|^n + 2m \cdot |q_{ij}| \quad (4.7)$$

Dok se za pumpe računa po izrazu:

$$g_{Lij} = n \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \left(\frac{q_{ij}}{\omega} \right)^{n-1} \quad (4.8)$$

Nakon prve iteracije rješavanja sustava jednadžbi 4.5, dobivene su nove hidrauličke visine, dok se protoci računaju prema sljedećem izrazu:

$$q_{ij} = q_{ij} - \Delta q_{ij} \quad (4.9)$$

Gdje se Δq_{ij} računa prema:

$$\Delta q_{ij} = \frac{(h_{Lij} - h_i + h_j)}{g_{ij}} \quad (4.10)$$

Prednost Globalnog Gradijentnog Algoritma je ta što nakon prve iteracije, formula za ažuriranje protoka zadovoljava jednadžbu očuvanja mase za svaki čvor. Algoritam iterativno ponavlja radnje sve dok nije zadovoljen kriterij konvergencije temeljen na rezidualnim greškama koje se temelje na jednadžbi očuvanja mase i jednadžbi očuvanja energije ili dok promjene u protocima ne postanu zanemarivo male. Bitno je napomenuti kako je kod za EPANET rješavač napisan u C++ programskom jeziku, za razliku od kasnije opisanog WNTR rješavača koji je napisan u Python programskom jeziku. Razlika se očituje u brzini rješavanja sustava, EPANET rješavač je znatno brži od WNTR rješavača, zbog toga je optimizacija vršena uz korištenje EPANET rješavača.

2.1.2. Princip potrošnje čvorova ovisne o tlaku sustava

Drugi princip za pretpostavku uzima da potrošnja u čvorovima ovisi o tlaku u sustavu. Tlak u sustavu može se preračunati u hidrauličku visinu u čvorovima. Postoji nekoliko načina za modeliranje protoka na ovaj način, EPANET koristi Wagner-ovu jednadžbu (*Wagner et al. 1988.*).

$$q_{Di} = \begin{cases} D_i & p_i \geq P_f \\ D_i \cdot \left(\frac{p_i - P_0}{P_f - P_0} \right)^{\frac{1}{e}} & P_0 < p_i < P_f \\ 0 & p_i \leq P_0 \end{cases} \quad (4.11)$$

D_i predstavlja standardnu potrošnju vode u čvoru kada je tlak u sustavu veći ili jednak od zahtijevanog tlaka P_f . Kada je zadovoljen ovaj uvjet, količina potrošnje računa se prema standardnom modelu fiksne potrošnje u čvorovima. Kada je tlak u sustavu manji od minimalnog tlaka P_0 , potrošnja iznosi nula, odnosno smatra se da tlak nije dovoljan kako bi se omogućila potrošnja vode u čvoru. Kada je

tlak u sustavu veći od P_0 i manji od P_f , potrošnja se modelira po navedenoj formuli kako bi se simulirala smanjena potrošnja uslijed nedovoljno visokog tlaka u sustavu.

Takav pristup omogućuje hidrauličke simulacije u sustavima niže kvalitete s velikim oscilacijama tlaka u cijevima, gdje potrošnja vode može uvelike varirati ovisno o tlaku.

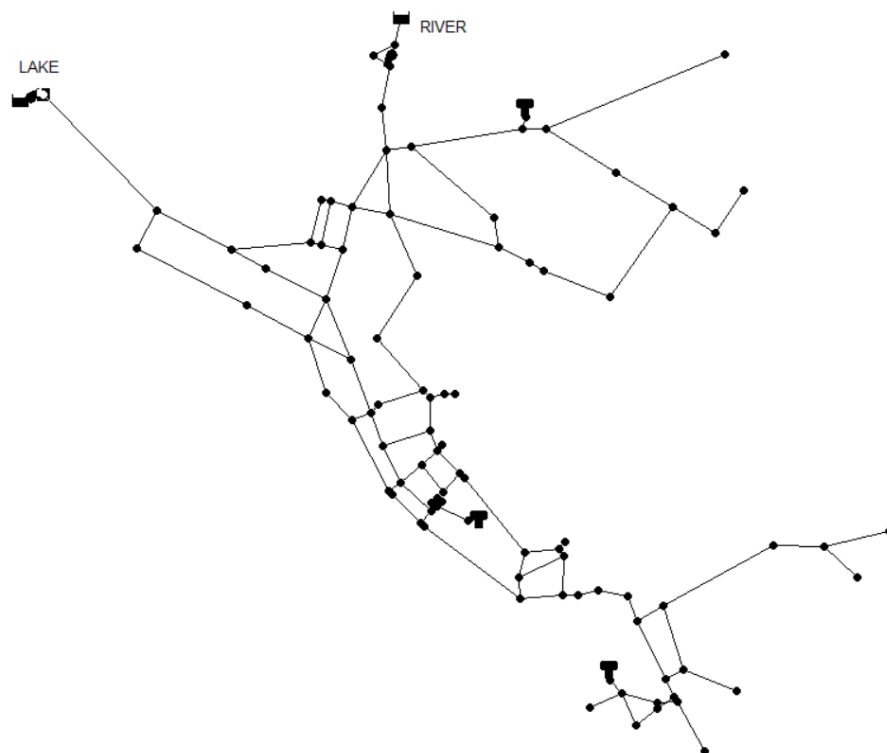
4.2 WNTR

WNTR (*Water Network Tool for Resilience*) je Python paket dizajniran za simulacije i analizu kvalitete vodoopskrbnih sustava. WNTR je baziran na EPANET softveru i rješavačima, ali omogućuje kompleksnije analize i upravljanje vodoopskrbnim mrežama. Uz generiranje modela vodoopskrbnih sustava, WNTR omogućuje i modificiranje modela dodavanjem ili mijenjanjem nekih značajki elemenata koje čine model. Upravljanje modelom omogućuje analizu ponašanja sustava u raznim slučajevima, poput potresa, požara, gubitka struje i slično.

Svaki model vodoopskrbnog sustava sastoji se od komponenti koje imaju svoje karakteristike i ulogu u sustavu, to su:

- Čvorovi – točke na kojima se sijeku dvije ili više cijevi, u čvorovima voda može izlaziti iz sustava ili ulaziti u sustav. Čvorovima se modeliraju potrošači vode u mreži.
- Cijevi – elementi koji povezuju dva čvora u mreži. Kroz cijevi se simulira protok vode koji ima smjer od veće hidrauličke visine prema manjoj. Fizičke karakteristike cijevi poput promjera, dužine i hrapavosti moguće je definirati zasebno za svaku cijev.
- Spremnici – elementi u kojima se nalazi zaliha vode. Za svaki spremnik potrebno je definirati trenutnu razinu vode i kapacitet spremnika.
- Izvori – točke u mreži koje pružaju beskonačan izvor vode za vodoopskrbnu mrežu. Navedeni elementi predstavljaju izvore vode poput potoka, rijeka ili jezera.
- Pumpe – elementi koji povezuju dva čvora u mreži i predaju energiju fluidu
- Ventili – elementi koji povezuju dva čvora, ali imaju mogućnost ograničavanja ili potpunog zaustavljanja protoka između čvorova.
- Emiteri – uređaji koji simuliraju istjecanje vode iz čvorova ovisno o tlaku u sustavu. Koriste se za modeliranje špina ili oštećenja koja uzrokuju curenje i gubitak vode iz sustava.

Na slici 4.1 prikazana je shema vodoopskrbne mreže. Na shemi se mogu uočiti čvorovi i cijevi koje ih povezuju.



Slika 4.1 Shema vodoopskrbne mreže

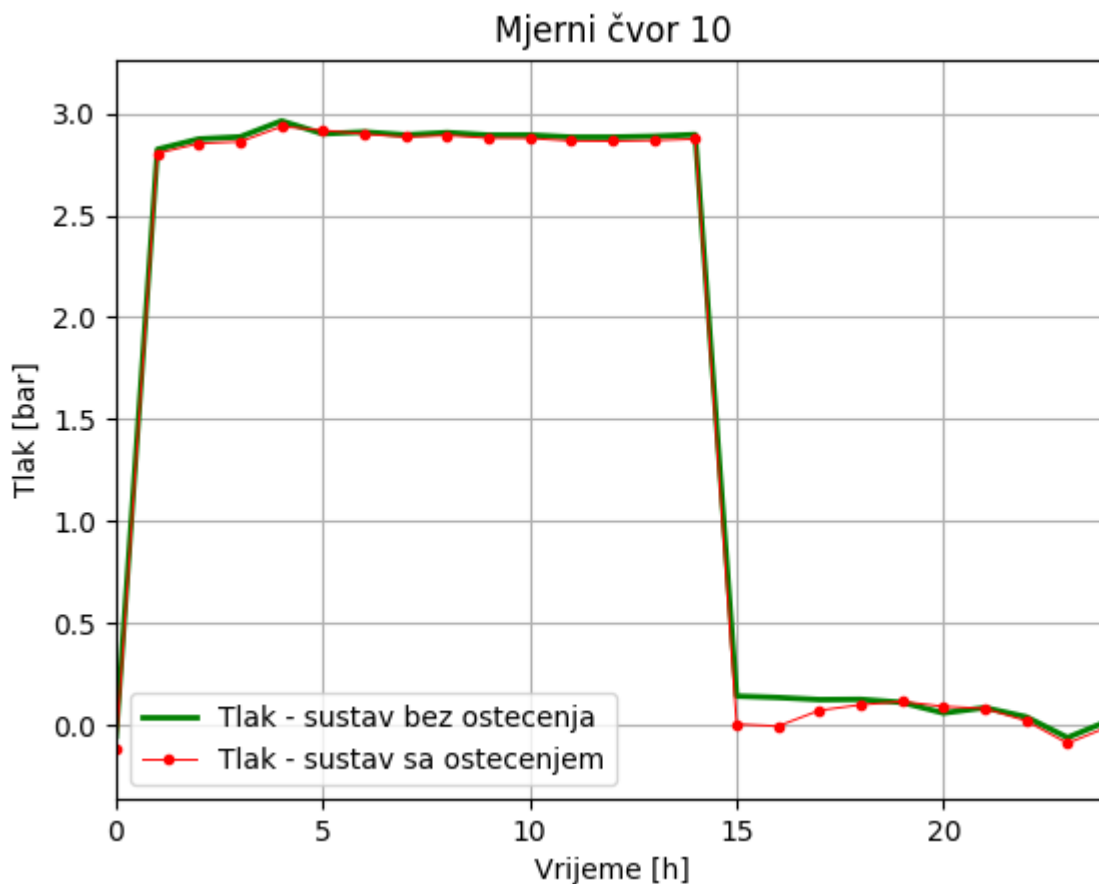
Tablica 3 Simboli sheme

●	Čvor
●—●	Cijev
●—[P]—●	Pumpa
[R]	Rezervoar
[T]	Spremnik
●—[V]—●	Ventil

5. DETEKCIJA I LOKALIZACIJA OŠTEĆENJA

5.1 DETEKCIJA OŠTEĆENJA

Oštećenja na cijevima uzrokuju uvećanu potrošnju vode i smanjenje tlaka u sustavu. Direktnan pristup bi se mogao temeljiti na mjerenju protoka u cijevima, ali ranije je objašnjeno kako je ipak pogodnije temeljiti detekciju na temelju mjerenja tlaka pomoću senzora. Na slici 5.1 prikazana su dva očitavanja tlaka na istom senzoru u 24 sata, prvo očitavanje je dobiveno simulacijom sustava bez oštećenja, dok je drugo očitavanje dobiveno simulacijom sustava s oštećenjem u mreži.



Slika 5.1 Usporedba očitavanja tlakova

Iz slike se može uočiti manji izmjereni tlak za slučaj kada se u sustavu nalazi oštećenje.

Razliku u očitanjima moguće je kvantizirati na dva načina: Srednje kvadratno odstupanje (jednadžba 5.1) i kvadratno odstupanje Z vrijednosti (jednadžba 5.2).

$$O = \sum_{i=1}^n [(\mathbf{p}_{T,i} - \mathbf{p}_{S,i})^2] \quad (5.1)$$

$$O = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{|\mathbf{p}_{T,i} - \mathbf{p}_{S,i}|}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (5.2)$$

U navedenim jednadžbama članovi predstavljaju sljedeće:

O – ocjena odstupanja, veći iznos predstavlja značajnije odstupanje

\mathbf{p}_T – vektor očitanih tlakova u vremenu za slučaj bez oštećenja

\mathbf{p}_S – vektor očitanih tlakova u vremenu za slučaj s oštećenjem

σ – standardna devijacija

Obzirom da razlika vektora \mathbf{p}_T i \mathbf{p}_S ima vektorski oblik, potrebno je izračunati prosječni iznos vektora razlike. Parametar σ predstavlja standardnu devijaciju odstupanja. Potrebno ga je izračunati tako da dozvoljena odstupanja upadaju unutar standardne devijacije, tako da sve razlike koje imaju veći iznos od dozvoljene devijacije budu ocjenjene visokom ocjenom. Bitno je napomenuti kako veća odstupanja rezultiraju većom ocjenom, što je bitno za uzeti u obzir kasnije kod optimizacije.

5.2 LOKALIZACIJA OŠTEĆENJA

Lokalizaciju oštećenja je nešto složenije izvršiti nego detekciju oštećenja. Razlog tome je veći mogućih kombinacija oštećenja u cjevovodima. Obzirom da su oštećenja često prisutna u vodovodnim sustavima, problem s nekoliko oštećenja je jako složeno lokalizirati. Stoga se ovaj rad fokusira na detekciju i lokalizaciju najintenzivnijeg oštećenja u vodovodnoj mreži uz što realnije uvjete. Pod pojmom najintenzivnije oštećenje podrazumijeva se oštećenje koje uzrokuje najveće gubitke vode u sustavu. U uvodnom djelu obuhvaćena su tri moguća pristupa lokalizacije. Ovaj rad obuhvatiti će lokalizaciju uz pomoć numeričke optimizacije funkcije s više varijabli. Kako bi to bilo moguće, potrebno je definirati funkciju koja za ulazne parametre računa ocjenu odstupanja na prethodno navedene načine.

5.2.1 Distribucija curenja u vodovodnoj mreži

Broj optimizacijskih varijabli funkcije utječe na brzinu konvergencije, stoga je poželjno smanjiti broj varijabli što je više moguće. Umjesto pretraživanja po čvorovima moguće je pretraživati područja mreže i na taj način obuhvatiti veći broj čvorova istovremeno s manjim brojem varijabli. Temeljna ideja optimizacijske funkcije je izračunati ocjenu odstupanja na temelju postavljenih oštećenja u nekoliko čvorova koji se nalaze u području. Poželjno je i obuhvatiti intenzitet oštećenja po pravilnoj distribuciji na način da se u centru distribucije postave najveći intenziteti oštećenja, te odmicanjem od centra se oštećenja smanjuju. To je moguće izvršiti pristupom preko bivarijabilne normalne razdiobe, odnosno Gaussove dvodimenzionalne razdiobe. Za navedeni slučaj funkcija distribucije je pojednostavljena kako bi se broj optimizacijskih varijabli sveo na svega četiri vrijednosti [8]:

$$z(\sigma, \mu_x, \mu_y, h) = h \cdot e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\cdot\sigma^2} - \frac{2\cdot\rho\cdot(x-\mu_x)\cdot(y-\mu_y)}{2\cdot\sigma^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\cdot\sigma^2}} \quad (5.3)$$

Jednadžba 5.3 sadrži sljedeće članove:

z – vrijednost funkcije

σ – standardna devijacija

μ_x – x koordinata srednje vrijednosti

μ_y – y koordinata srednje vrijednosti

h – iznos maksimuma funkcije u srednjoj vrijednosti

ρ – kovarijanca

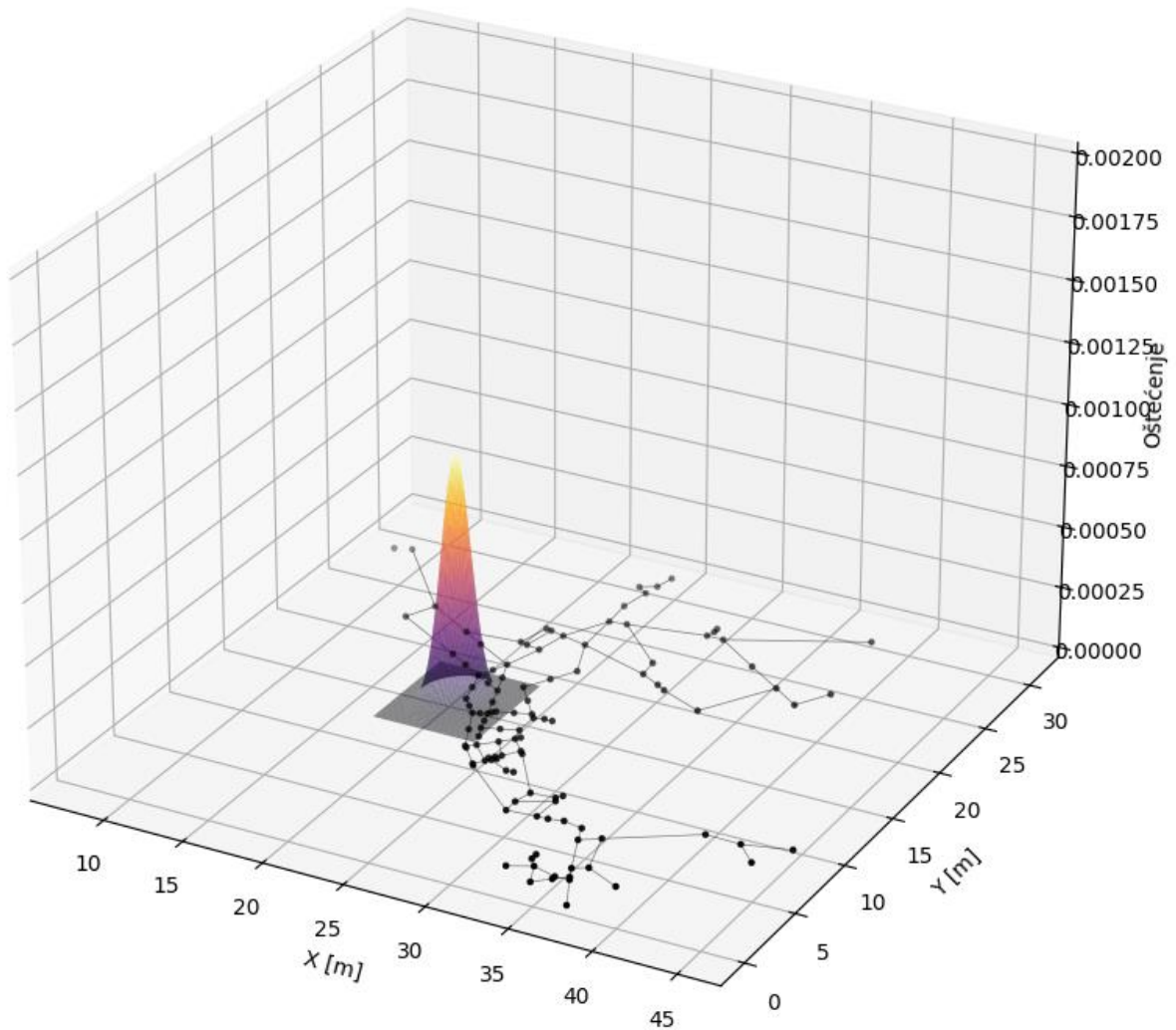
e – Eulerova konstanta (≈ 2.71828)

Radi jednostavnosti, usvojen je iznos kovarijance $\rho = 0$. Varijabla σ definira veličinu područja koje je obuhvaćeno te će igrati veliku ulogu kasnije u optimizacijskim ciljevima. Uslijed toga, srednji član u eksponentu je jednak nuli:

$$z(\sigma, \mu_x, \mu_y, h) = h \cdot e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2 \cdot \sigma^2} + \frac{2 \cdot 0 \cdot (x-\mu_x) \cdot (y-\mu_y)}{2 \cdot \sigma^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (5.4)$$

Konačno, distribucijska funkcija poprima sljedeći oblik:

$$z(\sigma, \mu_x, \mu_y, h) = h \cdot e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2 \cdot \sigma^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (5.5)$$



Slika 5.2 Gaussova 2D razdioba vjerojatnosti oštećenja prikazana na mreži

Na slici 5.2 prikazana je Gaussova 2D razdioba. Za navedeni problem, vrijednost funkcije z predstavlja intenzitet oštećenja na čvoru. Intenzitet je definiran kao koeficijent istjecanja (eng. *emitter coefficient*) koji oponaša istjecanje vode iz sustava. Navedena vrijednost definira intenzitet protoka vode kroz čvor u okolinu. Najbolji primjer iz svakodnevnog života je špina u kućanstvima, za mali otvor ventila špine protok vode kroz špinu će biti minimalan. Povećanjem otvora ventila povećava se protok vode kroz špinu. Protok vode koji istječe iz čvora opisan je sljedećom jednačinom:

$$Q = C \cdot (p_N - p_{ATM})^\gamma \quad (5.6)$$

Gdje je:

Q – protok vode koja istječe iz sustava

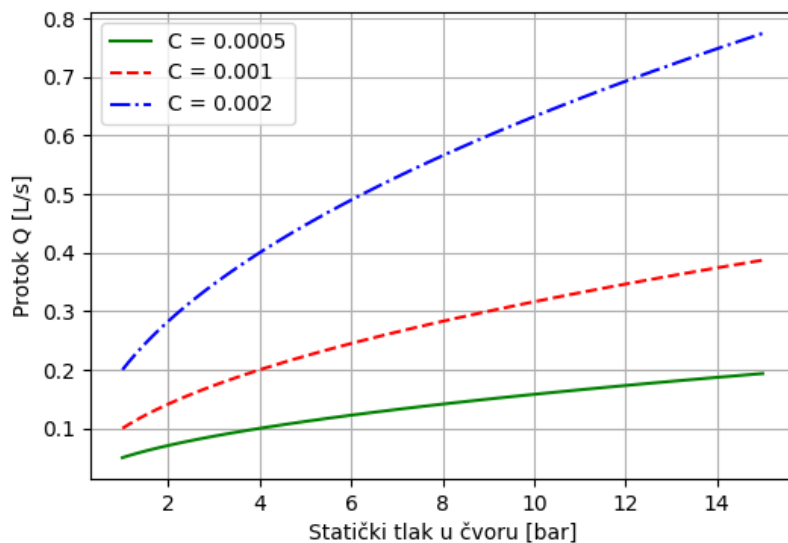
C – koeficijent istjecanja

p_N – statički tlak vode u čvoru

p_{ATM} – atmosferski tlak (usvojeno $p_{ATM} = 0$)

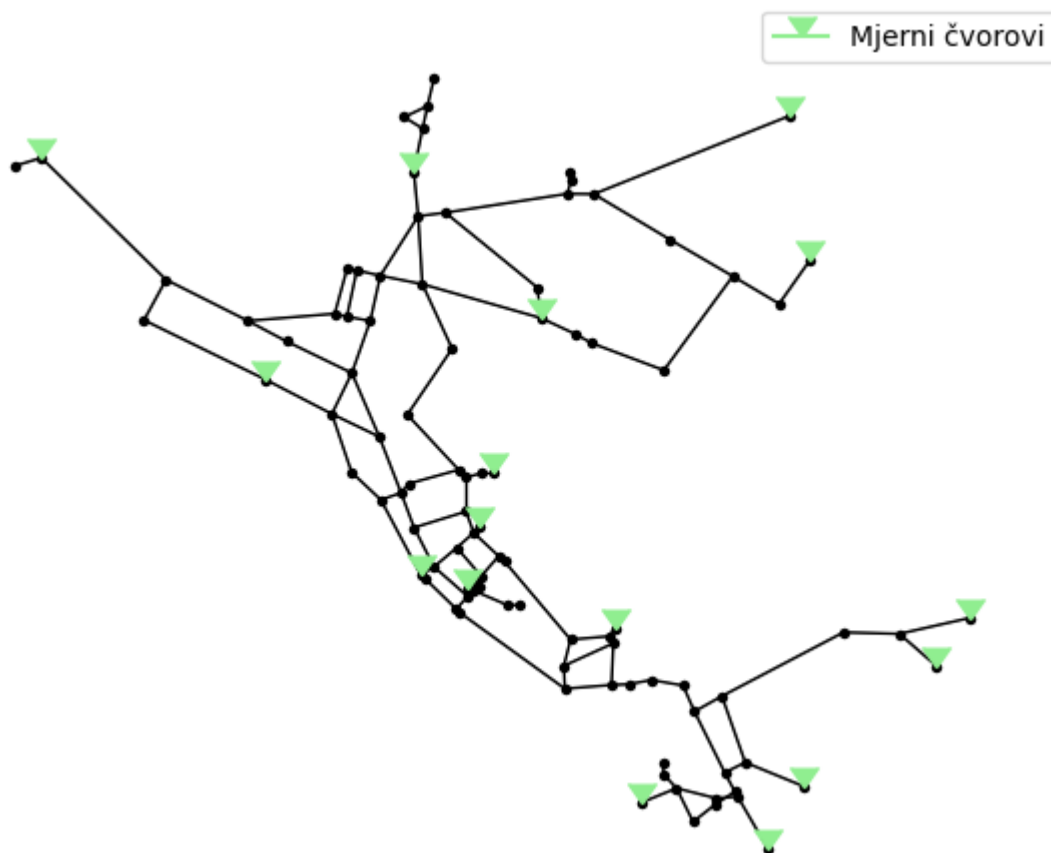
γ – eksponent tlaka (usvojeno $\gamma = 0,5$)

Eksponent tlaka je geometrijska karakteristika uređaja kroz koji voda istječe van iz sustava. Proizvođač uređaja (primjerice špina ili prskalica) definira iznos eksponenta tlaka. Na slici 5.3 može se uočiti iznos protoka istjecanja u odnosu na statički tlak u čvoru i koeficijent istjecanja.



Slika 5.3 Protok istjecanja u odnosu na tlak i koeficijent

Pretpostavljeno je kako se mjerenja tlakova vrše samo u određenom broju točaka. Broj mjernih čvorova pretpostavljen je između 5% i 10% ukupnog broja čvorova. Prikazana mreža na slici 5.4 sadrži 223 čvora od kojih su 17 mjerni čvorovi.



Slika 5.4 Prikaz položaja mjernih čvorova

Položaj mjernih točaka određen je proizvoljno. Metodom pokušaja i pogreške utvrđeno je kako nije povoljno postaviti mjerenje tlaka na čvorove koji su sjecišta brojnih cijevi jer ta mjerenja neće pridonijeti pri lokalizaciji oštećenja zbog manje volatilnosti u mjerenjima. Položaj mjernih točaka utječe na krajnju točnost i preciznost lokalizacije. Inicijalno su za svaku testiranu mrežu mjerni čvorovi postavljeni na rub mreže gdje je čvor povezan isključivo s jednom cijevi.

Optimizacijska funkcija postići će minimum ukoliko se parametri funkcije razdiobe poklapaju s lokacijom i intenzitetom oštećenja, što će uzrokovati minimalno odstupanje od izmjerenih iznosa tlakova i simuliranih iznosa tlakova. Teoretski slučaj potpunog poklapanja pogođene lokacije i intenziteta oštećenja sa stvarnim oštećenjem rezultirati će odstupanjem koje iznosi 0.

5.2.2 Princip numeričke optimizacije

Numerička optimizacija je metoda pronalaženja najboljeg rješenja za problem unutar danog skupa ograničenja. Koristi se za optimizaciju slučajeva koji su previše složeni za analitička rješenja. Osnova numeričke optimizacije je optimizacijska funkcija, ranije opisana u poglavlju 5.1 i parametrizacija distribucije curenja opisana u 5.2.1. Cilj optimizacije je pronaći vrijednosti varijabli koje rezultiraju minimalnom vrijednošću optimizacijske funkcije. Za navedeni slučaj korištene su PSO (*Particle Swarm Optimization* – Optimizacija Roja Čestica) i SSA (*Squirrel Search Algorithm* – Algoritam Pretrage Vjeverica) optimizacijske metode. PSO i SSA pripadaju u klasu algoritama inteligencije populacija. PSO metoda inspirirana je ponašanjem ptica unutar jata oponašanjem načina na koji se ptice kreću u grupama dok traže hranu, migriraju ili izbjegavaju predatore. Svaka čestica, odnosno kandidat u roju predstavlja potencijalno rješenje optimizacijskog problema. Čestica prilagođava svoj položaj u prostoru pretraživanja uspoređujući vlastite evaluacije i evaluacije susjednih čestica, konvergirajući prema minimumu. SSA algoritam je inspiriran ponašanjem letećih vjeverica u prirodi. Metoda oponaša populaciju vjeverica koje traže hranu i izbjegavaju predatore. Optimizacijska metoda istražuje prostor pretraživanja kroz slučajne skokove i lokalne pretrage na temelju položaja vjeverice i izvora hrane. Ključni koraci PSO metode su sljedeći [9]:

1. Inicijalizacija – nasumična inicijalizacija roja čestica gdje svaka čestica predstavlja potencijalno rješenje
2. Petlja evolucije rješenja
 - a. Evaluacija – svaka čestica u roju je evaluirana prema fitness funkciji
 - b. Ažuriranje najboljeg rezultata pojedine čestice
 - c. Ažuriranje globalno najboljeg rezultata roja – izbor globalno najbolje čestice s najboljim fitness rezultatom. Sve čestice u sustavu se pomiču prema najboljoj čestici.
 - d. Ažuriranje brzina čestica i pozicije
3. Prekid petlje – ukoliko je prekoračen dozvoljen broj iteracija ili zadovoljen kriterij konvergencije

Ključni koraci SSA metode su sljedeći [10]:

1. Inicijalizacija – nasumična inicijalizacija populacije vjeverica, svaka vjeverica predstavlja potencijalno rješenje
2. Petlja evolucije rješenja
 - a. Evaluacija – svaka vjeverica (kandidat) evaluira se fitness funkcijom
 - b. Sortiranje vjeverica prema kriteriju ocjene fitness funkcije
 - c. Ažuriranje pozicija i brzine kretanja vjeverica prema najboljem kandidatu
 - d. Reprodukција najboljih vjeverica koje zamjenjuju najgore rangirane vjeverice
 - e. Prisutnost predatora u područjima najgorih fitness iznosa kako bi se ubrzanim postupkom eliminirale najgore rangirane vjeverice
3. Prekid petlje – ukoliko je prekoračen dozvoljen broj iteracija ili zadovoljen kriterij konvergencije

Uz PSO i SSA korištene su i ostale navedene metode, ali je zaključeno kako su PSO i SSA najučinkovitije metode pretrage za objašnjeni optimizacijski problem.

Za navedeni problem, korišten je optimizacijski paket *Indago* razvijen na katedri za Računarsku mehaniku i inženjerstvo Tehničkog Fakulteta u Rijeci. *Indago* je Python modul koji sadrži veliki broj optimizacijskih algoritama pogodnih za rješavanje opisanog problema. Neki od algoritama koje sadrži navedeni alat su [11]:

- PSO – *Particle Swarm Optimization*
- FWA – *Fireworks Algorithm*
- SSA - *Squirrel Search Algorithm*
- DE - *Differential Evolution*
- BA - *Bat Algorithm*
- EFO - *Electromagnetic Field Optimization*
- MRFO - *Manta Ray Foraging Optimization*
- ABC - *Artificial Bee Colony*
- GWO - *Gray Wolf Optimizer*
- *Nelder-Mead*
- MSGS – *Multi Scale Grid Search*

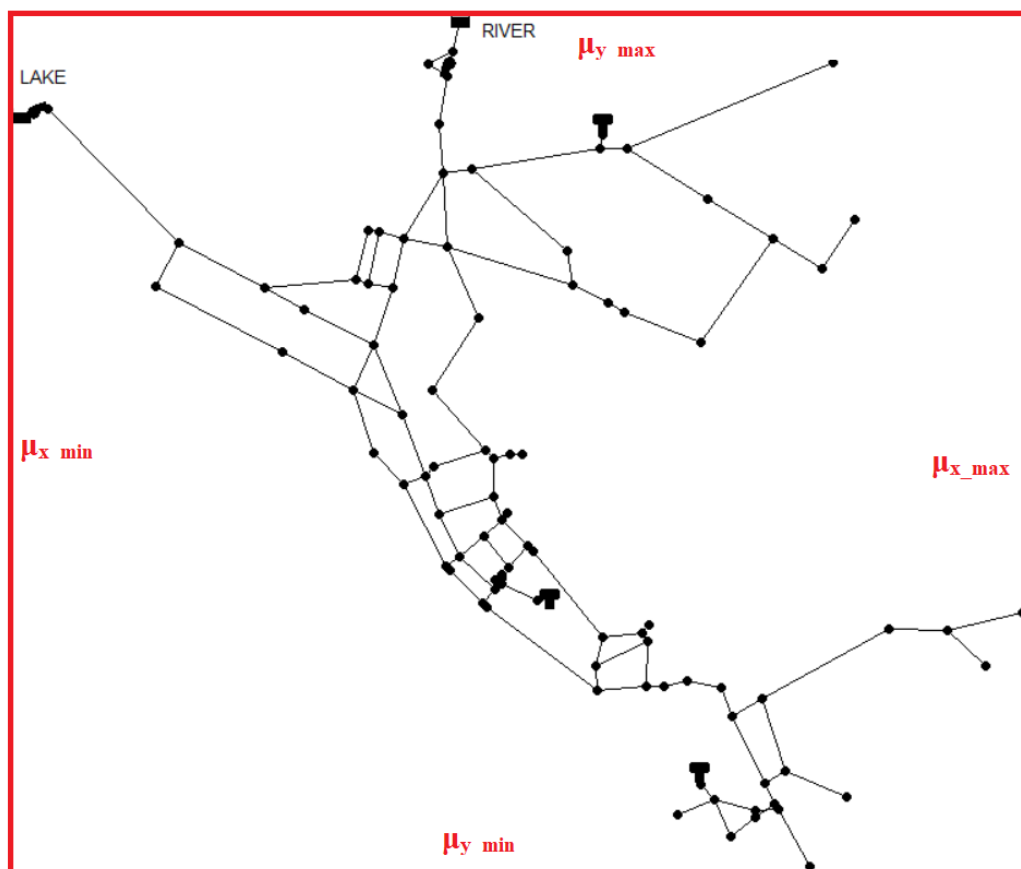
Svaki od navedenih optimizacijski algoritama ima jedinstven način pretraživanja minimuma funkcije. Efikasnost algoritma različito utječe s obzirom na prirodu problema ili načina postavljenog modela. Iz tog razloga neki algoritmi će biti efikasniji za specifične probleme od ostalih i obrnuto.

5.2.3 Granice pretraživanja i tijek optimizacije

Prednost numeričke optimizacije jest mogućnost pretrage minimuma funkcije više varijabli. Obzirom da se minimum funkcije ne računa analitički nego numeričkim metodama, potrebno je odrediti granice odnosno područje pretraživanja domene. Funkcija distribucije oštećenja ima sljedeći oblik:

$$f(\sigma, \mu_x, \mu_y, h) \quad (5.7)$$

Za svaku od navedene četiri varijable potrebno je postaviti granice pretrage. Za koordinate srednjih vrijednosti distribucije μ_x i μ_y , granice su postavljene na rub domene, odnosno na ekstremne vrijednosti koordinata čvorova. Na slici 5.5 moguće je uočiti granice postavljene za srednje vrijednosti distribucije.

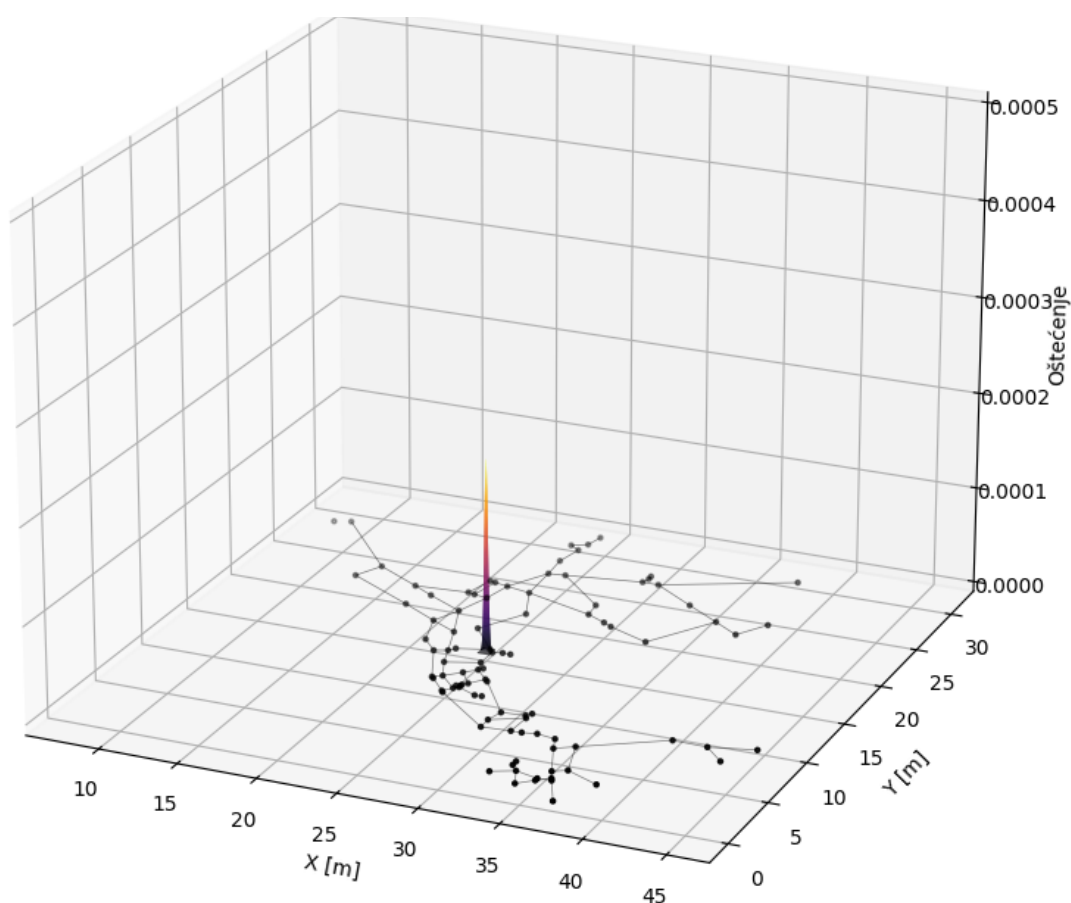


Slika 5.5 Granice srednjih vrijednosti distribucije – mreža 1

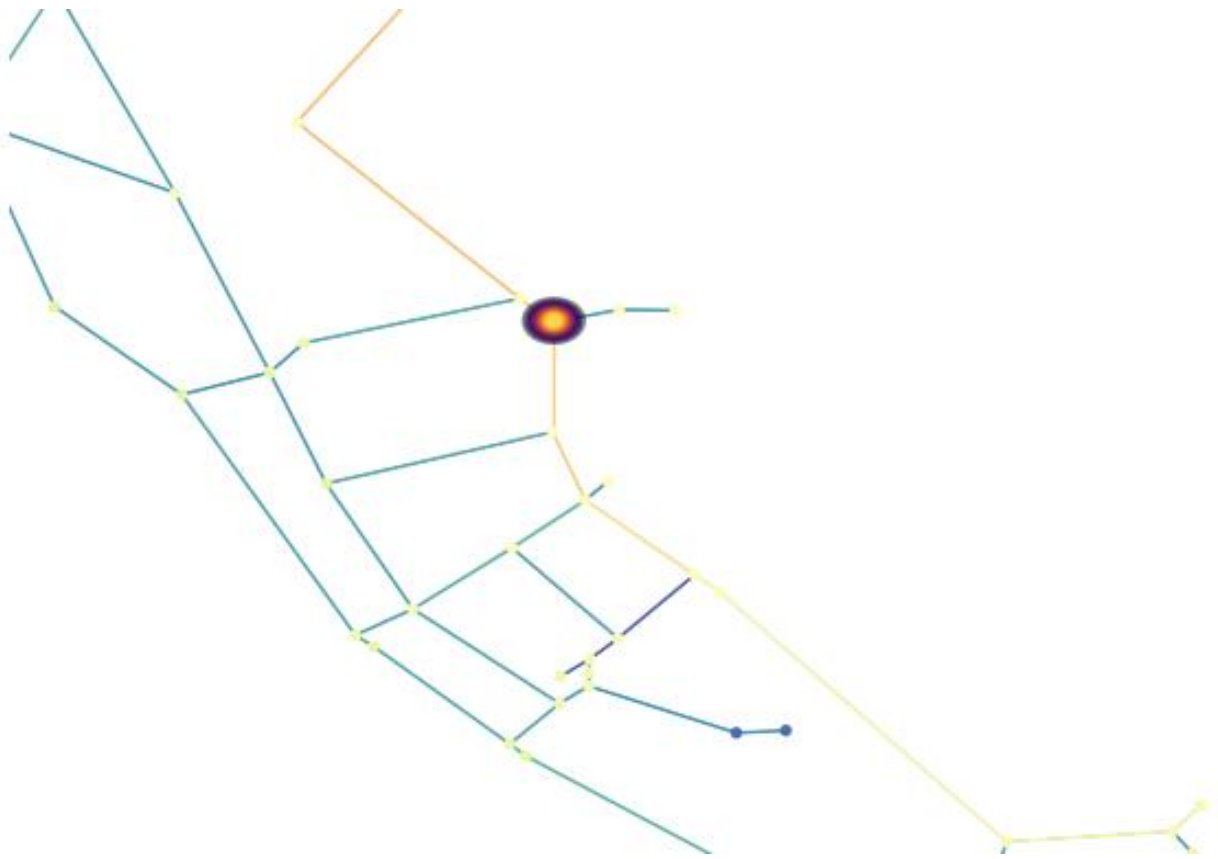
Granice standardne devijacije određene su proizvoljno, cilj je uspostaviti ravnotežu između brzine optimizacije i pronalaska globalnog minimuma. Donja granica standardne devijacije teži u nulu, iako nije potrebno ograničiti vrijednost isključivo na nulu, već na jako mali decimalni broj. U ovom slučaju usvojena je vrijednost:

$$\sigma_{min} = 0.01 \quad (5.8)$$

Što odgovara izgledu distribucije kao na slici 5.6, radi bolje preglednosti u ovom slučaju je distribucija prikazana drukčijim paletama boja nego u ostatku rada:



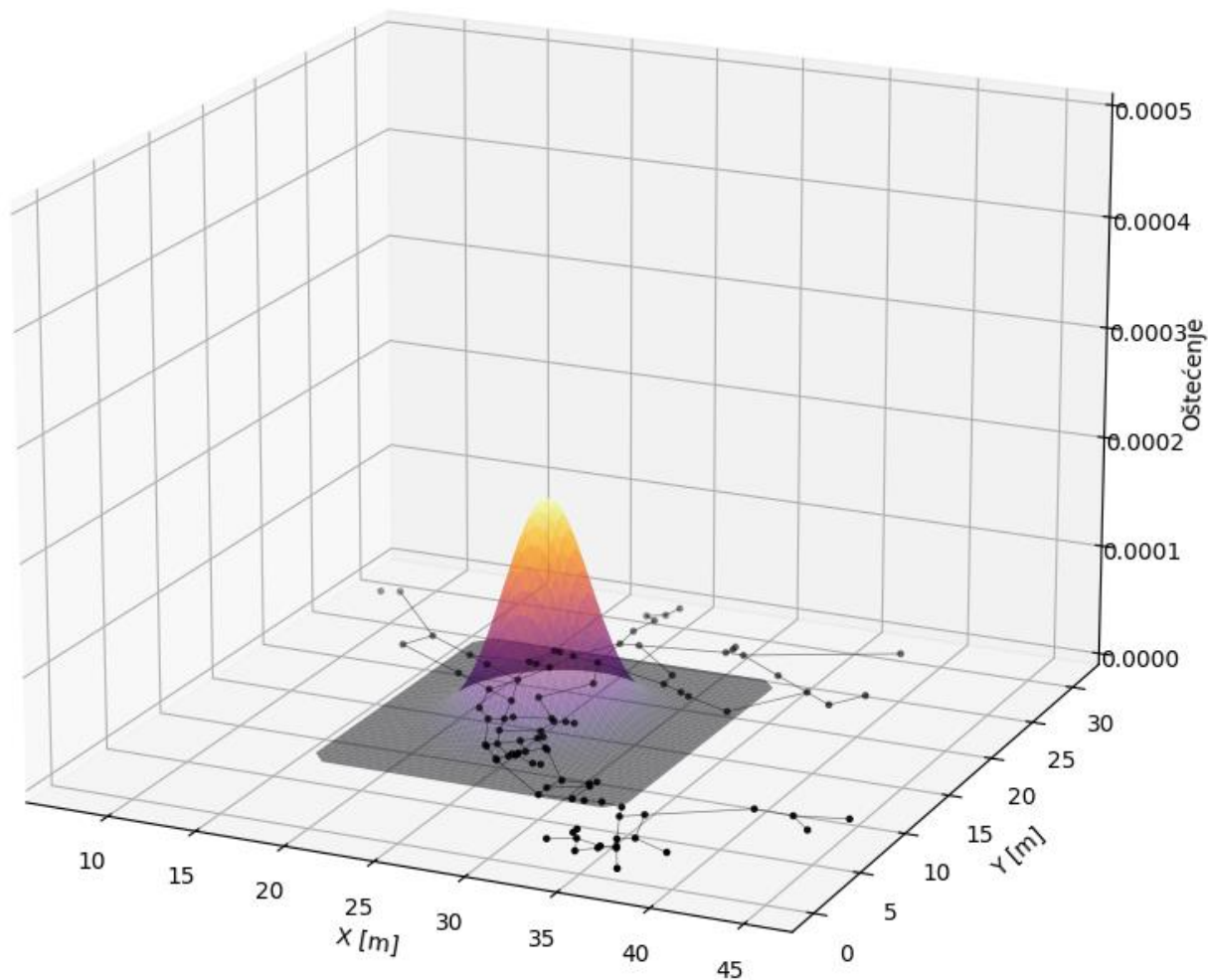
Slika 5.6 Trodimenzionalni prikaz distribucijske funkcije s minimalnom vrijednošću devijacije



Slika 5.7 Dvodimenzionalni prikaz distribucijske funkcije s minimalnom vrijednošću devijacije

Gornju granicu standardne devijacije je nešto složenije za odrediti, obzirom da gabariti različitih mreža će biti različitih vrijednosti. Cilj je postići maksimalni iznos standardne devijacije za koji će distribucijom biti obuhvaćeno otprilike 70% čvorova u mreži. Za prikazanu mrežu na slici 5.8 taj iznos je sljedeći:

$$\sigma_{max} = 2.2 \quad (5.9)$$



Slika 5.8 Prikaz distribucije s maksimalnom vrijednosti standardne devijacije

Zadnje vrijednosti granica jesu intenziteti oštećenja, odnosno visina distribucijske funkcije. Te vrijednosti određene su pretpostavkama oštećenja u sustavu. Cilj optimizacije je lokalizirati oštećenja što manjih intenziteta. Dva najveća ograničenja modela su; preciznost mjernih uređaja i devijacije u uzorcima potrošnje vode potrošača. Iz tog razloga nema smisla postavljati donju granicu oštećenja na jako male vrijednosti. S druge strane, postavljanje prevelike granice vrijednosti intenziteta oštećenja nema fizikalno smisla, obzirom da bi veliko oštećenje u sustavu moglo biti detektirano i bez računalne pomoći. Za navedeni model, usvojene su vrijednosti granica intenziteta oštećenja:

$$h_{max} = 0.005 \quad (5.10)$$

$$h_{min} = 5 \cdot 10^{-5} \quad (5.11)$$

Konačno, vektore gornjih i donjih vrijednosti granica moguće je zapisati na sljedeći način:

$$LB = \{\sigma_{min}, \mu_{x_{min}}, \mu_{y_{min}}, h_{min}\} \quad (5.12)$$

$$UB = \{\sigma_{max}, \mu_{x_{max}}, \mu_{y_{max}}, h_{max}\} \quad (5.13)$$

Njihove vrijednosti su:

$$LB = \{0.01, \mu_{x_{min}}, \mu_{y_{min}}, 1 \cdot 10^{-4}\} \quad (5.14)$$

$$UB = \{[2.0, 30.0], \mu_{x_{max}}, \mu_{y_{max}}, 0.01\} \quad (5.15)$$

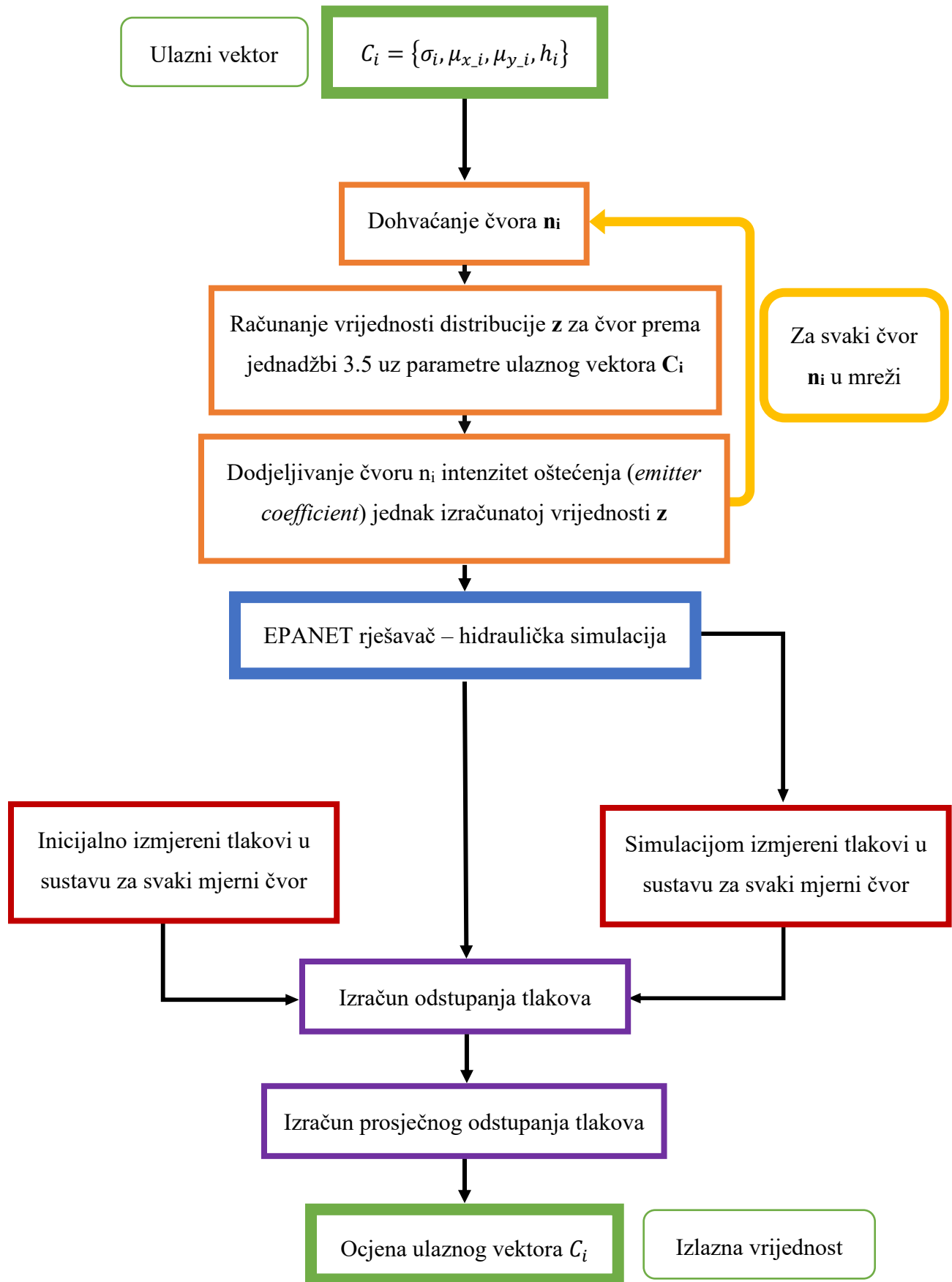
Iznosi $\mu_{x_{min}}$, $\mu_{x_{max}}$, $\mu_{y_{min}}$ i $\mu_{y_{max}}$ su određene programski na temelju minimalnih i maksimalnih koordinata čvorova mreže.

Evaluacija ulaznog vektora distribucijskih parametara vrši se uspoređivanjem izmjerenih tlakova i tlakova dobivenih u mjernim točkama vršenjem jedne hidrauličke simulacije. Optimizacijska funkcija prima vektor od četiri varijable koje predstavljaju parametre Gaussove dvodimenzionalne razdiobe. Ulazni vektor C ima sljedeći oblik:

$$C_i = \{\sigma_i, \mu_{x_i}, \mu_{y_i}, h_i\} \quad (5.16)$$

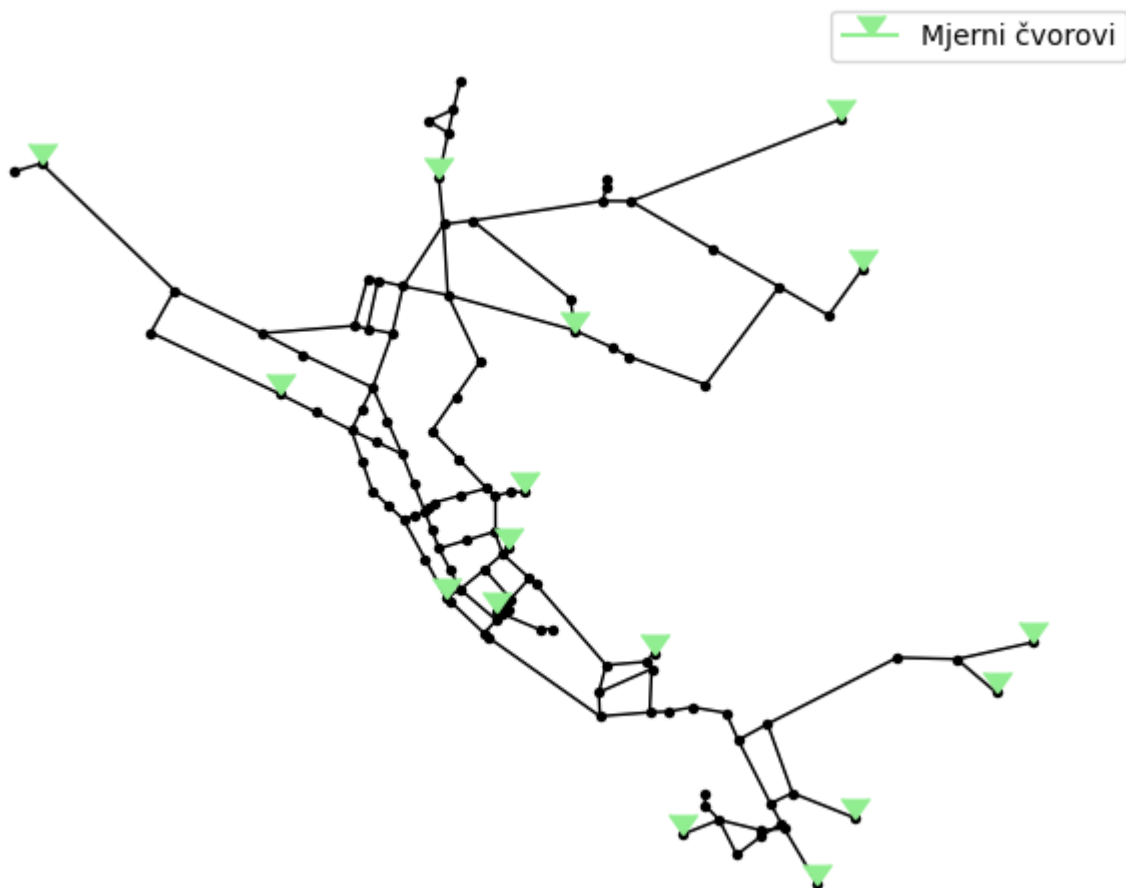
Optimizacijska funkcija vrši korake sljedećim tijekom:

1. Funkcija prima vektor C_i koji predstavlja parametre distribucijske funkcije
2. Vrijednosti distribucijske funkcije računaju se računskom petljom za svaki čvor, te se navedeno oštećenje pridodaje čvorovima
3. EPANET rješavač vrši hidrauličku simulaciju sustava
4. Zapisivanje rezultata tlaka u vremenu za svaki mjerni čvor u vodoopskrbnom sustavu
5. Usporedba dobivenih izmjerenih tlakova s inicijalno izmjerenim tlakovima u mjernim čvorovima sustava prema kriteriju odstupanja srednjih kvadratnih vrijednosti (jednadžba 3.1) ili prema kriteriju odstupanja z vrijednosti normalne distribucije (jednadžba 3.2). Ovakvo računanje odstupanja rezultira vektorom u kojem su zapisana odstupanja tlakova dobivenih hidrauličkom simulacijom od inicijalno izmjerenih tlakova sustava s oštećenjem.
6. Funkcija kao evaluacijsku ocjenu vraća prosječnu vrijednost odstupanja vektora iz petog koraka

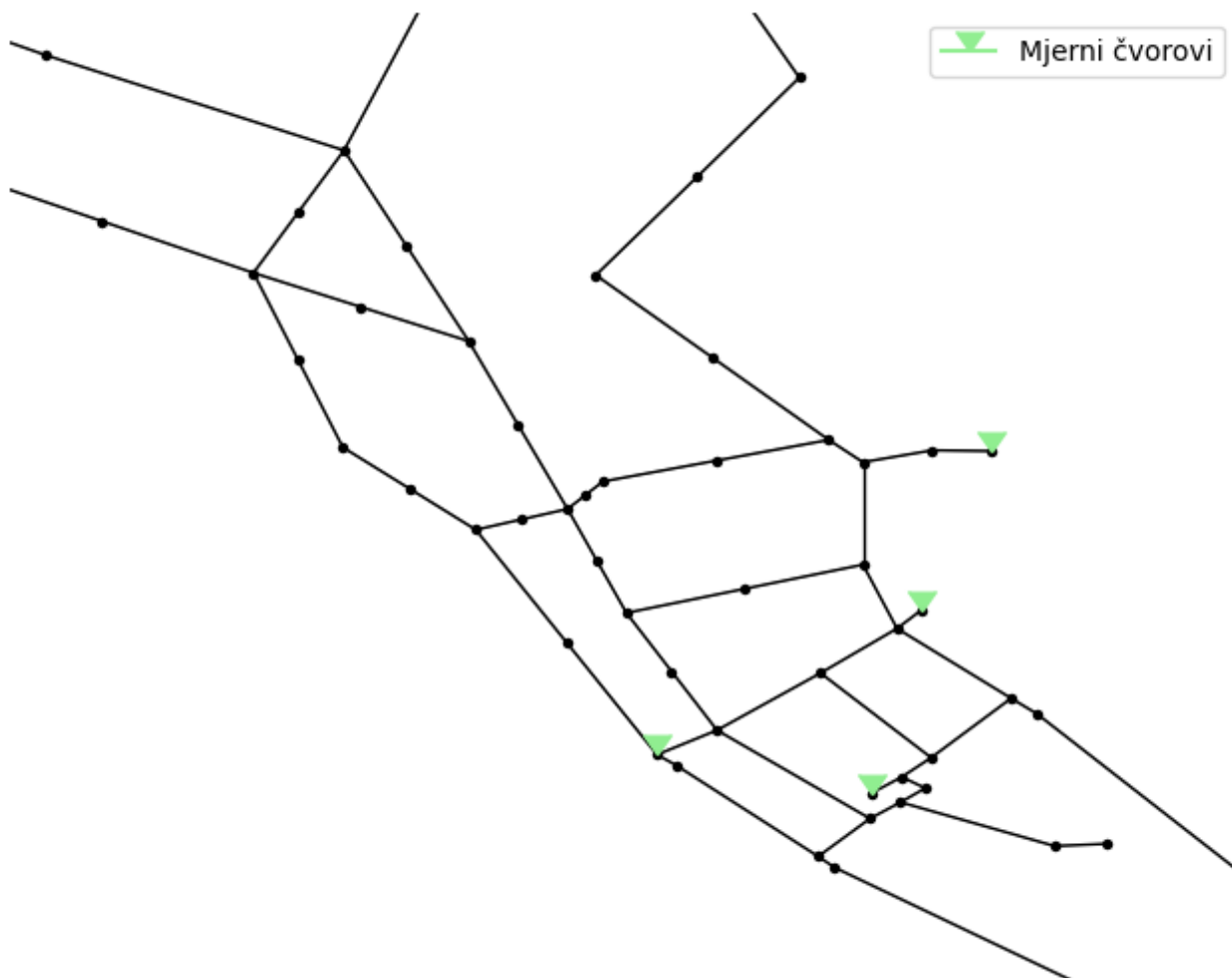


5.2.4 Podjela mreže na manje segmente

Softver podatke o tlaku i istjecanju fluida bilježi isključivo u čvorovima domene. Obzirom da se oštećenje modelira kao protok fluida iz sustava, korisno je podijeliti cijevi na segmente kako bi se povećao broj čvorova i na taj način lakše lokaliziralo oštećenje. Povećanje broja čvorova u domeni direktno utječe na brzinu izvršenja jedne hidrauličke simulacije, što se može zaključiti iz jednadžbe (4.6). Stoga je poželjno napraviti segmentaciju cijevi u području u kojem se prethodno sumnjalo na postojanje oštećenja, s ciljem preciznije lokalizacije. Bitno je postaviti ravnotežu između brzine simulacija i preciznosti oštećenja, zbog čega je proces lokalizacije inicijalno podijeljen u dva dijela: prvi dio podrazumijeva lokalizaciju oštećenja na inicijalnoj mreži, dok drugi dio podrazumijeva lokalizaciju na finijoj mreži s ciljem točnije lokalizacije. Na slikama 5.9 i 5.10 moguće je uočiti područje mreže koje je dodatno podijeljeno na manje segmente po cijevima. Područje koje prolazi kroz proces segmentacije mreže je određeno prvim korakom lokalizacije na inicijalnoj mreži.



Slika 5.9 Mreža s područjem segmentiranih cijevi



Slika 5.10 Detalj mreže sa segmentiranim područjem

Navedenom metodom postignuta je veća učinkovitost računalne snage, te mogućnost preciznije lokalizacije oštećenja. Obzirom da parametri distribucije mogu zahvatiti nekoliko koordinata čvorova mreže istovremeno, moguća je pojava kod koje model ukazuje na nekoliko susjednih čvorova istovremeno za koje smatra da sadrže oštećenje. Iz tog razloga, implementiran je treći korak lokalizacije koji koristi optimizaciju funkcije metodom zlatnog reza.

5.2.5 Dvostruki cilj optimizacijske funkcije

Optimizacijskom procesu moguće je zadati dva ili više ciljeva kako bi bili postignuti željeni rezultati. Krajnji cilj prvog stupnja optimizacije jest lokalizirati potencijalno oštećenje uz što preciznije područje pripremljeno za drugi stupanj optimizacije. Jedan od načina je metodom postavljanja ograničenja, međutim utvrđeno je kako je bolje postaviti dvostruki cilj jer će optimizacija kontinuirano poboljšavati rješenje do zadnje iteracije optimizacije. Kako bi se postavio dvostruki cilj, potrebno je odrediti težinski faktor svakog pojedinog cilja. Kao prvi cilj usvojena je ocjena odstupanja izmjerenih tlakova i simuliranih tlakova, dok je drugi cilj usvojen kao iznos standardne devijacije normalne razdiobe iz jednadžbe 5.5. Određivanje težinskih faktora ciljeva je nešto složenije, te je potrebno izvršiti veliki broj optimizacija kako bi se dobile upotrebljive vrijednosti. Bitno je napomenuti kako faktori ne predstavljaju direktno bitnost pojedinog cilja, već služe za uravnoteženje ukupnog rješenja na principu težinskog usrednjenja između dva cilja. Fitness funkcija koristi vrijednosti težinskih faktora ciljeva za izračun srednje ocjene cilja, obzirom da optimizacijski proces evaluira kandidate samo jednom ocjenom. Usvojeni su sljedeći intervali za težine ciljeva:

$$w_{o1} = [1 - 10^{-4}, 1 - 10^{-5}] \quad (5.17)$$

$$w_{o2} = [10^{-4}, 10^{-5}] \quad (5.18)$$

$$w_{o1} = 1 - w_{o2} \quad (5.19)$$

Gdje je:

w_{o1} – težinski faktor prvog cilja: ocjena odstupanja od izmjerenih tlakova

w_{o2} – težinski faktor drugog cilja: iznos standardne devijacije

Konačno, iznos fitness funkcije može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$f = \sum_{i=1}^n (w_{o,i} \cdot f_{o,i}) \quad (5.20)$$

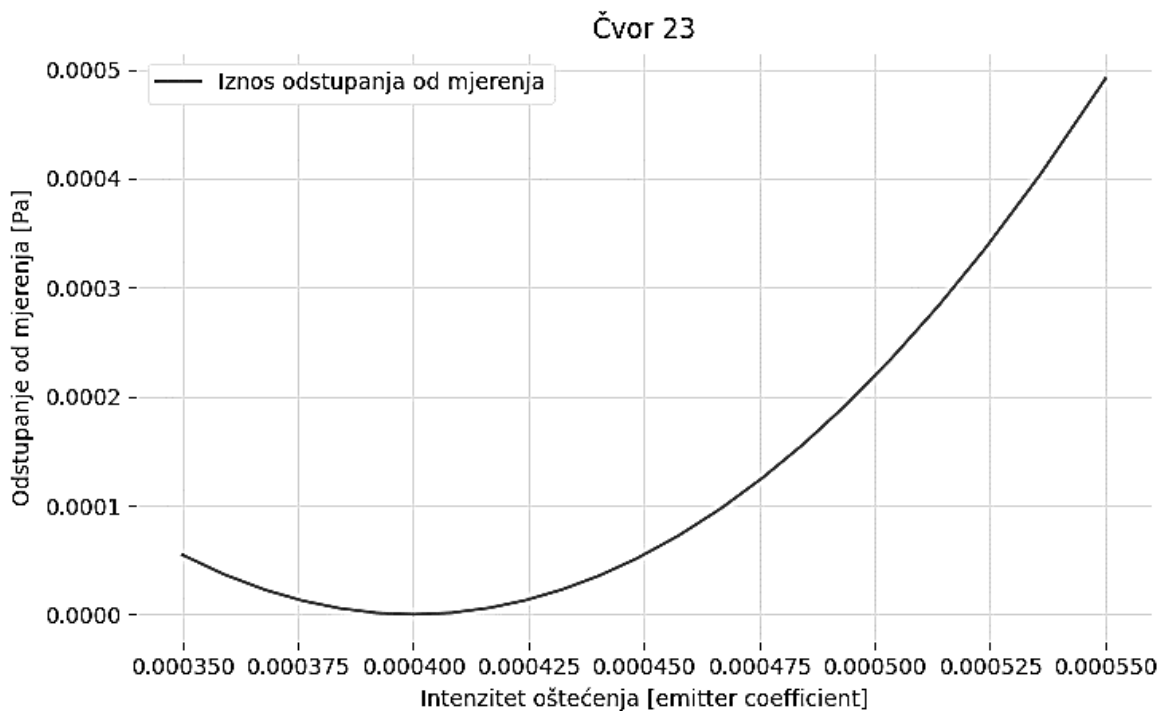
Gdje je:

$f_{o,i}$ – vrijednost fitness funkcije i-tog cilja

Kasnije u radu moguće je uočiti evoluciju dvaju ciljeva i njihov utjecaj na ukupan iznos fitness funkcije (slika 6.10).

5.2.6 Završna lokalizacija metodom zlatnog reza

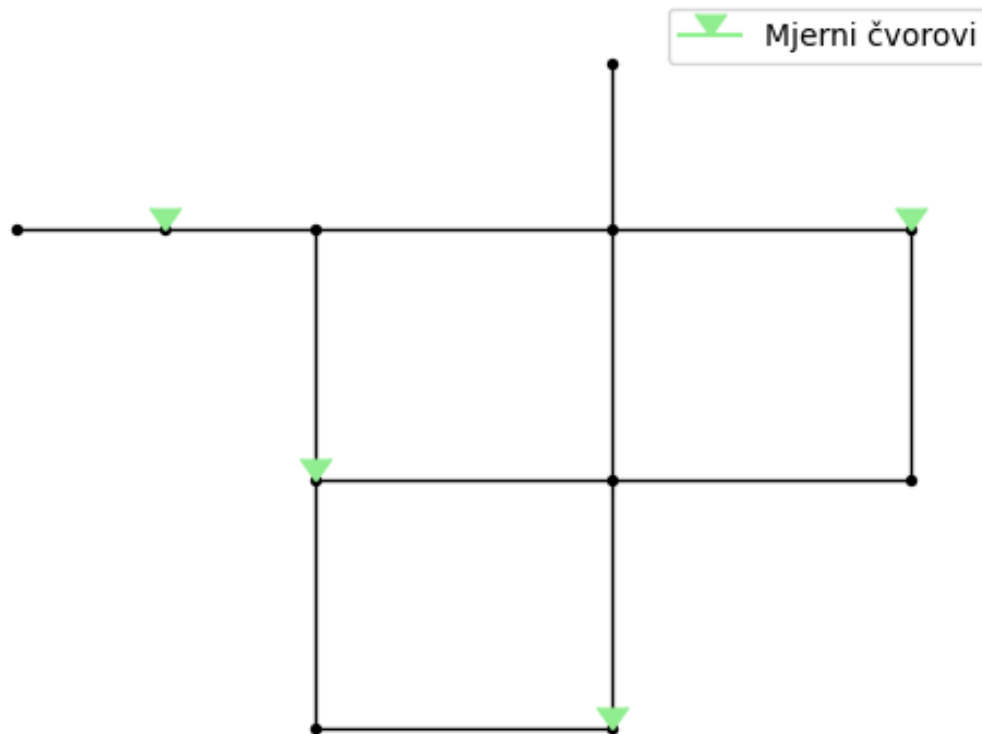
Drugi korak lokalizacije koji podrazumijeva dodatnu podjelu na manje segmente cijevi, smanjuje područje domene u kojem se nalazi oštećenje. Cilj modela je izračunati rješenje koje će za zadane izmjere izabrati lokaciju u mreži na kojoj se najvjerojatnije nalazi oštećenje čvora. Nakon drugog koraka, mijenjanje intenziteta i koordinata srednjih vrijednosti rezultira malim promjenama odstupanja od izmjerenih vrijednosti tlaka. Razlog tome može se pripisati manjak preciznosti distribucijske funkcije koja je svedena na četiri optimizacijske varijable. Ukoliko je već poznato smanjeno područje u kojem se nalazi oštećenje, tu informaciju je moguće iskoristiti za sljedeći korak koji će izvršiti provjeru svakog čvora i pronaći minimum odstupanja za svaki postavljeni intenzitet. Metoda pronalaženja minimuma je metoda zlatnog reza obzirom da se radi o optimizaciji funkcije jedne varijable.



Slika 5.11 Funkcija intenziteta oštećenja za čvor 23

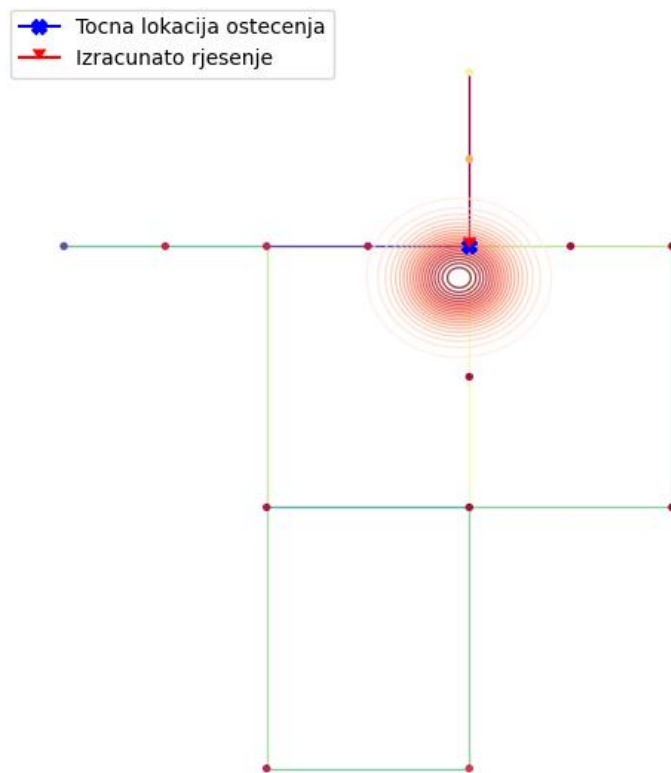
6. REZULTATI

Model je nakon podešavanja parametara testiran na dvije mreže. Utvrđeno je kako model dobro predviđa lokaciju oštećenja za slučaj kad oštećenje uzrokuje više od 80% veću potrošnju (volumni protok) vode nego inicijalno za čvor bez oštećenja. Na slici 6.1 prikazani su mjerni čvorovi mreže koji služe za očitavanje tlakova u prikazanim čvorovima i usporedbu rezultata.

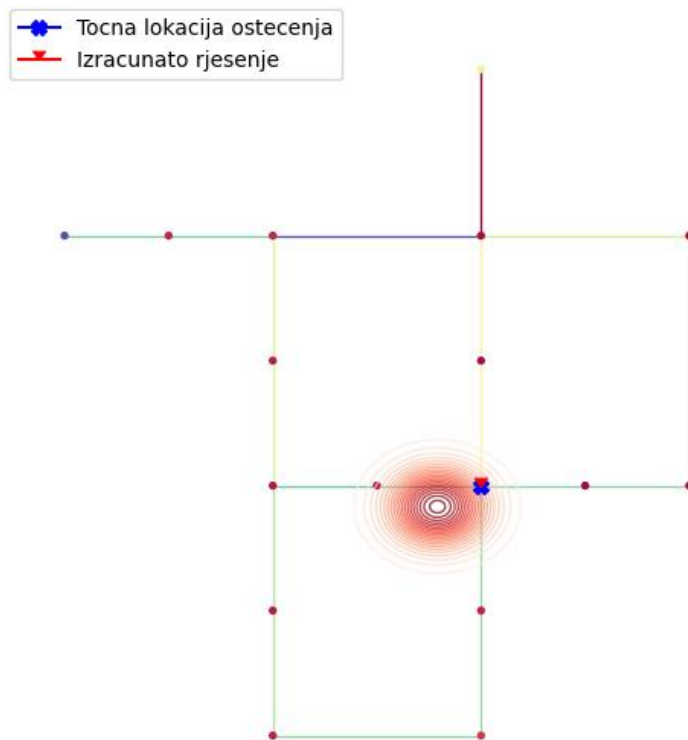


Slika 6.1 Prikaz mjernih čvorova mreže

Na slikama 6.2 i 6.3 prikazani su rezultati pronalaska oštećenja opisanom metodom. Lokalizacija oštećenja izvršena je minimizacijom optimizacijske funkcije uz pomoć PSO i SSA metode koje jednako dobro funkcioniraju na predstavljenom problemu. Vrijeme jedne optimizacije ovisi o kompleksnosti mreže i broju čvorova, cilj je postići 10 000 evaluacija po jednoj optimizaciji. Prosječno trajanje jedne optimizacije za mrežu prikazanu na slici 6.1 iznosi 3 minute.

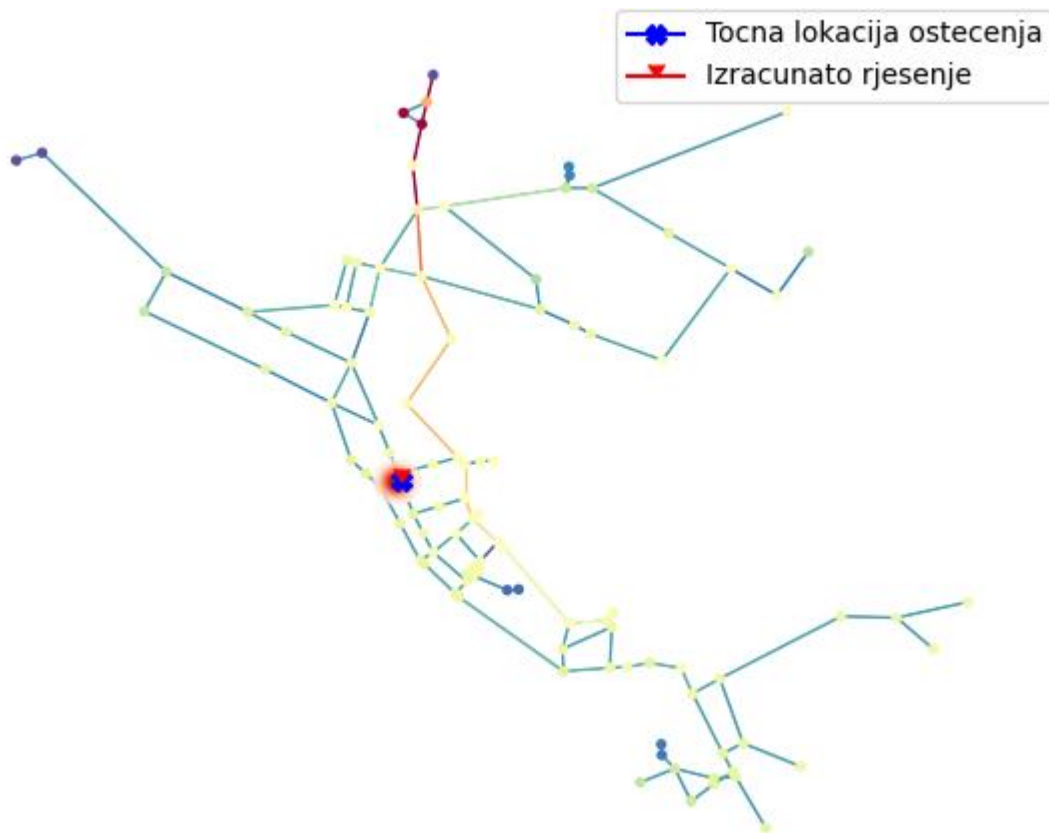


Slika 6.2 Prikaz rjesenja i pretpostavke modela – slučaj 1



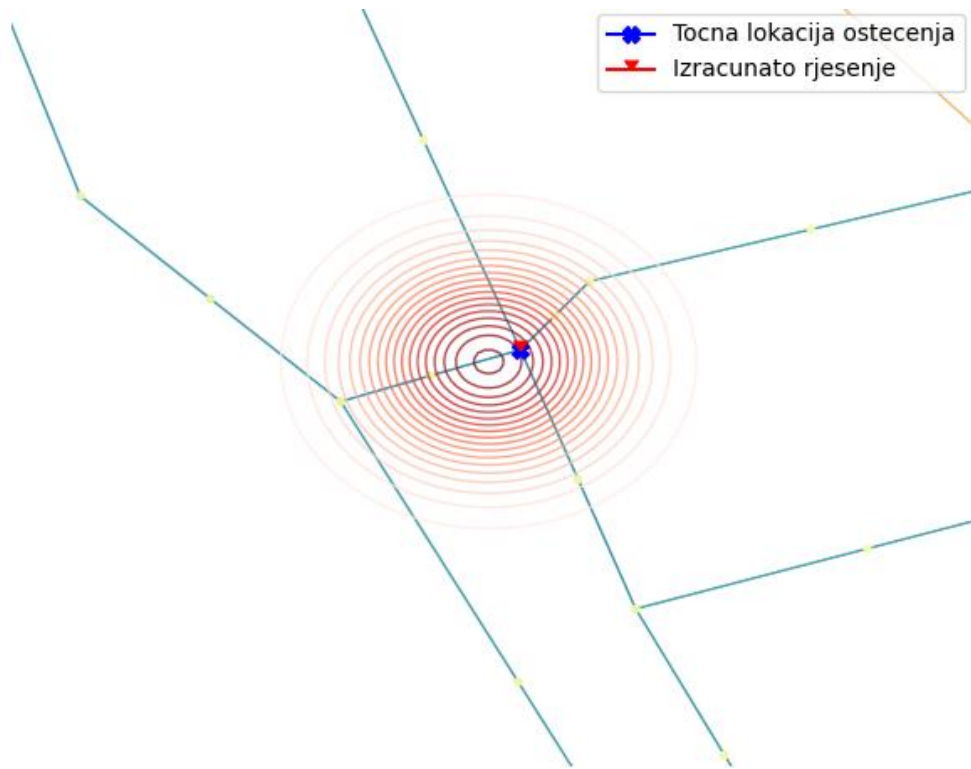
Slika 6.3 Prikaz rjesenja i pretpostavke modela - slučaj 2

Na slikama 6.2 i 6.3 moguće je uočiti područje prikazano crvenim gradijentom kao inicijalna pretpostavka modela. Daljnjom analizom metodom zlatnog reza za svaki zahvaćeni čvor, izračunata je najvjerojatnija lokacija oštećenja crvenim trokutićem. Nakon što su utvrđene granice i funkcionalnost modela, izvršene su lokalizacije na većoj mreži. Na slici 6.5 moguće je uočiti rješenje slučaja veće mreže nego kao kod prvog primjera. Trajanje jedne optimizacije za mrežu prikazanu na slici 6.4 iznosi oko 5 minuta uz zadovoljen uvjet od 10 000 evaluacija.

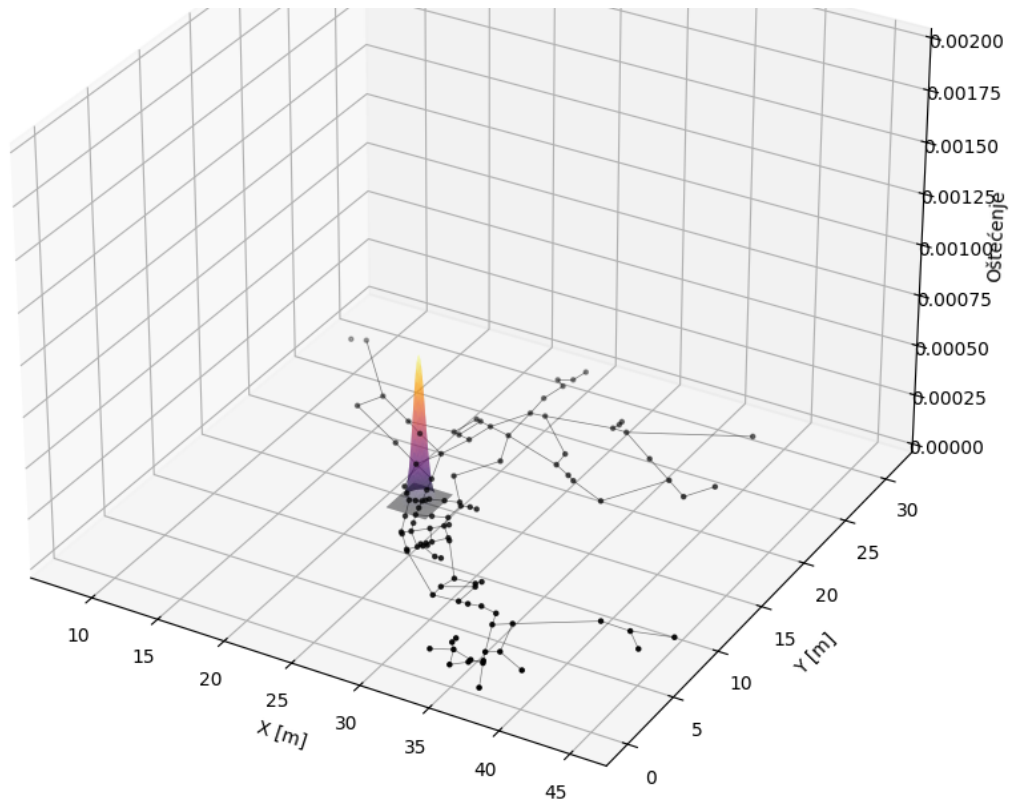


Slika 6.4 Prikaz pronalaska lokacije oštećenja

Na slici se može uočiti područje crvenim gradijentom koje predstavlja područje koje je model izračunao kao rješenje. U lokalnoj blizini može se uočiti i veći broj točaka u cjevovodnom sustavu radi preciznije lokalizacije u slučaju da se oštećenje nalazi duž cijevi. Konačna pretpostavka modela označena je crvenim trokutićem. Plavim križićem označena je točna lokacija oštećenja koja je inicijalno određena unosom korisnika radi testiranja modela. Informaciju o točnoj lokaciji oštećenja model nema, na ovoj slici je prikazana isključivo za pregled točnosti pretpostavke.

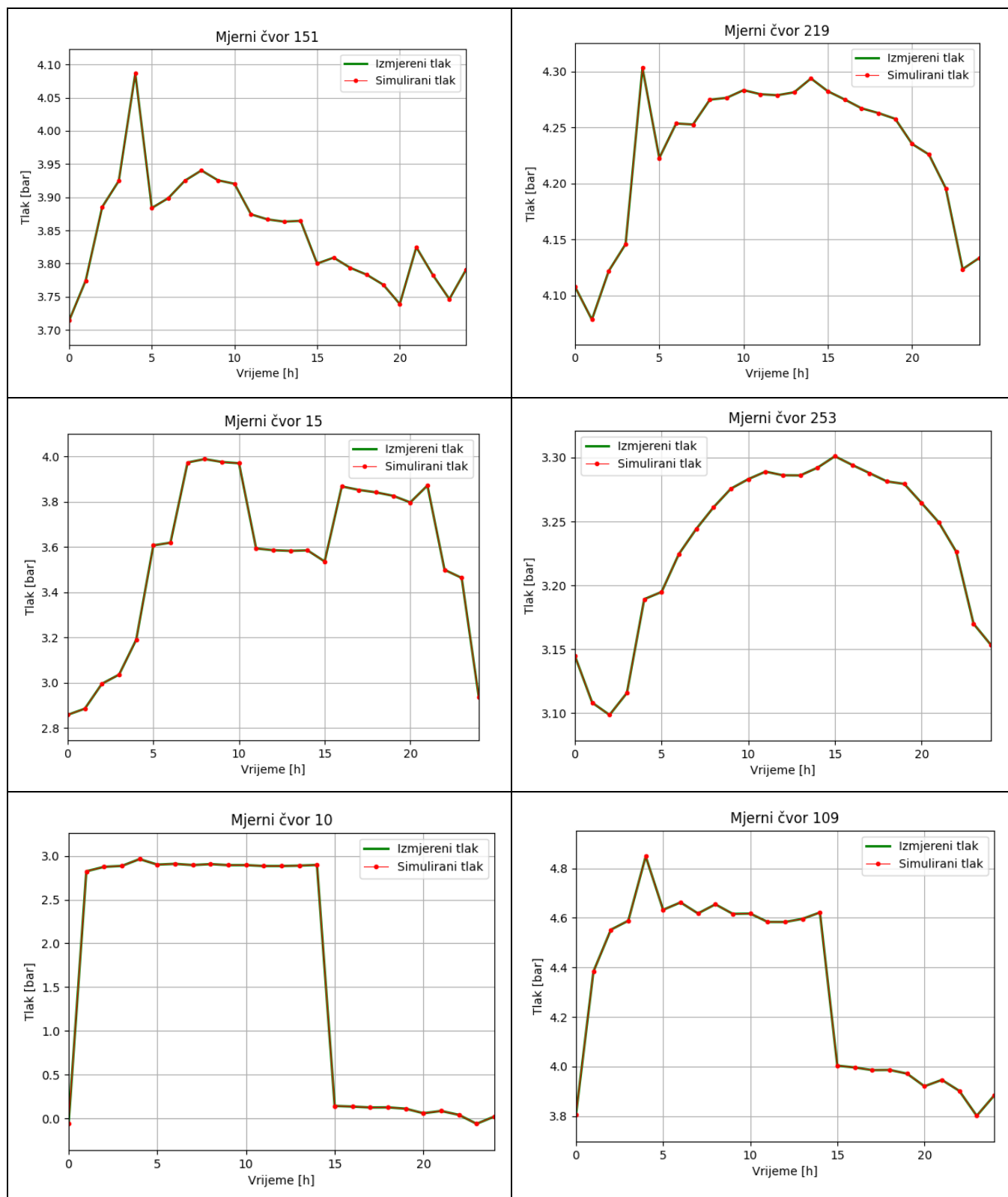


Slika 6.5 Uvećani prikaz područja

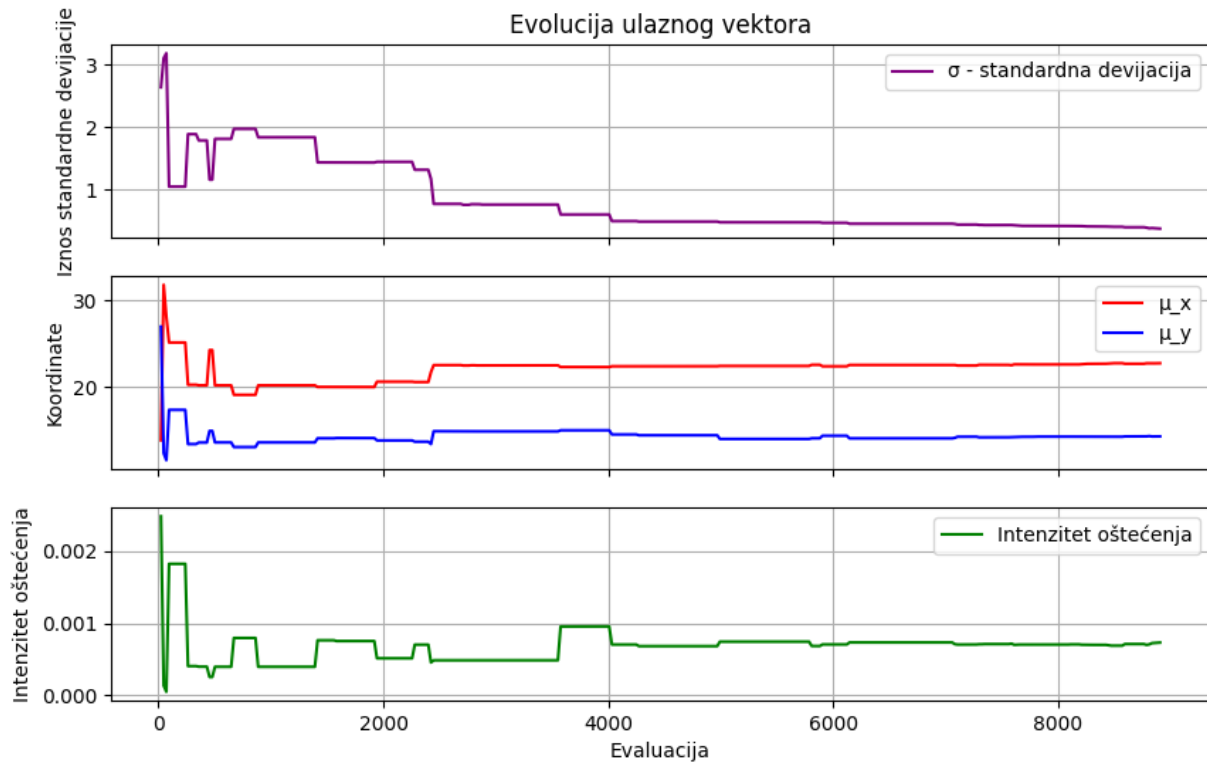


Slika 6.6 Prikaz prvog rješenja u trodimenzionalnom obliku

Tablica 4 Prikaz poklapanja tlakova u mjernim čvorovima

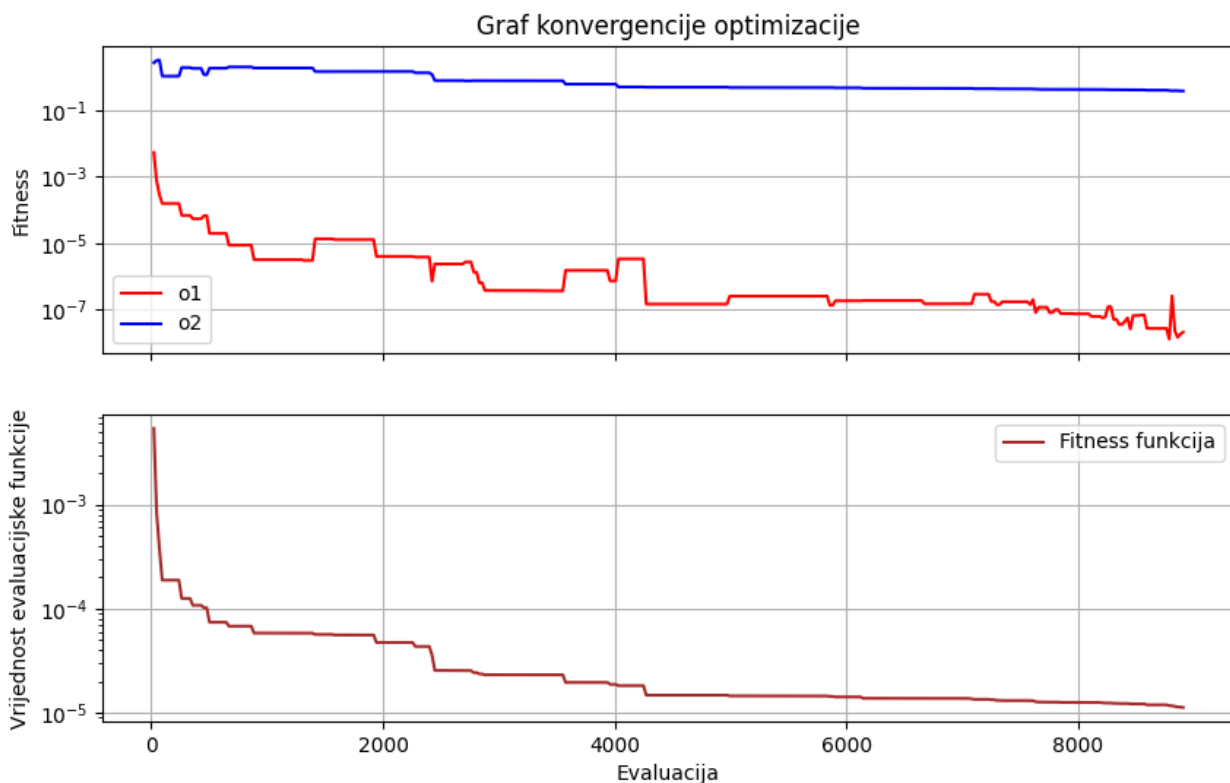


Obzirom da je prvi stupanj pretpostavljanja rješenja izvršen metodom numeričke optimizacije, moguće je grafički prikazati graf konvergencije numeričke metode. Na slici 6.9 moguće je uočiti graf koji prikazuje evoluciju ulaznog vektora C_i , odnosno vektora za koji model nastoji dobiti optimalne iznose. Na slici 6.10 prikazan je graf konvergencije s iznosima fitness funkcije i dvaju ciljeva.



Slika 6.9 Prikaz razvoja ulaznog vektora C_i

Na prvom prozoru prikazana je vrijednost prvog člana vektora kroz evoluciju optimizacijskog procesa koji predstavlja standardnu devijaciju distribucijske funkcije – σ . Na drugom prozoru su prikazane srednje vrijednosti distribucijske funkcije, odnosno μ_x i μ_y . Na trećem prozoru može se uočiti vrijednost intenziteta oštećenja, u kontekstu distribucijske funkcije ta vrijednost predstavlja posljednji član ulaznog vektora h .



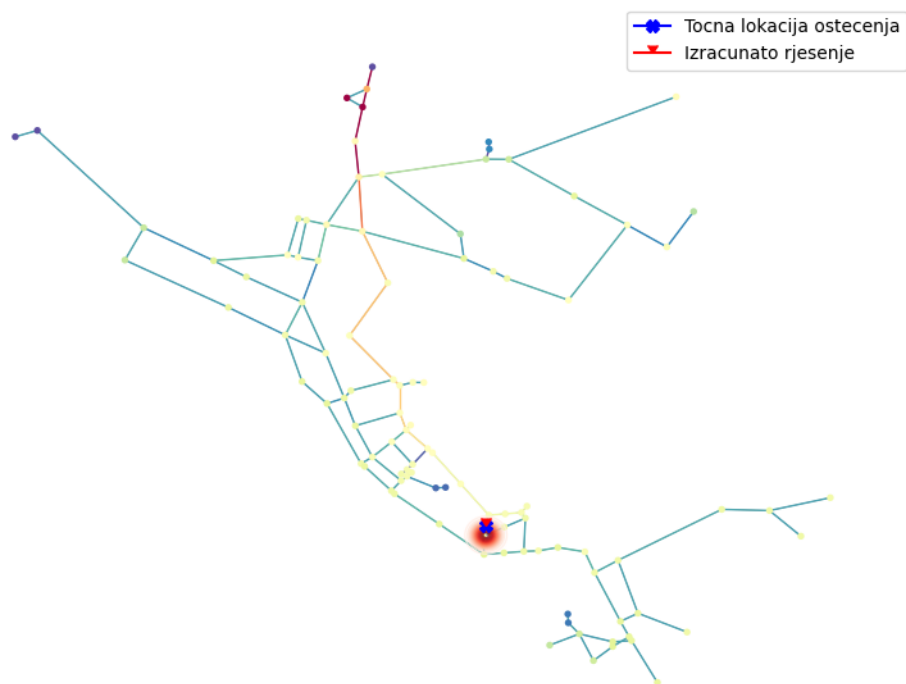
Slika 6.10 Prikaz grafa konvergencije

Na prvom prozoru su prikazane fitness vrijednosti ciljeva koji predstavljaju odstupanje od izmjerenih iznosa tlakova o_1 i cilj smanjenja iznosa devijacije o_2 . Obzirom da te dvije vrijednosti nemaju zajedničku skalu po kojoj se mogu mjeriti, potrebno je odrediti odnos težina ciljeva za optimizacijski problem. Metodom pokušaja i pogreške, usvojene su sljedeće vrijednosti:

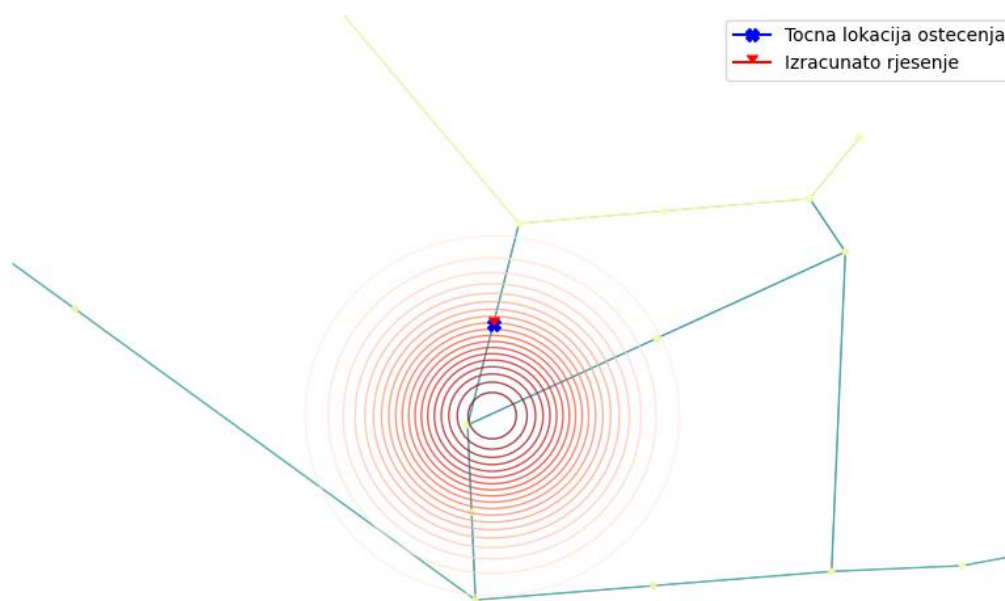
- Težina prvog optimizacijskog cilja $w_{o1} = 0.99997$
- Težina drugog optimizacijskog cilja $w_{o2} = 0.00003$

S tim vrijednostima dobivena je ravnoteža između točnosti modela i preciznosti, odnosno smanjenog područja sumnje.

Model također može vršiti pretragu oštećenja i po cijevima zbog mogućnosti podjele cijevi na manje dijelove. Iz praktičnih razloga, cijev nije potrebno dijeliti na manje dijelove jer ukoliko se oštećenje nalazi duž cijevi, instrumentima za akustično slušanje moguće je s visokom preciznošću odrediti točnu lokaciju oštećenja.



Slika 6.11 Oštećenje na polovici cijevi



Slika 6.12 Uvećani prikaz oštećenja na cijevi

7. ZAKLJUČAK

Vodovodne mreže su složeni sustavi sastavljeni od mnogo dijelova koji osiguravaju vodoopskrbu potrošačima u vodoopskrbnom sustavu. Uslijed stare infrastrukture ili nedovoljno kvalitetnog održavanja, mogu nastati oštećenja koja mogu kasnije predstaviti problem u kvaliteti dostavljene vode kroz cijevi ili volumne gubitke vode. Spektar oštećenja varira od mikroporoznih pukotina do velikih oštećenja sa značajnim gubicima vode iz sustava. Osim volumnih gubitaka vode, prijetnju kvaliteti vode predstavlja i onečišćenje koje može kroz oštećenje ući u vodovodni sustav i distribuirati se vodovodnom mrežom. Zbog toga, razvijeni su uređaji kojima se može detektirati postojanje i lokacija oštećenja. Uređaji adekvatni za takvu uporabu su veoma skupi i zahtijevaju iskusnog korisnika. Nadalje, navedeni uređaji služe za otkrivanje lokacije oštećenja na malom području vodovodne mreže. Zbog navedenih razloga, korisno je razviti numerički model koji ima sposobnost na temelju mjerenih podataka u vremenu izračunati lokaciju značajnog oštećenja. Postoji nekoliko metoda kojima se može dobiti procjena lokacije oštećenja, u ovom radu je detaljno opisan princip lokalizacije numeričkom optimizacijom. Cilj numeričke optimizacije jest uskladiti mjerenja iz virtualnog modela vodovoda sa stvarnim izmjerama tlaka vodovodnog sustava na predodređenim mjernim mjestima. Usklađivanje tih dviju vrijednosti može se postići računanjem srednjeg kvadratnog odstupanja ili kvadratnog odstupanja Z vrijednosti. Umjesto serijskog pretraživanja curenja čvor po čvor, lokalizacija curenja izvršena je koristeći Gaussovu bivarijabilnu distribuciju curenja u mreži. Na taj način se pretraživanje svodi na četiri optimizacijske varijable koje predstavljaju parametre distribucijske funkcije. Razvijen je model lokalizacije oštećenja na opisanom principu korištenjem programskog jezika *Python* i modula za numeričke optimizacije *Indago* razvijen na Tehničkom Fakultetu u Rijeci. Testirane su brojne metode numeričkih optimizacija, te je utvrđeno kako su za dani problem PSO i SSA metode najučinkovitije. Pretraživanje modelom vrši se u dva stupnja: inicijalna lokalizacija područja opisanog parametrima Gaussove bivarijabilne distribucije i dodatne lokalizacije provjerom svakog čvora u zahvaćenom području metodom zlatnog reza. Dobiveni rezultati su zadovoljavajući jer nadmašuju veličinu područja za koja se mogu koristiti spomenuti uređaji kojima se određuje točna lokacija oštećenja u cjevovodu. Metodom zlatnog reza dobiva se još preciznije rješenje od inicijalnog. Dodatna prednost takvog modela jest relativno brzo otkrivanje pojave manjih curenja i gubitka vode u sustavu. Naravno bitno je napomenuti kako je preciznost navedenog modela manja od preciznosti navedenih uređaja koji otkrivaju točnu lokaciju oštećenja, stoga je moguće koristiti oba alata za globalnu pretragu modelom i lokalnu pretragu područja

spomenutim uređajima. Nadalje, veličina područja moguće pretrage modelom ograničena je računalnom moći koje model koristi, iz tog razloga bilo bi korisno razmotriti opcije paralelne evaluacije, po mogućnosti na računalu s mogućnošću visokog stupnja paralelizacije. Model je moguće unaprijediti usporedbom sa stvarnim izmjerama tlakova i vrijednostima potrošnje vodovodnog sustava. Jedna od prepreka koju bi trebalo implementirati u model jest šum signala tlakova obzirom da uređaju za mjerenje tlakova imaju određeni stupanj devijacije u odnosu na stvarne vrijednosti. Također, potrošnja čvorova varira na dnevnoj bazi, te može stvoriti problem pri lokalizaciji. Logično rješenje bilo bi vršiti mjerenja tlakova u noćnim satima kada je potrošnja čvorova minimalna i kad su devijacije potrošnje čvorova najmanje. Implementiranjem navedenih otežanja i paralelnog računanja, model bi bilo zanimljivo testirati na manjim gradskim mrežama kako bi se ocijenile mogućnosti procjene i preciznosti takvog modela. Zaključno, model opisan u radu funkcionira na virtualnim vodovodnim mrežama, te može predstavljati dobru osnovu za razvoj modela primjenjivog na stvarnim vodoopskrbnim sustavima.

LITERATURA

- [1] Vijeće za Vodne Usluge: „Izvješće o stanju u sektoru vodnih usluga i radu vijeća za vodne usluge za 2021.“ Svibanj 2023.
- [2] Londonski vodoopskrbni sustav, s web stranice: https://en.wikipedia.org/wiki/London_water_supply_infrastructure
- [3] Portal Novi List: „Ovo je cijev koja je “pukla” i ostavila brojne Riječane bez vode. Proizvedena je u Austro-Ugarskoj“, s web stranice: https://www.novolist.hr/rijeka-regija/rijeka/ovo-je-cijev-koja-je-pukla-i-ostavila-brojne-rijecane-bez-vode-proizvedena-je-u-austro-ugarskoj/?meta_refresh=true Srpanj 2022.
- [4] Portal Novi List: „Problemi u Zagrebu: Puknuće vodovodne cijevi poplavilo Čileansku ulicu“, s web stranice: <https://www.novolist.hr/novosti/hrvatska/puknuce-vodovodne-cijevi-poplavilo-cileansku-ulicu/> Lipanj 2022
- [5] Znanstveni rad: T. K. Chan, Cheng Siong Chin Xiongzu Zhong, „Review of Current Technologies and Proposed Intelligent Methodologies for Water Distributed Network Leakage Detection“ Prosinac 2018.
- [6] Znanstveni rad: P. M. Bach and J. K. Kodikara, “Reliability of infrared thermography in detecting leaks in buried water reticulation pipes,” IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., vol. 10, no. 9, pp. 4210–4224, Rujan 2017.
- [7] EPANET dokumentacija, s Internet stranice: <https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/>
- [8] Gaussova dvodimenzionalna distribucija, s internet stranice: https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_function#Two-dimensional_Gaussian_function
- [9] „How does Particle Swarm Optimization work?“ S Internet stranice: <https://www.baeldung.com/cs/psa> Lipanj 2023.
- [10] Iz znanstvenog članka: Yanjiao Wang, Tianlin Du „A Multi-objective Improved Squirrel Search Algorithm based on Decomposition with External Population and Adaptive Weight Vectors Adjustment“ Ožujak 2020.
- [11] Indago, s internet stranice: <https://indago.readthedocs.io/>

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Prikaz puknute cijevi [3].....	4
Slika 2.2 Prikaz zahvaćenog područja radovima [3]	5
Slika 2.3 Prikaz poplavljenog područja u Zagrebu [4]	5
Slika 3.1 CCTV senzor [5].....	6
Slika 3.2 Senzori za detekciju oštećenja putem akustičnog slušanja [5]	7
Slika 3.3 Radar za pregled cijevi kroz tlo [5]	8
Slika 3.4 Metoda praćenja injektirane supstance [5]	9
Slika 3.5 Metoda infracrvene termografije [5]	9
Slika 3.6 Metoda primjene senzora s optičkim vlaknima [5]	11
Slika 3.7 RFEC metoda [5].....	11
Slika 4.1 Shema vodoopskrbne mreže	20
Slika 5.1 Usporedba očitavanja tlakova.....	21
Slika 5.2 Gaussova 2D razdioba vjerojatnosti oštećenja prikazana na mreži.....	25
Slika 5.3 Protok istjecanja u odnosu na tlak i koeficijent.....	26
Slika 5.4 Prikaz položaja mjernih čvorova	27
Slika 5.5 Granice srednjih vrijednosti distribucije – mreža 1	31
Slika 5.6 Trodimenzionalni prikaz distribucijske funkcije s minimalnom vrijednošću devijacije....	32
Slika 5.7 Dvodimenzionalni prikaz distribucijske funkcije s minimalnom vrijednošću devijacije...	33
Slika 5.8 Prikaz distribucije s maksimalnom vrijednosti standardne devijacije.....	34
Slika 5.9 Mreža s područjem segmentiranih cijevi.....	38
Slika 5.10 Detalj mreže sa segmentiranim područjem.....	39
Slika 5.11 Funkcija intenziteta oštećenja za čvor 23	41
Slika 6.1 Prikaz mjernih čvorova mreže	42

Slika 6.2 Prikaz rješenja i pretpostavke modela – slučaj 1	43
Slika 6.3 Prikaz rješenja i pretpostavke modela - slučaj 2.....	43
Slika 6.4 Prikaz pronalaska lokacije oštećenja	44
Slika 6.5 Uvećani prikaz područja	45
Slika 6.6 Prikaz prvog rješenja u trodimenzionalnom obliku.....	45
Slika 6.7 Prikaz minimalnog odstupanja dviju vrijednosti	47
Slika 6.8 Prikaz odstupanja u mjerenjima na temelju srednjeg kvadratnog odstupanja.....	47
Slika 6.9 Prikaz razvoja ulaznog vektora C_i	48
Slika 6.10 Prikaz grafa konvergencije	49
Slika 6.11 Oštećenje na polovici cijevi.....	50
Slika 6.12 Uvećani prikaz oštećenja na cijevi	50

POPIS TABLICA

Tablica 1 Podaci o potrošnji i isporuci vode od 2016. do 2020. [1].....	2
Tablica 2 Prosječna potrošnja vode od 2016. do 2021. [1].....	3
Tablica 3 Simboli sheme.....	20
Tablica 4 Prikaz poklapanja tlakova u mjernim čvorovima	46

SAŽETAK

Diplomski rad „Detekcija i lokalizacija gubitaka u cjevovodnim mrežama temeljena na numeričkoj optimizaciji“ opisuje problem gubitaka vode iz vodovodnih sustava kroz oštećenja u cijevima. Opisane su metode lokalizacije oštećenja primjenom specijaliziranih alata i njihovi nedostaci. Razvijen je model koji pronalazi potencijalnu lokaciju oštećenja metodom multivarijabilne optimizacije evaluacijske funkcije uz pomoć genetičkih algoritama. Model je podijeljen u dva stupnja: minimizaciju parametara Gaussove dvodimenzionalne funkcije za lokaciju oštećenja i dodatnu optimizaciju lokacije za svaki čvor metodom zlatnog reza. Dobiveni rezultati su zadovoljavajući, te su iznijete preporuke za unaprjeđenje sustava i buduća istraživanja.

Ključne riječi: Vodoopskrbni sustav, detekcija oštećenja, lokalizacija oštećenja, numerička optimizacija, numerički model, nestacionarne simulacije protoka, višedimenzijaska analiza, EPANET, WNTR

ABSTRACT

Master's thesis "Detection and Localization of Leaks in Pipeline Networks Based on Numerical Optimization" describes the problem of water losses from water supply systems through pipe damage. Thesis explains methods for localizing damage using specialized tools as well as their drawbacks. A numerical model has been developed that finds the potential location of damage using the method of multivariable optimization of the evaluation function with the help of genetic algorithms. The model is divided into two stages: minimizing the parameters of the Gaussian two-dimensional function for the location of the damage and additional optimization of the location for each node using the golden section method. The results obtained are satisfactory and recommendations for improvement and future studies are presented.

Key words: Water supply system, leak detection, leak localization, numerical optimization, numerical model, multivariable analysis, transient flow analysis, EPANET, WNTR