

# Lokalizacija gubitka vode u vodoopskrbnim mrežama primjenom matrice osjetljivosti tlakova

---

Vareško, Matea

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:585498>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Matea Vareško**

**Lokalizacija gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama primjenom  
matrice osjetljivosti tlakova  
Leak localization in water distribution networks using pressure  
sensitivity matrix**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni Diplomski Studij  
Hidrotehnika  
Računarska hidraulika**

**Matea Vareško  
JMBAG: 0114029653**

**Lokalizacija gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama primjenom  
matrice osjetljivosti tlakova  
Leak localization in water distribution networks using pressure  
sensitivity matrix**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2022.**



## IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Matea Vareško

U Rijeci, 14. rujan 2022.

*Zahvala!*

*Prije svega, zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Vanji Travašu dipl.ing.građ. i komentoru doc.dr.sc. Danku Holjeviću na pruženoj podršci, uputama, sugestijama, znanju i strpljenu koje mi je pružio za vrijeme izrade ovog diplomskog rada.*

*Najviše se zahvaljujem mojoj obitelji i prijateljima za svu podršku koju su mi pružili za vrijeme studiranja. Hvala vam što ste bili uz mene u svim teškim i u svim sretnim trenucima. Što ste uvijek vjerovali u mene i bodrili me cijelim putem. Ovaj je uspjeh jednako vaš koliko je i moj, jer bez vas ovoga ne bi ni bilo.*

## SAŽETAK

Tema koja se ovim diplomskim radom obrađuje usko je povezana uz gubitke vode u vodoopskrbnim sustavima. Opisuje se kako dolazi do gubitaka vode u vodoopskrbnim sustavima, kako se oni saniraju te kako se utvrđuje njihov položaj. U radu su opisane, analizirane i testirane tri proračunske determinističke metode lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama, i to metoda vektorskog otklona, metoda korelacijskog koeficijenta te metoda Euklidove udaljenosti. Sve su tri metode komparirane te su utvrđene njihove prednosti i nedostaci. Također, metode su uspoređene međusobno, a zaključci su potkrijepljeni provedenim računalnim simulacijama koristeći se pripremljenim kodom u programskom jeziku Python (na primjeru idealne vodoopskrbne mreže modelirane u programu Epanet).

Ključne riječi: *gubici vode, vodoopskrbni sustav, metode lokalizacije gubitaka vode, metoda vektorskog otklona, metoda korelacijskog koeficijenta, metoda Euklidove udaljenosti.*

## ABSTRACT

The topic covered in this thesis is closely related to water losses in water distribution networks. It describes how water losses occur in water distribution networks, how they are repaired and how their location is determined. The paper describes, analyzes and tests three deterministic methods of localization of water losses in water distribution networks: angle between vector method, correlation method and Euclidean method. All three methods were compared and their advantages and disadvantages were determined. Also, the methods were compared with each other and the conclusions were supported by computer simulations using prepared code in Python programming language (on the example of an ideal water supply network model in the Epanet program).

*Key words: water losses, water distribution network, methods of detection of losses, angle between vectors method, correlation method, Euclidean method.*



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b>	<b>15</b>
1.1 Sustavi vodoopskrbe	15
1.2. Gubici vode u vodoopskrbnom sustavu	19
<b>2. LOKALIZACIJA GUBITAKA VODE U VODOOPSKRBNOJ MREŽI</b>	<b>26</b>
2.1 Zoniranje vodoopskrbne mreže	29
2.2. Podaci potrebni za primjenu metoda lokalizacije	30
2.3. Konstrukcija vektora reziduala $\mathbf{r}$	31
2.4. Konstrukcija matrice osjetljivosti $\mathbf{S}$	32
2.5. Komparacija vektora reziduala $\mathbf{r}$ i stupca matrice osjetljivosti $\mathbf{S}$	33
<b>3. METODE LOKALIZACIJE GUBITAKA VODE U VODOOPSKRBNOJ MREŽI</b>	<b>34</b>
3.1 Metoda vektorskog otklona	34
3.2. Metoda korelacijskog koeficijenta	37
3.3. Metoda Euklidove udaljenosti	42
3.4. Usporedba metode vektorskog otklona i metode Euklidove udaljenosti	45
<b>4. NUMERIČKI PRIMJERI</b>	<b>46</b>
4.1. Protokol izrade primjera	47
4.2. Analiza rezultata za primjere različitih lokacija mjernih mjesta tlakova	48
4.3. Analiza rezultata za primjere različitih protoka gubitaka vode	55
4.4. Analiza rezultata za primjere različitog broja mjernih mjesta tlakova	59
4.5. Analiza rezultata za primjere na vodoopskrbnim mrežama s različitim brojem čvorova	64
4.6. Analiza rezultata za primjere u kojima postoji više od jednog gubitka vode	69
4.7. Analiza posebnih primjera zapaženih prilikom provođenja računalnih simulacija	76
<b>5. ZAKLJUČAK</b>	<b>85</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1.1 Shematski prikaz gravitacijskog vodoopskrbnog sustava [1].

Slika 1.2 Shematski prikaz tlačnog vodoopskrbnog sustava [1].

Slika 1.3 Shematski prikaz kombiniranog vodoopskrbnog sustava [1].

Slika 1.4 Broj lokalnih i javnih komunalnih društava koji upravljaju vodovodom u Republici Hrvatskoj kroz godine [2].

Slika 1.5 Postotak priključenosti stanovništva na sustave javne vodoopskrbe u 1986. i 2016. godini [2].

Slika 1.6 Postotak priključenosti stanovništva na sustave lokalne vodoopskrbe u 2008. i 2016. godini [2].

Slika 1.7 Podaci o gubicima u vodovodnim mrežama različitih zemalja Europske Unije [5].

Slika 1.8 Rezultati programa kontrole gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži na području pulskog vodovoda između 1996. i 2013. godine [6].

Slika 1.9 Četiri pravca djelovanja prema strategiji učinkovitog upravljanja gubicima vode [8].

Slika 2.1 Primjer očiglednog gubitka vode – puknuće vodovodne cijevi na Putu Trstenika [10].

Slika 2.2 Primjer prikrivenog gubitka vode – puknuće vodovodne cijevi u Brestovcu [11].

Slika 2.3 Lokalizacija gubitaka vode oslušivanjem vodoopskrbne mreže [3].

Slika 2.4 Shematski prikaz DMA zona [4].

Slika 3.1 Grafički prikaz usporedbe dva vektora metodom vektorskog otklona.

Slika 3.2 Grafički prikaz usporedbe dva vektora metodom Euklidove udaljenosti.

Slika 4.1 Prikaz kvadratne mreže s 100 čvorova s nazivima svakog čvora.

Slika 4.2 Prikaz kvadratne mreže s 361 čvorom s nazivima svakog čvora.

Slika 4.3 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.

Slika 4.4 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer B.

Slika 4.5 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer C.

Slika 4.6 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer D.

Slika 4.7 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.

Slika 4.8 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.

Slika 4.9 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.

Slika 4.10 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer D.

Slika 4.11 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.

Slika 4.12 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.

Slika 4.13 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer C.

Slika 4.14 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer D.

Slika 4.15 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

Slika 4.16 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.

Slika 4.17 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer C.

Slika 4.18 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer D.

Slika 4.19 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu dolazi do gubitka vode označenog crvenom točkom.

Slika 4.20 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.

Slika 4.21 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.

Slika 4.22 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.

Slika 4.23 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.

Slika 4.24 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.

Slika 4.25 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer C.

Slika 4.26 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

Slika 4.27 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.

Slika 4.28 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer C.

Slika 4.29 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.

Slika 4.30 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer B.

Slika 4.31 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer C.

Slika 4.32 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.

Slika 4.33 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.

Slika 4.34 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.

Slika 4.35 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.

Slika 4.36 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.

Slika 4.37 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer C.

Slika 4.38 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

Slika 4.39 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.

Slika 4.40 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer C.

Slika 4.41 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.

Slika 4.42 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer B.

Slika 4.43 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.

Slika 4.44 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.

Slika 4.45 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.

Slika 4.46. Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.

Slika 4.47 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

Slika 4.48 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.

Slika 4.49 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvorova u kojima se nalaze gubici vode označeni crvenim točkama za primjer A.

Slika 4.50 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.

Slika 4.51 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.

Slika 4.52 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

Slika 4.53 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvorova u kojima se nalaze gubici vode označeni crvenim točkama za primjer B.

Slika 4.54 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.

Slika 4.55 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.

Slika 4.56 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.

Slika 4.57 Postoci pojave različitih ishoda računalnih simulacija za metodu vektorskog otklona.

Slika 4.58 Postoci pojave različitih ishoda računalnih simulacija za metodu korelacijskog koeficijenta.

Slika 4.59 Postotci pojave različitih ishoda računalnih simulacija za metodu Euklidove udaljenosti.

Slika 4.60 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer A.

Slika 4.61 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer B.

Slika 4.62 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer C.

Slika 4.63 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.

Slika 4.64 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.

Slika 4.65 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.

Slika 4.66 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer D.

Slika 4.67 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer E.

Slika 4.68 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer F.

Slika 4.69 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer D.

Slika 4.70 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer E.

Slika 4.71 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer F.

Slika 4.72 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.

Slika 4.73 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.

Slika 4.74 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.

Slika 4.75 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Iskaz ishoda provedenih računalnih simulacija za osamnaest primjera u kojima se gubici vode nalaze u čvorovima 21 i 60.

## 1. UVOD

Poznata je činjenica kako je voda izvor života. Svi stanovnici Zemlje oduvijek su imali potrebu za vodom, a samim time još se kroz davnu povijest javila prva potreba za gradnjom svojevrsnih vodoopskrbnih sustava.

Samom pojavom vodoopskrbnih građevina i sustava, koliko god oni jednostavni bili, od samih se početaka javlja i pojava gubitaka vode u njima.

Unutar ovog diplomskog rada opisati će se pojava i sanacija gubitaka vode, a pobliže će se teorijski i računskim primjerima objasniti i analizirati metode lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama koristeći se inverznim modeliranjem.

### 1.1. Sustavi vodoopskrbe

Sustavi vodoopskrbe definiraju se kao sustavi objekata i mjera povezanih u funkcionalnu cjelinu pomoću kojih se voda zahvaća na izvorištu i u konačnici dovodi do potrošača odnosno korisnika. Cijeli je niz radnji i elemenata potreban kako bi voda došla od zahvata do korisnika, odnosno voda na svom putu prolazi kroz uređaj za kondicioniranje kako bi se kondicionirala, skladišti se privremeno u vodospremi te potom razvedenim cijevima odlazi prema gradovima i naseljima i konačno ka svakom potrošaču [1].

Svaki vodoopskrbni sustav je poseban i jedinstven, planira se, projektira i gradi u ovisnosti o lokalnim potrebama potrošača i gustoći naseljenosti, geografskim uvjetima, izdašnosti i udaljenosti izvora pitke vode kao i kakvoći sirove vode. Sve su ovo faktori koji su neizbježni za kvalitetno projektiranje i planiranje vodoopskrbnog sustava [1].

Nekoliko je elemenata koji čine svaki vodoopskrbni sustav, i to u smjeru toka vode kako slijedi:

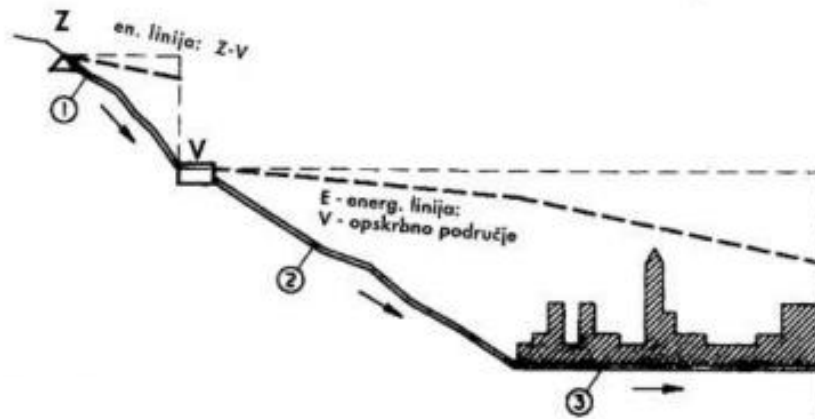
- vodozahvati,
- crpne stanice,
- uređaj za kondicioniranje vode,
- vodospreme i
- glavne i razdjelne vodoopskrbne mreže [1].

Prema načinu dovoda vode od vodospreme do krajnjeg korisnika razlikujemo tri sustava:



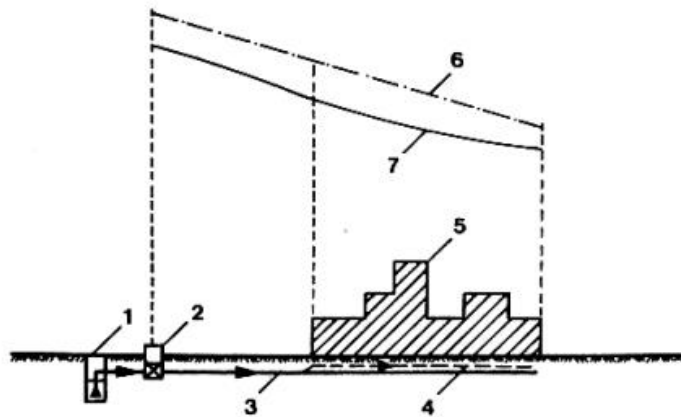
- 1) gravitacijski sustav,
- 2) tlačni sustav i
- 3) kombinirani sustav.

Glavna karakteristika gravitacijskog vodoopskrbnog sustava je ta da se tečenje vode događa pod utjecajem gravitacijske sile. Konkretnije, ovakav se sustav projektira na način da su vodozahvat i vodosprema pozicionirani na većoj visinskoj koti u odnosu na područje koje opskrbljuju. Pri projektiranju ovakvog sustava kritično je uzeti u obzir pad energetske linije te planirati da najniža točka iste bude na većoj visinskoj koti od visinske kote najvišeg potrošača, kako je prikazano na slici 1.1, gdje se jasno vidi proračunati pad energetske linije [1].



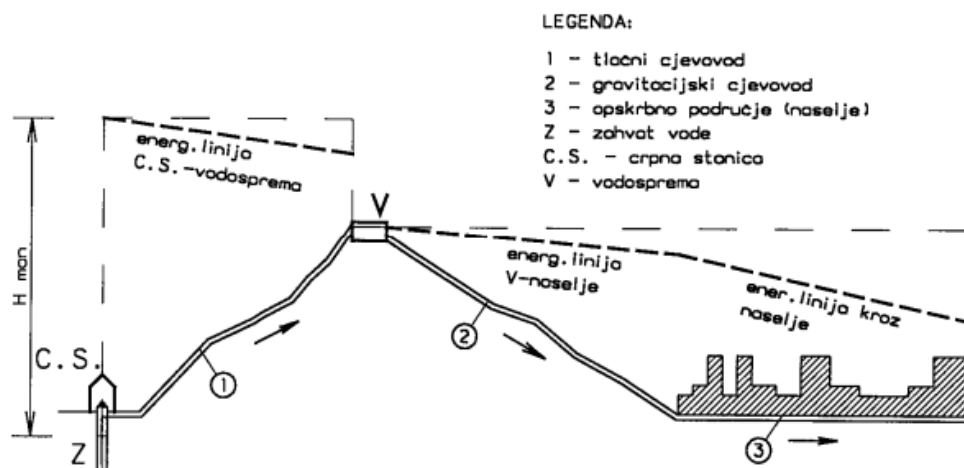
Slika 1.1 Shematski prikaz gravitacijskog vodoopskrbnog sustava [13].

Za razliku od gravitacijskog sustava, u tlačnom sustavu voda se od vodospreme do korisnika dovodi na način da se u najnižoj visinskoj koti postavljaju crpne stanice koje mehanički podižu vodu kroz cjevovode kako bi ona dospjela do korisnika na većoj visinskoj koti, kako je prikazano na Slici 1.2. Ovakvi su sustavi nepovoljniji od gravitacijskih iz ekonomskih razloga – svaki crpni uređaj potrebno je dodatno platiti te se također mora uzeti u obzir održavanje i mogući kvarovi na istima, koji su nepostojeći kod gravitacijskih sustava. Iz tog se razloga nastoji izbjeći gradnja tlačnih sustava uvijek kada je to moguće [1].



Slika 1.2 Shematski prikaz tlačnog vodoopskrbnog sustava [13].

U realnosti je teško izvesti potpuno gravitacijski vodoopskrbni sustav, te je iz tog razloga najčešći sustav vodoopskrbe zapravo kombinirani vodoopskrbni sustav (Slika 1.3), u kojemu se voda dovodi dijelom kroz gravitacijski cjevovod, a na mjestima gdje takav cjevovod nije moguće ostvariti voda se dovodi kroz tlačni cjevovod [1].



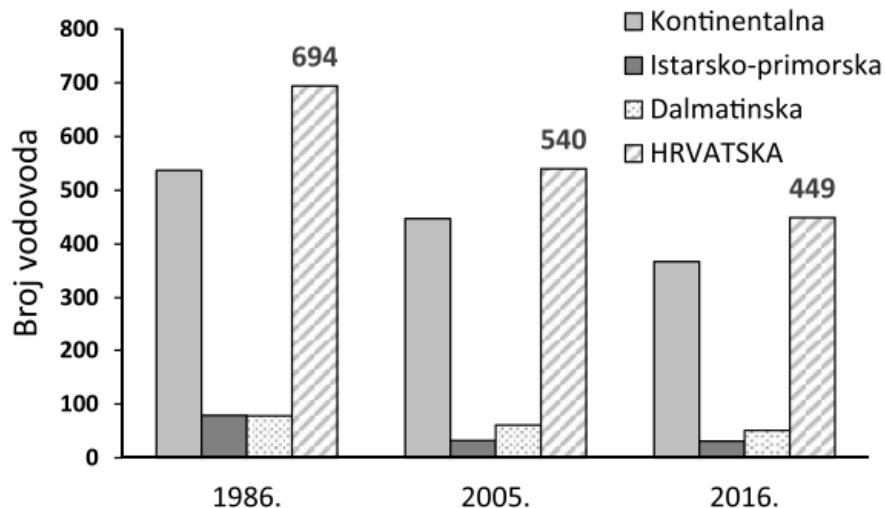
Slika 1.3 Shematski prikaz kombiniranog vodoopskrbnog sustava [13].

Potrebno je također napomenuti da osim podjele prema načinu dovoda vode postoji i podjela vodoopskrbnih sustava prema položaju glavne vodospreme u odnosu na mjesto potrošnje. Na taj način se mogu razlikovati:

- vodosprema ispred mjesta potrošnje,
- vodosprema iza mjesta potrošnje i
- vodosprema u mjestu potrošnje.

### 1.1.2. Vodoopskrbni sustavi u Republici Hrvatskoj

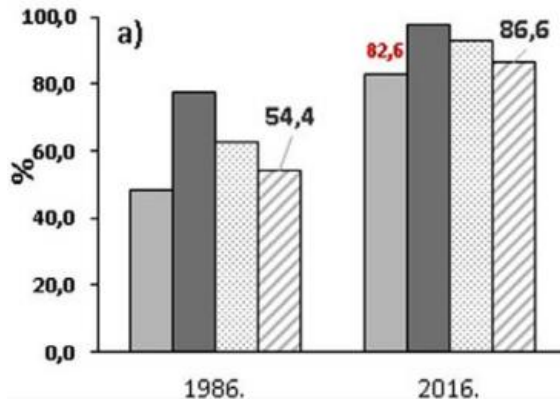
Na području Republike Hrvatske u 1986. godini poslovalo je ukupno 694 komunalnih društava koji upravljaju vodovodom, od čega 449 lokalnih i 245 javnih, dok je zabilježeni broj komunalnih društava koji upravljaju vodovodom u 2016. godini bio znatno manji, odnosno 449, od čega 135 javnih, a 314 lokalnih, kako je prikazano grafom na Slici 1.4 [2].



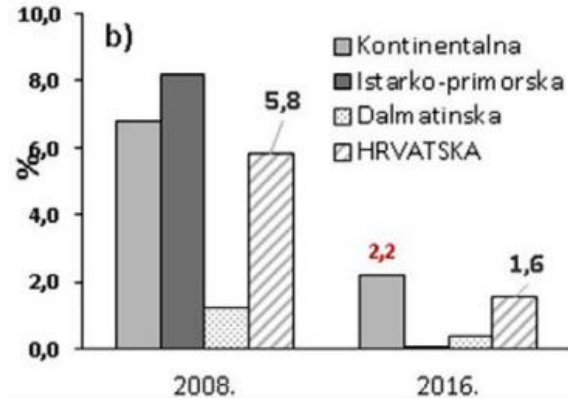
Slika 1.4 Broj lokalnih i javnih komunalnih društava koji upravljaju vodovodom u Republici Hrvatskoj kroz godine [2].

Sisačko-moslovačka i Dubrovačko-neretvanska županija, prema podacima iz 2016. godine, županije su s najvećim brojem javnih komunalnih društava koja upravljaju vodovodima (12), dok je županija s najmanjim brojem javnih komunalnih društava koji upravljaju vodovodom Međimurska (1). Isti podaci također daju informaciju kako je županija s najvećim brojem lokalnih komunalnih društava koji upravljaju vodovodom Karlovačka (66) [2].

Prema podacima iz 2016. godine, pretpostavlja se da je na javnu vodoopskrbu u Republici Hrvatskoj priključeno približno 87% stanovništva, a na lokalnu približno 1,6% stanovništva, za razliku od podataka iz 1986. godine, kada je postotak priključenosti stanovništva na vodoopskrbnu mrežu na području Republike Hrvatske bio približno 54,4 %. Iz ovih se podataka zaključuje kako je u posljednjih 30 godina opskrbljenost vodom na području Republike Hrvatske porasla za znatnih 32,2 %. (Slika 1.5) [2].



Slika 1.5 Postotak priključenosti stanovništva na sustave javne vodoopskrbe u 1986. i 2016. godini [2].



Slika 1.6 Postotak priključenosti stanovništva na sustave lokalne vodoopskrbe u 2008. i 2016. godini [2].

Ukoliko se promatra opskrbljenost vodom unutar regija Republike Hrvatske, daje se zaključiti kako je kontinentalna Hrvatska manjim postotkom priključena na javnu vodoopskrbnu mrežu u odnosu na primorsku Hrvatsku, što uključuje Istru i Dalmaciju. Na Slici 1.5 prikazano je kako je područje kontinentalne Hrvatske opskrbljeno približno 82,6 %. Paralelno s time, kontinentalna Hrvatska prednjači nad primorskom u postotku priključenosti na lokalnu vodoopskrbnu mrežu, i to s 2,2 %. Prateći podatke prikazane grafom na Slici 1.6 primjećuje se kako je postotak stanovništva na području Republike Hrvatske priključenog na lokalnu vodoopskrbu znatno pao prema podacima iz 2016. godine u odnosu na podatke iz 2008. godine, i to konkretno s 5,8 % na 1,6% ukupne priključenosti stanovništva [2].

## 1.2. Gubici vode u vodoopskrbnom sustavu

Čak i u najbanalnijem slučaju kada se zahvat vode na vodotoku ili izvorištu vrši ručno i potom se pješačenjem dovodi do potrošača, doći će do izlivanja poneke kapi vode. Dakle, problem gubitaka vode javlja se već na samom početku, te je potrebno pridati mu puno pažnje kako bi ga se ipak svelo na minimum.

Gubici vode odnose se na razliku zahvaćene i isporučene količine vode, odnosno predstavljaju zahvaćenu vodu koja ne stigne do krajnjeg korisnika. Oni se javljaju duž cijelog vodoopskrbnog sustava, od mjesta zahvaćanja vode sve do posljednjeg potrošača.

Do gubitaka vode može doći na uređajima za kondicioniranje radi nepravilnog čišćenja filtera ili radi loših zasuna i crpki. Također se može dogoditi da kod glavnih cjevovoda dođe do gubitka vode, a neki od faktora za takav ishod su loša izvedba izolacije cjevovoda, ventila i spojnica. Osim u cjevovodu, gubici vode se također mogu dogoditi i u crpnim stanicama i to najčešće na stanicama koje nisu redovito i pravilno održavane [3].

Međutim, najveći gubici vode u vodoopskrbnim sustavima događaju se na onim dijelovima sustava koji su najmanje vidljivi, primjerice spojevi, armature i priključci. Upravo je na njih potrebno obratiti najveću pozornost kako bi se ukupan postotak gubitaka vode mogao smanjiti [3].

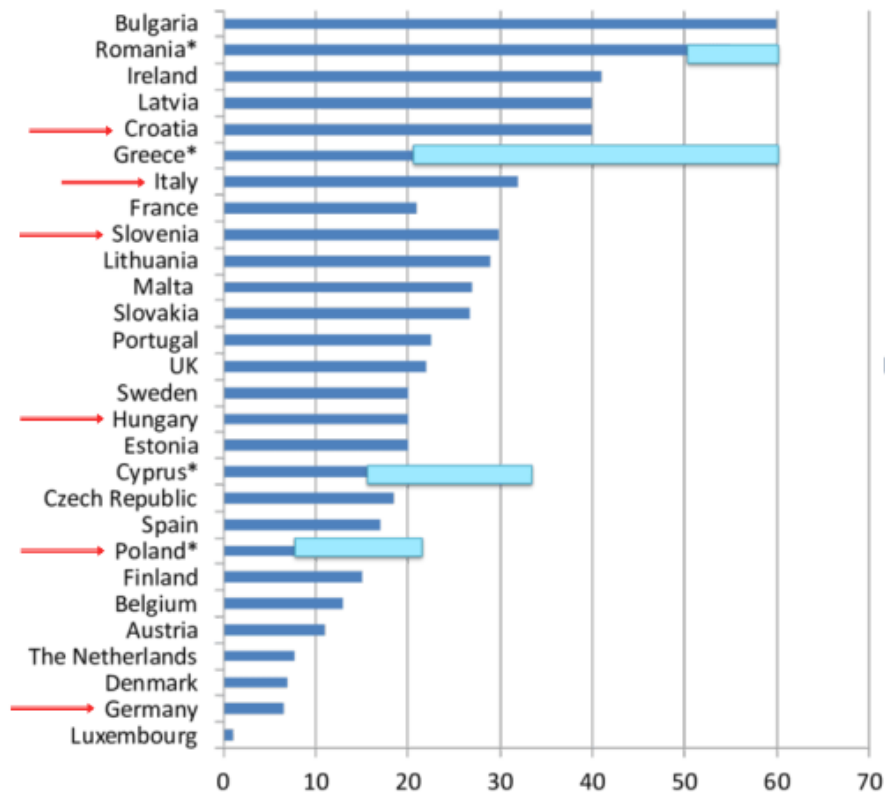
Kao neki od faktora koji utječu na količinu gubitaka vode navode se tlakovi u mreži, kvaliteta materijala, dotrajalost elemenata vodoopskrbne mreže, način izvedbe, nemar i nestručan rad, kao i prirodne neprilike poput nestabilnosti tla (slijeganje, klizišta i slično) [3].

Gubici vode najčešće se iskazuju u postocima, točnije kao odnos zahvaćene prema isporučenoj količini vode. Međutim, sve je više poznato kako je takvo iskazivanje gubitaka vode prilično netransparentno iz razloga što sustavi koji isporučuju veću količinu vode iskazuju manje vrijednosti gubitaka vode predstavljenih u protocima. Kada se ovakav netransparentan način prikaza gubitaka vode primjenjuje dolazi do pogrešnog analiziranja stvarnog stanja te naposljetku i neučinkovitog djelovanja, pa umjesto željenog efekta – maksimalnog smanjenja gubitaka vode – dolazi do neznatnog smanjenja ili čak u nekim slučajevima i do povećanja gubitaka vode [4].

Uzevši u obzir globalno zatopljenje, smanjenje resursa kao i ekonomsku krizu, sve veći broj ljudi počinje se sve više baviti gubitkom osnovnog resursa – vode. Postoji nekoliko metoda definiranja i smanjivanja gubitaka vode, neke od kojih su IWA (engl. „International Water Association“) metodologija, metoda kontrole tlaka, metoda lokalizacije gubitaka vode i slično. Unutar ovog diplomskog rada obrađuje se tematika lokalizacije gubitaka vode primjenom matrice osjetljivosti tlakova.

### 1.2.1. Gubici vode u vodoopskrbnim sustavima u Republici Hrvatskoj

Prema podacima iz Nacionalnih izvora, stvarni gubici vode u vodoopskrbnim mrežama Republike Hrvatske, prikazani kao prosjeci isporučenih količina, približno iznose 40%, što je prikazano grafom na Slici 1.7. Drugim riječima, na svakih 100 l zahvaćene vode za isporuku, krajnjim korisnicima dostavi se približno 60 l, dok se čak 40 l nepovratno gubi. Iako Republika Hrvatska nije prva prema postotku gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži, ona s Latvijom dijeli nezavidno četvrto mjesto na ljestvici država članica Europske unije (uključujući Ujedinjeno Kraljevstvo) [5].



Slika 1.7 Podaci o gubicima u vodovodnim mrežama različitih zemalja Europske Unije [5].

### 1.2.2. Primjeri dobre prakse u Republici Hrvatskoj

U studiji Europske unije u kojoj su opisane dobre prakse pri kontroliranju gubitaka vode u vodoopskrbnim sustavima kao jedna od dobrih praksi opisan je i jedan Hrvatski primjer – Vodovod Pula.

Vodovod Pula, smješten na krajnjem južnom vrhu Istarskog poluotoka, vodom opskrbljuje gradove Pulu i Vodnjan te općine Ližnjan, Barban, Medulin, Fažanu i Svetvinčenat, što čini ukupno stanovništvo od 75.000 stanovnika kojima je potrebno pribrojiti i približno 100.000 turista za vrijeme ljetnih mjeseci. Pulski vodovod raspolaže s trideset dvije vodospreme ukupnog kapaciteta 32.313 m<sup>3</sup>, sedamdeset crpnih jedinica, dvanaest crpnih stanica, jedanaest prekidnih komora, sedamnaest uređaja za kondicioniranje vode, 25.657 servisnih priključaka s 46.882 potrošača s mjernim mjestom, 2.402 hidranta i devetsto dvadeset osam km vodoopskrbne mreže različitih materijala i veličina [6].

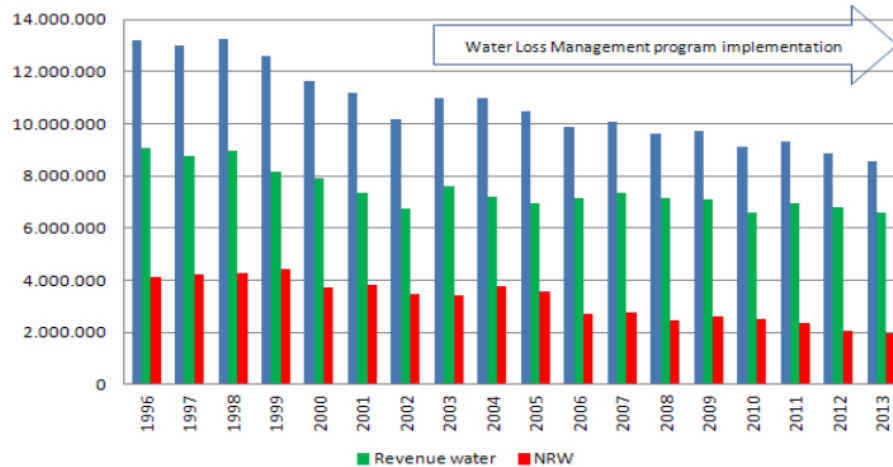
Organizirani pristup rješavanju gubitaka vode u Vodovodu Pula započeo je 2003. godine kada je osmišljen i službeno pokrenut „Program smanjenja propuštanja vodoopskrbne mreže“. Program je od samog početka imao jasno razumijevanje podjele između stvarnog i prividnog gubitka vode, te nekoliko mjera i aktivnosti za

postizanje rezultata. U početku se koristio pokazatelj NRW (engl. „Non revenue water“) koji opisuje proizvedenu vodu koja nije stigla do krajnjeg korisnika, već je izgubljena putem. To je rezultiralo smanjenjem NRW-a s početnih 34% na 25% u razdoblju od deset godina. Međutim, zadnjih se nekoliko godina glavni pokazatelji koriste prema IWA metodologiji [6].

Jedan od najvažnijih segmenata strategije je kontrola gubitaka vode s implementacijom hidrauličnih ventila za regulaciju tlaka. U sustavu je do 2015. godine formirano 19 zona regulacije tlaka koje pokrivaju približno 30% ukupne dužine vodovodne mreže. Pokrivena je periferija, kao i ruralna područja sustava, ali najurbaniziranije područje - grad Pula - nije. Svake godine nova područja se reguliraju tlakom, a postojeća se obnavljaju. Primjenjuju se suvremeni hidraulički ventili za regulaciju tlaka, s regulacijom tlaka prema trenutnom toku (ili uz primjenu posebnih rješenja koja omogućavaju povećanje tlaka za vatrogasne djelatnosti). Provode se redovite aktivnosti mjerenja i regulacije tlaka u sustavu [6].

U prvim godinama provođenja ovih mjera prioritetna je bila nabava instrumenata i opreme za lokalizaciju gubitaka vode. Aktivnosti poput regulacije tlaka u pojedinim područjima kao i redovite obnove sustava (približno 2% mrežnih i servisnih priključaka godišnje) također su uvedene. Kontrola gubitaka vode organizirana je uz pomoć posebnog servisnog tima za terenski rad kontrole gubitaka vode (ukupno četiri radnika podijeljeni u dva tima). Poseban naglasak stavljen je na kvalitetu i primjenjivost podataka koji se odnose na sustav i njegovu analizu, za što se koriste posebno prilagođeni programi temeljeni na GIS platformi [6].

U samom početku ovog programa Vodovod Pula morao je uložiti znatna financijska sredstva za nabavu opreme kao i u analize dobivenih podataka, međutim, neovisno o tome, postignuti rezultati iznimno su zadovoljavajući (Slika 1.8). U vremenskom periodu između 2004. i 2013. godine NRW je smanjen s 34% na 23%, odnosno iskazano volumenom, NRW je u 2004. godini iznosio 3,77 Mm<sup>3</sup>, a u 2013. godini iznosio je 1,94 Mm<sup>3</sup>, što čini ukupnu razliku od 1,83 Mm<sup>3</sup>, odnosno gotovo 50% uštede u volumenu. Ukoliko se govori o financijskim uštedama, može se reći da je ostvarena ušteta više od 700.000 € godišnje [6].



Slika 1.8 Rezultati programa kontrole gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži na području pulskog vodovoda između 1996. i 2013. godine [6].

### 1.2.3. Metode sanacije gubitaka vode

Prema Pravilniku o amortizaciji (NN 54/2001-872) određen je vijek uporabe građevinskih objekata i postrojenja stopom amortizacije i amortizacijskim vijekom. U podgrupu građevinskih objekata i postrojenja „1.1. Građevinski objekti visokogradnje i niskogradnje armirano betonske i metalne konstrukcije“ spadaju i vodovodi. Za takvu vrstu građevine propisana je amortizacija najmanje 2,5% godišnje, drugim riječima, ove građevine je potrebno projektirati za minimalnu upotrebu od četrdeset godina [7].

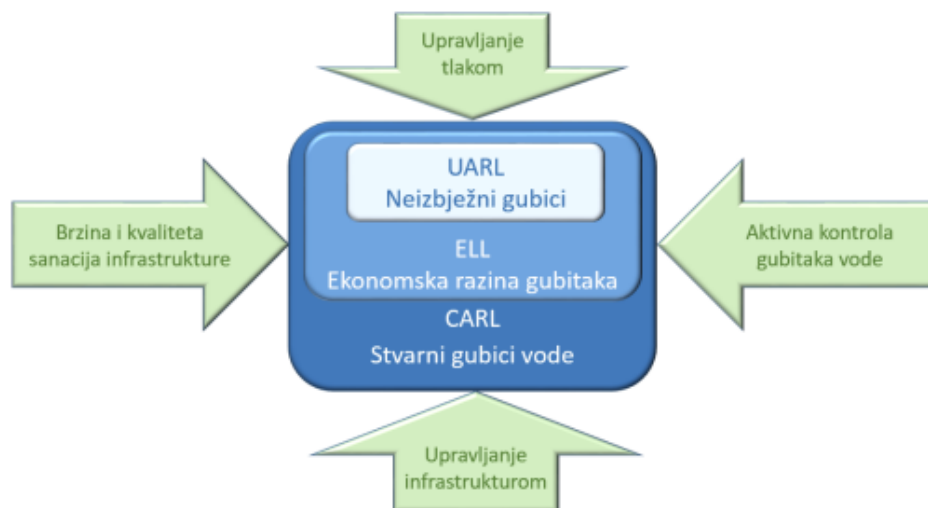
Vodovodna se mreža projektira i izvodi pažljivo, kako bi imala što je moguće manje kvarova i gubitaka vode. Jasno je kako starenjem vodoopskrbne mreže dolazi do većeg broja kvarova. Samim time, što je vodoopskrbna mreža starija, pretpostavka je da sadrži više gubitaka vode što iziskuje veću potrebu za lociranjem i saniranjem istih.

Postoji veliki broj mogućnosti kako sanirati i smanjiti gubitke vode u vodoopskrbnom sustavu. Rješenje gubitaka vode u vidu zamjene napuknutih cijevi nameće se kao prva solucija, međutim ona nije ekonomična niti održiva iz razloga što se ona primjenjuje nakon što je šteta već učinjena.

Kako bi se štete spriječile u većoj mjeri, mnogi istraživači i znanstvenici u svojim radovima predlažu razne metode upravljanja i održavanja sustava vodoopskrbne kao i metode sanacije.

WLTF grupa (engl. „Water Loss Task Force“) stvorila je strategiju učinkovitog upravljanja gubicima vode kojom se predlaže ukupno četiri pravca djelovanja (Slika 1.9). Bilo kojom od četiri predložena pravca djelovanja moguće je umanjiti stvarne gubitke vode.





Slika 1.9 Četiri pravca djelovanja prema strategiji učinkovitog upravljanja gubicima vode [8].

#### 1.2.4. Upravljanje tlakom

Oštećenja na cjevovodu mogu nastati djelom radi nepažnje pri gradnji, no također i radi visokih tlakova u vodoopskrbnoj mreži. Što je tlak u vodoopskrbnoj mreži to se na cijevi vrši veći pritisak. To može rezultirati puknućem. Također, prilikom promjene tlakova u vodoopskrbnoj mreži dolazi do stalnog širenja i skupljanja cijevi, što može dovesti to pucanja.

Na stvaranje oštećenja iznimno utječe tlak. Najviše u slučajevima kada je vodosprema puna vode, a potrošnja minimalna, odnosno kada je razina energetske linije najviša. Takve se pojave najčešće događaju u noćnim satima. Također, kao jedan od značajnih slučajeva koji može stvoriti veliki broj većih oštećenja izdvaja se pojava visokog dinamičkog tlaka, hidrauličkog udara [8].

Upravljanje tlakom smatra se najkorisnijom, najvažnijom i najisplativijom aktivnošću sanacije gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu. Upravljanje tlakom je pravac djelovanja uz kojeg je moguće odgoditi nastanak gubitaka vode, a u nekim slučajevima moguće ga je čak i u potpunosti spriječiti [8].

Osim što smanjuje gubitke vode, kontroliranje tlaka također smanjuje i nepotrebnu potrošnju energije. Omogućavanjem nižeg tlaka, osobito tijekom sati izvan vršnog opterećenja (noćni period), potrošnja energije za pumpanje može se smanjiti.

Za upravljanje tlakom neophodno je korištenje regulacijskih ventila koji održavaju određeni tlak, protok ili razinu bez obzira na promjene u vodoopskrbnoj mreži. Regulacijskim se ventilima smanjuje tlak u cijevima na onu vrijednost koja je dovoljna da se gubitak vode kroz oštećenja na cijevima smanji u najvećoj mogućoj mjeri.

Potrebno je međutim napomenuti kako, iako ova metoda ima velik broj prednosti, nije ju moguće koristiti u svim slučajevima iz razloga što se tlak u cijevima ne može reducirati do beskonačnosti. Minimalni dozvoljeni tlak u cijevima vodoopskrbnog sustava limitira se na 2,5 bara, odnosno na 25 metara vodnog stupca. Uzimajući to u obzir, prilikom smanjivanja tlaka kako bi se sanirali gubici vode potrebno je paziti da se minimalni tlak u cjevovodu nikada ne spušta na razinu ispod minimalno propisanog.

#### 1.2.5. Aktivna kontrola gubitka vode

Prema IWA grupi (engl. „International Water Association) aktivna kontrola gubitaka vode definira se kao proaktivna strategija s ciljem smanjenja gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu uz pomoć metoda za lokalizaciju prikrivenih gubitaka vode. Ove metode uglavnom provode stručnjaci uz pomoć specijalizirane opreme. Konačni cilj ove strategije jest sanacija ovakvih gubitaka vode [4].

#### 1.2.6. Upravljanje infrastrukturom

Upravljanje infrastrukturom uključuje učinkovito održavanje vodoopskrbne mreže. Održavanje uključuje popravak dijelova mreže kod kojih nije došlo do velikih oštećenja, primjerice cjevovoda, armature i opreme te zamjenu starih ili znatno oštećenih dijelova vodoopskrbne mreže [4].

#### 1.2.7. Brzina i kvalitetna sanacija infrastrukture

Ovaj pravac uključuje vrijeme koje je potrebno da bi se kvar na vodoopskrbnoj mreži locirao i sanirao, kao i učinkovitost radova s ciljem smanjenja lošeg učinka kvara na vodoopskrbnoj mreži [4].

## 2. LOKALIZACIJA GUBITAKA VODE U VODOOPSKRBNOJ MREŽI

Kada dođe do oštećenja u vodoopskrbnoj mreži, tada obično dolazi i do gubitaka vode. Kako bi se gubici vode sanirali i kako bi vodoopskrbni sustav mogao nastaviti opskrbu vodom, potrebno je te gubitke vode locirati. Neke je gubitke vode lakše uočiti, dok kod drugih gubitaka vode može proći i duži period od trenutka njegovog nastanka do trenutka njegove lokalizacije. Vrste gubitaka vode moguće je podijeliti u ovisnosti na uočljivost, a dijele se na očigledne gubitke vode i prikrivene gubitke vode [9].



*Slika 2.1 Primjer očiglednog gubitka vode – puknuće vodovodne cijevi na Putu Trstenika [10].*

Kod očiglednih gubitaka vode voda prodire u kroz slojeve tla iznad mjesta oštećenja i izbija na površinu (Slika 2.1). Takva se oštećenja brzo zamjećuju i moguće ih je brzo sanirati zamjenom oštećene cijevi novom. Međutim, kod prikrivenih gubitaka vode (Slika 2.2) mogu proći dani, mjeseci, pa čak i godine prije no što se oni lociraju. Potrebna su stručna znanja i sofisticirana oprema za pronalaženje takvih oštećenja [9].



*Slika 2.2 Primjer prikrivenog gubitka vode – puknuće vodovodne cijevi u Brestovcu [11].*

Očigledni gubiti vode lociraju se golim okom, dok je lociranje prikrivenih gubitaka vode mnogo kompleksniji proces. Upravo se takvi gubici vode nastoje locirati metodama koje će se opisati ovim diplomskim radom.

Metode lokalizacije gubitaka vode dijele se prema različitim kriterijima. Glavna podjela metoda lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu je na direktnu i indirektnu metodu. Indirektna metoda lokalizacije gubitaka vode bazira se na usporedbi zahvaćene vode i obračunate potrošnje vode na relaciji između vodozahvata i vodospreme. Ovakav se način provodi za određeno vremensko razdoblje, obično mjesec dana, a najčešće u periodima najmanje potrošnje, odnosno u noći [3].

Različito od indirektna metode, direktna se metoda provodi mjerenjem gubitaka vode od vodozahvata do vodoopskrbne mreže. Direktne metode dijele se na dvije podskupine:

- a) terenske metode i
- b) proračunske metode.

Terenske metode sastoje se od obilaženja cjevovoda i otkrivanja vode na mjestima izvan cijevi, npr. u šahtovima, na zasunima i slično te od traženja gubitaka vode osluškivanjem vodoopskrbne mreže (Slika 2.3).



*Slika 2.3 Lokalizacija gubitaka vode osluškivanjem vodoopskrbne mreže [3].*

Dok se terenske metode lokalizacije temelje na vizualnim i auditivnim ispitivanjima, proračunske se metode temelje na računskim ispitivanjima vodoopskrbne mreže. Takve su metode iznimno složene i zahtijevaju veliku razinu razumijevanja problema, materije i postupka njihovog provođenja. Proračunske metode iterativne su metode i baziraju se na inverznom modeliranju.

Inverzno modeliranje definira analitički ili numerički model pripremljen na temelju određenog skupa ulaznih parametara koji se uspoređuje s željenim rezultatom, primjerice mjerenjem na terenu.

Nadalje, proračunske se metode dijele na determinističke i stohastičke metode. Stohastičkim postupkom naziva se svaki slučajno određen postupak. Kao jedna od najpoznatijih stohastičkih metoda lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu izdvaja se PSO metoda, poznata i pod nazivom „Metoda roja čestica“ koja neprestanim ponavljanjem slučajnih pretpostavki dolazi do konačnog rješenja.

Za razliku od stohastičkih, determinističke se metode definiraju kao proračunske metode u kojima se osnovne varijable promatraju kao neslučajne. Unutar diplomskog rada se obrađuju ukupno tri determinističke metode, i to:

- a) metoda vektorskog otklona,
- b) metoda korelacijskog koeficijenta i
- c) metoda Euklidove udaljenosti.

Svaka on navedenih metoda bazira se na međusobnoj usporedbi dviju vektorskih neslučajnih varijabli; stupca matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  i vektora reziduala  $\mathbf{r}$ .

## 2.1. Zoniranje vodoopskrbne mreže

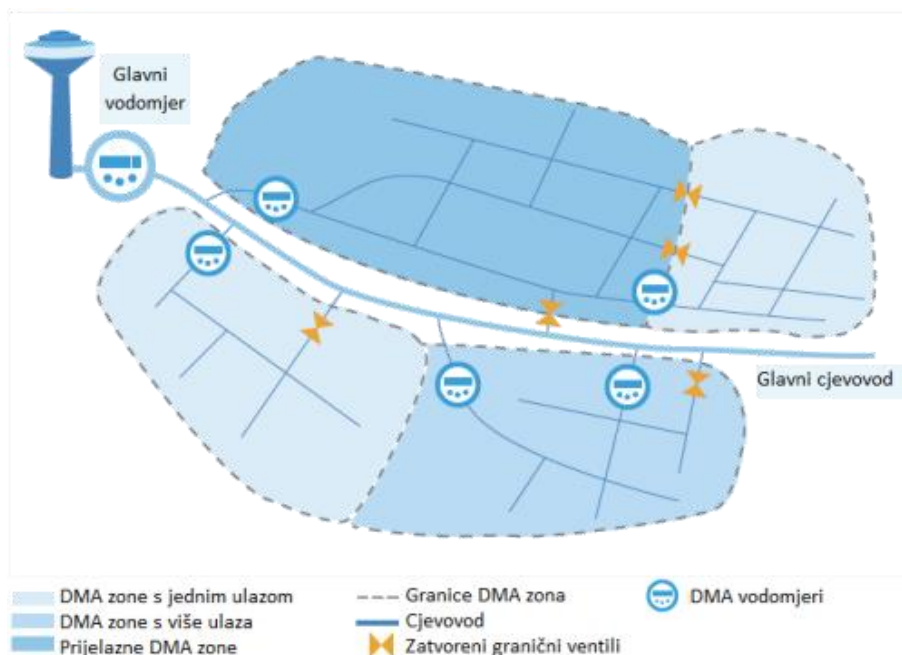
Prije pristupanja prikupljanju podataka određenih temeljnim zahtjevima za provedbu determinističkih metoda lokalizacije gubitaka vode, potrebno je definirati područje djelovanja na kojemu će se tražiti lokacije gubitaka vode.

Gubici vode su prisutni u svim vodoopskrbnim mrežama, neovisno o njihovoj starosti, veličini ili kvaliteti izvođenja. Ovisno o karakteristikama svakog pojedine mreže potrebno je donijeti posebnu strategiju za svaki vodoopskrbni sustav.

Kod velikih vodoopskrbnih sustava puno je teže i zahtjevnije lokalizirati gubitak vode iz razloga što se u takvom sustavu radi o izrazito velikim ukupnim protocima. Samim time, što su veći protoci, gubitak vode malog protoka imati će izrazito mali, gotovo neprimjetan utjecaj na plohu tlaka vodoopskrbnog sustava. Iz tog će razloga biti teško locirati mjesto na kojem dolazi do gubitka vode.

Potaknuto problemom velikih vodoopskrbnih mreža, uvodi se mogućnost podjele velike vodoopskrbne mreže na manje segmente, poznate kao DMA zone. DMA zone, od engleskog „District Metered Areas“, definirane su granicama te fizički dijele sustav vodoopskrbe na veći broj manjih zona koje je moguće lakše kontrolirati (Slika 2.4) [4].

DMA zone potrebno je odrediti na način da se unutar njih može učinkovito regulirati tlak i protok te također da rezultati mjerenja budu uspješni. Kako bi se to postiglo, ove se zone uglavnom ograničavaju na broj krajnjih korisnika između 1000 i 2000, kao i na protoke do  $Q = 50 \text{ l/s}$ . Potrebno je također uzeti u obzir i geometrijske karakteristike vodoopskrbne mreže i njezinu topologiju.



Slika 2.4 Shematski prikaz DMA zona [4].

## 2.2. Podaci potrebni za primjenu metoda lokalizacije

Temeljni zahtjevi koji moraju biti zadovoljeni prije konstrukcije ulaznih varijabli za provođenje determinističkih metoda lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu su:

- a) poznavanje geometrijskih značajki vodoopskrbne mreže,
- b) poznavanje tlakova kroz vrijeme na  $n$  mjernih mjesta tlakova i
- c) poznavanje protoka vode kroz vrijeme.

### 2.2.1. Geometrijski podaci

Geometrijske značajke vodoopskrbne mreže, kao što su primjerice promjer vodoopskrbnih cijevi, duljine dionica između dva susjedna čvora, visinske kote vodospreme i pojedinih čvorova, trenje u vodoopskrbnim cijevima i slično u pravilu je u vlasništvu nadležnog komunalnog društva koje upravlja promatranom zonom vodoopskrbne mreže.

### 2.2.2. Tlakovi

Podaci o izmjerenim tlakovima  $p$  u stvarnosti se dobivaju postavljanjem uređaja za mjerenje tlakova na terenu u željenim čvorovima vodoopskrbne mreže. Projektirani tlakovi  $\hat{p}$  dobivaju se hidrauličkim proračunom za idealne uvjete vodoopskrbne mreže bez gubitaka vode.

Provedba terenskih mjerenja tlakova na vodoopskrbnoj mreži provodi se upotrebom uređaja za mjerenje tlakova. Takvi se uređaji najčešće spajaju na vodoopskrbnu mrežu u čvorovima kod krajnjih korisnika. Postoje uređaji za mjerenje tlakova koji mogu pratiti promjenu tlakova kroz određeno vremensko razdoblje, odnosno mogu zabilježiti tlak kroz svaki sat, svaku minutu ili po potrebi i svaku sekundu. Ukoliko je moguće, idealno je da uređaji mjere tlakove u čvorovima vodoopskrbne mreže istovremeno te kroz vremenski period od optimalno 24 sata, kako bi se mogla promatrati promjena tlakova kroz jedan dan.

Prije prikupljanja podataka o tlakovima u čvorovima vodoopskrbne mreže, važno je pažljivo i smisleno odabrati lokacije čvorova u koje će se postaviti mjerna mjesta. Dakle, potrebno je promišljeno odabrati mjerna mjesta odnosno čvorove gdje su očekivane velike razlike u tlakovima, odnosno u onim čvorovima u kojima dolazi do velikih razlika u protocima.

### 2.2.3. Protoci

Osim podataka o tlakovima, potrebno je također prikupiti podatke o protocima kroz vodoopskrbnu mrežu. Za razliku od podatka o tlakovima, ove je podatke često teško prikupiti na pojedinim čvorovima, odnosno kod pojedinih krajnjih korisnika. Podatke o protocima moguće je pribaviti kumulativno, od nadležnog komunalnog društva odgovornog za promatranu zonu vodoopskrbne mreže. Upravo se iz tog razloga vrlo često analiza protoka kroz vodoopskrbnu mrežu svodi na to da se kumulativni protok približno prognozira po čvorovima. Kako bi takva prognoza bila što uspješnija potrebno je protoke raspodijeliti na način da odgovaraju izmjerenim tlakovima u vodoopskrbnoj mreži.

### 2.2.4. Obrada prikupljenih podataka

Temeljem podataka prikupljenih iz sva tri navedena segmenta moguće je konstruirati matricu osjetljivosti  $\mathbf{S}$ , dok je za konstrukciju vektora reziduala  $\mathbf{r}$  jedini potreban podatak o tlakovima opisanim trećim zahtjevom. Zasebno će se metoda konstrukcije ilustrirati u nastavku.

## 2.3. **Konstrukcija vektora reziduala $\mathbf{r}$**

Lociranje gubitaka vode bazira se na računanju razlike odnosno reziduala između izmjerenih tlakova  $p$  i projektiranih tlakova  $\hat{p}$  dobivenih hidrauličkim modelom. Ovom razlikom tlakova se definira vektor reziduala  $\mathbf{r}$  prema jednadžbi kako slijedi [12]:



$$r_i(k) = p_i(k) - \hat{p}_i(k) \quad (1)$$

za

$$i = 1, \dots, n \quad (2)$$

gdje je:

$\mathbf{r}$  – vektor reziduala

$i$  – redni broj retka

$p_i(k)$  – vrijednost izmjerenog tlaka u čvoru  $i$  u trenutku  $k$

$\hat{p}_i(k)$  – vrijednost projektiranog tlaka u čvoru  $i$  u trenutku  $k$

$n$  – broj mjernih mjesta

#### 2.4. Konstrukcija matrice osjetljivosti $\mathbf{S}$

Lociranje gubitka vode u vodoopskrbnom sustavu temelji se na procjeni učinka svih mogućih gubitaka vode u promatranoj mreži i dostupnim podacima o izmjerenim tlakovima u čvorovima mreže pomoću analize osjetljivosti. Matrica osjetljivosti ili matrica osjetljivosti  $\mathbf{S}$  rezultat je ove analize [12].

Matrica osjetljivosti  $\mathbf{S}$  konstruira se na način da se svaki član  $S_{ij}$  matrice  $\mathbf{S}$  izračuna produktom razlike izmjerenog i projektiranog tlaka i protoka pretpostavljenog gubitka vode u vremenu, kako je prikazano sljedećom jednadžbom:

$$S_{i,j}(k) = \frac{p_i^{f_m}(k) - \hat{p}_i(k)}{f_m} \quad (3)$$

gdje je:

$i$  – redni broj retka

$j$  – redni broj stupca

$m$  – redni broj stupca

$S_{i,j}(k)$  – pojedini član matrice osjetljivosti u trenutku  $k$

$p_i^{f_m}(k)$  – vrijednost izmjerenog tlaka u čvoru  $i$  u trenutku  $k$

$\hat{p}_i(k)$  – vrijednost projektiranog tlaka u čvoru  $i$  u trenutku  $k$

$f$  – nominalna vrijednost gubitka vode

Prema jednadžbi (3) za svaku komponentu matrice  $\mathbf{S}$  retka  $i$  i stupca  $j$  izračuna se vrijednost. Ta je vrijednost aproksimirana, iz razloga što je nominalna vrijednost gubitka vode  $f$  pretpostavljena, a ne izmjerena varijabla. S tako pripremljenim članovima, moguće je konstruirati matricu  $\mathbf{S}$  kako slijedi:

$$\begin{aligned}
S(k) &= \begin{bmatrix} S_{11}(k) & \cdots & S_{1m}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(k) & \cdots & S_{nm}(k) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \frac{p_1^{f_1}(k) - \hat{p}_1(k)}{f_1} & \cdots & \frac{p_1^{f_m}(k) - \hat{p}_1(k)}{f_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{p_n^{f_1}(k) - \hat{p}_n(k)}{f_1} & \cdots & \frac{p_n^{f_m}(k) - \hat{p}_n(k)}{f_m} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4}$$

## 2.5. Komparacija vektora reziduala $\mathbf{r}$ i stupca matrice osjetljivosti $\mathbf{S}$

Vektor reziduala  $\mathbf{r}$  i matrica osjetljivosti  $\mathbf{S}$  dvije su ulazne veličine koje se metodama lokalizacije gubitaka vode međusobno kompariraju.

Različite metode lokalizacije različitim načinom usporedbe dolaze do rješenja. Svaka od ovih metoda međusobnom usporedbom svakog pojedinog stupca matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  s vektorom reziduala  $\mathbf{r}$  nastoji pronaći onaj stupac matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  koji je najbliži vektoru reziduala  $\mathbf{r}$ . Obzirom na to da svaki stupac matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  predstavlja jedan čvor, odnosno jednu moguću lokaciju gubitka vode, onaj stupac koji je najbliži vektoru reziduala  $\mathbf{r}$  smatrati će se onim čvorom u kojemu dolazi do gubitka vode.

U idućim poglavljima ovog diplomskog rada svaka će se od metoda lokalizacije pobliže opisati, potkrijepiti primjerom te u konačnici analizirati provedbom većeg broja računalnih simulacija.

### 3. METODE LOKALIZACIJE GUBITAKA VODE U VODOOPSKRIBNOJ MREŽI

Za potrebe ovog diplomskog rada će se primijeniti naredne metode lokalizacije gubitaka vode:

- a) metoda vektorskog otklona,
- b) metoda korelacijskog koeficijenta i
- c) metoda Euklidove udaljenosti.

Prije nego što je moguće krenuti u provođenje samih metoda, potrebno ih je razumjeti kako bi one bile ispravno sprovedene. Kako je opisano u prethodnim poglavljima, za provedbu ovih metoda potrebno je prethodno definirati matricu osjetljivosti  $\mathbf{S}$  i vektor reziduala  $\mathbf{r}$  i to kroz određeni vremenski period. To je moguće učiniti uz pomoć jednadžbe (1), (3) i (4) i postupka opisanog kroz poglavlje 2.3 i 2.4.

Sve tri navedene metode svode se na isti zajednički zaključak, a to je usporedba, odnosno definiranje sličnosti između stupca matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  i vektora reziduala  $\mathbf{r}$ .

#### 3.1. Metoda vektorskog otklona

Metoda vektorskog otklona međusobno uspoređuje stupac matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  i vektor reziduala  $\mathbf{r}$  na način da se definira kut između vektora reziduala  $\mathbf{r}$  i svakog stupca matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  po jednadžbi (5) kako slijedi:

$$\alpha_j(k) = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}^T(k) \cdot S_{-j}(k)}{|\mathbf{r}(k)| \cdot |S_{-j}(k)|}\right) \quad (5)$$

za

$$j = 1, \dots, m \quad (6)$$

gdje je:

$\alpha_j(k)$  - kut vektorskog otklona u trenutku  $k$

$\mathbf{r}(k)$  - vektor reziduala u trenutku  $k$

$S_{-j}(k)$  - stupac  $j$  matrice osjetljivosti  $S$  u trenutku  $k$

$m$  - redni broj stupca matrice osjetljivosti  $S$

Nakon provedenog određivanja kuta vektorskog otklona određuje se srednja vrijednost svih dobivenih kutova vektorskog otklona za odabrani vremenski period prema jednadžbi (7).

$$\bar{\alpha}_j = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \alpha_j(k) \quad (7)$$

za

$$j = 1, \dots, m \quad (8)$$

gdje je:

$\bar{\alpha}_j$  - srednja vrijednost kuta vektorskog otklona kroz vremenski period  $L$

$L$  - odabrani vremenski period za koji se provodi proračun

Konačni rezultat ove metode biti će iskazan preko onoliko vrijednosti  $\bar{\alpha}_j$  koliko je stupaca  $j$  u matrici osjetljivosti  $\mathbf{S}$ . Broj redaka biti će jednak broju mjernih mjesta tlakova, dok će broj stupaca  $m$  biti jednak broju čvorova u promatranoj vodoopskrbnoj mreži. Za onaj čvor  $m$  za koji je vrijednost  $\bar{\alpha}_j$  najmanja smatra se čvorom u kojem je došlo do gubitka vode.

#### Primjer.

Ova metoda prikazati će se kroz primjer koristeći se nasumično odabranom matricom osjetljivosti  $\mathbf{S}$  i vektorom  $\mathbf{r}$  kako slijedi:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 1 & 6 & 9 \\ 8 & 7 & 5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{r} = \begin{Bmatrix} 1,5 \\ 3,5 \\ 2,5 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Kako bi se mogla koristiti prethodno definirana jednadžba (5) potrebno je prethodno pripremiti transponirani vektor  $\mathbf{r}$  te definirati stupce  $j$  matrice  $\mathbf{S}$ .

$$S_{-1} = \begin{Bmatrix} 2 \\ 1 \\ 8 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$S_{-2} = \begin{Bmatrix} 4 \\ 6 \\ 7 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$S_{-3} = \begin{Bmatrix} 3 \\ 9 \\ 5 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{r} = \{1,5 \quad 3,5 \quad 2,5\}^T \quad (14)$$

Nakon pripremljenih vektora  $S_{-1}, S_{-2}, S_{-3}$  i  $\mathbf{r}^T$  za kombinaciju svakog stupca matrice  $\mathbf{S}$  s vektorom  $\mathbf{r}$  provodi se usporedba prema jednadžbi (5).

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \arccos\left(\frac{\mathbf{r}^T \cdot S_{-1}}{|\mathbf{r}| \cdot |S_{-1}|}\right) & (15) \\ &= \arccos\left(\frac{2 \cdot 1,5 + 1 \cdot 3,5 + 8 \cdot 2,5}{\sqrt{2^2 + 1^2 + 8^2} \cdot \sqrt{1,5^2 + 3,5^2 + 2,5^2}}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{26,5}{\sqrt{69} \cdot \sqrt{27,75}}\right) \\ &= \arccos(0,6056) \\ &= 52^\circ 43' 26'' \end{aligned}$$

Isti se postupak ponavlja za stupce  $S_{-2}$  i  $S_{-3}$  matrice  $\mathbf{S}$  te rezultiraju:

$$\alpha_2 = 13^\circ 34' 38,59'' \quad (16)$$

$$\alpha_3 = 6^\circ 51' 19,9'' \quad (17)$$

Međusobno uspoređujući rezultate jednadžbe (5) moguće je zaključiti kako je najmanji dobiveni kut, kut  $\alpha_3 = 6^\circ 51' 19,9''$  te to predstavlja kako je stupac  $S_{-3}$  najbliži, odnosno najsličniji vektoru  $\mathbf{r}$ . Za navedeni primjer matrice  $\mathbf{S}$  i vektor  $\mathbf{r}$  čvor 3 bi bio čvor u kojemu je lociran gubitak vode.

### 3.2. Metoda korelacijskog koeficijenta

Metoda korelacijskog koeficijenta bazira se na usporedbi vektora reziduala  $\mathbf{r}$  sa svakim stupcem matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  prema jednadžbi (18) kako slijedi:

$$c_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i(k) - \overline{r(k)}) \cdot (S_{ij}(k) - \overline{S_j(k)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i(k) - \overline{r(k)})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{ij}(k) - \overline{S_j(k)})^2}} \quad (18)$$

za

$$j = 1, \dots, m \quad (19)$$

gdje je:

$c_{jk}$  - korelacijski koeficijent u trenutku  $k$

$r_i(k)$  - redak/član  $i$  vektora reziduala  $\mathbf{r}$  u trenutku  $k$

$\overline{r(k)}$  - srednja vrijednost svih redova/članova vektora reziduala  $\mathbf{r}$  u trenutku  $k$

$S_{ij}(k)$  - član matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  iz retka  $i$  i stupca  $j$  u trenutku  $k$

$\overline{S_j(k)}$  - srednja vrijednost svih članova stupca  $j$  matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  u trenutku  $k$

$m$  - redni broj stupca matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$

$n$  - redni broj retka matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$

Nakon provedenog proračuna prema jednadžbi (18) potrebno je pronaći srednju vrijednost korelacijskog koeficijenta kroz određeni vremenski period prema jednadžbi (19):

$$\overline{c_j} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L c_j(k) \quad (20)$$

za

$$j = 1, \dots, m \quad (21)$$

gdje je:

$\overline{c_j}$  - srednja vrijednost korelacijskog koeficijenta kroz vremenski period  $L$

$L$  - odabrani vremenski period za koji se provodi proračun

Konačni rezultat ove metode biti će iskazan preko onoliko vrijednosti  $\bar{c}_j$  koliko je stupaca  $j$  u matrici osjetljivosti  $\mathbf{S}(k)$ . Broj stupaca  $m$  biti će jednak broju čvorova u promatranoj vodoopskrbnoj mreži. Za onaj čvor  $m$  za koji je vrijednost  $\bar{c}_j$  najveća smatra se čvorom u kojem je došlo do gubitka vode.

Primjer.

Ova metoda prikazati će se kroz primjer koristeći se nasumično odabranom matricom  $\mathbf{S}$  i vektorom  $\mathbf{r}$  kako slijedi:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 1 & 6 & 9 \\ 8 & 7 & 5 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{r} = \begin{Bmatrix} 1,5 \\ 3,5 \\ 2,5 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Koristeći vrijednosti iz odabrane matrice  $\mathbf{S}$  i vektora  $\mathbf{r}$  započinje se proračun za stupac 1 matrice  $\mathbf{S}$  prema jednadžbi (18):

$$c_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{\mathbf{r}}) \cdot (S_{i1} - \bar{S}_1)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{\mathbf{r}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{i1} - \bar{S}_1)^2}} \quad (24)$$

Za potrebe jednostavnijeg pregleda ovog primjera svaka će se komponenta jednadžbe proračunati odvojeno. Prvenstveno, određuju se vrijednosti članova svih redaka vektora  $\mathbf{r}$  te njihovu srednju vrijednost:

$$r_1 = 1,5 \quad (25)$$

$$r_2 = 3,5 \quad (26)$$

$$r_3 = 2,5 \quad (27)$$

$$\bar{\mathbf{r}} = \frac{1,5 + 3,5 + 2,5}{3} = 2,5 \quad (28)$$

Potom se isti postupak provodi i za vektor  $S_1$  koji je zapravo prvi stupac matrice  $\mathbf{S}$ :

$$S_{11} = 2 \quad (29)$$

$$S_{21} = 1 \quad (30)$$

$$S_{31} = 8 \quad (31)$$

$$\bar{S}_1 = \frac{2 + 1 + 8}{3} = 3,67 \quad (32)$$

Nakon što se odrede sve zasebne komponente potrebe za uvrštavanje u jednadžbu (18) množe se komponente za svaki redak  $n$  matrice  $\mathbf{S}$  i vektora  $\mathbf{r}$  koji će tvoriti sumu u brojniku:

za  $n = 1$

$$(r_1 - \bar{r}) \cdot (S_{11} - \bar{S}_1) = (1,5 - 2,5) \cdot (2 - 3,67) = 1,67 \quad (33)$$

za  $n = 2$

$$(r_2 - \bar{r}) \cdot (S_{21} - \bar{S}_1) = (3,5 - 2,5) \cdot (1 - 3,67) = -2,67 \quad (34)$$

za  $n = 3$

$$(r_3 - \bar{r}) \cdot (S_{31} - \bar{S}_1) = (2,5 - 2,5) \cdot (8 - 3,67) = 0 \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{n=3} (r_i - \bar{r}) \cdot (S_{i1} - \bar{S}_1) = 1,67 - 2,67 + 0 = -1 \quad (36)$$



Također se isti postupak provodi i za komponente za svaki redak  $n$  matrice  $\mathbf{S}$  i vektora  $\mathbf{r}$  koje će tvoriti sumu u nazivniku:

za  $n = 1$

$$(r_1 - \bar{r})^2 = (1,5 - 2,5)^2 = 1 \quad (37)$$

$$(S_{11} - \bar{S}_1)^2 = (2 - 3,67)^2 = 2,79 \quad (38)$$

za  $n = 2$

$$(r_2 - \bar{r})^2 = (3,5 - 2,5)^2 = 1 \quad (39)$$

$$(S_{21} - \bar{S}_1)^2 = (1 - 3,67)^2 = 7,13 \quad (40)$$

za  $n = 3$

$$(r_3 - \bar{r})^2 = (2,5 - 2,5)^2 = 0 \quad (41)$$

$$(S_{31} - \bar{S}_1)^2 = (8 - 3,67)^2 = 32,15 \quad (42)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n=3} (r_i - \bar{r})^2} = \sqrt{1 + 1 + 0} = \sqrt{2} = 1,41 \quad (43)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n=3} (S_{i1} - \bar{S}_1)^2} = \sqrt{2,79 + 7,13 + 32,15} = \sqrt{42,07} = 6,47 \quad (44)$$

Nakon što su posebno izračunate sve komponente, te se vrijednosti uvrštavaju u jednadžbu (18) kako bi se dobio krajnji rezultat  $c_1$ .

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{\mathbf{r}}) \cdot (S_{i1} - \bar{S}_1)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{\mathbf{r}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{i1} - \bar{S}_1)^2}} \quad (45) \\ &= \frac{-1}{1,41 \cdot 6,47} \\ &= -0,11 \end{aligned}$$

Ovaj se postupak provodi onoliko puta koliko je stupaca  $m$  matrice  $\mathbf{S}$ . Za ovaj slučaj to će biti ukupno tri puta. Vrijednosti  $c_2$  i  $c_3$  su sljedeće:

$$c_2 = 0,65 \quad (46)$$

$$c_3 = 0,98 \quad (47)$$

Međusobno uspoređujući rezultate jednadžbe (18) moguće je zaključiti kako je najveći dobiveni koeficijent, koeficijent  $c_3 = 0,98$  te to predstavlja kako je stupac  $m_3$  najbliži, odnosno najsličniji vektoru  $v$ . Za navedeni primjer matrice  $\mathbf{S}$  i vektor  $\mathbf{r}$  čvor 3 bi bio čvor u kojemu je lociran gubitak vode.

### 3.3. Metoda Euklidove udaljenosti

Za razliku od prethodnih metoda, metoda Euklidove udaljenosti između vektora reziduala  $\mathbf{r}$  i svakog stupca  $j$  matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  može se koristiti kako bi izolirala gubitke vode u trenutku  $k$ . Metoda se provodi prema jednadžbi (48), kako slijedi:

$$d_j(k) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i(k) - S_{ij}(k) \cdot f_{nom})^2} \quad (48)$$

gdje je:

$d_j(k)$  - vektor Euklidove udaljenosti u trenutku  $k$

$r_i(k)$  - redak/član  $i$  vektora reziduala  $\mathbf{r}$  u trenutku  $k$

$S_{ij}(k)$  - član matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  iz retka  $i$  i stupca  $j$  u trenutku  $k$

$f_{nom}$  - nominalna vrijednost gubitka vode korištena za sastavljanje matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$  u trenutku  $k$

$n$  - redni broj retka matrice osjetljivosti  $\mathbf{S}$

Nakon provedenog proračuna prema jednadžbi (48) potrebno je pronaći srednju vrijednost Euklidove udaljenosti kroz određeni vremenski period prema jednadžbi (49):

$$\bar{d}_j = \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=1}^L d_j(k) \quad (49)$$

Konačni rezultat ove metode biti će iskazan preko onoliko vrijednosti  $\bar{d}_j$  koliko je stupaca  $j$  u matrici osjetljivosti  $\mathbf{S}$ . Broj redaka biti će jednak broju mjernih mjesta tlakova, dok će broj stupaca  $m$  biti jednak broju čvorova u promatranoj vodoopskrbnoj mreži. Za onaj čvor  $m$  za koji je vrijednost  $\bar{d}_j$  najveća smatra se čvorom u kojem je došlo do gubitka vode.

Bitno je napomenuti kako ova metoda ne daje uvijek precizne rezultate iz razloga što se ona bazira na pretpostavci. Ova metoda precizne rezultate dati će samo u onom slučaju kada je protok gubitka vode jednaka faktoru  $f_{nom}$  korištenom u jednadžbi (48). Ukoliko to nije slučaj, ova metoda neće imati točan ishod.

#### Primjer.

Ova metoda prikazati će se kroz primjer koristeći se nasumično odabranom matricom  $\mathbf{S}$  i vektorom  $\mathbf{r}$  kako slijedi:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 1 & 6 & 9 \\ 8 & 7 & 5 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\mathbf{r} = \begin{Bmatrix} 1,5 \\ 3,5 \\ 2,5 \end{Bmatrix} \quad (51)$$

Koristeći vrijednosti iz odabrane matrice  $\mathbf{S}$  i vektora  $\mathbf{r}$  započinje se proračun za stupac 1 matrice  $\mathbf{S}$  prema jednadžbi (48):

$$d_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - S_{i1} \cdot f_{nom})^2} \quad (52)$$

Za potrebe jednostavnijeg pregleda ovog primjera svaka će se komponenta jednadžbe proračunati odvojeno. Prvenstveno, određuju se vrijednosti članova svih redaka vektora  $\mathbf{r}$  i stupaca matrice  $\mathbf{S}$ .

$$r_1 = 1,5 \quad (53)$$

$$r_2 = 3,5 \quad (54)$$

$$r_3 = 2,5 \quad (55)$$

$$S_{11} = 2 \quad (56)$$

$$S_{21} = 1 \quad (57)$$

$$S_{31} = 8 \quad (58)$$

Za faktor  $f_{nom}$  potrebno je znati njegovu vrijednost koja je korištena prilikom dobivanja matrice osjetljivosti. Za ovaj slučaj faktor  $f_{nom}$  pretpostavlja se kao jedinični.

$$f_{nom} = 1$$

Nakon što se odrede sve zasebne komponente potrebe za uvrštavanje u jednadžbu (48) množe se komponente za svaki redak  $n$  matrice  $\mathbf{S}$  koje će tvoriti sumu:

Za  $n = 1$

$$(r_1 - S_{11} \cdot f_{nom})^2 = (1,5 - 2 \cdot 1)^2 = 0,25 \quad (59)$$

Za  $n = 2$

$$(r_2 - S_{21} \cdot f_{nom})^2 = (3,5 - 1 \cdot 1)^2 = 6,25 \quad (60)$$

Za  $n = 3$

$$(v_3 - m_{31} \cdot f_{nom})^2 = (2,5 - 8 \cdot 1)^2 = 30,25 \quad (61)$$

Nakon što su posebno izračunate sve komponente, te se vrijednosti uvrštavaju u jednadžbu (48) kako bi se dobio krajnji rezultat  $d_1$ .

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{\sum_{i=1}^{n=3} (r_i - S_{i1} \cdot f_{nom})^2} & (62) \\ &= \sqrt{0,25 + 6,25 + 30,25} \\ &= \sqrt{36,75} \\ &= 6,06 \end{aligned}$$

Ovaj se postupak provodi onoliko puta koliko je stupaca  $m$  matrice  $\mathbf{S}$ . Za ovaj slučaj to će biti ukupno tri puta. Vrijednosti  $d_2$  i  $d_3$  su sljedeće:

$$d_2 = 5,72 \quad (63)$$

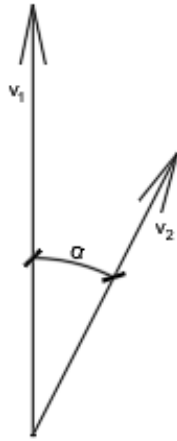
$$d_3 = 6,18 \quad (64)$$

Međusobno uspoređujući rezultate jednadžbe (48) moguće je zaključiti kako je najmanji dobiveni koeficijent, koeficijent  $d_2 = 5,72$  te to predstavlja kako je stupac  $m_2$  najbliži, odnosno najsličniji vektoru  $v$ . Za navedeni primjer matrice  $\mathbf{S}$  i vektor  $\mathbf{r}$  čvor 2 bi bio čvor u kojemu je lociran gubitak vode.

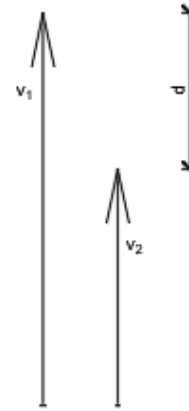
Bitno je za primijetiti kako metoda Euklidove udaljenosti nije dala jednak rezultat kao metoda vektorskog otklona i metoda korelacijskog koeficijenta. Pretpostavka je da se to dogodilo zato što je korišten  $f_{nom}$  koji nije jednak protok gubitka vode u promatranom čvoru.

### 3.4. Usporedba metode vektorskog otklona i metode Euklidove udaljenosti

Slikama 3.1 i 3.2 shematski je prikazana usporedba dva vektora metodom vektorskog otklona i metodom Euklidove udaljenosti. Kako je opisano u poglavlju 3.1, ova metoda komparira dva vektora pomoću kuta  $\alpha$  koji isti stvaraju ukoliko im se ishodišta postavje u istu točku. Što je veličina kuta  $\alpha$  manja, to će promatrani vektori biti sličniji.



Slika 3.1 Grafički prikaz usporedbe dva vektora metodom vektorskog otklona.



Slika 3.2 Grafički prikaz usporedbe dva vektora metodom Euklidove udaljenosti.

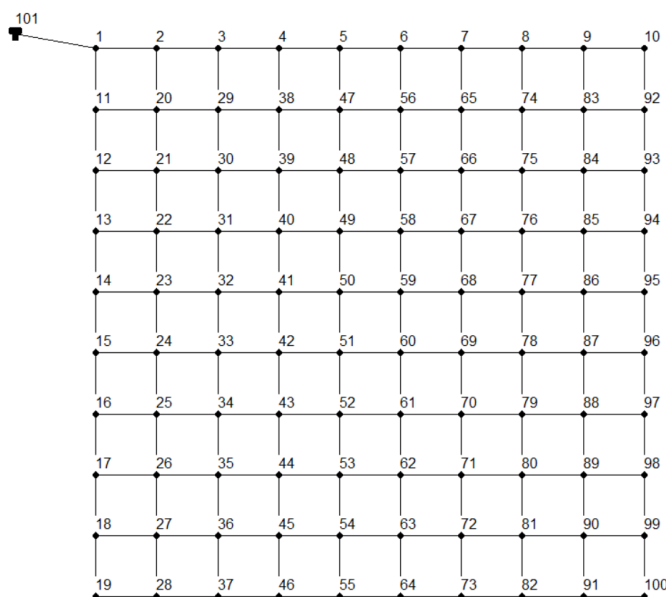
Različito od metode vektorskog otklona, metoda Euklidove udaljenosti prilikom usporedbe dva vektora promatra isključivo njihovu veličinu, odnosno razliku između njihovih veličina, označenu oznakom  $d$ . Što je razlika njihovih veličina manja to će parametar  $d$  biti manji. Manji parametar  $d$  ukazuje na veću sličnost između promatrana dva vektora.

#### 4. NUMERIČKI PRIMJERI

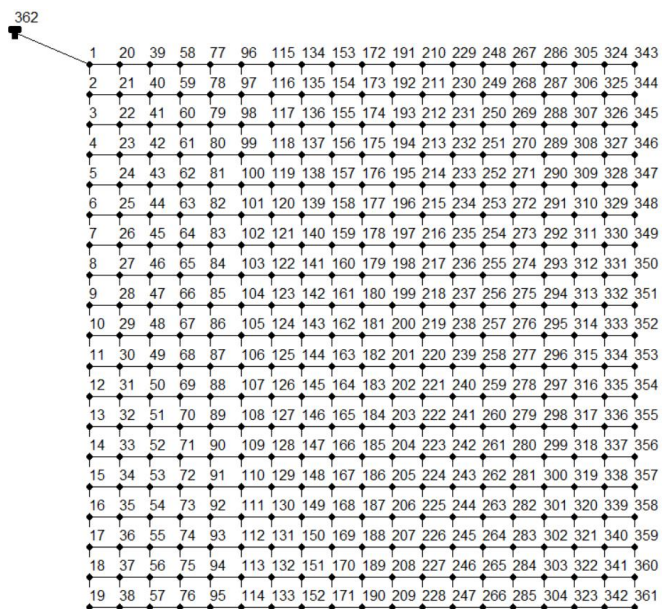
U ovom poglavlju opisati će se rezultati primjene prethodno opisanih metoda lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu. Kako bi se što bliže prikazale mogućnosti i uspješnost rezultata ovih metoda provedeno je petsto četrdeset i pet računalnih simulacija za jednako toliko primjera u promatranoj idealnoj vodoopskrbnoj mreži. Opisane su samo odabrane.

Računalnim simulacijama pristupilo se koristeći se kodovima pripremljenim u programskom jeziku Python. Istovremeno su se provodile računalne simulacije prema sve tri prethodno opisane metode lokalizacije gubitaka vode, odnosno prema metodi vektorskog otklona, metodi korelacijskog koeficijenta i metodi Euklidove udaljenosti.

Prije no što se moglo pristupiti računskim simulacijama bilo je potrebno odabrati parametre koji će se promatrati kroz različite situacije. Za izradu primjera po kojima će se izvoditi računske simulacije pripremljene su dvije kvadratne vodoopskrbne mreže. Vodoopskrbna mreža s manjim brojem čvorova (Slika 4.1) za izradu primjera pripremljena je kao kvadratna mreža 10x10 čvorova, odnosno sastoji se od ukupno 100 čvorova i 181 dionica. Mreža s većim brojem čvorova (Slika 4.2) pripremljena je kao kvadratna mreža 19x19 čvorova, odnosno sastoji se od ukupno 361 čvora i 685 dionica.



Slika 4.1 Prikaz kvadratne mreže s 100 čvorova s nazivima svakog čvora.



Slika 4.2 Prikaz kvadratne mreže s 361 čvorom s nazivima svakog čvora.

Važno je za napomenuti kako promatrane metode nisu egzaktne i za rijetke će slučajeve dati jedinstvene rezultate. Cilj ovih računalnih simulacija bio je prikazati u kojim slučajevima metode lokalizacije gubitaka vode predviđaju položaj gubitka vode na lokaciji na kojoj je gubitak vode zadan. Također, usporedbom zaključiti koja će od tri metode lokalizacije gubitaka vode biti najuspješnija pri lociranju gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu.

Parametri koji su mijenjani kroz različite primjere su sljedeći:

- 1) lokacija čvora u kojemu dolazi do gubitka vode,
- 2) broj čvorova u kojima dolazi do gubitka vode,
- 3) protok gubitka vode,
- 4) lokacija mjernih mjesta tlakova,
- 5) broj mjernih mjesta tlakova i
- 6) broj čvorova u vodoopskrbnoj mreži.

#### 4.1. Protokol izrade primjera

Provedenom analizom se ne mogu formirati poopćeni zaključci jer su analize provedene samo na jednoj pravokutnoj mreži. S druge strane, i u tom jednom karakterističnom primjeru se mogu prepoznati određeni obrasci konvergencije. U ovom će se poglavlju opisati protokol kojim su provedene računalne simulacije za potrebe ovog diplomskog rada. Za izradu svih primjera se koristio program Epanet.



#### 4.1.1. Projektirano stanje

Prvi korak prilikom provođenja računalnih simulacija je pripremiti projektirano stanje vodoopskrbne mreže. Projektirano stanje podrazumijeva stanje tlakova bez gubitaka vode. Kako bi bilo moguće dobiti te informacije, potrebno je vodoopskrbnoj mreži zadati protoke. Prema tako zadanim protocima kroz vodoopskrbnu mrežu provodi se izračun tlakova u čvorovima vodoopskrbne mreže. Ovako dobiveni tlakovi nazivaju se još i projektirani tlakovi vodoopskrbne mreže. Slijedom navedenog, u programu Epanet je zadana vodoopskrbna mreža s rasporedom protoka koji ne uključuje gubitke vode u mreži. Za ovakav raspored protoka je programom Epanet izračunat raspored tlakova u čvorovima.

#### 4.1.2. Izmjereno stanje

Sljedeći korak je pripremiti izmjereno stanje, odnosno stanje tlakova s uračunatim gubicima vode. Za potrebe izrade primjera, izmjereno stanje priprema se na način da se prethodno zadanim protocima doda protok gubitka vode u željenom čvoru vodoopskrbne mreže. Potom se ponovno provodi izračun tlakova te se tako dobiva izmjereno stanje.

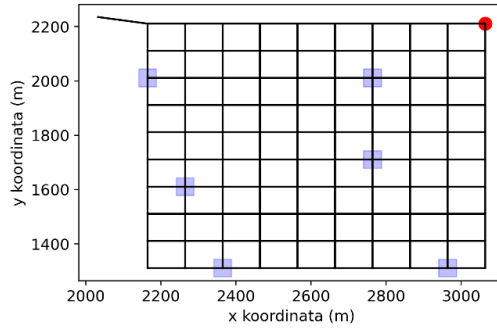
#### 4.1.3. Komparacija tlakova

Nakon što je dobiveno projektirano i izmjereno stanje tlakova vodoopskrbne mreže, koristeći se metodama lokalizacije gubitaka vode ta će se dva stanja međusobno komparirati. Komparacija se vrši primjenom matrice osjetljivosti tlakova uz pomoć prethodno pripremljenog koda u programskom jeziku Python. Računalna simulacija istovremeno komparira podatke prema sve tri navedene metode lokalizacije gubitaka vode te rezultira grafičkim prikazima rasporeda prognoziranog položaja gubitaka vode.

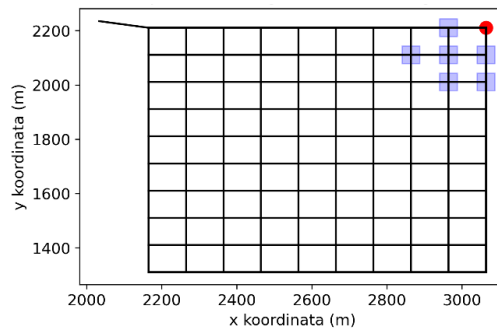
#### 4.2. Analiza rezultata za primjere različitih lokacija mjernih mjesta tlakova

Sljedeća analiza provodi se za primjere u kojima su lokacije mjernih mjesta tlakova u vodoopskrbnoj mreži mijenjane, dok je lokacija gubitka vode ostala ista. Gubitak vode zadan je protokom  $Q = 1 \text{ l/s}$ . Analizirati će se ukupno četiri primjera različitih dispozicija mjernih mjesta, i to:

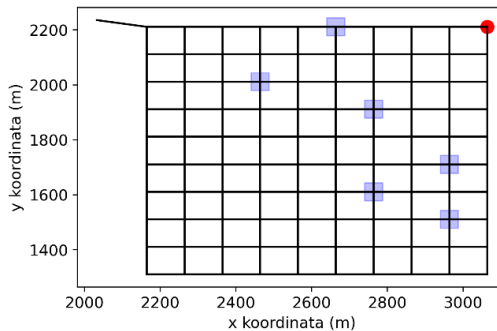
- a) primjer A – mjerna mjesta tlakova postavljena u općem položaju u vodoopskrbnoj mreži (Slika 4.3),
- b) primjer B – mjerna mjesta tlakova postavljena u neposrednoj blizini čvora u kojemu je postavljen gubitak vode (Slika 4.4),
- c) primjer C – mjerna mjesta tlakova postavljena na sredini vodoopskrbne mreže u odnosu na čvor u kojemu je postavljen gubitak vode (Slika 4.5) i
- d) primjer D – mjerna mjesta tlakova postavljena na velikoj udaljenosti u odnosu na čvor u kojemu je postavljen gubitak vode (Slika 4.6).



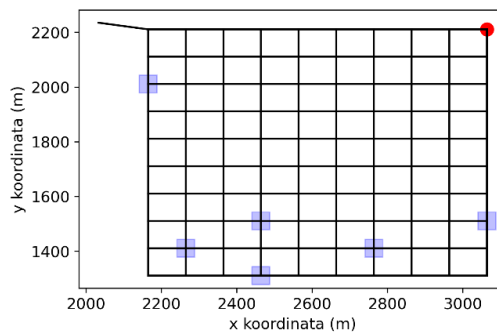
*Slika 4.3 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.*



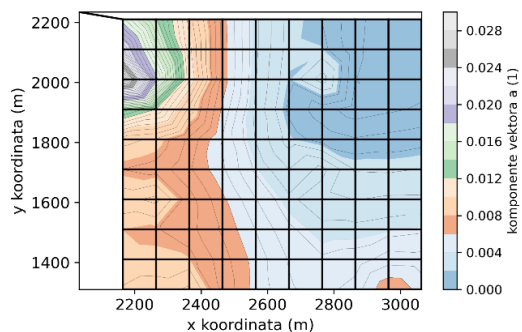
*Slika 4.4 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer B.*



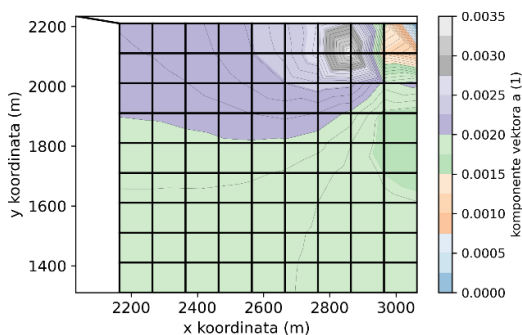
*Slika 4.5 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer C.*



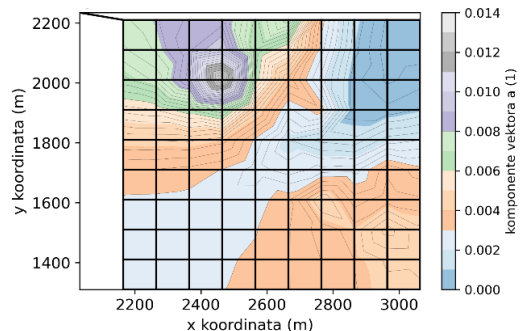
*Slika 4.6 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer D.*



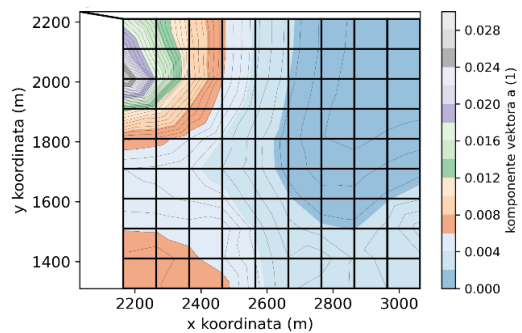
Slika 4.7 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.



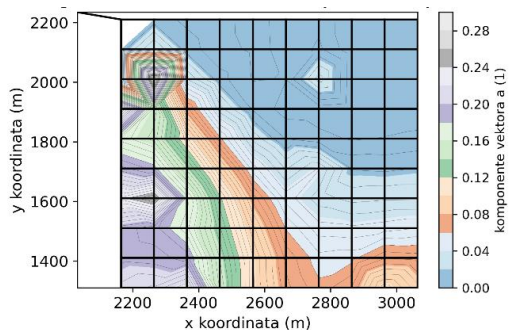
Slika 4.8 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.



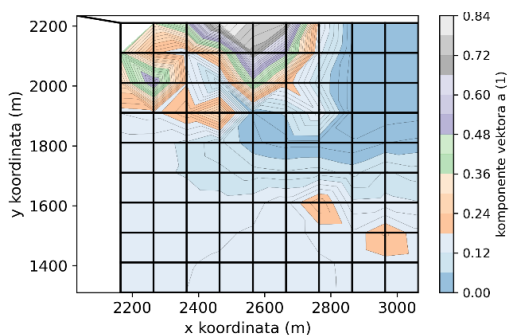
Slika 4.9 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.



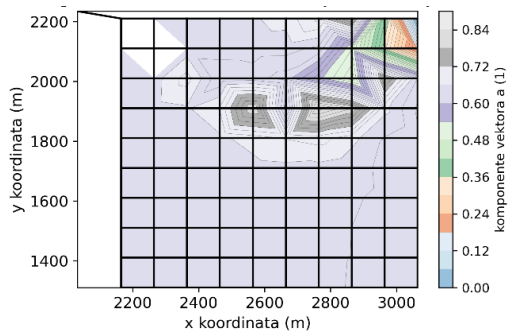
Slika 4.10 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer D.



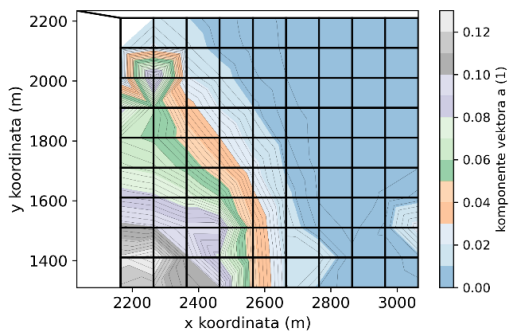
*Slika 4.11 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.*



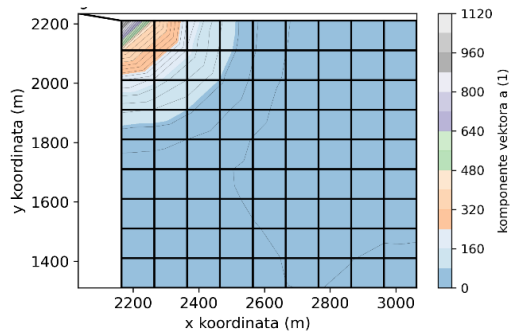
*Slika 4.12 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.*



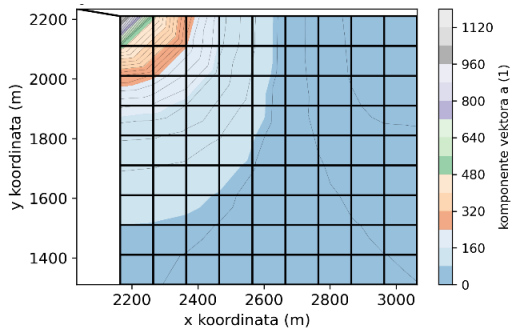
*Slika 4.13 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer C.*



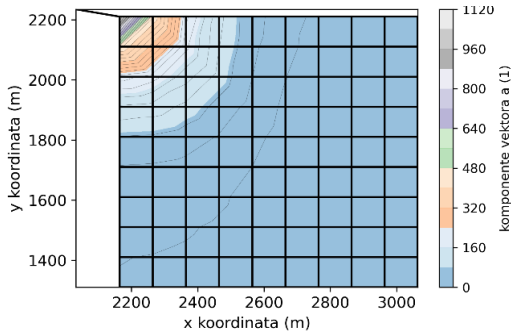
*Slika 4.14 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer D.*



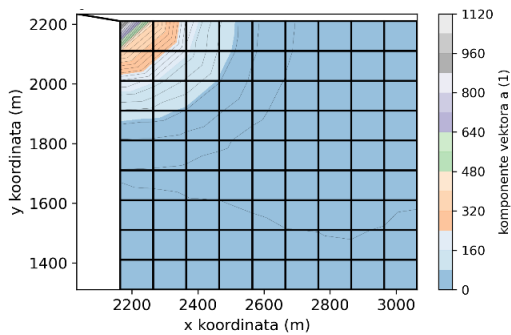
*Slika 4.15 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.*



*Slika 4.16 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.*



*Slika 4.17 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer C.*

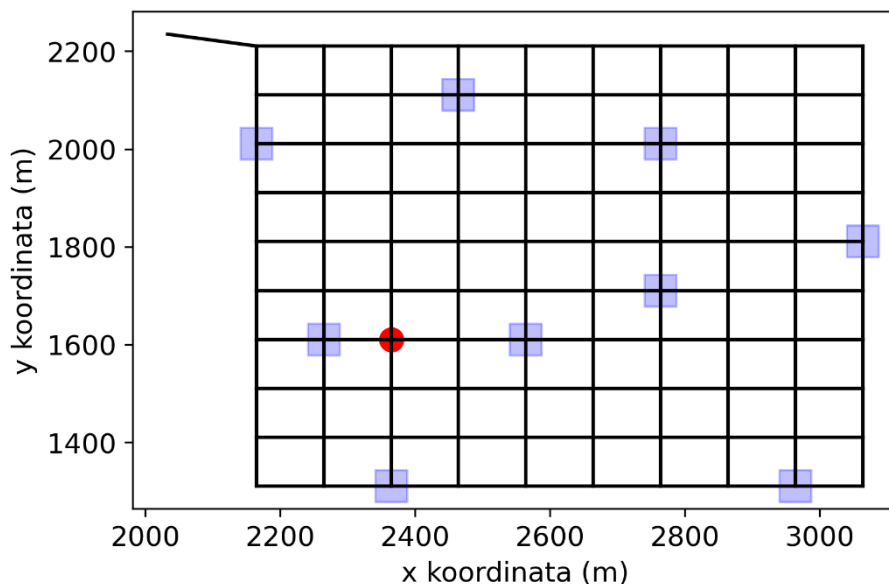


*Slika 4.18 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer D.*

Provedenim računalnim simulacijama za primjere u kojima su lokacije mjernih mjesta tlakova različite dobiveni su grafički prikazi prognoziranih položaja gubitaka vode koji su za ispitane uvijete i prethodno navedene metode ilustrirani na Slikama od 4.7 do 4.18.

Kako je i očekivano, metode lokalizacije gubitaka vode prikazale su najmanju površinu kojom predviđaju položaj gubitaka vode za primjer u kojemu su mjerna mjesta tlakova postavljena neposredno uz čvor u kojemu dolazi do gubitka vode. Također, za primjer gdje su mjerna mjesta tlakova postavljena daleko od čvora u kojemu dolazi do gubitka vode metode predviđaju najveću površinu moguće lokacije gubitka vode.

Lako se složiti da je pregledom dobivenih rezultata metoda vektorskog otklona (Slike 4.7 do 4.10.) najuspješnija u lociranju gubitaka vode. Sljedeća po redu metoda lokalizacije gubitaka vode koja se pokazala uspješnom bila je metoda korelacijskog koeficijenta (Slike 4.11 do 4.14). Za razliku od ove dvije metode, metoda Euklidove udaljenosti (Slike 4.15 do 4.18) pokazala se neuspješnom iz razloga što površina kojom metoda predviđa položaj gubitka vode pokriva više od 75% čvorova vodoopskrbne mreže.



*Slika 4.19 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu dolazi do gubitka vode označenog crvenom točkom.*

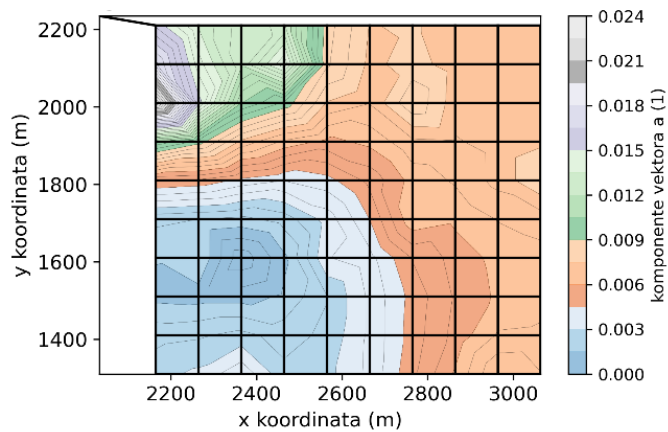
#### **4.3. Analiza rezultata za primjere različitih protoka gubitaka vode**

U ovom poglavlju analizirati će se rezultati metoda lokalizacije gubitaka vode za primjere različitih protoka gubitaka vode. Računalne simulacije provedene su za tri različita protoka kako slijedi:

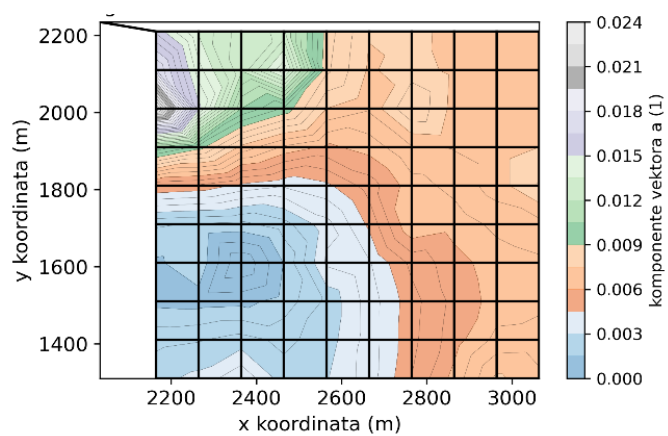
- a) primjer A: protok gubitka vode jednak je  $Q = 1 \text{ l/s}$ .
- b) primjer B: protok gubitka vode jednak je  $Q = 1,5 \text{ l/s}$ .
- c) primjer C: protok gubitka vode jednak je  $Q = 2 \text{ l/s}$ .

Za sva tri navedena primjera postavljeno je ukupno devet mjernih mjesta tlakova. Dispozicija mjernih mjesta tlakova i čvora u kojemu dolazi do gubitka vode prikazani su Slikom 4.19. Provedbom računalnih simulacija dobiveni su grafički prikazi rezultata sve tri navedene metode lokalizacije gubitaka vode. Grafički rezultati prikazani su Slikama 4.20 do 4.28 na sljedećim stranicama.

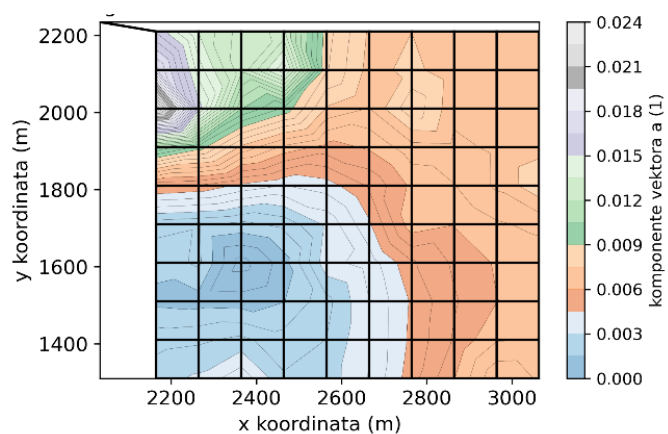




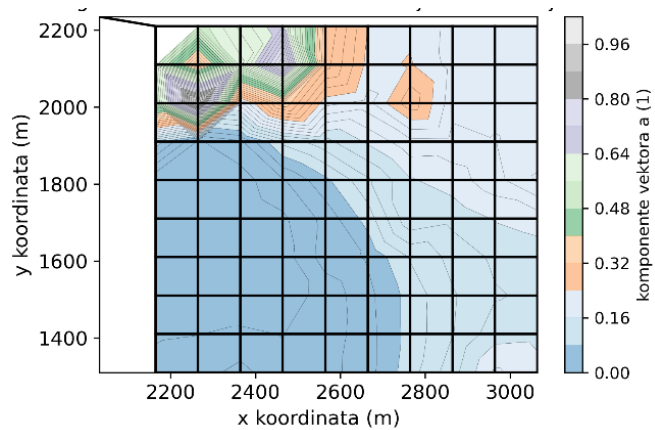
Slika 4.20 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.



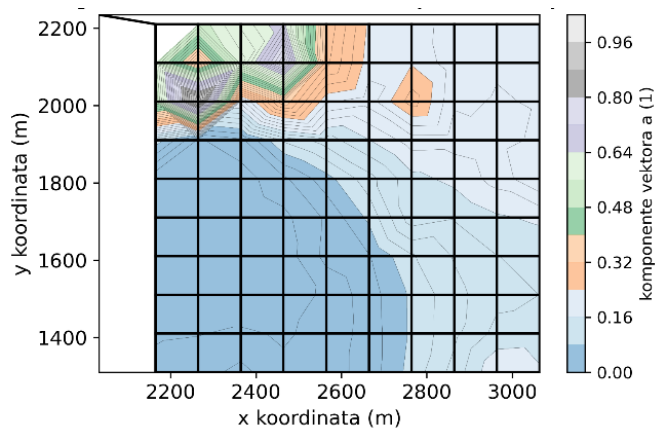
Slika 4.21 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.



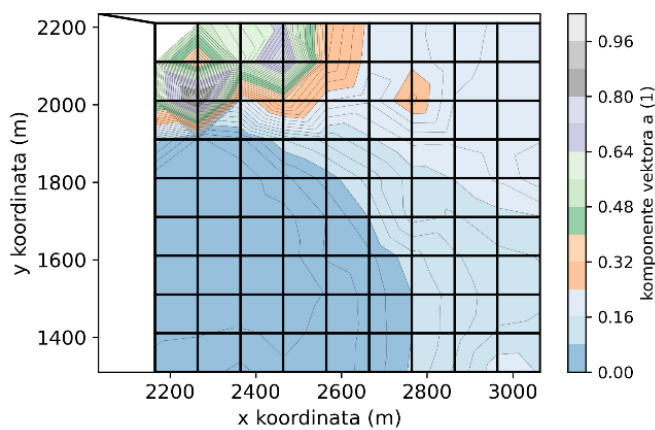
Slika 4.22 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.



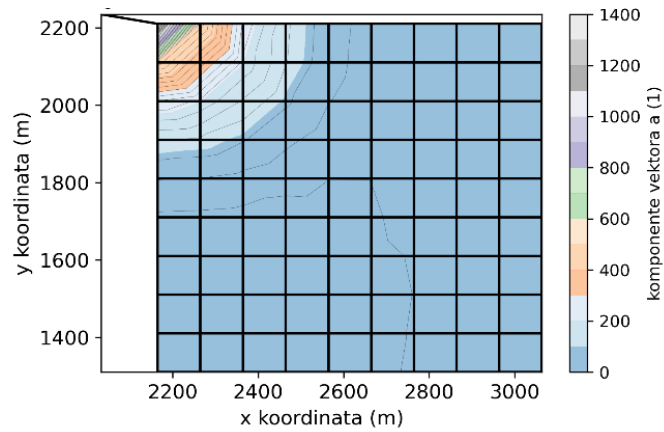
Slika 4.23 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.



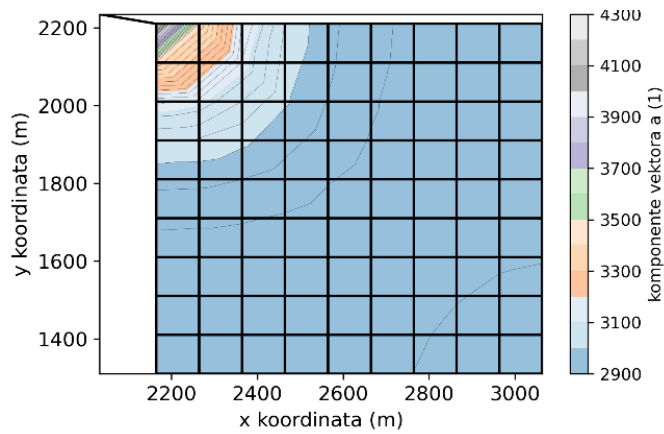
Slika 4.24 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.



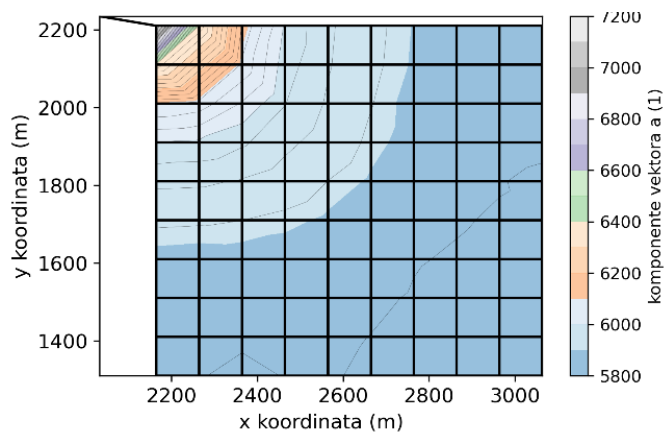
Slika 4.25 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer C.



*Slika 4.26 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.*



*Slika 4.27 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.*



*Slika 4.28 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer C.*

Pregledom dobivenih rezultata metode vektorskog otklona (Slike 4.20 do 4.22) i metode korelacijskog koeficijenta (Slike 4.23 do 4.25) za različite protoke gubitka vode ne primjećuje se razlika u veličini površine kojom metode predviđaju položaj gubitka vode. Time se zaključuje kako protok gubitka vode neće imati utjecaj na uspješnost ovih dviju metoda.

Za razliku od ovoga, kod metode Euklidove udaljenosti (Slike 4.26 do 4.28) primjetna je razlika u veličini površine kojom metoda predviđa položaj gubitka vode. Što je veći protok gubitka vode to je površina kojom se predviđa njegova lokacija manja. Ovakav rezultat dokazuje kako je veličina vektora jedina varijabla koju metoda Euklidove udaljenosti komparira.

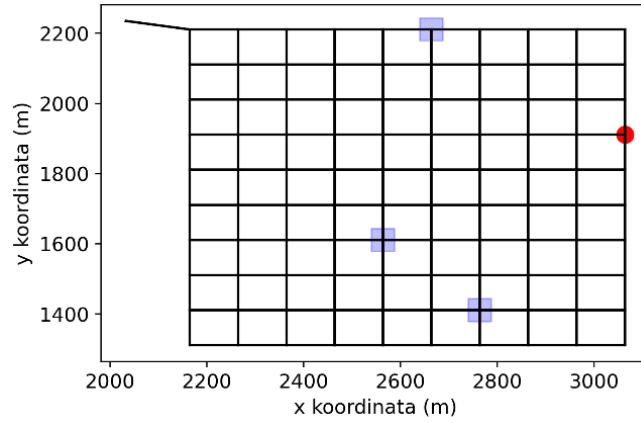
Međutim, ukoliko se gledaju ukupni rezultati, metoda Euklidove udaljenosti ponovno nije zadovoljila rezultatom iz razloga što površina kojom metoda predviđa položaj gubitka vode prekiva veći dio vodoopskrbne mreže. Metoda vektorskog otklona ponovno se pokazala kao najpovoljnija metoda lokalizacije gubitaka vode.

#### **4.4. Analiza rezultata za primjere različitog broja mjernih mjesta tlakova**

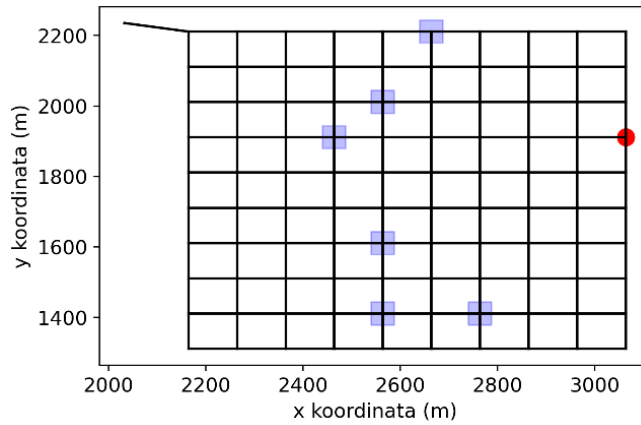
Sljedeći primjeri pripremljeni su na način da se za istu lokaciju čvora u kojemu dolazi do gubitka vode tlakovi mjere u tri navrata kako slijedi:

- a) primjer A: mjerenje tlaka na tri lokacije
- b) primjer B: mjerenje tlaka na šest lokacija
- c) primjer C: mjerenje tlaka na devet lokacija

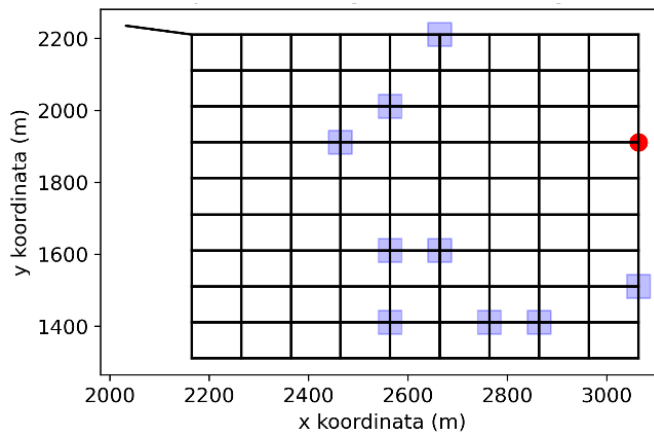
Računalna simulacija provodi se za sve tri opisane metode lokalizacije gubitaka vode. Rezultati dobiveni računalnom simulacijom kao i dispozicija mjernih mjesta tlakova i čvora u kojem dolazi do gubitka vode grafički su prikazani na Slikama 4.29 do 4.40.



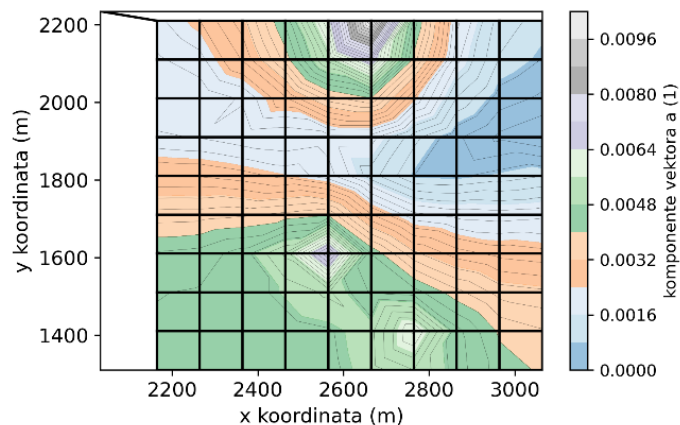
Slika 4.29 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.



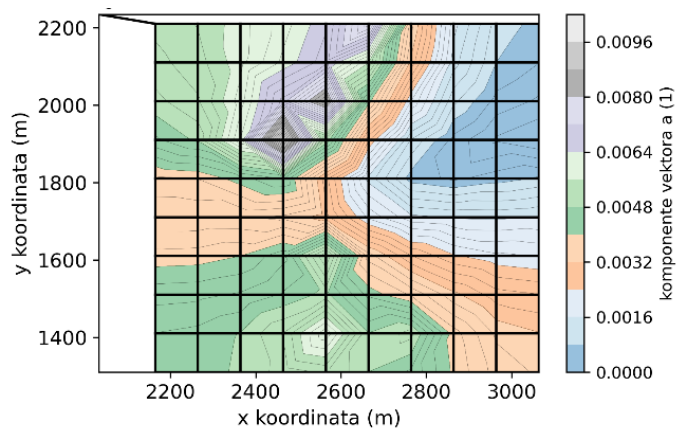
Slika 4.30 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer B.



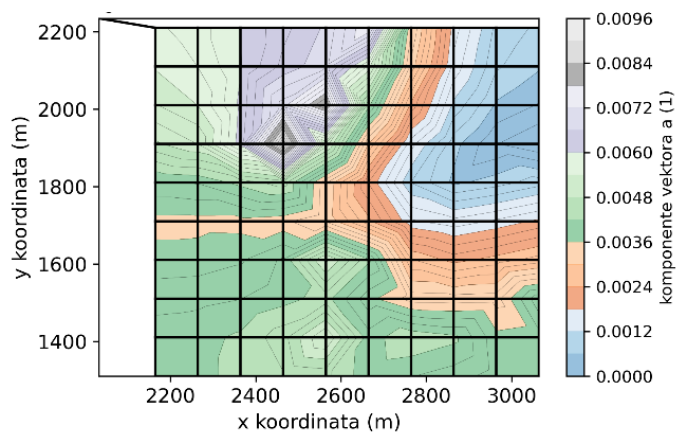
Slika 4.31 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer C.



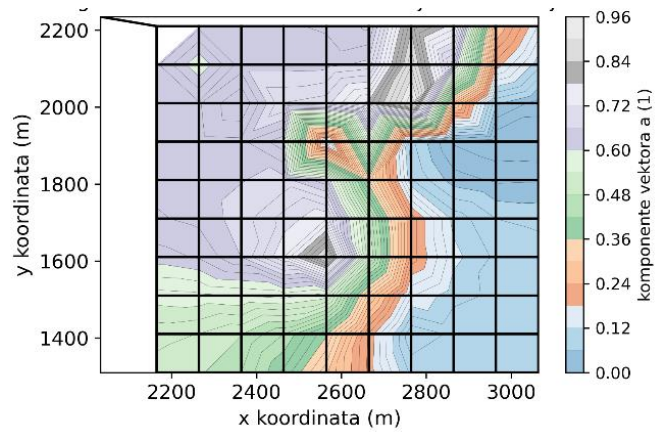
Slika 4.32 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.



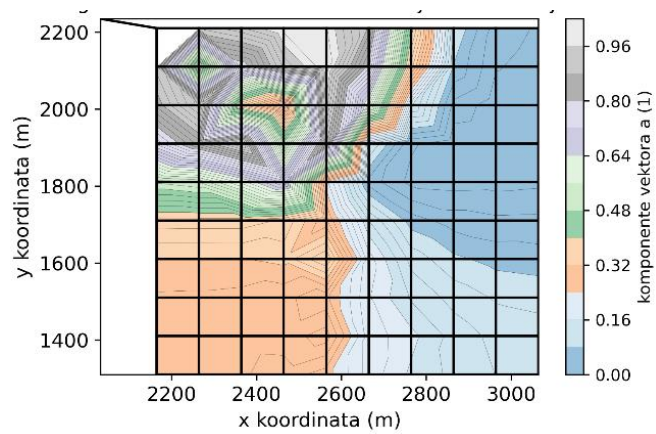
Slika 4.33 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.



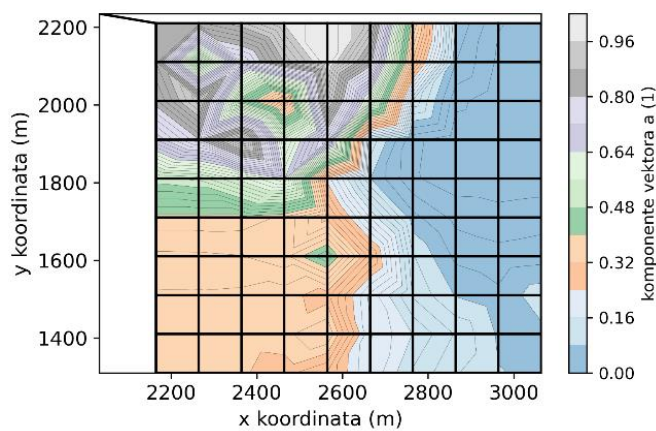
Slika 4.34 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.



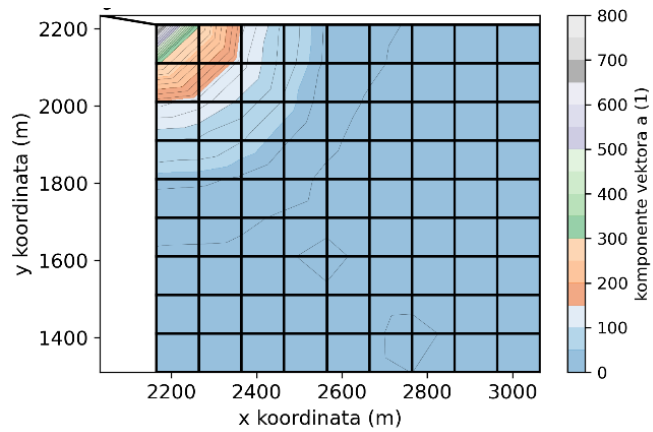
*Slika 4.35 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.*



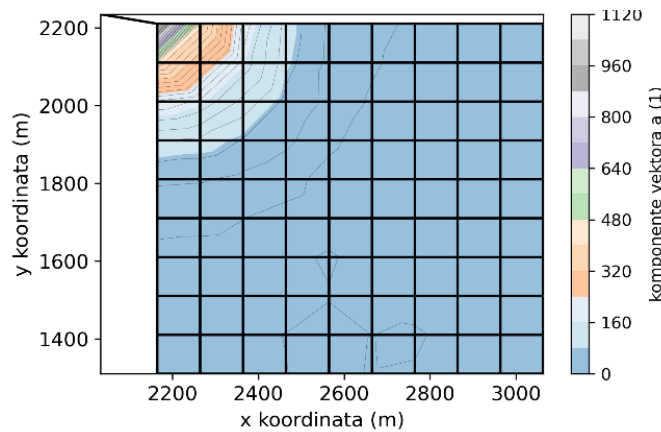
*Slika 4.36 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.*



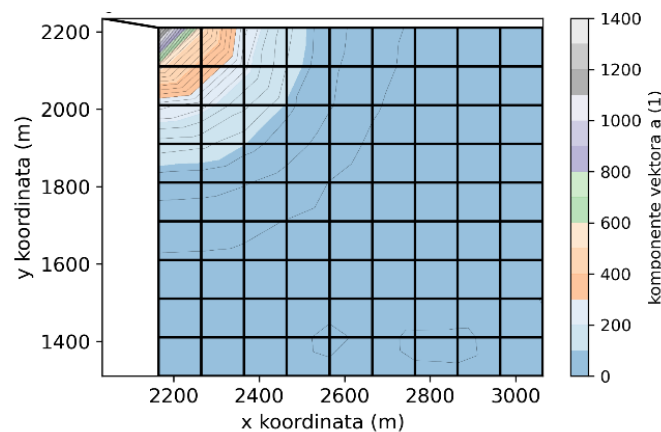
*Slika 4.37 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer C.*



*Slika 4.38 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.*



*Slika 4.39 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.*



*Slika 4.40 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer C.*



Na prethodnim Slikama grafički su prikazana rješenja računalne simulacije metoda lokalizacije gubitaka vode za primjere različitog broja mjernih mjesta tlakova.

Iz priloženih grafičkih prikaza rezultata metode vektorskog otklona (Slike 4.32 do 4.34) primjećuje se kako je površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode manja što je veći broj mjernih mjesta tlakova.

Za razliku od toga, metoda korelacijskog koeficijenta dala je neočekivane rezultate (Slike 4.35 do 4.37). Kod ove metode primjetno je kako se površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode povećava što je veći broj mjernih mjesta.

Obzirom na to da ovakav ishod nije bio očekivan, pristupilo se daljnjim analizama. Provedene su računalne simulacije za veći broj primjera u kojima se promatra razlika u rezultatima za različiti broj mjernih mjesta tlakova. Nekoliko je primjera rezultiralo jednako kao i primjer na Slikama 4.35 do 4.37, no nekoliko je primjera rezultiralo očekivano, odnosno površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode smanjivala se povećanjem broja mjernih mjesta tlakova.

Nakon provedenog većeg broja računalnih simulacija za različite primjere nije moguće sa sigurnošću zaključiti zašto dolazi do ovakvog rezultata. Kako bi se uzrok ovog ishoda mogao definirati potrebno je provesti daljnje analize koje se neće provesti ovim diplomskim radom.

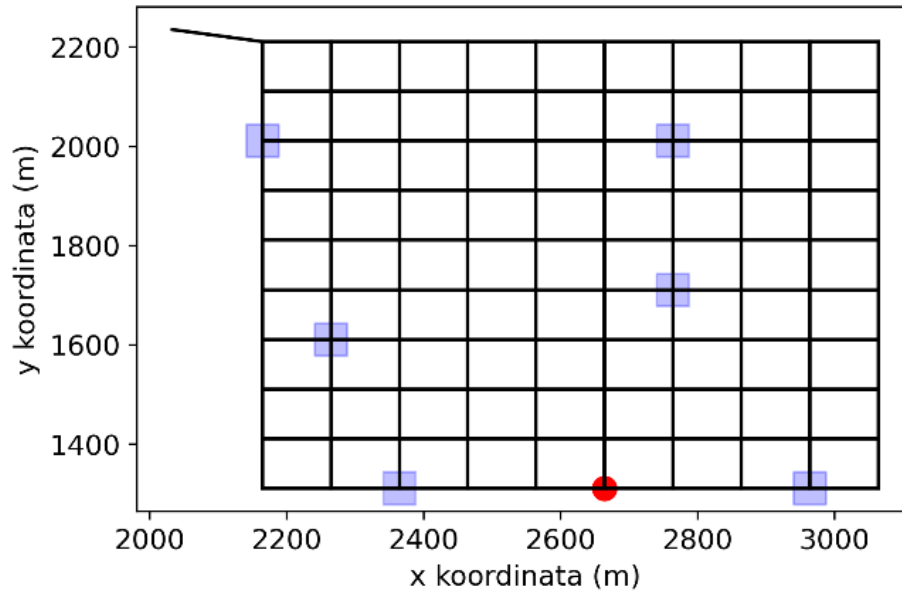
Metoda Euklidove udaljenosti rezultirala je površinama kojima metoda predviđa položaj gubitaka vode gotovo jednakih veličina za sva tri primjera. Rezultati dobiveni ovom metodom i dalje nisu zadovoljavajući te se oni odbacuju.

#### **4.5. Analiza rezultata za primjere na vodoopskrbnim mrežama s različitim brojem čvorova**

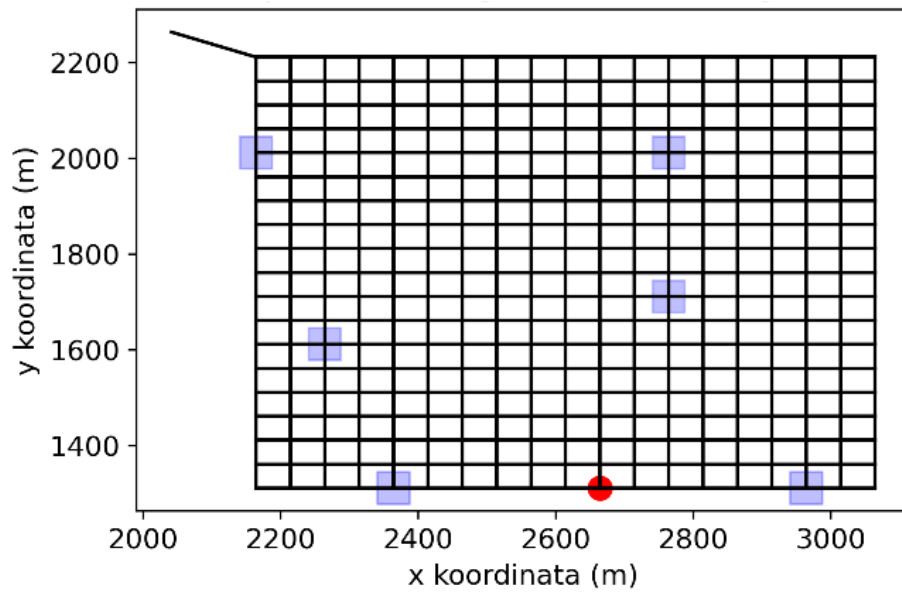
U ovom će se poglavlju prikazati rezultati dobiveni provedbom računalnih simulacija na primjerima dviju mreža različitog broja čvorova, kako slijedi:

- a) primjer A: mreža sa 100 čvorova
- b) primjer B: mreža s 361 čvorom

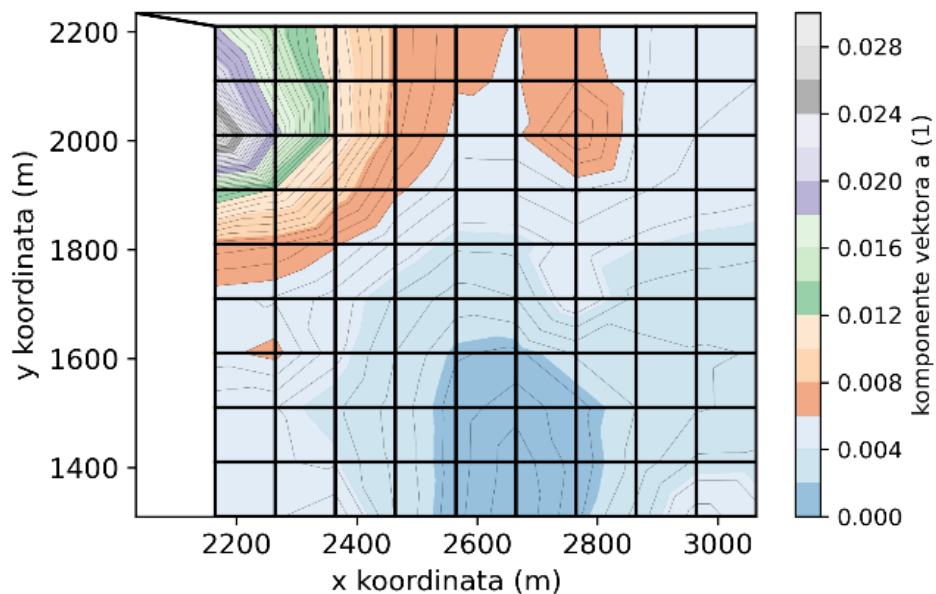
Za obje vodoopskrbne mreže mjerna mjesta tlakova i čvor u kojemu dolazi do gubitka vode postavljeni su na istim lokacijama. Njihova dispozicija prikazana je Slikama 4.41 i 4.42.



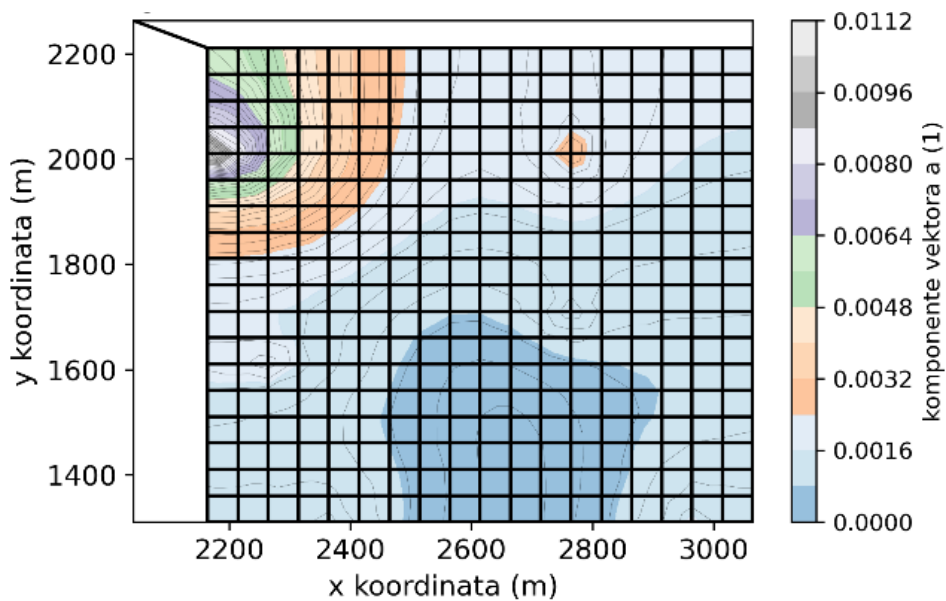
Slika 4.41 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.



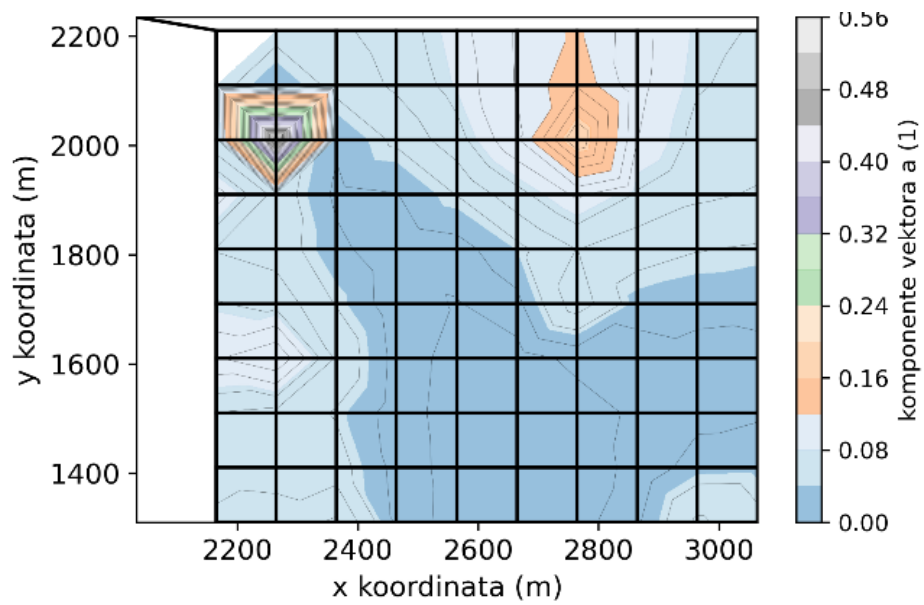
Slika 4.42 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer B.



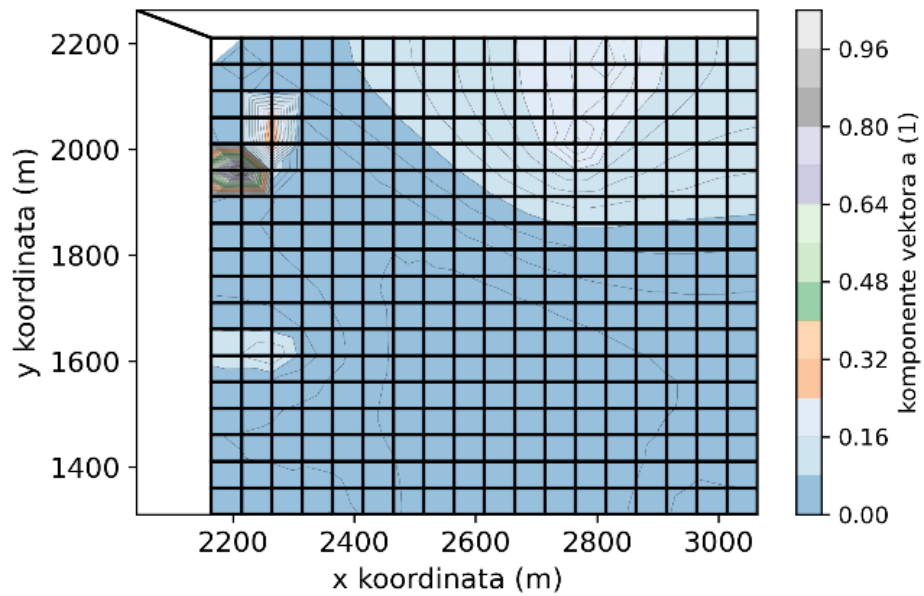
*Slika 4.43 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.*



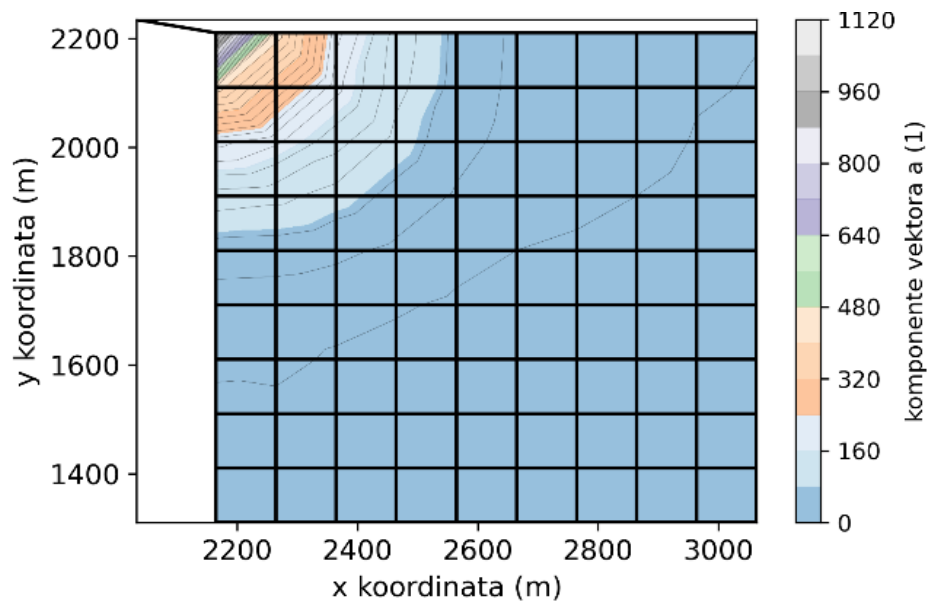
*Slika 4.44 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.*



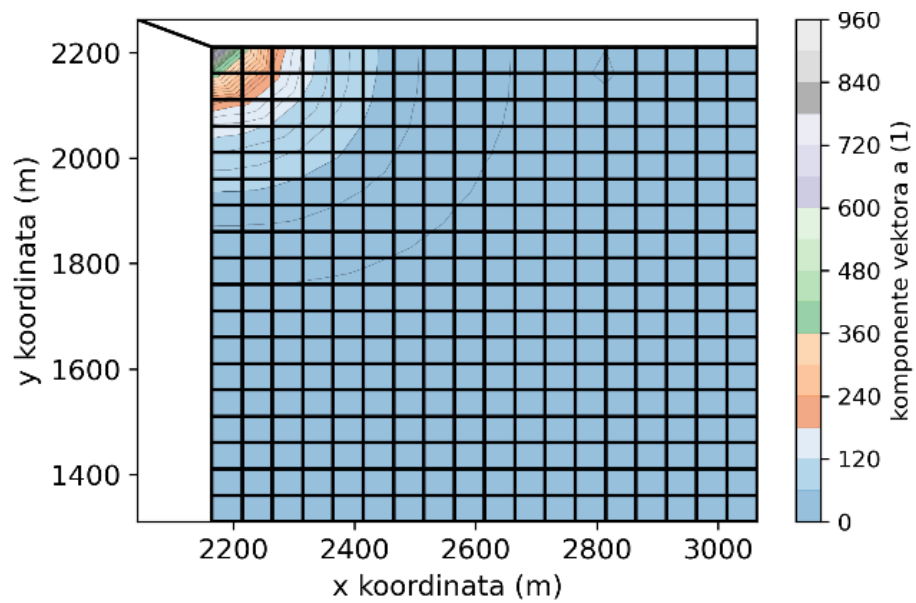
*Slika 4.45 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.*



*Slika 4.46. Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.*



*Slika 4.47 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.*



*Slika 4.48 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.*

Za jedan i drugi primjer vodoopskrbne mreže provedene su računalne simulacije za sve tri metode lokalizacije gubitaka vode. Cilj ove komparacije dviju različitih vodoopskrbnih mreža bio je uvidjeti hoće li broj čvorova u vodoopskrbnoj mreži imati znatan utjecaj na rezultate metoda lokalizacije gubitaka vode.

Obzirom na razliku u broju čvorova u vodoopskrbnim mrežama (čime se uvjetuje i razlika u ukupnoj duljini cjevovoda) bilo je potrebno koristiti se manjim početnim protocima za računanje tlakova u idealnom stanju. U suprotnom postojala bi mogućnost pojave negativnih tlakova u vodoopskrbnoj mreži.

Površina kojom metoda vektorskog otklona predviđa položaj gubitka vode u vodoopskrbnoj mreži na primjeru A pokriva približno 10% vodoopskrbne mreže (Slika 4.43). Površina kojom ista metoda predviđa položaj gubitka vode u vodoopskrbnoj mreži na primjeru B je veća te pokriva približno 17% vodoopskrbne mreže (Slika 4.44). Usporedbom ovih dvaju postotaka površine moguće je zaključiti kako je ova metoda uspješnija za primjer vodoopskrbne mreže a manjim brojem čvorova.

Za razliku od metode vektorskog otklona, razlika u veličinama površina kojom metoda korelacijskog koeficijenta predviđa položaj gubitka vode je velika (Slike 4.45 i 4.46). Kod vodoopskrbne mreže s većim brojem čvorova teže je locirati gubitak vode zato što je u takvoj mreži tlak osjetljiviji. Zaključuje se kako je metoda korelacijskog koeficijenta povoljnija za vodoopskrbne mreže s manjim brojem čvorova.

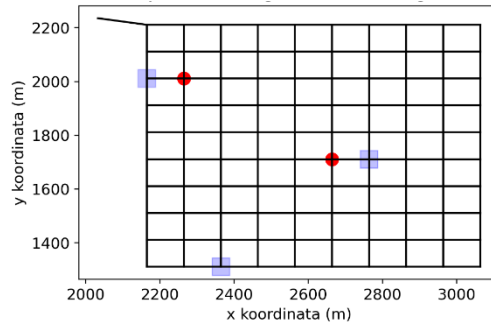
Prethodno je objašnjeno kako metoda Euklidove udaljenosti funkcionira na temelju usporedbe magnitude vektora. Iz tog razloga, jednaka veličina površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode za oba primjera ne iznenađuje (Slike 4.47 i 4.48). Zaključuje se kako broj čvorova u vodoopskrbnoj mreži nema utjecaj na uspješnost metode Euklidove udaljenosti.

Ovim poglavljem iskazano je kako kod dvije uspješne metode lokalizacije gubitaka vode broj čvorova u vodoopskrbnoj mreži znatno utječe na rezultat. Upravo se ovim primjerom potvrđuje potreba za uvođenjem tzv. DMA zona. Njima se velike vodoopskrbne mreže dijele na manje zone. Manje je zone lakše kontrolirati, kako je objašnjeno u poglavlju 2.1.

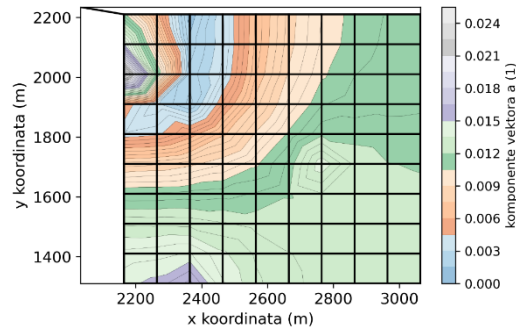
#### **4.6. Analiza rezultata za primjere u kojima postoji više od jednog gubitka vode**

##### **4.6.1. Analiza slučajeva u kojima su protoci gubitaka vode jednaki**

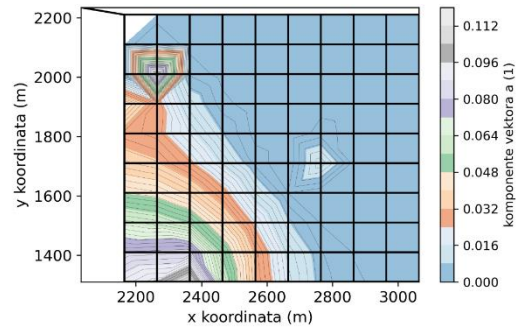
U primjeru A gubitak vode protoka  $Q = 1 \text{ l/s}$  postavljen je na dvije lokacije u vodoopskrbnoj mreži. Na istoj mreži postavljeno je tri mjerna mjesta tlakova kako je prikazano Slikom 4.49.



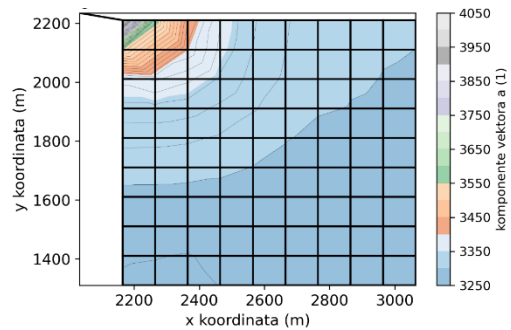
Slika 4.49 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvorova u kojima se nalaze gubici vode označeni crvenim točkama za primjer A.



Slika 4.50 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.



Slika 4.51 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.



Slika 4.52 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

Za primjer A provedena je računalna simulacija za sve tri metode lokalizacije gubitaka vode.

Promatrajući grafički prikaz rezultata metode vektorskog otklona na Slici 4.50 primjećuje se kako je površina kojom se predviđa lokacija gubitka vode iznimno mala. Moguće je reći kako ova metoda daje jedinstven rezultat jer površina zahvaća samo jedan čvor. Međutim, čvor zahvaćen površinom kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode nije čvor u kojemu zapravo dolazi do gubitka vode. Ova se metoda stoga smatra neuspješnom za ovaj primjer.

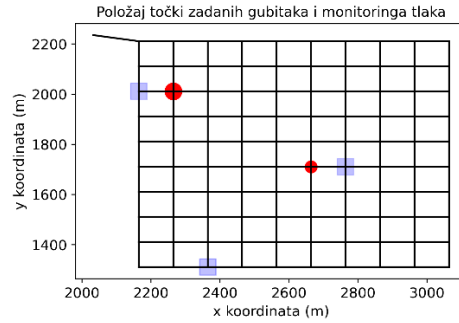
Metoda korelacijskog koeficijenta površinom kojom predviđa lokaciju gubitka vode zahvaća veći dio vodoopskrbne mreže (Slika 4.51). Bez obzira na veličinu površine, ona zahvaća samo jednu od dvije lokacije gubitka vode. Iz tog se razloga i ova metoda smatra neuspješnom za ovaj primjer.

Ne iznenađuje kako je površina kojom metoda Euklidove udaljenosti predviđa lokaciju gubitka vode velika (Slika 4.52). No također, kao niti prethodne dvije metode, niti metoda Euklidove udaljenosti nije locirala oba gubitka vode. Ona se također smatra neuspješnom za ovaj primjer.

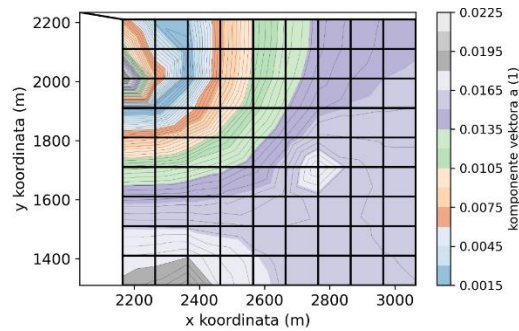
#### 4.6.2. Analiza slučajeva u kojima su protoci gubitaka vode različiti

Nakon provedenih računalnih simulacija za primjer A, uvodi se primjer B. Na ovom će primjeru gubici vode u čvorovima imati različit protok gubitaka vode. Protok gubitka vode u čvoru 21 u gornjem lijevom dijelu vodoopskrbne mreže jednak je  $Q = 2 \text{ l/s}$ . Protok gubitka vode u čvoru 60 na sredini vodoopskrbne mreže jednak je  $Q = 1 \text{ l/s}$ . Dispozicija mjernih mjesta tlakova i čvorova u kojima dolazi do gubitka vode prikazana je Slikom 4.53.

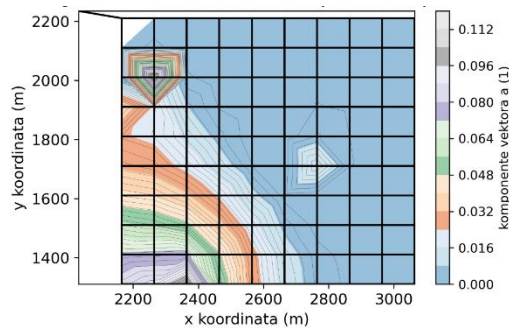




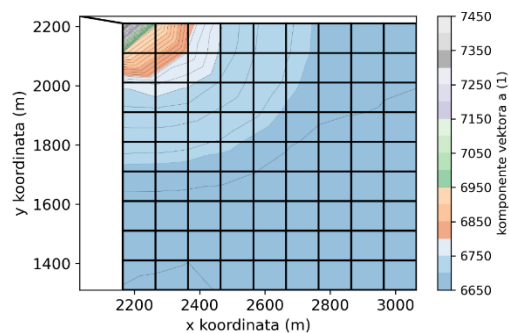
Slika 4.53 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvorova u kojima se nalaze gubitci vode označeni crvenim točkama za primjer B.



Slika 4.54 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.



Slika 4.55 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer B.



Slika 4.56 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer B.

Za primjer A provedena je računalna simulacija za sve tri metode lokalizacije gubitaka vode.

Usporedbom rezultata metode vektorskog otklona za primjer A (Slika 4.50) i primjer B (Slika 4.54) primjećuje se kako je površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode za primjer B manja. Međutim ona ne uključuje niti jedan čvor u kojemu dolazi do gubitka vode. Ova metoda se stoga i za primjer B smatra neuspješnom.

Površine kojima metoda korelacijskog koeficijenta predviđa lokacije gubitaka vode za primjer A (Slika 4.51) i primjer B (Slika 4.55) gotovo su jednake. Površina i u ovom primjeru uključuje samo jedan čvor u kojemu dolazi do gubitka vode. Ova se metoda za slučaj B također smatra neuspješnom. Zaključuje se također kako razlika u protoku gubitaka vode ne utječe na uspješnost ove metode.

Metoda Euklidove udaljenosti u ovom primjeru također je bila neuspješna. Površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode zahvaća samo jedan čvor u kojemu dolazi do gubitka vode (Slika 4.56)

#### 4.6.3. Sistematizacija provedenih analiza

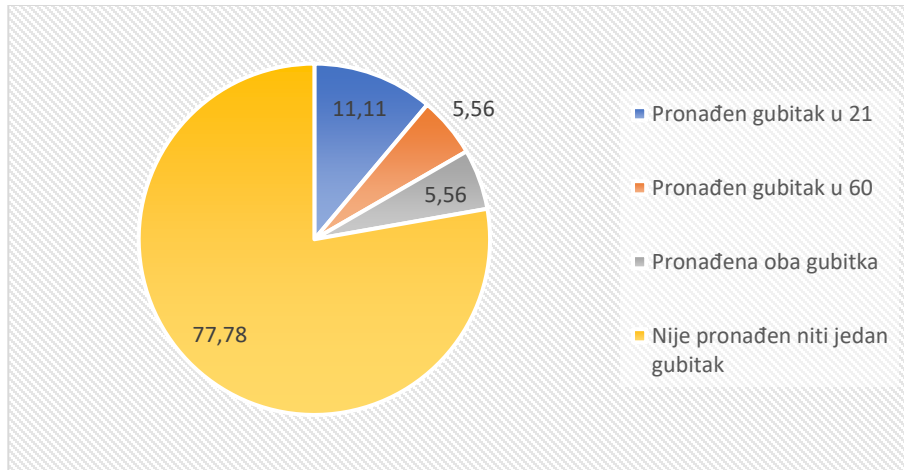
Za dispoziciju čvorova u kojima dolazi do gubitaka vode prikazanu Slikama 4.49 i 4.53 provedeno je ukupno osamnaest računalnih simulacija. U tim se primjerima mijenjao položaj i broj mjernih mjesta tlakova, kao i protoci gubitaka vode. Ishod ovih računalnih simulacija prikazan je tablicom 1. U njoj je redcima prikazano svih osamnaest primjera, a u stupcima je prikazan ishod računalnih simulacija. Metode su označene i prikazane na sljedeći način:

- a) A: metoda vektorskog otklona,
- b) B: metoda korelacijskog koeficijenta i
- c) C: metoda Euklidove udaljenosti.

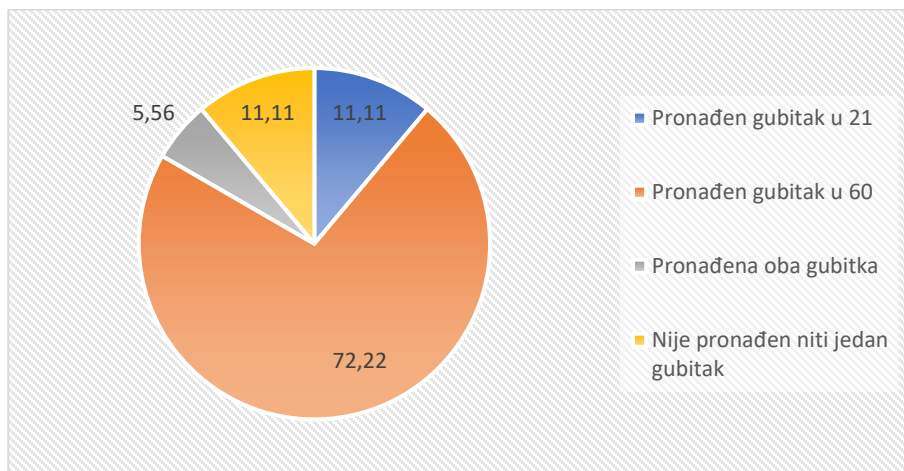
Tablica 1. Iskaz ishoda provedenih računalnih simulacija za osamnaest primjera u kojima se gubici vode nalaze u čvorovima 21 i 60.

	Lociran gubitak vode u čvoru 21	Lociran gubitak vode u čvoru 60	Locirana oba gubitka vode	Nije lociran niti jedan gubitak vode.
primjer A		B, C		A
primjer B		B, C		A
primjer C		B, C		A
primjer D		B		A, C
primjer E		B, C		A
primjer F		B		A, C
primjer G	B	C	A	
primjer H		C		A, B
primjer I		A, C		B
primjer J		B		A, C
primjer K		B, C		A
primjer L		B, C		A
primjer M		C		A, C
primjer N	A, B		C	
primjer O		B, C		A
primjer P		B, C		A
primjer R	A	C	B	
primjer S		B		A, C

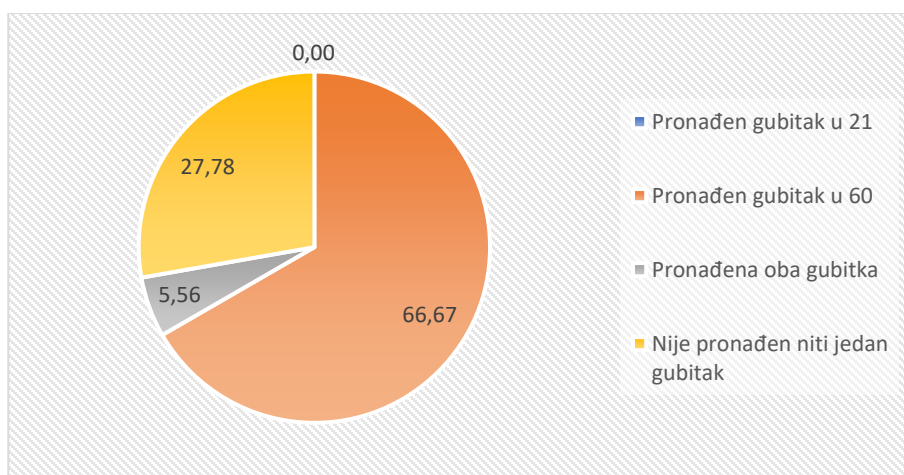
Iz priložene tablice 1. može se iščitati kako metoda vektorskog otklona (A) u većini primjera nije locirala niti jedan od dva gubitka vode. Metoda korelacijskog koeficijenta (B) u većini primjera locirala je samo jedan gubitak vode. Svaka od tri metode lokalizacije gubitaka vode jednom je računalnom simulacijom locirala oba čvora u kojima dolazi do gubitka vode. Slikama 4.57 do 5.59 dijagramima su prikazani postoci ishoda računalnih simulacija za svaku metodu lokalizacije gubitaka vode.



Slika 4.57 Postoci pojave različitih ishoda računalnih simulacija za metodu vektorskog otklona.



Slika 4.58 Postoci pojave različitih ishoda računalnih simulacija za metodu korelacijskog koeficijenta.



Slika 4.59 Postotci pojave različitih ishoda računalnih simulacija za metodu Euklidove udaljenosti.

Slika 4.57 prikazuje kako metoda vektorskog otklona u 77,78% primjera nije locirala niti jedan gubitak vode. Ovime se zaključuje kako metoda vektorskog otklona nije uspješna za lociranje gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama u kojima postoji više od jednog gubitka vode.

Jednak se zaključak donosi i promatranjem grafa na Slici 4.58 za metodu korelacijskog koeficijenta. Iako je ova metoda u 72,22% primjera locirala jedan gubitak vode, oba gubitka vode locirala je u samo 5,56% primjera. Stoga se i ova metoda smatra neuspješnom za lociranje gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama u kojima postoji više od jednog gubitka vode.

Također, metoda Euklidove udaljenosti također se iz istih razloga smatra neuspješnom za lokalizaciju gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama u kojima postoji više od jednog gubitka vode. Takav se zaključak donosi na temelju toga što je ova metoda u samo 5,56% primjera locirala oba gubitka vode (Slika 4.59).

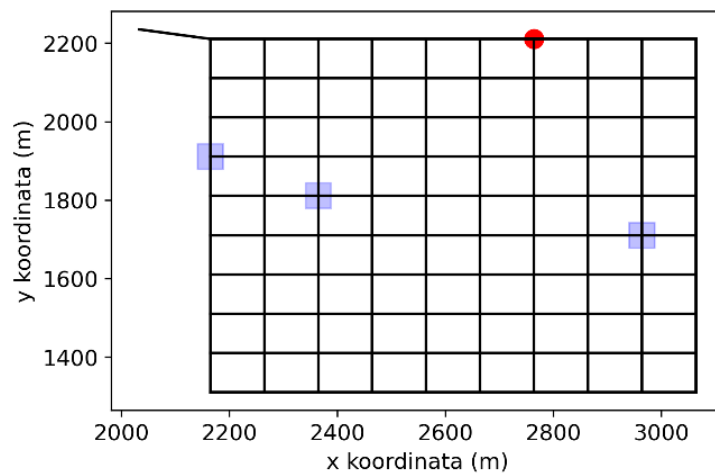
Valja primijetiti da su korištene metode razvijene za lociranje jednog gubitka vode te su prethodnim analizama ispitane za slučaj većeg broja lokacija gubitaka vode kako bi se ispitale njihove performanse u tim uvjetima.

#### **4.7. Analiza posebnih primjera zapaženih prilikom provođenja računalnih simulacija**

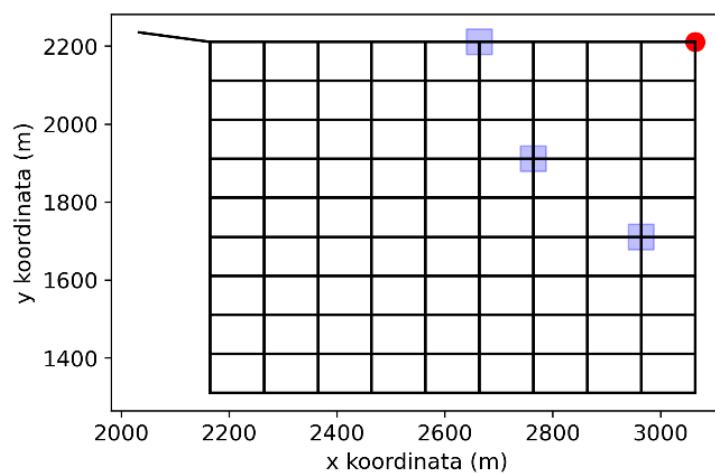
Prilikom provođenja računalnih simulacija na raznim primjerima, na nekim su grafičkim rezultatima zapažena zanimljiva ponašanja. Neka će se od tih ponašanja komentirati u daljnjem tekstu.

##### **4.7.1. Analiza primjera u kojima je grafički rezultat metode vektorskog otklona simetričan**

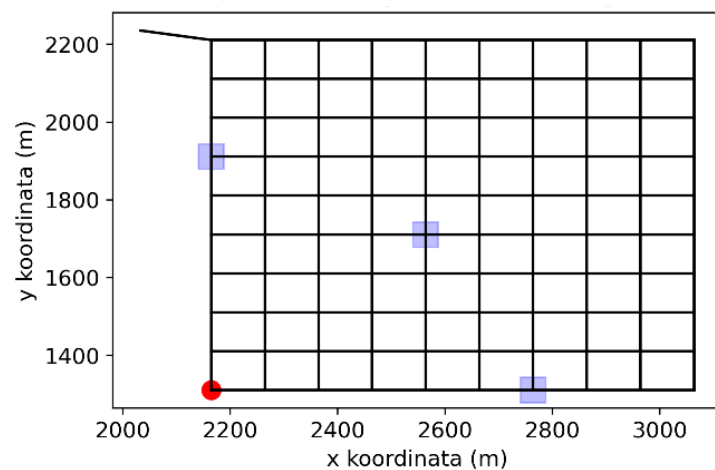
Prilikom provođenja računalnih simulacija, u nekoliko se primjera uočio grafički rezultat simetričnog oblika. U ovom će se poglavlju grafički prikazati rezultati spomenutih primjera. Cilj ove analize bio je zaključiti zašto dolazi do simetričnog oblika grafičkog rješenja, te je li takav rezultat uspješniji od nesimetričnog.



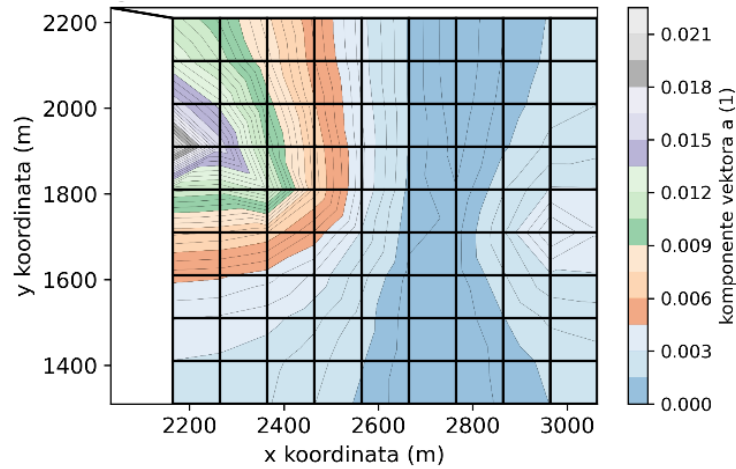
Slika 4.60 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer A.



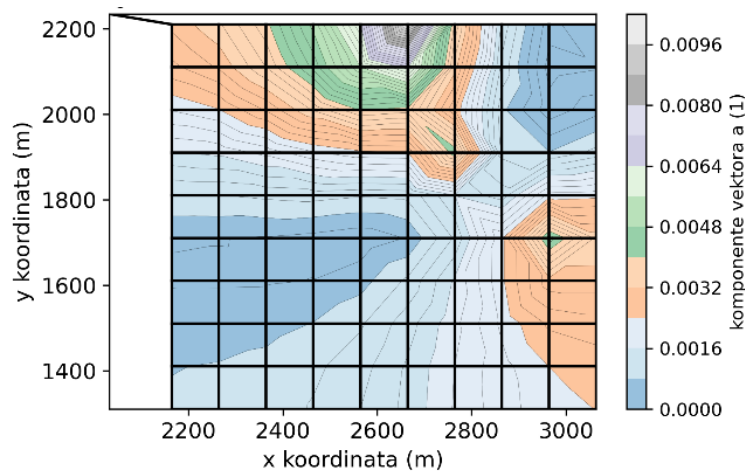
Slika 4.61 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer B.



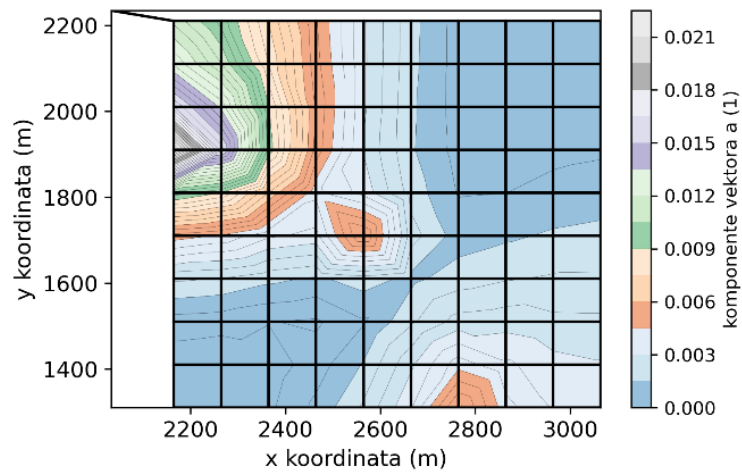
Slika 4.62 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer C.



Slika 4.63 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.



Slika 4.64 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer B.



Slika 4.65 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer C.

Na Slikama 4.60 do 4.62 prikazane su dispozicije mjernih mjesta tlakova i čvora u kojemu dolazi do gubitka vode za tri primjera. U svim primjerima mjerna mjesta tlakova postavljena su približno na sredini vodoopskrbne mreže u odnosu na čvor u kojemu dolazi do gubitka vode.

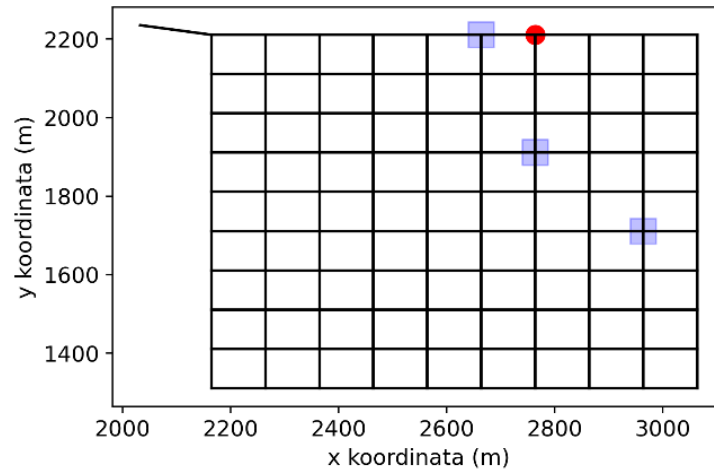
Grafički rezultati metode vektorskog otklona za dva tri primjera prikazani su Slikama 4.63 do 4.65. Površine kojima metoda previđa lokaciju gubitaka vode su simetrične u odnosu na položaj mjernih mjesta tlakova.

Razlog ovakvog ishoda je nejasan. Međutim, metoda vektorskog otklona se za primjere A, B i C smatra uspješnom. Postavlja se pitanje hoće li ista metoda za ovakvu dispoziciju mjernih mjesta tlakova biti uspješna i ukoliko se gubitak vode dogodi i u nekom drugom čvoru.

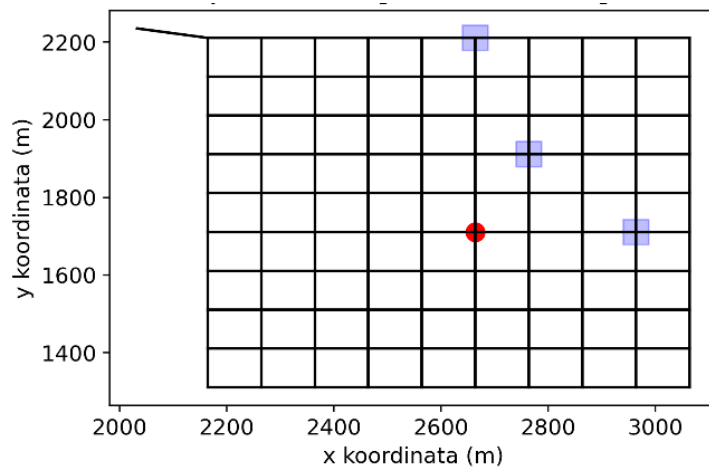
Potaknuto tim pitanjem, pripremili su se primjeri D, E i F. Primjeri su pripremljeni na način da su mjerna mjesta tlakova postavljena nekolinearno na način da idu od mjesta najbližem vodospremi ka mjestu najdaljem od vodospreme (Slike 4.66 do 4.68).

Za primjere D, E i F provedene su računalne simulacije za metodu vektorskog otklona, prikazane Slikama 4.69 do 4.71).

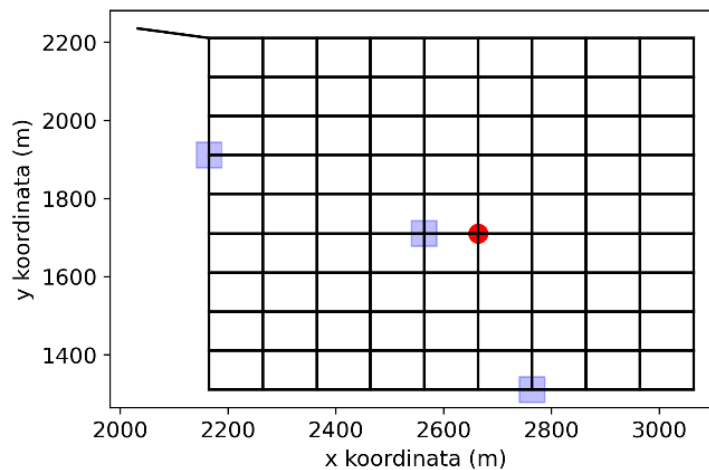




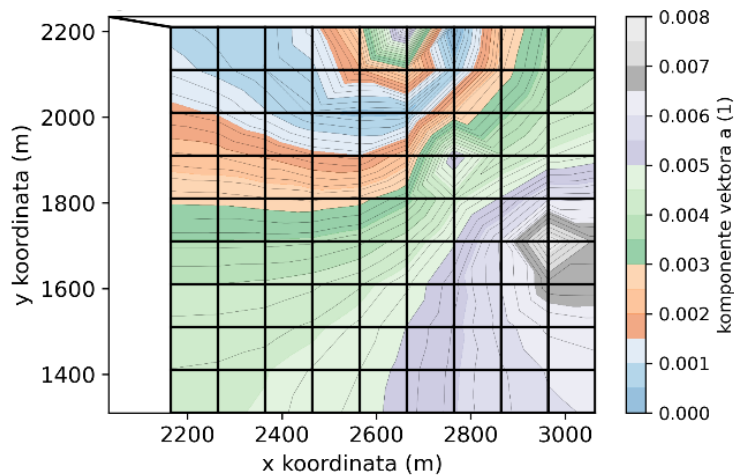
Slika 4.66 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer D.



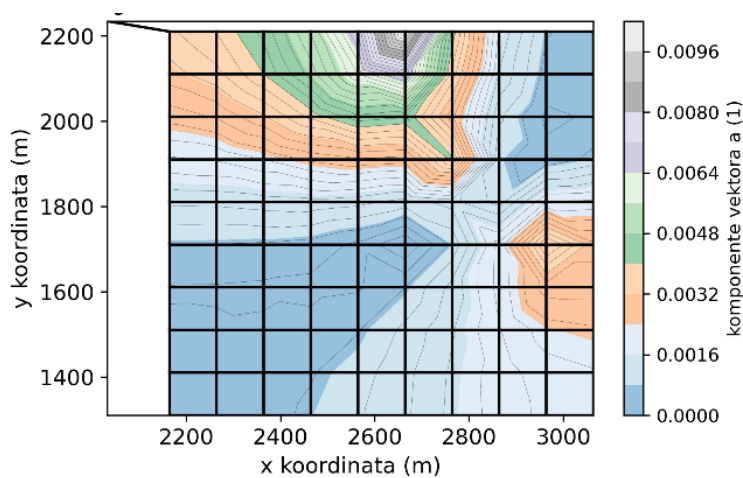
Slika 4.67 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer E.



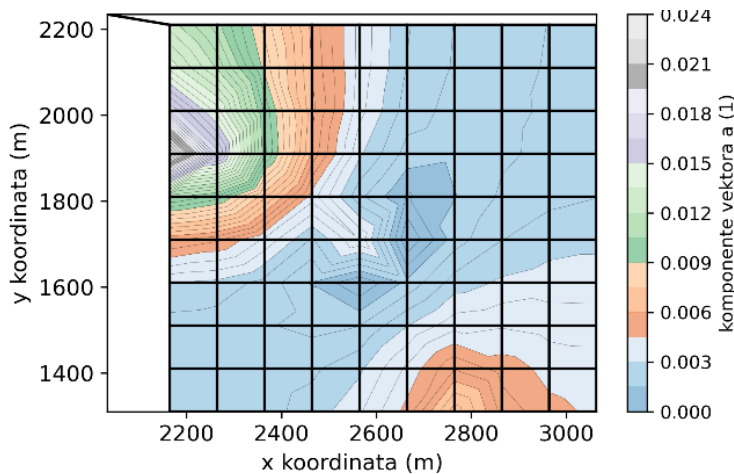
Slika 4.68 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojemu se nalazi gubitak vode označen crvenom točkom za primjer F.



Slika 4.69 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer D.



Slika 4.70 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer E.



Slika 4.71 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer F.

U primjeru D površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode toliko je mala da zahvaća samo jedan čvor. Čvor koji ona zahvaća je upravo čvor u kojemu dolazi do gubitka vode. U primjerima E i F površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode je također zahvatila i čvorove u kojima dolazi do gubitka vode.

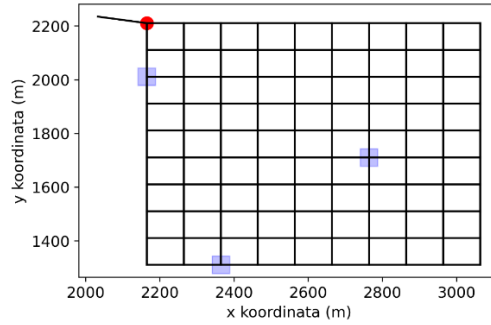
Osim navedena tri primjera, provedeno je još pet računalnih simulacija na pet primjera. U tim su primjerima dispozicije mjernih mjesta tlakova jednake, a mijenjala se lokacija gubitka vode. U svakom od tih primjera rezultati dobiveni računalnim simulacijama bili su zadovoljavajući.

Važno je ovom analizom istaknuti nekoliko činjenica vezanih uz tlakove u vodoopskrbnoj mreži. Prije svega, u slučajevima u kojima se koriste tri mjerna mjesta, izmjereno stanje tlakova definira nagib plohe tlaka. Samim time, komparacija izmjerenog i idealnog stanja biti će uspješnija.

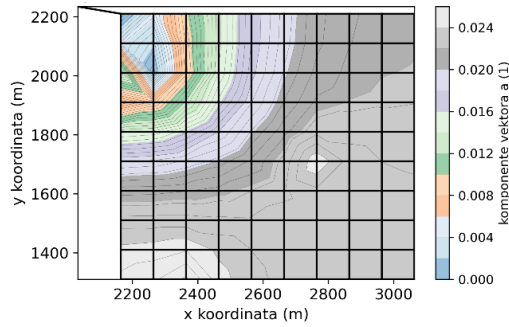
Moguće je zaključiti kako je za pravokutnu vodoopskrbnu mrežu optimalno postaviti mjerna mjesta tlakova nekolinarno između čvora najbližeg vodospremi i čvora najdaljeg od vodospreme. Za takvu će dispoziciju mjernih mjesta u većini slučajeva metoda vektorskog otklona biti uspješna, a površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode biti će optimalne veličine.

#### 4.7.2. Analiza primjera u kojemu je gubitak vode postavljen u čvoru najbližem vodospremi

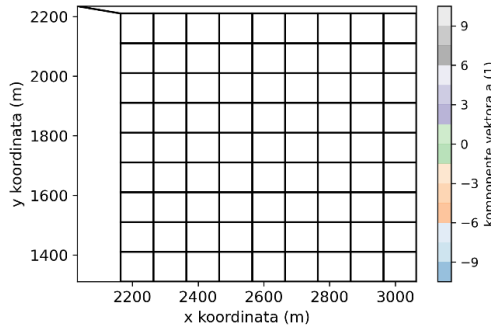
U primjeru A gubitak vode protoka  $Q = 1 \text{ l/s}$  nalazi se u čvoru 1. Čvor 1 nalazi se u gornjem lijevom kutu vodoopskrbne mreže, odnosno to je čvor koji je najbliži vodospremi. Dispozicija mjernih mjesta tlakova i položaj čvora u kojem se nalazi gubitak vode prikazani su Slikom 4.72.



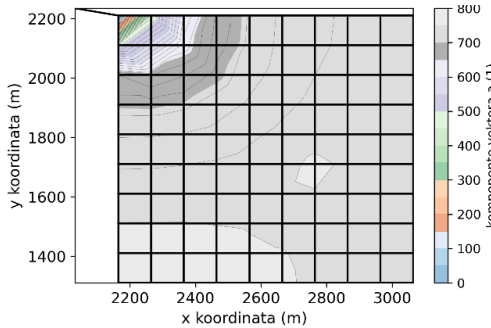
Slika 4.72 Dispozicija mjernih mjesta tlakova označenih ljubičastim kvadratićima i čvora u kojem se nalazi gubitak vode označenog crvenom točkom za primjer A.



Slika 4.73 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom vektorskog otklona za primjer A.



Slika 4.74 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom korelacijskog koeficijenta za primjer A.



Slika 4.75 Grafički prikaz rasporeda očekivanih položaja gubitaka vode dobiven metodom Euklidove udaljenosti za primjer A.

Metoda vektorskog otklona (Slika 4.73) površinom kojom predviđa položaj gubitaka vode zahvatila je samo dva čvora. Od zahvaćena dva čvora, gubitak vode nalazi se u jednom. Ovakav se rezultat metode vektorskog otklona smatra uspješnim.

Grafički rezultat metode korelacijskog koeficijenta je izostao. Računalna simulacija rezultirala je potpuno bijelim grafičkim prikazom. Ovaj bi se primjer mogao pripisati grešci, međutim, kod svih ostalih provedenih računalnih simulacija za primjer kada se gubitak vode nalazi u čvoru 1 je jednak.

Pretpostavka je da do ovakvog ishoda dolazi zato što je čvor 1 najbliži vodospremi. Samim time, ukupan protok koji mora proći kroz vodoopskrbnu mrežu prolazi i tim čvorom. Iz tog razloga, zadani protok gubitka vode  $Q = 1 \text{ l/s}$  je toliko mali u odnosu na ukupan protok da ga računalna simulacija ne prepoznaje. Ovime se zaključuje kako metoda korelacijskog koeficijenta neće biti uspješna za lociranje gubitaka vode u čvoru najbližem vodospremi.

Površina kojom metoda Euklidove udaljenosti predviđa položaj lokacije gubitka vode zahvatila je samo jedan čvor, i to čvor u kojemu dolazi do gubitka vode. Metoda Euklidove udaljenosti može se smatrati uspješnom za ovaj primjer.

## 5. ZAKLJUČAK

Ovim su se diplomskim radom računalnim simulacijama analizirali rezultati dobiveni koristeći se trima metodama lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnim sustavima. Koristile su se metoda vektorskog otklona, metoda korelacijskog koeficijenta i metoda Euklidove udaljenosti.

Provedeno je ukupno petsto četrdeset i pet računalnih simulacija za različite primjere u pravokutnom vodoopskrbnom sustavu. Računalne simulacije su provedene koristeći prethodno pripremljen kod u programskom jeziku Python.

Računske simulacije su se provodile na ukupno dvije vodoopskrbne mreže koje su jednake veličinom, ali različitog broja čvorova. Međusobnom usporedbom rezultata tih dviju mreža, zaključuje se kako će kod vodoopskrbne mreže s manjim brojem čvorova površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode biti manja nego kod mreže većeg broja čvorova. To se zaključuje iz razloga što kroz mrežu s manjim brojem čvorova teku manji protoci te je lakše primijetiti gubitak vode. Ovim se zaključnom dokazuje i potreba za korištenjem DMA zona, odnosno zoniranjem velikih vodoopskrbnih mreža koje je jednostavnije kontrolirati.

Provodile su se također i usporedbe protoka gubitaka vode. Provele su se računalne simulacije za primjere u kojima se mijenjao protok gubitka vode na istoj lokaciji. Dokazano je kako u većini primjerna metode vektorskog otklona i korelacijskog koeficijenta ne prepoznaju razliku u primjerima drugačijih protoka gubitaka vode. Međutim, metoda Euklidove udaljenosti prepoznaje isključivo taj parametar. Ovim se zaključkom potvrđuje prethodno postavljena pretpostavka da je veličina vektora jedina varijabla koju metoda Euklidove udaljenosti promatra prilikom komparacije.

Obije vodoopskrbne mreže ispitane su i za primjere u kojima se gubitak vode javlja u većem broju čvorova, najčešće dva. Ove su računalne simulacije u gotovo svim primjerima bile neuspješne. Zaključuje se stoga kako ove metode lokalizacije gubitaka vode nisu pogodne za vodoopskrbne mreže u kojima se nalazi više od jednog gubitka vode.

U primjerima u kojima se promatrala razlika grafičkih rješenja za različitu lokaciju mjernih mjesta zaključuje se kako će metode lokalizacije gubitaka vode biti uspješnije što su mjerna mjesta tlakova postavljena bliže čvoru u kojemu dolazi do gubitka vode.

Slično ovome, dokazalo se i kako će u većini primjera površina kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode biti manja što je veći broj mjernih mjesta tlakova u

vodoopskrbnoj mreži. Ovaj zaključak nije vrijedio u nekoliko primjera, međutim razlog tomu nije bilo moguće dokučiti.

Podatak koji je vrlo važno istaknuti je podatak o najpovoljnijem položaju mjernih mjesta tlakova u vodoopskrbnoj mreži. Provedbom većeg broja računalnih simulacija dolazi se do zaključka kako su najpovoljnije lokacije mjernih mjesta tlakova u vodoopskrbnom sustavu na potezu između čvora koji je najbliže vodospremi i čvora koji je najdalje od vodospreme. Iznimno je važno da se mjerna mjesta tlakova ne postavljaju kolinearno jer se u tom slučaju poništava njihov učinak. Ovakav položaj mjernih mjesta tlakova neće dati egzaktno rješenje, no neovisno o lokaciji gubitka vode dati će površinu kojom metoda predviđa lokaciju gubitka vode optimalne veličine.

Važno je napomenuti kako zaključci postavljeni temeljem provedenih analiza nisu poopćeni. Svaka vodoopskrbna mreža je jedinstvena, drugačijih geometrijskih značajki, visinskih kota, drugačije starosti, drugačije kvalitete izvedbe. Sve su to faktori koji mogu utjecati na pojavu i lokalizaciju gubitaka vode. Samim time, zaključuje se kako se svaka od analiziranih metoda lokalizacije gubitaka vode može ponašati drugačije u realnim slučajevima i na realnim vodoopskrbnim mrežama. Međutim, provedene analize mogu služiti kao podloga za daljnje istraživanje.

## LITERATURA

- [1] Karleuša, Barbara et. al.: „Vodoopskrba i kondicioniranje voda“, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka – skripta za internu upotrebu
- [2] Ujević Bošnjak, Magdalena et. al.: „Vodoopskrba u Republici Hrvatskoj i potreba uvođenja planova sigurnosti vode“, Hrvatski zavod za javnoo zdravstvo, Zagreb, Hrvatska, 2017.
- [3] Užar, Josip: „Gubici vode u vodoopskrbnom sustavu“, Tehnički glasnik 6, 2(2012), 312-218.
- [4] Vukotić, Vedran: „Smanjenje gubitka vode u vodoopskrbnim sustavima“, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2015.
- [5] Mergeta, Jure: „Gubici i učinkovitost u vodoopskrbnom sustavu“, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, Split, 2020.
- [6] EU Reference document: „Good Practices on Leakage Management“, Case study document, 2015.
- [7] Ministarstvo financija: „Pravilnik o amortizaciji“, Narodne Novine br. 54/2001, 2001.
- [8] Poljak, Davor: „Integralni model za povećanje učinkovitosti javne vodoopskrbe“, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [9] Blažević, Marko: „Rezultati sustavnog smanjivanja gubitaka u Vodovod-u d.o.o. Slavonski Brod“, Stručno-poslovni skup Gubici vode u vodoopskrbi i odvodnji: Suvremene metodologije praćenja, pronalaženja i otklanjanja, Poreč, 2007.
- [10] Slobodna Dalmacija - <https://slobodnadalmacija.hr/split/stanari-uz-trstenicki-potok-vec-su-se-prepali-da-im-po-ulici-cure-fekalije-no-srecom-radilo-se-tek-o-puknuću-cijevi-djelatnici-vodovoda-vec-su-na-terenu-stigla-je-i-cisterna-1199495> - pristup kolovoz 2022.
- [11] 034 Portal - <https://www.034portal.hr/zbog-puknuća-vodovodne-cijevi-brestovac-i-okolna-mjesta-ostala-bez-vode-403> - pristup kolovoz 2022.
- [12] Casillas Ponce, Myrna V.: „Model-based Leak Detection and Location in Water Distribution Networks considering an Extended-horizon Analysis of Pressure Sensitivites“, Journal of Hydroinformatics 16, 2014.
- [13] Vuković, Živko: „Osnove hidrologije, prvi dio, druga knjiga“, Zagreb: Akvamarine, 1995.