

# Lokalizacija gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama primjenom PSO metode

---

**Krizmanić, Matija**

**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:157:805407>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**



*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**

**Matija Krizmanić**

**Lokalizacija gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama  
primjenom PSO metode  
Leak localization in water distribution networks using PSO method**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij**

**Hidrotehnika**

**Računarska hidraulika**

**Matija Krizmanić**

**JMBAG:**

**0117225253**

**Lokalizacija gubitaka vode u vodoopskrbnim mrežama  
primjenom PSO metode**

**Leak localization in water distribution networks using PSO method**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2022.**

## **IZJAVA**

Diplomski rad izradio 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.

---

Matija Krizmanić

U Rijeci, 14. rujan 2022.

Zahvala!

Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Vanji Travašu dipl.ing.grad. i komentoru doc.dr.sc. Danku Holjeviću na uputama, smjernicama i znanju koje su mi pružali pri pisanju ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima te posebno Matei Vareško. Hvala vam što ste bili uz mene na ovom divnom putovanju kroz studij u svim usponima i padovima tokom studiranja.

Hvala vam.

## SAŽETAK

Gubitci vode su veliki problem u svijetu, a tako i u Hrvatskoj. Sve države Europe pokušavaju smanjiti gubitke vode u javnoj vodoopskrbi. Nove direktive EU nalažu da se voda počne naplaćivati po zahvaćenoj vodi, a ne kao do sada po isporučenoj količini vode. U svrhu ovog diplomskog rada, napravljena je hipotetska vodoopskrbna mreža u programu Epanet za koju su se provodili proračuni da bi se vidjelo može li se putem optimizacijske metode doći do određenog čvora u kojemu je prethodno zadan gubitak vode. Računalne simulacije su se provodile tako da se uspoređivalo kakva je točnost rezultata ovisno o broju mjernih mjesta tlakova. Sve računalne simulacije su se provodile da bi se dobila što manja funkcija cilja koja je definirana mjerom odstupanja između tlakova. Programski kod pomoću kojeg se radila optimizacijska metoda napisan je u programskom jeziku Python.

Ključne riječi: *Gubitci vode, Epanet, optimizacijska metoda, funkcija cilja, Python*

## **ABSTRACT**

Water losses are a big problem in the world, as well as in Croatia. All European countries are trying to reduce water losses in the public water supply. The new EU directives mandate that water be charged for the amount of water consumed, and not for the amount of water delivered as before. For the purpose of this thesis, a hypothetical water supply network was created in the Epanet program, for which calculations were carried out to see if the optimization method could be used to reach a certain node in which the water loss was previously set. Computer simulations were carried out in such a way that the accuracy of the results was compared depending on the number of pressure measurement points. All computer simulations were performed in order to obtain as small an objective function as possible, which is defined by the measure of the deviation between the pressures. The programming code used for the optimization method was written in the Python programming language.

Key words: Water losses, Epanet, optimization method, objective function, Python

## SADRŽAJ

<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
1.1 Gubici vode u vodoopskrbnom sustavu	2
1.1.1 Općenito o gubicima vode	2
1.1.2 IWA metodologija	3
1.1.3 Gubici vode u vodoopskrbnim sustavima – iskustva u Republici Hrvatskoj	8
1.1.4 Gubici vode u vodoopskrbnim sustavima – iskustva izvan Republike Hrvatske	10
1.2 Količina zahvaćene i isporučene vode	12
<b>2 MODELIRANJE VODOOPSKRBNOG SUSTAVA U PROGRAMU EPANET</b>	<b>15</b>
2.1 Općenito o Epanetu	15
2.2 Mogućnosti hidrauličkog modeliranja	15
2.3 Primjena Epaneta za potrebe diplomskog rada	17
2.3.1 Projektirano stanje tlakova	17
2.3.2 Izmjereno stanje tlakova	20
<b>3. DMA ZONE</b>	<b>23</b>
<b>4. PSO OPTIMIZACIJSKA METODA</b>	<b>24</b>
4.1 Funkcija cilja	29
4.2 Ažuriranje položaja čestica	32
4.3 Kutijasti dijagram	33
<b>5 PRIMJER LOKALIZACIJE GUBITAKA VODE</b>	<b>34</b>
5.1 Vodoopskrbna mreža	34
5.2 Proračun projektiranih tlakova	34
5.3 Proračun izmjerenih tlakova	34
5.4 PSO optimizacija	35
5.4.1 PSO optimizacija mreže 100 čvorova	35
5.4.2 PSO optimizacija mreže 180 čvorova	55
<b>8. ZAKLJUČAK</b>	<b>75</b>



## POPIS SLIKA

Slika 1. raspodjela vode u svijetu.

Slika 2. nivoi NRW-a u vodovodnim poduzećima u zemljama u razvoju.

Slika 3. vrijednost ILL pokazatelja za sustave u EU i u Hrvatskoj.

Slika 4. zadane potrošnje u čvorovima.

Slika 5. zadane visinske kote u čvorovima.

Slika 6. vrijednost zadanih duljina cijevi.

Slika 7. vrijednost zadanih promjera cijevi.

Slika 8. vrijednost tlakova u čvorovima.

Slika 9. vrijednost brzine vode u vezama.

Slika 10. digitalni manometar.

Slika 11. analogni manometar.

Slika 12. struktura DMA zona.

Slika 13. dijagram klasifikacije različitih vrsta metaheuristike.

Slika 14. primjer pretrage PSO metode.

Slika 15. kutijasti dijagram.

Slika 16. prikaz prve referentne kružne vodoopskrbne mreže.

Slika 17. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

Slika 18. raspored protoka s gubicima vode.

Slika 19. raspored tlakova.

Slika 20. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka, početno stanje.

Slika 21. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 22. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.

Slika 23. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.

Slika 24. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.

Slika 25. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 26. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 60 sa 2 lokacije mjerenja u mreži sa 100 čvorova.

Slika 27. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

Slika 28. raspored protoka s gubicima vode.

Slika 29. raspored tlakova.

Slika 30. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.

Slika 31. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 32. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.

Slika 33. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.

Slika 34. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.

Slika 35. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 36. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 60 sa 3 lokacije mjerenja u mreži sa 100 čvorova.

Slika 37. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

Slika 38. raspored protoka s gubicima vode.

Slika 39. raspored tlakova.

Slika 40. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.

Slika 41. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 42. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.

Slika 43. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.

Slika 44. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.

Slika 45. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 46. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 60 sa 4 lokacije mjerenja u mreži sa 100 čvorova.

Slika 47. prikaz druge referentne kružne vodoopskrbne mreže.

Slika 48. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

Slika 49. raspored protoka s gubicima vode.

Slika 50. raspored tlakova.

Slika 51. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.

Slika 52. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 53. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.

Slika 54. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.

Slika 55. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.

Slika 56. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 57. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 75 sa 2 lokacije mjerenja u mreži sa 180 čvorova.

Slika 58. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

Slika 59. raspored protoka s gubicima vode.

Slika 60. raspored tlakova.

Slika 61. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.

Slika 62. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 63. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.

Slika 64. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.

Slika 65. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.

Slika 66. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 67. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 75 sa 3 lokacije mjerenja u mreži sa 180 čvorova.

Slika 68. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

Slika 69. raspored protoka s gubicima vode.

Slika 70. raspored tlakova.

Slika 71. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.

Slika 72. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 73. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.

Slika 74. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.

Slika 75. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.

Slika 76. prognozirani raspored gubitaka vode.

Slika 77. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 75 sa 4 lokacije mjerenja u mreži sa 180 čvorova.

Slika 78. prikaz točnosti podataka obzirom na broj mjernih mjesta.

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Opća bilanca vode prema IWA metodologiji [4].

Tablica 2. Procjena stanja vodoopskrbnih sustava u odnosu na ILI pokazatelj [3].

# 1 UVOD

Od najstarije povijesti ljudi su doseljavali u mjesta pozamašnih izvora pitke vode. Bilo je potrebno već tada osmisliti efektivne načine kako pitku vodu dopremiti od mjesta njenog izviranja do mjesta njenog korištenja. To se na neki način može nazvati počecima projektiranja vodoopskrbnih sustava, koliko god oni bili jednostavni.

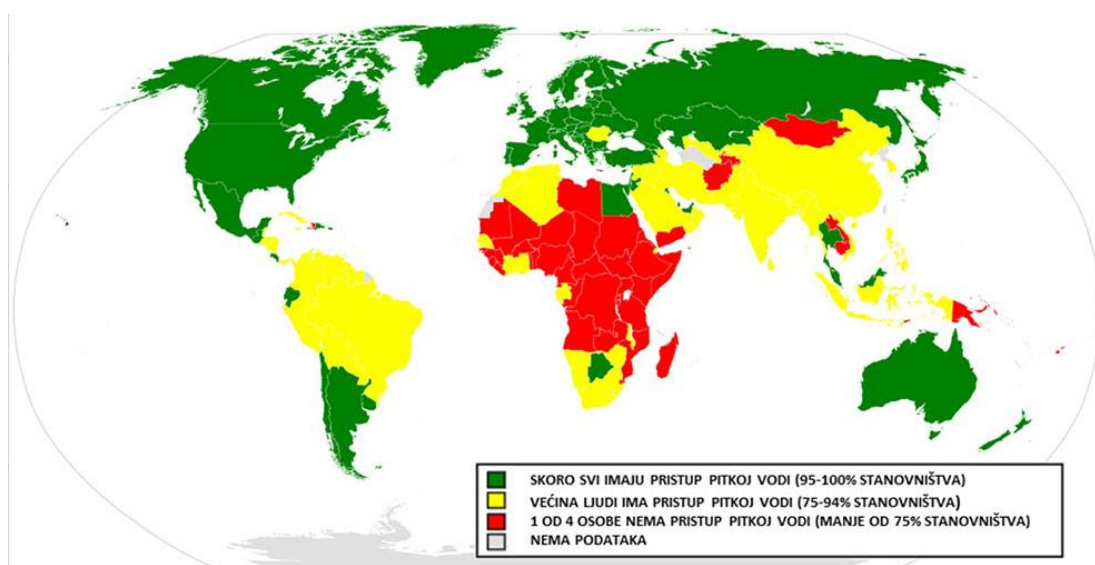
Samom pojavom i najjednostavnijih vodoopskrbnih sustava javlja se pojava gubitaka vode. Gubici vode definiraju se u grubo kao razlika između zahvaćene i dopremljene vode do krajnjeg korisnika. Gubici vode klasificiraju se kao problem što ekonomske, što ekološke prirode. Kao takve, potrebno ih je minimizirati, ako ne i u potpunosti ukloniti.

Postoje razne metode sanacije i lokalizacije gubitaka vode u vodoopskrbnim sustavima, a ovim se diplomskim radom opisuje, analizira i provode računalne simulacije za optimizacijsku metodu detekcije, poznatu kao PSO metoda ili metoda roja čestica.

## 1.1 Gubitci vode u vodoopskrbnom sustavu

### 1.1.1 Općenito o gubicima vode

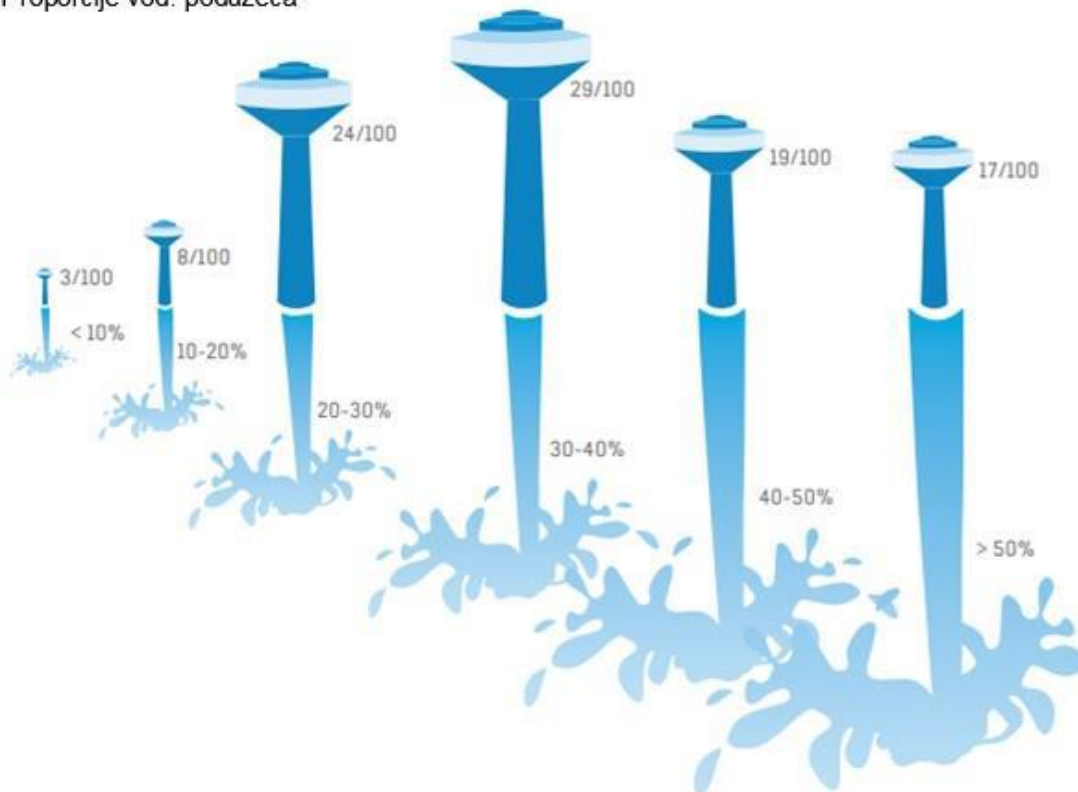
Voda je resurs bez kojeg čovjek ne može. Čovjek može bez vode preživjeti dva do tri dana, što vodu čini drugim najvažnijim resursom na Zemlji, nakon kisika. Zato je problem gubitka vode ozbiljan, pogotovo zato što se potrebe za vodom povećavaju iz dana u dan. Te potrebe se javljaju zbog rasta stanovništva, ekonomskog razvoja društva i klimatskih promjena. Posebno je teško u područjima gdje vlada nestašica vode. Stoga je bitno što više vode dovesti do potrošača bez suvišnih gubitaka vode. Globalna raspodjela količine vode u svijetu prikazana je na Slici 1.



Slika 1. raspodjela vode u svijetu.

Gubici vode, zajedno s nenaplaćenom izmjerenom vodom i nenaplaćenom neizmjenom vodom (voda koja se koristi za požare, ispiranje cijevi, čišćenje ulica, gradske fontane itd.), čine ne prihodovanu vodu (NRW). NRW (engl. „Non-revenue water“) je, ukratko, voda koja je proizvedena, ali od nje nije ostvarena zarada. Studija svjetske banke je pokazala da se otprilike 45 milijuna m<sup>3</sup> vode godišnje izgubi zbog curenja. To čini 35% vode koja se isporučuje (Slika 2). Kada bi pola izgubljene vode bilo sačuvano, 100 milijuna ljudi bi imalo pristup vodi bez daljnjih ulaganja [2].

Proporcije vod. poduzeća



Raspon nivoa NRW-a

Slika 2. nivoi NRW-a u vodovodnim poduzećima u zemljama u razvoju [1].

Kako bi poduzeća uspješno poslovala potrebno je vodne resurse koristiti tako da ih se čuva za buduće generacije jer se potrebe za vodom stalno povećavaju. Ta potreba za povećanjem se javlja zbog rasta stanovništva, ekonomskog razvoja, klimatskih promjena, migracija i urbanizacije. Zato je potrebno financijski i politički poticati aktivnosti koje smanjuju gubitke vode. Ti isti gubici vode imaju ekonomske, tehničke, društvene i ekološke utjecaje koji dalje stvaraju probleme vodovodnim poduzećima. Na sreću razvijene su brojne metode koje smanjuju gubitke vode. Četiri glavne metode su:

- a) upravljanje tlakom,
- b) aktivna detekcija curenja,
- c) brzina i kvaliteta popravaka i
- d) upravljanje infrastrukturom [1].

## 1.1.2 IWA metodologija

### 1.1.2.1 Općenito o IWA metodologiji i načinima iskazivanja gubitaka vode

Najčešći način iskazivanja vodnih gubitaka u vodoopskrbnim sustavima je postotno tj. kao odnos zahvaćenih i naplaćenih količina vode. Taj se odnos sve rjeđe koristi jer ne nudi dovoljno informacija i ne daje uvid u realno stanje sustava u kojem se ti gubici vode javljaju. Zato je međunarodno udruženje za vode IWA (engl. „International Water Association“) donijelo metodologiju koja koristi infrastrukturni indeks curenja ILI, (engl. „infrastructure leakage indeks“). No kako bi još detaljnije odredili vodne gubitke koriste se ekonomske analize tj. gubici vode se izražavaju kroz novac, što je realni prikaz stanja gubitaka vode u sustavu. Relativno nov način prikaza gubitaka vode je indeksom upravljanja tlakom (PMI engl. „Pressure Management Indeks“) koji daje procjenu potencijala za smanjenje gubitaka vode putem upravljanja tlakom [3].

### 1.1.2.2 Terminologija vodnog bilanca

Međunarodno udruženje za vodu (IWA) 2000. godine je utvrdila metodu analize i kontrole gubitaka vode. Ovo je standardni oblik proračuna bilance vode. Bilanca se prikazuje u obliku tablice (Tablica 1.). Preko ove metode mogu se izračunati sve komponente ne prihodovane vode te se mogu standardizirati pojedine komponente. Ova metoda nam omogućava računanje stvarnih i prividnih gubitaka vode.

Tablica 1. opća bilanca vode prema IWA metodologiji [4].

Dobavljena voda	Ovlaštena potrošnja	Fakturirana ovlaštena potrošnja	Fakturirana mjerena količina vode (očitani vodomjeri potrošača)	Prihodovana voda
		Nefakturirana ovlaštena potrošnja	Nefakturirana mjerena količina vode	
	Nefakturirana nemjerena količina vode			
	Gubici vode	Prividni gubici	Netočnost vodomjera potrošača (i pogreške u obradi podataka)	
			Neovlaštena potrošnja vode	
		Stvarni gubici	Curenje na cijevovodima	
			Preljevanje i curenje rezervoara	
			Curenje na priključcima vodomjera	



Elementi vodne bilance se definiraju kao:

- a) volumen na ulasku u sistem: količina vode koja ulazi u sistem,
- b) ovlaštena potrošnja: količina izmjerene i/ili neizmjerene vode koju uzimaju registrirani potrošači, vodovod i ostale ovlaštene strane. U to spada fakturirana ovlaštena potrošnja i nefakturirana ovlaštena potrošnja,
- c) prihodovana voda: fakturirana količina vode koja je dovedena do potrošača i koja ostvaruje prihod (fakturirana ovlaštena potrošnja),
- d) ne prihodovana voda (NRW): količina vode koja je nefakturirana i koja ne donosi prihod. Može se izraziti kao razlika između količine koja uđe u sustav i fakturirane ovlaštene potrošnje i
- e) gubici vode: količina vode koja je izgubljena zbog različitih razloga. Dije se na realne i prividne gubitke. Realni gubici vode se sastoje od curenja na cjevovodima, curenja na priključenjima na mrežu i gubicima iz rezervoara. Prividni gubici vode se mogu podijeliti na neovlaštenu potrošnju vode, nepreciznost vodomjera i na pogreške u obradi podataka [1].

### 1.1.2.3 ILI pokazatelj

ILI pokazatelj se prikazuje kao odnos trenutnih godišnjih stvarnih gubitaka vode (*CARL*, engl. „Current Annual Real Losses“) i neizbježnih godišnjih stvarnih gubitaka vode (*UARL*, engl. „Unavoidable Annual Real Losses“).

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (1)$$

*CARL* i *UARL* se izražavaju jedinično u l/(km·dan) u slučajevima gdje je broj priključaka manji od 20 po km cjevovoda ili u l/(priključak·dan) kada je broj priključaka po km cjevovoda veći od 20. Iz toga se zaključuje da je ILI parametar bezdimenzionalan.

*CARL* se definira kao:

$$CARL = \frac{Q_{RL} \cdot 10^3}{N_{dwspl}} \quad (2)$$

gdje je:

*CARL* - trenutni godišnji stvarni gubici vode

*Q<sub>RL</sub>* - godišnji stvarni gubici vode

*N<sub>dwspl</sub>* - dani kada je sustav pod tlakom

*CARL* vrijedi i u distribucijskim mrežama koje imaju isprekidanu isporuku vode samo je potrebno uzeti u obzir dane kad je sustav pod pritiskom.

*UARL* predstavljaju curenja vrlo malog intenziteta tzv. pozadinska curenja. Te je gubitke nemoguće potpuno izbjeći. *UARL* je opisan jednadžbom:

$$UARL = (18 \cdot L_N + 0,8 \cdot N_C + 25 \cdot L_P) \cdot P_A \quad (3)$$

gdje je:

*UARL* - Neizbježni godišnji stvarni gubici vode

*L<sub>N</sub>* - Dužina mreže (bez duljine kućnih priključaka)

*N<sub>C</sub>* - Broj priključaka na mrežu

*L<sub>P</sub>* - Dužina privatnih priključnih cijevi iza granice privatne parcele do vodomjera

*P<sub>A</sub>* - Prosječni radni tlak

ILI pokazatelj se može primijeniti ako sustav ispunjava sljedeće uvjete:

broj priključaka:  $N_C > 3000$

prosječni tlak:  $P_A > 25$  m

gustoća priključaka: bez donje / gornje granice [1]

Korištenje ILI pokazatelja se pokazuje kao uspješniji način prikazivanja gubitaka vode u sustavu nego klasični prikaz zahvaćene vode i ukupnog gubitka izraženog preko postotaka. Što je veća vrijednost ILI pokazatelja to je stanje u sustavu lošije te prikazuje lošije rješavanje problema vezanih uz gubitke vode. U tablici 2 prikazani su rasponi vrijednosti ILI pokazatelja za pojedine sustave i procjena stanja tih sustava u odnosu na ILI pokazatelj.

Tablica 2. procjena stanja vodoopskrbnih sustava u odnosu na ILI pokazatelj [3].

Zemlje u razvoju i nerazvijene zemlje	Razvijene zemlje	Opći opisi kategorija kontrole stvarnih gubitaka za razvijene zemlje i zemlje u razvoju
ILI raspon	ILI raspon	
manje od 4	manje od 2	Daljnje smanjenje gubitaka tlaka možda će biti ekonomski neopravdano, osim u slučaju nestašice vode; potrebna je precizna analiza da bi se utvrdila financijski najisplativija poboljšanja
4 do 8	2 do 4	Mogućnosti za navedena poboljšanja; razmisliti o kontroli curenja i boljem upravljanju i održavanju sustava
8 do 16	4 do 8	Slaba kontrola gubitaka; može se tolerirati jedino ako je voda jeftinija i ima je u izobilju; čak i u tom slučaju analizirati veličinu i prirodu gubitaka te povećati nastojanja za smanjenje gubitaka
16 ili više	8 ili više	Jako neučinkovita upotreba resursa, programi smanjenja gubitaka su neophodni i trebali bi biti prioriteta

Kako bi se ostvario jednostavniji uvid u stanje gubitaka vode u sustavu preporučuje se sustav podijeliti na izdvojene mjerne zone, tzv. DMA (engl. „Direct Memory Access“) zone. Podjelom sustava na manje prostorne jedinice dobiva se mogućnost praćenja stanja u pojedinim dijelovima sustava što znači da je moguće djelovati u onim dijelovima koji imaju najlošije ILI pokazatelje. No ILI pokazatelj nije jedina stavka koja je bitna za analizu vodnih gubitaka. Njegova kombinacija s ekonomskim analizama daje dobru sliku o stanju u sustavu.

#### 1.1.2.4 Indeks upravljanja tlakom (PMI)

PMI je pomoćni alat koji se koristi za procjenu opsega i potencijalne efikasnosti upravljanja tlakom, a opisan je odnosom tekućeg prosječnog tlaka i minimalnog prihvatljivog tlaka u sustavu ili pojedinoj DMA zoni. Minimalni prihvatljivi tlak ( $P_{min}$ ) ovisi o minimalnom standardu usluge u sustavu i varira od države do države, a obično je požarno opterećenje mjerodavno za određivanje  $P_{min}$  [1].

PMI se tako definira kao:

$$PMI = \frac{P_A}{P_{min} + P_{safety}} \quad (4)$$

gdje je:

$PMI$  - indeks upravljanja tlakom

$P_A$  - tekući prosječni tlak u zoni

$P_{min}$  - minimalni standard usluge (obično od 5 do 25 m)

$P_{safety}$  - sigurnosna margina (obično 3 – 5 m, omogućuje veću sigurnost pri izračunu)

### 1.1.3 Gubici vode u vodoopskrbnim sustavima - iskustva iz Republike Hrvatske

U Hrvatskoj je stanje gubitaka vode u cjevovodu u prosjeku oko 50%. Često se govori kako Hrvatska ima puno pitke vode te je svrstana u 30 zemalja koje su najbogatije pitkom vodom. Međutim, ta činjenica ne bi trebao biti razlog da gubitci vode u Hrvatskoj budu tako veliki jer će voda uskoro postati najvrjedniji resurs na svijetu. U 2005. godini gubici vode su iznosili približno 2.1 milijardu kuna. To znači oko 100 milijuna kuna godišnje po županiji. Na svjetskoj razini Svjetska banka daje preporuku da nenaplaćena voda treba biti na iznosu manjem od 25% sve vode koja ulazi u sustav. S druge strane, Europska unija ima puno strože kriterije i radi se o iznosu manje od 15% gubitaka vode.

Situaciju u vodoopskrbnom sustavu može se vidjeti na Slici 1, koja prikazuje vrijednost ILI pokazatelja za sustave u EU i u Hrvatskoj. Sa slike je vidljivo kako je stanje u Hrvatskoj jako loše (crvenom bojom je označena Hrvatska). Što je veća vrijednost ILI pokazatelja to znači da je stanje u vodoopskrbnom sustavu lošije.



Analiziranjem većeg broja sustava u Hrvatskoj pokazano je da je prosječan iznos III faktora oko 5,0. To ukazuje na činjenicu kako trenutno stanje upravljanja vodoopskrbnim sustavima u Hrvatskoj nije dobro i da postoji još puno prostora za napredak. Neki od načina za poboljšanje situacije u vodoopskrbnim sustavima slijede u nastavku.

Da bi se poboljšala situacija u vodoopskrbnim sustavima trebalo bi uvesti dodatne kontrole tlaka, češću kontrolu gubitaka vode te optimalnije upravljanje i održavanje sustava. Smatra se kako se postojeće stanje može tolerirati samo ako je voda jeftina i ima je u izobilju. Međutim, treba reći da se čak i u tom slučaju preporuča analiza veličine i prirode vodnih gubitaka te povećanje nastojanja za smanjenjem istih [3].

Kako bi se provelo poboljšanje situacije u vodoopskrbnom sustavu preporučuje se korištenje sredstava iz EU. Sredstva iz EU najbolje bi bilo iskoristiti za obnovu infrastrukture zato što su u Hrvatskoj elementi vodoopskrbnog sustava jako stari. Na početku obnove troškovi bi bili veliki, ali kasnije isplativi u prihvatljivom vremenu s obzirom na velike gubitke vode.

#### **1.1.4 Gubici vode u vodoopskrbnim sustavima - iskustva izvan Republike Hrvatske**

U većini Europskih zemalja postoje sheme za prikupljanje podataka vezanih za gubitke vode u vodoopskrbnim sustavima. Podatke prikuplja nacionalno tijelo ili agencija kao što je statistička agencija. U rijetkim slučajevima zadaću prikupljanja podataka preuzima nacionalna udruga ili komunalna služba. Gotovo uvijek postoji zakon ili propis koji zahtijeva prikupljanje podataka. Međutim, nije jasno koja je razina odgovora na ovaj zahtjev ili konzistentnost te točnost podataka zato što bi se ti podatci morali predati središnjim agencijama ili tijelima. Pokazano je da postoji samo nekoliko normi ili nacionalnih shema koje su uspostavljene za ravnotežu vode u mreži i proračuna propuštanja.

Do velikog nezadovoljstva dolazi zbog velike količine vode koja nije naplaćena. Izvještaj o velikoj količini vode koja nije naplaćena odnosno velikim gubitcima vode narušava ugled zemlje u međunarodnoj zajednici kao i rezultate održivog razvoja koje prati UN (engl. „United Nations“). Međunarodnim financijskim institucijama i MMF-u („Međunarodni monetarni fond“) od velike je važnosti da se prati učinkovito upravljanje vodom. Ovom temom Komisija se nije još detaljnije bavila, ali se očekuje da će sve više biti uključena ukoliko se pokaže da su nacionalni i lokalni podaci loši. Velika većina zemalja prijavljuje gubitke vode u m<sup>3</sup> ili kao postotak u odnosu na isporučenu/zahvaćenu vodu.

Nacionalni okvir za pravilan izračun vodne bilance još uvijek nije usklađen. Čak i ako postoji nacionalni okvir kompatibilnost između različitih sustava, on još nije poznat. Postoje velike razlike u vremenskim okvirima izračuna te potrebnoj razini pouzdanosti podataka i procjeni nesigurnosti. Diljem Europe i EU gubitci vode se razlikuju, te gubitci u vodoopskrbnim sustavima variraju od manje od 5% do preko 50% zahvaćene vode.

Čimbenici koji objašnjavaju ovakve rezultate su starost i održavanje sustava, duljina mreže, broj priključaka, lokalna topografija, različiti nacionalni sustavi. Uz sve to rezultati još ovise i o tlu i klimatskim uvjetima, cijeni vode na mjestu zahvata i potrošnji te strategijama kojima se kontrolira curenje i način na koji se voda cijeni od strane društva. Najčešća praksa koja se koristi za smanjenje curenja je pristup „Pronađi i popravi na temelju pritužbi kupaca“.

Drugi pristupi koji se koristi su programi za otkrivanje i popravljavanje curenja, razvoj oblasnog područja mjerenja (DMA) kao način za što točnije mjerenje i upravljanje curenjima. Mnogi vodovodi diljem Europe koriste optimalno upravljanje tlakom u DMA zonama i curenje koje je identificirao kupac te sheme besplatnih popravaka. Kada je vodovodna mreža jako stara, loše projektirana i ne zadovoljava potrebe protočne opskrbe tada se dijelovi mreže potpuno obnavljaju.

Postoji još metoda potonja, ali ta metoda je jako skupa i ne koristi se često zbog financijskih ograničenja. Osim navedenih metoda tu su još i programi za smanjenje curenja koji su za sad dobro uspostavljeni u većini članica. Ti programi su dosta skupi i zahtijevaju specijalizirane radnike vanjskih izvođača te suradnju ključnog osoblja u vodnom poduzeću.

## 1.2 Količina zahvaćene i isporučene vode

U nastavku se navode strateške odrednice javne vodoopskrbe preuzete od višegodišnjeg programa gradnje komunalnih vodnih građevina [6]:

*- Povećanje stupnja opskrbljenosti stanovništva zdravstveno ispravnom vodom iz javnih vodoopskrbnih sustava ili putem mobilne isporuke. Postojeća razina priključenosti stanovništva na javne vodoopskrbne sustave povećat će se na 85% - 90%. Na područjima s visokom opskrbljenošću izgrađeni će se sustavi proširiti prema perifernim dijelovima urbanih područja. Tim proširenjem rubna naselja će se priključiti u postojeće javne vodoopskrbne sustave. Na taj način dio stanovništva koji se sada koristi lokalnim vodovodima i individualnim načinom vodoopskrbe (bunari, cisterne, čatrnje i slično) postupno će se uključivati u sustave javne vodoopskrbe, čime će se uspostaviti nadzor nad kakvoćom isporučene vode i sanitarnom sigurnosti korisnika te nadzor nad naplatom korištenja vodnih resursa. Posebna pozornost posvetit će se racionalnijem korištenju voda na otocima. Posebnim propisima uredit će se mehanizmi za obvezno uključivanje stanovništva u sustave javne vodoopskrbe [6].*

*- Unaprjeđenje upravljanja javnim vodoopskrbnim sustavima postići će se: (i) određivanjem distribucijskih područja. Distribucijska područja će se odrediti kao tehnološko-ekonomske cjeline. Nakon što se odredilo distribucijsko područje na svakom tom području osnovat će se po jedno komunalno društvo i propisat će se jedinstvena cijena vode. Doći će do reorganizacija i optimalizacija (okrupnjavanje) komunalnih društava što će rezultirati znatno manjim brojem društava u usporedbi s trenutačnim stanjem, (ii) povezivanjem vodoopskrbnih sustava - regionalni sustavi. Unaprjeđenje učinkovitosti postojećih vodoopskrbnih sustava postići će se njihovim uključivanjima u regionalne sustave s mogućnošću dopreme vode iz više smjerova (slivova) [6].*

*- Ekonomska cijena vode. Uvođenje ekonomske cijene vode, uz poštivanje temeljnog načela "potrošač plaća", bit će postupno do 2015. godine. Ono će se provesti tehnološkom integracijom sustava i uspostavom distribucijskih područja s jedinstvenom cijenom vode. Korekcije cijene vode omogućit će povećanje sigurnosti javne vodoopskrbe, izgradnju i pogon uređaja za kondicioniranje vode prema europskim standardima te pojačani nadzor nad kakvoćom isporučene vode i razinom usluge. Također, postupnim uvođenjem ekonomske cijene vode očekuje se i racionalizacija potrošnje [6].*

*- Smanjenje gubitaka vode iz javnih vodoopskrbnih sustava. Smanjenje gubitaka vode iz javnih vodoopskrbnih sustava na prihvatljive vrijednosti (15 - 20 %) po uzoru na razvijene europske zemlje trajna je zadaća vodno-komunalnog gospodarstva. Time će se dobiti znatne dodatne količine vode i smanjit će se potrebe za novim količinama i izvorištima vode, odnosno utjecat će se na racionalnost korištenja vodnih resursa. Isto tako, racionalizirat će se i količine prerađene vode, koje zbog sadašnjih gubitaka vode samo dijelom dolaze do potrošača [6].*



*- Zadovoljenje potreba za vodom. Na buduće povećanje potrebe za vodom u javnim vodoopskrbnim sustavima utjecat će: (i) povećanje stupnja opskrbljenosti stanovništva, (ii) razvojne potrebe u industriji i turizmu; na smanjenje potreba utjecat će: (iii) saniranje gubitaka vode i (iv) racionalizacija potrošnje uslijed uvođenja ekonomske cijene vode.*

*- Povećanje sigurnosti zahvata vode za javnu vodoopskrbu. U javnim vodoopskrbnim sustavima povećat će se sigurnost vodoopskrbe i to prioritetno na sustavima: (i) za koje je karakteristična velika ranjivost vodonosnika, odnosno trajna mogućnost onečišćenja zbog antropogenih utjecaja i/ili relativno male debljine pokrovnoga sloja vodonosnika, (ii) sa zahvatima koji nemaju zadovoljavajuću prirodnu kakvoću podzemne vode, (iii) sa zahvatima površinskih voda koji zbog otvorenosti imaju manju sigurnost na zahvatu (posebno u urbanim područjima) ili koji zahvaćaju vodu iz građevina hidroelektrana, (iv) koji koriste samo jedno izvoriste (nužna je alternativna opskrba vodom), (v) koji imaju dio priljevnog područja izvan Republike Hrvatske [6].*

Svako smanjenje zahvaćanja vode ima pozitivan efekt s ciljem postizanja zaštite vode. To se posebno odnosi na smanjivanje gubitaka vode iz javnih vodovodnih mreža koji iznose oko 50% ukupno zahvaćene vode. Na godišnjoj razini (prema podacima za 2019.), većinom iz tijela podzemnih voda, za javnu vodoopskrbu se zahvati oko 477 milijuna m<sup>3</sup> vode, dok se krajnjim korisnicima isporuči samo oko 240 milijuna m<sup>3</sup> vode [6].

Najveći problem na količinsko stanje podzemnih voda u odnosu na zahvate drugih namjena predstavlja voda za javnu vodoopskrbu (tehnološka voda oko 19 milijuna m<sup>3</sup>). Ako se smanji gubitak iz javnih vodoopskrbnih sustava može se postići značajni pomak prema očuvanju i stanju vodnih tijela, a naročito podzemnih voda. Investiranje u provedbu mjera smanjenja gubitaka vode distribucijskih dijelova vodoopskrbnih sustava posljedično utječe na povećanje efikasnosti korištenja vode. Time se s jedne strane smanjuje negativan utjecaj zahvaćanja voda te se postiže zaštita voda kao jedan od temeljnih ciljeva. Bitno je za istaknuti kako provedba ovih mjera nema negativnih utjecaja na standard isporuke vode potrošačima.

Uredba o izmjenama i dopunama Uredbe o visini naknade za korištenje voda (Narodne novine, br. 32/20) donesena je iz razloga da javni isporučitelji vodnih usluga što racionalnije koriste vodu koja je zahvaćena u javnoj vodoopskrbi te kako bi se što učinkovitije upravljalo sustavima javne vodoopskrbe donesen je višegodišnji program gradnje komunalnih vodnih građevina [6].

Člankom 4. te uredbe rečeno je da se naknada za korištenje voda naplaćuje na isporučenoj količine vode do 30. prosinca 2022. godine. Time je dana mogućnost isporučiteljima vodnih usluga da do kraja 2022. godine osnovica za naplatu bude količina zahvaćene vode. Ova direktiva stupa na snagu 1. siječnja 2023. godine. Od te naknade koja je javno davanje, Hrvatske vode će pokriti troškove resursa i zaštite okoliša (čl. 28. Zakona o financiranju vodnoga gospodarstva). Direktive o vodama pozivaju članice da uzmu „u obzir načelo

povrata troškova od vodnih usluga, uključujući i troškove zaštite okoliša i resursa“, te će države članica osigurati „da politika cijena vode predstavlja odgovarajući poticaj korisnicima da koriste vodne resurse učinkovito i da time doprinesu ostvarenju ciljeva ove Direktive [6].

Prvi korak za uspostavu učinkovitog korištenja voda je mjerenje zahvaćenih i isporučenih količina vode. Treba napomenuti da je mjerenje isporučene količine vode u Hrvatskoj uspostavljeno već nekoliko godina, dok je mjerenje zahvaćene vode na vodozahvatima i izvorištima javne opskrbe nepostojeće ili nefunkcionalno i treba ga uspostaviti zbog kontrole provođenja mjera koje će smanjiti gubitke. Ovaj će se projekt realizirati prema Akcijskom planu ugradnje, upravljanja i održavanja mjernih uređaja na vodozahvatima vodoopskrbe [6].

Projekt će se realizirati prema Akcijskom planu ugradnje, upravljanja i održavanja mjernih uređaja na vodozahvatima javne vodoopskrbe, te evidentiranja, prikupljanja, obrade i kontrole podataka o zahvaćenim količinama vode koje je donijelo Upravno vijeće Hrvatskih voda 16. prosinca 2020. godine, kao plan za provedbu obveze iz članka 25.a Zakona o financiranju vodnoga gospodarstva [6].

## 2 MODELIRANJE VODOOPSKRBNOG SUSTAVA U PROGRAMU EPANET

### 2.1 Općenito o Epanetu.

EPANET je računalni program koji izvodi dugotrajnu simulaciju toka i kvalitete vode unutar mreža cijevi pod tlakom. Mreža se sastoji od cijevi, čvorova (cijevnih spojeva), pumpi, ventila i skladišnih spremnika ili rezervoara. EPANET prati protok vode u svakoj cijevi, tlak na svakom čvoru, visinu vode u svakom spremniku i koncentraciju kemijske tvari u cijeloj mreži tijekom vremenske domene simulacije. Osim kemijskih tvari, također se može simulirati starost vode i praćenje izvora.

EPANET je dizajniran da bude istraživački alat za poboljšanje razumijevanja kretanja pitke vode unutar distribucijskih sustava. Može se koristiti za mnoge različite vrste aplikacija u analizi distribucijskih sustava. Dizajn programa uzorkovanja, kalibracija hidrauličkog modela, analiza rezidualnog klora i procjena izloženosti potrošača samo su neki od primjera. EPANET može pomoći u procjeni alternativnih strategija upravljanja za poboljšanje kvalitete vode u cijelom sustavu. To može uključivati:

- a) mijenjanje korištenja izvora unutar sustava s više izvora,
- b) promjena rasporeda pumpanja i punjenja/pražnjenja spremnika,
- c) korištenje satelitske obrade, kao što je ponovno kloriranje u spremnicima za skladištenje i
- d) ciljano čišćenje i zamjena cijevi.

Radeći pod sustavom Windows, EPANET pruža integrirano okruženje za uređivanje mrežnih ulaznih podataka, pokretanje hidrauličkih simulacija i simulacija kvalitete vode te pregled rezultata u različitim formatima. To uključuje mrežne karte označene bojama, podatkovne tablice, grafikone vremenskih nizova i konturne crteže.

### 2.2 Mogućnosti hidrauličkog modeliranja

Potpuno opremljeno i precizno hidrauličko modeliranje preduvjet je za učinkovito modeliranje kvalitete vode. EPANET sadrži najsuvremeniji mehanizam za hidrauličku analizu koji uključuje sljedeće mogućnosti:

- a) ne postavlja ograničenja na veličinu mreže koja se može analizirati,
- b) izračunava gubitak glave od trenja koristeći formule Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ili Chezy-Manning,
- c) uključuje manje gubitke za zavoje, spojeve itd.,
- d) modeli pumpi konstantne ili promjenjive brzine,
- e) izračunava energiju i cijenu pumpanja,
- f) modelira različite vrste ventila uključujući ventile za zatvaranje, povratne ventile, ventile za regulaciju tlaka i ventile za kontrolu protoka,
- g) omogućuje da spremnici imaju bilo koji oblik (tj. promjer može varirati s visinom),
- h) razmatra višestruke kategorije potražnje u čvorovima, svaka sa svojim vlastitim obrascem vremenske varijacije,

- i) modeli protoka vođenog tlakom koji izlazi iz emitera (glave prskalica)
- j) modelira potražnju vođenu pritiskom u čvorovima
- k) može bazirati rad sustava na jednostavnim kontrolama razine spremnika ili mjerača vremena i na složenim kontrolama temeljenim na pravilima i
- l) mogućnosti modeliranja kvalitete vode.

Uz hidrauličko modeliranje, EPANET pruža sljedeće mogućnosti modeliranja kvalitete vode:

- a) modelira kretanje nereaktivnog materijala za praćenje kroz mrežu tijekom vremena,
- b) modelira kretanje reaktivnog materijala dok raste (npr. nusprodukt dezinfekcije) ili se raspada (npr. ostatak klora) u vremenu,
- c) modelira starost vode kroz mrežu,
- d) prati postotak protoka od određenog čvora koji doseže sve ostale čvorove tijekom vremena,
- e) modelira reakcije u protoku i na stijenci cijevi,
- f) koristi kinetiku n-tog reda za modeliranje reakcija u protoku mase,
- g) koristi kinetiku nultog ili prvog reda za modeliranje reakcija na stijenci cijevi,
- h) uzima u obzir ograničenja prijenosa mase pri modeliranju reakcija stijenske cijevi,
- i) omogućuje odvijanje reakcija rasta ili propadanja do granične koncentracije,
- j) koristi globalne koeficijente brzine reakcije koji se mogu mijenjati od cijevi do cijevi,
- k) omogućuje korelaciju koeficijenata brzine reakcije stijenske s hrapavosti cijevi,
- l) omogućuje vremenski promjenjive koncentracije ili masovne ulaze na bilo kojem mjestu u mreži i
- m) modelira skladišne spremnike kao reaktore s potpunom mješavinom, reaktorima s protokom ili s dva odjeljka.

Koristeći ove značajke, EPANET može proučavati fenomene kvalitete vode kao što su:

- a) miješanje vode iz različitih izvora,
- b) starost vode u sustavu,
- c) gubitak ostataka klora,
- d) rast nusproizvoda dezinfekcije i
- e) praćenje događaja širenja zagađivača.

## **2.3 Primjena Epaneta za potrebe diplomskog rada.**

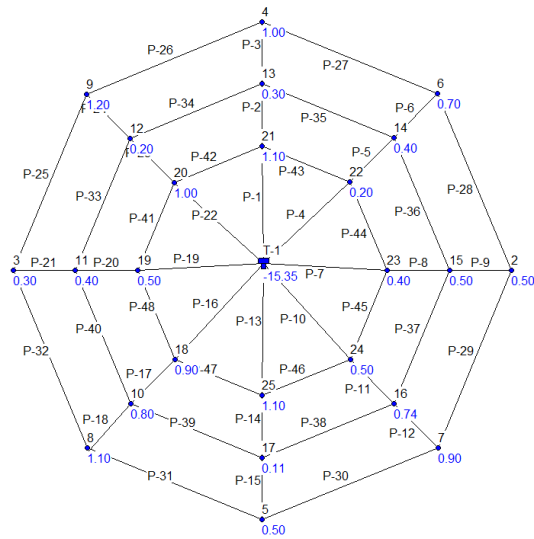
Za potrebe ovog diplomskog rada korišten je program Epanet. Pomoću programa Epanet dobiven je izračun tlakova za zadanu potrošnju. Tlakovi koji su se dobili mogu biti sa gubitcima i bez gubitaka.

### **2.3.1 Projektirano stanje tlakova**

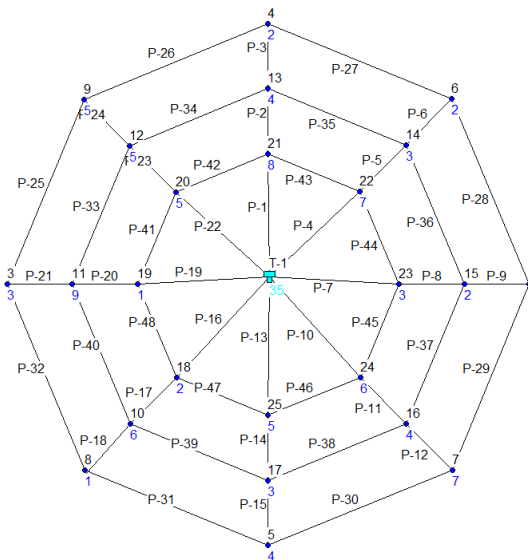
Za ovaj diplomski rad u programu Epanet crtale su se dvije fiktivne vodoopskrbne mreže. Svaka vodoopskrbna mreža se sastoji od vodospreme u kojoj se pohranjuje voda, cijevi kojima voda teče do krajnjih korisnika te čvorova ili račvi u kojima se cijevi sječu.

Za dobivanje projektiranih tlakova prije svega potrebno je prikupiti podatke o protocima u čvorovima mreže, geometrijske podatke o cijevima kao što su duljina cijevi, promjer cijevi, materijal cijevi, trenje, pad nivelete, visinska kota vodospreme i slično. Što je više podataka dostupno to će rezultati projektiranih tlakova biti točniji.

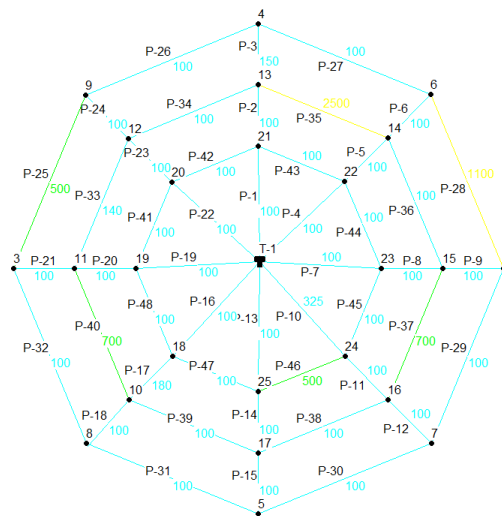
Podatci koji se koriste za određivanje projektiranih tlakova su idealni tj. ti podaci nemaju u sebi uključene gubitke koji se mogu javljati zbog ne ispravnosti cijevi, propuštanja vode na spojevima, nelegalnog korištenja vode i slično. Nakon što se prikupe podaci potrebno je tu vodoopskrbnu mrežu izmodelirati u programu Epanet. Mrežom se modelira izvedena situacija.



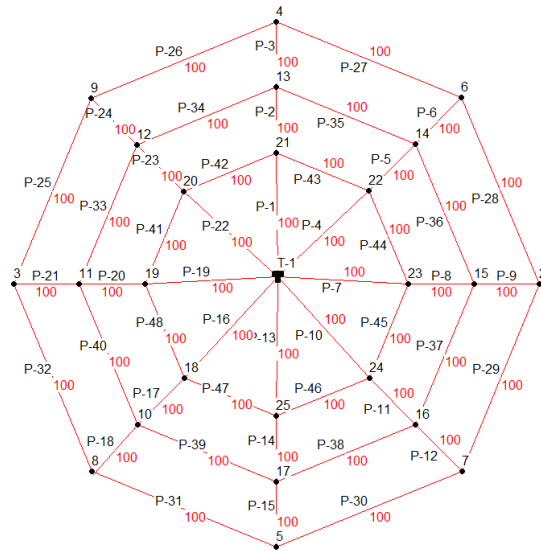
Slika 4. zadane potrošnje u čvorovima.



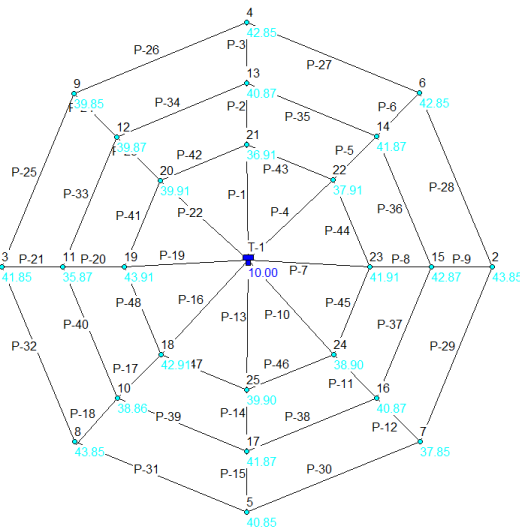
Slika 5. zadane visinske kote u čvorovima.



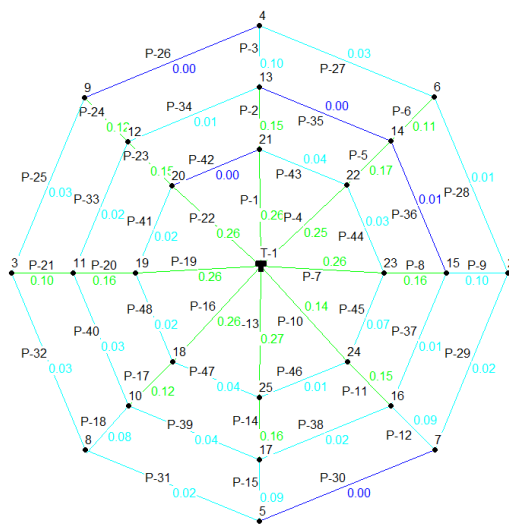
Slika 6. vrijednost zadanih duljina cijevi.



Slika 7. vrijednost zadanih promjera cijevi.



Slika 8. vrijednost tlakova u čvorovima.



Slika 9. vrijednost brzine vode u vezama.

Na pripremljenom modelu vodoopskrbne mreže u Epanetu potrebno je ubaciti potrošnju vode u čvorovima vodoopskrbne mreže i potom pokrenuti proračun tlakova. Program Epanet generira tlakove za svaki čvor u mreži, te u ovom slučaju tlakovi neće uključivati gubitke već samo potrošnju vode krajnjih korisnika. Ovakvi podaci nazivaju se očekivani tlakovi.

### **2.3.2 Izmjereno stanje tlakova**

Terenska mjerenja tlaka provode se s ciljem prikupljanja podataka o stvarnim tlakovima na terenu. Stvarni tlakovi razlikuju se od projektiranih iz razloga što na vodoopskrbnoj mreži na terenu postoje gubici vode koji nisu projektirani. Zbog gubitaka vode dolazi do promjene protoka, samim time i do promjene tlakova.

Terenska mjerenja provode se koristeći se različite vrste manometra. Postoje digitalni i analogni manometri. Kod digitalnim manometra (Slika 10) moguće ih je programirati da mjere tlak u zahtijevanom vremenskom intervalu. Kod takvih manometara dobivamo kontinuirane podatke kroz neko određeno vrijeme bez potrebe prisustva operatera. Digitalni manometri mogu biti energetske neovisni ili ovisni ovisi za koju svrhu ga koristimo.

Kod analognih manometara (Slika 11) potreban je operater koji će zabilježiti svaki izmjereni tlak. Oni se obično koriste za mjerenje tlaka u trenutku. Koriste se najčešće na terenu.





*Slika 10. digitalni manometar.*



*Slika 11. analogni manometar.*

Kako bi se tlakovi izmjerili na terenu, potrebno je na raspolaganju imati barem tri uređaja za mjerenje tlakova, istih specifikacija. Tri uređaja za mjerenje tlakova moraju istovremeno prikupljati podatke o tlakovima. Ovisno o potrebama, tlakovi mogu biti mjereni svake sekunde, svake minute ili svakog sata. Važno je da se podaci mjere sa barem tri mjerna uređaja, iz razloga što su podaci o tlakovima na tri lokacije minimalan uvjet za dobivanje nagiba plohe tlaka. Ukoliko bi se koristila dva mjerna uređaja, ne bi bilo moguće odrediti nagib plohe tlaka, stoga bi konačni rezultati imali manju uspješnost.

Prije korištenja, potrebno je utvrditi ispravnost uređaja i kalibrirati ih. Također, potrebno je prethodno izabrati lokacije na kojima će mjerna mjesta biti postavljena. Optimalno je postaviti mjerna mjesta na lokacijama na kojima se predviđaju velike oscilacije u protocima. Primjerice, to mogu biti tvornice ili ustanove koje rade u određenom radnom vremenu u kojemu će potrošnja vode biti znatno veća nego što će biti noću.

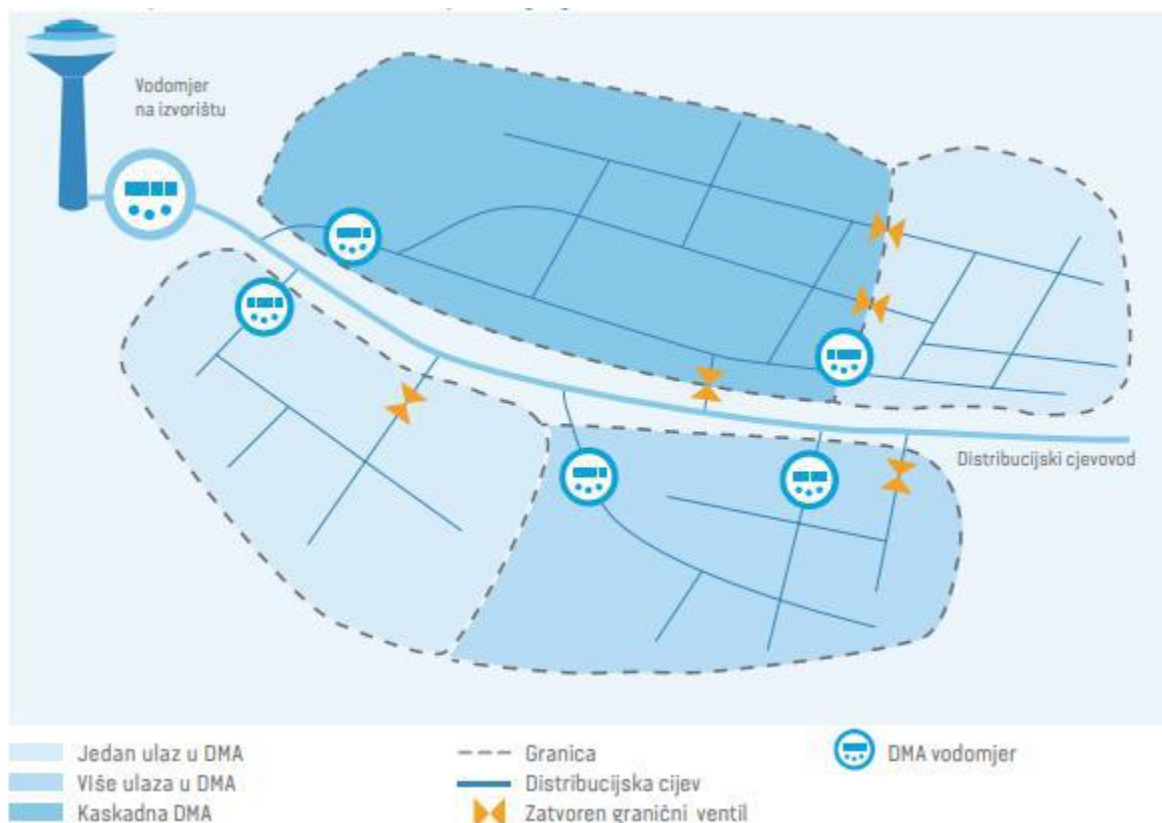
Nakon što su odabrane lokacije za postavljanje uređaja za mjerenje tlakova i nakon što se utvrdila njihova ispravnost, moguće je započeti mjerenje. Kako bi mjerenje bilo što efikasnije, idealno je mjeriti tlakove kroz određeni vremenski period. Ovisno o mogućnostima, period može biti 24 h, pa čak i do nekoliko dana neprestanog mjerenja tlakova.

Nakon što su tlakovi na terenu izmjereni, potrebno je za svaki čvor u kojemu su mjereni tlakovi izračunati srednju vrijednost. Ta se srednja vrijednost potom koristi za generiranje stvarnog stanja tlakova.

Nakon pripremljenih podataka o projektiranom i stvarnom stanju, potrebno ih je međusobno komparirati. Oni se mogu komparirati uz pomoć raznih metoda, a za potrebe ovog diplomskog rada koristiti će se komparacija PSO metodom koja će kasnije u ovom radu biti objašnjena.

### 3 DMA ZONE

Kako bi se lakše pratili gubitci vode u vodoopskrbnom sustavu sustav bi se trebao podijeliti na manje dijelove. Ti dijelovi se zovu DMA zone. DMA zona se formira zatvaranjem graničnih ventila ili trajnim odvajanjem cijevi od susjednih područja. Svrha DMA zona je ta da se lakše otkriti neki gubitak u jednom manjem području nego u cijelom sustavu, te je takav gubitak odmah lakše i sanirati. Na ulazu u DMA zonu prate se protoci i tako se određuje moguće pojavljivanje gubitaka vode u cjevovodu. DMA zone se mogu podijeliti u tri skupine: DMA s jednim ulazom, DMA s više ulaza i kaskadna DMA.



Slika 12. struktura DMA zona.

DMA zone se može unaprijediti tako da se stavi uređaj za upravljanje tlakom (PMA). Na svim ulaznim točkama u zonu stavlja se ventil za smanjenje pritiska (PRV) jer se tim ventilima može smanjiti tlak i tako se utječe na smanjenje gubitaka vode u cjevovodu (ako imamo oštećene cijevi). Također, stavljanjem ventila smanjuje se i pucanje novih cijevi. Pri podjeli sustava u DMA zone treba uzeti u obzir hidraulične, ekonomske i praktične faktore. Troškovi održavanja i instalacija su veći kada je sustav podijeljen na više manjih zona, ali je prednost kod DMA ta da kada nastupi curenje vode ili nekakvog kvara u sustavu moguće je puno brže sanirati i otkloniti taj problem. Preporuka IWA je da u urbanim područjima DMA ima između 500 i 3000 priključaka i da je dužina distributivnih cijevi od 4 do maksimalno 30km [1].

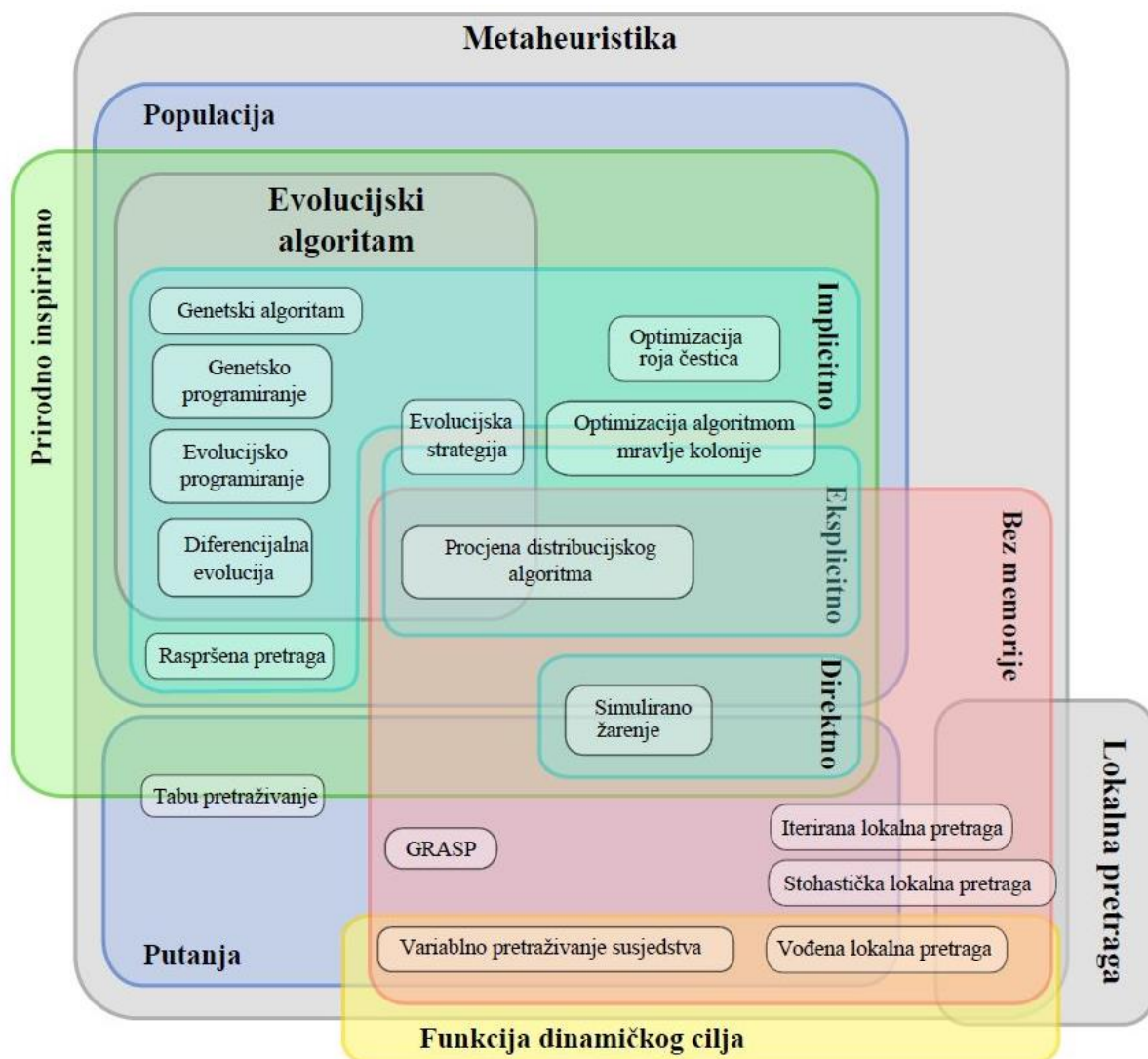
## 4 PSO OPTIMIZACIJSKA METODA

Optimizacija se definira kao proces pronalaska najpogodnijeg rješenja određenog problema. Za pronalazak najpogodnijeg rješenja određenog problema koriste se algoritmi optimizacije. Pretražujući određeni prostor rješenja, algoritmi optimizacije pronalaze optimalno rješenje. Probleme koji se optimiziraju dijelimo na ograničene i neograničene.

Ograničeni problemi imaju određeno ograničenje unutar domene. Ukoliko rješenje dobiveno optimizacijom krši jedno od ograničenje unutar domene ono se smatra nevažecim. S druge strane, neograničeni problemi nemaju ograničenja unutar domene problema. Rješenja problema mogu biti iz cijelog područja domene.

Važno je istaknuti da optimum nekog problema može biti maksimum ili minimum što se odnosi na funkciju cilja koja je objašnjena u sljedećem pod poglavlju.

Algoritam optimizacije rojem čestica (engl. Particle swarm optimization) opisuje se kao „matahuerstički stohastički evolucijski algoritam“.



Slika 13. dijagram klasifikacije različitih vrsta metaheuristike.

Heuristički algoritmi nastali su eksperimentiranjem u svrhu dobivanja zadovoljavajućeg rješenja. Podrijetlo riječi heuristika proizlazi od grčke riječi *heurisko* što znači "pronašao sam".

Jedno od važnih svojstava ovih algoritama je njihovo približno rješavanje problema eksponencijalne i faktorijalne složenosti. Važno je istaknuti da rješavanje problema uz pomoć ovog algoritma ne dovodi uvijek do zadovoljavajućeg rješenja. Za određene probleme heuristički algoritmi pokazuju relativno loše rezultate, pogotovo za probleme kod kojih postoje egzaktni algoritmi polinomske složenosti.

Heuristički algoritmi nisu jednoznačno određeni. Određeni dijelovi heurističkih algoritama mogu se razlikovati ovisno o situaciji u kojoj se koriste. Ti su dijelovi većinom funkcije cilja (transformacije). Njihovo definiranje ima značajan utjecaj na efikasnost algoritma [11].

Matematički objekt koji se definira kao skup slučajnih varijabli naziva se stohastički ili slučajni proces. Stohastički procesi koriste se kao matematički modeli sustava i pojava koji pokazuju varijacije na slučajan način. U velikoj mjeri su korišteni u teoriji vjerojatnosti i srodnim područjima,

Algoritam nazivamo evolucijskim iz razloga što jedinke poboljšavaju svoje rješenje kroz vrijeme. U algoritmu se te jedinke nazivaju čestice. U suprotnosti s većinom evolucijskih algoritama, stare čestice se ne brišu a nove čestice ne stvaraju.

Inteligencija roja (engl. Swarm intelligence) je prvi opisani algoritam optimizacije. Nastao je 1995. godine. Inspiriran kretanjem jata ptica.

Dr. Eberhart i Dr. Kennedy razvili su stohastičku optimizacijsku tehniku pod nazivom Particle swarm optimization (PSO) ili optimizacija roja čestica. Iako je opisana 1995. godine predstavlja relativno nov pristup u rješavanju problema. Inspiraciju su pronašli promatrajući ponašanje i kretanje skupine ptica i riba u jatu. U početku su kreirali simulaciju pojednostavljenih životinjskih socijalnih sustava s ciljem simuliranja kretanja jata riba i ptica. Utvrđeno je da model kretanja životinja u jatu može biti korišten kao optimizirajuća tehnika.

PSO se sastoji od mnogih sličnosti sa evolucijskim optimizacijskim tehnikama. Jedna od njih su genetski algoritmi (GA). Sustav počinje populacijom nasumičnih rješenja tražeći optimum obnavljanjem generacija. Za razliku od GA, PSO ne sadrži evolucijske operatore poput križanja i mutacije.

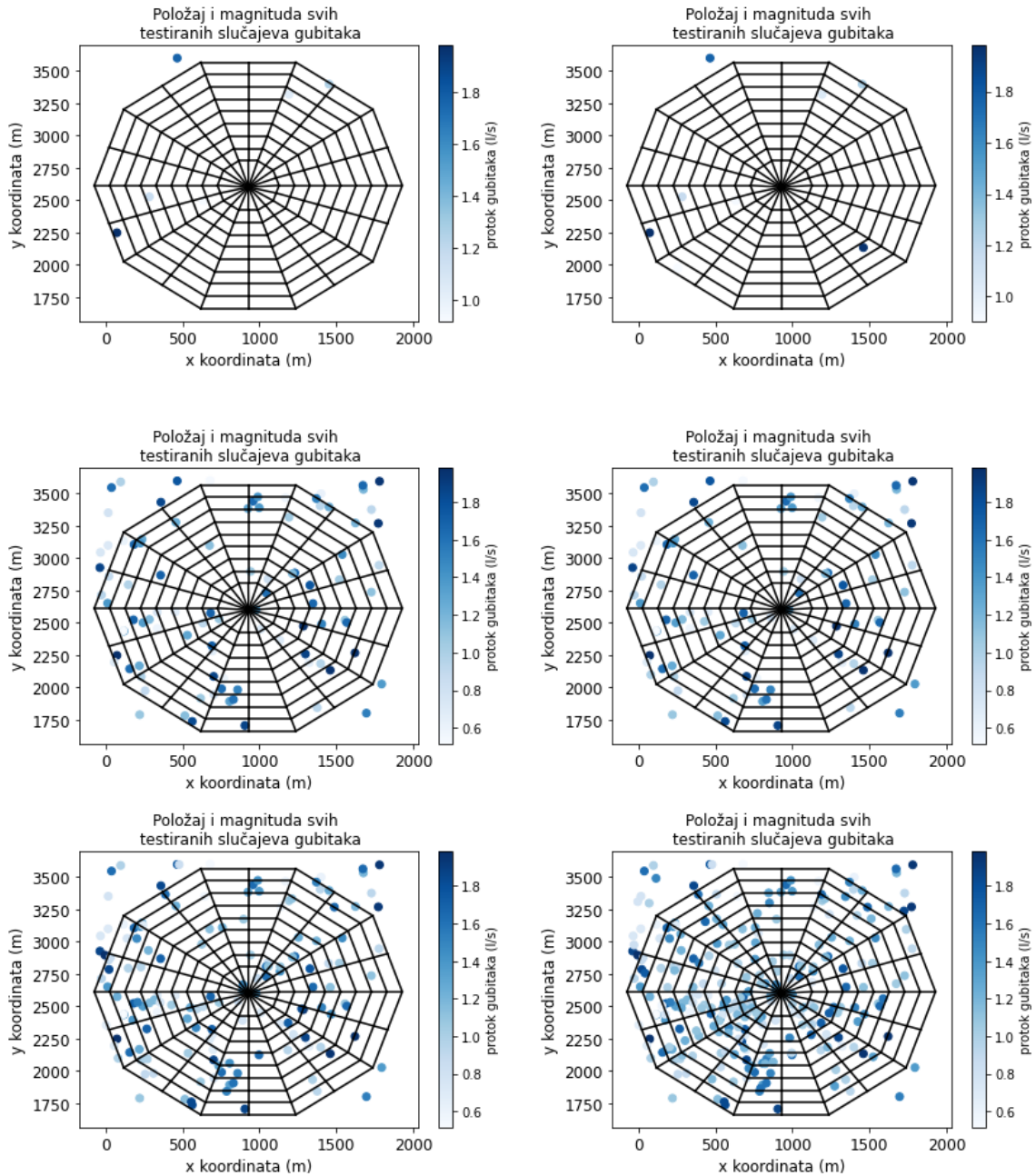
U PSO moguća rješenja nazivamo čestice. Za razliku od GA, PSO sadrži manje parametara koji se podešavaju i njegova primjena je lakša. Uspješno se koristi u raznim područjima poput: učenja umjetnih neuronskih mreža, upravljanje neizrazitih sustava i ostala područja u kojima GA nije primjenjiv.

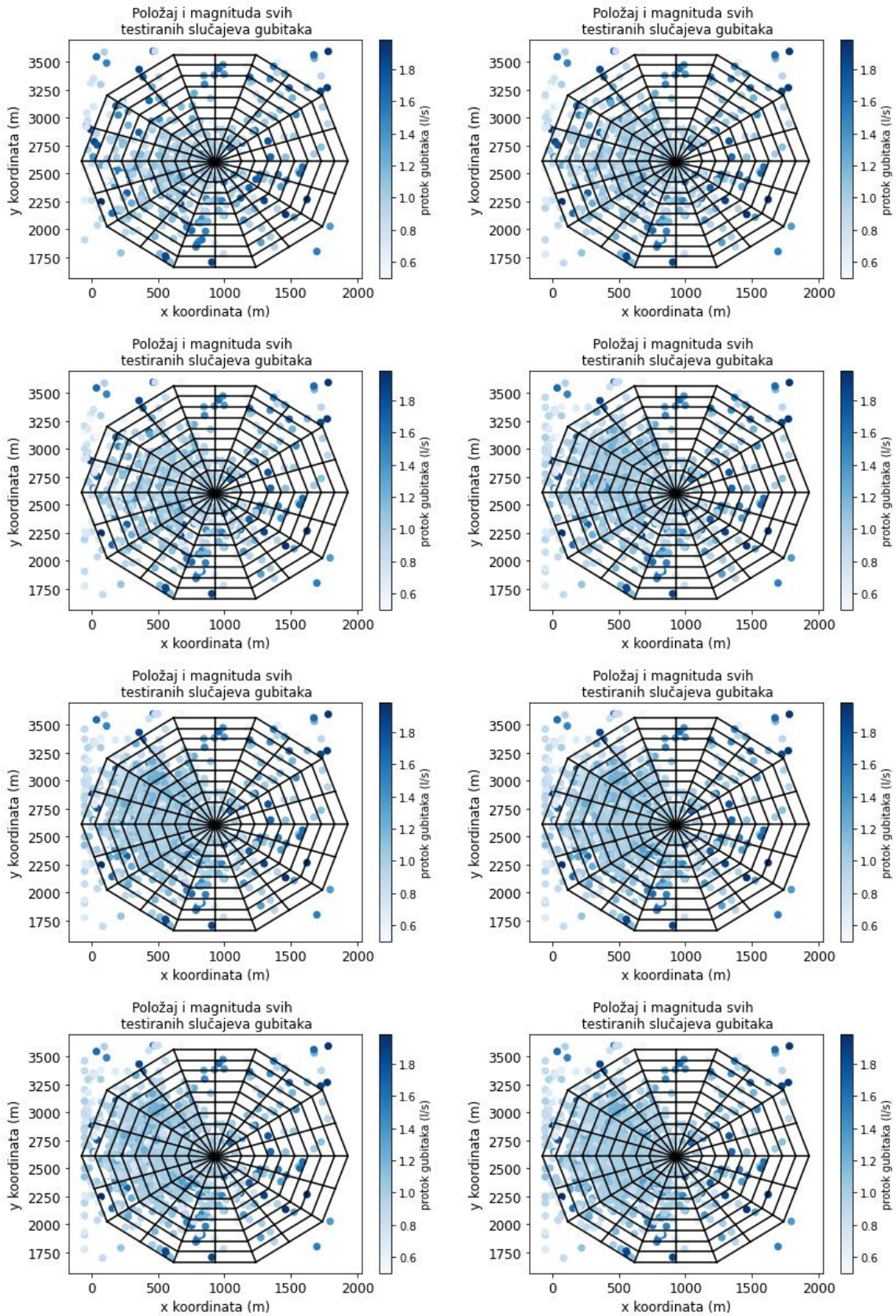
Pretpostavimo da smo definirali okruženje u kojem je grupa ptica u nasumičnoj potrazi za hranom u određenom području. U tom se području nalazi samo jedan komad hrane. Iako ptice ne znaju lokaciju hrane, svakim pokušajem otkrivaju svoju udaljenost od hrane. Posljedično tome učinkovita je ona strategija u kojoj se slijedi ptica koja je najbliža hrani.

PSO koristi takvo okruženje za rješavanje optimizacijskih problema. Svako rješenje je "ptica" u prostoru pretraživanja i nazivamo ga čestica. Sve čestice sadržavaju vrijednosti brzine i dobrote putem kojih se upravlja let čestica nad prostorom rješenja. PSO putem grupe nasumičnih čestica(rješenja) traži optimum obnavljanjem generacija. Tijekom svake iteracije čestice su obnovljene prema dvjema najboljim vrijednostima. Te vrijednosti nazivamo globalno najbolja vrijednost i lokalno najbolja vrijednost. Nakon što je došlo do pronalaska dvaju najboljih vrijednosti čestica poboljšava svoju brzinu i položaj [9].

Kako bi ovaj model bio vjerno prikazan potrebno je svakoj čestici pridružiti vektor brzine i vektor položaja. Kako bi problem bio efikasno riješen ponekad su potrebne veće dimenzije prostora. Važno je istaknuti da svaka čestica pamti svoje najbolje i globalno najbolje rješenje (najbolje rješenje svih čestica). U velikoj mjeri dolazi do situacije da se umjesto globalno najboljeg rješenja, pamti najbolje rješenje susjedne okoline. Iz tog se razloga u roju odrede međusobni susjedi kako bi svaka čestica pamtila najbolje rješenje iz susjedstva. Time se smanjuje vjerojatnost upadanja u lokalni optimum, ali je konvergencija sporija. Globalno najbolje rješenje je poseban slučaj najboljeg rješenja iz susjedstva u kojoj su sve čestice međusobno susjedi [11].

Na Slici 14 prikazano je kako metoda pretražuje prostor. Metoda u ovom primjeru konvergira u položaju gubitaka i magnitudi što se prepoznaje gustoćom točaka i istom bojom koja označava magnitudu gubitaka.





Slika 14. primjer pretrage PSO metode.



## 4.1 Funkcija cilja

Optimizacijski problemi svode se na to da se minimalizira funkcija cilja.

$$G(\mathbf{x}) = \sum_i (\hat{y} - y(\mathbf{x}))^2 \quad (5)$$

gdje je:

$\hat{y}(t_n)$  – zadani tj. priželjkivani odziv proces u trenutku  $t_n$   
 $y(x, t_n)$  – ostvareno tj. modelirani odziv sustava u istom trenutku  $t_n$  za zadane parametre sustava koji su grupirani u vektoru  $\mathbf{x}$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{d_n} \end{pmatrix} \quad (6)$$

koji sadrži komponentu  $d_n$  koja označava broj dizajna varijabli koje će se u optimizacijskom procesu mijenjati. Njen iznos se kreće u rasponu od  $x_{min}$  do  $x_{max}$  te ovisi o prostoru koji se pretražuje. Kako bi se funkcija cilja minimalizirala moraju se odrediti parametri modela  $x_i$  (gdje nam je  $i = 1 \dots d_n$ ) kod kojih je razlika između željenog i dobivenog odziva najmanja, dok je u cilju dobiti da je uopće nema [7].

Vrijednost funkcije cilja  $G(x_i)$  nije unaprijed poznata tj. njen analitički oblik je nepoznanica. To znači da se mogu odrediti samo njene diskretne vrijednosti za odabrane parametre modela  $x_i$ . Ukoliko se želi optimizirati proces to znači da je potrebno naći parametar  $x_i$  u kojima funkcija  $G(x_i)$  ima minimalnu vrijednost.

Funkcija cilja se može rekonstruirati samo diskretno u koordinatama  $x_i$  s parametrima kojima je definiran model. U tom slučaju mora se raspolagati računalnim modelom procesa. Za zadane parametre  $x_i$  mogu se ispitati odstupanja od željenog rezultata odnosno vrijednosti funkcije cilja.

Kada se simpleks algoritmom dođe do optimalnog rješenja – funkcija cilja više ne može naći bolje rješenje, to rješenje ne mora biti jedinstveno, već može biti više optimalnih rješenja. Kod ovakvih algoritama može se javiti slučaj multipliciranog optimalnog rješenja što znači da postoji više optimalnih programa koji imaju istu vrijednost zadane funkcije cilja [8].

Ovakav slučaj može se prepoznati po tome što će ne bazične varijable, odnosno varijable koje nisu ušle u rješenje ni jednog od programa, poprimiti - unutar (prvog) optimalnog rješenja. Budući su im te vrijednosti jednake nuli unosom takvih varijabli u bazu promjena funkcije cilja neće biti postignuta, nego će se novim programom dobiti alternativno rješenje optimalnog problema [8].

Optimizacijski problemi često su multimodalni, a to znači da posjeduju više dobrih rješenja. Sva rješenja mogu biti globalno dobra (vrijednost funkcije je ista) ili može biti kombinacija globalno i lokalno dobrih rješenja. Cilj multimodalnog optimiziranja je dobivanje svih višestrukih rješenja.

Koristeći klasične tehnike optimiziranja ne dolazi se do zadovoljavajućih rezultata za više rješenja zbog svog iterativnog pristupa. Razlog tome je što nije sigurno da će se različita rješenja dobiti ako se koriste različiti početni uvjeti tokom višestrukog izvođenja algoritma.

## 4.2 Ažuriranje položaja čestica

U prostoru funkcije cilja svaka čestica ima definiran položaj preko vektora  $\mathbf{x}$  odnosno položaj čestica definiran je koordinatama  $x_i$ , a te koordinate predstavljaju parametre koje treba optimizirati. Svaka čestica se može definirati preko vektora.

$$\mathbf{x}^{(p,e)} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{d_n} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Redni broj čestice  $p$  se kreće od 1 do ukupnog broja čestica u roju  $pn$ . Redni broj evaluacija u procesu optimizacije definiran je s oznakom  $e$ . Oznakom  $x_{d_n}$  označen je broj parametara koji se optimizira.

Kada se primjenjuje PSO metoda prvo je potrebno zadati broj čestica u roju s kojim će se pretraživati prostor funkcije cilja.

Nakon toga je potrebno inicijalizirati položaj čestica što u skladu s prethodnim znači zadati početnu vrijednost parametara modela  $x_i$  odnosno koordinate svake čestice u prostoru pretraživanja. Koordinate svake čestice će definirati jedan slučaj parametara modela koji treba ispitati i putem kojeg se može odrediti vrijednost funkcije cilja odnosno razlika ostvarenog odziva i onog zahtijevanog. Ovaj postupak se u prvoj evaluaciji optimizacijskog algoritma provodi za sve čestice te se nakon toga može pronaći ona čestica čije koordinate uzrokuju najmanju vrijednost funkcije cilja. U ovoj prvoj evaluaciji svih čestica u roju, čestica s najpovoljnijim koordinatama  $x_i$  će se koristiti u svrhu definiranja globalnog optimuma.

$$\mathbf{x}^{(g,e)} = \begin{Bmatrix} x_1^{(g)} \\ x_2^{(g)} \\ x_3^{(g)} \\ \vdots \\ x_{d_n}^{(g)} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

odnosno do sada najpogodnijeg rješenja optimizacijskog problema. Pritom, u nastavku je ovo rješenje potrebno unaprijediti što iziskuje pomicanje čestica u prostoru funkcije cilja te novu evaluaciju njihovih koordinata čime će se moći komparirati najbolje ostvareno rješenje s prethodnim.

Ažuriranje položaja čestica u prostoru pretraživanja se provodi analogijom kinematike gibanja čestica odnosno definirajući „brzinu“ čestice  $p$  na kraju evaluacijskog koraka  $e$ .

$$\mathbf{v}^{(p,e+1)} \quad (9)$$

kojom se zatim provodi ažuriranje položaja.

$$\mathbf{x}^{(p,e+1)} = \mathbf{x}^{(p,e)} + \mathbf{v}^{(p,e+1)} \cdot l_r \quad (10)$$

Parametar  $l_r$  u kinematičkom smislu može tumačiti kao proteklo vrijeme (iako, u PSO metodi ima drugačiju interpretaciju koja će se kasnije navesti). Ovim je problem ažuriran položaj čestice za novu evaluaciju optimizacijskog problema sveden na definiranje modela brzine kretanja čestica u prostoru pretraživanja.

Za ažuriranje položaja čestica  $p$  tijekom pretraživanja prostora funkcije cilja  $G(\mathbf{x}^{(p,e)})$ . Gibanje svake čestice koja pretražuje prostor određena je s dvije komponente: komponenta individualnog odlučivanja temeljena na prethodnom iskustvu pretraživanja prostora te komponenta odlučivanja temeljena na kolektivnom iskustvu pretraživanja prostora. Obzirom na navedeno, u PSO metodi se ažuriranje brzine kretanja provodi modelom.

$$\mathbf{v}^{(p,e+1)} = w \cdot \mathbf{v}^{(p,e)} + ((c_1 \cdot \mathbf{r}_1 * (\mathbf{x}^{(p_0,e)} - \mathbf{x}^{(p,e)})) + ((c_2 \cdot \mathbf{r}_2 * (\mathbf{x}^{(p_0,e)} - \mathbf{x}^{(p,e)})) \quad (11)$$

gdje je:

- $\mathbf{v}^{(p,e)}$  - brzina čestice  $p$  na kraju trenutne evaluacije optimizacijskog problema,
- $\mathbf{v}^{(p,e+1)}$  - brzina čestice  $p$  na početku sljedeće evaluacije optimizacijskog problema,
- $w$  faktor s kojim se opisuje svojstvo inercije (održavanje smjera i brzine kretanja),

- $c_1$  - parametar s kojim se opisuje oslanjanje na individualno iskustvo (samouvjerenost čestice),
  - $c_2$  - parametar s kojim se opisuje oslanjanje na kolektivno iskustvo (povjerenje čestice),
  - $\mathbf{x}^{(p,e)}$  - koordinate čestice  $p$  u evaluacijskom koraku  $e$ ,
  - $\mathbf{x}^{(po,e)}$  - najbolje koordinate koje je do trenutne evaluacije imala čestica  $p$  (lokalni optimum),
  - $\mathbf{x}^{(go,e)}$  - najbolje koordinate do trenutne evaluacije (globalni optimum),
- $\mathbf{r}_1$  i  $\mathbf{r}_2$  - su slučajni brojevi generirani u rasponu od 0 do 1 pri svakom ažuriranju brzine čestice  $p$  te se uvode kako bi se oponašala slučajna komponenta pretraživanja (za ove brojeve je važno da se u proračunskom algoritmu određuju temeljem uniformne distribucije brojeva te se tako ne favorizira pojedini smjer kretanja čestica) [7].

#### 4.1.1 Hadamardov produkt

Važan faktor koji je potrebno komentirati i uzeti u obzir u jednadžbi (11) je način množenja. U spomenutoj jednadžbi koriste se skalarni umnožak i Hadamardov produkt.

Produkt umnoška dvaju vektora je brojčana vrijednost. Hadamardov se produkt razlikuje od skalarnog umnoška. Hadamardov produkt, u matematici je binarna operacije koja množi dvije matrice istih dimenzija. Množenjem Hadamardovim produktom svaki član  $i, j$  matrice A množi se sa istim članom  $i, j$  matrice B, te tako pomnožena dva člana čine član  $i, j$  matrice C. Rezultat Hadamarovog produkta je vektor. Primjer Hadamardovog produkta prikazan je jednadžbom (12).

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \cdot y_1 \\ x_2 \cdot y_2 \\ x_3 \cdot y_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

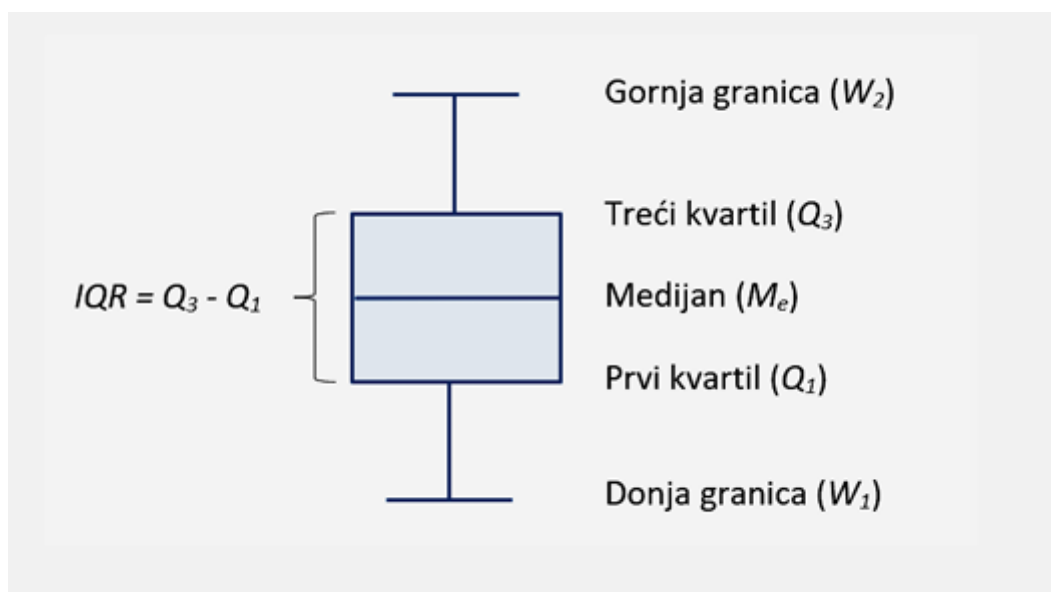
### 4.3 Kutijasti dijagram

Kutijasti dijagram se koristi kada se neki podaci žele prikazati sažetije nego što to prikazuje aritmetička sredina. Kutijasti dijagram daje podatke o raspršenju podataka. U ovom diplomskom radu kutijasti dijagram se koristi da bi se izrazila statistička distribucija tlakova u čvorovima u kojima se mjere tlakovi.

Kutijasti dijagram se sastoji od pet podataka, a to su:

- a) minimalna vrijednost svih podataka  $W_1$ ,
- b) prvi kvartil  $Q_1$ ,
- c) medijan  $M_e$ ,
- d) treći kvartil  $Q_3$  i
- e) maksimalna vrijednost svih podataka  $W_2$ .

Kutijasti dijagram se sastoji od pravokutnika koji nije uvijek podijeljen na dva jednaka dijela jer to ovisi o podatcima s kojima se raspolaže, te se sa svake strane nalaze brkovi. U pravokutniku je obuhvaćeno 50% podataka, podatci od 1 do 3 kvartila. Donji brk obuhvaća 25% minimalnih podataka dok Gornji brk obuhvaća 25% maksimalnih podataka. Krajevi su minimumi te maksimumi. Točke koje se nalaze izvan granica se posebno crtaju i to su vrijednosti koje odstupaju od ostalih.



Slika 15. kutijasti dijagram.

## **5 PRIMJER LOKALIZACIJE GUBITAKA VODE**

### **5.1 Vodoopskrbna mreža**

Za provedbu proračuna PSO metode pripremljene su dvije referentne kružne vodoopskrbne mreže. Obje vodoopskrbne mreže koncipirane su na način da je vodosprema smještena u samom središtu kružne mreže a čvorovi ju okružuju. Prva mreža, prikazana Slikom 16, sastavljena je od ukupno 100 čvorova, postavljenih u 10 koncentričnih kružnica koje se nazivaju prstenovi i na ukupno 10 pravocrtnih dionica. Druga mreža, prikazana Slikom 47, sastavljena je od ukupno 18 čvorova postavljenih u 10 koncentričnih kružnica (prstenova) i na ukupno 18 pravocrtnih dionica.

Ove dvije vodoopskrbne mreže korištene su za računalne simulacije koje će se analizirati u ovom diplomskom radu.

### **5.2 Proračun projektiranih tlakova**

Za ovako postavljene vodoopskrbne mreže potrebno je pripremiti podatke o projektiranom stanju tlakova. To se priprema koristeći se programom Epanet.

Kako je opisano u poglavlju 4.3 ovog diplomskog rada, projektirano stanje tlakova dobiva se na način da se provedbom hidrauličkog proračuna kroz računalni program Epanet generiraju tlakovi u svim čvorovima vodoopskrbne mreže. Ovakvi tlakovi ovise o protocima u mreži kao i geometrijskim značajkama vodoopskrbne mreže. U projektirano stanje tlakova nisu uračunati protoci gubitaka vode, već samo protoci predviđeni projektom vodoopskrbne mreže.

### **5.3 Proračun izmjerenih tlakova**

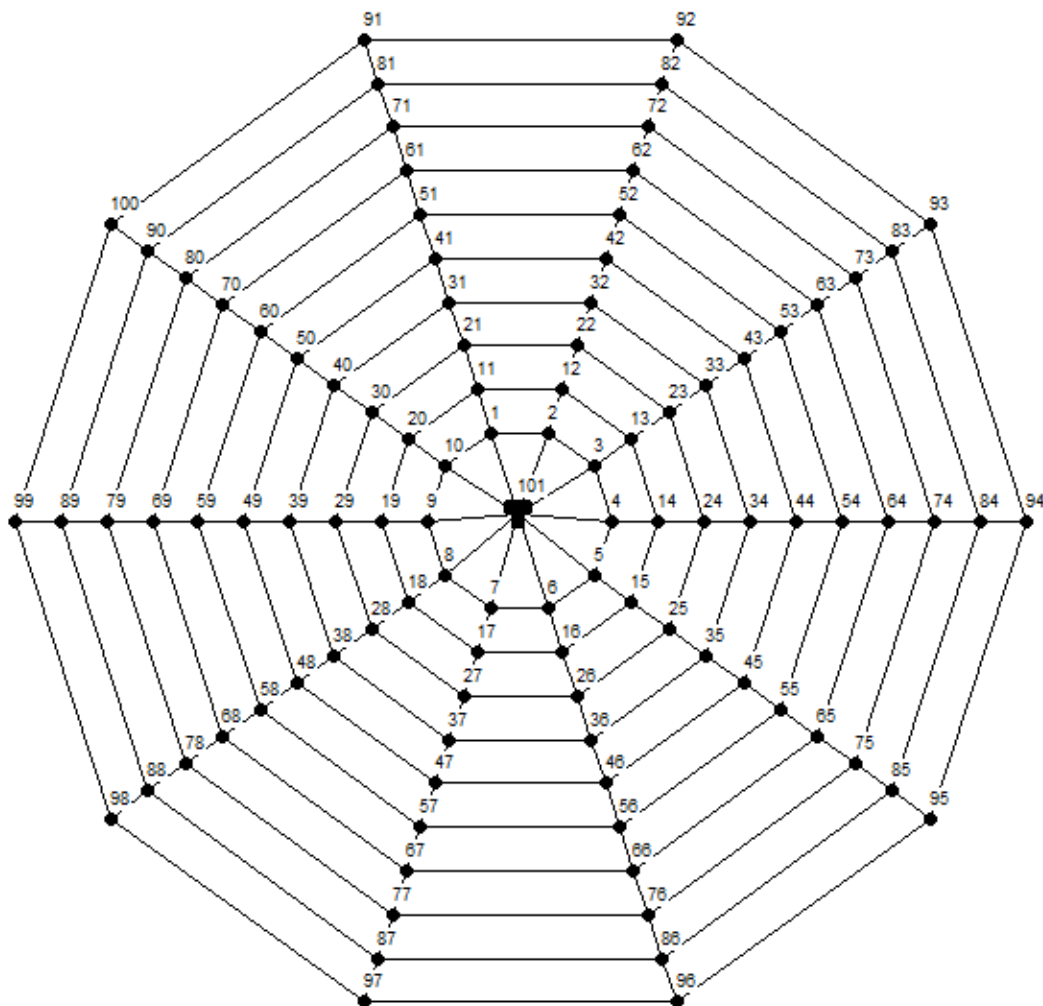
Za razliku od projektiranog stanja tlakova, u izmjereno stanje tlakova uključeni su i gubici vode u vodoopskrbnom sustavu. Uključeni su na način da se protocima korištenim za projektirano stanje tlakova dodaju protoci gubitaka u željenim čvorovima.

Sa tako pripremljenim podacima o protocima, na istoj se vodoopskrbnoj mreži provodi hidraulički proračun. Hidrauličkim se proračunom dobivaju podaci o tlakovima u svim čvorovima mreže, koji zajedno čine izmjereno stanje tlakova.

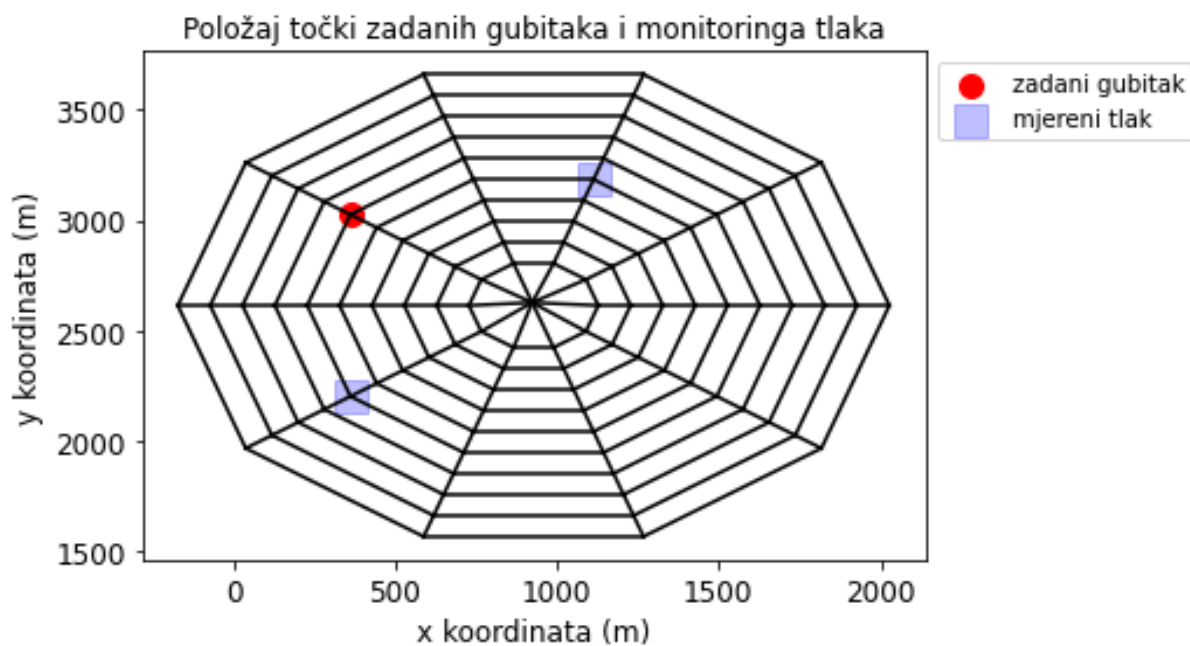
## 5.4 PSO optimizacija

PSO metoda napisana je u programskom jeziku Python. Programski kod napisan u Pythonu koristi se za upravljanje Epanet modelom. Metoda radi na način da kontrolirano traži položaj gubitka te iznos gubitka. Računalna simulacija ponavlja postupak sve dok ne dođe do optimalnog rješenja. PSO metoda konvergira točke čvorova te iznose gubitka sve dok računalna simulacija ne pronađe slučaj u kojemu se tlakovi poklapaju s početnim tlakovima, odnosno kompariramo trenutne tlakove s početnim tlakovima. Tokom tog postupka cilj je da se brkovi kutijastog dijagrama spoje, a to ukazuje na to da su se tlakovi poklopili s početnim tlakovima u mreži, odnosno minimalizirala se funkcija cilja.

### 5.4.1 PSO optimizacija mreže 100 čvorova



Slika 16. prikaz prve referentne kružne vodoopskrbne mreže.

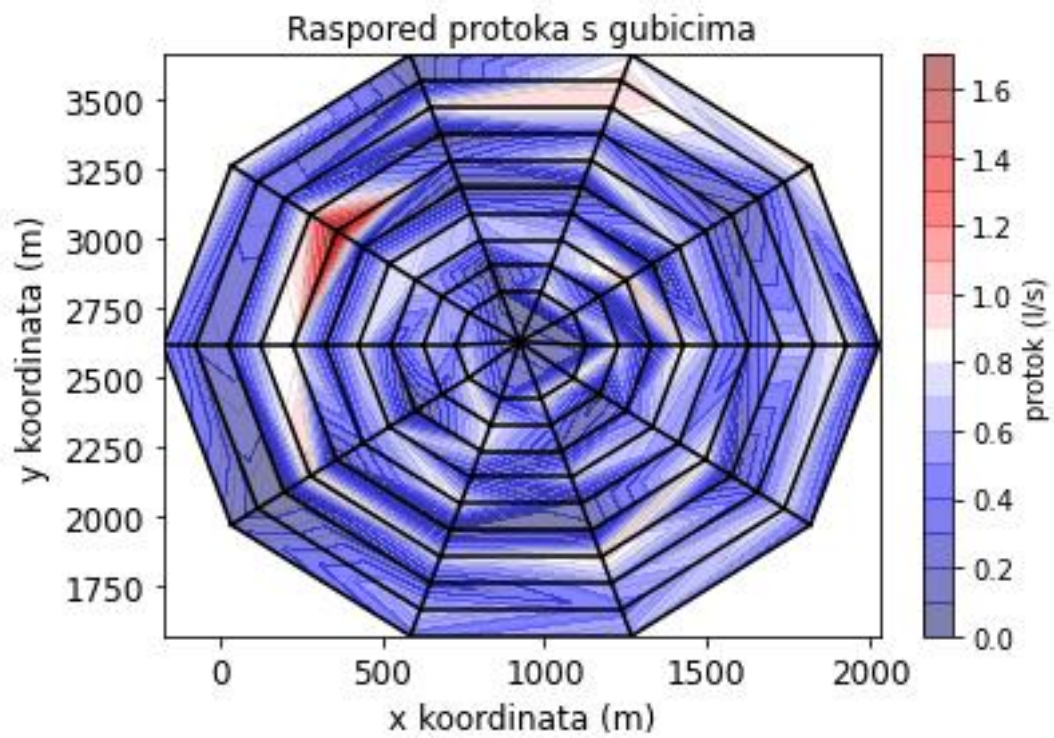


Slika 17. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

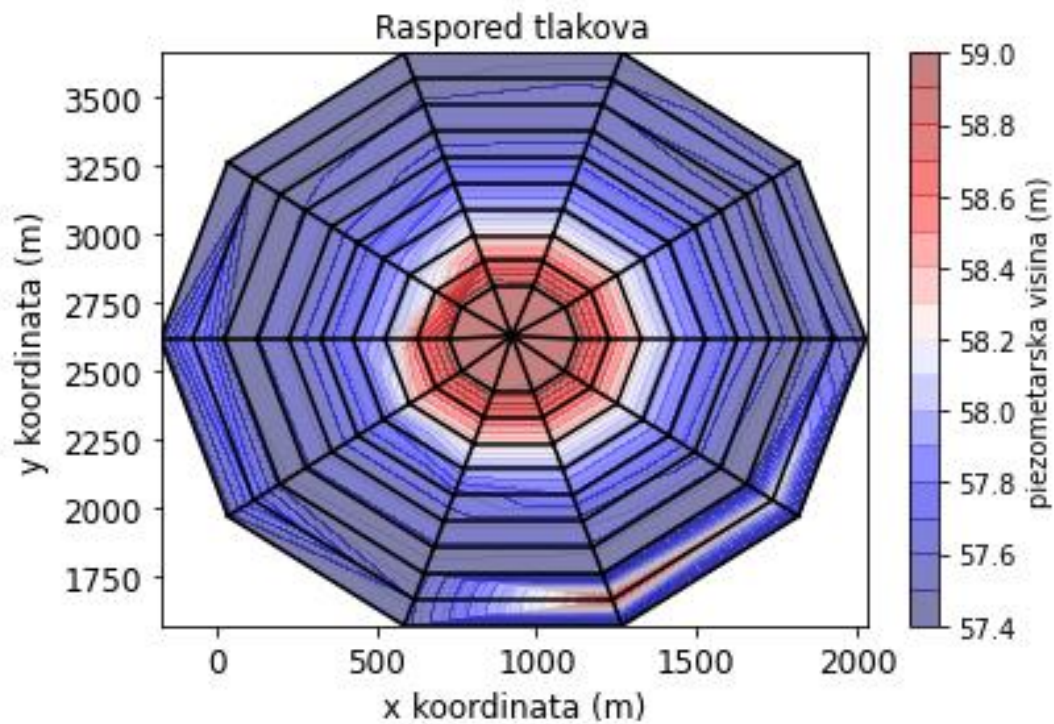
Odabrano je prvo testiranje mreže tako da je zadan gubitak vode u čvoru 60 protoka  $q = 1 \text{ l/s}$ , zbrojen na inicijalnu potrošnju zadanu u tablici  $q$ , koja je korištena za sve računalne simulacije koje će se dalje provoditi u ovoj mreži. Osim zadanog gubitka, potrebno je zadati i čvorove u kojima su mjereni tlakovi, kako je prikazano Slikom 17.

Prije same računalne simulacije u programu Python, a nakon zadavanja čvorova prikazanih Slikom 17, također se grafičkim prikazom iskazuje raspored protoka u zadanoj vodoopskrbnoj mreži (Slika 18) kao i raspored tlakova u mreži generiranih u odnosu na zadane protoke tablicom  $q$  i zadane gubitke vode (Slika 19).

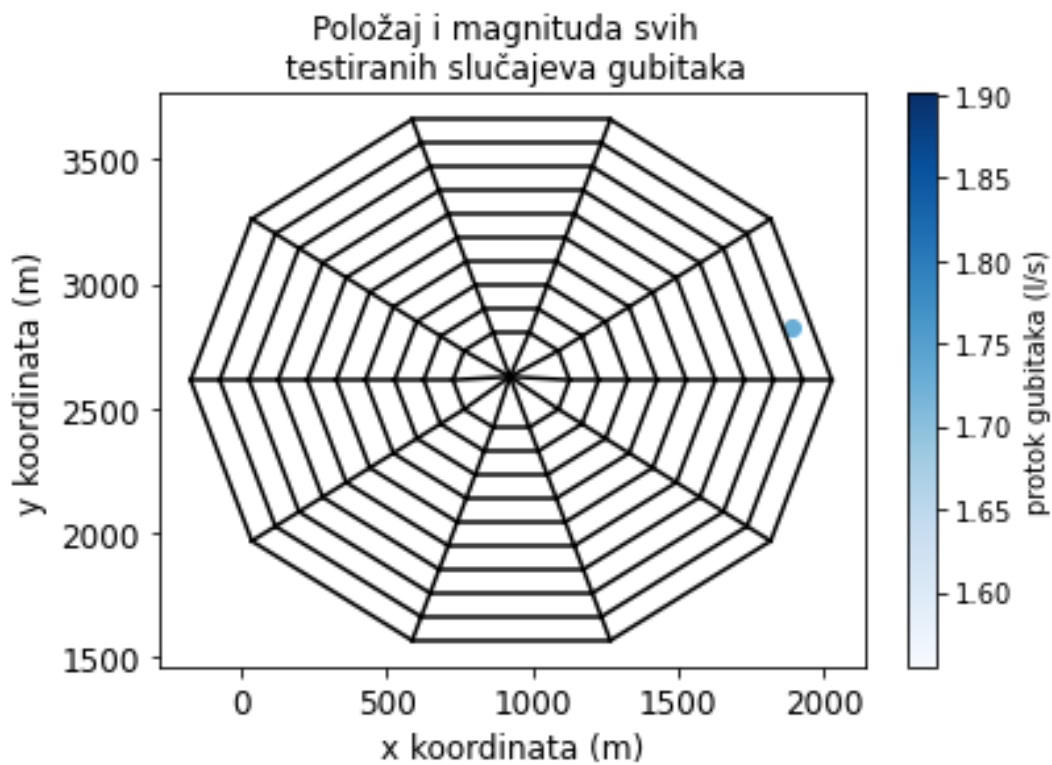




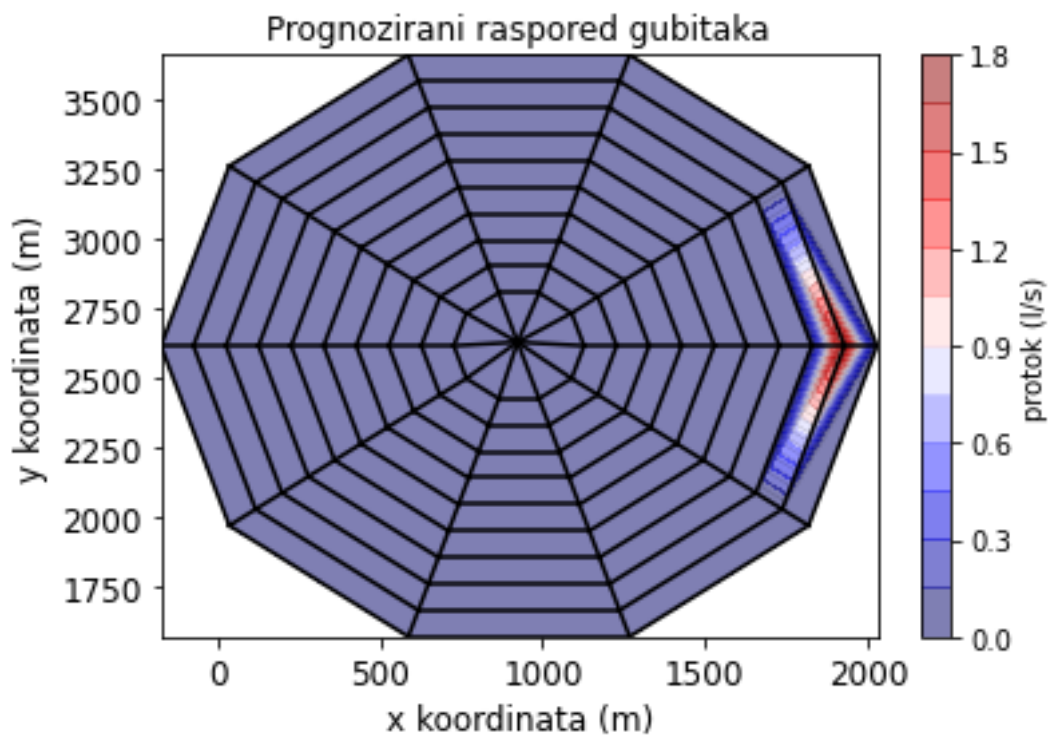
Slika 18. raspored protoka s gubicima vode.



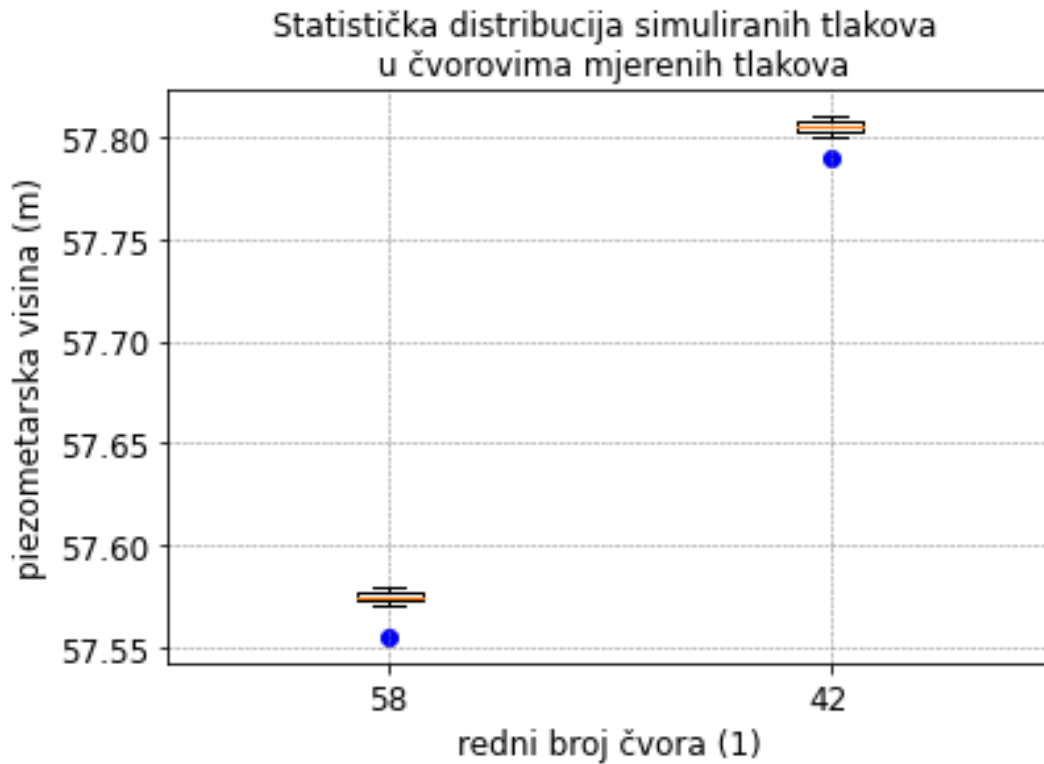
Slika 19. raspored tlakova.



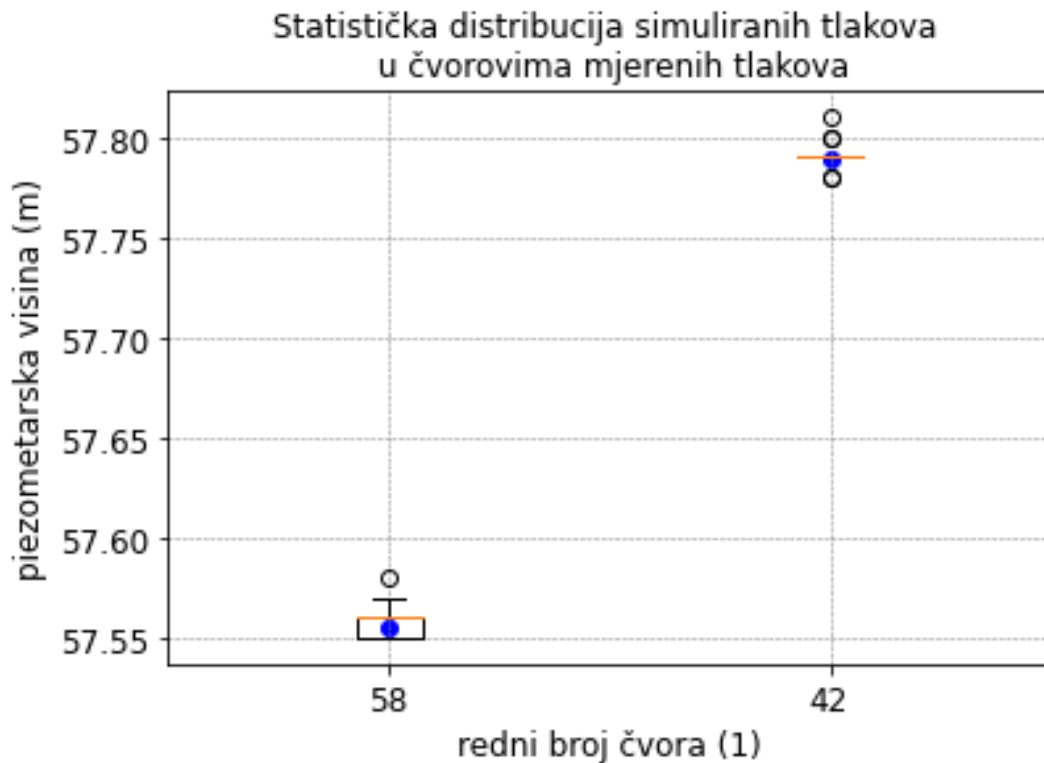
*Slika 20. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.*



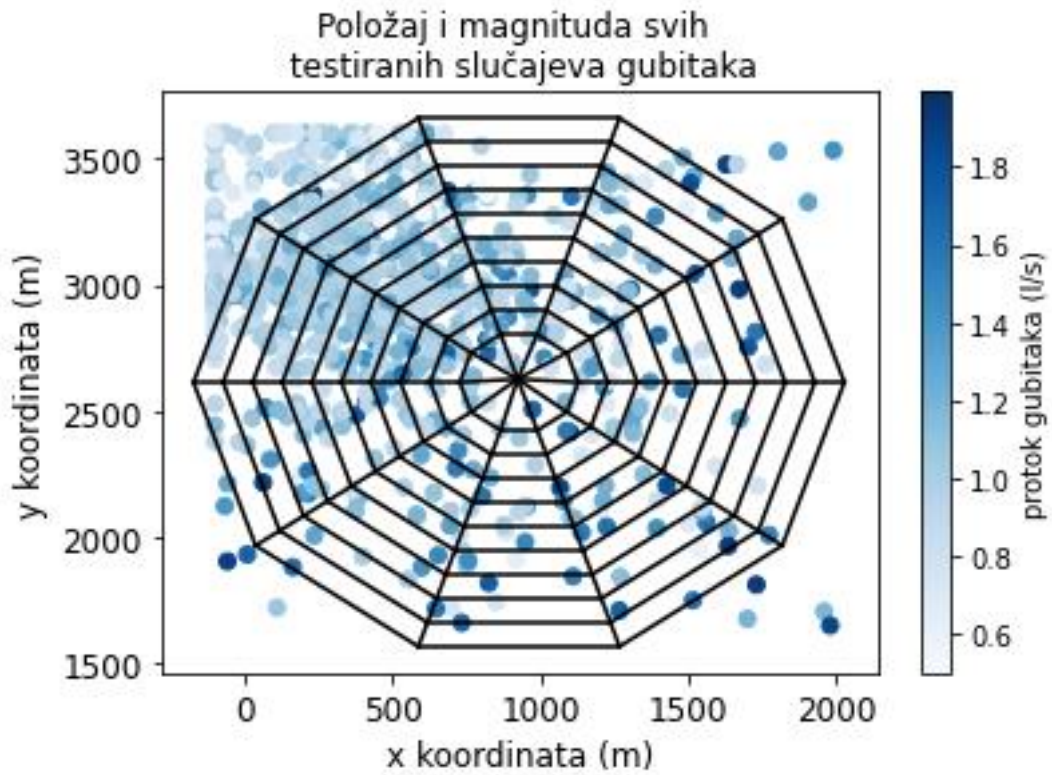
*Slika 21. prognozirani raspored gubitaka vode.*



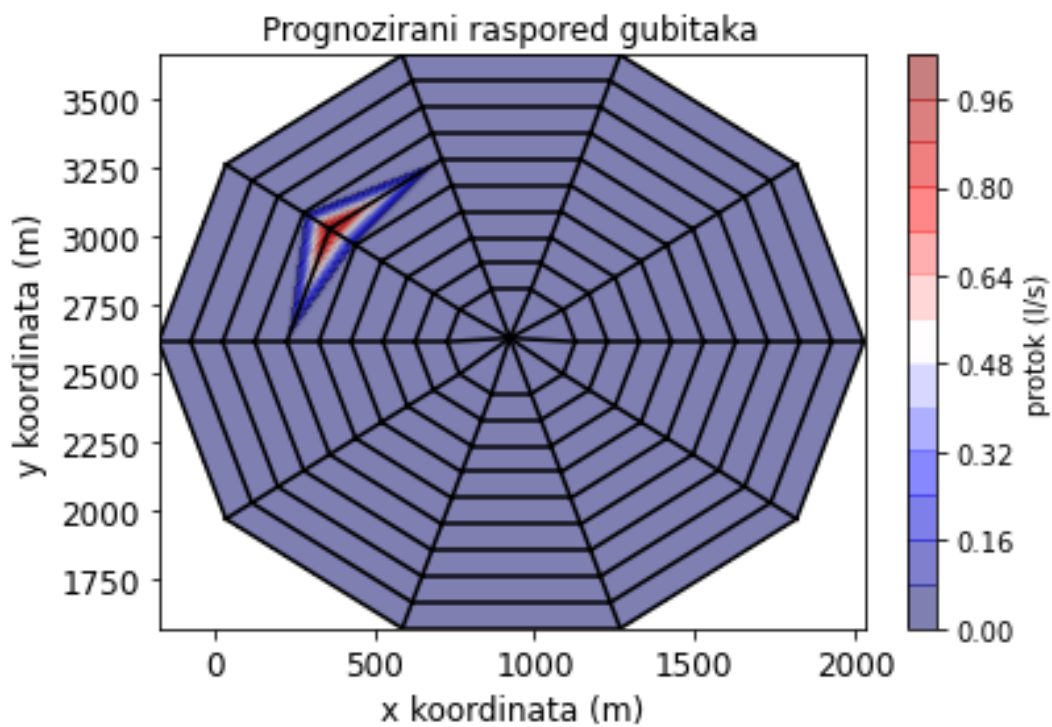
Slika 22. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.



Slika 23. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.



Slika 24. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.



Slika 25. prognozirani raspored gubitaka vode.

Nakon postavljanja svih prethodno opisanih parametara pokreće se postupak PSO metode. Metoda je koncipirana na način da se računalna simulacija ponavlja onoliko puta koliko joj je potrebno da ustvrdi u kojem se čvoru najvjerojatnije dogodio gubitak vode.

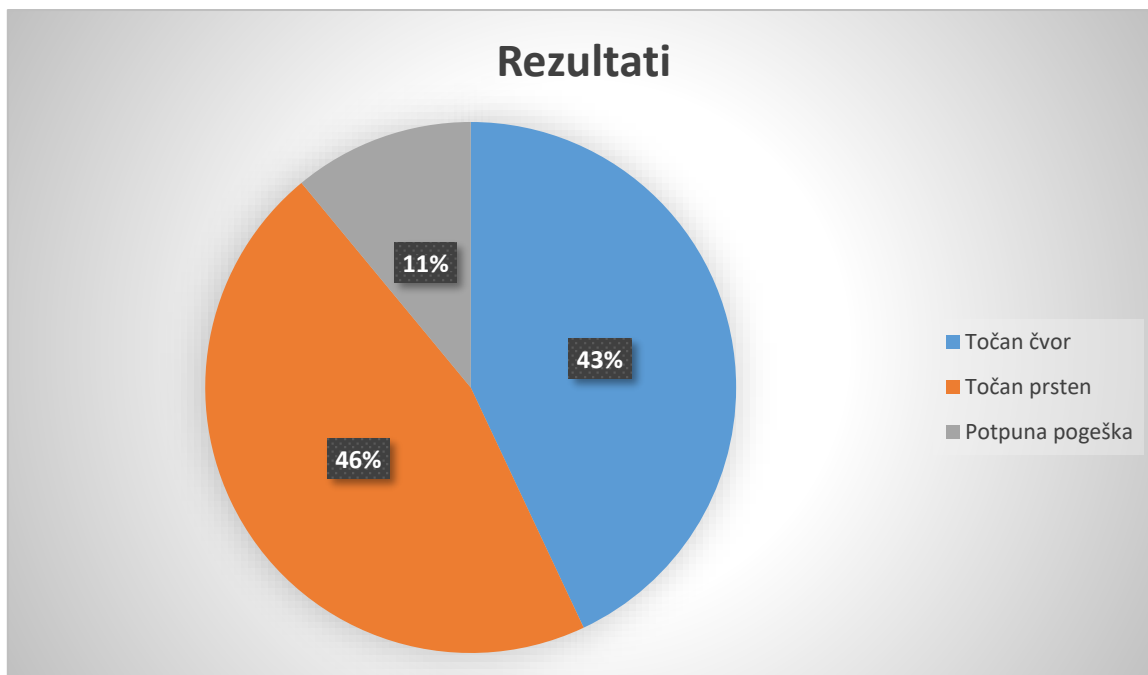
U ovoj računalnoj simulaciji s dva tlakomjera PSO metoda je provela ukupno 30 evaluacija, od kojih 12 evaluacija s drugačijom predviđenom lokacijom gubitka vode, sve dok nije pokazala čvor u kojoj se dogodio gubitak vode. Na Slici 20 prikazana je prva provedena evaluacija u kojoj je moguće primijetiti kako je sama računalna simulacija započeta sa jednim nasumičnim gubitkom vode, te je nakon prvog nasumičnog pokušaja računalna simulacija kontrolirano je pretraživala prostor, sve dok program u jednom od njih nije pronašao povoljnije rješenje.

U ovom slučaju računalna simulacija je preko funkcije cilja došla do optimalnog rješenja ali kao što se može vidjeti iz Slike 23. Kutijasti dijagram se nije spojio dok je čvor kojeg je računalna simulacija pokazala onaj u kojem je zadan gubitak vode. Ova činjenica znači da je računalna simulacija pronašla dobre koordinate odnosno lokaciju gubitka vode, dok s druge strane iznos koji je pretpostavio nije onaj koji je zadan.

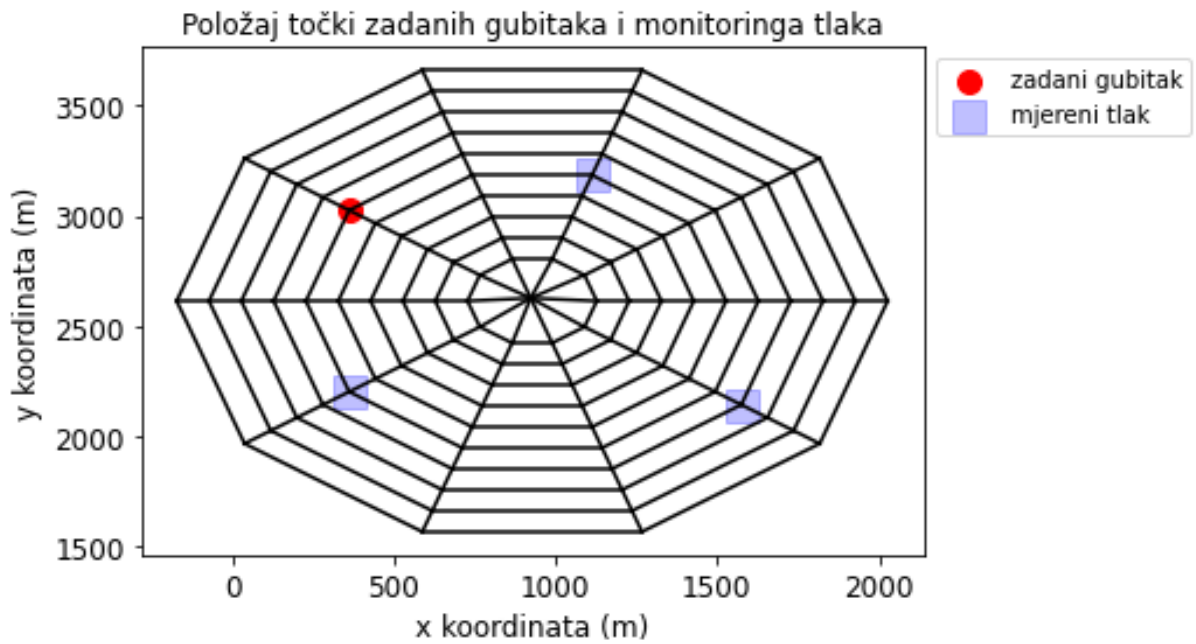
Nakon što je metoda provela više od 1000 iteracija, kao posljednju evaluaciju prikazanu na Slici 25 PSO metoda je uspješno detektirala gubitak vode u čvoru 60. Na Slici 24, primjećuje se kako su u okrugu čvora 60, u kojem je zadan gubitak vode, plave točke koje nastoje detektirati gubitak vode najgušće. Ovakva činjenica ukazuje na preciznost ove metode.

Na Slici 25 prikazano je mjesto prognoziranog rasporeda gubitaka vode nakon što je metoda provedena u cijelosti. Na ovom grafičkom prikazu može se primijetiti kako je jedini detektirani protok gubitka vode upravo u čvoru 60.

Za iste uvjete – istu lokaciju gubitka vode i mjernih mjesta te protoka gubitka vode – ova je metoda provedena ukupno 30 puta. Od ukupnih 30 provedenih računalnih simulacija, ukupno je 13 puta metoda odredila gubitak vode u čvoru u kojem je zadan, što čini 43% od ukupnog broja provedenih postupaka. Metoda je ukupno 14 puta odredila gubitak vode u prstenu u kojem je zadan, ali u pogrešnom čvoru, odnosno u 46% slučajeva. U preostala 3 provedene računalne simulacije metoda je ne uspješno odredila gubitak vode. Jednom riječju detektirani čvor se nalazi u potpuno drugom prstenu, što čini 11% slučajeva.



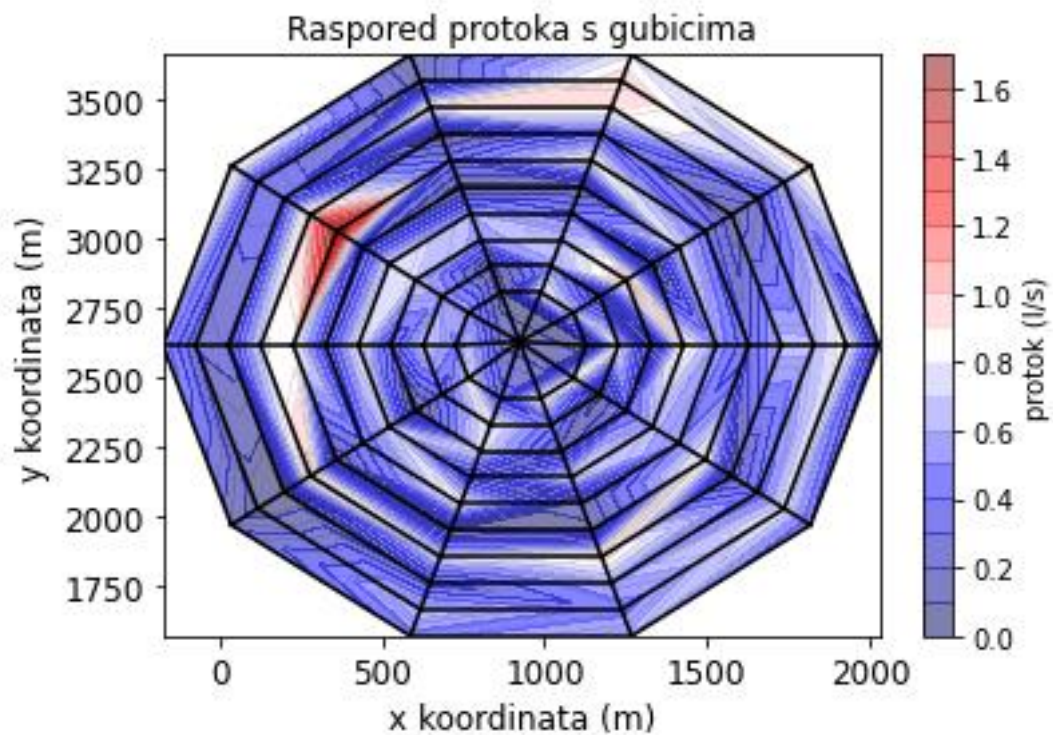
*Slika 26. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 60 sa 2 lokacije mjerenja u mreži sa 100 čvorova.*



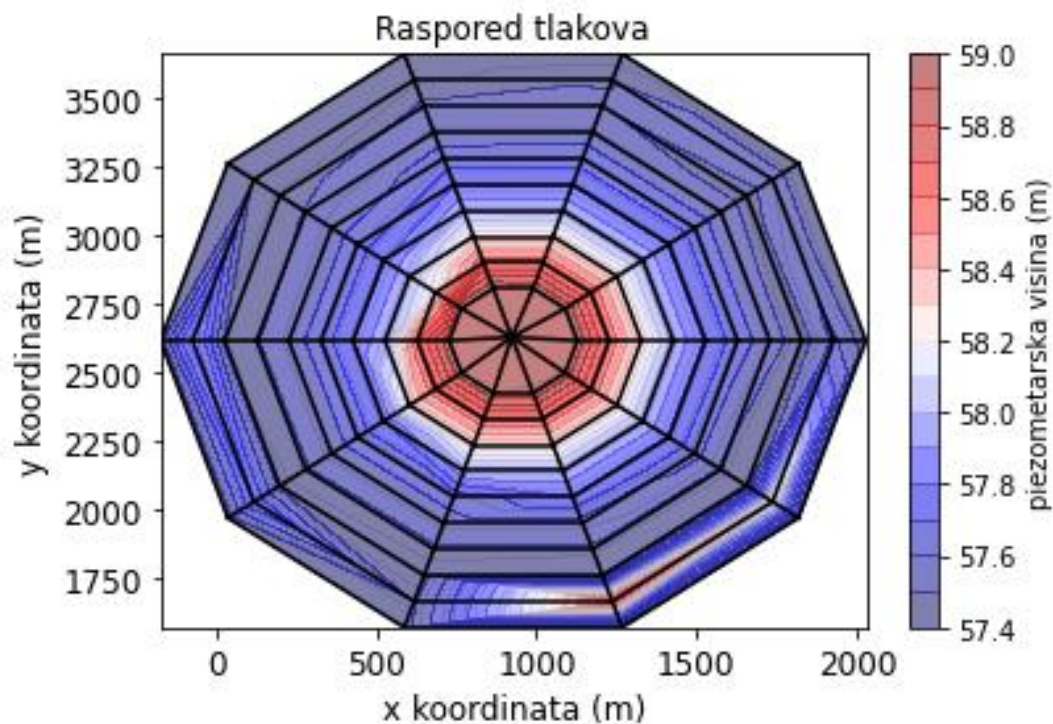
*Slika 27. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.*

U sljedećem slučaju uzeta je ista mreža sa istim gubitcima vode, ali sa tri tlakomjera te je gubitak vode ostao isti od 1 l/s u čvoru 60. Tlakomjeri su se nalazili na čvorovima prikazani Slikom 27.

Nakon zadavanja čvorova u kojima se tlakomjeri nalaze kako je prikazano na Slici 27, grafički se prikazuje raspored protoka u vodoopskrbnoj mreži i raspored gubitaka vode (Slika 28) te raspored tlakova u mreži koji su ovisni o protocima zadanim tablicom  $q$  i gubitkom vode (Slika 29).

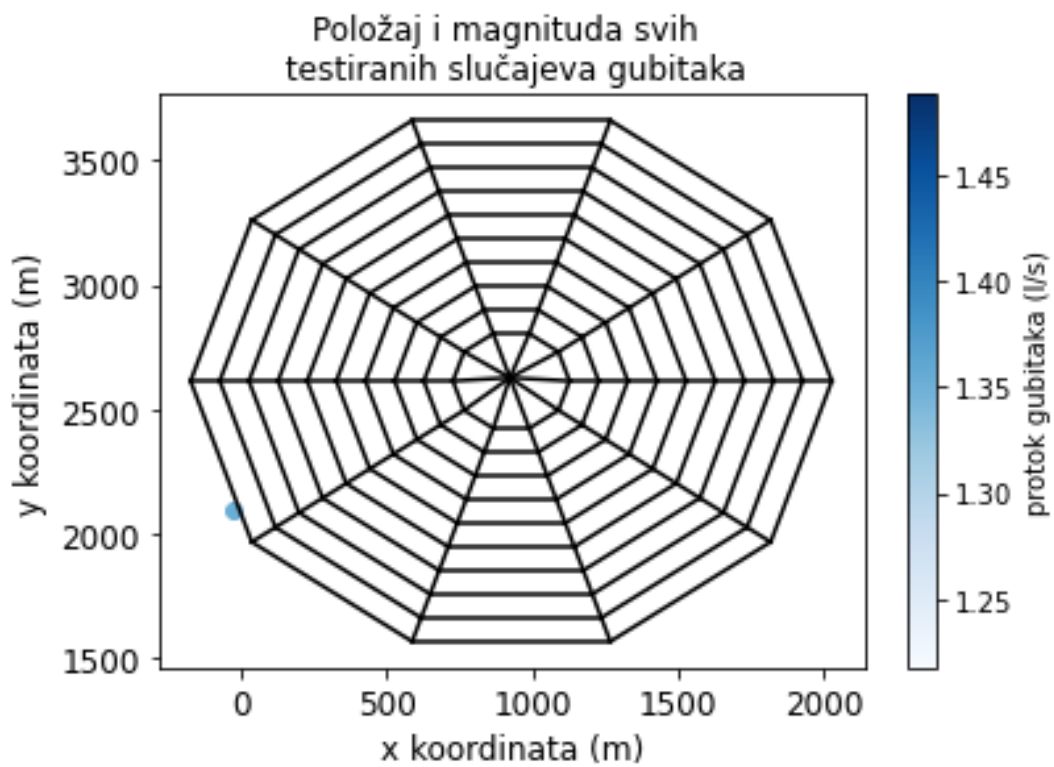


*Slika 28. raspored protoka s gubicima vode.*

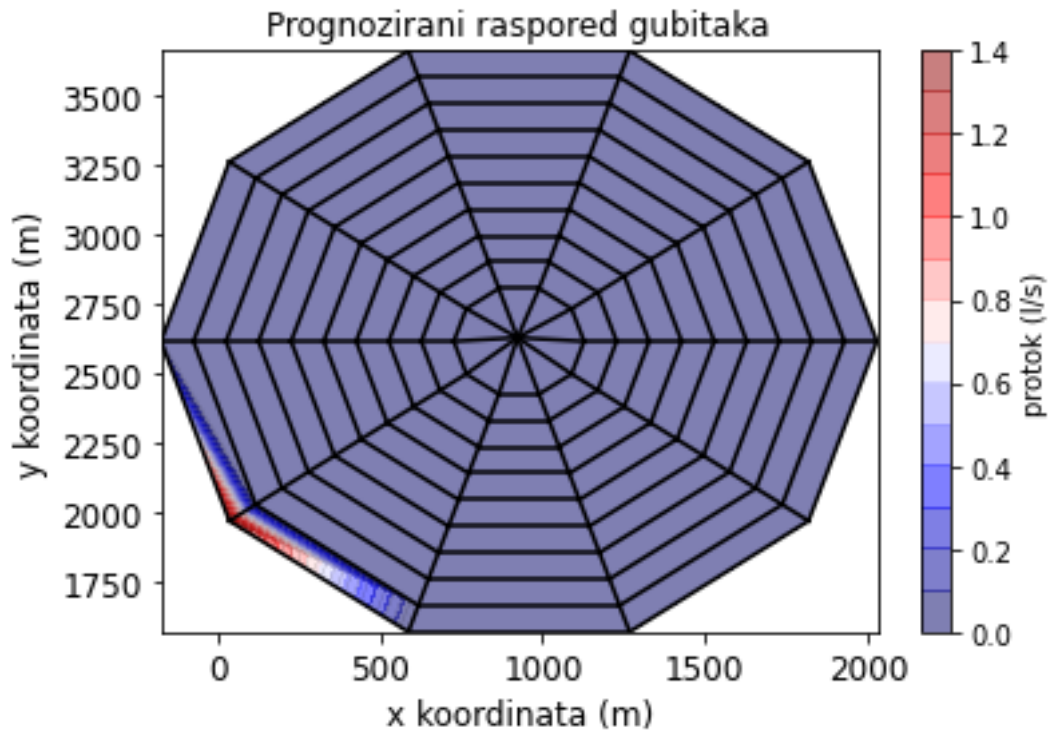


*Slika 29. raspored tlakova.*

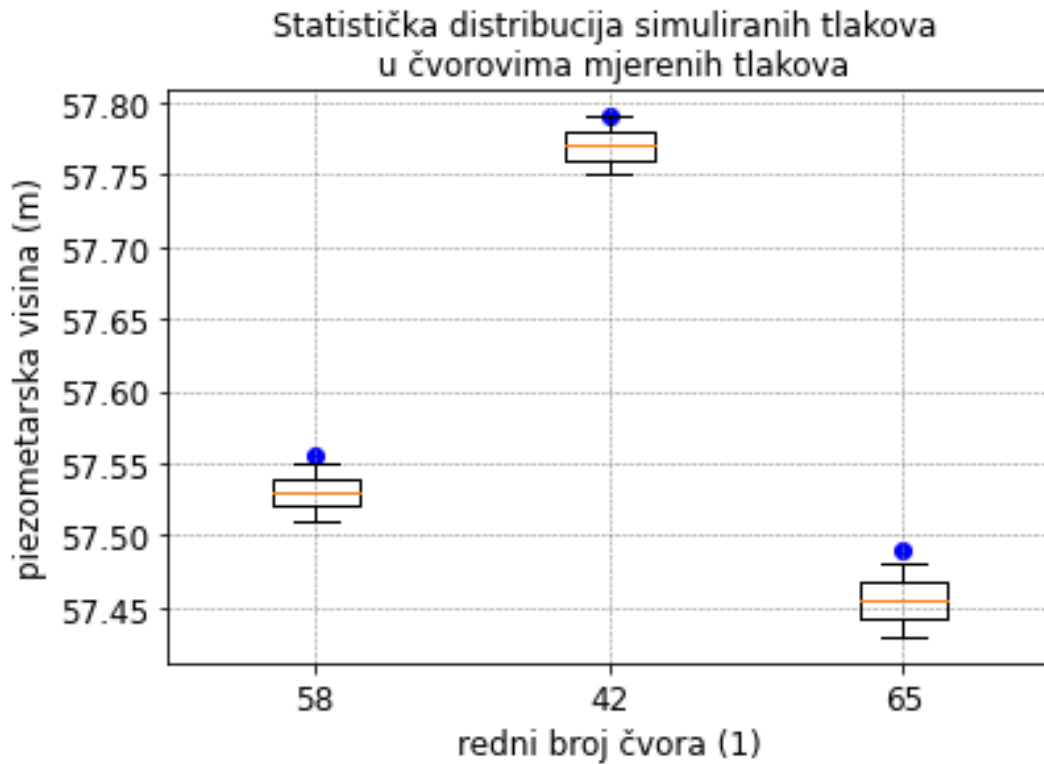




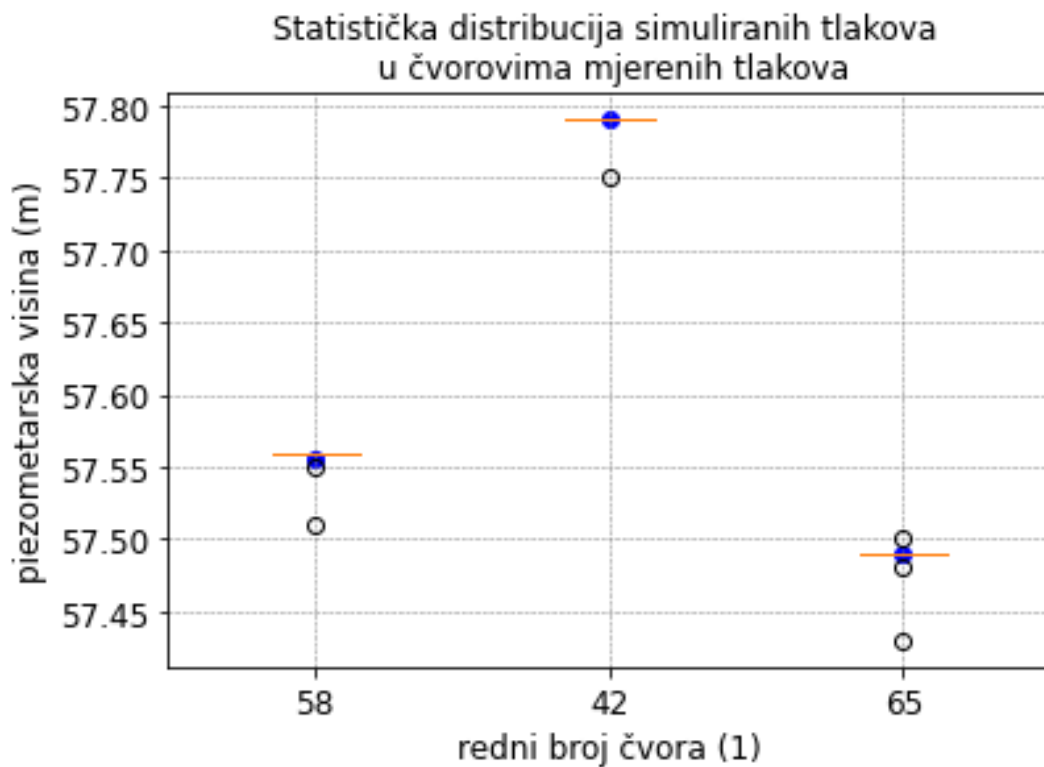
*Slika 30. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.*



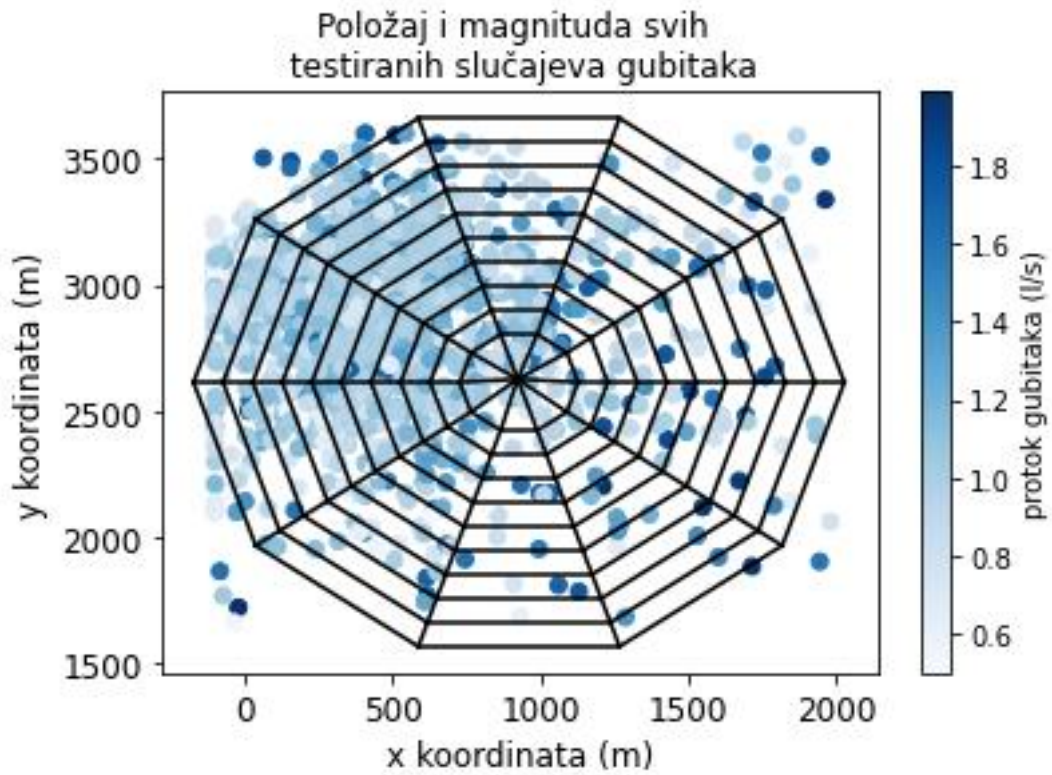
*Slika 31. prognozirani raspored gubitaka vode.*



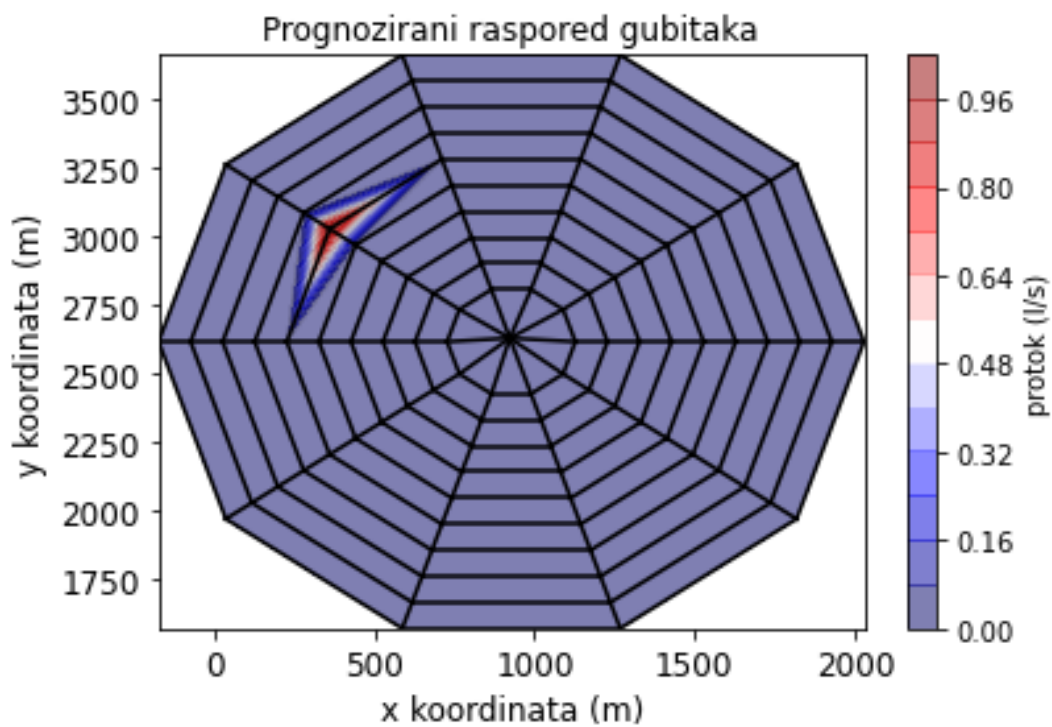
*Slika 32. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.*



*Slika 33. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.*



Slika 34. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.



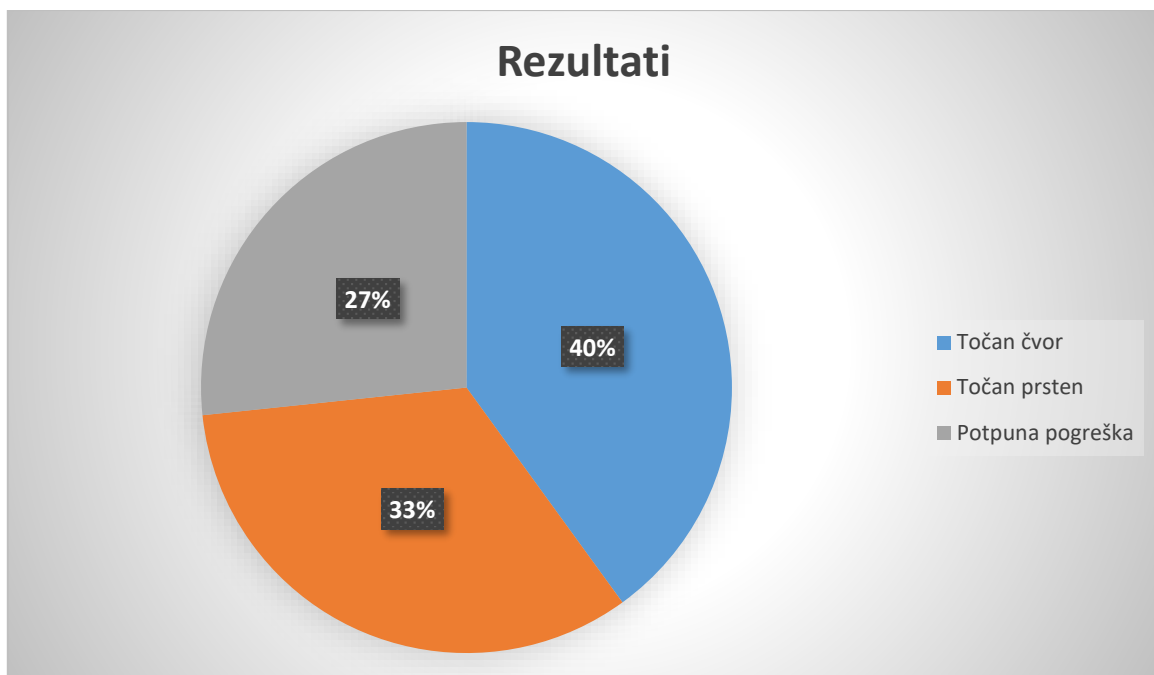
Slika 35. prognozirani raspored gubitaka vode.

U ovoj računalnoj simulaciji za slučaj sa tri tlakomjera PSO metoda je provela 30 evaluacija, od kojih je 11 imalo uspješnije rješenje od prethodne. Ova je metoda predvidjela čvor u kojem je postavljen gubitak. Kao i u prethodnom slučaju program je započeo s jednim nasumično izabranim čvorom i gubitkom vode u tom čvoru (Slika 30).

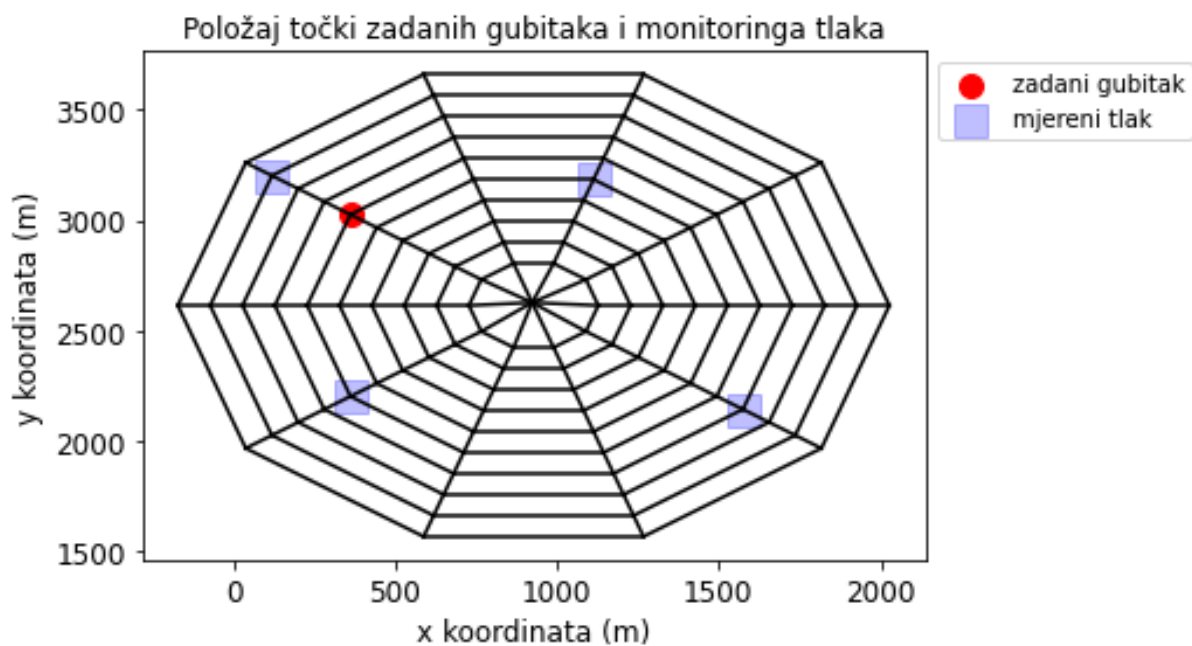
U ovom slučaju računalna simulacija je preko funkcije cilja došla do optimalnog rješenja. Za razliku od prvog slučaja može se vidjeti da su se brkovi kutijastog dijagrama spojili što ukazuje da je računalna simulacija pronašla lokaciju gubitka vode te je pronašla i njegov protok.

PSO metoda tražila je najbolje rješenje kroz evaluacije. Nakon 30 evaluacija i preko 1000 iteracija računalna simulacija predvidjela je gubitak vode u čvoru 60 u kojem je i bio zadan (Slika 35).

Kao i u prvom slučaju i u ovom je, također, metoda provedena 30 puta. Od ukupno 30 provedenih računalnih simulacija metoda je pronašla čvor u kojem je zadan gubitak vode u 12 slučajeva što čini 40% od ukupnog provedenog broja postupaka. U 10 slučajeva metoda je odredila gubitak vode u točnom prstenu, ali u krivom čvoru i to čini 33% slučajeva. U ostalih 8 računalnih simulacija metoda je u potpunosti pogriješila čvor i prsten, što čini 27% slučajeva.



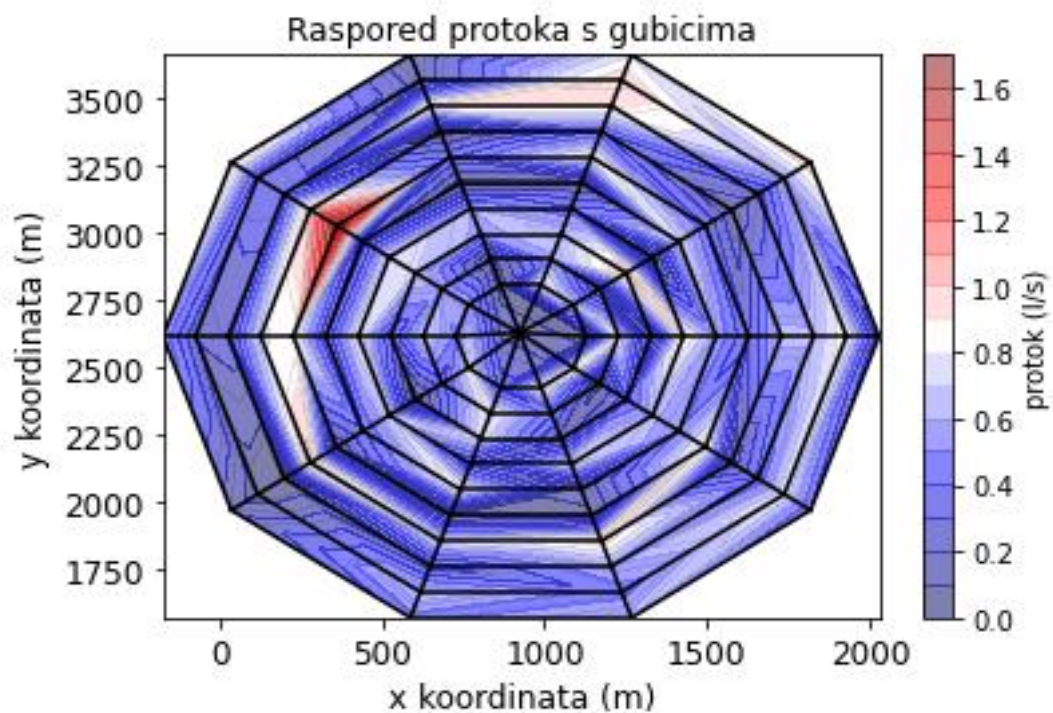
Slika 36. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 60 sa 3 lokacije mjerenja u mreži sa 100 čvorova.



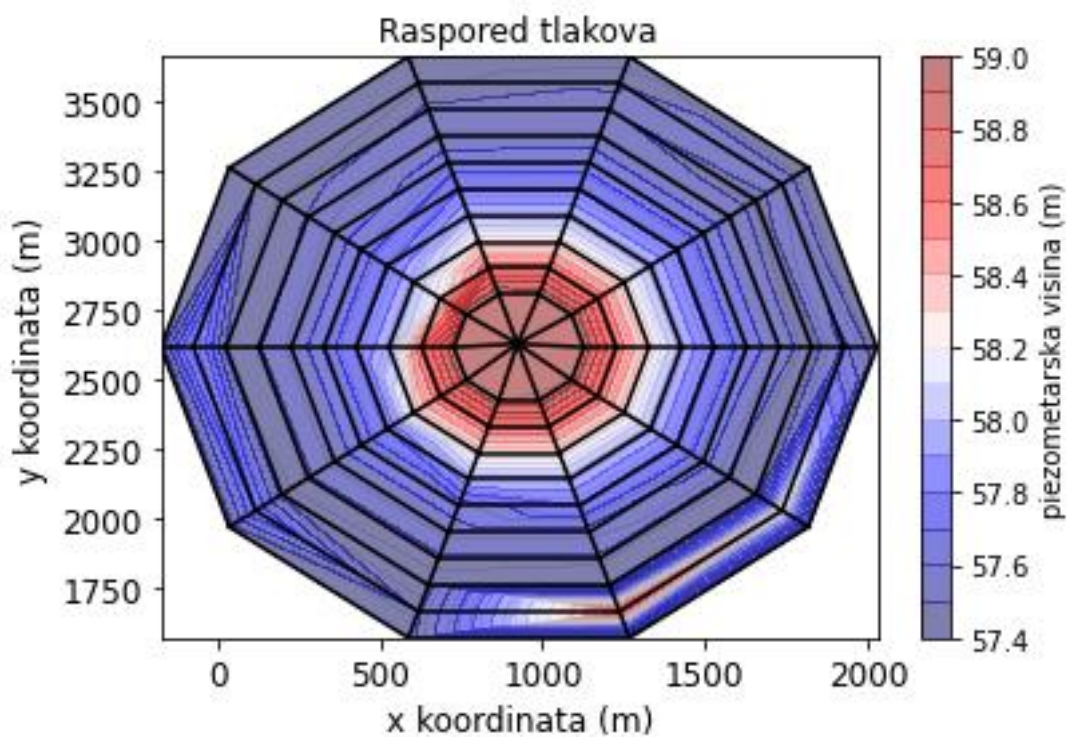
Slika 37. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.

U slučaju broj tri korištena su četiri tlakomjera na čvorovima prikazanim Slikom 37. Protok u čvorovima je ostao isti te je iskazan tablicom  $q$ , dok je gubitak vode protoka  $q = 1 \text{ l/s}$  ostao u čvoru 60.

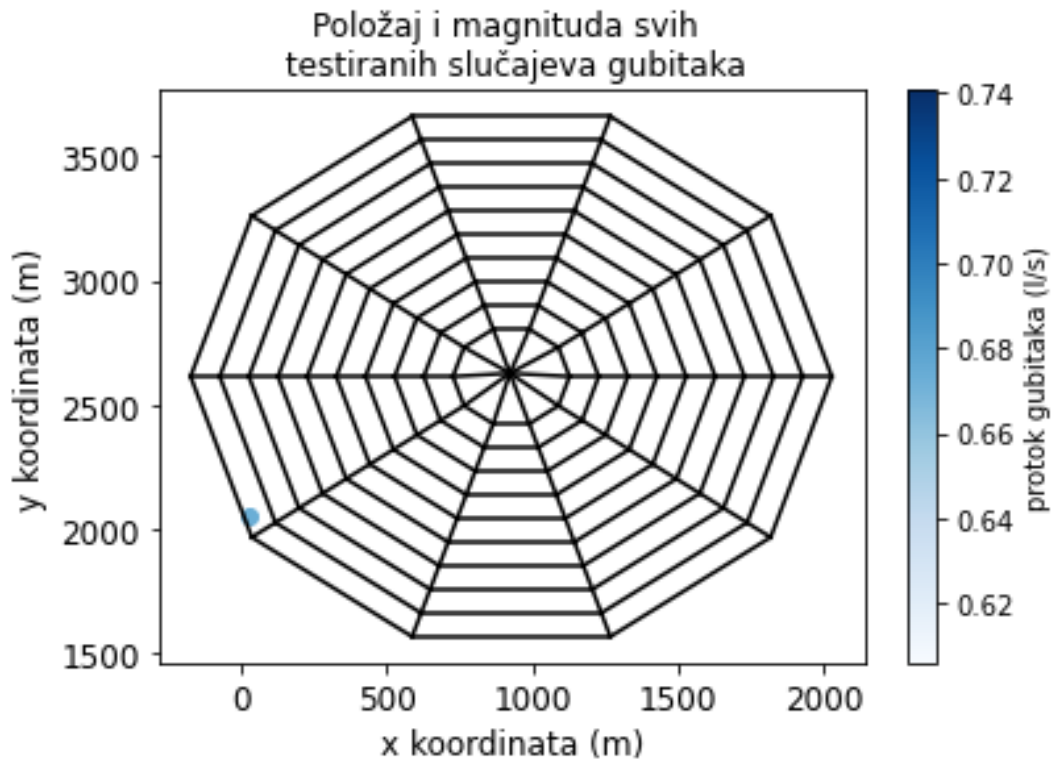
Nakon što su zadana mjesta na kojima se nalaze tlakomjeri (Slika 37) grafički se prikazuje raspored protoka i raspored gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži (Slika 38). Nakon toga prikazuje se raspored tlakova koji su ovisni o protocima zadanim tablicom  $q$  i gubitkom od  $q = 1 \text{ l/s}$  (Slika 39).



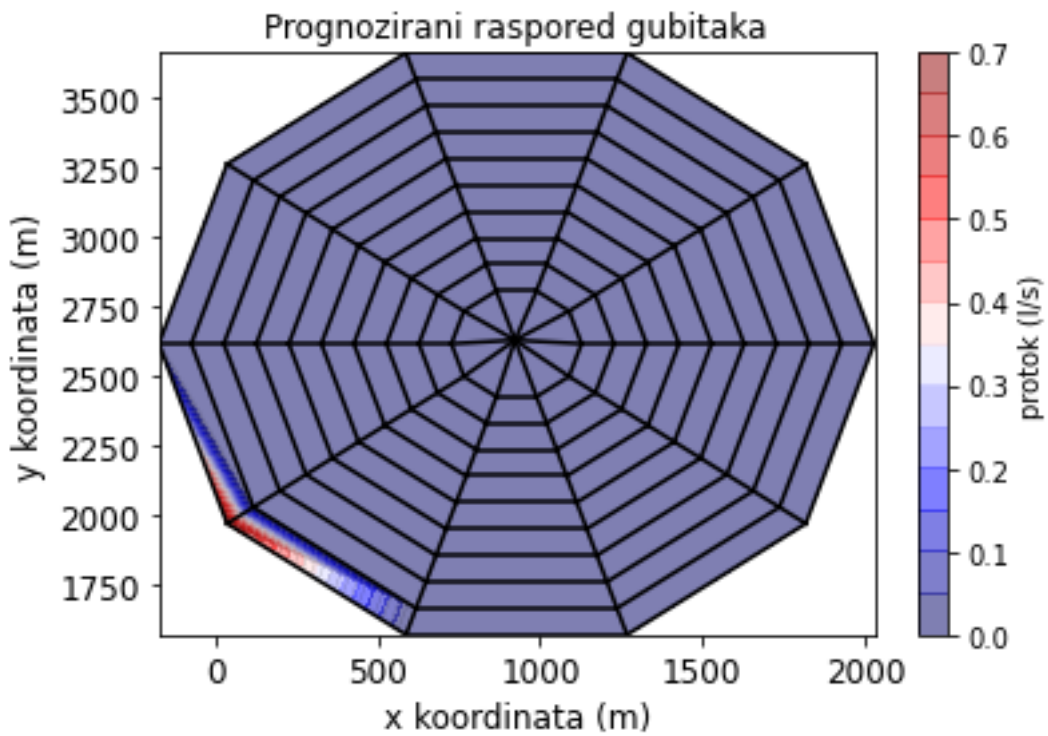
Slika 38. raspored protoka s gubicima vode.



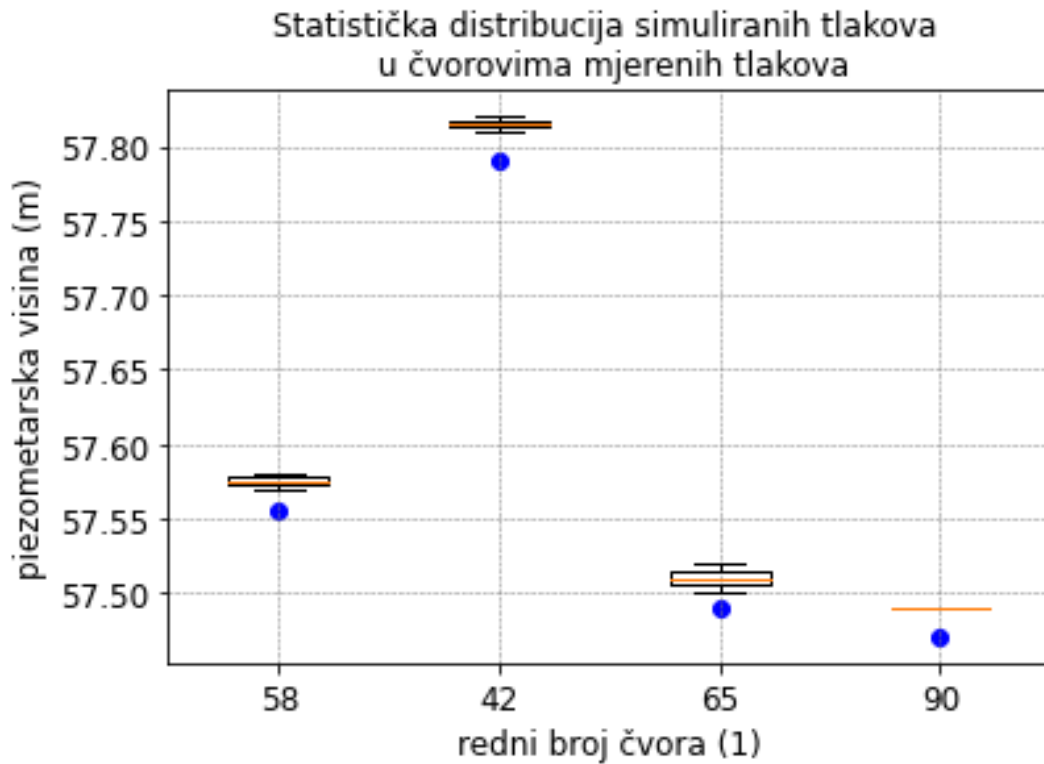
Slika 39. raspored tlakova.



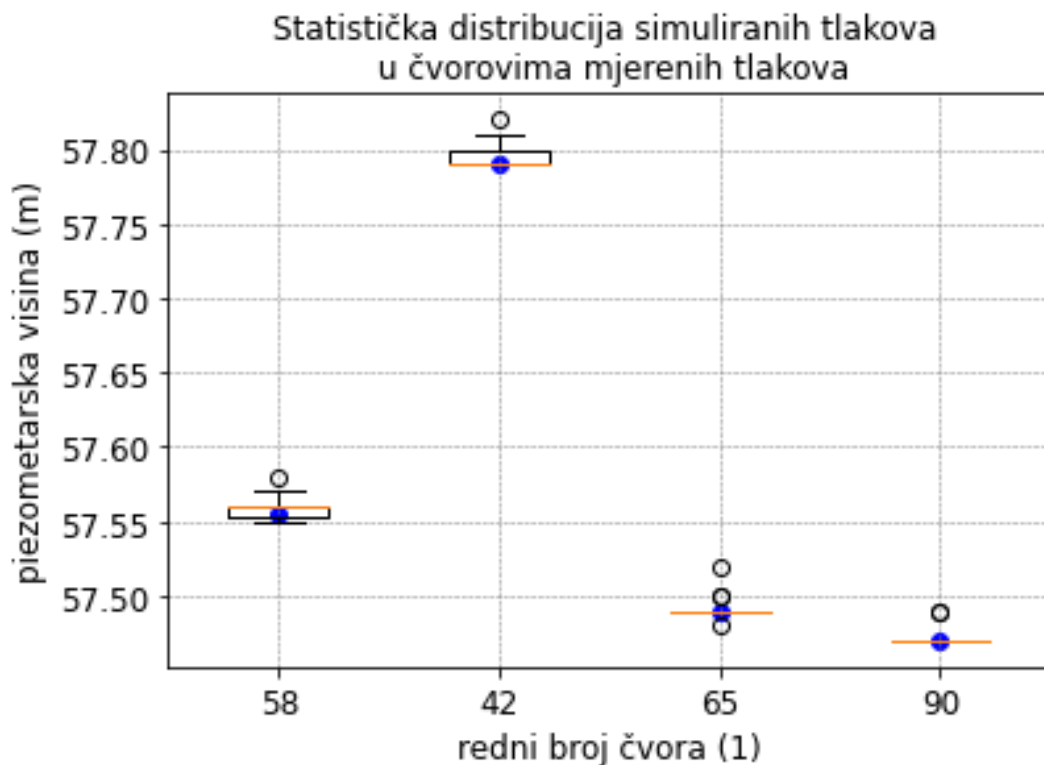
Slika 40. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.



Slika 41. prognozirani raspored gubitaka vode.

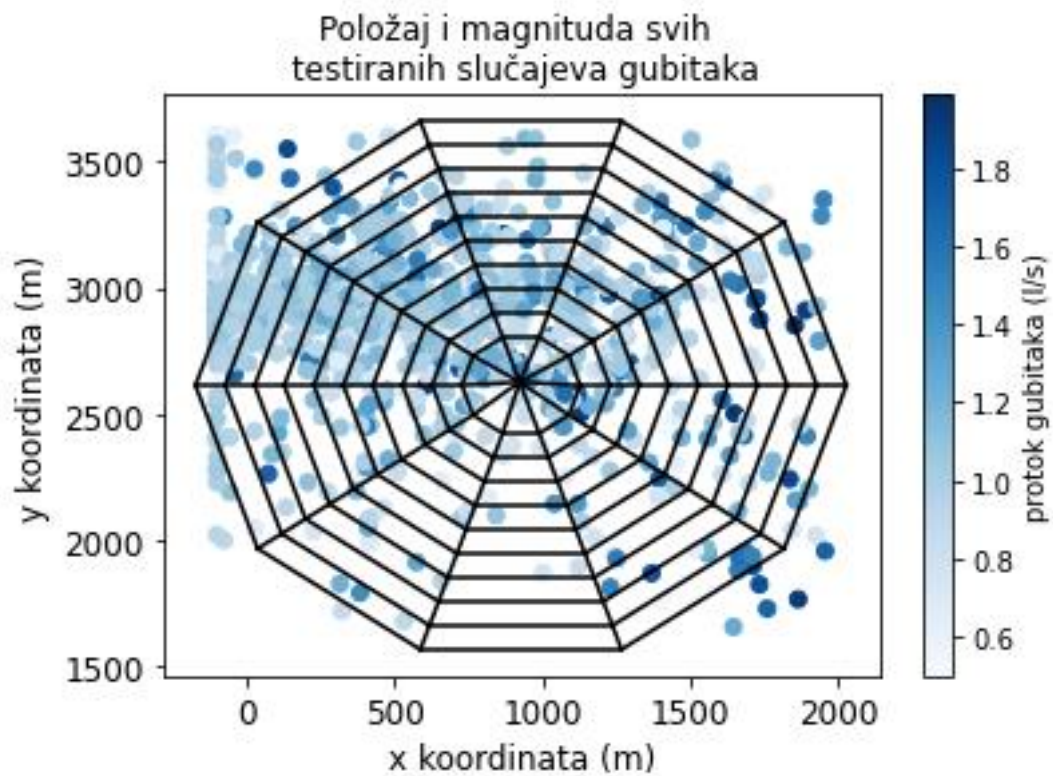


Slika 42. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.

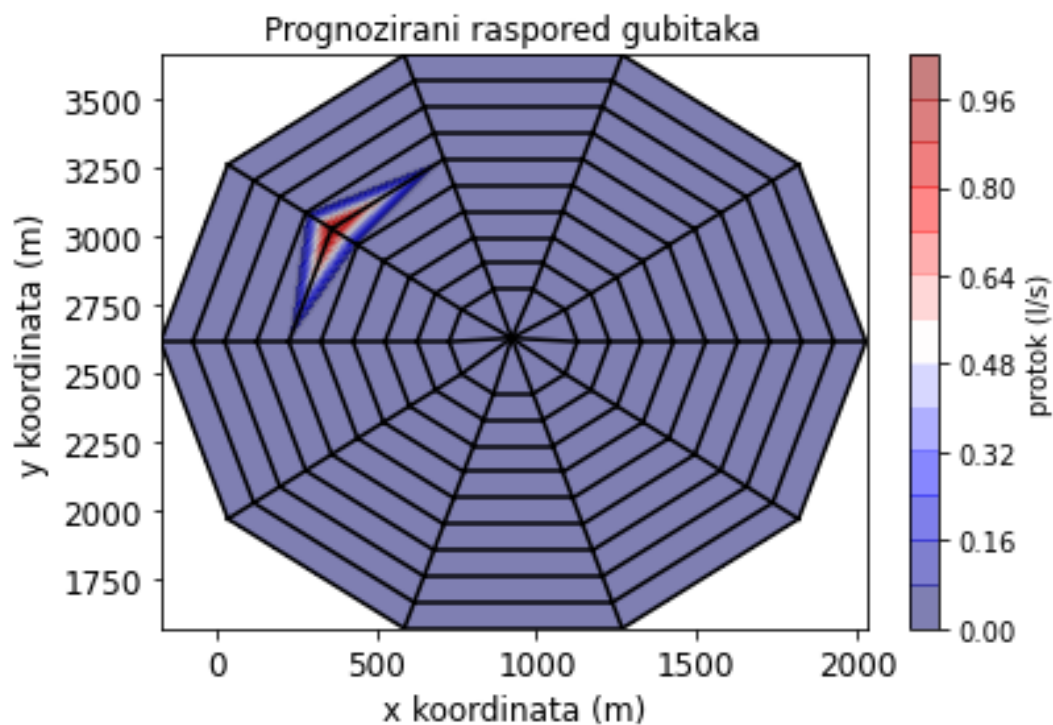


Slika 43. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.





*Slika 44. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.*



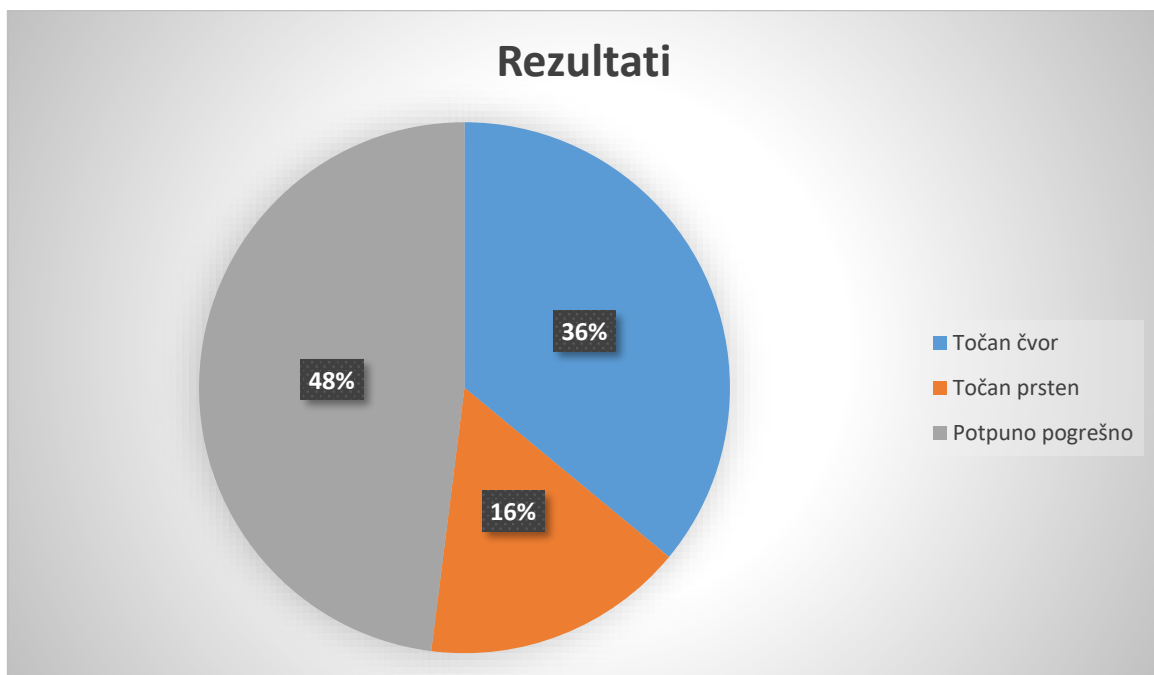
*Slika 45. prognozirani raspored gubitaka vode.*

Kao i u prošlim slučajevima PSO metoda je provela 30 evaluacija od kojih je 13 imalo bolje rješenje od prethodne te je na kraju pokazala na traženi čvor u kojem je bio gubitak vode. Također, kao i u prethodnim slučajevima metoda je pretragu započela s jednim nasumično izabranim čvorom gdje je postavila gubitak vode (Slika 40).

Nadalje, kao i u prvom slučaju i ovdje je računalna simulacija preko funkcije cilja došla do koordinata u kojim se nalazi gubitak, međutim nije pronašla dobar iznos, jer se kutijasti dijagram nije spojio, a ta situacija se može vidjeti na Slici 43.

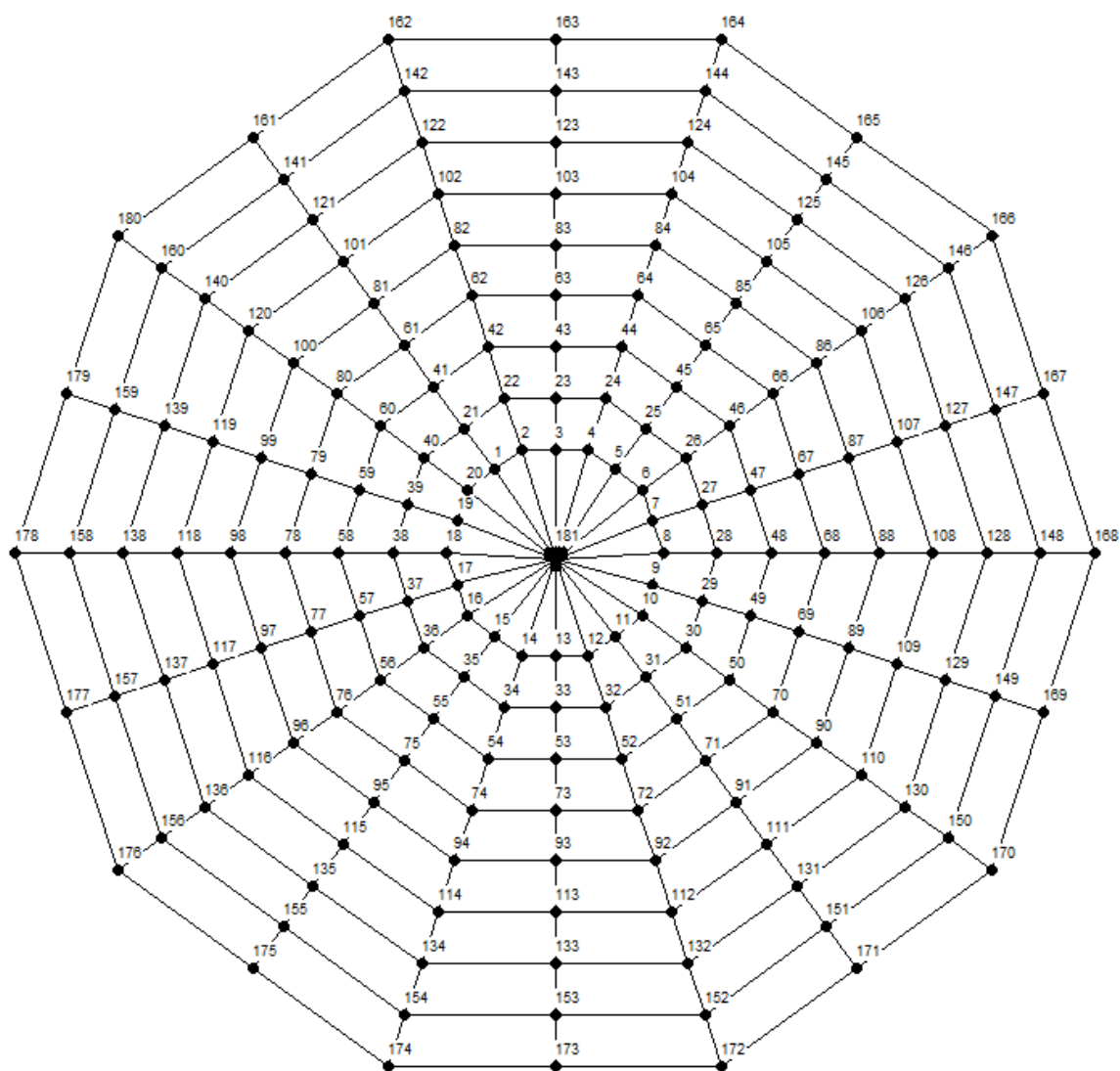
Na sljedećim Slikama može se vidjeti kako je računalna simulacija nakon 30 evaluacija došla do najboljeg rješenja preko PSO metode.

I u ovom slučaju PSO metoda je, kao i u prethodna dva, provedena 30 puta. Od ukupno 30 testova u ovom slučaju PSO metoda je pronašla čvor u kojem se nalazi gubitak vode 11 puta što od ukupnog provedenog broja postupaka čini 36%. Dobar prsten, ali krivi čvor metoda je pronašla 5 puta, što predstavlja 16% od ukupnog broja provedenih. Ostalih 14 puta PSO metoda je u potpunosti pogriješila, a to čini 48%, tj. najveći dio od ukupnog broja provedenih računalnih simulacija.



Slika 46. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 60 sa 4 lokacije mjerenja u mreži sa 100 čvorova.

## 5.4.2 PSO optimizacija mreže 180 čvorova

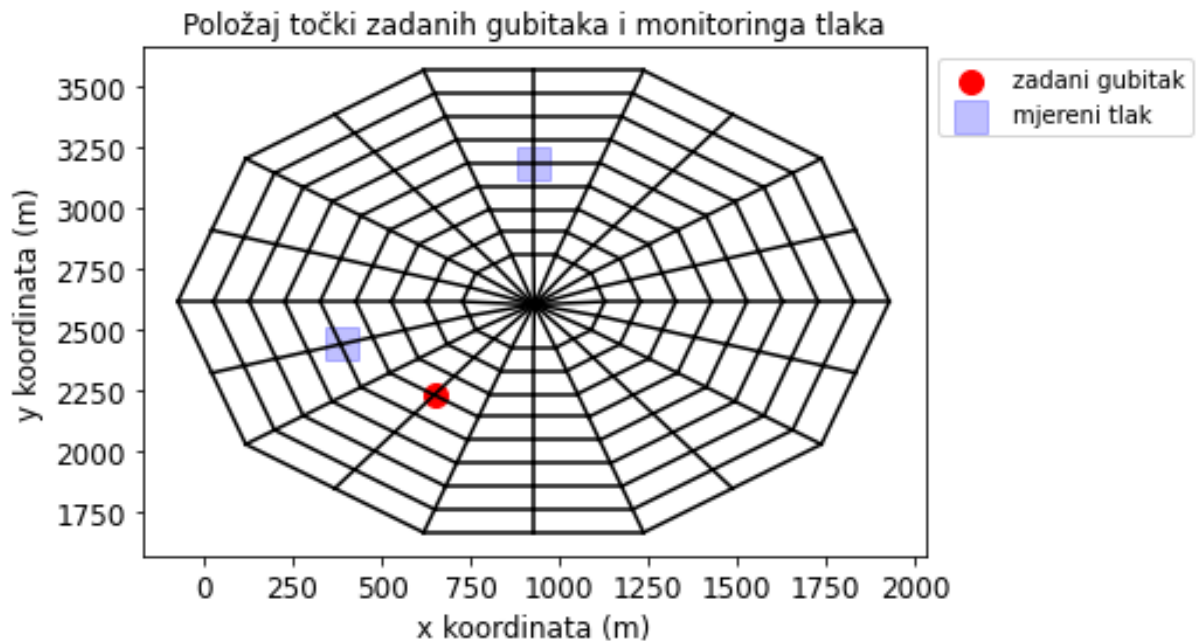


Slika 47. prikaz druge referentne kružne vodoopskrbne mreže.

Druga mreža prikazana Slikom 47, sastavljena je od 180 čvorova koji su postavljeni u 9 koncentričnih kružnica tj. prstenova i ukupno 20 pravocrtnih dionica. Ova vodoopskrbna mreža korištena je za tri računalne simulacije.

I kod ove mreže je korišten isti PSO kod kao i na mreži od 100 čvorova. Na mreži sa 180 čvorova su zadane dvije različite početne potrošnje koje su određene tablicom  $q$ , od čega je jedna dvostruko manja od druge. Ovakvi su se podaci primijenili kako bi se dobio podatak o tome hoće li veličina protoka kroz vodoopskrbni sustav imati utjecaj na uspješnost rezultata ove metode.

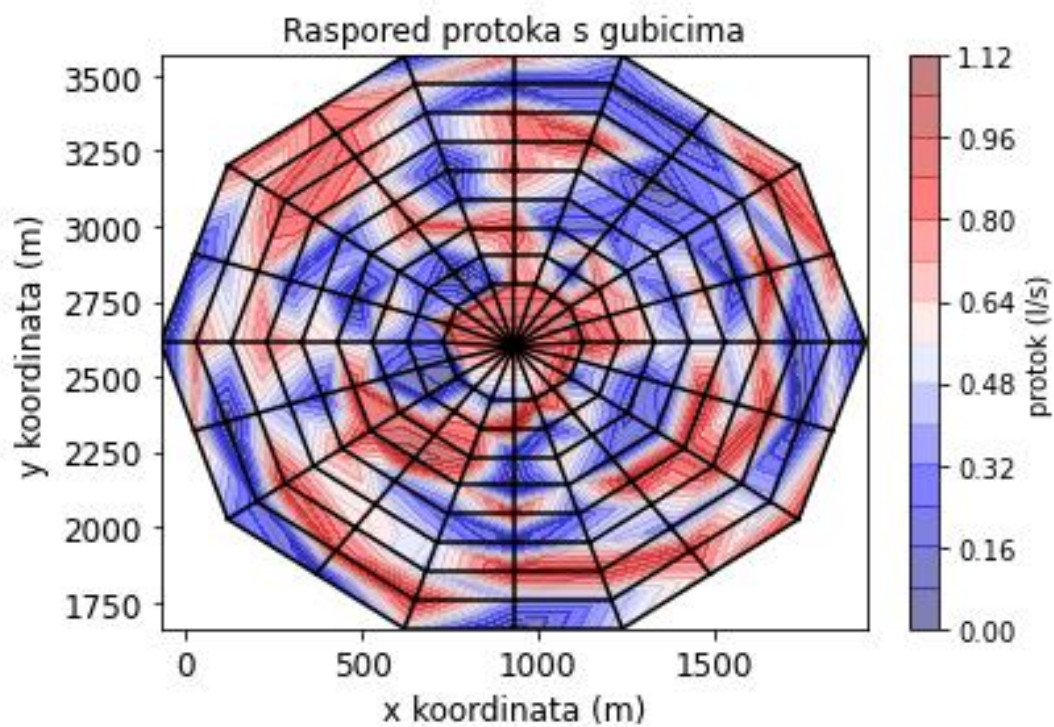
Za potrebe ove usporedbe kao referentni primjer uzet je gubitak vode protoka  $q = 1 \text{ l/s}$  u čvoru. Napravljene su usporede rezultata za slučajeve gdje su tlakovi mjereni u dva, tri i četiri tlakomjera.



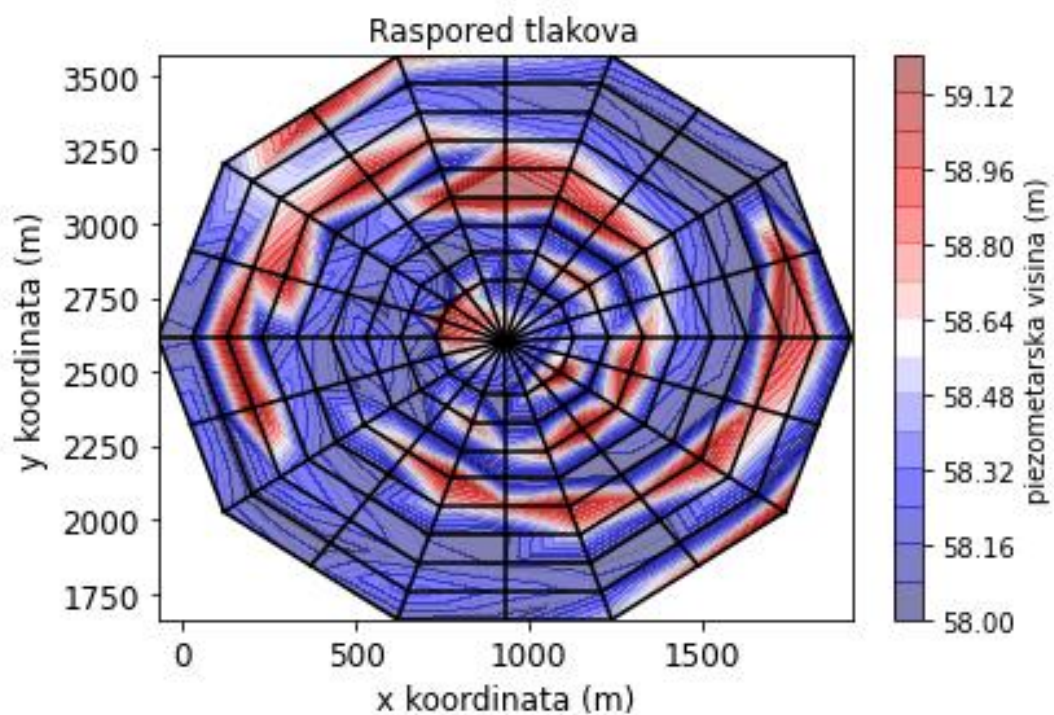
*Slika 48. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.*

U prvom slučaju korištena su dva tlakomjera koja su postavljena u čvorovima prikazani Slikom 48, dok je početni gubitak vode zadan tablicom q.

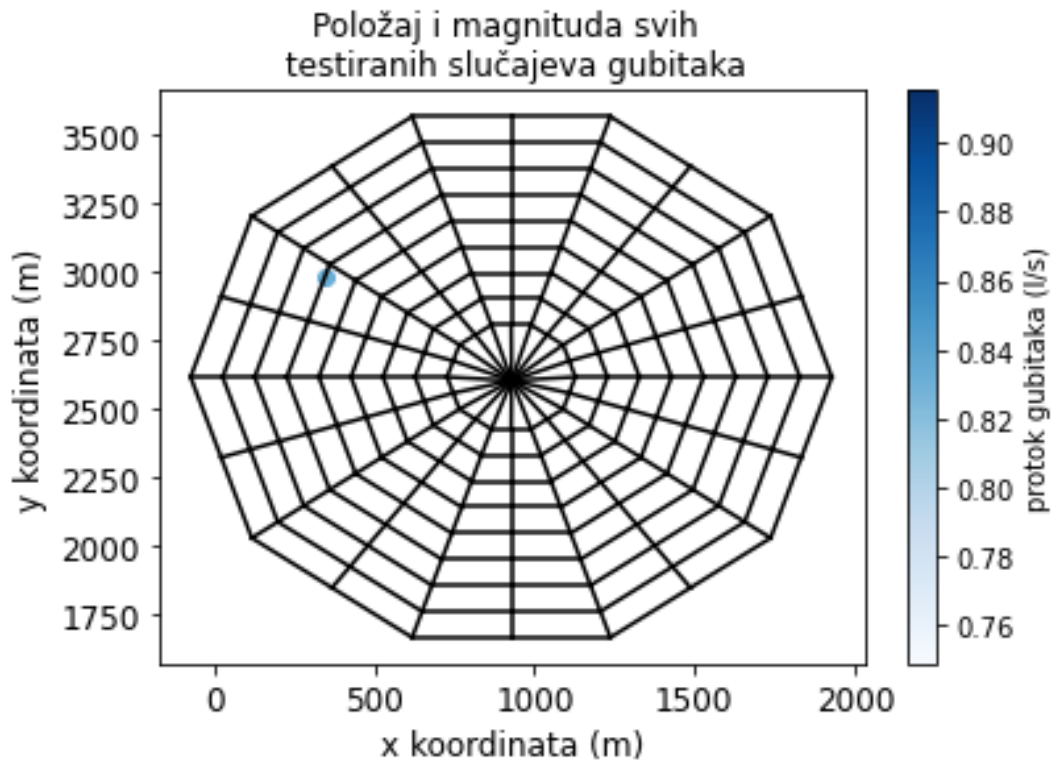
Slikom 49 grafički je prikazan raspored protoka i gubitaka vode. Slikom 50 je prikazan raspored tlakova koji ovise o zadanim protocima koji su zadani tablicom q i gubitkom vode od  $q = 1 \text{ l/s}$ .



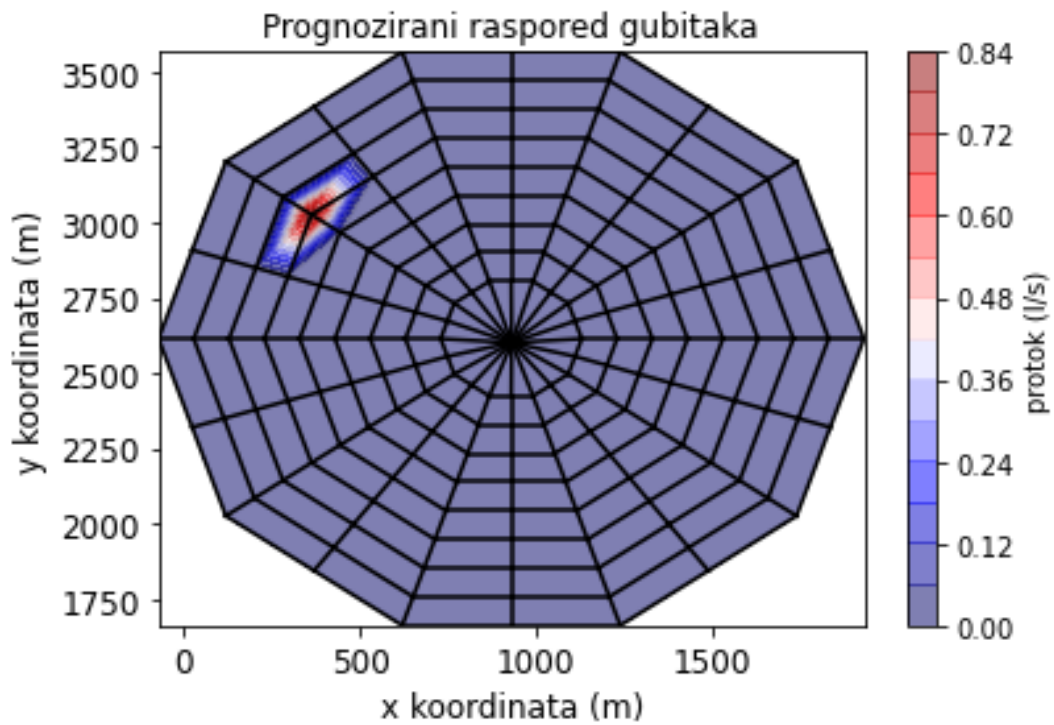
Slika 49. raspored protoka s gubicima vode.



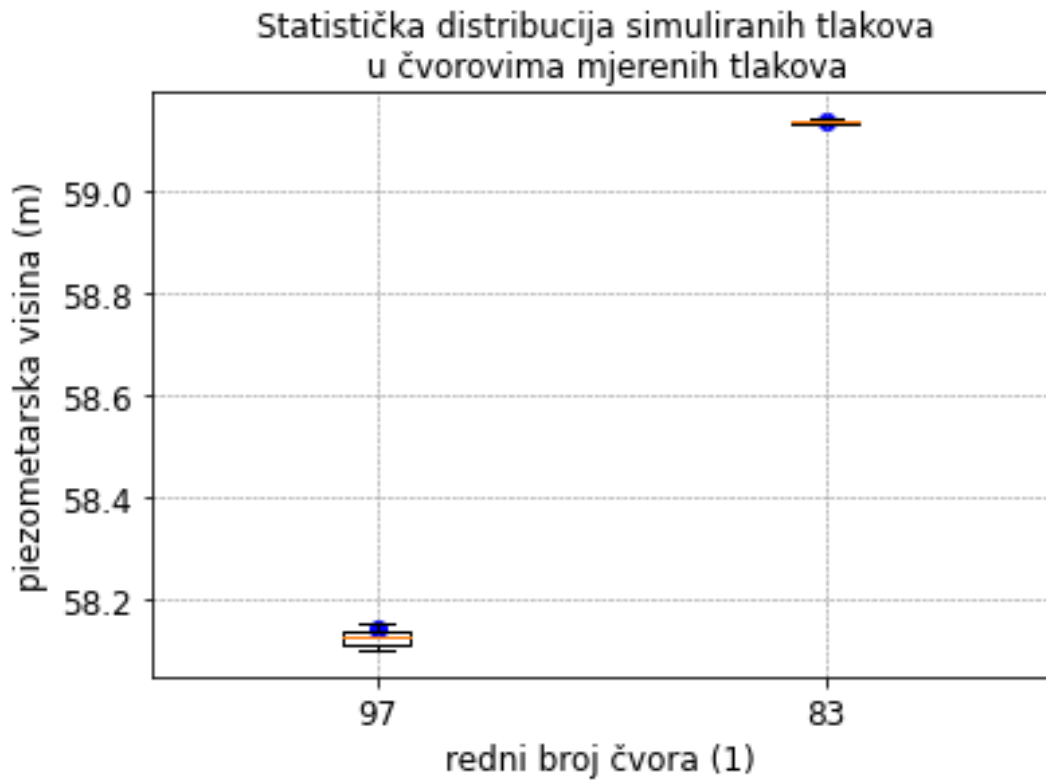
Slika 50. raspored tlakova.



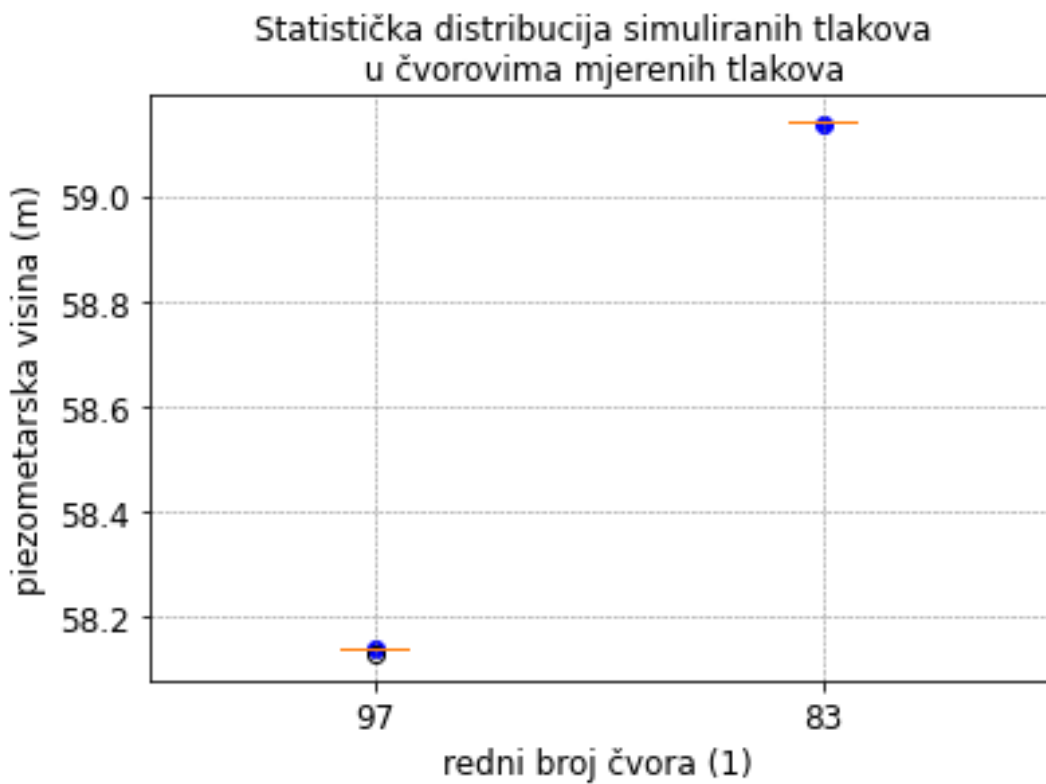
*Slika 51. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.*



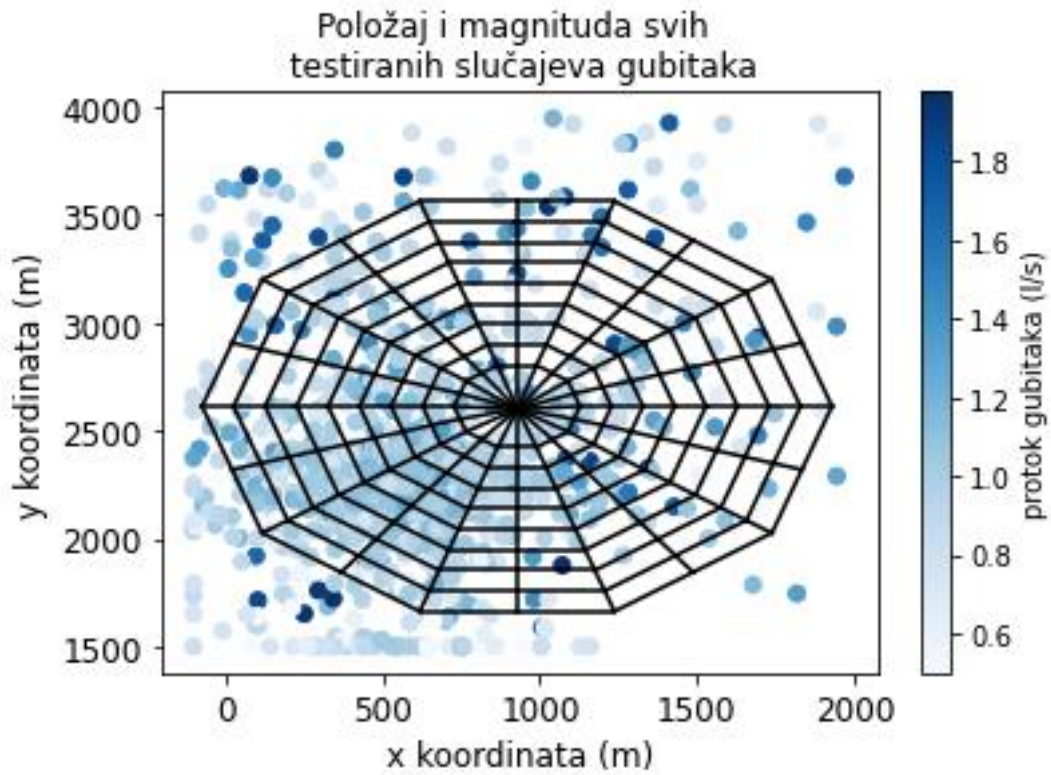
*Slika 52. prognozirani raspored gubitaka vode.*



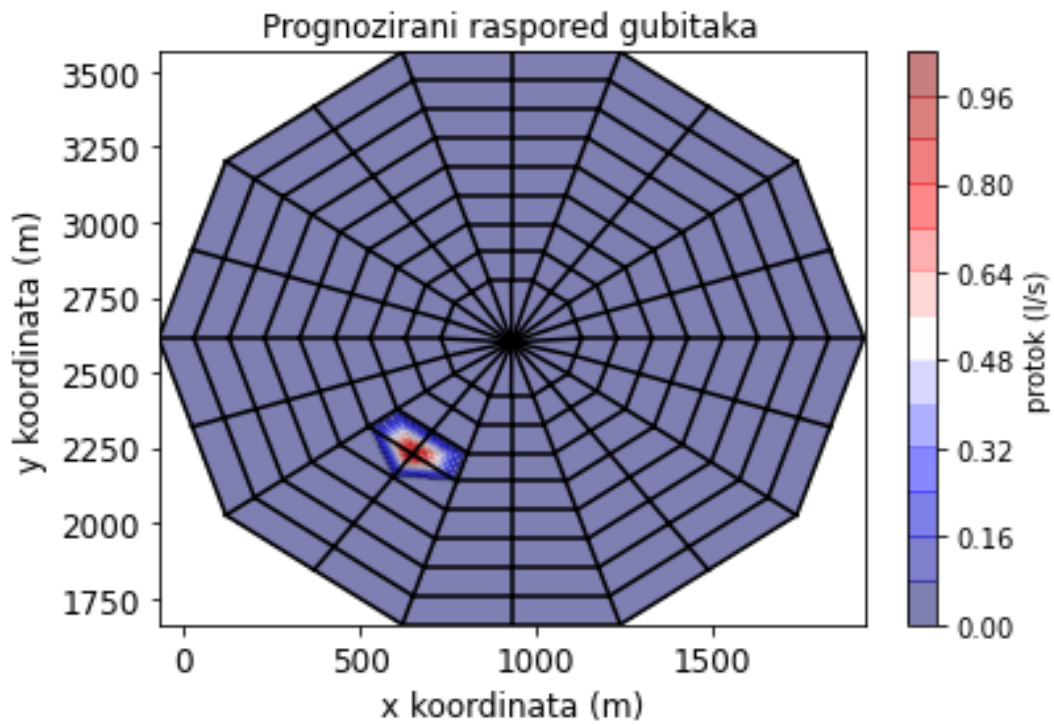
*Slika 53. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.*



*Slika 54. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.*



*Slika 55. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.*



*Slika 56. prognozirani raspored gubitaka vode.*

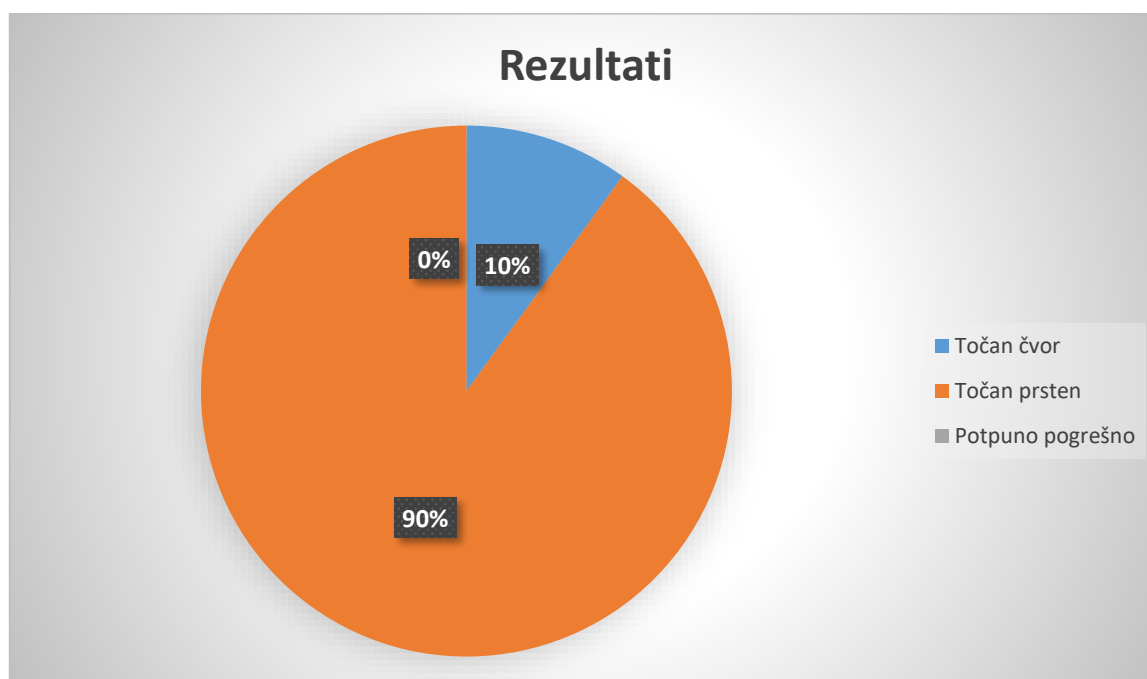


PSO metoda je provela 30 evaluacija. Povoljnije rješenje od prethodne evaluacije PSO metoda je imala 8 puta te je na kraju pronašla čvor u kojem je bio zadan gubitak vode. U ovom slučaju metoda započinje pretragu s jednim nasumično izabranim čvorom gdje sama postavi gubitak vode (Slika 51).

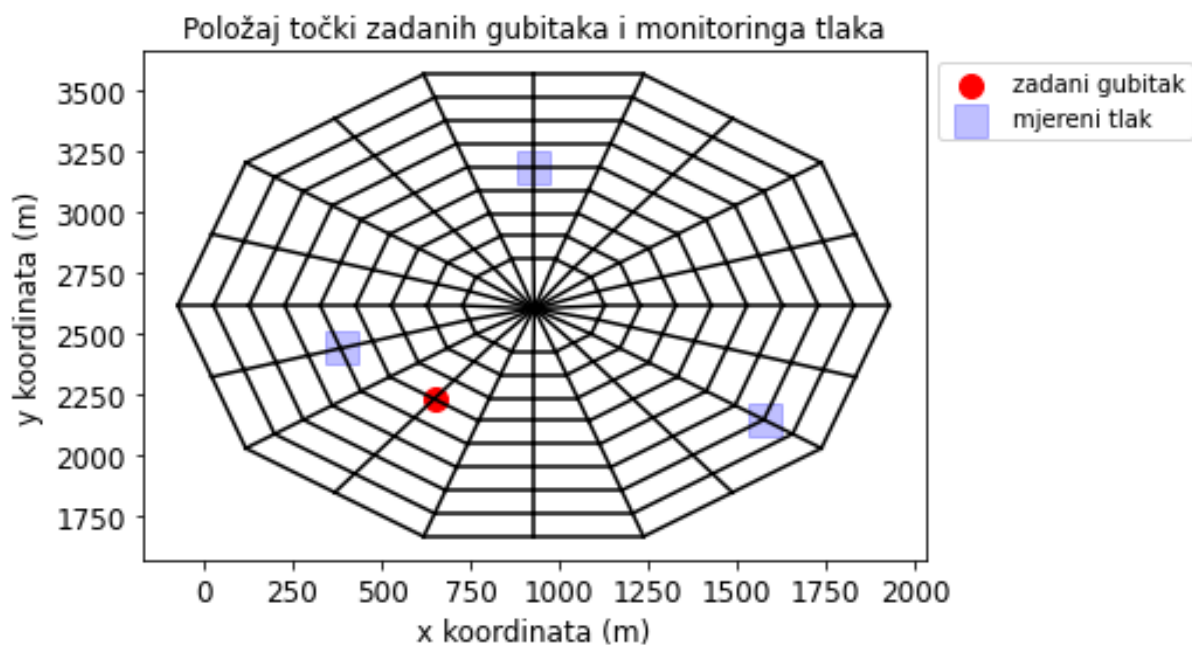
Iz Slike 54 je vidljivo kako su se brkovi kutijastog dijagrama spojili što ukazuje na to da je računalna simulacija pronašla koordinate čvora u kojem se nalazi gubitak, a ujedno je pronašao i dobar iznos gubitka u čvoru.

Na Slikama 55 i 56 može se vidjeti kako je program nakon 30 evaluacija došao do najboljeg rješenja preko PSO metode.

PSO metoda je provedena 30 puta. Od 30 ukupnih testova metoda je točan čvor pronašla u samo 3 slučaja što čini 10% od ukupnog broja provedenih računalnih simulacija. Preostalih 27 puta metoda je pronašla prsten u kojemu je zadan gubitak što čini 90% od provedenog broja računalnih simulacija. U ovom slučaju se nije desilo da je metoda u potpunosti pogriješila prsten.



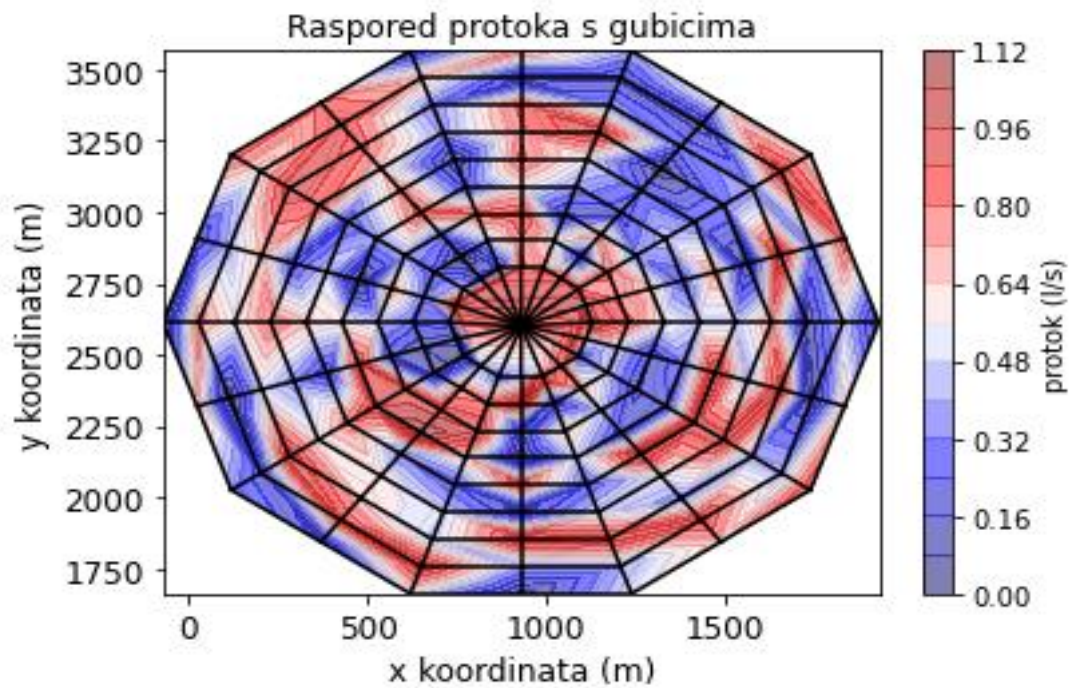
Slika 57. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 75 sa 2 lokacije mjerenja u mreži sa 180 čvorova.



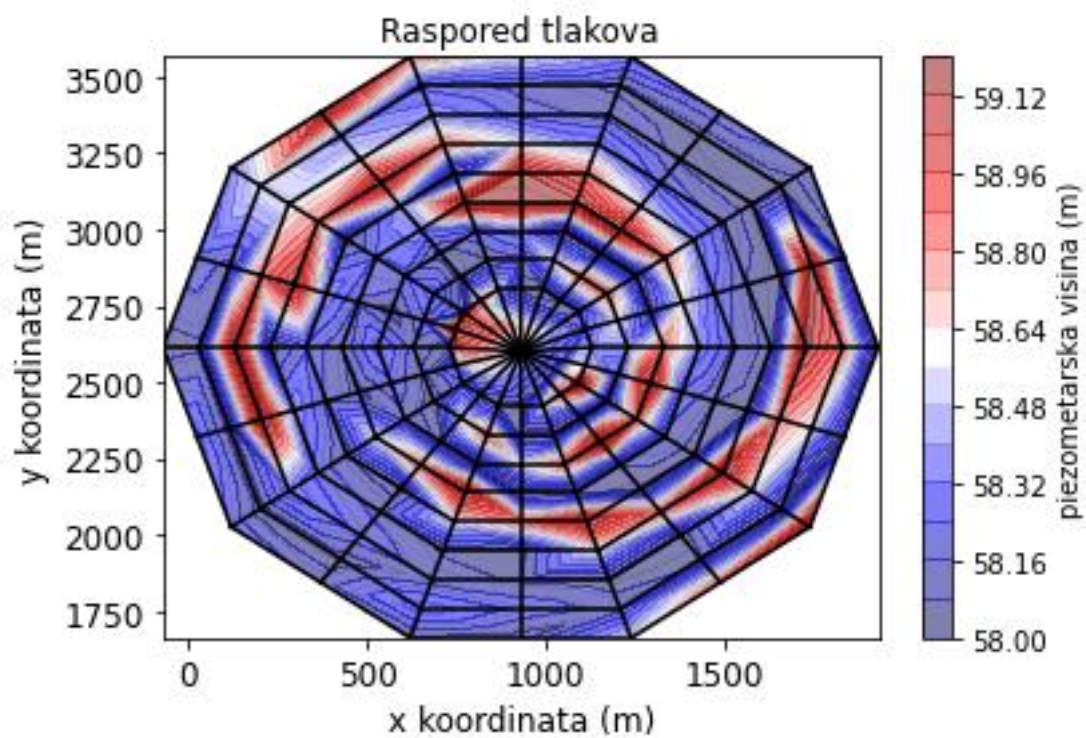
*Slika 58. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.*

Za razliku od prvog slučaja, u drugom slučaju korišteno je ukupno tri tlakomjera. Kod ovog slučaja tlakomjeri se nalazi na položajima prikazanim slikom 58, a početni gubitak vode je zadan u čvoru 75 od protoka  $q = 1 \text{ l/s}$ .

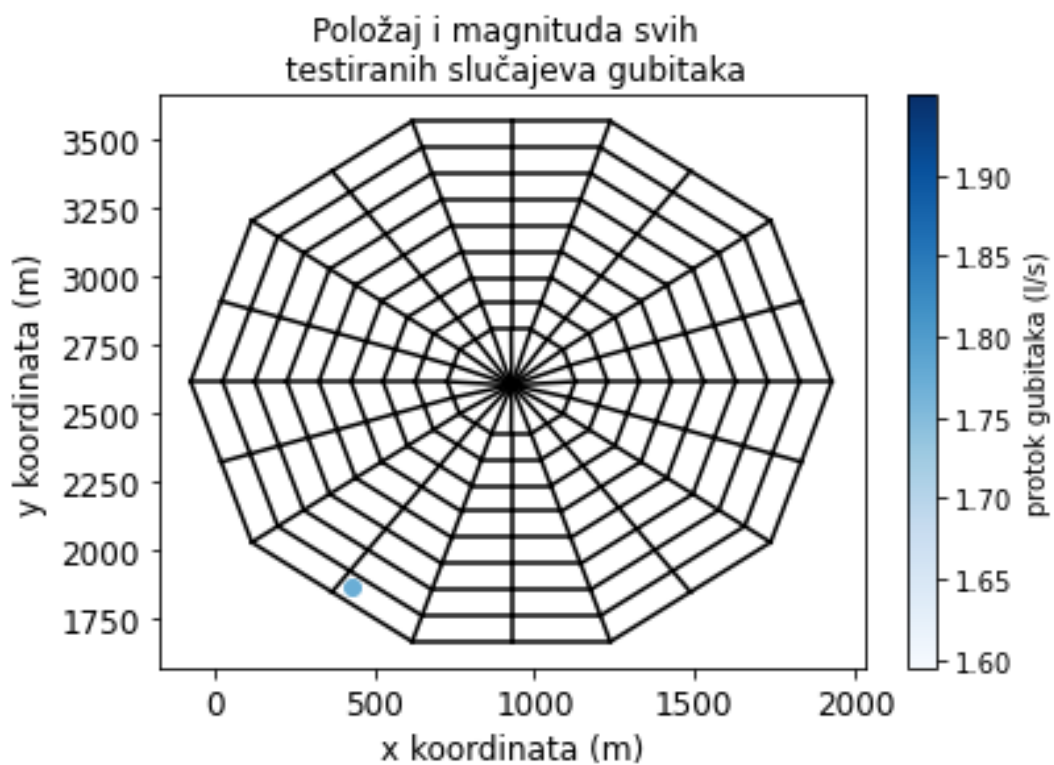
Nakon zadavanja čvorova u kojima su tlakomjeri (Slika 58), grafički se prikazuje raspored protoka u vodoopskrbnoj mreži i raspored gubitaka vode (Slika 59) te raspored tlakova u mreži koji su ovisni o protocima zadanim tablicom  $q$  i gubitkom vode (Slika 60).



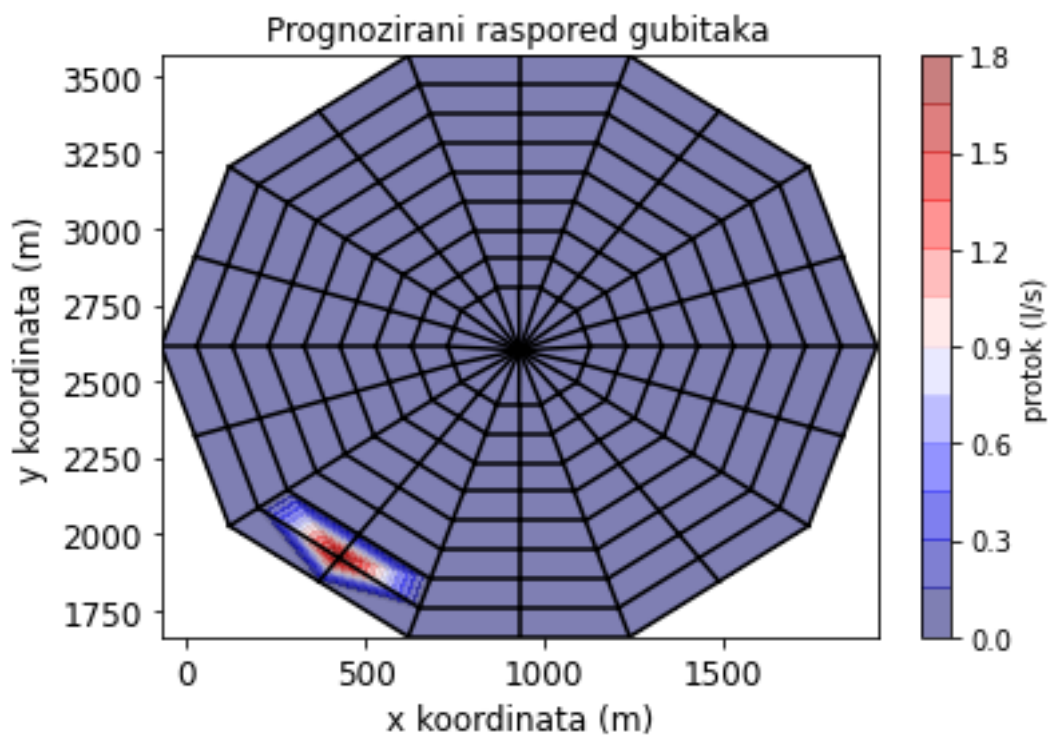
*Slika 59. raspored protoka s gubicima vode.*



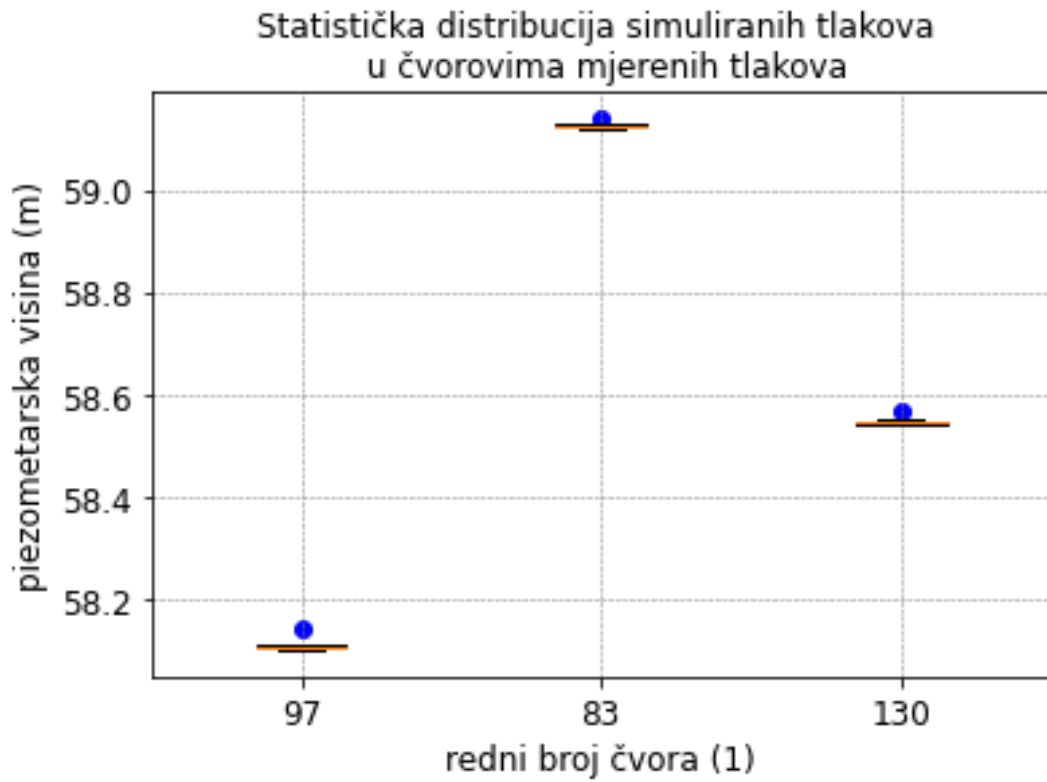
*Slika 60. raspored tlakova.*



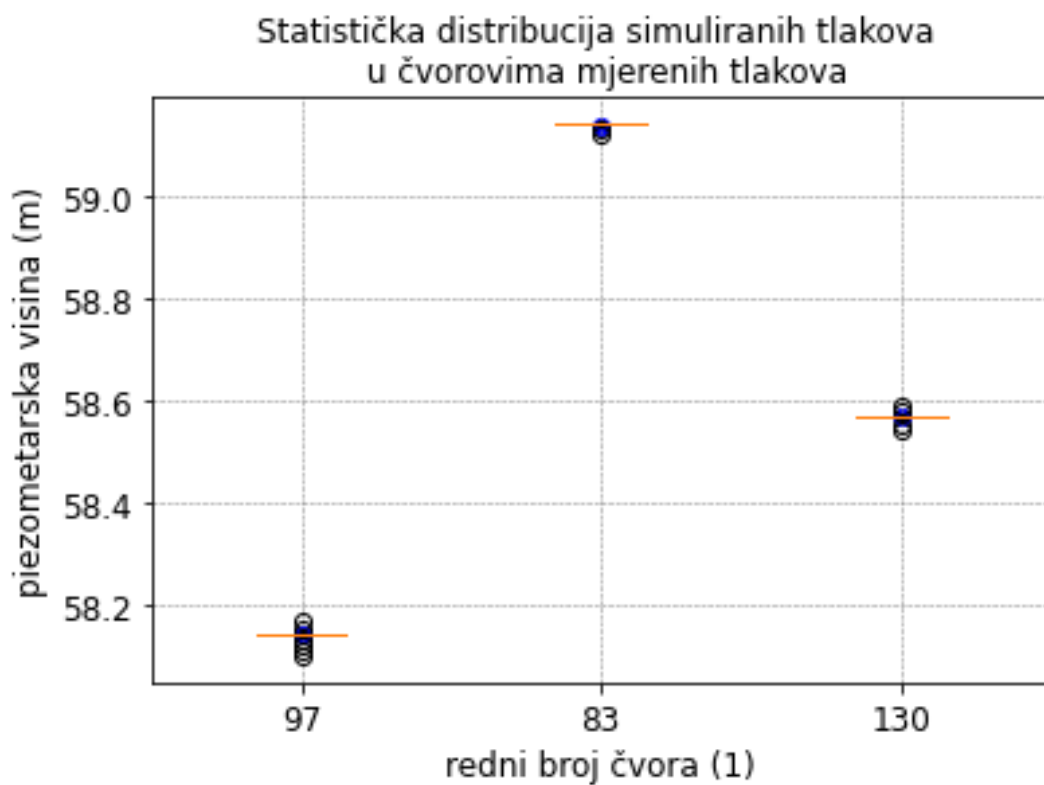
*Slika 61. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.*



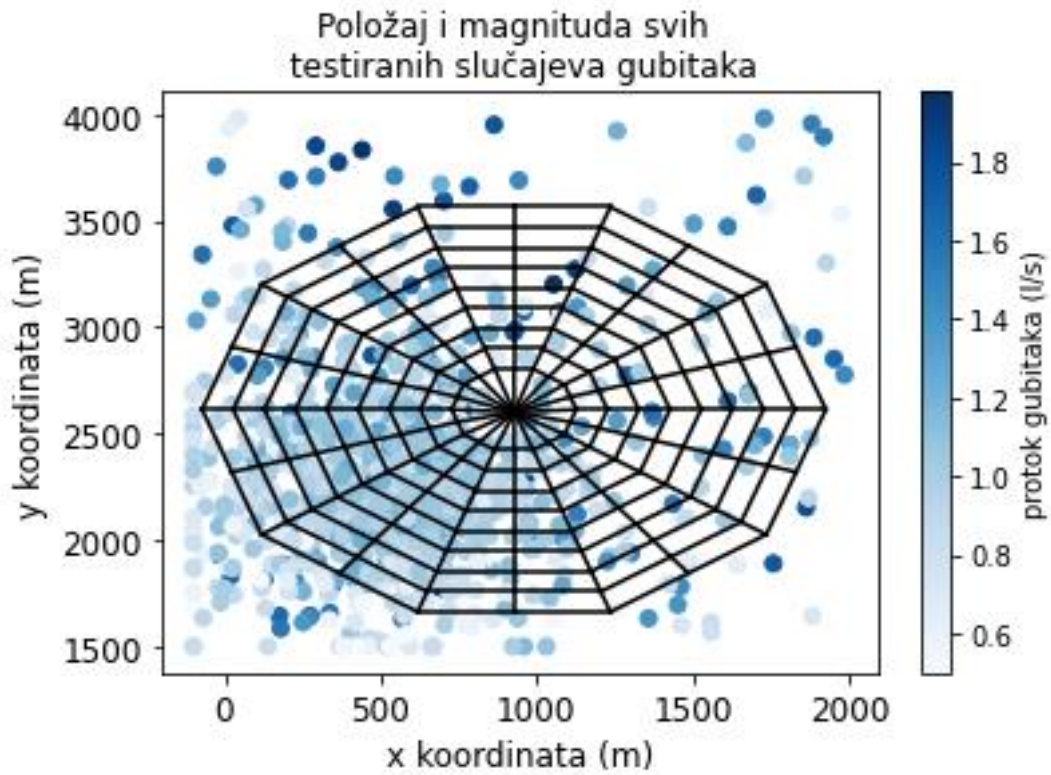
*Slika 62. prognozirani raspored gubitaka vode.*



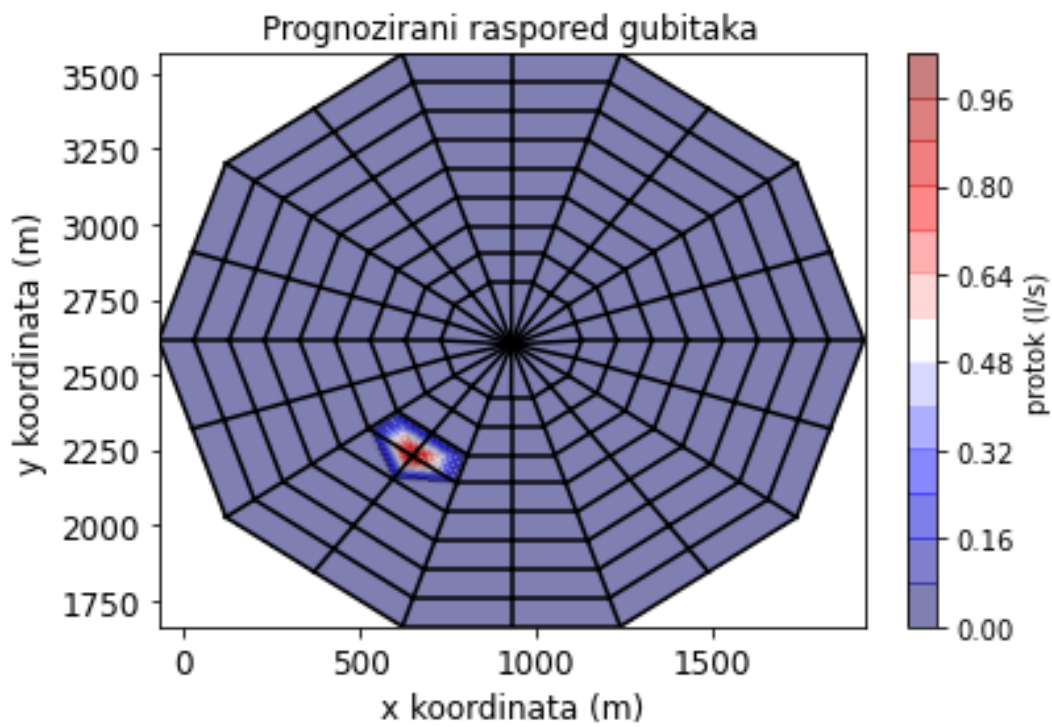
Slika 63. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.



Slika 64. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.



*Slika 65. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode.*



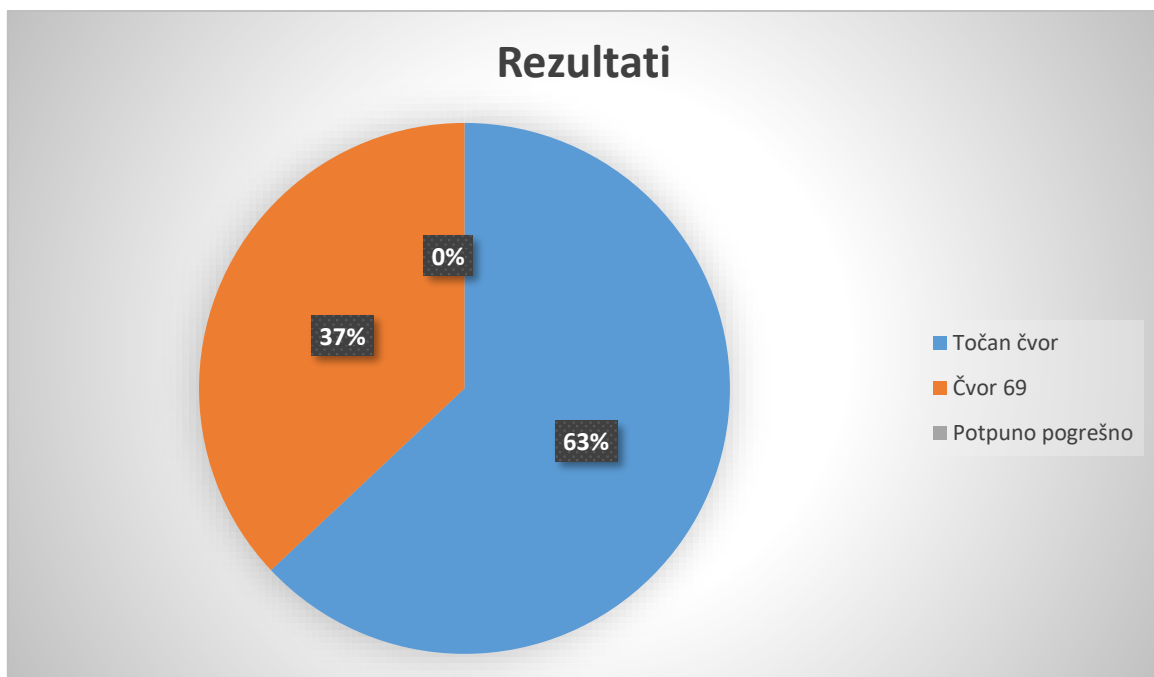
*Slika 66. prognozirani raspored gubitaka vode.*

Kao i kod prijašnjih slučajeva i ovdje je metoda započela pretragu s jednim nasumično odabranim čvorom gdje je postavila gubitak vode. Nadalje, nakon 30 evaluacija i 17 uspješnijih rješenja pronašla je čvor u kojem je bio zadan gubitak vode.

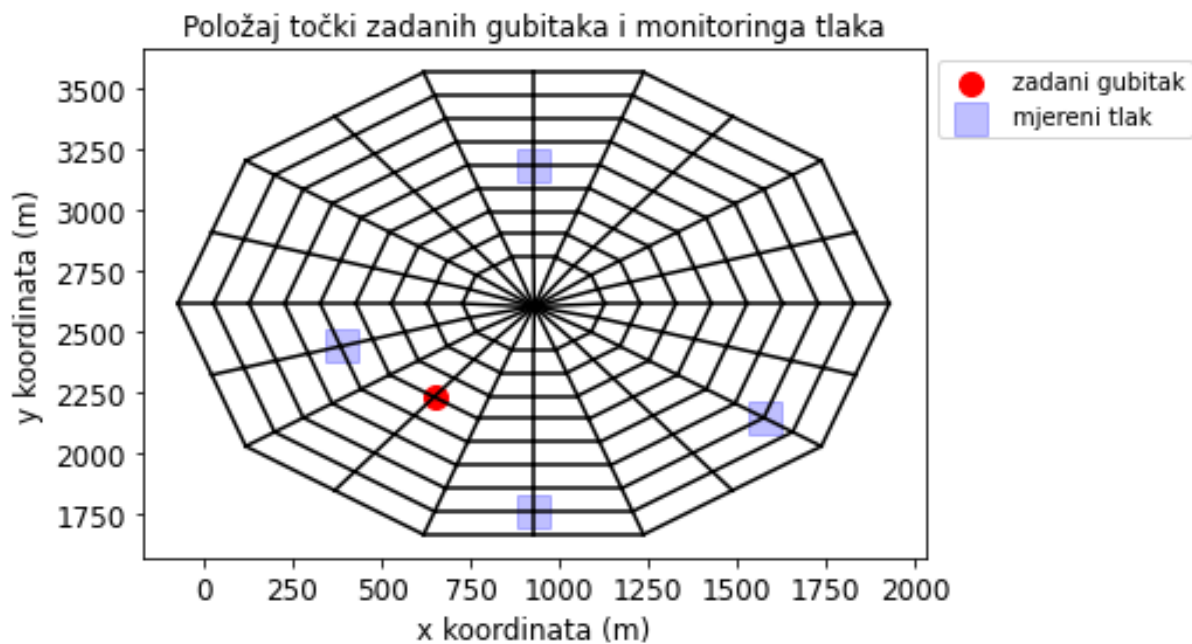
Iz kutijastog dijagrama na Slici 64, može se vidjeti da se brkovi kutijastog dijagrama spojili te da je računalna simulacija pronašla optimalno rješenje.

Na Slikama 65 i 66 može se vidjeti kako je program nakon 30 evaluacija došao do najboljeg rješenja preko PSO metode.

I kod ovog slučaja PSO metoda je provedena 30 puta. Od 30 ukupnih testova metoda je detektirala čvor u kojemu se nalazi gubitak vode u 19 slučajeva, a to čini 63% od ukupnog provedenog broja postupaka. U ostalih 11 puta metoda je pronašla dobar prsten, a to je 37% od provedenog broja postupaka. Zanimljivost kod ovog slučaja je ta da je računalna simulacija pronašla čvor u kojem je bio zadan gubitak vode ili je pokazala na čvor 69. koji se nalazi na istom prstenu, ali sa suprotne strane.



Slika 67. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka u čvoru 75 sa 3 lokacije mjerenja u mreži sa 180 čvorova.

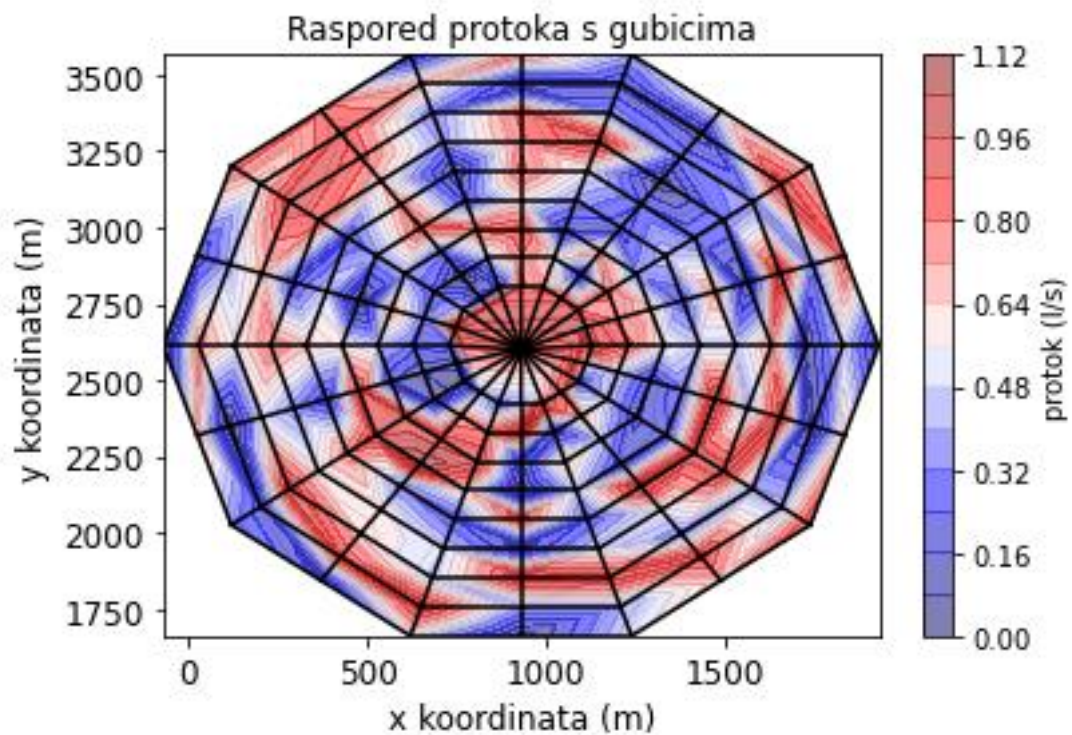


*Slika 68. prikaz odabranih čvorova u kojima su izmjereni tlakovi i čvora u kojem je zadan gubitak vode.*

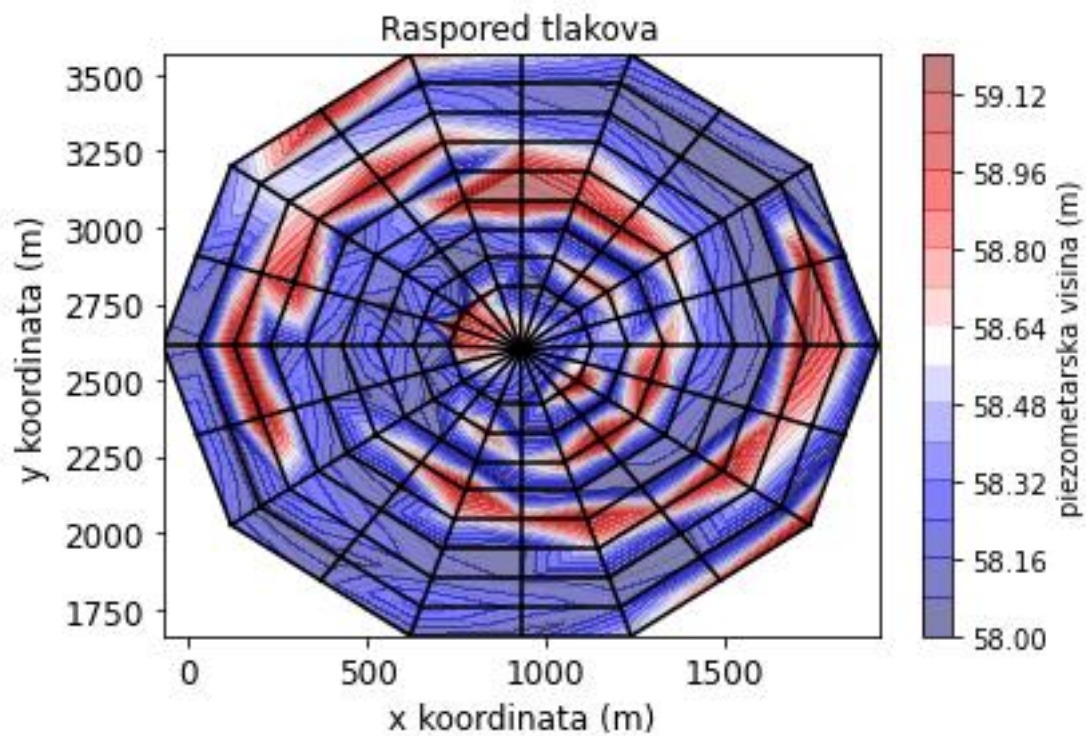
Za razliku od drugog slučaja, u ovom slučaju korišteno je ukupno četiri tlakomjera i to na način koji je prikazan slikom 68. Početni gubitak vode je zadan u čvoru 75 protoka  $q = 1 \text{ l/s}$ .

Kao i u prijašnjim slučajevima i u ovom se nakon zadavanja čvorova u kojima su tlakomjeri (Slika 68), grafički prikazuje raspored protoka u vodoopskrbnoj mreži i raspored gubitaka vode (Slika 69), te raspored tlakova u mreži koji su ovisni o protocima zadanim tablicom  $q$  i gubitkom vode (Slika 70).

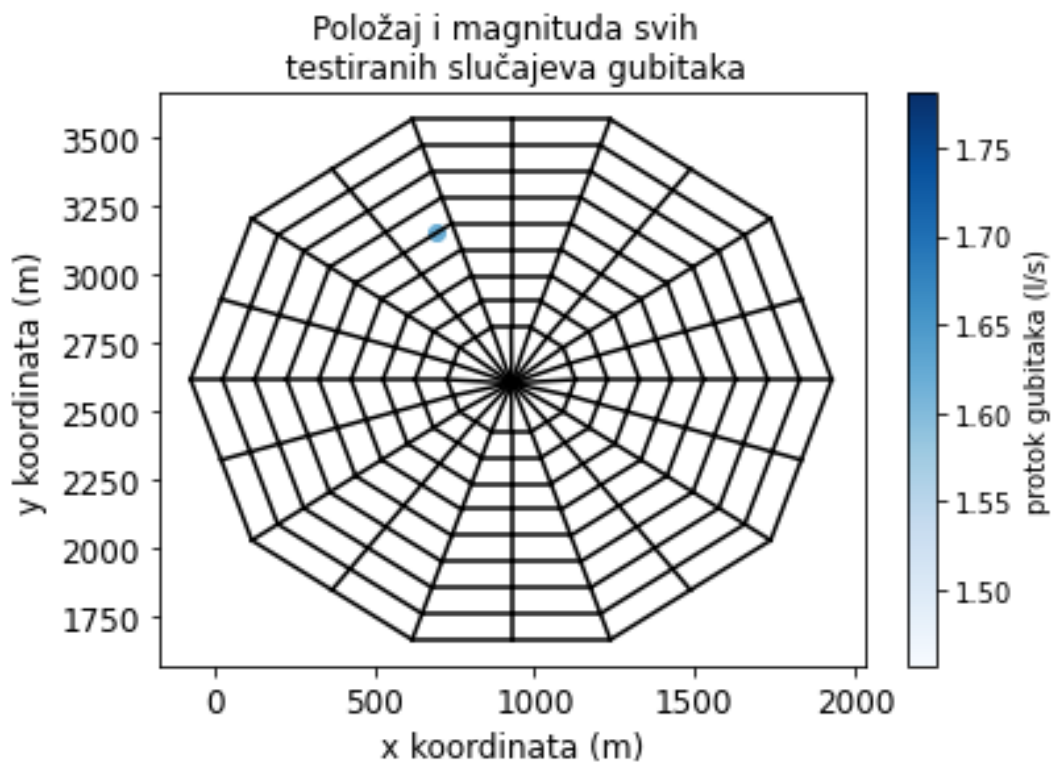




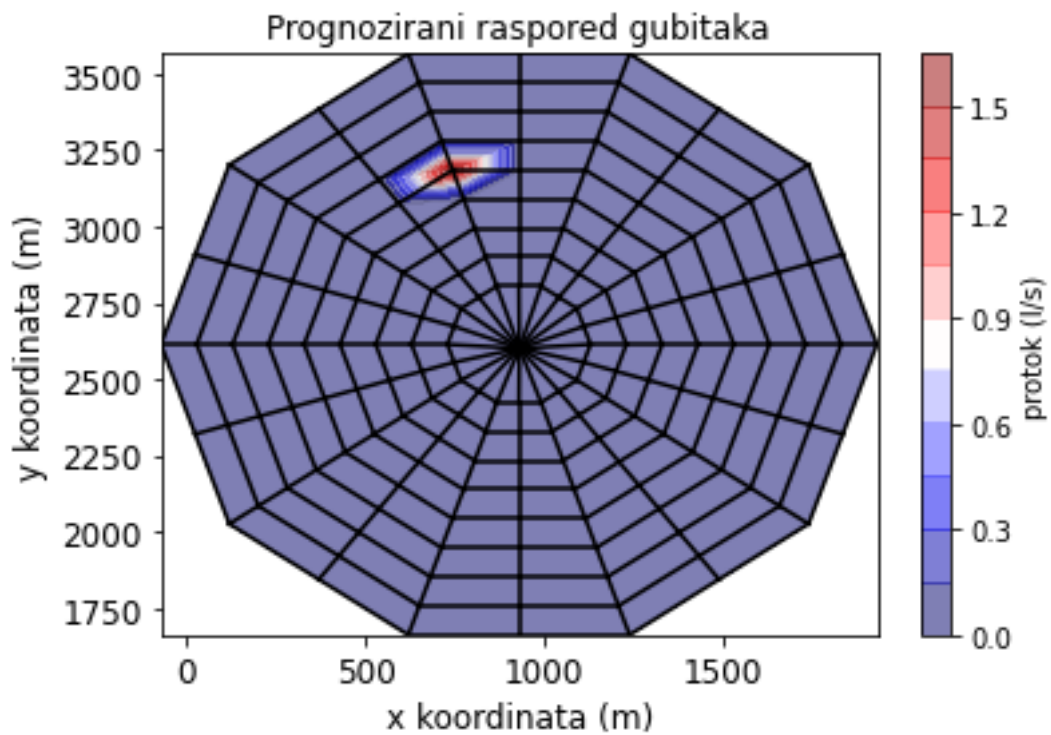
*Slika 69. raspored protoka s gubicima vode.*



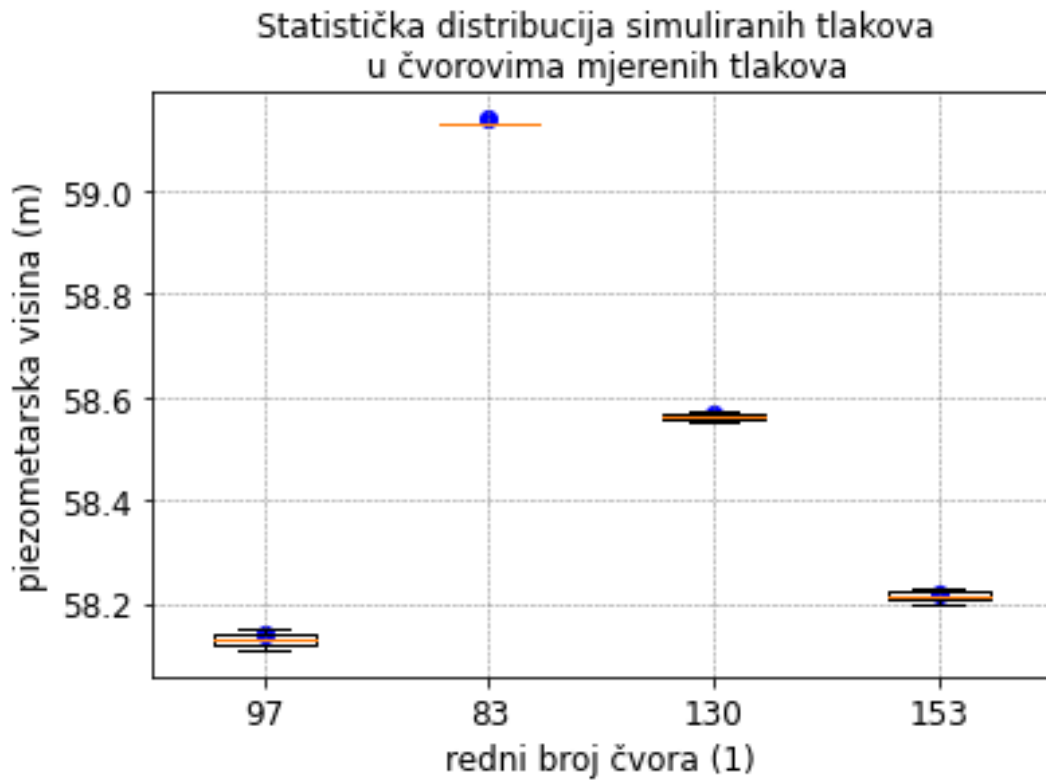
*Slika 70. raspored tlakova.*



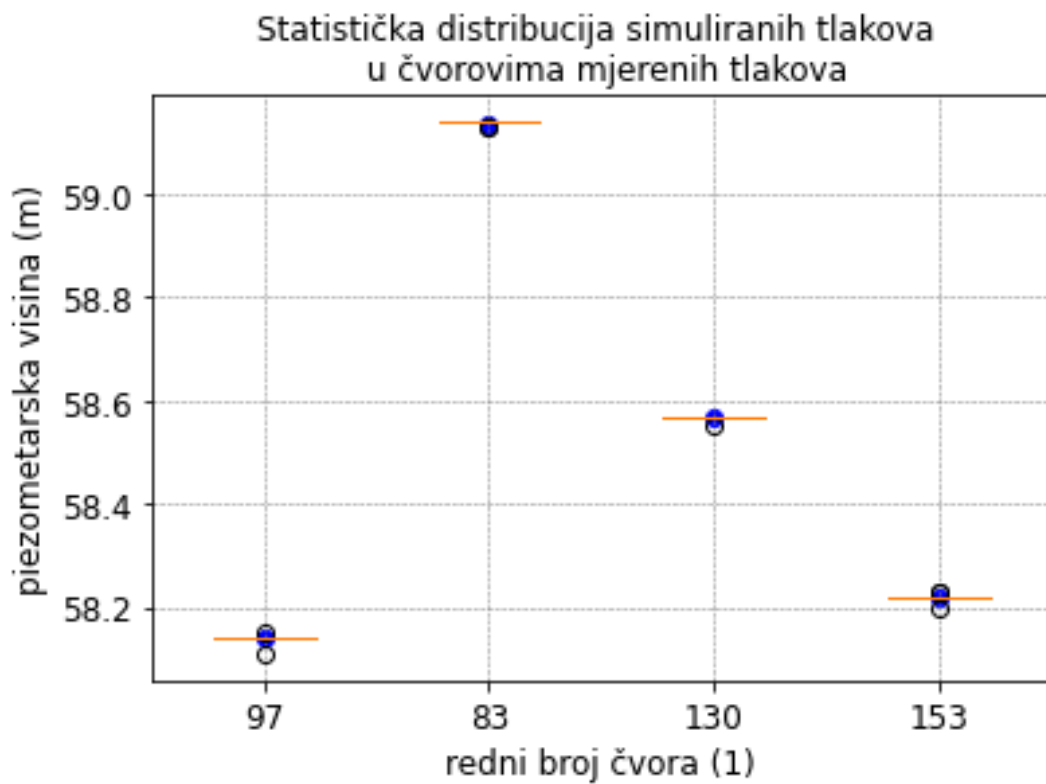
*Slika 71. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode, početno stanje.*



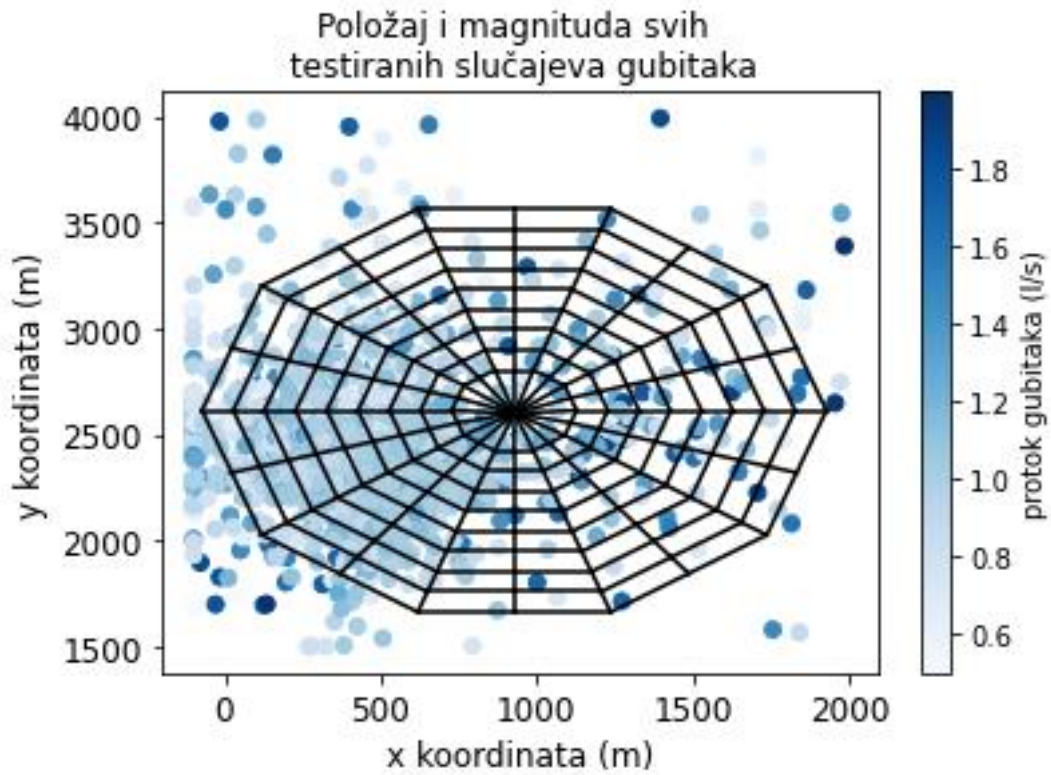
*Slika 72. prognozirani raspored gubitaka vode.*



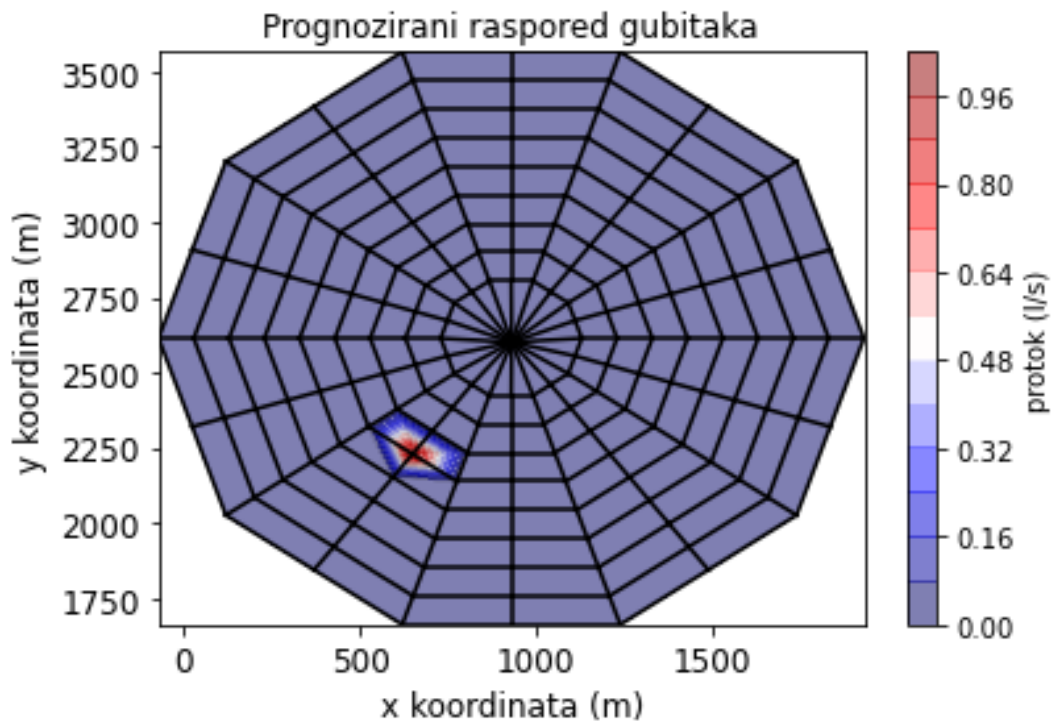
Slika 73. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Početno stanje.



Slika 74. funkcija cilja prikazana kutijastim dijagramom. Krajnji rezultat.



*Slika 75. položaj i protok svih testiranih slučajeva gubitaka vode,*



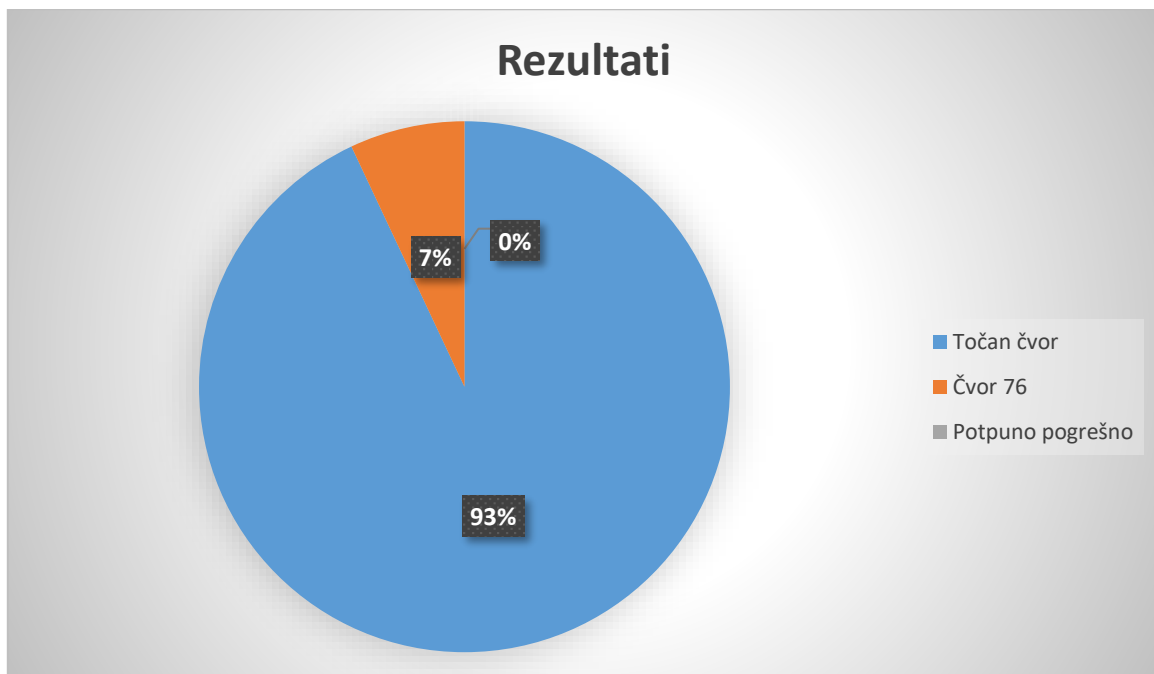
*Slika 76. prognozirani raspored gubitaka vode.*

Kao što je iz prijašnjih slučajeva vidljivo i ovdje metoda započinje svoju pretragu s jednim nasumično odabranim čvorom u kojem je postavila gubitak vode. Također, provedeno je 30 evaluacija te je nakon 18 boljih rješenja pronašla čvor u kojem je bio zadan gubitak vode.

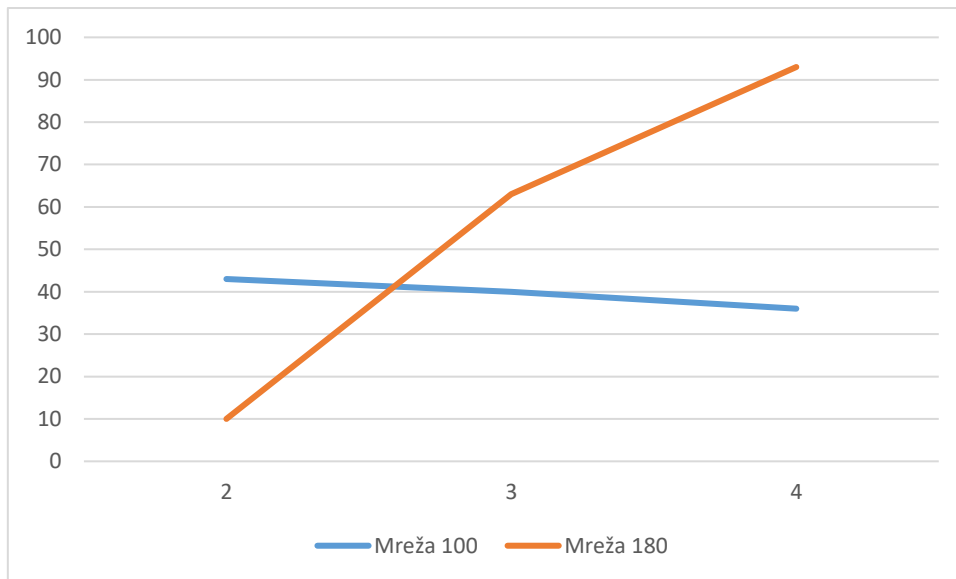
Nadalje, iz prikazanog kutijastog dijagrama može se vidjeti da su se brkovi spojili te da je na kraju program pronašao optimalno rješenje.

I u ovom slučaju program je nakon 30 evaluacija došao do optimalnog rješenja preko PSO metode što je prikazano Slikama 75 i 76.

Kao što je prije napisano PSO metoda je provedena 30 puta. Od 30 ukupnih testova metoda je pronašla točan čvor u 28 slučaja (93% od ukupnog provedenog broja računalnih simulacija). U dva puta metoda je pronašla čvor koji se nalazi odmah do čvora koji je tražen te to čini 7% slučajeva.



*Slika 77. grafički prikaz odnosa rezultata PSO metode za slučaj gubitka vode u čvoru 75 sa 4 lokacije mjerenja u mreži sa 180 čvorova.*



*Slika 78. prikaz točnosti podataka s obzirom na broj mjernih mjesta.*

## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj se diplomski rad sastoji od opisa i analize PSO metode detekcije gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu. Uz pomoć fiktivnog idealnog modela vodoopskrbnog sustava pripremljenog u programu Epanet analizirala se PSO metoda detekcije. Proračuni su provedeni koristeći se kodom u programskom jeziku Python. Ispitale su se dvije vodoopskrbne mreže različitih veličina. Za svaku mrežu provedena su tri seta po trideset proračuna. U svakom setu gubitak vode i mjerna mjesta se nisu mijenjala zbog toga da bi se moglo vidjeti kako se program ponaša i hoćemo li dobiti egzaktno rješenje.

Na mreži od 100 čvorova događa se zanimljiva situacija jer iz provedenih računalnih simulacija se vidi da što je manje mjernih mjesta, računalna simulacija u više slučajeva dolazi do uspješnih rezultata. Razlog tome je što u toj mreži ima manje linijskih gubitaka vode nego u mreži od 180 čvorova a to preko Darcy – Weisbach-ove jednadžbe daje manje razlike tlakova u mreži. U ovom slučaju računalna simulacija je najviše puta pronašla traženi čvor u situaciji kada su postavljena dva mjerna mjesta i točnost je bila 43%. Dok je na mreži od 180 čvorova uspješnost rezultata rasla s brojem mjernih mjesta tlakova u mreži. S 4 mjerna mjesta dolazi se do gotovo 100% točnosti. Provedeni su još računalne simulacije za mrežu od 180 čvorova kada su protoci u mreži upola manji. Rezultati u ovom slučaju su bili gotovo identični kao i kada su bili postavljeni početni protoci. Metoda je ispitana i na slučajevima kada postoje više gubitaka vode ali u tom slučaju metoda nije bila uspješna.

Analize provedene u okviru ovo diplomskog rada ne omogućuju formiranje deklarativnih zaključaka jer se odnose na specifične vodoopskrbne mreže i uvjete toka.

## LITERATURA

- [1] D. Ziegler, F. Sorg, P. Fallis, K. Hübschen, „Uputstva za smanjenje gubitaka vode“
- [2] W. Kingdom, R. Liemberger, P. Marin, The Challenge of Reducing NonRevenue Water (NRW) in Developing Countries – How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting, Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series, Paper No. 8, The World Bank, Washington, DC, 2006, pp. 1–40.
- [3] D. Vouk et al. : Usporedba različitih načina iskazivanja vodnih gubitaka uz osvrt na hrvatsku praksu
- [4] D. Simon, Evolutionary optimization algorithms: biologically-Inspired and populationbased approaches to computer intelligence. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013. Accessed: Jul. 17, 2021. [Online]. Available: <http://site.ebrary.com/id/10722521>
- [5] F. Naglič: „Gubici vode u javnoj vodoopskrbi“, završni rad, Građevinski fakultet Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2019.
- [6] Vlada Republike Hrvatske: „Višegodišnji program gradnje komunalnih vodnih građevina za razdoblje do 2030. godine“, NN 147/21.
- [7] V. Travaš, „Optimizacijski problemi“, predavanje, Građevinski fakultet Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.
- [8] M. Mašek, „Posebna svojstva simpleks algoritma“, završni rad, Fakultet organizacije i informatike Varaždin, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin, 2018.
- [9] J. Barač, „Upravljanje robotom primjenom genskih algoritama“, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [10] R. Hassan (2004). Particle swarm optimization: Method and applications. *Prezentacija na <http://ocw.mit.edu>*.
- [11] Web članak, G. Radanović, Pregled heurističkih algoritama, preuzeto s: [http://www.zemris.fer.hr/~golub/ga/studenti/seminari/2007\\_radanovic/index.html](http://www.zemris.fer.hr/~golub/ga/studenti/seminari/2007_radanovic/index.html)