

## Višekriterijumska analiza sektorizacije vodovodne mreže

Željko Vasilić<sup>1</sup>  
Damjan Ivetić<sup>2</sup>  
Miloš Stanić<sup>3</sup>

APSTRAKT: Sektorizacija odnosno podela vodovodne mreže na osnovne zone bilansiranja (eng. District Meter Areas – DMAs) predstavlja najisplativiju i opšte prihvaćenu strategiju za kontrolu vodnog bilansa, pritisaka i smanjenje gubitaka u mreži. Izbor zona bilansiranja nije jednoznačan zbog čega je identifikacija optimalnog rasporeda izuzetno zahtevan zadatak, naročito u slučaju postojećih distributivnih sistema. Pored osnovnih kriterijuma (npr. veličina zona i dužina mreže) postupak sektorizacije treba da obuhvati i dodatne „lokalne“ kriterijume specifične za mrežu koja se razmatra kao što su minimalni broj dovoda, zadovoljenje protivpožarnog opterećenja itd. U ovom radu je prikazana metodologija za sektorizaciju zasnovana na primeni novog indeksa uniformnosti mreže (eng. Uniformity Index) koja omogućava identifikaciju klastera u mreži ujednačenih po potrošnji. Optimizacioni algoritam, podržan inženjerskom logikom, je korišćen za određivanje položaja kontrolnih uređaja (zatvarača i merača protoka) na granicama prethodno identifikovanih klastera, čime se uspostavljaju zone bilansiranja. Osnovni kriterijumi za vrednovanje i izbor optimalnog rešenja su minimalna ulaganja u neophodne intervencije u mreži i očuvanje pouzdanosti sistema. Rezultati testiranja metodologije na realnom primeru vodovodne mreže, sa primenom lokalnih kriterijuma, potvrđuju da može biti od značajne koristi u inženjerskoj praksi u procesu sektorizacije.

Ključne reči: Vodovodni sistemi, Sektorizacija, Optimizacija, Zone bilansiranja

## Multi-criteria analysis of water distribution network sectorization

ABSTRACT: Sectorization of Water Distribution Network (WDN) into District Meter Areas (DMAs) is a proven measure for proactive leakage and pressure control. Sectorization of WDN into an optimal system of DMAs is a hard task to achieve, especially for the existing and continuously operating WDN. Beside general criteria (e.g. DMA size, network length), sectorisation process should be driven by the case-specific criteria such as required number of feeds, fire flow regulations etc. This paper presents sectorization algorithm that utilizes newly developed uniformity index which drives the sectorization process and identifies clusters in the network with uniform demand. Engineering heuristic is coupled with optimization algorithm in order to search the broader range of feasible solutions and identify (near)optimal positions of flow-meters and isolation valves on clusters' boundary edges, converting them to DMAs. Least investment for field implementation and maintaining the same level of WDN's operational efficiency are adopted as main criteria for solution evaluation and selection of preferable solution. Testing algorithm on a part of real-life WDN, subjected to the specific local design criteria, proved it can be a valuable decision support tool for sectorization process.

Keywords: Water distribution network, Sectorization, Optimization, DMAs

---

<sup>1</sup>Dr Željko Vasilić, Građevinski fakultet Beograd, docent, [zvasilic@grf.bg.ac.rs](mailto:zvasilic@grf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup>Dr Damjan Ivetić, Građevinski fakultet Beograd, docent, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

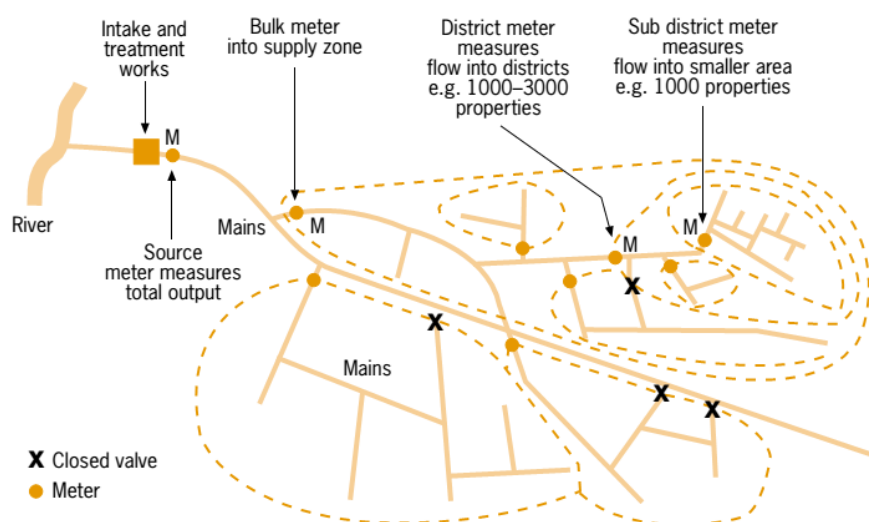
<sup>3</sup>Dr Miloš Stanić, Građevinski fakultet Beograd, vanredni profesor, [mstanic@grf.bg.ac.rs](mailto:mstanic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Kroz istoriju, vodovodni sistem ima ulogu da obezbedi kontinualno vodosnabdevanje korisnika dovoljnom količinom vode koja je bakteriološki ispravna. Zadovoljenje ovih standarda je obezbeđeno jasno definisanom zakonskom regulativom (Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće - Sl. list SRJ, br. 42/98), koja međutim ne propisuje standarde za kontrolu stanja i efikasnosti samog vodovodnog sistema za vodosnabdevanje. Obzirom da je voda osnovni životni resurs na čiju dostupnost sve više utiču klimatske promene, suše i rast broja stanovnika, posebna pažnja se posvećuje unapređenju efikasnosti vodovodnih sistema.

Od ukupno isporučene vode u distributivnu mrežu samo deo čini legalna potrošnja. Legalna potrošnja koja se obračuna predstavlja prihodovanu vodu. Neobračunata legalna potrošnja sa gubicima čini neprihodovanu vodu (eng. Non-Revenue Water - NRW). Gubici se dele na stvarne i prividne. Stvarni su posledica neodržavanja i lošeg izvođenja mreže, usled čega dolazi do curenja na cevovodima, rezervoarima i priključcima. Prividne gubitke čine pre svega ilegalna potrošnja i greške merenja. Problem neprihodovane vode je značajan i prisutan u svim vodovodnim mrežama, samo u različitoj meri. Krajem devedesetih godina prošlog veka u značajnom delu evropskih zemalja gubici u vodovodnim sistemima su prevazilazili vrednosti od 25% (npr. Italija 37%) a u slabo razvijenim zemljama i 45% (Evropska Agencija za zaštitu životne sredine). U periodu do 2010. godine napravljen je značajan napredak na polju smanjenja ovih gubitaka, naročito u zemljama zapadne Evrope (npr. Holandija manje od 10%), čiji se trend i dalje nastavlja. S druge strane, u slabije razvijenim zemljama, pored nedostatka finansijskih sredstava neophodnih za ulaganja u mere za smanjenje gubitaka, komunalna preduzeća su dodatno suočena sa lošim stanjem infrastrukture, koje povećava potencijal za porast gubitaka u sistemu i smanjenje njegove efikasnosti. Vodovodna preduzeća će često odustati od rekonstrukcije mreže (redovnog održavanja) zbog zahtevanih značajnih ulaganja koja kasnije neće moći da povrate kroz naplatu potrošnje jer je ekonomska cena vode teško ostvariva.

Efikasno upravljanje vodovodnim sistemima, pre svega podrazumeva kontrolu vodnog bilansa kroz efikasniji monitoring i smanjenje gubitaka u sistemu. Jedna od osnovnih strategija je sektorizacija mreže tj. definisanje osnovnih zona bilansiranja (OZB, eng. District Meter Area -DMA) koje olakšavaju kontrolu vodnog bilansa i detekciju gubitaka u mreži (Ostfeld et al., 2008). Jedna zona OZB-a se definiše kao deo vodovodnog sistema koji ima jedan ili više ulaza i izlaza na kojima se mere protoci a od ostatka sistema se izoluje ukidanjem cevi ili postavljanjem izolacionih zatvarača – Slika 1 (Burrows et al., 2000).



Slika 1. Shematski prikaz sektorizacije mreže tj. uspostavljanja osnovnih zona bilansiranja (Farley, 2001)

Figure 1. Schematic of District Meter Area design (Farley, 2001)

OZB moraju biti definisane na jednostavan i logičan način da bi se zadovoljili primarni zahtevi za kontrolu bilansa i detekciju gubitaka. Međutim, da bi se formirale OZB potrebno je izvršiti fizičke modifikacije na mreži, kao što su ukidanje pojedinih cevi i zatvaranje zatvarača, što može uticati na pritiske u sistemu i na kvalitet snabdevanja potrošača. Istorijski, gradski vodovodni sistemi su projektovani kao izrazito prstenasti da bi se korisniku obezbedilo snabdevanje sa više strana i ostvarila veća pouzdanost sistema. Prethodno opisanim intervencijama na mreži se praktično menja ovaj koncept pa su pouzdanost sistema, nivo zaštite od požara kao i zahtev za jednakim snabdevanjem u slučaju restrikcija samo neki od aspekata koji mogu biti ugroženi. Cilj je i da definisane zone budu adekvatne veličine, što je vrlo proizvoljan parametar i često se odnosi na broj veza unutar zone i dužinu mreže.

Ne postoji jasna regulativa koja propisuje način sektorizacije mreže, već niz preporuka koje daju smernice za ovu svrhu. Tako se npr. mogu naći preporuke o veličini zone od 1.000 do 3.000 priključaka (WAA & WRC, 1985), o ukupnom broju stanovnika u jednoj zoni od 2.500 – 12.500 ili o ukupnoj dužini mreže od 5 do 30 km (Butler, 2000). Međunarodna asocijacija za vode (International Water Association - IWA) preporučuje svoj dokument koji može poslužiti inženjerima prilikom zoniranja mreže (Morrison et al., 2007) a slične preporuke daje i svetska zdravstvena organizacija (Farley, 2001).

Obzirom na veliki broj kriterijuma i ograničenja, u praksi je definisanje zona proces baziran na ekspertskom znanju, odnosno, na inženjerskom pristupu u toku koga se metodom probanja testiraju različita varijantna rešenja na hidrauličkom modelu. Iskustveno znanje se svakako ne može zanemariti i treba da bude uključeno u proces kreiranja zona, međutim, ovakav pristup zahteva dosta vremena a odabrano rešenje ne mora biti optimalno. Razvojem računarskih resursa u proteklom periodu pristupilo se razvijanju metodologija za dimenzionisanje i automatsku podelu mreže zasovanih na primeni optimizacionih algoritama (najčešće metode enumeracije i genetskih algoritama) koje bi omogućile pretragu šireg skupa mogućih rešenja (Alvisi & Franchini, 2014; Bragalli et al., 2012; Di Nardo et al., 2014; Giustolisi & Ridolfi, 2014; Hajebi et al., 2016). Međutim, postojeći algoritmi gotovo isključivo koriste jedan ili dva osnovna kriterijuma za podelu (npr. veličina zone) uz eventualni dodatak nekog empirijskog kriterijuma. Valjanost rešenja se procenjuje na osnovu indikatora performansi sistema, najčešće ne više od dva (cena koštanja rešenja i indeks pouzdanosti (Todini, 2000)). Dodatno, postojeći algoritmi su uglavnom primenjivani na test primere iz literature (eng. benchmark) što dovodi u pitanje njihove upotrebljivosti na realnim vodovodnim sistemima sa nekoliko desetina hiljada veza i čvorova.

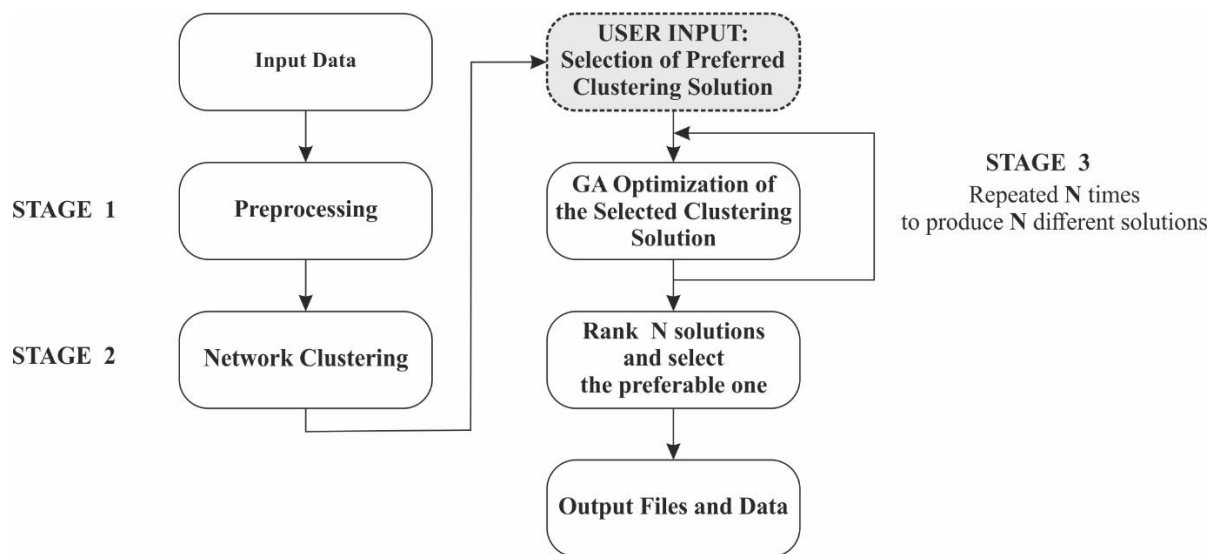
U ovom radu je predstavljena metodologija za podršku odlučivanju u postupku sektorizacije vodovodne distributivne mreže na osnovne zone bilansiranja. Obzirom da sektorizacija mreže nije jednoznačna, razvijena metodologija je implementirana u hidroinformacioni alat koji omogućava sagledavanje većeg skupa mogućih rešenja sektorizacije. Efikasnost, upotrebljivost i primena razvijenog hidroinformacionog alata je obezbeđena kroz implementaciju sledećih celina: 1) algoritma za automatsku sektorizaciju mreže, 2) efikasnog modela za hidrauličke simulacije i 3) višekriterijumske optimizacije. Na ovaj način se donosi odluka koji upravljaju komunalnim preduzećima omogućava olakšano planiranje mera i potencijalnih intervencija na mreži u cilju smanjenja gubitaka u sistemu, kao i sagledavanje efekata tih mera. Dodatno je omogućeno objedinjenje osnovnih kriterijuma sektorizacije (veličina zone) sa lokalnim kriterijumima (inženjerskim i hidrauličkim) karakterističnim za predmetnu vodovodnu mrežu koja se analizira. Primena opisane metodologije je ilustrovana na konkretnom primeru vodovodne distributivne mreže naseljenog mesta u Holandiji.

## 2 Metodologija

U hidroinformacionom alatu opisanom u ovom radu sektorizacija vodovodne mreže se vrši primenom DeNSE (eng. Distribution Network SEctorization) metodologije, zasnovane na teoriji grafova (eng. Graph Theory) i maksimizaciji indeksa uniformnosti (eng. Uniformity Index), koji omogućava identifikaciju klastera u mreži ujednačenih po potrošnji (Vasilic, 2018; Vasilic et al., 2020). Optimizacioni algoritam, podržan inženjerskom logikom, se koristi za određivanje položaja kontrolnih uređaja (zatvarača i merača protoka) na granicama prethodno identifikovanih klastera, čime se uspostavlja zone bilansiranja (OZB). Osnovni kriterijumi za vrednovanje i izbor optimalnog rešenja

sektorizacije su minimalna ulaganja u neophodne intervencije u mreži i očuvanje pouzdanosti sistema. Neophodan ulazni podatak za upotrebu predloženog alata je hidraulički model vodovodne mreže na osnovu koga se potvrđuje valjanost identifikovanog rešenja sektorizacije. Preporuka je da se obezbedi kalibrisan hidraulički model kao ulazni podatak, jer će i samo rešenje sektorizacije biti pouzdanije a neophodne intervencije u mreži mogu biti preduzete sa većim stepenom sigurnosti u pogledu efekata koje će uzrokovati.

Metodologija implementirana u razvijeni hidroinformacioni alat se sastoji iz tri osnovna koraka (Slika 2). Prvi korak (STAGE 1) obuhvata pred-procesiranje svih relevantnih podataka preuzetih iz obezbeđenog hidrauličkog modela vodovodne mreže, kao i njihovu pripremu za naredni korak.



Slika 2. Shematski prikaz DeNSE metodologije implementirane u hidroinformacioni alat

Figure 2. DeNSE sectorization method flow chart

U drugom koraku (STAGE 2) se vrši sektorizacija, odnosno podela mreže na klastere, na osnovu novog indeksa uniformnosti mreže. Nakon završetka ovog koraka, korisnik pred sobom ima izbor većeg broja rešenja podele mreže na klastere i od njega se zahteva da: a) odabere jedno rešenje i b) definiše broj alternativnih rešenja za položaj merača protoka i izolacionih zatvarača na granicama klastera kojima se definiše zona bilansiranja (OZB). Odabrano rešenje podele mreže na klastere se zatim u trećem koraku (STAGE 3) podvrgava procesu optimizacije primenom genetskog algoritma, kako bi se odredili položaji merača protoka i izolacionih zatvarača. Obzirom da je optimizacija primenom genetskih algoritama po prirodi stohastički proces, optimizacioni algoritam će svaki put rezultovati različitim položajem merača protoka i izolacionih zatvarača, odnosno drugačijim alternativnim rešenjem za definisanje OZB. Deo ovog koraka je i kontinualna 24-časovna simulacija rada sistema kako bi se potvrdilo zadovoljenje relevantnih kriterijuma i ograničenja i odredili indikatori performansi sistema koji će biti korišćeni za rangiranje i poređenje alternativnih rešenja. Konačno, za svako rešenje se može generisati niz izlaznih datoteka koje grafički i prostorno vizuelizuju rešenje i olakšavaju izbor optimalnog.

Svi prethodno navedeni koraci će ukratko biti opisani u nastavku, dok se detaljan opis može naći u relevantnoj literaturi (Vasilic, 2018; Vasilic et al., 2020).

## 2.1 Ulazni podaci

Za primenu hidroinformacionog alata neophodno je obezbediti sledeće ulazne podatke:

1. Kalibrisan matematički model distributivne mreže u formi EPANET (.inp) datoteke, koja sadrži sve relevantne podatke o mreži (topologija, hidrauličke karakteristike, podatke o potrošnji, podatke o priključcima itd.);
2. Minimalan ( $n_c^{\min}$ ) i maksimalan ( $n_c^{\max}$ ) preferirani broj priključaka u okviru jedne OZB (DMA), kao i ukupan broj priključaka u mreži ( $n_c$ ), ukoliko broj priključaka po čvoru nije dostupan u okviru modela mreže (što je obično slučaj). Preporuke o ovim vrednostima mogu se pronaći u brojnim raspoloživim smernicama za kreiranje OZB, a obično se smatra da bi broj veza trebao biti u rasponu od 500-5.000 (Farley, 2001; Morrison et al., 2007). Smatra se da formiranje OZB sa brojem priključaka većim od 5.000 nije praktično jer postaje teško razlikovati gubitke vode od podataka noćnog toka, a pri tom je potrebno više vremena za njihovo lociranje. Treba napomenuti da je preferirana veličina zone specifična za mrežu, na koju utiču mnogi faktori i treba je odrediti na osnovu temeljne analize specifičnih podataka relevantnih za mrežu koja se razmatra;
3. Minimalan zahtevan broj dovoda vode (feed lines -  $f^{\text{req}}$ ) u OZB, koji se definiše prema broju priključaka u zoni. Ulazni podataka je specifičan za svaku distributivnu mrežu koja se razmatra i najčešće je definisan lokalnim aktom komunalnog preduzeća koje upravlja vodovodnim sistemom;
4. Vrednost prečnika glavne tj. primarne distributivne mreže ( $D_{\text{MAIN}}$ ). Primarnom distributivnom mrežom se smaraju cevi prečnika većeg od  $D_{\text{MAIN}}$ , serijski povezanih, koje vodu transportuju između vodozahvata i rezervoara u mreži. Na ovim cevima se ne smeju vršiti nikakve intervencije i one ostaju izvan definisanih zona bilansiranja. Kao i u slučaju preferiranog broja priključaka po zoni, i vrednost prečnika  $D_{\text{MAIN}}$  je specifična za mrežu koja se razmatra, a uglavnom se kreće u granicama 300 – 350 mm (Ferrari et al., 2014);
5. Minimalni zahtevani ( $p_{\text{MIN}}$ ) i maksimalni dozvoljeni ( $p_{\text{MAX}}$ ) pritisak u mreži;
6. Broj varijantnih rešenja za definisanje osnovnih zona bilansiranja u mreži (N). Svako varijantno rešenje je rezultat postupka optimizacije, koji se sprovodi u trećem koraku algoritma (STAGE 3) a rezultuje različitim brojem merača protoka i izolacionih zatvarača i njihovim različitim položajem. Smatra se da je  $N = 5$  minimalan broj rešenja da bi se omogućilo reprezentativno rangiranje na osnovu usvojenih indikatora, ali se korisnik može odlučiti i za veći broj varijantnih rešenja.

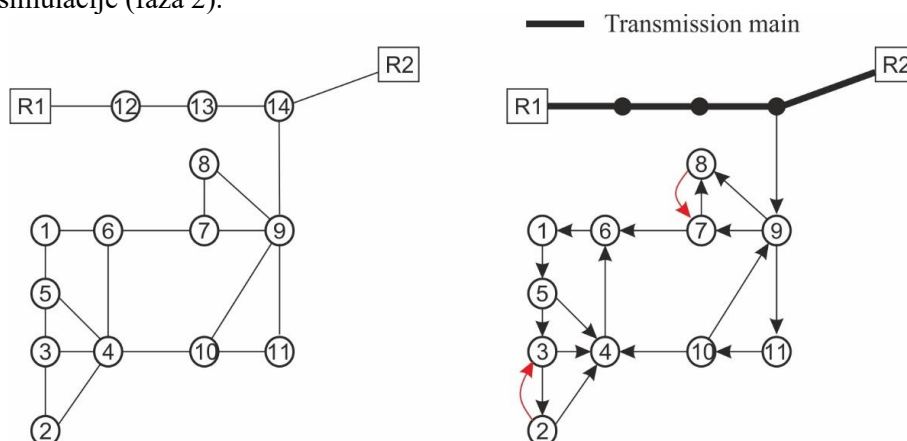
## 2.2 Pred-procesiranje

Pred-procesiranje se odvija u prvom koraku metodologije (Slika 2 – STAGE 1) i sastoji se iz dve faze:

1. Faza 1 – identifikuju se sve cevi koje čine primarnu distributivnu mrežu, na osnovu zadate vrednosti prečnika  $D_{\text{MAIN}}$ . Za ove potrebe se koristi blago modifikovani Breadth First Search (BFS) algoritam za pretraživanje grafa koji sa pretraživanjem startuje simultano od svih čvorova koji predstavljaju izvorišta, tj. vodozahvate. Pomenuta modifikacija se ogleda u davanju prioriteta cevima sa prečnikom većim od vrednosti  $D_{\text{MAIN}}$  prilikom propagacije kroz mrežu.
2. Faza 2 – sprovodi se kontinualna 24-časovna simulacija u danu maksimalne potrošnje u cilju određivanja orijentacije cevi u grafu na osnovu smera tečenja. Rezultat ove faze je direkcioni graf (DIGRAPH), u kome su cevi sa promenljivim smerom tečenja označene kao neorijentisane, odnosno na takvim mestima se definišu paralelne cevi sa suprotnom orijentacijom.

Na slici 3 je prikazan ilustrativan primer distributivne mreže sa 16 čvorova, od čega su dva izvorišni čvorovi, tj. vodozahvati/rezervoari. Na desnoj strani slike je prikazan rezultat procesa pred-

procesiranja. Cevi koje povezuju rezervoare su identifikovane kao glavne distributivne cevi koje su isključene iz procesa sektorizacije mreže i dalje analize (faza 1). Naglašava se da korisnik može odabrati i bilo koju drugu cev, ukoliko želi da je isključi iz procesa sektorizacije. Preostali deo mreže, u ovom slučaju povezan za glavni vod sa jednom vezom u čvoru 9, je potrebno podeliti na klustere u procesu sektorizacije. Na slici su označene orijentacije cevi, određene na osnovu rezultata 24-časovne hidrauličke simulacije (faza 2).



Slika 3. Prikaz jednostavne mreže (levo) i rezultat pred-procesiranja (desno)

Figure 3. Simple network example (left) and result after preprocessing stage (right)

### 2.3 Podela mreže na klustere - sektorizacija

Podela mreže na klustere se odvija u drugom koraku metodologije (Slika 2 – STAGE 2) i sastoji se iz tri faze, koje će biti ukratko opisane a detaljan opis se može naći u relevantnoj literaturi (Vasilic, 2018; Vasilic et al., 2020):

1. Faza 1 – identifikacija čvrsto povezanih komponenti u okviru prethodno identifikovanog direkcionog grafa (Strongly Connected Components – SCCs). Čvrsto povezana komponenta grafa (SCC) je termin iz teorije grafova i predstavlja podgraf koji se karakteriše osobenošću da se, polazeći iz bilo kog čvora podgraфа, pretraživanjem može stići u bilo koji drugi čvor tog podgraфа (Gabow, 2000). Suštinski, SCC komponenta je deo mreže sa usmerenim cikličnim tokom (Perelman & Ostfeld, 2012). Posledično, ostvarivanje kontrole vodnog bilansa i kontrole pritiska unutar SCC komponenti bi bilo teško ostvarivo, pa je osnovna ideja da se ovakve komponente identifikuju a zatim tretiraju kao agregirani čvorovi u daljem procesu sektorizacije mreže. Graf koji se dobija identifikacijom SCC komponenti je takođe direkciono (usmereno), kao i polazni graf, ali je za razliku od njega acikličan tj. ciklična putanja između čvorova nije ostvariva. Ovakav graf se naziva DAG (Directed Acyclic Graph). Proces identifikacije SCC komponenti i kreiranje DAG graфа je prikazan na slici 4.
2. Faza 2 – Topološko sortiranje direkcionog graфа identifikovanog u prethodnoj fazi. Čvorovi direkcionog graфа, SCC komponente, se sortiraju u redosledu od nizvodnih ka uzvodnim na osnovu usmerenosti veza.
3. Faza 3 – Vrš se agregacija prethodno identifikovanog DAG graфа, sačinjenog od međusobno povezanih SCC komponenti, prateći redosled u topološki sortiranoj listi (od najnižvodnijih SCC čvorova). Postupak agregacije je baziran na složenom indeksu uniformnosti ( $U$ ) koji je definisan na sledeći način (Vasilic, 2018):

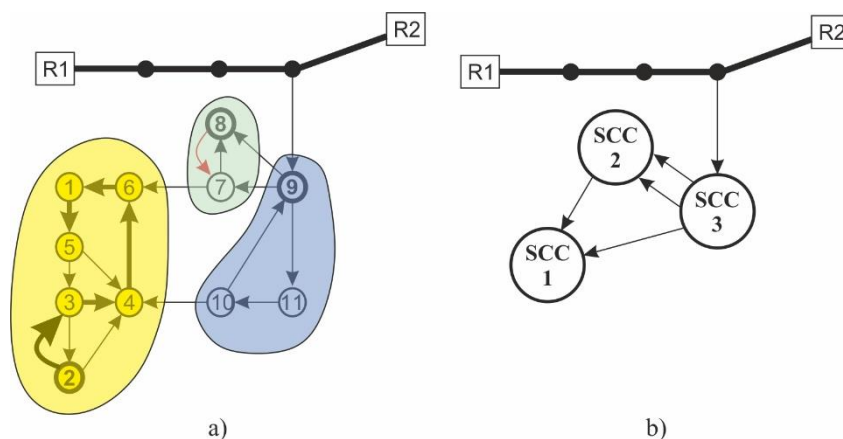
$$U = u_{net} u_v w_{agg} \tag{1}$$

gde su:

$u_{net}$  – indeks uniformnosti mreže u pogledu veličine klastera,

$u_v$  – indeks uniformnosti vektora veličine klastera i

$w_{agg}$  – relativna težina svih veza agregiranih u klasteru.



Slika 4. Prva faza sektorizacije mreže – identifikovane SCC komponente (a) i rezultujući direkcionni aciklični graf (DAG)

Figure 4. First phase of the network clustering procedure – identified SCCs (a) and DAG representation of the graph (b)

Svaki klaster se karakteriše svojom veličinom ( $S_i$ ), koja može biti predstavljena ukupnom potrošnjom ili brojem priključaka unutar klastera. Korisnik može odabrati odgovarajuću karakteristiku za predstavljanje veličine klastera, u zavisnosti od usvojenih kriterijuma za podelu mreže. Indeks uniformnosti mreže ( $u_{net}$ ) predstavlja prosečno odstupanje veličine klastera od njegove preferirane veličine ( $S_{pref}$ ). Preferirana veličina klastera se određuje kao srednja vrednost minimalne ( $S_{min}$ ) i maksimalne ( $S_{max}$ ) veličine klastera, definisanih ulaznim podacima:

$$S_{pref} = 0.5(S_{min} + S_{max}) \tag{2}$$

Idealno, svi klasteri bi bili međusobno jednaki u veličini i ona bi odgovarala preferiranoj veličini klastera ( $S_i = S_{pref}$ ), što je u realnim mrežama praktično nemoguće ostvariti. Stoga se definiše trougaona funkcija veličine klastera  $f(S)$  na osnovu koje se kvantifikuje „kvalitet“ klastera u granicama  $[0, 1]$ . Ukoliko klaster ima veličinu  $S_i = S_{pref}$ , vrednost funkcije  $f$  je maksimalna -  $f(S_i) = 1$ . U suprotnom vrednost funkcije teži nuli (Slika 5).

Indeks uniformnosti mreže ( $u_{net}$ ) se računa kao:

$$u_{net} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cl}} f_i}{N_{cl}} \tag{3}$$

gde je  $N_{cl}$  broj klastera. Definisanje klastera čija će veličina biti u granicama  $[S_{min}, S_{max}]$  i što bliža vrednosti  $S_{pref}$  je jedan cilj sektorizacije. Drugi je definisati klasteru koji će biti međusobno uniformni po veličini.

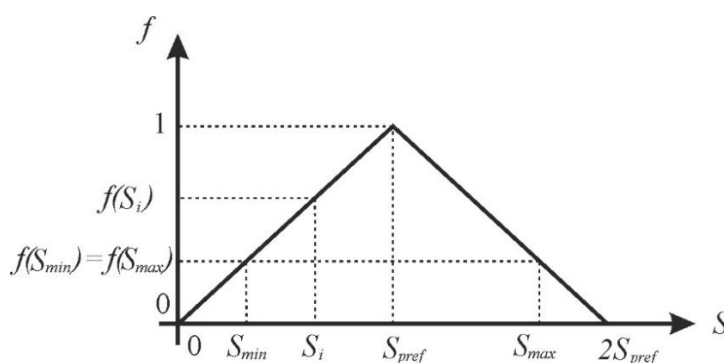
Normalizovane veličine klastera formiraju vektor veličine klastera:

$$S^n = \{S_1^n, S_2^n, S_3^n \dots, S_{N_{cl}}^n\}; \quad d_i^n = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^{N_{cl}} d_i} \quad (4)$$

Uniformnost ovog vektora ( $u_v$ ) pokazuje međusobnu ujednačenost klastera po veličini i računa se kao Euklidova norma:

$$u_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{cl}} (S_i^n)^2} \quad (5)$$

Vrednost veličine  $u_v$  se takođe normalizuje da bi se kretala u granicama [0, 1], kao i vrednost veličine  $u_{net}$ .



Slika 5. Trougaona funkcija veličine klastera

Figure 5. Trinangular function quantifying cluster size

Relativna težina svih veza agregiranih u klasteru ( $w_{agg}$ ) se računa na sledeći način:

$$w_{agg} = \frac{\sum_{i=1}^{n_i^{agg}} D_i}{\sum_{i=1}^{n_i} D_i} \quad (6)$$

gde je  $n_i$  ukupan broj veza u mreži,  $n_i^{agg}$  broj veza agregiranih u klasteru i  $D_i$  prečnik veze. Ukoliko nema agregacije, ni jedna veza nije agregirana i vrednost veličine  $w_{agg}$  je jednaka nuli, a ukoliko je cela mreža agregirana u jedan klaster vrednost veličine  $w_{agg}$  je 1. Prema tome, i vrednost veličine se kreće u granicama [0, 1].

Agregacija SCC komponenti u klasteru, koja je bazirana na vrednosti prethodno opisanog indeksa uniformnosti ( $U$ ), se sprovodi sukcesivno propagirajući se kroz listu topološki sortiranih SCC komponenti. U svakom koraku se agregira SCC komponenta čija agregacija će najviše doprineti povećanju indeksa uniformnosti ( $\Delta U_{max}$ ). Sve tri veličine sadržane u indeksu uniformnosti (jednačina 1) uzimaju vrednosti u rasponu [0, 1], pa shodno tome i vrednost indeksa uniformnosti se kreće u istim granicama. Veća vrednost indeksa uniformnosti ( $U$ ) ukazuje na bolju uniformnost podele mreže na klasteru.

## 2.4 Definisane osnovnih zona bilansiranja (OZB) primenom optimizacije

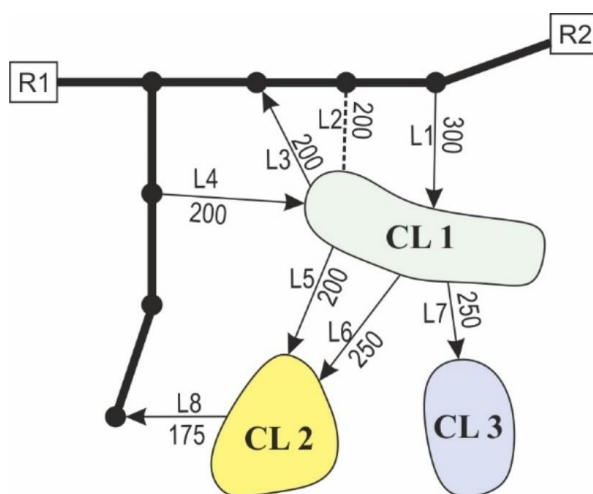
Nakon postupka sektorizacije mreže, koji je sproveden u drugom koraku metodologije (STAGE 2), od korisnika se zahteva da odabere jedno rešenje sektorizacije koje će biti podvrgnuto



postupku definisanja osnovnih zona bilansiranja (OZB). Korisnik može odabrati rešenje kome odgovara maksimalna vrednost indeksa uniformnosti, ali i neko drugo rešenje, njemu blisko, ukoliko smatra da ono više odgovara lokanim uslovima i topologiji mreže.

Nakon izbora rešenja sektorizacije mreže, pristupa se trećem koraku (STAGE 3) u kome se vrši optimizacija položaja merača protoka i izolacionih zatvarača na graničnim vezama svakog klastera, u cilju definisanja osnovnih zona bilansiranja. Za potrebe optimizacije primenjena je metoda genetskog algoritma (Genetic Algorithm - GA).

Za potrebe ilustracije poslužiće primer prikazan na slici 6. Granične veze klastera su označene sa L1 – L8, a brojevi prikazuju prečnike veza u milimetrima. Orijentacije toka tokom 24-satne hidraulične simulacije u danu maksimalne potrošnje, dobijene u fazi 2 prvog koraka algoritma (STAGE 1), označene su strelicama. Cevi sa promenljivim smerom toka (neorjentisane) označene su isprekidanim linijama bez strelica (samo veza L2 u konkretnom slučaju). Neorijentisane cevi su samo one koje povezuju klaster sa glavnim distributivnim cevovodom.



Slika 6. Odabrano rešenje sektorizacije mreže koje se dalje podvrgava postupku GA optimizacije

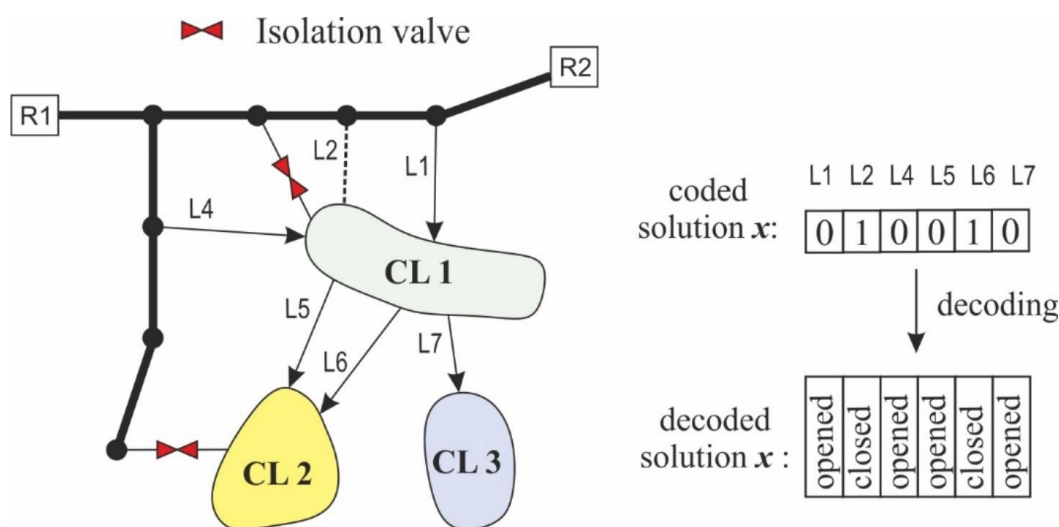
Figure 6. Selected clustering solution to be subjected to the GA optimization

Sa slike 6 je jasno da postoji ukupno 8 veza (cevi) koje je potrebno opremiti uređajima, meračima protoka ili izolacionim zatvaračima, da bi se u potpunosti definisala svaka od 3 osnovne zone bilansiranja (OZB). Pre pokretanja GA optimizacionog algoritma za definisanje položaja ovih uređaja, sprovodi se eliminacija određenih veza iz postupka optimizacije, zasnovana na inženjerskom pristupu, kako bi se smanjio broj veza koje će biti podvrgnute procesu optimizacije a samim tim i suzio skup potencijalnih rešenja. Inženjerski pristup koji se primenjuje je baziran na dva osnovna kriterijuma:

1. Neorijentisane veze, odnosno veze sa promenljivim smerom toka u toku dana, u kojima je maksimalna amplituda proticaja manja od 0.2 L/s se označavaju kao veze na kojima je potrebno instalirati trajne izolacione zatvarače. Smatra se da je, sa stanovišta vodosnabdevanja, protok u ovim cevima zanemarljiv i da njihovo zatvaranje neće uticati na hidrauličke uslove u mreži. Pretpostavimo da je u konkretnom primeru takva veza L2, ali da ona ne zadovoljava postavljeni kriterijum pa će svakako biti uključena u proces optimizacije;
2. Veze koje uvek „vraćaju vodu“ u glavni distributivni cevovod se takođe označavaju kao veze na kojima je potrebno instalirati trajne izolacione zatvarače. Veze ovog tipa očigledno nisu primarni vodovi vodosnabdevanja za deo mreže u kome se nalaze i mogu se smatrati redundantnim. U konkretnom primeru na slici 6, veze ovog tipa su L3 i L8.

Nakon primene prethodno opisanih kriterijuma, u konkretnom slučaju na slici 6, broj veza koje je potrebno podvrgnuti procesu optimizacije je smanjen sa 8 na 6. Efekat smanjenja broja veza sa kojima se ulazi u proces optimizacije je izuzetno značajan, naročito u realnim mrežama sa nekoliko hiljada cevi, i bitno utiče na poboljšanje efikasnosti GA optimizacionog algoritma.

Veze je potrebno opremiti izolacionim zatvaračima, ukoliko se one zatvaraju (ukidaju), ili meračima protoka ukoliko ostaju otvorene i služe za razmenu vode u mreži između OZB i glavne distributivne mreže. Jedina nepoznata veličina u procesu optimizacije je status veze – da li je otvorena ili zatvorena. U procesu optimizacije primenom GA algoritma, rešenje problema se kodira hromozomima koji su predstavljeni nizom bitova (Slika 7). Pojedinačni delovi hromozoma predstavljaju kodirane veličine, odnosno gene, u ovom slučaju veze kojima se vrši optimizacija statusa. Za konkretan slučaj, za kodiranje gena je dovoljna dužina od jednog bita, obzirom da svaka cev može imati samo dva statusa – otvorena (0) ili zatvorena (1).



Slika 7. Veze preostale nakon primene inženjerskih kriterijuma na kojima se vrši GA optimizacija

Figure 7. Remaining pipes, after engineering heuristics has been applied, subjected to the GA optimization

Nakon određivanja dužine hromozoma, koji odgovara broju veza, inicijalizuje se populacija određene veličine (određenog broja jedinki), koje evoluiraju kroz postupak optimizacije primenom operacija GA algoritma – selekcije, ukrštanja i mutacije. U svakom koraku, tj. fazi optimizacionog algoritma, sprovodi se hidraulička simulacija za svaku jedinku u populaciji i određuje vrednost ciljne funkcije (Objective function - *OF*).

Sledeći korak algoritma je selekcija jedinki koje će biti podvrgnute procesu ukrštanja, u cilju generisanja genetski modifikovanih i unapređenih jedinki za naredni korak. Proces selekcije je odgovoran za kontrolisano stohastičko ponašanje GA algoritma, i može biti baziran na različitim pravilima izbora – npr. pravilo ruleta (roulette-wheel selection) ili turnira (tournament selection). Pravila izbora impliciraju da je slučajnost izbora pristrasna vrednostima ciljnih funkcija koje jedinke ostvaruju, odnosno da jedinke sa boljom vrednošću ciljne funkcije imaju veću šansu da budu odabrane za proces ukrštanja i kreiranja novih jedinki.

Verovatnoća primene operacije mutacije na jedinkama je takođe parametar algoritma, ali bi trebala da bude podešena na nisku vrednost (1%), obzirom da je cilj da čitav proces evolucije bude dominantno vođen operacijom ukrštanja, pre nego operacijom mutacije.

Primenom operacija selekcije, ukrštanja i mutacije formira se nova generacija jedinki, za koju se očekuje da bude bolja po vrednostima ciljne funkcije od prethodne. Prethodno opisan proces se ponavlja dok se ne dostigne prethodno definisani broj generacija, koji je takođe parametar GA algoritma. Sumirajući primenu GA algoritma, parametri koji se moraju definisati “a priori” su:

1. Veličina populacije ( $ps$ ),
2. Dužina hromozoma – broj bita koji kodira rešenja,
3. Verovatnoća ukrštanja – obično 0.8-0.9,
4. Verovatnoća mutacije – obično 0.01 i
5. Broj generacija za evoluciju ( $ng$ ).

Efikasnost opisanog GA algoritma zavisi direktno od usvojenih vrednosti za prethodno navedene parametre i oblika ciljne funkcije koja se optimizuje ( $OF$ ). U konkretnom slučaju, ciljna funkcija odražava samo ekonomski aspekt, odnosno cenu koštanja implementacije predloženog rešenja podele mreže na osnovne zone bilansiranja (OZB). GA optimizacioni algoritam bi se neformalno mogao definisati kao algoritam koji traži optimalno rešenje problema u višedimenzionalnom prostoru diskretnih rešenja, bez ograničenja. Međutim, konkretan problem podele mreže na OZB jeste ograničen zahtevom da se primenom intervencija u mreži, neophodnih za implementaciju rešenja, ne ugrožava funkcionalnost i pouzdanost vodosnabdevanja i čitavog vodovodnog sistema.

U hidroinformacionom alatu baziranom na DeNSE metodologiji za sektorizaciju mreže, opisanom u ovom radu, prethodno opisana ograničenja se u proces optimizacije uvode kroz nekoliko kaznenih funkcija u postupku proračuna ciljne funkcije. Na taj način se svakom rešenju koje ima negativne posledice na funkcionalnost sistema, u poređenju sa osnovnim stanjem, proporcionalno uvećava vrednost ciljne funkcije za faktor  $C_i P_i$ , gde je  $i$  redni broj kaznene funkcije,  $C_i$  jedinična vrednost penala (kazne) i  $P_i$  faktor proporcionalnosti:

$$OF = Cost + \sum_{i=1}^4 C_i P_i \quad (7)$$

Казнене функције које су имплементиране у алгоритам, јединична вредности њихових казнених вредности ( $C_i$ ) и начин прорачуна фактора пропорционалности ( $P_i$ ) су сумирани у наредној табели:

Tabela 1. Opis kaznenih funkcije koje su implementirane u GA algoritam

Table 1. Penalty functions used in GA optimization algorithm

$i$	Tip kaznene funkcije	Opis	$C_i$	$P_i$
1	Valjanost rešenja	Ukoliko se javljaju negativni pritisci u mreži ili ne postoji rešenje sistema jednačina koje opisuju matematički model sistema, smatra se da rešenje nije valjano	$10^7 \text{ €}$	$P_i = 1$
2	Zahtevani broj dovoda vode u zonu	Svaka zona (OZB) mora imati minimalni broj dovoda vode u zonu, definisan prema broju priključaka u zoni ( $f_j^{req}$ ). Ukoliko uslov nije ispunjen, faktor proporcionalnosti se računa prema broju zona koje ne ispunjavaju uslov i broju nedostajućih dovoda vode.	$5 \times 10^5 \text{ €}$	$P_i = n_{cl} + \sum_{j=1}^{n_{cl}} (f_j^{req} - f_j^*)$ $n_{cl}$ – broj klastera koji imaju broj dovoda manji od zahtevanog $f_j^{req}$ – zahtevani broj dovoda za j-ti klaster $f_j^*$ – ostvareni broj dovoda za j-ti cluster
3	Zadovoljenost minimalnog pritiska	Ukoliko je pritisak u bilo kom čvoru mreže ispod minimalne zahtevane vrednosti, rešenje se kažnjava proporcionalno broju takvih čvorova.	$5 \times 10^4 \text{ €}$	$P_i = n_j$ $n_j$ – broj čvorova u mreži u kojim su pritisci niži od minimalnog zahtevanog
4	Smanjenje pritiska u mreži	Ukoliko dolazi do smanjenja prosečnih pritiska u mreži, u poređenju sa originalom	$1 \times 10^4 \text{ €/m}$	$P_i = p_{av\_min}^{orig} - p_{av\_min}^*$

		dispozicijom mreže, rešenje se kažnjava proporcionalno iznosu smanjenja pritiska.		$p_{av\_min}^{orig}$ - minimalni prosečni pritisak u toku 24-časovne simulacije u originalnoj dispoziciji mreže $p_{av\_min}^*$ - minimalni prosečni pritisak u toku 24-časovne simulacije u dispoziciji mreže sa implementiranim intervencijama
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Вредност циљне функције дата једначином 7 (OF) се минимизира у поступку оптимизације. Решење се сматра ваљаним уколико задовољава следеће услове:

1. Притисци у мрежи су током 24-часовне симулације у предефинисаним границама ( $p_{min} - p_{max}$ ) и
2. Број довода воде у све ОЗБ је већи од захтеваног броја ( $f^{req}$ ), дефинисаног према њиховој величини.

## 2.5 Indikatori za rangiranje rešenja

Nakon trećeg koraka algoritma, rešenja su optimizovana i korisnik može pristupiti njihovoj analizi i odabiru onog koje će potencijalno biti implementirano na terenu. Radi lakšeg izbora definišu se i računaju vrednosti sledećih indikatora za rangiranje, koji odražavaju efekte intervencija koje se preduzimaju za implementaciju i uspostavljanje osnovnih zona bilansiranja:

1. Prosečni pritisci u mreži, pre i nakon implementacije intervencija;
2. Relativna promena pritiska u mreži, kao posledica predviđenih intervencija, koja se računa prema sledećoj relaciji:

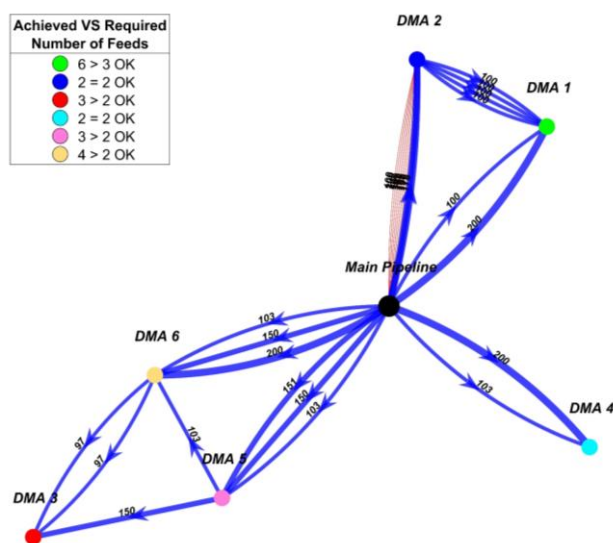
$$\Delta p = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{t=1}^{24} (p_i^{*t} - p_i^t)}{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{t=1}^{24} (p_i^t)} 100 \quad [\%] \quad (8)$$

где је  $p_i^t$  притисак у  $i$ -том чвору мреже у временском тренутку  $t$  у оригиналној мрежи а  $p_i^{*t}$  је притисак у том истом чвору и истом временском тренутку у мрежи са имплементираним интервенцијама;

3. Cena koštanja implementacije rešenja, određena na osnovu procene troškova za instalaciju merača protoka i izolacionih zatvarača;
4. Broj uređaja za uspostavljanje OZB, merača protoka i izolacionih zatvarača, s tim da se identifikuju i koriste postojeći zatvarači u mreži ukoliko je to moguće;
5. Šematski prikaz povezanosti između uspostavljenih OZB.

Ilustrativni šematski prikaz povezanosti između zona je prikazan na narednoj slici (Slika 8). Zone su prikazane krugovima različitih boja, povezane međusobno i za glavnu distributivnu mrežu (označenu crnim krugom i natpisom Main Pipeline). Plave veze sa strelicama predstavljaju direktne dovode u zone, dok su crvenom bojom označene veze u kojima se voda može kretati u oba pravca tokom 24-časovne simulacije. Debljina linija je proporcionalna prečniku veze, dok je pored veza naznačena i vrednost prečnika. Broj zahtevanih i ostvarenih direktnih dovoda vode se takođe prikazuje na grafiku i označen je u formi legende sa naslovom Achieved VS Required Number of Feeds i oznakom OK ili NOT OK. Ovakav prikaz daje uvid u međusobnu povezanost zona i pravac kretanja vode u mreži i s toga je

značajna pomoć korisniku u procesu odlučivanja, obzirom da izbor konačnog rešenja ne treba da bude motivisan samo cenom koštanja kao glavnim kriterijumom.

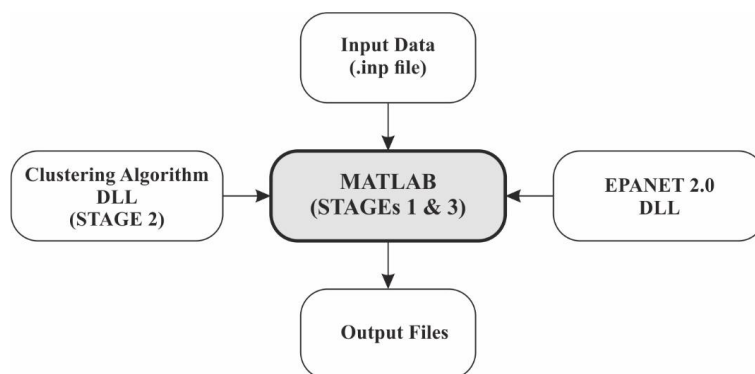


Slika 8. Šematski prikaz međusobne povezanosti OZB

Figure 8. Schematic representation of connectivity between DMAs

## 2.6 Implementacija metodologije

Prethodno opisana metodologija za definisanje osnovnih zona bilansiranja u distributivnoj mreži (DeNSE) je implementirana u hidroinformacioni alat prema dijagramu prikazanom na slici 9.



Slika 9. Implementacija DeNSE metodologije za definisanje OZB u hidroinformacioni alat

Figure 9. DeNSE sectorization methodology implementation chart

Implementacija je sprovedena u Matlab softverskom paketu kao centralnom okruženju, sa pojedinim delovima metodologije koji su razvijeni u drugim programskim jezicima zarad poboljšane računarske efikasnosti. Algoritam za podelu mreže na klastere (sektorizacija mreže), odnosno drugi korak metodologije (STAGE 2), je napisan u C++ programskom jeziku i koristi se unutar Matlab radnog okruženja kao eksterna DLL datoteka (Dynamic Link Library). Za potrebe hidrauličkih simulacija, u koracima 1 i 3 (STAGE 1, STAGE 3) koristi se modul za hidraulički proračun implementiran u softverskom paketu EPANET, prihvaćen kao etalon u predmetnoj oblasti (<https://www.epa.gov/water-research/epanet>). Ovaj modul se takođe koristi kao eksterna DLL datoteka unutar Matlab radnog okruženja.

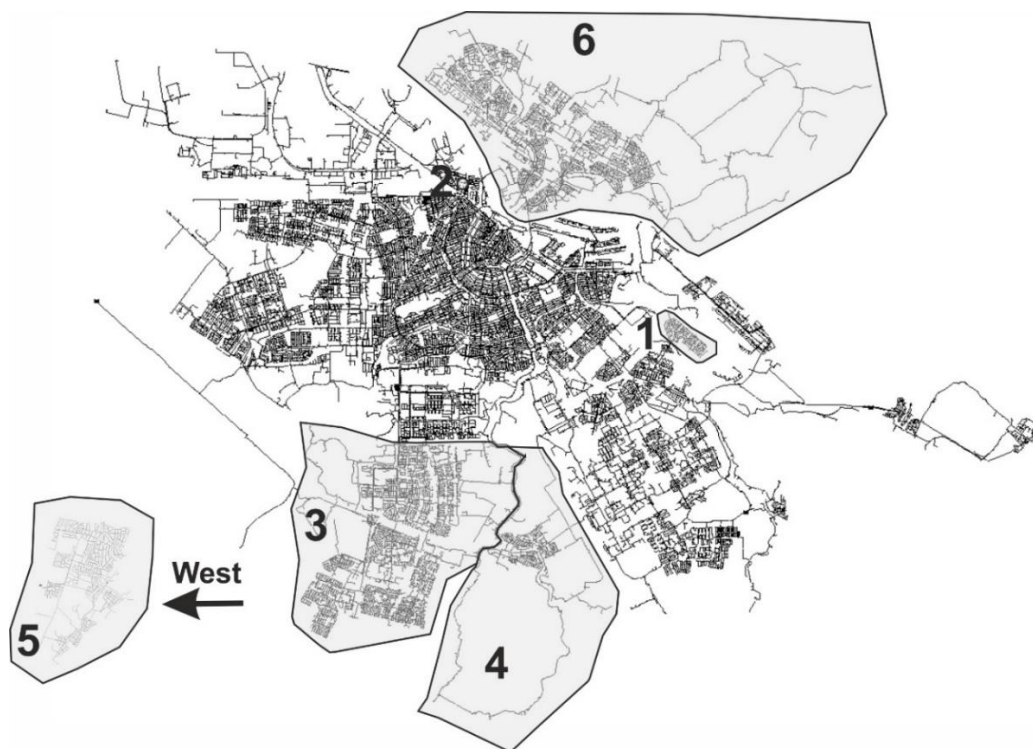
### 3 Primer primene metodologije

Opisana metodologija je delom razvijena tokom istraživačkog boravka autora u kompaniji „WaterNet“ u Amsterdamu (Holandija), u okviru međunarodnog istraživačkog projekta „WatQual“. Tokom saradnje na pomenutom projektu na raspolaganju su bili podaci o vodovodnoj distributivnoj mreži kojom upravlja kompanija „WaterNet“ a koji si poslužili za razvoj i testiranje DeNSE metodologije za podelu distributivne mreže na OZB.

Distributivna mreža kojom upravlja kompanija „WaterNet“ trenutno sadrži 6 područja koja se mogu smatrati OZB, obzirom da su jasno odvojena od ostatka mreže (Slika 10). Pet područja su deo distributivne mreže grada Amsterdama, dok je jedno područje potpuno odvojena mreža naseljenog mesta Heemstede koje se nalazi zapadno od Amsterdama. Ovih 6 područja značajno variraju u pogledu broja korisnika:

1. Diemen Noord (~2 900 priključaka),
2. Prinseneiland (~325 priključaka),
3. Amstelveen (~35 000 priključaka),
4. Ouderkerk (~3 500 priključaka),
5. Heemstede (~10 700 priključaka),
6. Amsterdam Noord (~42 000 priključaka),

pa je od interesa razmotriti njihovu dalju podelu na OZB u pravom smislu, odnosno prema kriterijumima veličine koji se usvoje, a u skladu su sa preporukama iz literature i potrebama komunalnog preduzeća. Ostatak mreže grada Amsterdama sadrži okvirno 500 000 priključaka koji su pretežno locirani u centralnom gradskom jezgri, i povezani u gustu prstenastu mrežu, što značajno otežava definisanje OZB u ovom delu mreže.



Slika 10. Distributivna mreža kojom upravlja kompanija „WaterNet“

Figure 10. Water distribution network operated by „WaterNet“ company

Za potrebe testiranja metodologije odabrana su 2 područja, od prethodno navedenih 6 - Heemstede (5) i Amstelveen (3). U oba slučaja predložena DeNSE metodologija, implementirana u opisani hidroinformacioni alat, se pokazala vrlo korisnom i efikasnom u postupku definisanja OZB (Vasilic & Ivetic, 2020). U ovom radu su prikazani rezultati testiranja na manjem primeru mreže Heemstede.

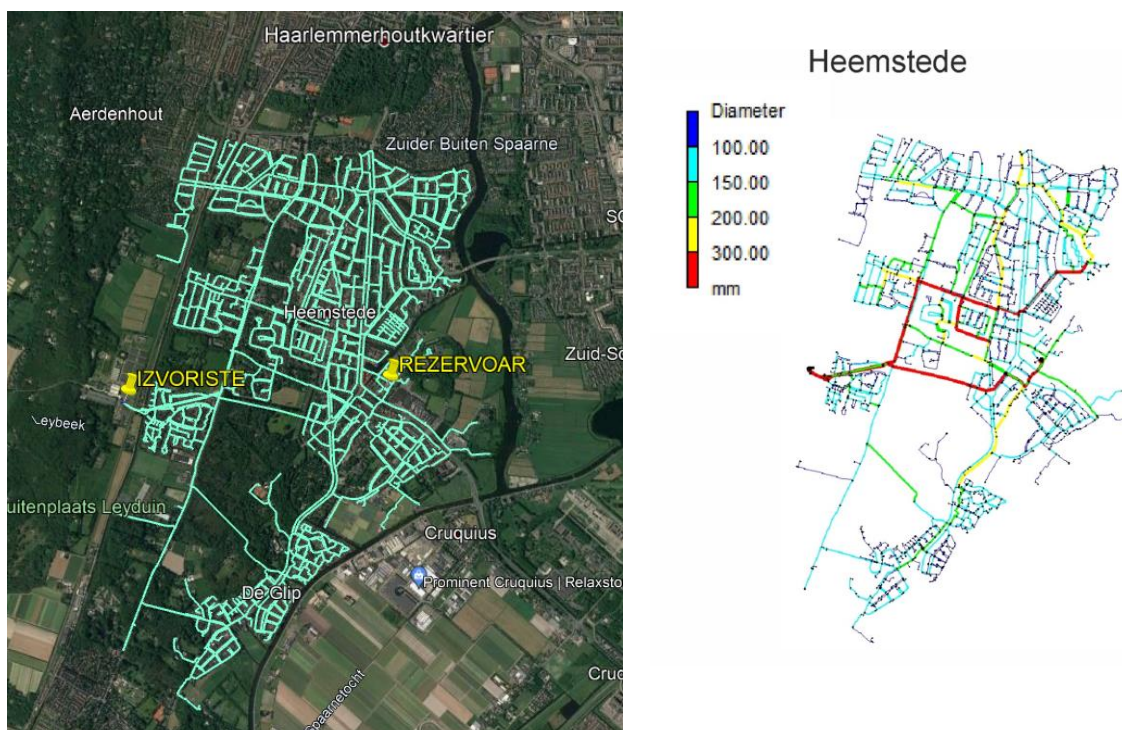
### 3.1 Karakteristike mreže

Za potrebe testiranja metodologije izabran je deo mreže u naselju Heemstede, zapadno od Amsterdama. Osnovne karakteristike mreže su prikazane u tabeli 2, dok je dispozicija mreže prikazana na slici 11. Heemstede mreže je pogodna za testiranje metodologije jer je relativno male veličine (~10000 priključaka) i potpuno izdvojena od ostatka mreže pa nije potrebno posebno definisanje graničnih uslova.

Tabela 2. Karakteristike mreže Heemstede

Table 2. Heemstede network characteristics

Cevi	3204
Čvorova	3997
Potrošačkih čvorova	2046
Izvorišta	1
Rezervoara	1
Pumpnih stanica	1
Zatvarača	989
Priključaka	10741
Ukupna prosečna potrošnja	161.3 m <sup>3</sup> /h



Slika 11. Dispozicija test primera mreže naselja Heemstede – satelitski snimak (levo); matematički model u EPANET-u sa prikazom prečnika cevi (desno)

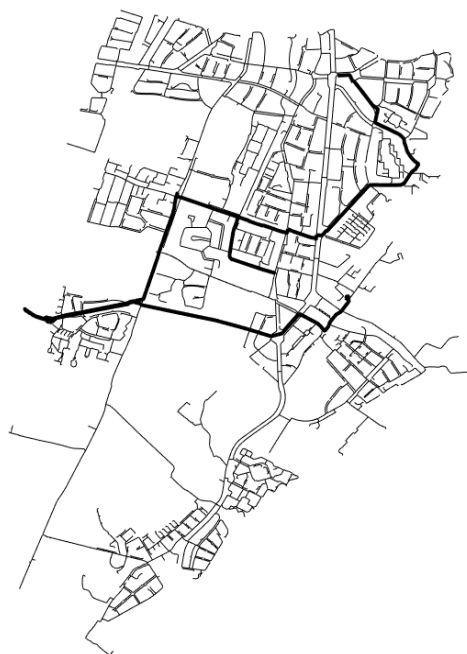
Figure 11. Heemstede case study network – satellite image (left); EPANET mathematical model with pipes' diameters (right)

U nastavku se prikazuju rezultati primene metodologije na razmatranom test primeru. Prezentacija rezultata je data prema redosledu opisa metodologije – najpre se navode usvojeni ulazni podaci, zatim se prikazuju rezultati algoritma za sektorizaciju mreže na klastere, elaborira se izbor preferiranog rešenja podele mreže na klastere, vrši se rangiranje optimizovanih rešenja rasporeda merača protoka i izolacionih zatvarača i konačno se usvaja finalno rešenje sa definisanim OZB.

### 3.2 Ulazni podaci

Za potrebe primene tehničkog rešenja na primeru Heemstede mreže usvojeni su sledeći ulazni podaci:

1. Kalibrisan matematički model distributivne mreže u formi EPANET (.inp) datoteke je obezbeđen od strane zaposlenih u „WaterNet“-u;
2. Minimalan ( $n_c^{\min}$ ) i maksimalan ( $n_c^{\max}$ ) preferirani broj priključaka u okviru jedne OZB su  $n_c^{\min}=500$  and  $n_c^{\max}=5000$ . Usvojene vrednosti su u skladu sa preporukama iz literature iz relevantne oblasti, a određene su uz saglasnost zaposlenih u „WaterNet“-u;
3. Ukupan broj priključaka u mreži je  $n_c=10741$  i preuzet je iz dostavljenog matematičkog modela (Tabela 2.) u kome je broj priključaka eksplicitno definisan u svakom čvoru mreže;
4. Usvojena vrednost prečnika glavne tj. primarne distributivne mreže iznosi  $D_{\text{MAIN}} = 225$  mm, što nakon postupka pred-procesiranja identifikuje glavni vod prikazan na slici 12;
5. Minimalni zahtevani i maksimalni dopušteni pritisci u mreži su usvojeni iz internih pravilnika kompanije „WaterNet“ i iznose  $p_{\text{MIN}} = 2.0$  bar i  $p_{\text{MAX}} = 6.0$  bar;
6. Usvojeni broj varijantnih rešenja za definisanje osnovnih zona bilansiranja u mreži iznosi  $N=10$ ;
7. Usvojeni parametri za optimizacioni algoritam su: broj generacija  $n_g = 35$  i veličina populacije u svakoj generaciji  $p_s = 30$ ;



Slika 12. Glavna distributivna mreža u Heemstede mreži, identifikovana u postupku pred-procesiranja

Figure 12. Main transmission pipeline in Heemstede network, identified in pre-processing

Pored navedenih ulaznih podataka, korišćeni su dodatni podaci preuzeti iz internog pravilnika kompanije „WaterNet“ (“Design Criteria for Drinking Water Distribution Networks”), neophodni za



primenu metodologije. Pravilnik se primeljuje prilikom projektovanja i održavanja distributivnih mreža koje su u nadležnosti „WaterNet“-a. Dodatni podaci koji su usvojeni su:

1. Nabavne cene uređaja sa instalacijom (zatvarača i merača protoka) i
2. Sigurnost vodosnabdevanja – broj zahtevanih direktnih dovoda vode u svaki deo mreže prema broju priključaka:

Tabela 3. Broj zahtevanih dovoda vode u zonu distributivne mreže

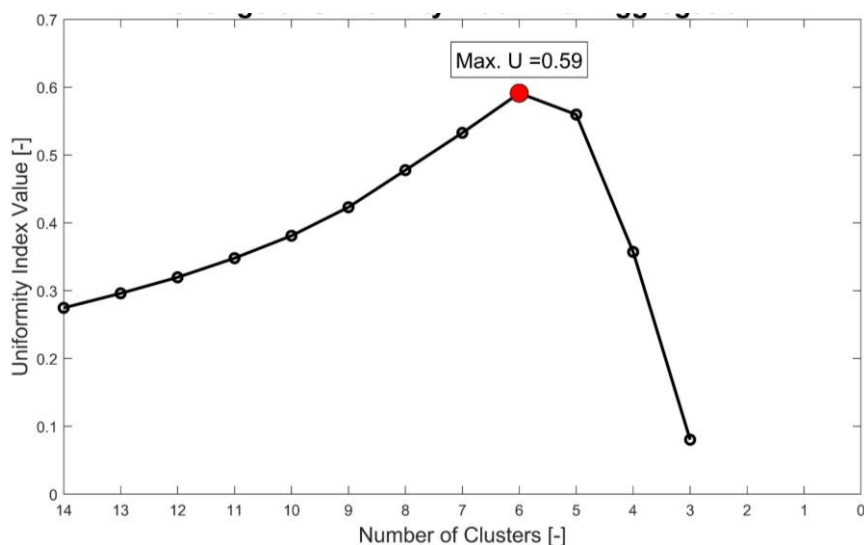
Table 3. Required number of feed lines into an area of distribution network

Broj priključaka u zoni	Minimalni zahtevani broj dovoda ( $F^{req}$ )
< 200	1
200 – 2000	2
> 2000	3

### 3.3 Rezultati podele mreže na klasterne

Slika 13 prikazuje promenu indeksa uniformnosti ( $U$ ), definisanog jednačinom 1, tokom postupka podele mreže na klasterne. Na slici je prikazana vrednost indeksa uniformnosti u poslednjih 12 koraka agregacije komponenti i jasno se uočava trenutak kada vrednost indeksa dostiže maksimalnu vrednost a zatim se smanjuje u nekoliko poslednjih koraka.

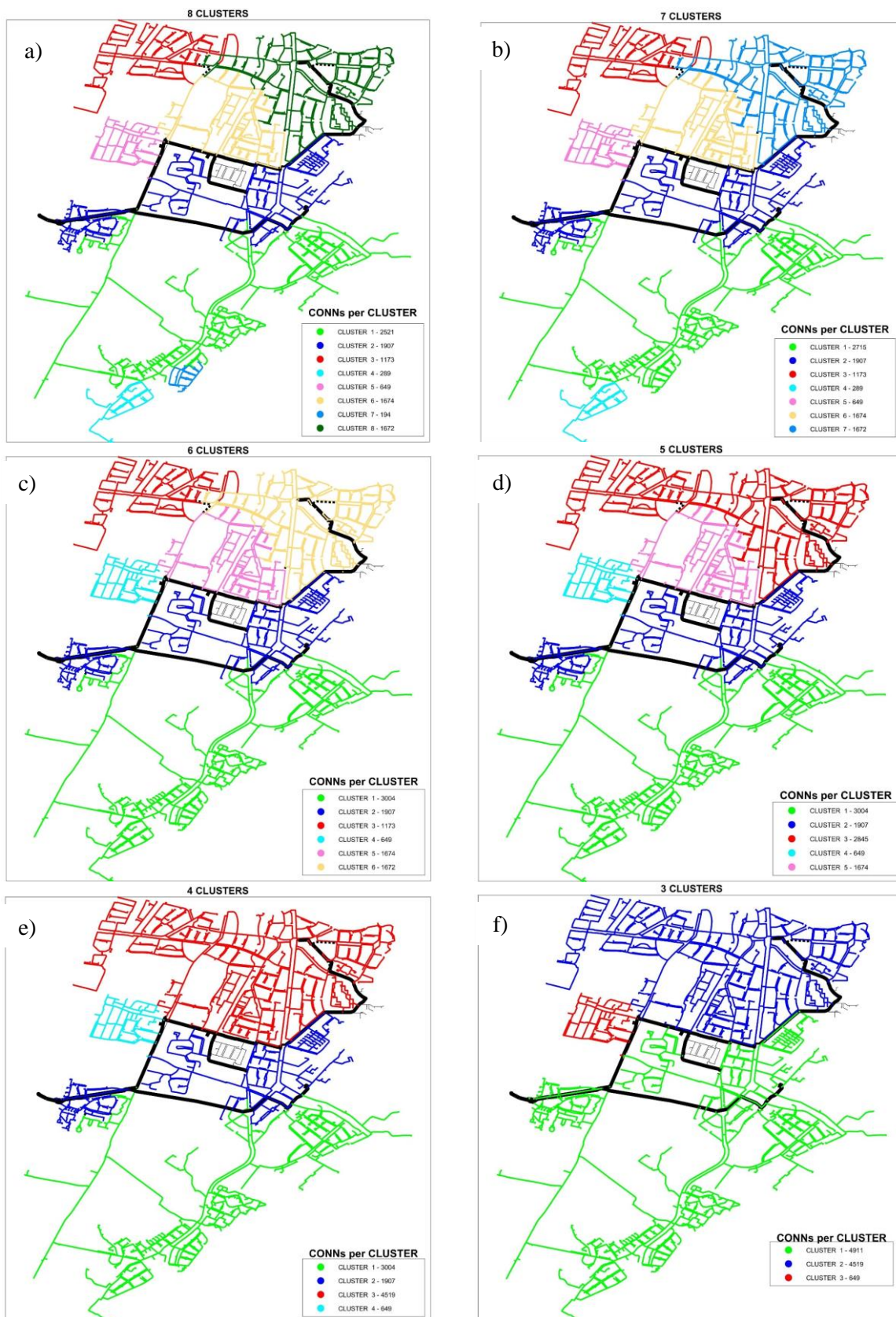
Maksimalna vrednost indeksa uniformnosti iznosi  $U_{max} = 0.59$  i odgovara podeli mreže na 6 klastera. Izbor ovog rešenja se nameće kao logičan za postupak optimizacije položaja merača protoka i izolacionih zatvarača za definisanje OZB. Međutim, korisniku se savetuje da sagleda i rešenja koja se nalaze u okolini onog sa maksimalnom vrednosti indeksa uniformnosti. U konkretnom slučaju, rešenja sa 7 (jedan korak napred) i 5 klastera (jedan korak nazad) imaju slične, neznatno niže vrednosti indeksa uniformnosti. Rešenje sa neznatno nižom vrednosti indeksa uniformnosti, i dalje može biti pogodno za implementaciju obzirom na lokalne uslove, kriterijume i topologiju mreže.



Slika 13. Promena indeksa uniformnosti tokom procesa agregacije SCC komponenti u klasterne

Figure 13. Evolution of uniformity index metrics during the aggregation of SCCs in clusters

Slika 14 prikazuje rešenja podele mreže na klasterne u poslednjih 6 koraka agregacije. Identifikovani klasteri u mreži su na svakom grafiku označeni različitim bojom, sa legendom koja prikazuje i broj priključaka u svakom klasteru.



Slika 14. Podela mreže na klastera u 6 poslednjih koraka agregacije

Figure 14. Sectorization of network in clusters – last 6 aggregation steps

Obzirom na minimalan i maksimalan broj priključaka u okviru jedne OZB ( $n_c^{\min}=500$  i  $n_c^{\max}=5000$ ), definisan u ulaznim podacima, proizilazi da je preferirani broj priključaka  $n_c^{\text{pref}}=2750$ . Nemoguće je u svakoj zoni ostvariti egzaktan isti broj priključaka jednak preferiranom broju. Kao što je ranije opisano osnovni cilj metodologije je ostvariti podelu u kojoj su sve zone po veličini u rasponu  $n_c^{\min} - n_c^{\max}$  i što bliže vrednosti  $n_c^{\text{pref}}$ .

Rešenje sa podelom mreže na 8 klastera (slika 14 a) sadrži 2 ekstremno mala klastera (klasteri 7 i 4), sa 194 i 289 priključaka respektivno, koja su ispod granice  $n_c^{\min}$ . U sledećem koraku (rešenje sa 7 klastera, slika 14 b) klaster 7 se agregira u veći klaster (klaster 1), usled čega se povećava vrednost indeksa uniformnosti. Naredni korak donosi agregaciju i drugog manjeg klastera (klastera 4) u klaster 1 (rešenje sa 6 klastera, slika 14 c), kada se dostiže i maksimalna vrednost indeksa uniformnosti  $U_{\max}=0.59$ . U ovom trenutku agregacije svi klasteri su u granicama  $n_c^{\min} - n_c^{\max}$ .

Dva relativno velika klastera, 3 i 6, se agregiraju u narednom koraku (slika 14 d), što remeti ujednačenost klastera po veličini, samim tim snižava se i vrednost indeksa uniformnosti. Ovo je posledica činjenice da sada postoje 2 klastera koja su po veličini iznad granice  $n_c^{\text{pref}}$  - klaster 1 sa 3004 priključka i klaster 3 sa 2845 priključaka. Nastavak procesa agregacije klastera donosi dodatno smanjenje indeksa uniformnosti i naglašava ovu činjenicu, obzirom da je sve manji broj klastera ali značajne veličine. Na slici 14 e je prikazan naredni korak agregacije, u kome su agregirani klasteri 3 i 5 u jedan klaster sa ukupno 4519 priključaka. Konačno, nakon poslednjeg koraka agregacije preostala su samo tri klastera koja su povezana za glavnu distributivnu mrežu ali se dalje ne mogu agregirati usled nepostojanja direktnih međusobnih veza. Dva od tri klastera su po veličini skoro duplo veći od vrednosti  $n_c^{\text{pref}}$  (klaster 1 sa 4911 i klaster 2 sa 4519 priključaka), zbog čega je i vrednost indeksa uniformnosti dodatno snižena. Podela mreže na klastera je ovim okončana i na korisniku je da napravi izbor rešenja koje će biti podvrgnuto postupku optimizacije.

### 3.4 Rangiranje optimizovanih rešenja

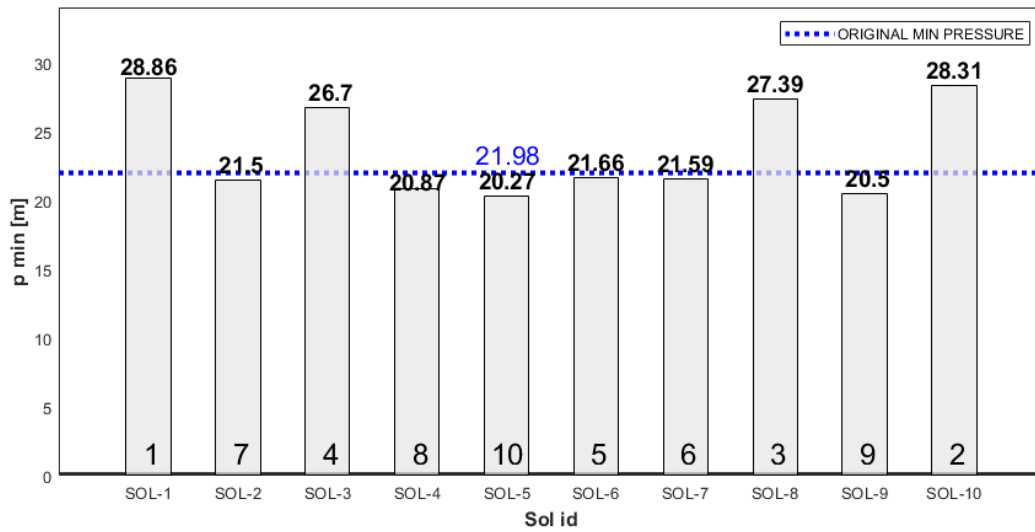
Kao što je ranije rečeno, na korisniku je da odabere jedno rešenje sektorizacije mreže na klastera koje će biti podvrgnuto procesu optimizacije u cilju određivanja položaja merača protoka i izolacionih zatvarača, u cilju konačnog definisanja i uspostavljanja OZB. U prethodnom poglavlju su prikazana i elaborirana alternativna rešenja sektorizacije (slika 14). Izbor rešenja zavisi od topologije mreže, lokalnih uslova i potreba i preferencija kompanije koja upravlja vodovodnom mrežom. U ovom slučaju rešenje sa šest klastera, kome odgovara najveća vrednost indeksa uniformnosti, je odabrano (slika 14 c).

Optimizacioni GA algoritam rezultuje sa 10 ( $N=10$ ) alternativnih rešenja za položaje mernih uređaja i zatvarača na granicama identifikovanih klastera, za odabranu dispoziciju sa šest klastera. Analiza i rangiranje ovih rešenja se sprovodi na osnovu prethodno definisanih kriterijuma za rangiranje.

Na slici 15 su prikazane vrednosti apsolutnih minimalnih pritisaka u mreži za sva rešenja i njihovo poređenje sa istim pritiskom u originalnoj mreži. Sva rešenja ispunjavaju uslove zahtevanih pritisaka u mreži. Na slikama 16 i 17 je prikazan uporedni prikaz vrednosti indikatora za rangiranje svih 10 rešenja – a) prosečni pritisci u mreži, b) relativna promena pritiska u mreži, c) cena implementacije rešenja i d) broj merača protoka i zatvarača. Rangiranje je prikazano brojevima na dnu grafika.

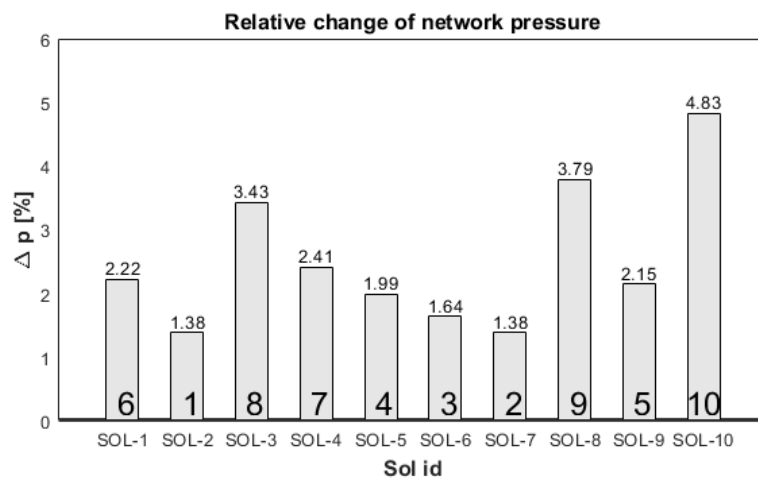
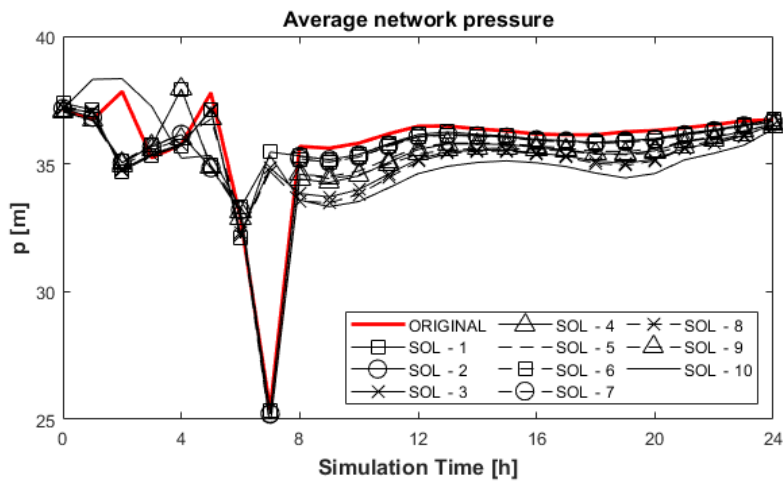
Na osnovu indikatora relevantnih za pritisak u mreži, jasno je da rešenja SOL-2, SOL-7, SOL-6 i SOL-4 najmanje utiču na promenu pritisaka u mreži, kako prosečnih tako i apsolutno minimalnih. Obzirom da je ovo jedan od osnovnih ciljeva metodologije, ova rešenja se nameću kao dominantna sa ovog aspekta.

Sa aspekta cene implementacije, rešenje SOL-7 je najbolje rangirano a prate ga rešenja SOL-5 i SOL-10, ali rešenje SOL-10 ujedno ima i najveći uticaj na promenu pritisaka u mreži. Cena implementacije je indirektno povezana sa brojem uređaja koje je potrebno instalirati, međutim ne linearno jer cena pojedinih uređaja nije direktno proporcionalna sa prečnikom cevi na koju se instalira. Ipak, jasno je da rešenje SOL-7 dominira i po ovom kriterijumu jer je najmanji broj novih zatvarača koje je potrebno instalirati u mreži (četiri).



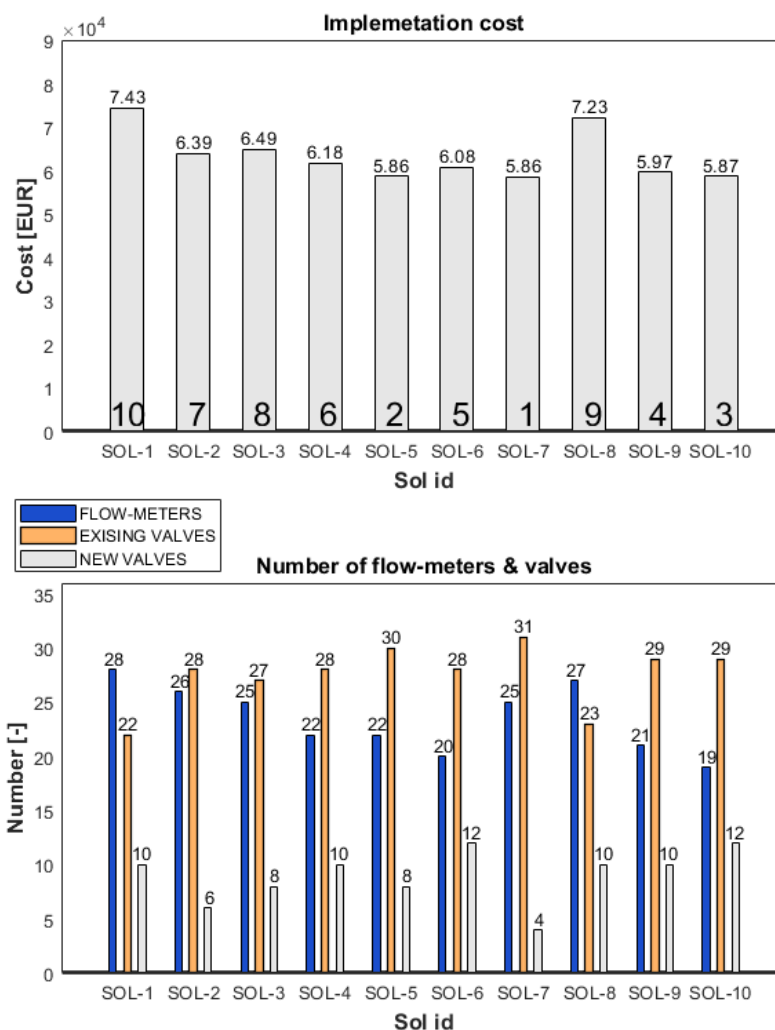
Slika 15. Uporedni prikaz apsolutnih minimalnih pritisaka u mreži

Figure 15. Comparison of absolute minimal pressures in network



Slika 16. Uporedni prikaz prosečnih pritisaka u mreži i relativne promene pritiska u mreži

Figure 16. Comparison of average network pressures and relative change of network pressure



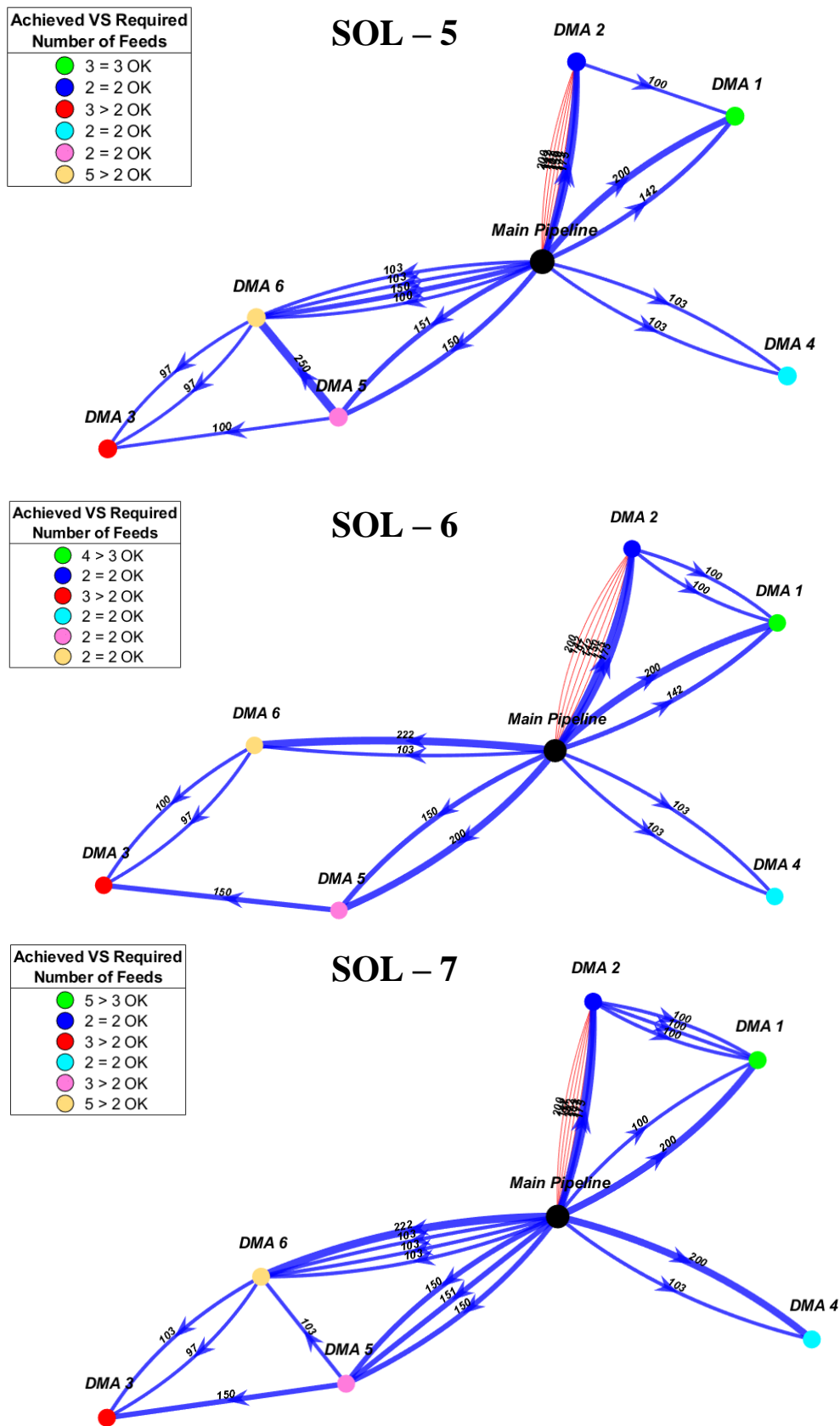
Slika 17. Uporedni prikaz troškova implementacije rešenja i potrebnog broja zatvarača i merača protoka

Figure 17. Comparison of solutions' implementation cost and number of flow-meters and valves

### 3.5 Izbor konačnog rešenja

Rezultati prikazani u prethodnom poglavlju ilustruju da su sva rešenja dobijena postupkom optimizacije validna, tj. zadovoljavaju sve osnovne hidrauličke kriterijume i mogu biti implementirana na terenu. Prema postavljenom kriterijumu minimalnog uticaja na pritiske u mreži izdvajaju se tri rešenja SOL-2, SOL-6 i SOL-7. Ukoliko se u proces odlučivanja uključi i cena implementacije kao važan kriterijum, rešenje SOL-2 se može otpisati kao jedno od skupljih, a rešenje SOL-5 uvrstiti u izbor kao najjeftinije. Rešenje SOL-7 je najbolje rangirano prema svim kriterijumima i nameće se kao logičan izbor, međutim mora se pažljivo razmotriti i međusobna povezanost osnovnih zona bilansiranja (OZB, na grafičkim priložima u nastavku označene sa DMA).

Naredna slika (slika 18) prikazuje šemu međusobne povezanosti zona za tri alternativna rešenja koja su ušla u najuži izbor, na osnovu prethodne diskusije (SOL-5, SOL-6 i SOL-7). Legenda prikazuje broj zahtevanih (required) i u rešenju ostvarenih (achieved) direktnih dovoda vode u svaku zonu (feeds). Potrebno je primetiti da sva tri razmatrana rešenja, a i preostalih sedam koja nisu prikazana ovde, ostvaruju veći ili jednak broj direktnih dovoda vode od broja zahtevanih za svaku zonu. Sve zone, osim zone DMA 3, imaju direktan dovod vode (dva ili više) sa glavnog distributivnog cevovoda. Ovakav uslov je svakako imperativ, ali ga nije moguće ostvariti za zonu DMA 3 zbog njene udaljenosti od glavnog distributivnog cevovoda.



Slika 18: Uporedni prikaz međusobne povezanosti zona – SOL-5, SOL-6 i SOL-7

Figure 18. Comparison of connectivity between clusters in different solutions - SOL-5, SOL-6 and SOL-7

Sa slike 18 se može zaključiti da, iako na prvi pogled povezanost zona u rešenjima deluje slično, postoje značajne razlike u broju veza kao i u njihovim prečnicima. Na primer, u rešenju SOL-6 zona DMA 6 je povezana za glavnu distributivnu mrežu sa 2 cevi, dok je u rešenjima SOL-5 i SOL-7 ista zona povezana sa 4 cevi. Prečnici, a i položaji u mreži, ovih cevi se takođe bitno razlikuju. U rešenju SOL-6 ne postoji veza između zona DMA 5 i DMA 6, dok su one u rešenjima SOL-5 i SOL-7 povezane jednom vezom, ali različitog prečnika (250 i 103 mm, respektivno).

Sva prethodna razmatranja ukazuju na sledeći zaključak – da bi se stekao potpuni uvid u međusobnu povezanost zona, pre svega prostorni raspored ovih veza u mreži, pored šematskog prikaza povezanosti mora se razmotriti i grafički prikaz mreže sa tačnim položajem uređaja koje je potrebno instalirati. Korisnik svakako može generisati ovakav grafički prikaz za svako alternativno rešenje, i pomoću ekspertskeg poznavanja svih osobnosti razmatrane mreže odabrati najpogodnije rešenje. Rešenje SOL-7 je u konkretnom slučaju odabrano kao optimalno, a u nastavku će se prikazati njegove detaljne karakteristike.

### 3.6 Vizuelizacija i analiza usvojenog rešenja

Slika 19 prikazuje prostorni raspored uređaja neophodnih za uspostavljanje OZB u mreži. Slika prikazuje tačan položaj glavnog distributivnog cevovoda (crna široka linija), merača protoka i izolacionih zatvarača. Merači protoka su podeljeni u dve kategorije:

1. Merači protoka na direktnim dovodima vode (označeni tamno plavim kvadratićima) i
2. Merači protoka na cevima u kojima se menja orijentacija toka tokom dana (označeni svetlo plavim kvadratićima).

Izolacioni zatvarači su takođe podeljeni u dve kategorije:

1. Postojeći zatvarači (označeni žutim trouglovima) – zatvarači čiju je funkcionalnost potrebno proveriti i zatvoriti i
2. Novi zatvarači koje je potrebno instalirati (označeni crvenim trouglovima).

Ovakav grafički prikaz rešenja je potrebno sagledati prilikom izbora konačnog rešenja, zajedno sa šematskim prikazom povezanosti između zona ilustrovanom u prethodnom poglavlju.

Slika 20 prikazuje usvojeno rešenje u Google Earth softverskom okruženju. Iz hidroinformacionog alata se generiše nekoliko datoteka koje podržava Google Earth (kml datoteke), po jedna za svaki tip objekata od interesa – delove mreže koji predstavljaju OZB (DMAs) obojene različitim bojama, položaje oba tipa zatvarača i položaje oba tipa merača protoka. Ovakav prikaz je zgodan jer omogućava korisniku da relativno brzo na satelitskom snimku sagleda tačan položaj svih elemenata rešenja i mogućnost njihove implementacije na terenu.

Prikaz u Google Earth okruženju je u potpunosti kompatibilan sa prethodnim prikazom bez satelitske podloge koji je prikazan na slici 21. Slika 23 prikazuje uporedno ova dva prikaza za jedan izdvojeni deo mreže. Uređaji, zatvarači i merači protoka, su na Google Earth-u označeni sa svojim jedinstvenim identifikatorima (EPAValveID/EPAPipeID) koji odgovaraju identifikaciji u matematičkom modelu EPANET-a koji se takođe automatski generiše (inp datoteka). Na ovaj način se korisniku omogućava da vrlo jednostavno samostalno vrši dodatne izmene u matematičkom modelu i vrši dalju verifikaciju usvojenog rešenja.

Slika 22 prikazuje karakteristike svake od OZB (DMA) u usvojenom konačnom rešenju. Za svaku od zona na graficima su prikazani: a) prosečna potrošnja, b) broj priključaka u zoni, c) poređenje zahtevanih i ostvarenih direktnih dovoda vode i d) ukupna dužina cevne mreže. Slika 23 prikazuje uporedni prikaz prosečnih pritisaka po zonama tokom 24 sata, pre i posle podele mreže. Pritisak u zonama uglavnom ostaje nepromenjen, ili se javlja neznatno povišenje pritiska, što se svakako ne može smatrati negativnom posledicom.

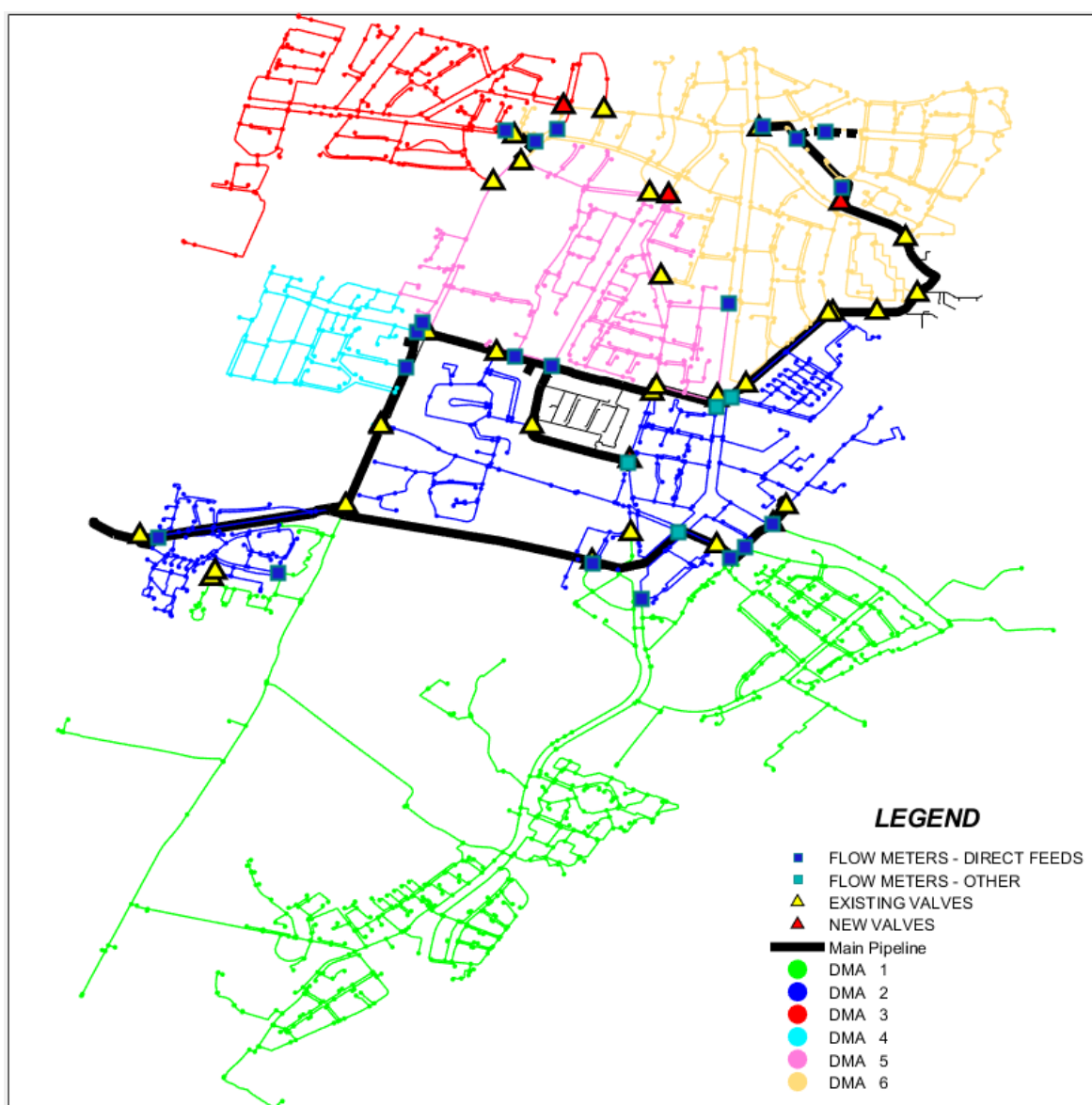
Za svaku zonu se može prikazati broj merača protoka i izolacionih zatvarača koje je potrebno instalirati u pojedinim zonama mreže, kako bi se one u potpunosti definisale, kao i cene inicijalne implementacije za svaku od zona individualno. Odnosno, ukoliko se prvo uspostavi zona DMA 5, u

narednom koraku se moraju redukovati cene implementacije zona DMA 3 i DMA 6 obzirom da one dele zajedničke veze sa zonom DMA 5. Hidroinformacioni alat korisniku daje mogućnost da generiše najekonomičniji redosled implementacije zona, prema kriterijumu najmanje cene. U konkretnom slučaju redosled fazne implementacije zona je prikazan u narednoj tabeli i ukupna cena implementacije OZB za celu mrežu iznosi € 58,617.75.

Tabela 4. Fazna implementacija osnovnih zona bilansiranja

Table 4. Phased implementation of district meter areas

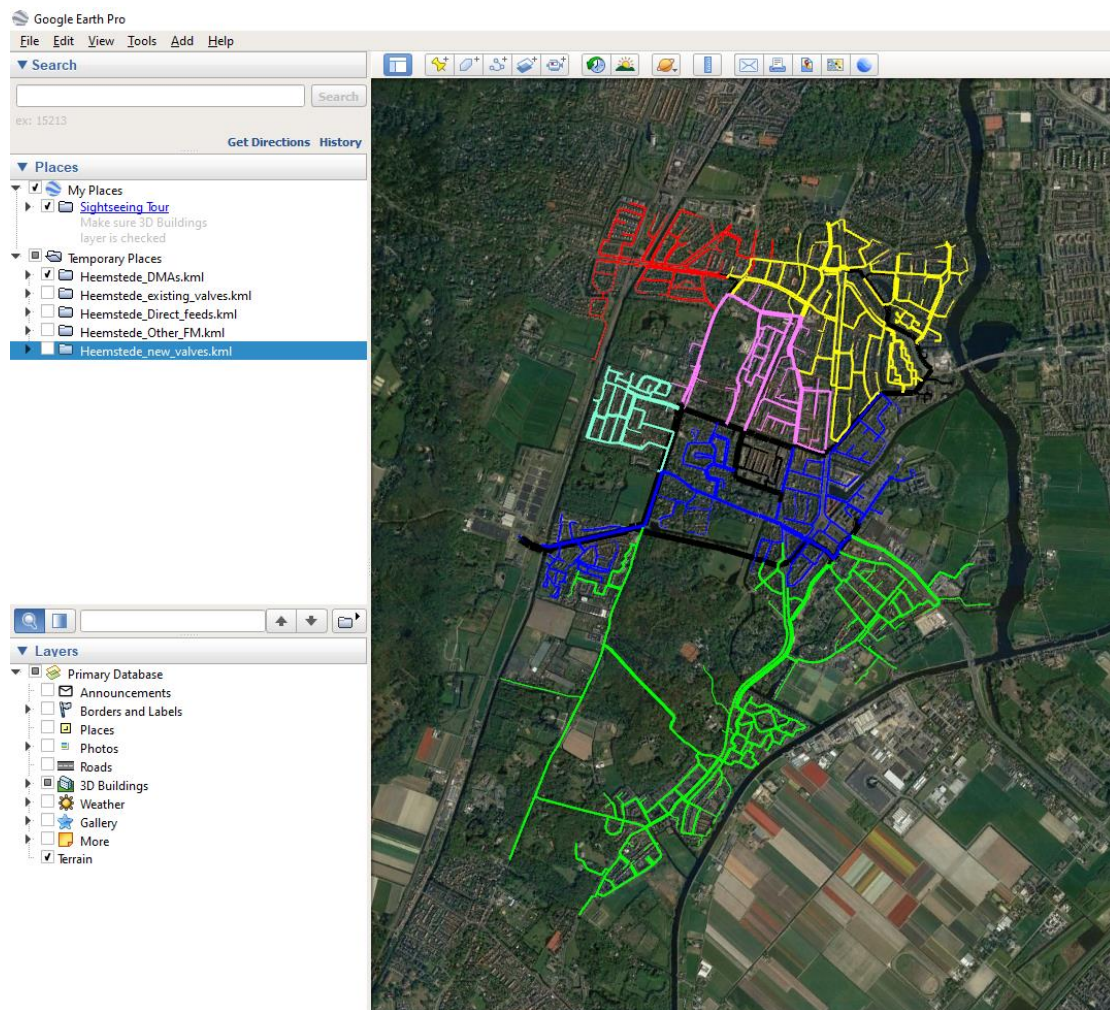
Faza implementacije	1	2	3	4	5	6
OZB (DMA)	DMA_4	DMA_3	DMA_5	DMA_6	DMA_1	DMA_2
Cena	€ 4,185.42	€ 7,853.13	€ 9,945.84	€ 9,945.84	€ 10,463.55	€ 16,223.97



Slika 19. Prostorni raspored zatvarača (postojećih i novih) i merača protoka za usvojeno rešenje

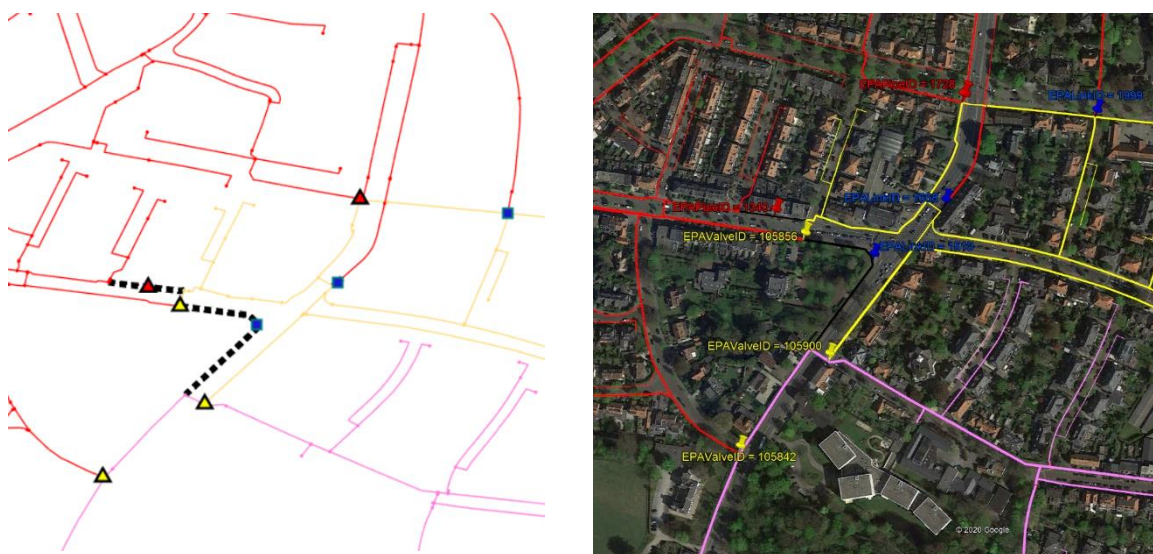
Figure 19. Spatial position of valves (existing and new) and flow meters for adopted solution





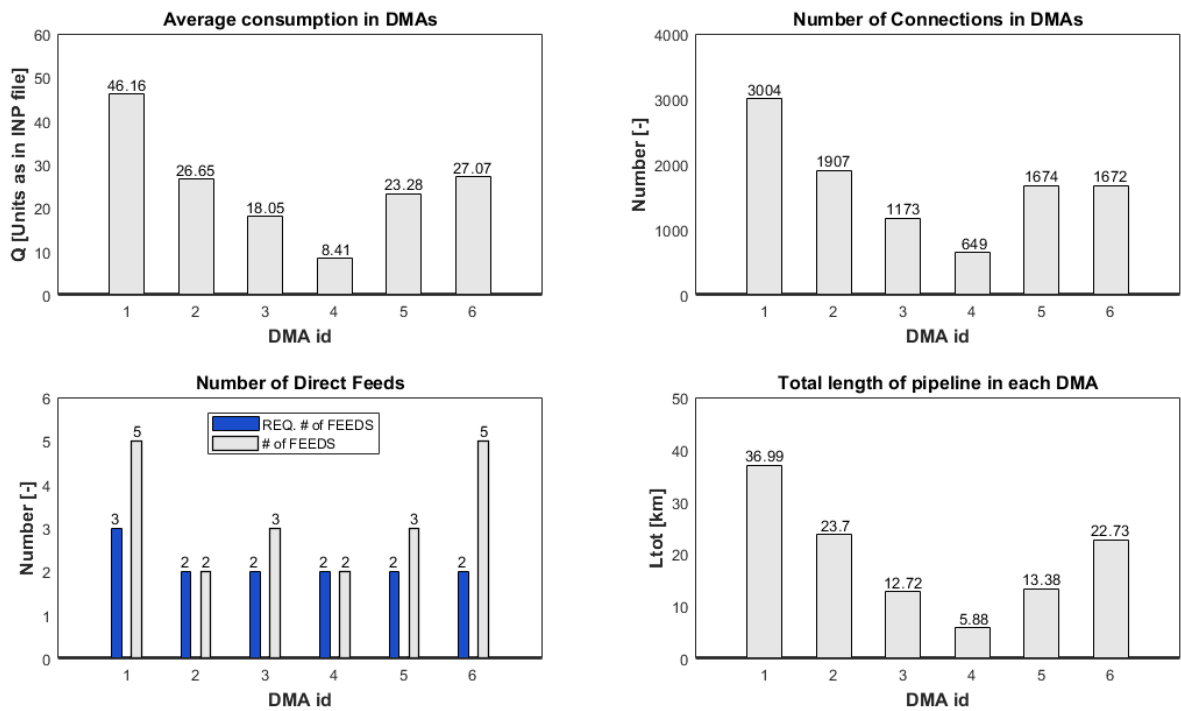
Slika 20. Prikaz usvojenog rešenja u Google Earth softveru

Figure 20. Adopted solution plotted in Google Earth



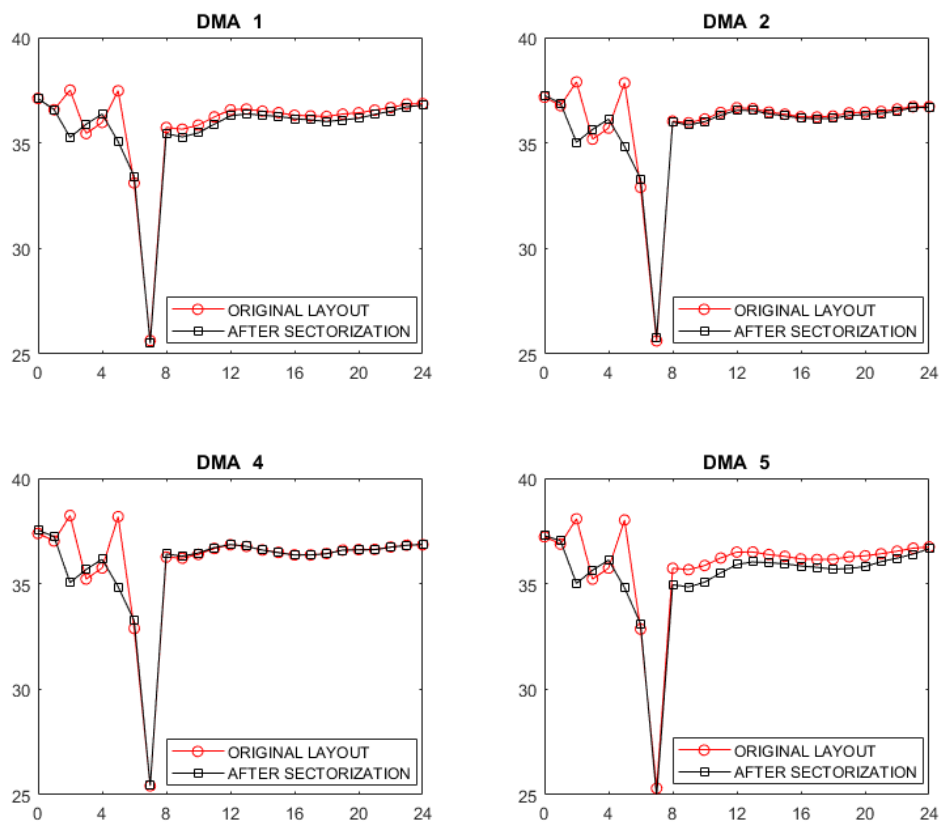
Slika 21. Prostorni raspored uređaja – običan prikaz (levo) i Google Earth prikaz (desno)

Figure 21. Spatial position of devices – ordinary plot (left) and Google Earth plot (right)



Slika 22. Karakteristike zona (DMA) za konačno usvojeno rešenje

Figure 22. Characteristics of DMAs in the adopted solution



Slika 23. Uporedni prikaz prosečnih pritisaka u zonama (DMA) pre i posle sektorizacije mreže

Figure 23. Comparison of average pressures in DMAs, before and after network sectorization

## 4 Zaključak

U radu je predstavljena DeNSE metodologija (Distribution Network SEctorization) namenjena za podršku odlučivanju u postupku sektorizacije mreža pod pritiskom na osnovne zone bilansiranja (OZB). Osnovni kriterijumi koji se primenjuju u postupku sektorizacije su minimalna ulaganja u neophodne intervencije u mreži i očuvanje pouzdanosti sistema. Ovakav set osnovnih kriterijuma je naročito privlačan za komunalna preduzeća koja raspolažu ograničenim finansijskim sredstvima i imaju potrebu da proces sektorizacije izvedu fazno.

Opisana metodologija je implementirana u hidroinformacioni alat koji omogućava korisniku sagledavanje više alternativnih rešenja sektorizacije u cilju definisanja optimalnog. Kao posebna prednost se ističe mogućnost aktivne interakcije korisnika u korišćenju alata, čime se uključuje i neophodno ekspertsko znanje i poznavanje lokalnih specifičnosti mreže koja se analizira.

Metodologija je uspešno primenjena na dva primera realnih vodovodnih mreža u Holandiji kojima upravlja komunalno preduzeće “Waternet”, od kojih je u radu detaljno opisan primer manje vodovodne mreže – Heemstede. Prikazani rezultati potvrđuju ostvarivanje polaznih hipoteza postavljenih prilikom razvoja metodologije – razvijeni hidroinformacioni alat može biti koristan prilikom odlučivanja u postupku sektorizacije mreža pod pritiskom u kome je potrebno održati postojeće performanse sistema i ne ugroziti njegovu efikasnost.

## Literatura

- Alvisi, S., & Franchini, M. (2014). Water distribution systems: Using linearized hydraulic equations within the framework of ranking-based optimization algorithms to improve their computational efficiency. *Environmental Modelling and Software*, 57, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.012>
- Bragalli, C., D’Ambrosio, C., Lee, J., Lodi, A., & Toth, P. (2012). On the optimal design of water distribution networks: A practical MINLP approach. *Optimization and Engineering*, 13(2), 219–246. <https://doi.org/10.1007/s11081-011-9141-7>
- Burrows, R., Crowder, G., & Zhang, J. (2000). Utilisation of network modelling in the operational management of water distribution systems. *Urban Water*, 2(2), 83–95. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00046-7)
- Butler, D. (2000). *Leakage detection and management*. Palmer Environmental Ltd.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G., Tzatchkov, V., & Alcocer-Yamanaka, V. (2014). Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 620–629. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000364)
- Farley, M. (2001). *Leakage Management and Control : A Best Practice Training Manual*. 1–169. [http://whqlibdoc.who.int/hq/2001/WHO\\_SDE\\_WSH\\_01.1\\_pp1-98.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2001/WHO_SDE_WSH_01.1_pp1-98.pdf)
- Ferrari, G., Savic, D., & Becciu, G. (2014). A Graph Theoretic Approach and Sound Engineering Principles for Design of District Metered Areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(12), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000424](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000424)
- Gabow, H. N. (2000). Path-Based Depth-First Search for Strong and Biconnected Components 1 Introduction 2 Strong Components. *Information Processing Letters*, 74, 107–114.
- Giustolisi, O., & Ridolfi, L. (2014). New Modularity-Based Approach to Segmentation of Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10), 04014049. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000916](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000916)
- Hajebi, S., Roshani, E., Cardozo, N., Barrett, S., Clarke, A., & Clarke, S. (2016). Water distribution network sectorisation using graph theory and many-objective optimisation. *Journal of Hydroinformatics*, 18(1), 77–95. <https://doi.org/10.2166/hydro.2015.144>
- Morrison, J., Tooms, S., & Rogers, D. (2007). *DMA management guidance notes*. IWA.
- Ostfeld, A., Uber, J. G., Salomons, E., Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. a, Watson, J., Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., di Pierro, F., Khu, S.-T., Savic, D., Eliades, D., Polycarpou, M., Ghimire, S. R., Barkdoll, B. D., Gueli, R., Huang, J. J., ... Walski, T. (2008). The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(6), 556–568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:6\(556\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:6(556))
- Perelman, L., & Ostfeld, A. (2012). Water-Distribution Systems Simplifications through Clustering. In *Journal of Water Resources Planning and Management* (Vol. 138, Issue 3).

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000173](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000173)
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2)
- Vasilic, Ž. (2018). *Decision Support Algorithms for Sectorization of Water Distribution Networks (PhD Thesis, Belgrade - december 2018)*. University of Belgrade.
- Vasilić, Ž. (University of B. F. of C. E., & Ivetić, D. (University of B. F. of C. E. (2020). *Report on application of sectorization method for creation of District Meter Areas ( DMAs ) within the water distribution network of the city of Amsterdam* (Issue September). <https://doi.org/https://doi.org/10.15131/shef.data.13415024.v1>
- Vasilic, Ž., Stanic, M., Kapelan, Z., Prodanovic, D., & Babic, B. (2020). Uniformity and Heuristics-Based DeNSE Method for Sectorization of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001163](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001163)
- WAA, & WRC. (1985). *Water Authorities Association and Water Research Centre: Report 26 Leakage Control Policy & Practice*.