



METODOLOGIJA ZA PODRŠKU ODLUČIVANJU PRI SEKTORIZACIJI VODOVODNIH MREŽA NA OSNOVNE ZONE BILANSIRANJA

Željko Vasilić, Univerzitet u Beograd, Građevinski fakultet, zvasilic@grf.bg.ac.rs
Damjan Ivetić, Univerzitet u Beograd, Građevinski fakultet, divetic@grf.bg.ac.rs
Miloš Stanić, Univerzitet u Beograd, Građevinski fakultet, mstanic@grf.bg.ac.rs

APSTRAKT: 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 hidrodinamični alat koji omogućava sagledavanje većeg skupa mogućih rešenja sektorizacije. Metodologija za sektorizaciju je zasnovana na primeni novog indeksa uniformnosti mreže (eng. Uniformity Index) koji omogućava identifikaciju klastera u mreži ujednačenih po potrošnji. Efikasnost, upotrebljivost i primena razvijenog hidrodinamičnog alata je obezbeđena kroz implementaciju sledećih celina: 1) algoritma za automatsku sektorizaciju mreže na klasterne, 2) efikasnog modela za hidrauličke simulacije i 3) višekriterijumske optimizacije. Osnovni kriterijumi za vrednovanje i izbor optimalnog rešenja su minimalna ulaganja u neophodne intervencije u mreži i očuvanje pouzdanosti sistema. 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.

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

DECISION SUPPORT METHODOLOGY FOR SECTORIZATION OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS INTO DISTRICT METER AREAS

ABSTRACT: This paper presents decision support methodology for sectorization of water distribution networks (WDNs) into district meter areas (DMAs). Considering that complexity of the real life WDNs results in many different alternatives in which network sectorization into DMAs can be done, presented methodology is implemented into comprehensive hydroinformatics tool which allow end-user to investigate broad set of feasible sectorization solutions. Sectorization algorithm used in this research utilizes newly developed Uniformity Index which drives the sectorization process and identifies clusters in the network with uniform demand. The efficiency, usability and successful application of the developed hydroinformatics tool is ensured through the implementation of the following: 1) algorithm for automatic sectorization of the network into clusters, 2) efficient model for hydraulic simulations and 3) multicriteria optimization. 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. This enables decision-makers easier planning of measures and potential interventions in the water distribution network in order to reduce losses in the system, as well as to assess the potential impacts of those measures. Additionally, it is possible to combine general sectorization criteria (DMA size) with local criteria (engineering and hydraulic), specific to the water distribution network being analyzed. Presented methodology is applied on a real-sized WDN of a small area in Netherlands.

Keywords: Water distribution network, Sectorization, Optimization, DMAs

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 vodododnih sistema. 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 se definiše kao deo vododvodnog 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 (Burrows et al., 2000). 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. 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).

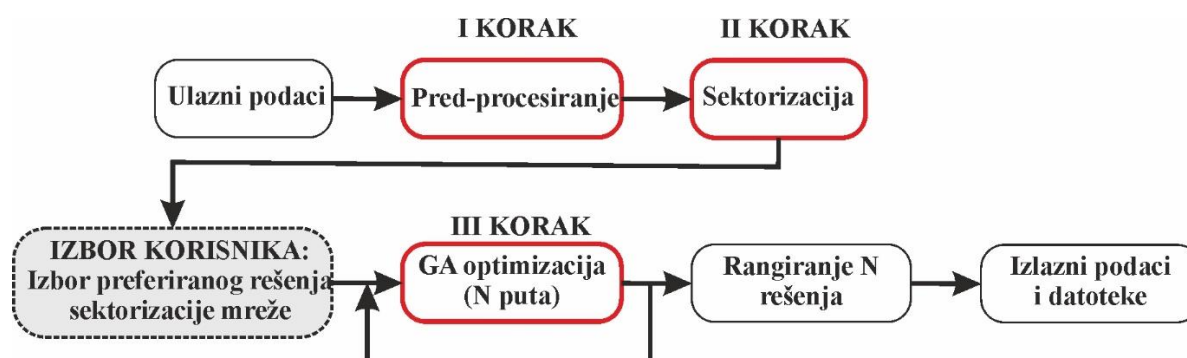
Obzirom na veliki broj kriterijuma i ograničenja, u praksi je definisanje zona proces baziran na ekspertskom znanju, odnosno, na inženjerskom pristupu u toku koga se metodom probanja testiraju različita varijantna rešenja na hidrauličkom modelu. Iskustveno znanje se svakako ne može zanemariti i treba da bude uključeno u proces kreiranja zona, međutim, ovakav pristup zahteva dosta vremena a odabrano rešenje ne mora biti optimalno. Razvojem računaraskih 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 njihovu upotrebljivost na realnim vodovodnim sistemima sa nekoliko desetina hiljada veza i čvorova.

U ovom radu se sektorizacija vodovodne mreže 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 uspostavljaju 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. Primena opisane metodologije je ilustrovana na konkretnom primeru vodovodne distributivne mreže naseljenog mesta u Holandiji.

2 METODOLOGIJA

Metodologija implementirana u razvijeni hidroinformacioni alat se sastoji iz tri osnovna koraka (Slika 1).



Slika 1. Šematski prikaz DeNSE metodologije implementirane u hidroinformacioni alat

Prvi korak obuhvata pred-procesiranje svih relevantnih podataka preuzetih iz obezbeđenog hidrauličkog modela vodovodne mreže, kao i njihovu pripremu za naredni korak. U drugom koraku se vrši sektorizacija, odnosno podela mreže na klastera, na osnovu novog indeksa uniformnosti mreže. Nakon završetka ovog koraka, korisnik pred sobom ima izbor većeg broja rešenja podele mreže na klastera i od njega se zahteva da: a) odabere jedno rešenje i b) definiše broj alternativnih rešenja (N) za položaj merača protoka i izolacionih zatvarača na granicama klastera kojima se definiše zona bilansiranja (OZB). Odabrano rešenje podele mreže na klastera se zatim u trećem koraku 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 kvantifikovali 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:

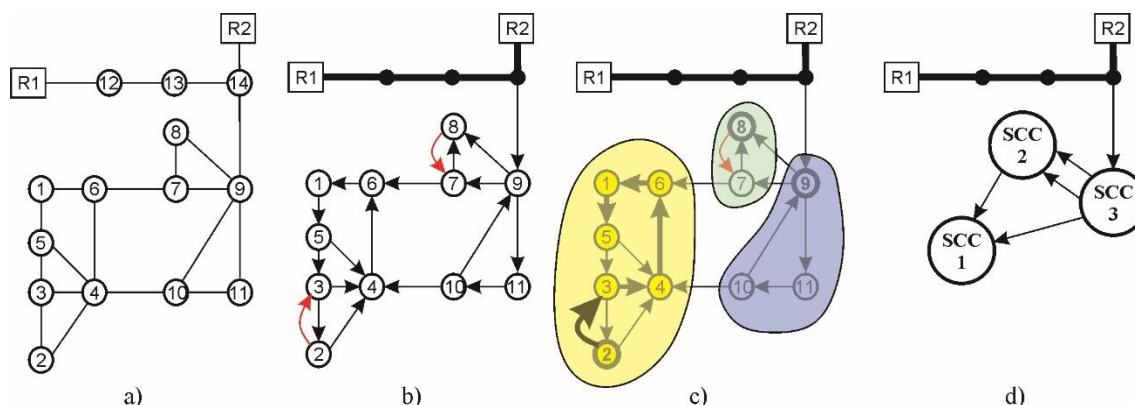
1. Kalibrisan matematički model distributivne mreže u formi EPANET (.inp) datoteke, koja sadrži sve relevantne podatke o mreži (topologija, hidrauličke karakteristike, podatke o potrošnji, podatke o priključcima itd.);
2. Minimalan (n_c^{\min}) i maksimalan (n_c^{\max}) preferirani broj priključaka u 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 priključaka 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 protoka, a pri tom je potrebno više vremena za njihovo lociranje. Treba napomenuti da je preferirana veličina zone specifična za mrežu, zavisna od mnogih faktora i treba je odrediti na osnovu temeljne analize specifičnih podataka relevantnih za mrežu koja se razmatra;
3. Minimalan zahtevan broj dovoda vode (eng. feed lines - f^{req}) u OZB, koji se definiše prema broju priključaka u zoni. Ulazni podatak 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_{MAIN}). Primarnom distributivnom mrežom se smaraju cevi prečnika većeg od D_{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_{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_{MIN}) i maksimalni dozvoljeni (p_{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 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 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_{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_{MAIN} prilikom propagacije kroz mrežu.

- 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.



Slika 2. a) Prikaz jednostavne mreže; b) rezultat pred-procesiranja; c) identifikovane SCC komponente; d) rezultujući DAG graf

Na slici 2-a je prikazan ilustrativan primer distributivne mreže sa 16 čvorova, od čega su dva izvorišni čvorovi, tj. vodozahvati/rezervoari. Na slici 2-b 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 klasterne u procesu sektorizacije. Na slici 2-b su označene i orijentacije cevi, određene na osnovu rezultata 24-časovne hidrauličke simulacije (faza 2).

2.3 Podela mreže na klasterne – sektorizacija

Podela mreže na klasterne se odvija u drugom koraku metodologije 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):

- 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 podgrafova, pretraživanjem može stići u bilo koji drugi čvor tog podgrafova (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 direkcioni (usmeren), 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 je prikazan na slici 2-c, a rezultujući DAG graf na slici 2-d.

2. Faza 2 – Topološko sortiranje direkcionog grafa identifikovanog u prethodnoj fazi. Čvorovi direkcionog grafa, SCC komponente, se sortiraju u redosledu od nizvodnih ka uzvodnim na osnovu usmerenosti veza.
3. Faza 3 – Vršiti se agregacija prethodno identifikovanog DAG grafa, 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):

$$U = u_{net} u_v w_{agg} \quad (1)$$

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 klastere.

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. 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. Definisane klastera čija će veličina biti u granicama $[S_{min}, S_{max}]$ i što bliža vrednosti S_{pref} je jedan cilj sektorizacije. Drugi je definisati klastere koji će međusobno biti uniformni po veličini. Ovaj kriterijum sektorizacije je kvantifikovan indeksom uniformnosti vektora veličine klastera (u_v), koji pokazuje međusobnu ujednačenost klastera po veličini, a čija vrednost se takođe kreće u granicama $[0, 1]$. Relativna težina svih veza agregiranih u klastere (w_{agg}) se definiše kao odnos težina agregiranih veza i težine svih veza u mreži. Težina veza je kvantifikovana njihovim prečnikom.

Agregacija SCC komponenti u klastere, 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 (ΔU_{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 podelu mreže na klastere.

2.4 Definisane osnovnih zona bilansiranja (OZB) primenom optimizacije

Nakon postupka sektorizacije mreže, koji je sproveden u drugom koraku metodologije, 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 (U_{max}), ali i neko drugo rešenje, njemu blisko, ukoliko smatra da ono više odgovara lokalnim uslovima i topologiji mreže.

Nakon izbora rešenja sektorizacije mreže, pristupa se trećem koraku (slika 1) 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). 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;
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.

Nakon primene prethodno opisanih kriterijuma broj veza koje je potrebno podvrgnuti procesu optimizacije je smanjen. 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 svakom koraku, tj. fazi optimizacionog algoritma, sprovodi se hidraulička simulacija i određuje vrednost ciljne funkcije (eng. Objective function – OF). Efikasnost optimizacionog GA algoritma zavisi direktno od 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:

$$OF = Cost + \sum_{i=1}^4 C_i P_i \quad (2)$$

Kaznene funkcije koje su implementirane u algoritam, jedinična vrednosti njihovih kaznenih vrednosti (C_i) i način proračuna faktora proporcionalnosti (P_i) su sumirani u narednoj tabeli:

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

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 €	$P_i = 1$
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^{req}). Ukoliko uslov nije ispunjen, faktor proporcionalnosti se računa prema broju zona koje ne ispunjavaju uslov i broju nedostajućih dovoda vode.	$5 \times 10^5 \text{ €}$	$P_i = n_{cl} + \sum_{j=1}^{n_{cl}} (f_j^{\text{req}} - f_j^*)$ <p>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</p>
3	Zadovoljenost minimalnog pritiska	Ukoliko je pritisak u bilo kom čvoru mreže ispod minimalne zahtevane vrednosti, rešenje se kažnjava proporcionalno broju takvih čvorova.	$5 \times 10^4 \text{ €}$	$P_i = n_j$ <p>n_j – broj čvorova u mreži u kojim asu pritisci niži od minimalnog zahtevanog</p>
4	Smanjenje pritiska u mreži	Ukoliko dolazi do smanjenja prosečnih pritiska u mreži, u poređenju sa originalom dispozicijom mreže, rešenje se kažnjava proporcionalno iznosu smanjenja pritiska.	$1 \times 10^4 \text{ €/m}$	$P_i = p_{\text{av_min}}^{\text{orig}} - p_{\text{av_min}}^*$ <p>$p_{\text{av_min}}^{\text{orig}}$ - minimalni prosečni pritisak u toku 24-časovne simulacije u originalnoj dispoziciji mreže $p_{\text{av_min}}^*$ - minimalni prosečni pritisak u toku 24-časovne simulacije u dispoziciji mreže sa implementiranim intervencijama</p>

Vrednost ciljne funkcije data jednačinom 2 (OF) se minimizira u postupku optimizacije a rešenje se smatra valjanim ukoliko zadovoljava sledeće uslove:

1. Pritisci u mreži su tokom 24-časovne simulacije u predefinisanim granicama ($p_{\text{MIN}} - p_{\text{MAX}}$) i
2. Broj dovoda vode u sve OZB je veći od zahtevanog broja (f^{req}), definisanog prema njihovoj veličini.

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 pritisaka u mreži, kao posledica predviđenih intervencija, koja se računa prema sledećoj relaciji:

$$\Delta p = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{t=1}^{24} (p_i^{*t} - p_i^t)}{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{t=1}^{24} (p_i^t)} 100 \quad [\%] \quad (3)$$

gde je p_i^t pritisak u i -tom čvoru mreže u vremenskom trenutku t u originalnoj mreži a p_i^{*t} je pritisak u tom istom čvoru i istom vremenskom trenutku u mreži sa implementiranim intervencijama;

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. 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.

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 su poslužili za razvoj i testiranje DeNSE metodologije za podelu distributivne mreže na OZB. Za potrebe testiranja metodologije odabrana su 2 područja, jedno manje (~10000 priključaka) i jedno veće (~35000 priključaka). U oba slučaja predložena DeNSE metodologija, implementirana u opisani hidroinformacioni alat, se pokazala vrlo korisnom i efikasnom u postupku definisanja OZB (Vasilić & Ivetić, 2020). U ovom radu su prikazani rezultati testiranja na primeru distributivne mreže za manje područje.

Osnovne karakteristike mreže su: 3204 cevi, 3997 čvorova od čega 2046 potrošačkih, 1 izvorište, 1 rezervoar, 1 pumpa, 989 zatvarača, 10741 priključak i ukupna prosečna potrošnja u mreži iznosi 161,3 m³/h. Odabrana mreža 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. U nastavku se prikazuju rezultati primene metodologije na razmatranom test primeru. Presentacija 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.

3.1 Ulazni podaci

Za potrebe primene tehničkog rešenja na analiziranom primeru 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 $n_c^{\min}=500$ i $n_c^{\max}=5000$. 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 u kome je broj priključaka eksplicitno definisan u svakom čvoru mreže;
4. Usvojena vrednost prečnika primarne distributivne mreže iznosi $D_{\text{MAIN}} = 225$ mm;
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 OZB u mreži iznosi $N=10$;

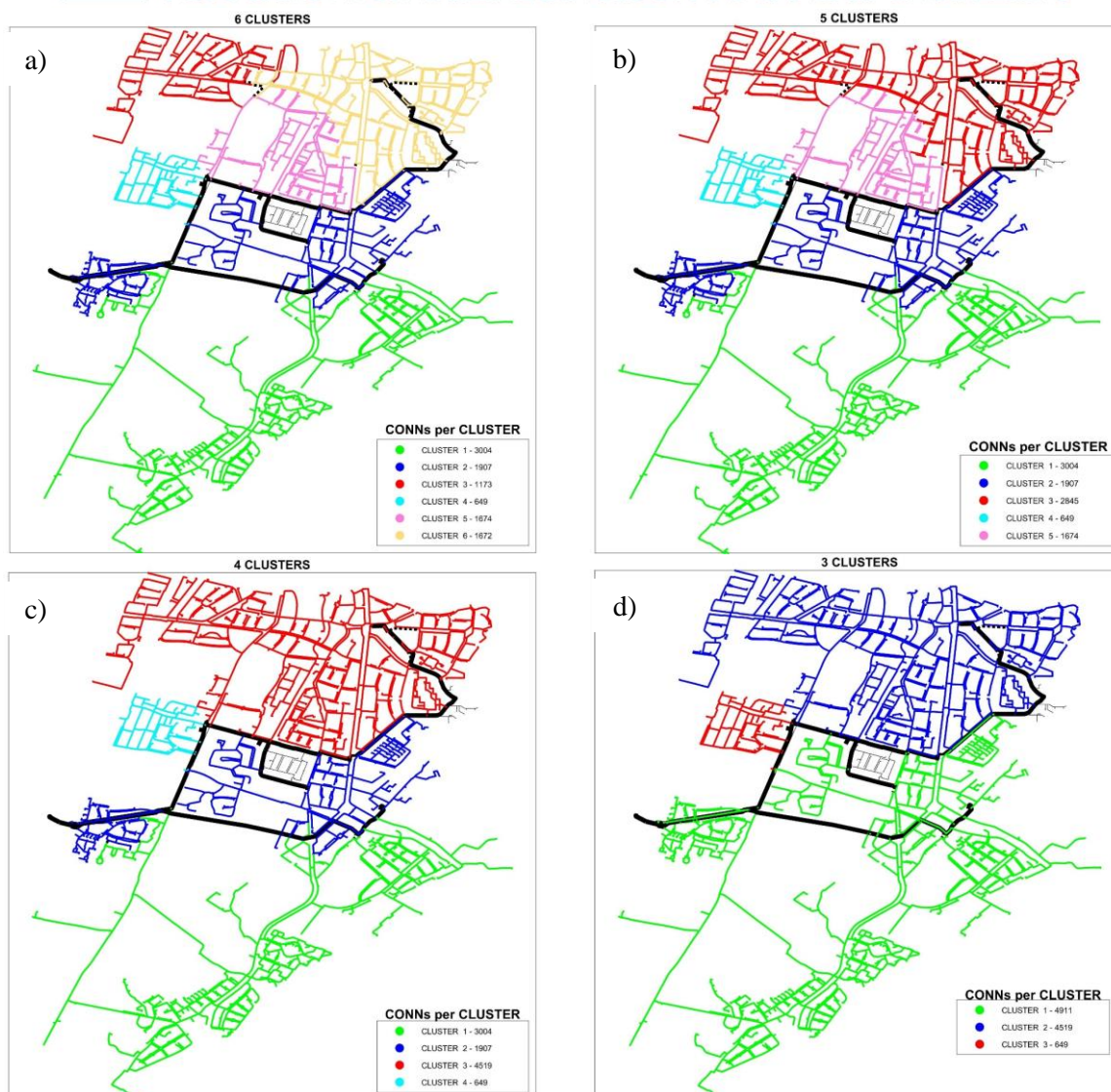
Pored navedenih ulaznih podataka, korišćeni su dodatni podaci preuzeti iz internog pravilnika kompanije „WaterNet“ (“Design Criteria for Drinking Water Distribution Networks”), neophodni za primenu metodologije: 1) nabavne cene uređaja sa instalacijom (zatvarača i merača protoka) i 2) sigurnost vodosnabdevanja – broj zahtevanih direktnih dovoda vode u svaki deo mreže prema broju priključaka (f^{req}).

3.2 Rezultati podele mreže na klasterne

Maksimalna vrednost indeksa uniformnosti iznosi $U_{\text{max}} = 0.59$ 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 3 prikazuje rešenja podele mreže na klasterne u poslednja 4 koraka agregacije. Identifikovani klasteri u mreži su na svakom grafiku označeni različitom bojom, sa legendom koja prikazuje i broj priključaka u svakom klasteru. 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 egzatno 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^{pref} .

Maksimalna vrednost indeksa uniformnosti $U_{\text{max}}=0.59$ se ostvaruje u slučaju rešenja sa podelom mreže na 6 klastera (slika 3-a). U ovom trenutku agregacije svi klasteri su u granicama $n_c^{\min} - n_c^{\max}$.

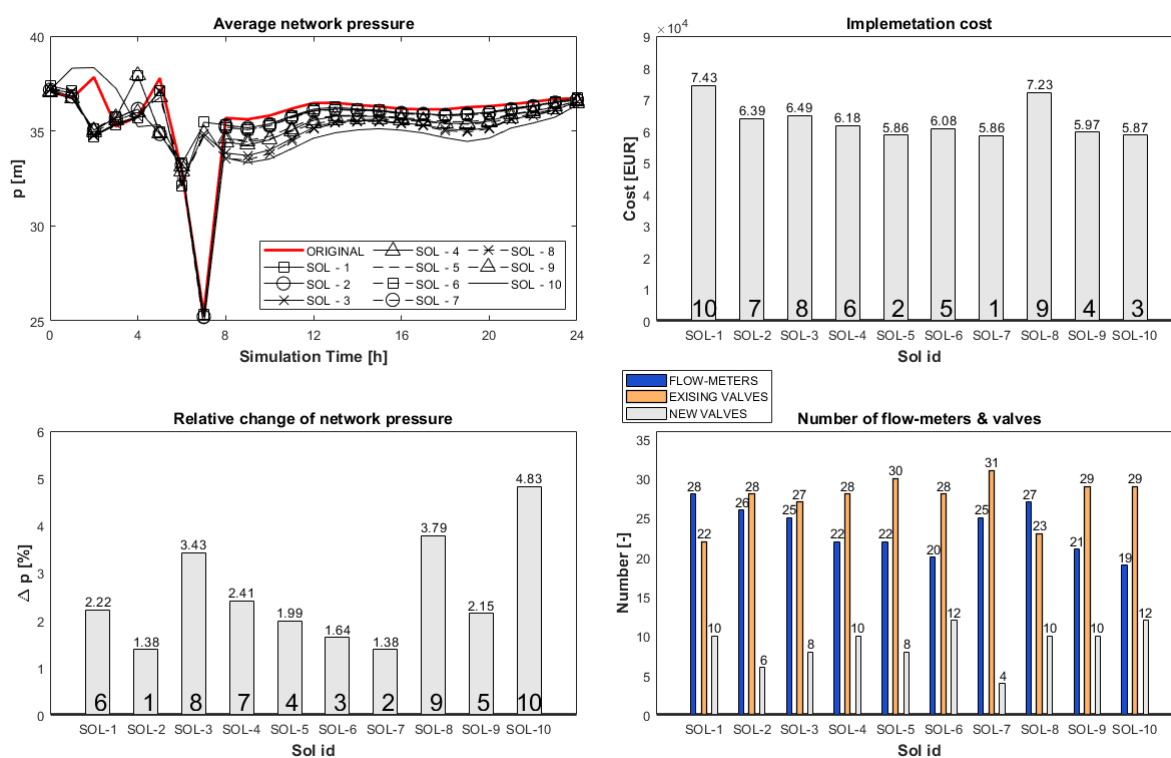


Slika 3. Podela mreže na klastera u poslednja 4 koraka agregacije

Dva relativno velika klastera, 3 i 6, se agregiraju u narednom koraku (slika 3-b), 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^{pref} - klaster 1 sa 3004 priključaka 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 3-c 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 (slika 3-d). Dva od tri klastera su po veličini skoro duplo veći od vrednosti n_c^{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.

3.3 Rangiranje optimizovanih rešenja

Kao što je ranije rečeno, na korisniku je da odabere jedno rešenje sektorizacije mreže na klasterne 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 3). Izbor rešenja zavisi od topologije mreže, lokalnih uslova, potreba i preferencija kompanije koja upravlja vodovodnom mrežom. U ovom slučaju odabrano je rešenje sa šest klastera (slika 3-a), kome odgovara najveća vrednost indeksa uniformnosti. 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 (slika 4). Rangiranje je prikazano brojevima na dnu grafika.



Slika 4. Uporedne vrednosti kriterijuma za rangiranje rešenja: 1) prosečni pritisak (p); 2) relativna promena pritiska (Δp); 3) cena implementacije (Cost); 4) broj zatvarača i merača protoka (number)

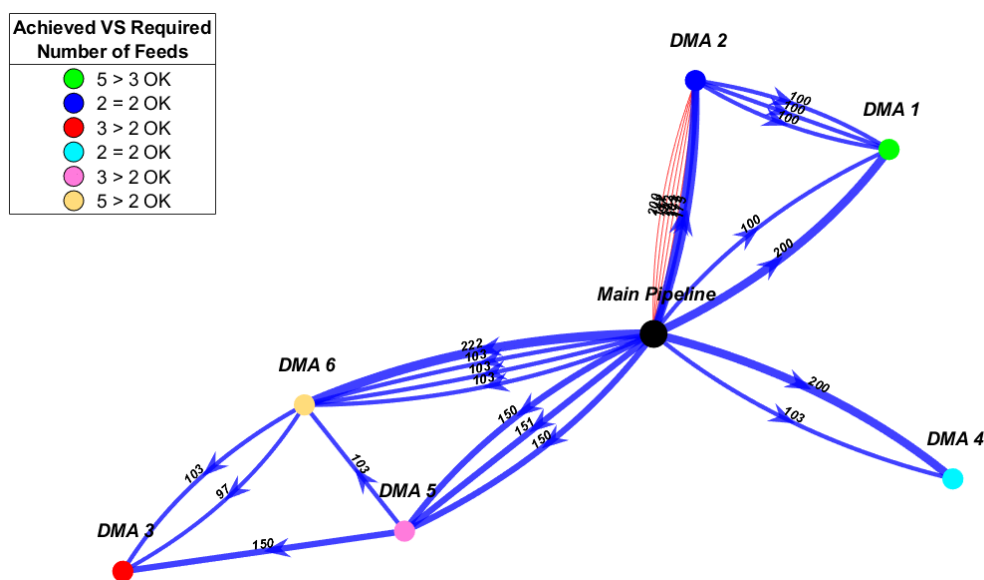
Na osnovu dobijenih vrednosti apsolutnih minimalnih pritisaka u mreži za sva rešenja (nisu prikazana grafički ovde), i njihovog poređenja sa istim pritiskom u originalnoj mreži, zaključuje se da sva rešenja ispunjavaju uslove zahtevanih pritisaka u mreži ($p_{MIN} - p_{MAX}$).

Na osnovu indikatora relevantnih za pritisak u mreži, jasno je da rešenja SOL-2, SOL-7, SOL-6 i SOL-5 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 i broj novih zatvarača koje je potrebno instalirati u mreži (četiri).

3.4 Izbor, vizuelizacija konačnog rešenja i izlazne datoteke

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 odbaciti 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 slici 5 označene sa DMA).

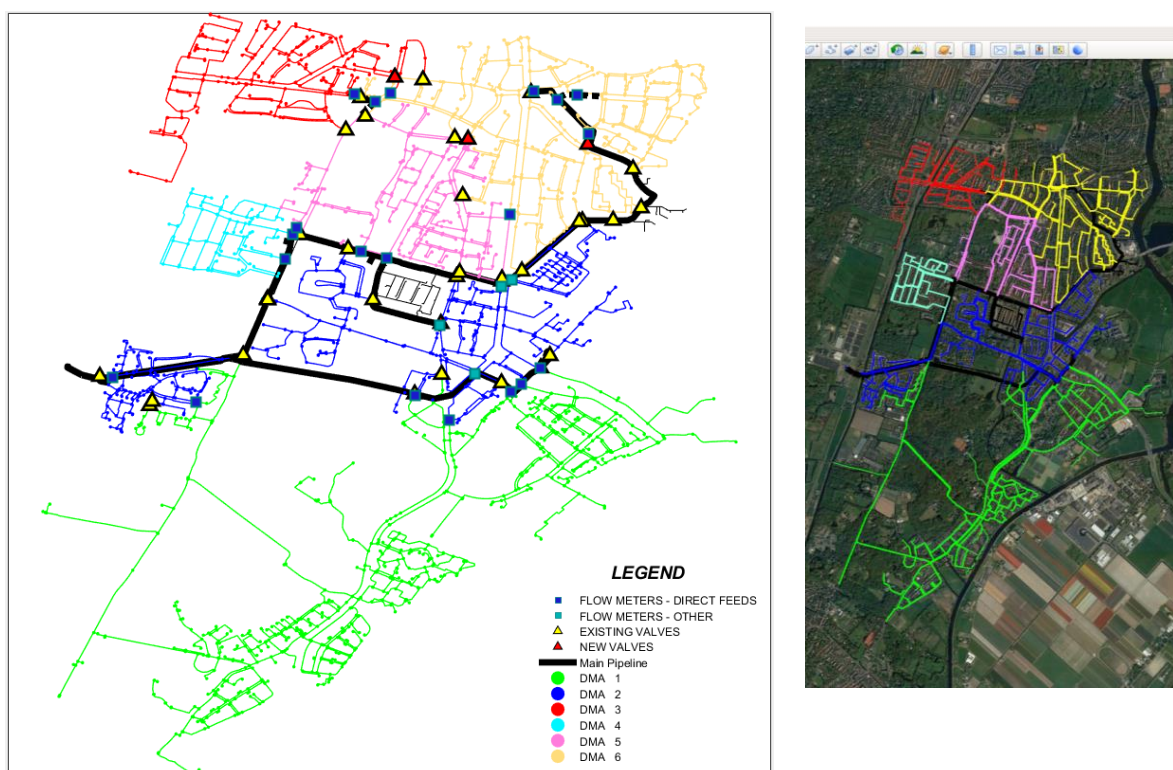


Slika 5: Uporedni prikaz međusobne povezanosti OZB u rešenju SOL-7

Slika 5 prikazuje šemu međusobne povezanosti zona za najbolje rangirano rešenje SOL-7. Legenda prikazuje broj zahtevanih (eng. required) i u rešenju ostvarenih (eng. achieved) direktnih dovoda vode u svaku zonu (eng. feeds). Potrebno je primetiti da se u slučaju prikazanog rešenja SOL-7, a i preostalih devet koja nisu prikazana ovde, ostvaruje 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 (eng. Main Pipeline). Ovakav uslov je svakako imperativ, ali ga nije moguće ostvariti za zonu DMA 3 zbog njene udaljenosti od glavnog distributivnog cevovoda.

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 (slika 6). Korisnik svakako može generisati ovakav grafički prikaz za svako alternativno rešenje, i pomoću ekspertskog

poznavanja svih osobnosti razmatrane mreže odabrati najpogodnije rešenje. Rešenje SOL-7 je u konkretnom slučaju odabrano kao optimalno i konačno.



Slika 6. Prostorni raspored zatvarača i merača protoka za usvojeno rešenje SOL-7

Dodatno se može generisati i prikaz usvojenog rešenja u Google Earth softverskom okruženju (slika 6-desno). 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, zatvarače i merače 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. 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.

Tabela 4. Fazna implementacija osnovnih zona bilansiranja

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

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.

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. 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.

5 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
- 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.
- Vasilic, Ž. (University of B. F. of C. E., & Ivetic, 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*.