

SEKTORIZACIJA VODOVODNE MREŽE NA OSNOVNE ZONE BILANSIRANJA SA POREĐENJEM INDIKATORA PERFORMANSI

Željko Vasilić, mast.inž.građ

Miloš Stanić, dipl. građ. Inž.

Damjan Ivetić, mast.inž.građ

Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

zvasilic@grf.bg.ac.rs

Rezime

Sektorizacija odnosno podela vodovodne mreže na osnovne zone bilansiranja (eng. District Meter Areas – DMAs) predstavlja najisplativiju i opšte prihvaćenu strategiju za kontrolu vodnog bilansa, pritiska i smanjenje gubitaka u mreži. Izbor zona bilansiranja nije jednoznačan zbog čega je identifikacija njihovog optimalnog rasporeda u mreži 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. Metodologija za sektorizaciju primenjena u ovom radu zasnovana je na primeni indeksa uniformnosti mreže (eng. Uniformity Index) čime se omogućava identifikacija zona u mreži ujednačenih po potrošnji. Efikasnost, upotrebljivost i primena razvijene metodologije obezbeđena je kroz implementaciju sledećih celina u jedinstveni hidroinformacioni alat: 1) algoritam za automatsku sektorizaciju mreže na klastere, 2) efikasn model za hidrauličke simulacije i 3) višekriterijumska optimizacija. Osnovni kriterijumi za vrednovanje i izbor optimalnog rešenja su minimalna ulaganja u neophodne intervencije u mreži i očuvanje pouzdanosti sistema. Za poređenje stanja sistema pre i nakon sektorizacije usvojeni su sledeći indikatori performansi: 1) indeks sposobnosti adaptacije sistema (eng. Resilience Index), 2) pokazatelj zadržavanja vode u mreži (eng. Water Age) i 3) prosečan pritisak u zonama. Rezultati testiranja metodologije na realnom primeru distributivne mreže naseljenog mesta u Holandiji, sa primenom lokalnih kriterijuma, potvrđuju da metodologija može biti od značajne koristi u inženjerskoj praksi u procesu sektorizacije.

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

SECTORIZATION OF WATER DISTRIBUTION NETWORK INTO DMAs WITH PERFORMANCE INDICES COMPARISON

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. The efficiency, usability and successful application of the developed methodology is ensured through its' implementation in comprehensive hydroinformatics tool encompassing: 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. To compare the state of the system before and after sectorization, the following performance indices were adopted: 1) Resilience Index, 2) Water Age and 3) average pressure in zones. Testing algorithm on a real-life WDN in Netherlands, 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

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. 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 [1]. Jedna zona OZB 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 [2]. 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 [3], o ukupnom broju stanovnika u jednoj zoni od 2.500 – 12.500 ili o ukupnoj dužini mreže od 5 do 30 km [4]. Međunarodna asocijacija za vode (International Water Association - IWA) preporučuje svoj dokument koji može poslužiti inženjerima prilikom zoniranja mreže [5] a slične preporuke daje i Svetska zdravstvena organizacija [6].

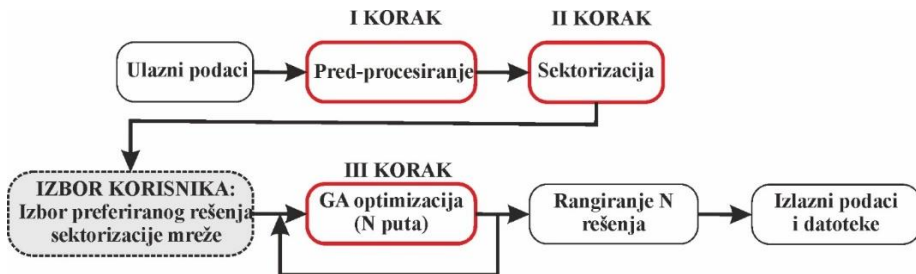
Obzirom na veliki broj kriterijuma i ograničenja, u praksi je definisanje zona proces baziran na ekspertskom znanju, odnosno, na inženjerskom pristupu u toku koga se metodom probanja testiraju različita varijantna rešenja na hidrauličkom modelu. Iskustveno znanje se svakako ne može zanemariti i treba 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 dimenzionisnje i automatsku podelu mreže zasovanih na primeni optimizacionih algoritama (najčešće metode enumeracije i genetskih algoritama) koje bi omogućile pretragu šireg skupa mogućih rešenja [7]–[11]. 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 [12]). 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 [13], [14]. 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.

METODOLOGIJA

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



Slika 1. Šematski prikaz DeNSE metodologije
Figure 1. DeNSE methodology flow chart

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 klasterne, na osnovu novog indeksa uniformnosti mreže. Nakon završetka ovog koraka, korisnik pred sobom ima izbor većeg broja rešenja podele mreže na klasterne 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 klasterne 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. U nastavku će se navesti neophodni ulazni podaci za primenu metodologije i ukratko opisati postupci sektorizacije mreže na klasterne (II korak)

i definisanja OZB (III korak), dok se detaljan opis kompletne metodologije može naći u relevantnoj literaturi [13], [14].

Ulazni podaci

Za primenu hidroinformatičnog 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 [5], [6]. 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 [15];
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.

Podela mreže na klasterne – sektorizacija

Podela mreže na klasterne se odvija u drugom koraku metodologije i sastoji se iz tri faze: 1) identifikacija direkcionog acikličnog grafa (DAG) sačinjenog od čvrsto povezanih komponenti (Strongly Connected Components – SCCs); 2) topološko sortiranje identifikovanog DAG grafa, 3) agregacija topološki sortiranog DAG grafa. Postupak agregacije je baziran na složenom indeksu uniformnosti (U) koji je definisan na sledeći način [14]:

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

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 klasterne.

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. 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 klasterne 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 klasterne (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 podele mreže na klastere.

Definisanje 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 primenjuje se metoda genetskog algoritma (Genetic Algorithm – GA). 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 24-časovna 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
Table 1. Penalty functions used in GA algorithm

i	Tip kaznene funkcije	C_i	P_i
1	Valjanost rešenja	10^7 €	$P_i = 1$
2	Zahtevani broj dovoda vode u zonu	$5 \times 10^5 \text{ €}$	$P_i = n_{cl} + \sum_{j=1}^{n_{cl}} (f_j^{\text{req}} - f_j^*)$
3	Zadovoljenost minimalnog pritiska	$5 \times 10^4 \text{ €}$	$P_i = n_j$
4	Smanjenje pritisaka u mreži	$1 \times 10^4 \text{ €/m}$	$P_i = p_{av_min}^{\text{orig}} - p_{av_min}^*$

gde su: 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; n_j - broj čvorova u mreži u kojim asu pritisci niži od minimalnog zahtevanog; $p_{av_min}^{\text{orig}}$ - 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. Vrednost ciljne funkcije data jednačinom 2 (OF) se minimizira u postupku optimizacije

Indikatori za rangiranje i izbor rešenja

Nakon trećeg koraka algoritma, rešenja su optimizovana i korisnik može pristupiti njihovoj analizi i odabiru onog koje će potencijalno biti implementirano na terenu. Izbor rešenja se vrši na osnovu sledećih pokazatelja koji odražavaju

efekte intervencija koje se preduzimaju za implementaciju i uspostavljanje osnovnih zona bilansiranja:

1. Prosečni pritisci u mreži (p_{AV}), pre i nakon implementacije intervencija;
2. Cena koštanja implementacije rešenja (*Cost*), određena na osnovu procene troškova za instalaciju merača protoka i izolacionih zatvarača;
3. 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.

Indikatori za evaluaciju usvojenog rešenja

Za evaluaciju usvojenog rešenja i poređenje stanja sistema pre i nakon sektorizacije usvojeni su sledeći indikatori performasi: 1) indeks sposobnosti adaptacije sistema (*Res* – eng. Resilience Index), 2) pokazatelj zadržavanja vode u mreži (*WA* – eng. Water Age) i 3) prosečan pritisak u zonama (P_{DMA}^{av}). Prosečan indeks sposobnosti adaptacije sistema (*Res*), odnosno dela sistema, se računa kao prosečna vrednost tokom perioda simulacije od 24 h. Ovaj indeks predstavlja odnos rezidualne energije u sistemu, nakon zadovoljenja čvornih potrošnji, i maksimalne količine energije koja može biti utrošena u mreži uz uslov zadovoljenja čvornih potrošnji i minimalnih pritisaka u mreži [12]. Indeks se računa na sledeći način:

$$Res = \underset{T}{mean} \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_j} q_i (h_i - h_i^*)}{\sum_{j=1}^{n_r} Q_j H_j + \sum_{k=1}^{n_p} \frac{P_k}{\gamma} - \sum_{i=1}^{n_j} q_i h_i^*} \right) \quad [-] \quad (3)$$

gde su: n_j – broj čvorova; n_r – broj rezervoara; n_p – broj pumpi; q_i – čvorna potrošnja u čvoru i ; h_i – pritisak u čvoru i , h_i^* - minimalni pritisak u čvoru i ; Q_j – dotok iz rezervoara j , H_j – pijeziometarska kota rezervoara; P_k – količina energije koja se u sistem uvodi pumpom k i $\gamma = \rho g$ – specifična težina vode.

Prosečna vrednost pokazatelja zadržavanja vode u mreži (*WA*), tokom poslednja 24h 7-dnevne simulacije se računa kao:

$$WA = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{t=T-24}^T WA_i^t}{24n_j} \quad [h] \quad (4)$$

gde je WA_i^t – *WA* koji se odnosi na čvor i u trenutku t .

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 [16]. 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.

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}).

Rezultati podele mreže na klasterne

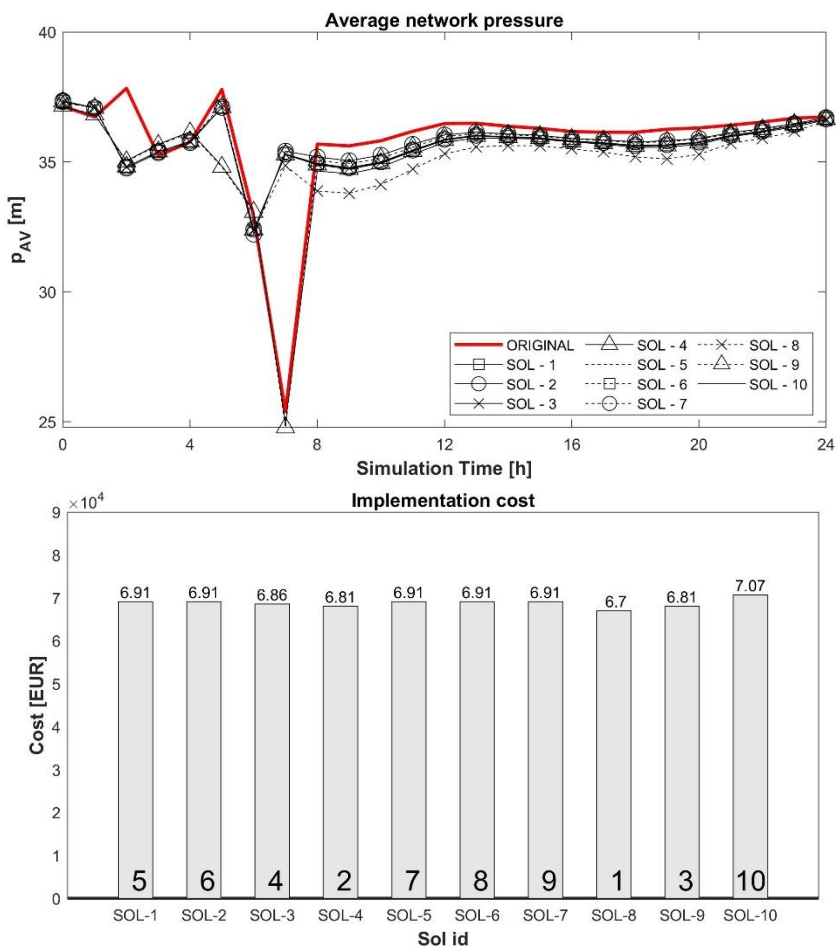
Maksimalna vrednost indeksa uniformnosti iznosi $U_{max} = 0.59$ i odgovara podeli mreže na 6 klastera. Izbor ovog rešenja se nameće kao logičan za postupak optimizacije položaja merača protoka i izolacionih zatvarača za definisanje OZB. Međutim, korisniku se savetuje da sagleda i rešenja koja se nalaze 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.

Rangiranje optimizovanih rešenja i izbor konačnog

Kao što je prethodno 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. 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 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 2 – prosečnog pritiska i cene koštanja). Rangiranje je prikazano brojevima na dnu grafika.

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 prikaza prosečnih pritisaka u mreži tokom 24h jasno je da rešenje SOL-9 najmanje utiče na trend promene pritiska, dok ostala rešenja utiču na porast pritiska u periodu 7-8h kada dolazi do promene režima rada pumpe. Generalno sva rešenja neznatno snižavaju 24-časovni prosečan pritisak u mreži.

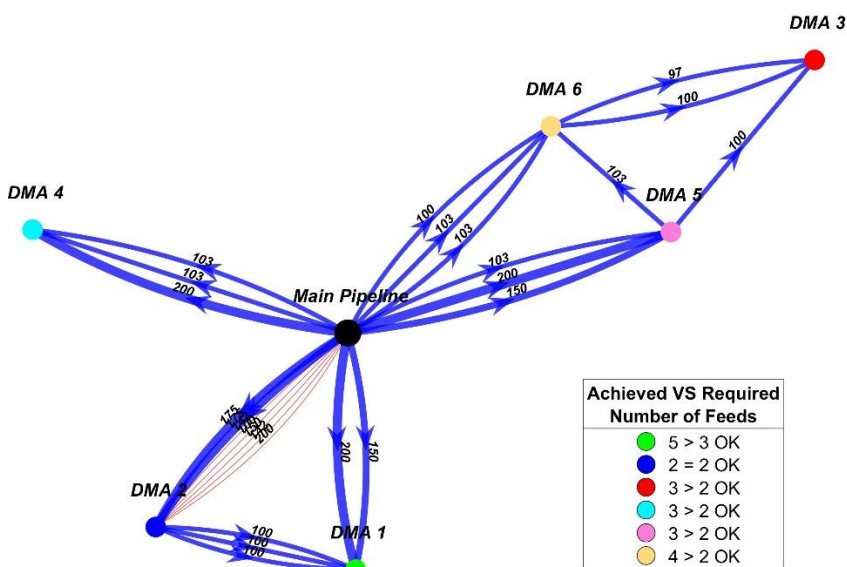
Sa aspekta cene implementacije, rešenje SOL-8 je najbolje rangirano a prate ga rešenja SOL-4 i SOL-9. Cena implementacije je indirektno povezana i sa brojem uređaja koje je potrebno instalirati, međutim ne linearno jer cena pojedinih uređaja nije direktno proporcionalna sa prečnikom cevi na koju se instalira. Ipak, rešenje SOL-9 dominira i po ovom kriterijumu.



Slika 2. Kriterijumi za rangiranje rešenja optimizacije
Figure 2. Optimization solutions' ranking criteria

Obzirom na prethodno izlaganje može se zaključiti da su sva rešenja dobijena postupkom optimizacije validna, tj. zadovoljavaju sve osnovne hidrauličke kriterijume i mogu biti implmentirana na terenu. Rešenje SOL-9 je rangirano među prva 3 prema kriterijumu cene, i kao prvo po kriterijumu promene prosečnog pritiska, pa se shodno tome i nameće kao logičan izbor. Međutim mora se pažljivo razmotriti i međusobna povezanost osnovnih zona

bilansiranja. Slika 3 prikazuje šemu međusobne povezanosti zona (OZB, na slici 3 označenih sa DMA) za rešenje SOL-9. 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-9, 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. Obzirom na prethodno izlaganje, rešenje SOL-9 se usvaja kao konačno rešenje podele mreže na OZB.



Slika 3. Međusobna povezanost OZB u rešenju SOL-9
 Figure 3. DMA's connectivity in solution SOL-9

Evaluacija i vizuelizacija konačnog rešenja

Nakon izbora konačnog rešenja potrebno je izvršiti njegovu evaluaciju i validaciju na osnovu prethodno usvojenih kriterijuma: 1) indeks sposobnosti adaptacije sistema (*Res* – eng. Resilience Index), 2) pokazatelj zadržavanja vode u mreži (*WA* – eng. Water Age) i 3) prosečan pritisak u zonama (P_{DMA}^{av}). U tabeli 2 su prikazane vrednosti 3 indikatora za evaluaciju po zonama, pre i posle sektorizacije mreže, kao i broj priključaka (*Nconn*), prosečna potrošnja (*Q*) i ukupna dužina mreže (*L*). Obzirom na minimalan i maksimalan broj priključaka u okviru jedne OZB ($n_c^{\min}=500$ i $n_c^{\max}=5000$), definisan u ulaznim podacima,

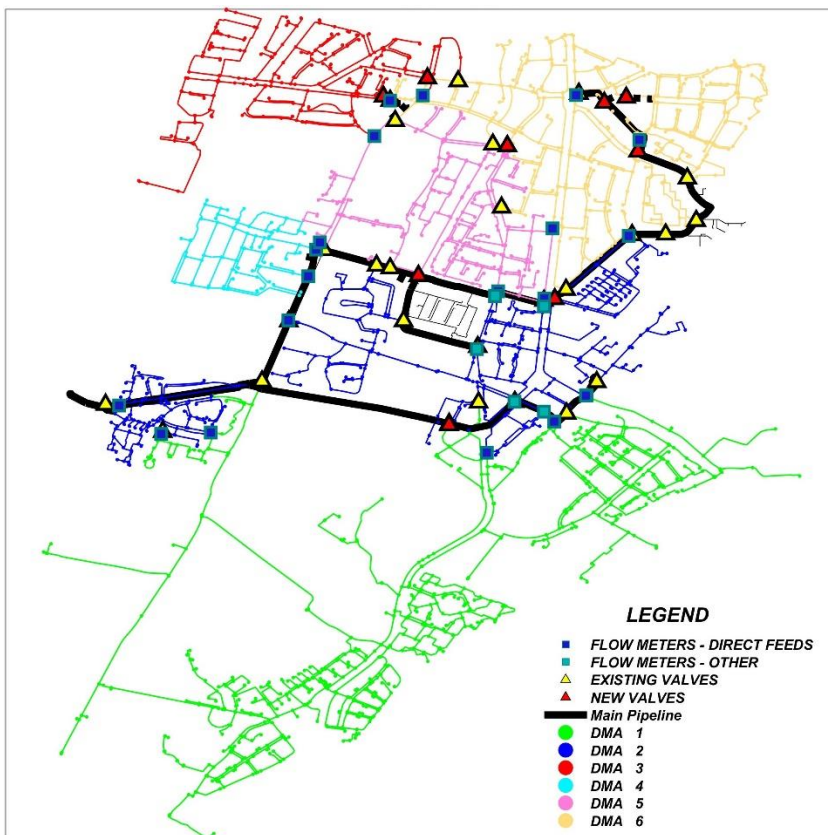
proizilazi da je preferirani broj priključaka $n_c^{pref} = 2750$. Nemoguće je u svakoj zoni ostvariti egzatno isti broj priključaka jednak preferiranom broju. Kao što je ranije opisano osnovni cilj metodologije je ostvariti podelu u kojoj su sve zone po veličini u rasponu $n_c^{min} - n_c^{max}$ i što bliže vrednosti n_c^{pref} . Zone DMA 2, DMA 3, DMA 5 i DMA 6 su relativno ujednačene po broju priključaka što je i bio jedan od ciljeva podele na klastere. Zona DMA 1 je najveća po veličina ali bliska preferiranoj veličini od 2750 priključaka, dok je zona DMA 1 najmanja po veličini sa 649 priključaka iz razloga što je povezana samo na glavnu distributivnu mrežu pa njena dalja agregacija nije bila moguća. Na osnovu prikaza prosečnih pritisaka u mreži u mreži (P_{DMA}^{av}), može se zaključiti da je došlo do njihovog neznatnog smanjenja u svim zonama, što se nije značajnije odrazilo na indeks sposobnosti adaptacije sistema (*Res*). Pokazatelj zadržavanja vode u mreži (*WA*) se pogoršao u svim zonama osim zone DMA 4, zbog promene smerova tečenja u mreži, međutim ipak je i dalje ispod minimalne propisane po standardima kompanije Waternet (60 h).

Tabela 2. Karakteristike definisanih OZB
Table 2. Charactersitics of defined DMAs

DMA	Nconn	Q	L	p_{AV}		WA		Res	
				orig.	sekt.	orig.	sekt.	orig.	sekt.
(-)	(-)	(L/s)	(km)	(m)	(m)	(h)	(h)	(-)	(-)
1	3004	46.16	36.99	35.88	35.58	44.46	49.65	0.974	0.977
2	1907	26.65	23.69	35.92	35.64	38.81	42.18	0.864	0.863
3	1173	18.05	12.72	35.41	34.31	47.09	46.93	0.991	0.953
4	649	8.41	5.88	36.07	35.87	30.37	31.06	0.998	0.998
5	1674	23.28	13.38	35.84	35.42	36.17	44.56	0.980	0.960
6	1672	27.07	22.73	35.72	34.91	53.09	54.85	0.997	0.959

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 4). Korisnik svakako može generisati ovakav grafički prikaz za svako alternativno rešenje, i pomoću ekspertskeg poznavanja svih osobnosti razmatrane mreže odabrati najpogodnije rešenje.

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 tabeli 3 i ukupna cena implementacije OZB za celu mrežu iznosi € 68.067,75.



Slika 4. Prostorni raspored zatvarača i merača protoka za usvojeno rešenje
 Figure 4. Network position of flow meters and valves for adopted solution

Tabela 3. Fazna implementacija osnovnih zona bilansiranja
 Table 3. Phased implementation of DMAs

Faza implementacije	1	2	3	4	5	6
OZB (DMA)	DMA_4	DMA_3	DMA_5	DMA_6	DMA_1	DMA_2
Cena (€)	6.278,13	9.428,13	11.520,84	11.003,13	12.038,55	17.798,97

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.

LITERATURA

- [1] A. Ostfeld *et al.*, "The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms," *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 134, no. 6, pp. 556–568, Nov. 2008.
- [2] R. Burrows, G. Crowder, and J. Zhang, "Utilisation of network modelling in the operational management of water distribution systems," *Urban Water*, vol. 2, no. 2, pp. 83–95, 2000.
- [3] WAA and WRC, "Water Authorities Association and Water Research Centre: Report 26 Leakage Control Policy & Practice." 1985.
- [4] D. Butler, *Leakage detection and management*. Cwambran, UK: Palmer Environmental Ltd, 2000.
- [5] J. Morrison, S. Tooms, and D. Rogers, *DMA management guidance notes*. London: IWA, 2007.
- [6] M. Farley, "Leakage Management and Control: A Best Practice Training Manual," pp. 1–169, 2001.
- [7] C. Bragalli, C. D'Ambrosio, J. Lee, A. Lodi, and P. Toth, "On the optimal design of water distribution networks: A practical MINLP approach," *Optim. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 219–246, 2012.
- [8] S. Alvisi and M. Franchini, "Water distribution systems: Using linearized hydraulic equations within the framework of ranking-based optimization algorithms to improve their computational efficiency," *Environ. Model. Softw.*, vol. 57, pp. 33–39, 2014.
- [9] A. Di Nardo, M. Di Natale, G. Santonastaso, V. Tzatchkov, and V. Alcocer-Yamanaka, "Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices," *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 140, no. 5, pp. 620–629, 2014.
- [10] O. Giustolisi and L. Ridolfi, "New Modularity-Based Approach to Segmentation of Water Distribution Networks," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 140, no. 10, p. 04014049, 2014.
- [11] S. Hajebi, E. Roshani, N. Cardozo, S. Barrett, A. Clarke, and S. Clarke, "Water

- distribution network sectorisation using graph theory and many-objective optimisation,” *J. Hydroinformatics*, vol. 18, no. 1, pp. 77–95, Aug. 2016.
- [12] E. Todini, “Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach,” *Urban Water*, vol. 2, no. 2, pp. 115–122, 2000.
- [13] Ž. Vasilic, M. Stanic, Z. Kapelan, D. Prodanovic, and B. Babic, “Uniformity and Heuristics-Based DeNSE Method for Sectorization of Water Distribution Networks,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 146, no. 3, 2020.
- [14] Ž. Vasilic, “Decision Support Algorithms for Sectorization of Water Distribution Networks (PhD Thesis, Belgrade - december 2018),” University of Belgrade, 2018.
- [15] G. Ferrari, D. Savic, and G. Becciu, “A Graph Theoretic Approach and Sound Engineering Principles for Design of District Metered Areas,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 140, no. 12, pp. 1–13, 2014.
- [16] Ž. (Univerity of B. F. of C. E. Vasilic and D. (Univerity of B. F. of C. E. Ivetić, “Report on application of sectorization method for creation of District Meter Areas (DMAs) within the water distribution network of the city of Amsterdam,” 2020.