

PODELA VODOVODNE MREŽE NA OSNOVNE ZONE BILANSIRANJA KORIŠĆENJEM TOPOLOŠKIH MATRICA POVEZANOSTI

D. Ivetić¹, M. Stanić², Ž. Vasilčić³, D. Prodanović⁴

Apstrakt: Formiranje zona bilansiranja vodovodne mreže jednog grada je potreban preduslov za racionalnu potrošnju vode. Da bi se formirale zone bilansiranja potrebno je praktično podeliti postojeću mrežu na odvojene celine, međusobno spojene što manjim mogućim brojem veza (cevi). Kako bi se došlo do minimalnog broja veza potrebno je zatvoriti izvestan broj cevi dok se na drugim instalira merač proticaja. Izolacioni zatvarači ranije postavljeni u mreži, se mogu iskoristiti za zatvaranje cevi. U tom kontekstu neophodno je razmotriti sistem izolacionih zatvarača postavljenih u distributivnoj mreži čiji je primarni zadatak da isključuje pojedine delove mreže. Definišu se segmenti distributivne mreže koji predstavljaju delove mreže koji se mogu izolovati od ostatka sistema zatvaranjem određenih izolacionih zatvarača. Kako su vodovodne mreže složene strukture, potrebno je primeniti algoritam za definisanje segmenata. Predstavljeni algoritam ima za zadatak da na osnovu hidrauličkih modela vodovodnih mreža unetih preko standardnih softvera (EPANET, 3Dnet) definiše segmente mreže, nenamerna isključenja u mreži kao posledicu izolovanja određenog segmenta, kao i deficit u vodosnabdevanju koji će se izolovanjem određenog segmenta javiti. Koristi se topološke matrice povezanosti koje se koriste u hidrauličkim modelima vodovodnih mreža. Primenjena metodologija za segmentizaciju je opisana kroz jednostavan primer. Algoritam je primenjen na vodovodnoj mreži italijanskog grada Ferrara.

Ključne reči: segmenti, vodovodne mreže, topološke matrice povezanosti \

Abstract: Design of district metric areas for a city water distribution system is a necessary precondition for rational water consumption. In order to form district metric areas, existing network should be divided in separate units, interconnected via minimal number of connections (pipes). To obtain a minimal number of connections, a number of pipes need to be closed, while on some others flow meters are installed. Isolation valves, previously placed in network, could be used in order to close the pipes. In this context, it is necessary to investigate the isolation valve system installed in distribution network whose primary task is to isolate certain parts of the network. Segments in the distribution network are defined, where they represent a part of the network that can be isolated from the rest by closing certain isolation valves. Water distribution networks have a complex structure, so an algorithm needs to be employed in order to define these segments. Algorithm presented, has the task to, based on the hydraulic model of the water distribution system entered through standard software (EPANET, 3Dnet), define network segments, accidental disconnection of the network parts as a result of the isolation of a segment, as well as a water demand shortfall which will occur to the segment isolation. Topological incidence matrices are used, which are already defined by the hydraulic model of the water distribution network. Methodology used for the network segmentation is described through a simple example. The algorithm is applied to the water supply network of the Italian city of Ferrara.

Keywords: Segments, water networks, topological incidence matrix

1. UVOD

Kako bi se efikasno upravljalo odnosno „gazdovalo“ vodovodnim distributivnim sistemima, neophodno je formirati zone bilansiranja. Poznavanjem ulaznih i izlaznih proticaja iz ovih zona, kao i fakturisanom potrošnjom vode unutar jedne zone, otvara se mogućnost za kvantifikovanje gubitaka vode. Imajući u vidu da se očekuje samo porast jedinične cene vode kao i da će se usled nedostataka izvora javljati deficiti vode, racionalizacija potrošnje je neminovna.

Da bi se formirale zone bilansiranja potrebno je praktično podeliti postojeću mrežu na odvojene celine, međusobno spojene što manjim mogućim brojem veza (cevi). Različita soft-

¹⁾ Damjan Ivetić, asistent doktorant, Građevinski fakultet, divetic@hikom.grf.bg.ac.rs

²⁾ Miloš Stanić, docent, Građevinski fakultet, mstanic@grf.bg.ac.rs

³⁾ Željko Vasilčić, asistent doktorant, Građevinski fakultet, zeljkovasilic@hikom.grf.bg.ac.rs

⁴⁾ Dušan Prodanović, redovni profesor, Građevinski fakultet, eprodano@hikom.grf.bg.ac.rs

verska rešenja se mogu koristiti kao pomoćni alat (Branisavljević et al, 2014). Uglavnom takav poduhvat zahteva zatvaranje izvesnog broja aktivnih cevi koje bi spajale buduće zone, dok se na preostalim instaliraju merači proticaja. Na taj način buduća zona je ograničena zatvorenim cevima dok sa ostalim zonama ostvaraju vezu preko cevi u kojima je moguće odrediti proticaj. Ako se ima u vidu da se u distributivne mreže gradova pri izgradnji postavljaju izolacioni zatvarači, jasno je da oni mogu kasnije imati ulogu u zatvaranju određenih veza u svrhu formiranja zone bilansiranja. Primarna uloga izolacionih zatvarača je da izoluju delove vodovodne distributivne mreže. Razloga može biti mnogo za izolovanje nekih delova mreža kao što su npr planirane ili havarijske intervencije na sanaciji mreže.

Kao početna iteracija za određivanje zona bilansiranja potrebno je definisati segmente mreže, koji su ništa drugo nego delovi mreže koji se mogu izolovati od ostatka distributivne mreže, zatvaranjem izolacionih zatvarača. Poznavanjem svih segmenata gde svaki segment može da formira uslovno rečeno „mini“ zonu bilansiranja, ostvaraju se mogućnost da se njihovom naknadnom agregacijom dođe do oblika zona bilansiranja. Nekoliko metoda je definisano za detektovanje segmenata mreže, koje na kraju praktično daju isti rezultat. Neki istraživači su koristili algoritme iz teorije grafova (Jun i Loganathan, 2007.), dok su drugi koristili topološke matrice povezanosti (Giustolisi, Kapelan i Savić, 2008.). Metodologija za segmentizaciju vodovodnih distributivnih mreža prezentovana u ovom radu pripada pristupu koji koristi topološke matrice povezanosti mreže koje se koriste u hidrauličkim modelima vodovodnih mreža, kao i modifikovanu originalnu topologiju mreže. Rezultati primene ovog metoda su isti kao i u slučaju korišćenja teorije grafova, ali pruža određene potencijalne prednosti. Na primer korisnici ovog metoda nisu obavezni da budu upoznati sa teorijom grafova i izvesnim algoritimima za pretraživanje, već na osnovu matricne strukture koja se pojavljuje u hidrauličkim modelima, mogu definisati segmente mreže kao i nenamerno isključene delove mreže.

2. METODOLOGIJA SEGMENTIZACIJE

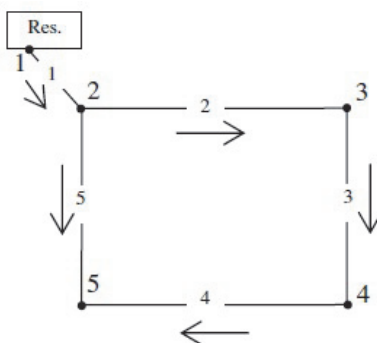
Metodologija za segmentizaciju vodovodnih distributivnih mreža koja je primenjena preko programskog koda napisanog u MatLab okruženju, je opisana korišćenjem jednostavnog primera. Ideja je da se kroz odgovarajući primer upotpunjen sa slikama koje opisuju različite korake, prođe kroz algoritam kako bi se uočili svi bitni aspekti. Konačno na kraju rada primena algoritma je prikazana i na jednom realnom vodovodnom sistemu. Shema ovog primera je prikazana na slici 1. Mreža se sastoji od $n_o = 1$ rezervoara, $n_i = 4$ čvora sa nepoznatom piježometarskom kotom i $n_p = 5$ cevi. Ciljevi primene ovog algoritma se mogu predstaviti na sledeći način:

1. Identifikacija segmenata vodovodne distributivne mreže,
2. Identifikacija nenamernih isključenja delova vodovodne mreže kao sekundarna posledica zatvaranje izolacionih zatvarača na određenom segmentu,
3. Proračun deficita u vodosnabdevanju pri zatvaranju izolacionih zatvarača na određenom segmentu.

Slika 1. Shema jednostavnog primera; strelicama su obleženi pretpostavljeni smerovi tečenja u cevima

Imajući u vidu složenost realnih vodovodnih mreža, može se zaključiti da ovaj obim posla prevazilazi mogućnosti ljudske intuicije, zbog čega je neophodno definisati algoritam i koristiti računarske programe

Autor je koristio mreže koje se unete ili preko besplatnog softvera za analizu vodovodnih



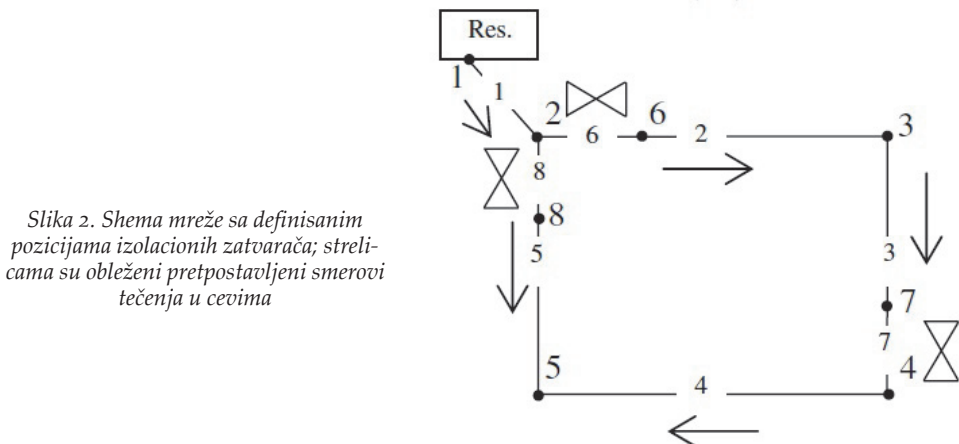
sistema, EPANET-a, ili preko programa koji je razvijen u *MatLAB* okruženju za potrebe održavanja nastave na kursu Hidroinformatika na master studijama, *gui_hydroinf*. Softverski paket EPANET je u širokoj upotrebi, upravo zbog slobodne licence, pa je bilo ciljano omogućiti primenu algoritma za mreže formirane u ovom programskom okruženju. Na ovaj način i sam algoritam dobija na opštosti u primeni.

Identifikacija i opisivanje segmenata formiranih kao posledica zatvaranja izolacionih zatvarača u prezentovanom algoritmu se sastoji od četiri koraka, koja će biti detaljnije opisana u nastavku.

2.1. Identifikacija čvorova i cevi povezanih sa izvornim čvorovima

Analizira se polazna postavka mreže prikazana na slici 1. Za početak moraju se pozicionirati izolacioni zatvarači u cevima koji će diktirati uslove za formiranje segmenata mreže. Postavljaju se tri izolaciona zatvarača u cevima obeleženim sa brojevima 2, 3 i 5. Pri pozicioniranju izolacionih zatvarača vodi se računa da se oni postavljaju na krajevima cevi kako bi njihovo zatvaranje prekinulo vodosnabdevanje u uzvodnom delu cevi. Zatvarači koji se postavljaju u mrežu sa primerima su analogno sa napisanim postavljani na krajevima cevi 2, 3 i 5 odnosno respektivno u blizini čvorova 2, 4 i 2. Na ovaj način dobija se dispozicija mreže prikazana na slici 2.

Na novoformiranoj dispoziciji mreže sa primećuje da se definisani sada i novi čvorovi 6, 7 i 8. To je posledica tretiranja zatvarača kao cevi fiktivne dužine koja povezuje dva čvora mreža. Ovaj način definisanja odgovara prikazu koji se koristi u softverskom paketu EPANET. Mreža se shodno promenama sada sastoji od $n_o = 1$ rezervoara sa fiksnom pijezometarskom kotom, $n_i = 7$ čvorova sa nepoznatom pijezometarskom kotom i $n_p = 8$ cevi. Sa modifikovanim mrežom može se krenuti dalje u analizu, odnosno formirati ranije spomenutu topološku matricu povezanosti A (Todini i Pilati, 1988). Ona daje uvid o vezama između čvorova u mreži uzimajući pritom u obzir i polaznu pretpostavku o smerovima tečenja. Dimenzije ove matrice su $n_p * (n_o + n_i)$. Element ove matrice $A(i,j)$ može uzeti tri vrednosti: 0, -1 i 1. Konkretno $A(i,j) = 0$ ako i -ta cev nema j -ti čvor na jednom njenom kraju. Ukoliko i -ta cev ima j -ti čvor na jednom kraju, onda će $A(i,j)$ dobiti vrednosti ili 1 ili -1, u zavisnosti od početne pretpostavke smera protoka u i -toj cevi. Vrednost $A(i,j) = 1$ odgovara slučaju kada proticaj ulazi u čvor j , dok vrednost -1 važi za čvor iz kojeg izlazi proticaj. Za mrežu sa slike 2, dobija se oblik topološke matrice povezanosti A prikazan u j-ni (1). Na dalje topološka matrica povezanosti A se može podeliti na dve matrice, A_{10} i A_{12} , obeležene u okviru j-ne (1). Matrica A_{10} obuhvata samo kolone koje se odnose na čvorove sa fiksnom pijezometarskom kotom, dok je matrica A_{12} sastavljena od kolona koje se odnose na čvorove sa nepoznatom pijezometarskom kotom. Uz A_{10} i A_{12} , formira se i matrica A_{11} , dimenzija $n_p * n_p$. A_{11} je dijagonalna matrica, gde članovi na dijagonali predstavljaju provodnosti (protočnosti) cevi u mreži.



Slika 2. Shema mreže sa definisanim pozicijama izolacionih zatvarača; strelicama su obeleženi pretpostavljeni smerovi tečenja u cevima

Cilj ove analize je identifikacija čvorova i cevi koji su povezani sa izvornim čvorovima, uspostavljajući uslove u mreži, takvi da je čvorna potrošnja u svim čvorovima sa nepoznatom π kotom jednaka nuli iliti $q = 0$, a π kota u čvorima sa fiksnom π kotom jednaka jedinici. Matrica provodnosti cevi postaje matrica $A_{11} = I$, gde je I ustvari matrica identiteta. Pod navedenim uslovima, druga jednačina sistema (2) jednostavno vodi do $Q = 0$. Kada se $Q = 0$ zameni u prvu jednačinu dobija se obrazac u sledećoj formi:

$$A_{12} \cdot H = -A_{10} \cdot I_0 \tag{7}$$

Na ovaj način dobijen je linearni sistem jednačina, koji se može direktno rešiti, koristeći matričnu notaciju, na sledeći način:

$$X = inv(M) \cdot N \tag{8}$$

gde $inv(M)$ predstavlja inverznu matricu, matrice M .

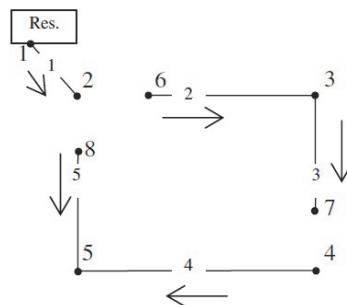
Rešavanjem sistema j -na koristeći obrazac (8) daje rešenja koja odgovaraju slučaju da su svi izolacioni zatvarači otvoreni, odnosno da kroz sve cevi struji voda. Konkretno dobija se da su protoci kroz sve cevi jednaki nuli a pijezometarska kota u svim čvorovima u kojima je prethodno bila nepoznata, da je jednaka jedinici:

$$Q^T = (Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4 \ Q_5 \ Q_6 \ Q_7 \ Q_8) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \tag{9}$$

$$H^T = (H_2 \ H_3 \ H_4 \ H_5 \ H_6 \ H_7 \ H_8) = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) \tag{10}$$

Iz dobijenih pijezometarskih kota u čvorovima gde je ona bila nepoznata, koje su jednake fiksnoj pijezometarskoj koti u izvornom čvoru, zaključuje se da ne postoje prekidi u mreži. Ukoliko se dobije za neki čvor da je π kota jednaka 0, za njega se može konstatovati da nije povezan sa izvornim čvorovima.

Zatvaranje izolacionih zatvarača u distributivnoj mreži se može predstaviti otklanjanjem fiktivnih cevi koje predstavljaju zatvarače čime se dobija dispozicija sa slike 3.



Slika 3. Shema mreže sa uklonjenim izolacionim zatvaračima; strelicama su obleženi pretpostavljeni smerovi tečenja u cevima

Uklanjanje zatvarača sa dispozicije mreže, zahteva da se shodno tome transformiše i matrica M . Redovi i kolone koje su vezane za uklonjene zatvarače se takođe izbacuju iz ove matrice pa se dobija redukovana matrica M_{red} a isti princip važi i za vektore X i N iz kojih se dobijaju redukovani vektori X_{red} i N_{red} .

Novi sistem jednačina je neodređen (ima više od jednog rešenja), budući da matrica M_{red} dimenzija $12 * 12$ nije punog ranga (zbog unetih prekida u mreži). Konkretno u ovom slučaju matrica M_{red} ima rang 10. Giustolisi (Giustolisi, Kapelan i Savić, 2008) je predložio jedno

rešenje, među beskonačno mogućih, koje se dobija korišćenjem pseudo-inverzne (p-inverse) matrice od matrice M_{red} :

$$X_{red} = p-inverse(M_{red}) \cdot N_{red} \tag{11}$$

Rešenje koje se dobija iz jednačine (11) korišćenjem pseudo-inverzne matrice, $X_{red} = (Q_{red}$

$$H_{red})^T, karakteriše to da ima minimalnu normalizovanu vrednost odnosno $\sqrt{\sum_{j=1}^{n_p+n_i} (X_{red,j})^2}$.$$

Minimalna normalizovana vrednost dalje implicira da će se u čvorovima sa nepoznatom π kotom koji nisu povezani sa izvornim čvorovima dobiti π kota jednaka nuli, a u čvorovima koji su povezani sa izvorom π kota će biti jednaka onoj vrednosti koja je zadata izvornom čvoru. Rešavanjem j-ne (11) dobijaju se sledeće vrednosti za vektore sa nepoznatim veličinama:

$$Q_{red}^T = (Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3 \quad Q_4 \quad Q_5) = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \tag{12}$$

$$H_{red}^T = (H_2 \quad H_3 \quad H_4 \quad H_5 \quad H_6 \quad H_7 \quad H_8) = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \tag{13}$$

Prema prethodno napisanom objašnjenju, čvorovi za koje se dobila π kota jednaka jedinici su povezani sa rezervoarom u slučaju zatvaranja svih izolacionih zatvarača, odnosno to su čvorovi 1 i 2 (1 je ustvari izvorni čvor = sam rezervoar). Nasuprot tome čvorovi sa π kotom jednaka nuli nisu povezani sa izvorom, a to su čvorovi 3, 4, 5, 6, 7 i 8. Kako bi se došlo podatka o nepovezanim cevima, potrebno je analizirati topološku matricu povezanosti A_{red} mreže u kojoj su fiktivne cevi (zatvarači) uklonjene (slika 3). Ova matrica se može izvesti iz topološke matrice povezanosti A mreže sa slike 2, date j-nom (1), eliminisanjem vrsta koje odgovaraju uklonjenim zatvaračima odnosno fiktivnim cevima. Sledeći korak je, brisanje iz matrice A_{red} svih kolona koje se odnose na prethodno identifikovane čvorove koji su nepovezani sa izvornim čvorom. Kolone koje odgovaraju čvorovima 3, 4, 5, 6, 7 i 8 se eliminišu pa se dobija matrica $A_{red-mod}$:

$$A_{red-mod} = \begin{matrix} & & n_1 & n_2 \\ p1 & \left(\begin{matrix} -1 & 1 \end{matrix} \right) \\ p2 & \left(\begin{matrix} 0 & 0 \end{matrix} \right) \\ p3 & \left(\begin{matrix} 0 & 0 \end{matrix} \right) \\ p4 & \left(\begin{matrix} 0 & 0 \end{matrix} \right) \\ p5 & \left(\begin{matrix} 0 & 0 \end{matrix} \right) \end{matrix} \tag{14}$$

Posmatraju se kolone koje su asocirane sa čvorovima u kojima je bila nepoznata pijezometarska kota, u j-ni (14) to je kolona za n_2 . Ukoliko neka cev ima u bilo kojoj od navedenih kolona bar jedan koeficijent različit od nule, ona je povezana sa izvornim čvorom, nasuprot tome ako su svi koeficijenti u kolonama jednaki nuli, ta cev nije povezana. Iz j-ne (14), na osnovu toga sledi da je cev 1 ostala povezana sa izvornim čvorom nakon zatvaranja svih izolacionih zatvarača, dok su cevi 2, 3, 4 i 5 postale nepovezane.

Na osnovu informacija o nepovezanim delovima mreže, tačnije nepovezanim čvorovima, formira se vektor V_{dn} koji se sastoji od indeksa ovih čvorova:

$$V_{dn}^T = (3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8) \quad (15)$$

2.2. Sastavljanje i definisanje segmenata mreže

U okviru ovog koraka algoritma, potrebno je definisati segmente vodovodne distributivne mreže koji se sastoje od grupisanih veza i čvorova mreže, koji se mogu izolovati od ostatka mreže zatvaranjem određenih izolacionih zatvarača.

Kako bi se definisali ovi segmenti mreže, algoritam koristi V_{dn} vektor čvorova koji su nepovezani sa izvornim čvorovima u slučaju zatvaranja svih izolacionih zatvarača. Ovaj vektor je prikazan j-nom (15) za dispoziciju sa slike 2. Analizira se prvi član vektora V_{dn} i na mesto tog čvora se postavlja fiktivni rezervoar sa fiksnom pijezometarskom kotom jednakom jedinici. Za vektor iz (15), na poziciji čvora obeleženog sa indeksom 3, postavlja se fiktivni rezervoar pa se dobija dispozicija predstavljena slikom 5.

Slika 4. Identifikacija segmenta $S = 1$: fiktivni rezervoar postavljen na mesto čvora 3.

Čvorovi i veze koje pripadaju segmentu $S = 1$ su povezani sa fiktivnim rezervoarom pozicioniranom na mesto čvora 3. Oni se mogu odrediti na isti način kao što je rađeno u prethodnom koraku algoritma za čvorove i veze koje su povezane sa pravim izvornim čvorovima korišćenjem j-na (11) i (14). Za dispoziciju sa slike 4, dobija se da se segment $S = 1$ sastoji od čvorova 3, 6 i 7 i cevi 2 i 3.

Čvorovi koji pripadaju segmentu $S = 1$, se brišu iz vektora V_{dn} , koji je sada redukovan na:

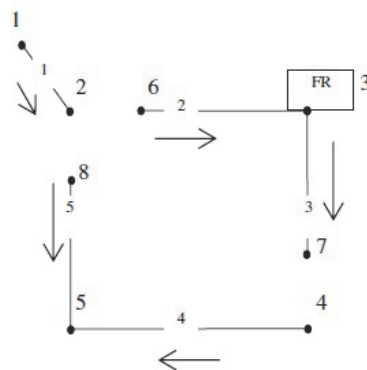
$$V_{dn}^T = (4 \quad 5 \quad 8) \quad (16)$$

Na dalje ponavlja se prethodno opisana procedura dok vektor V_{dn} ne ostane bez članova odnosno dok se ne dodele svi čvorovi nekom segmentu. To bi značilo da se u odnosu na primer, sada fiktivni rezervoar postavlja na mesto prvog člana redukovanog vektora V_{dn} tj. na mesto čvora 4. Segment $S = 2$, čine čvorovi 4, 5 i 8, ako i cevi 4 i 5.

2.3. Definisanje nenamernih isključenja

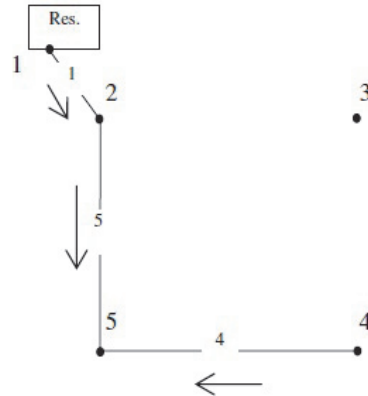
U uvodnom delu ovog rada spomenuta su nenamerna isključenja u mreži kao sekundarna posledica zatvaranja izolacionih zatvarača na određenom segmentu. Konkretno to znači da ukoliko bi izolovali određeni segment vodovodne mreže, nizvodni delovi mreže ukoliko su se snabdevali *jedino* putem veza koje pripadaju izolovanom segmentu, će takođe biti odsečeni od izvornih čvorova. Kao posledica javiće se prekid u vodosnabdevanju i u izolovanom segmentu i u nenamerno isključenom delu distributivne mreže.

Konkretan postupak za određivanje nenamenskih isključenja se oslanja na prvi korak celokupnog algoritma. Tačnije referencira se na početnu dispoziciju mreže bez postavljenih izolacionih zatvarača (slika 1), sa kojom se sprovedi postupak sličan kao u prvom koraku. Sada se umesto uklanjanja izolacionih zatvarača (kojih uopšte nema na ovoj dispoziciji),



uklanjaju veze i čvorovi koji pripadaju određenom segmentu. Konkretno na primeru će se za segment $S = 1$, nakon uklanjanja pripadajućih elemenata dobiti dispozicija prikazana na slici 5.

Slika 5. Određivanje nenamenski isključenih delova mreže za segment $S = 1$



Ponavlja se postupak koji je opisan u prvom koraku algoritma za definisanje čvorova i veza povezanih sa izvornim čvorom, baziran na jednačinama (11) i (14), s tim što se sada koristi modifikovana matrica M_{mod} umesto matrice M . Ova modifikovana matrica se razlikuje od originalne po tome što: ne sadrži vrste i kolone koje se odnose na fiktivne cevi koje predstavljaju zatvarače (pošto ih nema), kao ni vrste i kolone odgovaraju vezama koje pripadaju segmentu za koji se analiziraju nenamerna isključenja. Na ovaj način je predstavljeno izolovanje određenog segmenta na dispoziciji bez izolacionih zatvarača. Nenamerno izolovani čvorovi će imati kao i u prethodnim slučajevima π kotu blisku nuli, dok će veze koje su na ovaj način isključene imati u odgovarajućoj vrsti matrice $A_{red-mod}$ j-na (14) sve članove jednake nuli (izuzev kolone koje odgovara izvornom čvoru). Konkretno za dispoziciju sa slika 5. neće se dobiti delovi mreže koji će biti nenamerno isključeni, budući da se radi o jednostavnoj shemi mreže.

2.4. Proračun deficita u vodosnabdevanju

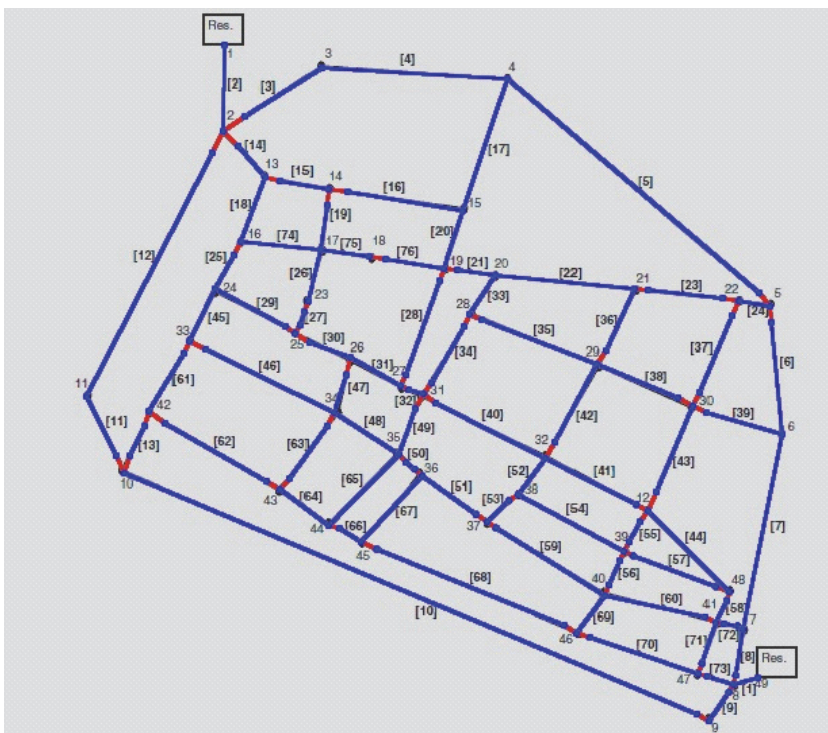
U okviru poslednjeg koraka algoritma, potrebno je sračunati deficit u vodosnabdevanju, koji će se javiti pri izolovanju određenog segmenta vodovodne distributivne mreže. Ovaj deficit predstavlja količinu vode koju distributivni sistem nije u stanju da isporuči, što je posledica zatvaranja pristupa potrošačima. Ovde se provlači analogija sa prethodnim korakom algoritma, na osnovu kog se može zaključiti da se potrošači koji su isključeni od ostatka distributivnog sistema, nalaze i u samom segmentu koji je izolovan operacijom zatvaranja izolacionih zatvarača i u delu distributivne mreže koji je nenamerno isključen. Suma količine vode koju sistem nije u stanju da isporuči ovim potrošačima predstavlja spomenuti deficit u vodosnabdevanju i označava se sa D_{wds-i} (wds – skr.eng. *Water Demand Shortfall*), gde indeks i obeležava segment koji je izolovan. Postupak koji se sprovodi u okviru ove analize je karakterističan po tome što se zahtevana količina vode za potrošače, ne izražava kao čvorna potrošnja (karakteristično za softverski paket *EPANET*), već kao potrošnja raspoređena duž cevi.

Za računanje deficita usled izolovanja nekog segmenta potrebno je ukloniti elemente koji pripadaju tom segmentu na isti način kako je to opisano u prethodnom poglavlju. Na osnovu podataka o nepovezanim cevima (budući da je sad potrošnja raspoređena duž cevi), sumiranjem njihovih potrošnji dobija se deficit u vodnosnabdevanju D_{wds-i} . Postupak se ponavlja za sve segmente distributivne mreže kako bi se za svaki dobio podatak o odgovarajućem deficitu u vodosnabdevanju.

3. PRIMENA ALGORITMA ZA SEGMENTIZACIJU NA PRIMERU VODOVODNE MREŽE GRADA FERARA

Za kraj ovog rada prikazana je primena algoritma za segmentizaciju vodovodne mreže na realnom primeru mreže preuzetom iz literature. Radi se o vodovodnoj distributivnoj mreži italijanskog grada Ferara, koji je obrađen u nekoliko radova koji se bave ovom tematikom (npr. Craeco, Franchini i Alvisi, 2012). Upoređivanjem rezultata dobijenih u okviru istraživanja koja su pratila ovaj rad sa rezultatima koje su dobijali drugi autori moguće je verifikovati rezultate kao i sam programski kod koji je napisan.

Distributivna mreža grada Ferara je slikovit primer vodovodnih mreža manjih gradova (tačnije njihovog gradskog jezgra), koja prihranjuje potrošače iz dva rezervoara koji se nalaze na suprotnim krajevima grada (slika 6). Prvi rezervoar se nalazi na severozapadnom kraju mreže a drugi na jugoistočnom. Sama distributivna mreža je prstenastog tipa, sačinjena od 76 cevi u kojima je postavljeno 67 izolacionih zatvarača. Ova postavka izolacionih zatvarača ne odgovara stvarnom stanju, već je predlog broja i pozicije zatvarača dobijen primenom optimizacionog modela koji ispituje različite generisane dispozicije (Craco, Franchini i Alvisi, 2012). Konačno pored cevi i zatvarača mrežu čine i čvorovi kojih ima 114. Za ovu mrežu čvorovi nemaju definisanu čvornu potrošnju već je opisana potrošnja duž cevi mreže. Podaci o mreži ovde nisu prikazani ali se mogu pronaći u drugim radovima npr (Craco, Franchini i Alvisi, 2012).

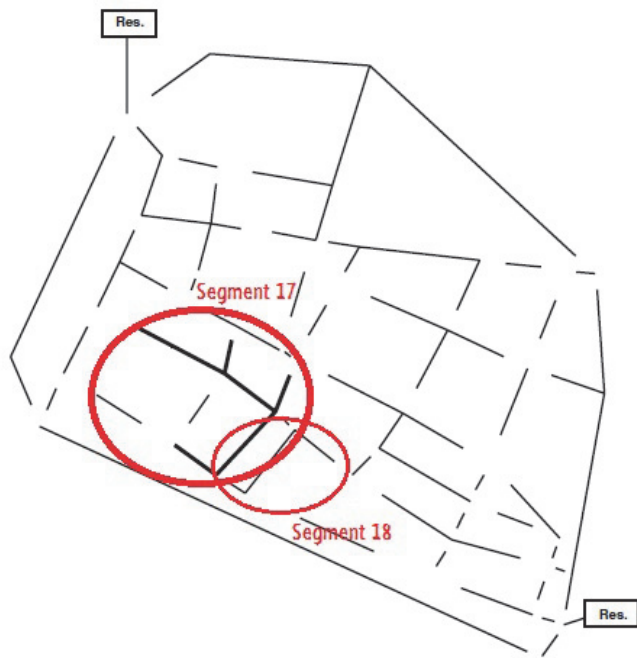


Slika 6. Dispozicija distributivne mreže italijanskog grada Ferara; Svetlijom bojom su prikazani zatvarači, a tamnijom cevi u mreži; u uglastim zgradama su redni brojevi čvorova, a izvan zgrada su redni brojevi čvorova.

Primenom funkcije za segmentizaciju implementiranoj u okviru gui_hydroinf programa, MatLab računarsko okruženje (u okviru kojeg se izvršava gui_hydroinf) za približno 20 s izbacuje rezultate. Ovo vreme odgovara primeni na računaru sa Intel CORE i7 procesorom i 4GB DDR-RAM memorije. Interesantno je konstatovati da je najviše vremena pri izvršavanju algoritma potrebno za proračun pseudo-inverzne matrice (11). Za dobijeno vreme izvršenja može se konstatovati da je relativno kratko, tako da se ni sa znatno složenijim mrežama ne očekuje vreme izvršenja duže od 30 min.

Usled izrazito prstenaste strukture mreže, odnosno pojave da se svaki čvor snabdeva iz dva ili više pravaca, pri ovakvoj dispoziciji nisu se dobile nenamerno isključene veze i čvorovi za bilo koji segment. Najveći deficit u vodosnabdevanju se javlja pri izolovanju segmenata 17 i 18. Interesantno je da ovi segmenti nisu najveći ukoliko se posmatra čisto dužina cevi koje ih čine ali je očigledno da se radi o užem gradskom jezgru gde je gust-

ina naseljenosti veća nego u ostatku mreže. Navedena dva segmenta su crvenom bojom zaokruženi na slici 7.



Slika 7. Prikaz rezultata segmentizacije vodovodne mreže Ferare; svaki izdvojeni deo mreže predstavlja segment za sebe

4. ZAKLJUČAK

Poznavanjem segmenata mreže odnosno može se dobiti početna iteracija za formiranje zona bilansiranja. Kroz rad je opisan algoritam za segmentizaciju koji formira, može se reći „mini“ zone bilansiranja, kroz četiri koraka koji ga čine, koristeći jednostavan primer za slikovit prikaz. Menjajući početnu dispoziciju mreže, algoritam koristi različite oblike topološke matrice povezanosti kako bi odredio podatke koji su potrebni. Sistem jednačina koji se rešava bazira se na jednačini kontinuiteta i energetske jednačini, i karakteristično je što je u većini slučajeva neodređen. Zbog toga se za njegovo rešavanje koristi pseudo-inverzna matrica koja predstavlja jedno od bezbroj rešenja sistema, karakteristično po tome što ima minimalnu normalizovanu vrednost. Programski kod za izvršenje algoritma je napisan i integrisan u okviru softvera `gui_hydroinf`. Obraden je primer vodovodne mreže grada Ferara i prikazani su najinteresantiji rezultati.

Budući da se ova tematika intezivno istražuje tek prethodnih nekoliko godina, postoji značajan broj pravaca u kojima bi moglo istraživanje da se nastavi. Različite grupe autora su poslednje tri godine predložili nekoliko optimizacionih modela koji se oslanjaju na ovu analizu. Optimizacija u ovom slučaju može imati različite ciljeve ili kriterijume, npr kao što je određivanje optimalnog broja i položaja samih izolacionih zatvarača u zavisnosti od cene ugradnje, srednjeg deficita u vodosnabdevanju itd.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, prosvete i tehnološkog razvoja Republike Srbije na podršci u realizaciji projekta TR37010 pod nazivom: „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao

deo urbane i saobraćajne infrastrukture“, čiji je sastavni deo bilo istraživanje u problematici opisanoj u ovom radu.

LITERATURA

1. N. Branislavljević, I. Ćipranić, D. Prodanović, D. Ivetić, 2014. Softverska podrška određivanju osnovnih zona bilansiranja vodovodnih mreža. Prihvaćen rad za konferenciju „Vodovodni i kanalizacioni sistemi“ Jahorina.
2. E. Craeco, M. Franchini, S. Alvisi, 2010., Optimal Placement of Isolation Valves in Water Distribution Systems Based on Valve Cost and Weighted Average Demand Shortfall, *Water Resource Management*, Springer Science.
3. E. Craeco, M. Franchini, S. Alvisi, 2012., Evaluating Water Demand Shortfalls in Segment Analysis, *Water Resource Management*, 26:2301-2321, Springer Science
4. O. Giustolisi, D. Savić, 2010., Identification of Segments and Optimal Isolation Valve System Design in Water Distribution Networks, *Urban Water Journal*, 7:1, 1-15, Taylor & Francis.
5. O. Giustolisi, Z. Kapelan, D. Savić, 2008., An algorithm for automatic detection of topological changes in water distribution networks. *Journal of Hydraulic Eng* 134 (4), 435-446.
6. H. Jun, G.V. Loganathan, 2007., Valve-Controlled Segments in Water Distribution Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, No. 2.
7. J.J. Kao, P.H. Li, 2007., A Segment-based Optimization model for water pipeline replacement, *American Water Works Association Journal*, vol. 99, No. 7, 83-95, American Water Works Association.
8. A. Ostfeld, E. Salomon, 2004. Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130 (5), 377-385.
9. E. Todini, S. Pilati, 1988. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In: Coulbeck B, Choun-Hou (eds) *Computer application in water supply*, vol I-system analysis and simulation. Wiley, London, 1-20.
10. T.M. Walski, 1993., *Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis*, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 42, 21-27.