



ALGORITAM ZA SEGMENTACIJU VODOVODNE MREŽE POMOĆU POSTOJEĆIH IZOLACIONIH ZATVARAČA

ALGORITHM FOR WATER DISTRIBUTION NETWORK SEGMENTATION USING EXISTING ISOLATION VALVES

APSTRAKT

Podela složene vodovodne mreže (segmentacija) na manje zone, sa jasnim ulazima i izlazima, je preduslov za uspostavljanje bolje kontrole nad gubicima. Da bi se formirale takve zone, koje se često zovu i osnovne zone bilansiranja, potrebno je složenu i prstenastu vodovodnu mrežu podeliti na odvojene celine zatvaranjem minimalnog broja cevi. Pri tome, zgodno je koristiti postojeće izolacione zatvarače, ranije postavljene u mreži. U radu se prikazuje algoritam za automatsku segmentaciju korišćenjem postojećih izolacionih zatvarača. Vodovodna mreža se posmatra kao topološki uređen sistem koji se sastoji od cevi (veza), čvorova i postojećih izolacionih zatvarača. Definišu se segmenti distributivne mreže koji predstavljaju delove mreže koji se mogu izolovati od ostatka sistema zatvaranjem određenih izolacionih zatvarača. Predstavljeni algoritam za segmentaciju 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. Algoritam je baziran na topološkim matricama povezanosti, koje se koriste u hidrauličkim modelima vodovodnih mreža. Prikazana metodologija za segmentaciju je primenjena na primeru vodovodne mreže italijanskog grada Ferara.

Ključne reči: segmenti, vodovodne mreže, topološke matrice povezanosti

ABSTRACT

Dividing a complex water distribution network (segmentation) on smaller zones, with defined entry and exit points, is a precondition for better water loss management. In order to obtain these zones, often called District Metering Areas, it is necessary to divide a complex looped water distribution network on separate units by closure of minimal number of pipes. It is convenient to use existing isolation valves, placed earlier in the network, for this task. Water distribution network is analyzed as a topologically sorted system made out of pipes (connections), nodes and existing isolation valves. 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. 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 due to the segment isolation. Algorithm is based on topological incidence matrices, which are used in the hydraulic model of the water distribution network. Methodology shown is applied on the example of 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 složenu vodovodnu mrežu podeliti na manje celine, u okviru kojih je moguće pratiti (meriti) ulaz i izlaz, i vršiti redovnu kontrolu bilansa sa očitanim potrošnjom na vodomernima. Takve zone se nazivaju Osnovne Zone Bilansiranja (OZB), ili na engleskom District Metering Area (DMA). Poznavaњem ulaznih i izlaznih protoka iz ovih zona, kao i fakturisanom potrošnjom vode unutar jedne zone, otvara se mogućnost za pravovremeno kvantifikovanje gubitaka vode. Imajući

1. INTRODUCTION

In order to manage water distribution systems efficiently, it is necessary to divide a complex water distribution network in smaller zones, in which it is possible to control the water balance measuring inputs, outputs and consumption meters. These zones are called District Metering Areas (DMAs). By performing regularly the water balance in DMA, it is possible to quantify timely water losses in the network. Keeping in mind that unit water price is expected to rise in the future and that due to the lack of water sources, water deficit is imminent, the reduction of leakage

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 Vasilović, asistent doktorant, Građevinski fakultet, zeljkovasilic@hikom.grf.bg.ac.rs

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



u vidu da se očekuje značajan porast jedinične cene vode u bliskoj budućnosti, kao i da će se usled nedostataka izvora javljati deficiti vode, racionalizacija potrošnje, na ovaj ili neki drugi način, je neminovnost.

Da bi se formirale zone bilansiranja potrebno je, praktično, podeliti postojeću mrežu na odvojene celine međusobno spojene što manjim mogućim brojem veza (cevi), pri čemu uslovi snabdevanja potrošača ne smeju značajno da degradiraju. Kao pomoć u podeli mreže, mogu da se koiriste različita softverska rešenja i alati (Branisavljević i ostali, 2014). Uglavnom takav poduhvat zahteva zatvaranje izvesnog broja aktivnih cevi koje bi spajale buduće zone, dok se na preostanim instaliraju merači protoka. Na taj način buduća zona je ograničena zatvorenim cevima dok sa ostalim zonama ostvaraju vezu preko cevi u kojima je moguće odrediti protok.

Standardna praksa je da se prilikom izgradnje distributivne vodovodne mreže postavljaju izolacioni zatvarači. Njihova primarna uloga je da izoluju delove vodovodne distributivne mreže pri planiranim ili havarijskim intervencijama na sanaciji mreže. Međutim, jasno je da se izolacioni zatvarači mogu koristiti i u svrhu zatvaranju određenih segmenata mreže, radi formiranja zona bilansiranja (Ivetić i ostali, 2014). U ovom radu se prezentuje algoritam koji omogućava automatsku segmentaciju vodovodne mreže korišćenjem izolacionih zatvarača.

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 grupe izolacionih zatvarača. Poznavanjem svih segmenata gde svaki segment može da formira, uslovno rečeno „mini“ zonu bilansiranja, ostvaraje se mogućnost da se njihovim naknadnim grupisanjem 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 segmentaciju vodovodnih distributivnih mreža prezentovana u ovom radu pripada pristupu koji koristi topološke matrice povezanosti mreže koje se upotrebljavaju u hidrauličkim modelima vodovodnih mreža, kao i modifikovanu originalnu topologiju mreže. Rezultati primene ovog metoda su isti kao i u slučaju korišćenja teorije grafova, iako postoje određene potencijalne prednosti. Na primer korisnici ovog metoda nisu obavezni da budu upoznati sa složenom teorijom grafova i izvesnim algoritimima za pretraživanje, već na osnovu matricne strukture koja se pojavljuje u hidrauličkim modelima, mogu definisati segmente mreže kao i namerno isključene delove mreže.

Prikaz metodologije i algoritma automatske segmentacije vodovodnih distributivnih mreža je u radu dat

and rationalization of the consumption is a necessity.

In order to obtain the DMA zones, it is necessary to divide an existing network in separate units, interconnected with minimal number of links (pipes), while the water supply conditions should not be degraded. Help in this task can be acquired through different software solutions and tools (Branisavljević et al, 2014). Usually this task includes closure of certain number of active pipes which would connect future DMAs, while installing flow meters on the rest of the pipes. This way future zone is limited with sealed pipes, while the connection with other DMAs is obtained through pipes in which flow can be measured.

It is a standard procedure to install isolation valves in the water supply network while the network is being constructed. Their primary goal is to isolate parts of water distribution network for planned or unplanned rehabilitation interventions in the network itself. However, it is obvious that these isolation valves can be used to close certain pipes so DMAs can be created (Ivetić et al, 2014). In this paper an algorithm is presented for the automatic segmentation of water supply network by usage of isolation valves.

As a starting iteration for the DMAs design, definition of network segments is needed, where these segments are parts of the network which can be isolated from the rest of the distribution network, by closure of certain group of isolation valves. Acquisition of all of the network segments where each segment can represent a “mini” DMA, allows us to form real DMAs by aggregating these segments.

Several methods have been proposed for the detection of the network segments, which ultimately give the same result. Some researchers have used algorithms from the graph theory (Jun and Loganathan, 2007.), while others utilized topological incidence matrices (Giustolisi, Kapelan and Savić, 2008.). Methodology for the water distribution network segmentation presented in this paper belongs to the latter group, with usage of topological incidence matrices of the network, frequently found in hydraulic models of the networks, along with use of modified network topology. Results obtained in this manner are the same as they would be with the graph theory approach, although certain advantages exist. For example, users of this approach do not need a knowledge of the rather complex graph theory and certain search algorithms. Instead, based on the matrix structure already appearing in the hydraulic models, they can define network segments as well as the unintended isolations.

Both methodology and the algorithm for the automatic segmentation of water supply networks are presented in the paper with the reference to the simple example, with figures showing different steps of the algorithm. At the end of the paper, example of algorithm use is shown on the real life water distribution system of the Italian city Ferrara (Cræco, Franchini and Alvisi, 2012.).

na jednostavnom primeru, upotpunjenom sa slikama koje opisuju različite korake, kako bi se uočili svi bitni aspekti. Na kraju rada je data i primena prikazane metodologije na jednostavnom primeru vodovodne mreže italijanskog grada Ferrara (Cracoco, Franchini i Alvisi, 2012).

2. METODOLOGIJA SEGMENTACIJE

Zadaci segmentacije vodovodne mreže prema metodologiji opisanoj u nastavku se mogu predstaviti na sledeći način:

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

Imajući u vidu složenost realnih vodovodnih mreža, može se zaključiti da ovaj obim posla prevazilazi mogućnosti ljudske intuicije, zbog čega je neophodno definisati algoritam koji bi uz pomoć računarskih programa obavio automatski segmentaciju.

U nastavku će se dati opis metodologije za segmentaciju vodovodnih distributivnih mreža na veoma jednostavnom primeru, prikazanom na slici 1. Mreža se sastoji od $n_o = 1$ rezervoara, $n_i = 4$ čvora sa nepoznatom pijezometarskom kotom i $n_p = 5$ cevi.

Za hidrauličku analizu mreže autori su koristili besplatan softvera EPANET, koji je bio povezan sa razvijenim programom u MatLAB okruženju. 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 u mreži iz primera su postavljeni

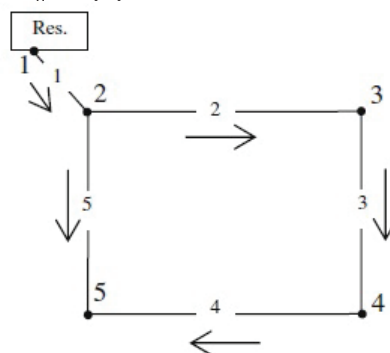
2. SEGMENTATION METHODOLOGY

Goals of the network segmentation methodology, described in this paper, can be presented in the following manner:

1. Identification of the water distribution network segments,
2. Identification of the unintended isolations as a secondary consequence of the segment isolation,
3. Computation of the water demand shortfall arising from the certain segment isolation.

Having in mind the complexity of the real water distribution networks, it can be concluded that this task cannot be solved using just human intuition. Therefore it is necessary to define an algorithm which will perform an automatic segmentation using the computer resources.

Methodology for the water supply network segmentation is described in the following pages through simple example shown in figure 1. Network is made of $n_o = 1$ reservoir, $n_i = 4$ nodes with unknown head value and $n_p = 5$ pipes.



Slika 1. Shema jednostavnog primera; strelicama su obeleženi pretpostavljeni smerovi tečenja u cevima
Figure 1. Simple example scheme; arrows show the assumed direction of the water flow in pipes

Authors have used the freeware software EPANET for the hydraulic analysis of the network, which was linked with the code written in MATLAB environment. Software package EPANET is widely used, especially due to its freeware nature, so the goal was to enable usage of the algorithm on the networks developed in EPANET. This way algorithm itself can be widely used.

Identification and definition of the segments formed as a consequence of the isolation valves closure in presented algorithm is made out of four steps, which will be described in detail in following sections.

2.1 Identification of nodes and pipes connected with source nodes

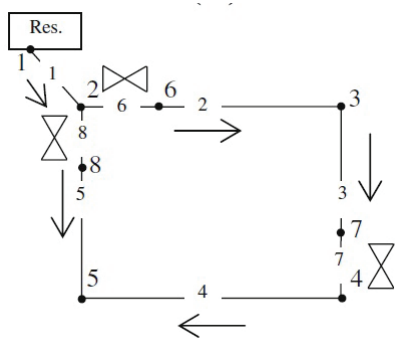
Starting setup of the network shown in figure 1 is analyzed. First, isolation valves need to be placed in pipes in order to get the conditions for network se-



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 su sada definisani i novi čvorovi 6, 7 i 8. To je posledica tretiranja zatvarača kao cevi fiktivne dužine koje povezuju 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 modifikovanom mrežom može se krenuti dalje u analizu, odnosno formirati ranije spomenutu topološku matricu povezanosti \mathbf{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 $\mathbf{A}(i, j)$ može uzeti tri vrednosti: 0, -1 i 1. Konkretno $\mathbf{A}(i, j) = 0$ 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 $\mathbf{A}(i, j)$ dobiti vrednosti ili 1 ili -1, u zavisnosti od početne pretpostavke smera protoka u i -toj cevi. Vrednost $\mathbf{A}(i, j) = 1$ odgovara slučaju kada protok ulazi u čvor j , dok vrednost -1 važi za čvor iz kojeg izlazi protok. Za mrežu sa slike 2, dobija se oblik topološke matrice povezanosti \mathbf{A} prikazan jednačinom (1).

Na dalje, topološka matrica povezanosti \mathbf{A} se može podeliti na dve matrice, \mathbf{A}_{10} i \mathbf{A}_{12} , obeležene u okviru jednačine (1). Matrica \mathbf{A}_{10} obuhvata samo kolone koje se odnose na čvorove sa fiksnom pijezometarskom kotom, dok je matrica \mathbf{A}_{12} sastavljena od kolona koje se odnose na čvorove sa nepoznatom pijezometarskom kotom. Uz \mathbf{A}_{10} i \mathbf{A}_{12} formira se i matrica \mathbf{A}_{11} , dimenzija $n_p * n_p$. \mathbf{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

Figure 2. Network scheme with defined positions of isolation valves; arrows show the assumed direction of the water flow in pipes

Konačno, definišu se i vektori H , Q i q , koji respektivno predstavljaju vektor nepoznatih pijezometarskih kota, vektor nepoznatih protoka u cevima mreže i

gments definition. Three isolation valves are placed in pipes numerated with 2, 3 and 5. Isolation valves need to be placed on pipe ends so they can interrupt water supply in upstream parts of that pipe. Valves in the example network are placed on the ends of pipes 2, 3 and 5 in vicinity of nodes 2, 4 and 2. This way new network disposition is obtained (figure 2.).

It can be noticed on the new network disposition, that additional nodes 6, 7 and 8 have been inserted. This is due to the fact that valves are treated as pipes with fictitious length connecting two nodes. Treatment of valves in this manner is typical for EPANET software. Due to the changes made, network is now made of $n_o = 1$ reservoir with constant head, $n_i = 7$ nodes with unknown head value and $n_p = 8$ pipes. With modified network, further analysis can be performed, regarding definition of topological incidence matrix \mathbf{A} , mentioned earlier (Todini and Pilati, 1988). Matrix gives an insight into links between nodes in network, taking into account the starting assumption about flow direction. Size of the matrix is $n_p * (n_o + n_i)$. Each element of the matrix $\mathbf{A}(i, j)$ can have one of the three following values: 0, -1 and 1. Precisely $\mathbf{A}(i, j) = 0$ if i -th pipe doesn't have an j -th node at any end. If i -th pipe does have an j -th node at one of it's ends, then $\mathbf{A}(i, j)$ will take value either 1 or -1, depending of the starting flow direction assumption. Value $\mathbf{A}(i, j) = 1$, corresponds to the case where flow enters node j , while value of -1 corresponds to the node from which flow is exiting. For the network represented in figure 2, topological incidence matrix \mathbf{A} will have a form shown in equation (1).

Further on, topological incidence matrix \mathbf{A} can be divided in two sub matrices, \mathbf{A}_{10} and \mathbf{A}_{12} , marked in equation (1). Matrix \mathbf{A}_{10} is made out of columns corresponding to the nodes with constant head value, while matrix \mathbf{A}_{12} is made of columns corresponding to the nodes with unknown head value. Along with \mathbf{A}_{10} and \mathbf{A}_{12} , matrix \mathbf{A}_{11} is formed, having dimensions $n_p * n_p$. \mathbf{A}_{11} is a diagonal matrix, where elements at the diagonal represent conductivities of the pipes in network.

		\mathbf{A}_{10} :		\mathbf{A}_{12}								
		$n1$:	$n2$:	$n3$:	$n4$:	$n5$:	$n6$:	$n7$:	$n8$:			
$\mathbf{A} =$	$p1$	-1:	1	0	0	0	0	0	0	0	(1)	
	$p2$	0:	0	1	0	0	-1	0	0			
	$p3$	0:	0	-1	0	0	0	1	0			
	$p4$	0:	0	0	-1	1	0	0	0			
	$p5$	0:	0	0	0	1	0	0	-1			
	$p6$	0:	-1	0	0	0	1	0	0			
	$p7$	0:	0	0	1	0	0	-1	0			
	$p8$	0:	-1	0	0	0	0	0	1			

p_i : i -ta cev; n_j : j -ti čvor
 p_i : i -th pipe; n_j : j -th node

vektor čvornih potrošnji koji su vezani za čvorove sa nepoznatom pijezometarskom kotom.

Proračun vektora H i Q , zahteva rešavanje nelinearnog sistema jednačina kog čine jednačina kontinuiteta i energetska jednačina (2) (Todini i Pilati, 1988):

$A_{11} \cdot Q + A_{12} \cdot H = -A_{10} \cdot H_0$ $A_{21} \cdot Q = -q$	(2)
---	-----

gde je H_0 vektor fiksnih pijezometarskih kota.

Predstavljeni sistem jednačina se može napisati koristeći matricnu notaciju, kako bi se dobio kompaktniji izraz:

$M \cdot X = N$	(3)
-----------------	-----

gde su napisani članovi ustvari jednaki:

$M = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{pmatrix}$	(4)
---	-----

$X = \begin{pmatrix} Q \\ H \end{pmatrix}$	(5)
--	-----

$N = \begin{pmatrix} -A_{10} \cdot H_0 \\ -q \end{pmatrix}$	(6)
---	-----

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 ili $q = 0$, a Π kota u čvorovima 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:

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

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

$X = inv(M) \cdot N$	(8)
----------------------	-----

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

Rešavanjem sistema jednačina koristeći obrazac (8), dobijaju se rešenja koja odgovaraju slučaju da su svi izolacioni zatvarači otvoreni, odnosno da kroz sve cevi teče voda. Konkretno, dobija se da su protoci kroz

Finally, vectors H , Q and q are defined, representing respectively vector of unknown nodal heads, vector of unknown pipe flows and vector of nodal demands for the nodes with unknown head values.

In order to calculate values of vectors H and Q , it is necessary to solve a non-linear equation system made out of continuity equation and headloss equation (2) (Todini and Pilati, 1988):

$A_{11} \cdot Q + A_{12} \cdot H = -A_{10} \cdot H_0$ $A_{21} \cdot Q = -q$	(2)
---	-----

where H_0 is a vector of constant head values.

Equation system shown, can be written using the matrix notation, so more compact formulation can be obtained:

$M \cdot X = N$	(3)
-----------------	-----

Where the elements shown are equal to:

$M = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{pmatrix}$	(4)
---	-----

$X = \begin{pmatrix} Q \\ H \end{pmatrix}$	(5)
--	-----

$N = \begin{pmatrix} -A_{10} \cdot H_0 \\ -q \end{pmatrix}$	(6)
---	-----

Goal of this analysis is to identify nodes and pipes connected to the source nodes, and it can be obtained by setting the following conditions in network: nodal demands in all nodes with unknown nodal head Π should be equal to zero or $q = 0$, while heads Π in nodes with constant head should be equal to one. Pipe conductivity matrix becomes $A_{11} = I$, where I is the identity matrix. In the conditions stated, second equation from the system (2) leads to $Q = 0$. When $Q = 0$ is used in first equation, following form is obtained:

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

This way linear system of equations is derived, which can be computed directly, using the matrix notation in the following way:

$X = inv(M) \cdot N$	(8)
----------------------	-----

where $inv(M)$ represent inverse matrix of matrix M .

Solving the system of equations with (8), solution is obtained which corresponds to the case where all isolation valves are open, meaning that the water is flowing through all pipes. Precisely, we get



sve cevi jednaki nuli a pijezometarska kota u svim čvorovima u kojima je prethodno bila nepoznata, da je jednaka jedinici:

$Q^T = (Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4 \ Q_5 \ Q_6 \ Q_7 \ Q_8) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	(9)
$H^T = (H_2 \ H_3 \ H_4 \ H_5 \ H_6 \ H_7 \ H_8) = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$	(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.

Uklanjanje zatvarača sa dispozicije mreže, zahteva da se shodno tome preuredi 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} :

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

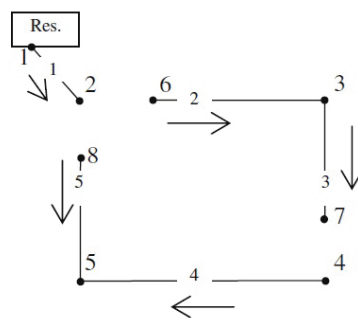
$$\sqrt{\sum_{j=1}^{n_p+n_i} (X_{red,j})^2}$$

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:

all flows in pipes equal to zero and head values in all nodes in which head was unknown, equal to one:

It can be concluded from the fact that the nodal heads obtained are equal to one, that there are no discontinuities in the network. If the computed value for any of the nodal heads was equal to 0, it would mean that this node is not connected to the source nodes.

Isolation valves closure in distribution network can be represented



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

Figure 3. Network scheme with isolation valves removed; arrows show the assumed direction of the water flow in pipes

with removal of fictitious pipes representing valves, in which case network disposition from figure 3 is derived.

Removal of valves from the network, requires adequate reordering of the matrix M . Rows and columns representing removed valves are also removed from this matrix, so the reduced matrix form is obtained M_{red} the same goes for the vectors X and N from which reduced vectors are derived X_{red} and N_{red} .

New equation system is non-defined (it has more than one solution), since matrix M_{red} having size 12×12 does not have full rank (because discontinuities have been introduced into network). In this case matrix M_{red} has the rank of 10. Giustolisi (Giustolisi, Kapelan i Savić, 2008) proposed one solution, amongst infinite number, which is computed with use of pseudo-inverse (p-inverse) matrix of matrix M_{red} :

proposed one solution, amongst infinite number, which is computed with use of pseudo-inverse (p-inverse) matrix of matrix M_{red} :

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

Solution obtained from equation (11) using pseudo-inverse matrix, $X_{red} = (Q_{red} \ H_{red})^T$, is characterized by

$$\sqrt{\sum_{j=1}^{n_p+n_i} (X_{red,j})^2}$$

having a minimal normalized value, . Minimal normalized value further implies that the nodes with unknown Π value which are disconnected from the source nodes will have a head value equal to zero, while nodes connected to the source nodes will have a Π value equal to the value set in source nodes. Solving equation (11) will provide following values for the vectors with the unknowns:

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

$H_{red}^T = (H_2 \quad H_3 \quad H_4 \quad H_5 \quad H_6 \quad H_7 \quad H_8) = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$	(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 jednakom 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 $A_{red-mod}$:

$A_{red-mod} = \begin{matrix} p1 \\ p2 \\ p3 \\ p4 \\ p5 \end{matrix} \begin{pmatrix} n1 & n2 \\ -1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	(14)
--	------

Posmatraju se kolone koje su asocirane sa čvorovima u kojima je bila nepoznata pijezometarska kota, u jednačini (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 jednačine (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:

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

According to the previous explanation, nodes for which Π value is equal to one are connected to the reservoir in the case of closure of all isolation valves, for this example those are nodes 1 and 2 (1 is actually the source node = reservoir itself). On the other hand, nodes with head value equal to zero are disconnected from the source, those are nodes 3, 4, 5, 6, 7 and 8. In order to obtain information about disconnected pipes, it is necessary to analyze topological incidence matrix $A_{red'}$ for the network in which fictitious pipes (valves) are removed (figure 3). This matrix can be derived from the topological incidence matrix A for the network shown in figure 2, displayed with equation (1), by elimination of all rows corresponding to the removed valves or fictitious pipes. Next step is, removal of all columns from matrix A_{red} which are corresponding to the earlier identified nodes which are disconnected from the source node. Columns corresponding to nodes 3, 4, 5, 6, 7 and 8 are eliminated, so matrix $A_{red-mod}$ is obtained:

$A_{red-mod} = \begin{matrix} p1 \\ p2 \\ p3 \\ p4 \\ p5 \end{matrix} \begin{pmatrix} n1 & n2 \\ -1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	(14)
--	------

Columns associated to the nodes where nodal heads were unknown, are analyzed, in equation (14) it is the column n_2 . If any of the pipes has in any of the stated columns, at least one element differing from zero, the pipe is connected to the source node, or if all of the coefficients are equal to zero, this pipe is disconnected. From the equation (14) it can be concluded that pipe 1 remained connected to the source node after closure of all isolation valves, while pipes 2, 3, 4 and 5 became disconnected.

Based on the information regarding disconnected parts of the network, or to be more precise disconnected nodes, vector V_{dn} is created, containing indices of this nodes:

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

2.2 Composition and definition of network segments

In this step of the algorithm, it is necessary to define segments of the water distribution network consisting of a grouped links and nodes, which can be isolated from the rest of the network by closing specific isolation valves.

đenih 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 4.

Čvorovi i veze koje pripadaju segmentu $S = 1$ su povezani sa fiktivnim rezervoarom pozicioniranom na mestu 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 jednačina (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 redukovano 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 Definisane 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 nenamernih isključenja se oslanja na prvi korak celokupnog algoritma. Tačnije referencira se na početnu dispoziciju mreže bez postavljenih izolacionih zatvarača (slika 1), sa kojim se sprovedi postupak sličan kao u prvom

In order to define these segments of the network, the algorithm uses the $V_{dn'}$ vector of nodes disconnected from the source nodes in case of closure of all isolation valves. This vector is shown in eq. (15) for the network disposition from figure 2. First element of vector V_{dn} is analyzed, and on the position of this node, fictitious reservoir is placed with a fixed head elevation equal to one. For the vector shown in (15), in the position of the node labeled with an index of 3, fictitious reservoir is placed giving the disposition represented by Figure 4.

Nodes and links belonging to the segment, $S = 1$ are connected with the fictitious reservoir positioned at the fictitious node 3. They can be determined in the same manner as it was done in the previous step of the algorithm for the nodes and links that are connected to the source nodes, by using the equations (11) and (14). For the disposition displayed in figure 4, it is obtained that $S = 1$ segment consists of the nodes 3, 6 and 7 and the pipes 2 and 3.

Nodes that belong to the segment $S = 1$, are deleted from the vector $V_{dn'}$, reducing it to:

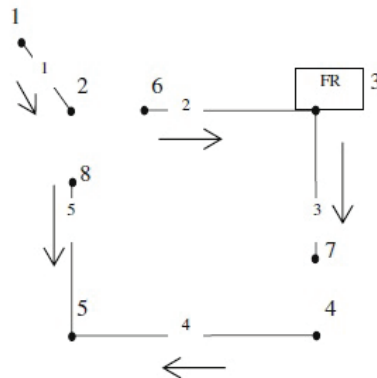
$$V_{dn}^T = (4 \quad 5 \quad 8) \quad (16)$$

Further reiteration of the previously described procedure goes on until vector V_{dn} runs out of elements or until all nodes are assigned to a segment. This would mean that in relation to shown example, fictitious reservoir is now placed at the location of the first element of the reduced vector $V_{dn'}$, i.e. the location of node 4. Segment $S = 2$, is made of nodes 4, 5 and 8, and pipes 4 and 5.

2.3 Definition of unintended isolations

In the introductory part of this paper, unintended isolations of the network parts are described as a secondary consequence of the closure of the isolation valves on a particular segment. Specifically, this means that if we isolate a particular segment of the water supply network, the downstream parts of the network, if they are supplied only through the links that belong to an isolated segment, will also be cut off from the source node. As a result there would be a break in the water supply in the isolated segment and inadvertently disconnected part of the distribution network.

A specific method for the determination of the unintended isolations is based on the first step of the overall algorithm. More specifically reference is made to the initial layout of the network where isolation valves are not yet placed (Figure 1), with whom a similar procedu-

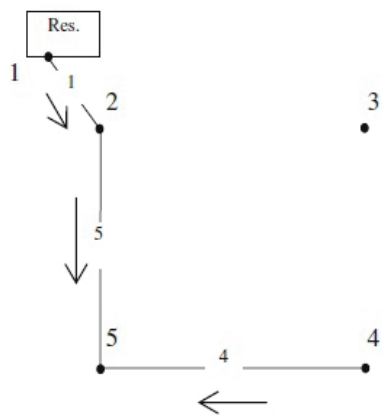


Slika 4. Identifikacija segmenta $S = 1$: fiktivni rezervoar postavljen na mesto čvora 3.

Figure 4. Identification of segment $S = 1$: fictitious reservoir placed instead of node 3.

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.

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 koje 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 slike 5, neće se dobiti delovi mreže koji će biti nenamerno isključeni, budući da se radi o jednostavnoj shemi mreže.



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

Figure 5. Definition of unintended isolations of network for segment $S = 1$

re is carried out as in the first step. Now, instead of removing the isolation valves (which do not exist on this disposition), links and nodes that belong to a particular segment are removed. In this example, for the segment $S = 1$, after the removal of the corresponding elements, disposition shown in Figure 5 will be obtained.

Procedure described in the first step of the algorithm for defining nodes and links associated with the source node is repeated, based on the equations (11) and (14), except that now modified matrix M_{mod} is used instead of the matrix M . This modified matrix is differing from the

original in: it does not includes the columns and rows relating to the fictitious pipes representing isolation valves (since there are none), as well as rows and columns corresponding to the links that belong to the segment being analyzed for unintended isolations. In this way isolation of a particular segment is presented on the disposition without isolation valves. Inadvertently isolated nodes will have as in the previous cases Π elevation close to zero, while the links that are in this way excluded will have in the appropriate row of matrix $A_{red-mod}$ eq. (14), all members equal to zero (except for the column corresponding to the

source node) . In particular, for the disposition of Figure 5, no parts of the network will be inadvertently isolated, since it is a simple network diagram.

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.

2.4 Water Demand Shortfall computation

In the last step of the algorithm, it is necessary to calculate the 2.4. Water Demand Shortfall, which will occur when isolating a particular segment of the water distribution network. This deficit represents the amount of water that the distribution system is not able to deliver, as a result of the closure of access to consumers. Here analogy is ran to the previous step of the algorithm, based on which it can be concluded that consumers who are excluded from the rest of the distribution system, are in the segment that was isolated by closing operation of the isolation valves and in the part of the distribution network that was inadvertently isolated. Sum of the quantities of water that the system is unable to deliver to these customers represent aforementioned Water Demand shortfall and is marked with D_{wds-i} where the index i labels segment that was isolated. The procedure being carried out in the framework of this analysis is characterized by the fact that the required amount of water to consumers, is not expressed as nodal demand (typical for a software package EPANET), but as the demand distributed along the pipe.



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-j} . Postupak se ponavlja za sve segmente distributivne mreže kako bi se za svaki dobio podatak o odgovarajućem deficitu u vodnosnabdevanju.

3. PRIMENA ALGORITMA ZA SEGMENTACIJU NA VODOVODNU MREŽU GRADA FERARA SA DISKUSIJOM REZULTATA

Za kraj ovog rada prikazana je primena algoritma za segmentaciju 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 tematicom (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.

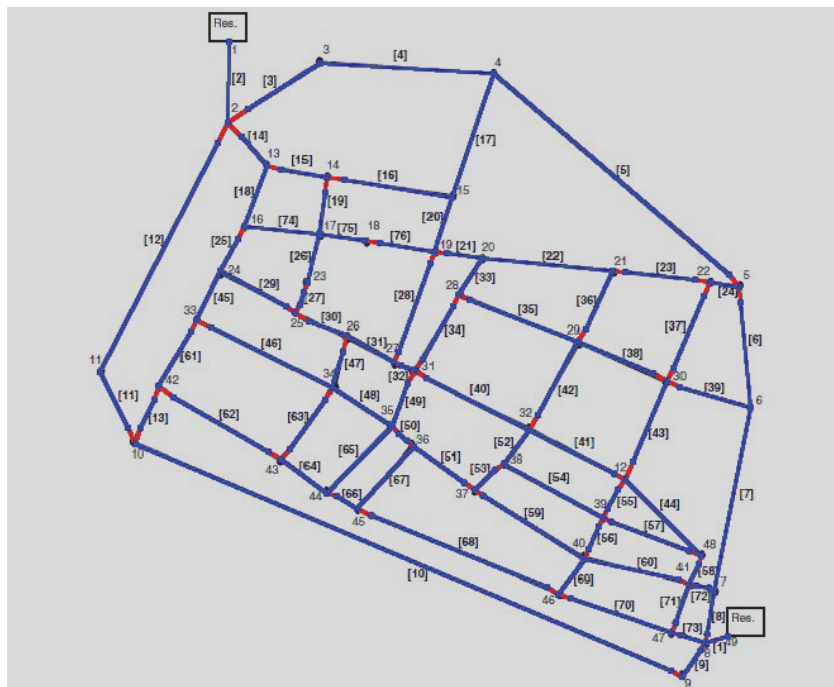
Distributivna mreža grada Ferara je slikovit primer vodovodnih mreža manjih gradova (tačnije njihovog gradskog jezgra), koja prihranjuje potrošače iz dva rezervoara koji se nalaze na suprotnim krajevima grada (slika 6). Prvi rezervoar se nalazi na severozapadnom kraju mreže a drugi na jugoistočnom. Sama 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 (Craeco, Franchini i Al-

For the computation of the demand shortfall due to the isolation of a segment, it is necessary to remove elements that belong to this segment in the same manner as described in the previous section. Based on the data regarding disconnected pipes (as now demand is distributed along the pipe), summing of their demands provides the value of water demand shortfall D_{wds-j} . The process is repeated for all segments of the distribution network in order to receive any information about the appropriate water demand shortfall.

3. APPLICATION OF THE SEGMENTATION ALGORITHM ON THE FERARA CITY WATER DISTRIBUTION NETWORK

At the end of this paper application of the algorithm for the segmentation of the water supply network is shown in the real life example network taken from the literature. It is a water distribution network of the Italian city of Ferrara, who has analyzed in a number of papers dealing with this topic (eg. Craeco, Alvisi and Franchini, 2012). By comparing the results obtained in the framework of the research that followed this work with the results given by other authors, we can verify the results as well as the code that was written.

The distribution network of Ferrara is a picturesque example of water supply network of smaller cities (namely their urban core), which feeds consumers from



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

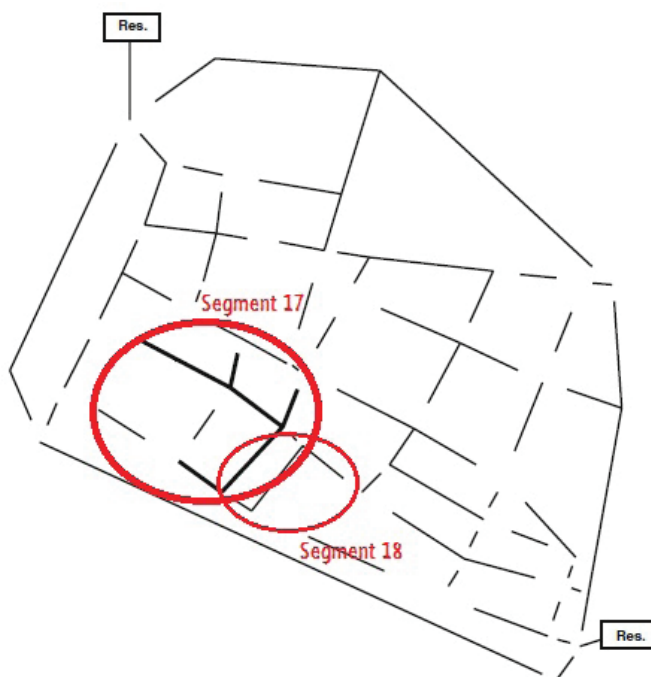
Figure 6. The layout of the distribution network of the Italian city of Ferrara; Lighter color shows isolation valves, a darker pipes in the network; in square brackets are the ordinal numbers of pipes and outside the parentheses are the ordinal numbers of nodes.

two reservoirs that are placed at opposite ends of the city (Figure 6). The first tank is located at the northwest end of the net and the other on the southeast. The mere distribution network is a looped-type, composed of 76 pipes in which the 67 isolation valves were set. This setting of isolation valves does not correspond to the reality, but it is a proposition of a number and the position of the valves obtained by applying an optimization model that examines the different

visi, 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).

Primenom funkcije za segmentaciju 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 ovačkoj dispoziciji nisu se dobile nenamerano 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 gustina naseljenosti veća nego u ostatku mreže. Navedena dva segmenta su crvenom bojom zaokruženi na slici 7.



Slika 7. Prikaz rezultata segmentacije vodovodne mreže Ferrare; svaki izdvojeni deo mreže predstavlja segment za sebe
Figure 7. Results of segmentation of the water supply network of Ferrara; each separate part of the network is the segment

generated dispositions (Craco, Alvisi and Franchini, 2012). Finally, in addition to tubes and valves network has 114 nodes. For this network nodes have no defined nodal demand, but the demand is defined along the pipes of the network. Network data is not shown here but can be found in other works, eg (Craco, Alvisi and Franchini, 2012).

By performing segmentation implemented within the *gui_hydroinf* program, MatLab computing environment (within which *gui_hydroinf* is executed) for approximately 20 s computes the results. This time corresponds to the application on a computer with Intel Core i7 processor and 4GB of DDR-RAM. It is interesting to note that the most time in the execution of the algorithm is needed to calculate the pseudo-inverse of the matrix (11). For the obtained execution time, it can be said to be relatively short, so that even with a much more complex networks expected execution time should not be longer than 30 min.

Due to the pronouncedly cyclic structure of the network, or the phenomenon that each node is supplied from two or more directions, this disposition doesn't have an unintentionally isolated links and nodes in any segment. The largest water demand shortfall occurs when segments 17 and 18 are isolated. It is interesting that these segments are not the largest when considering purely the length of pipes constituting them, but it is obvious that this is the core of town, where the population density is higher than in the rest of the network. These two segments are circled

in red on Figure 7.

4. ZAKLJUČAK

Poznavanjem segmenata mreže kao celina koje se mogu izolovati od ostatka mreže, može se dobiti početna iteracija za formiranje zona bilansiranja. Kroz rad je opisan algoritam za segmentaciju koji pored definisanja segmenata mreže ima za zadatak i da odredi nenamerano isključenja u mreži kao i deficite u vodosnabdevanju koji će se javiti pri izolovanju određenog segmenta. Algoritam je prikazan kroz četiri koraka, koristeći jednostavan primer mreže sa jednim rezervoarom. Menjajući početnu dispoziciju mreže, algoritam koristi različite oblike to-

4. CONCLUSIONS

By knowing the network segments as a separate parts, which can be isolated from the rest of the network, initial iteration of the District Metering Areas can be obtained. This paper presents the algorithm for network segmentation which will detect the unintended isolations of the network as well as water demand shortfalls that will occur when isolating a particular segment. The algorithm is presented in four steps, using a simple example network with a single tank. Changing the initial layout of the network, the algorithm uses different types of topological inciden-



pološke 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*. Za rešavanje hidrauličke mreže je korišćen *EPANET* program. Pored malog ilustrativnog primera, u radu je dat i primer vodovodne mreže grada Ferara i prikazani su najinteresantniji rezultati.

Budući da se ova tematika intenzivno 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 / LITERATURE

1. Branislavljević, N., Čipranić, I., Prodanović, D., Ivetić, D., 2014. Softverska podrška određivanju osnovnih zona bilansiranja vodovodnih mreža. Zbornik radova sa 14. međunarodne konferencije „Vodovodni i kanalizacioni sistemi“, Jahorina.
2. Craeco, E., Franchini, M., Alvisi, S., 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. Craeco, E., Franchini, M., Alvisi, S., 2012., Evaluating Water Demand Shortfalls in Segment Analysis, *Water Resource Management*, 26:2301-2321, Springer Science.
4. Giustolisi, O., Savić, D., 2010., Identification of Segments and Optimal Isolation Valve System Design in Water Distribution Networks, *Urban Water Journal*, 7:1, 1-15, Taylor & Francis.
5. Giustolisi, O., Kapelan, Z., Savić, D., 2008., An algorithm for automatic detection of topological changes in water distribution networks. *Journal of Hydraulic Eng* 134 (4), 435-446.
6. Ivetić, D., Stanić, M., Vasilić, Ž., Prodanović, D., 2014., Podela vodovodne mreže na osnovne zone bilansiranja korišćenjem topoloških matrica povezanosti. Zbornik radova sa 14. međunarodne konferencije „Vodovodni i kanalizacioni sistemi“, Jahorina.
7. Jun, H., Loganathan, G.V., 2007., Valve-Controlled Segments in Water Distribution Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, No. 2.
8. Kao, J.J., Li, P.H., 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.
9. Ostfeld, A., Salomon, E., 2004., Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130 (5), 377-385.
10. Todini, E., Pilati, S., 1988. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In: Coulbeck B, Chou-Hou (eds) *Computer application in water supply, vol I-system analysis and simulation*. Wiley, London, 1-20.
11. Walski, T.M., 1993., Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 42, 21-27.

ce matrix to determine the data needed. The system of equations consisting of continuity and headloss equations is in most cases undetermined. Therefore, for its solution the use of pseudo-inverse matrix is necessary, giving the result with minimum normalized value. Program code for execution of the algorithm is written and integrated into the software *gui_hydroinf*. To solve the hydraulics of the network *EPANET* program is used. In addition to the small illustrative examples, the paper presents an example of the water supply network in the city of Ferrara and most interesting results are shown.

Since these topics are intensively investigated only for the past few years, a numerous directions for future research exists. Different groups of authors have suggested in the last three years several optimization models that rely on this analysis. Optimization in this case may have different objectives or criteria, such as determining the optimum number and position of isolation valves depending on the cost of installation, water demand shortfall and so on.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the Ministry of Science, Education and Technological Development of the Republic of Serbia for support in the implementation of the project TR37010 entitled “Systems for drainage of rain water as part of urban and transport infrastructure”, which integral part of an investigation was the issue described in this paper.