

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Gorjup, M., 2016. Uporaba teorije grafov za zasnovo merilnih območij v vodovodnih omrežjih. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kramar Fijavž, M., somentor Kozelj, D.): 68 str.

Datum arhiviranja: 18-10-2016

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Gorjup, M., 2016. Uporaba teorije grafov za zasnovo merilnih območij v vodovodnih omrežjih. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kramar Fijavž, M., co-supervisor Kozelj, D.): 68 pp.

Archiving Date: 18-10-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO**

Kandidat:

**MARIJAN GORJUP**

**UPORABA TEORIJE GRAFOV ZA ZASNOVO  
MERILNIH OBMOČIJ V VODOVODNIH OMREŽJIH**

Magistrsko delo št.: 15/II.VOI

**USING GRAPH THEORY FOR DESIGNING DISTRICT  
METERED AREAS IN WATER SUPPLY NETWORK**

Graduation – Master Thesis No.: 15/II.VOI

**Mentorica:**

izr. prof. dr. Marjeta Kramar Fijavž

**Somentor:**

asist. dr. Daniel Kozelj

Ljubljana, 11. 10. 2016

## ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

Spodaj podpisani/-a študent/-ka Marijan Gorjup, vpisna številka 26450019 avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Uporaba teorije grafov za zasnovno merilnih območij v vodovodnih omrežjih,

#### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
  
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Ljubljana

Datum: 20. 9. 2016

Podpis študenta/-ke:

\_\_\_\_\_

---

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>519.17:628.1(043.3)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Marijan Gorjup</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Marjeta Kramar Fijavž</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. dr. Daniel Kozelj</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Uporaba teorije grafov za zasnovno merilnih območij v vodovodnih omrežjih</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Magistrska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>68 str., 3 pregl., 41 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>vodovodni sistem, DMA, algoritem, teorija grafov</b>

### **Izvleček**

Vodovodni sistemi imajo velik delež neprodane vode. Z namenom zmanjšanja količine neprodane vode se v vodovodnem sistemu oblikuje merilna območja (DMA cone). V DMA conah se merita parametra tlak in pretok vode. Z znanima podatkom o količini vtekle vode v DMA cono in količini prodane vode je po izračunu bilance vode enostavno določiti količino neprodane vode. Z zasnovno DMA con je upravljalcem omogočena hitrejša detekcija vodnih izgub in učinkovit nadzor nad delovanjem celotnega sistema. Kljub temu se pojavljajo negativni učinki kot je neustrezen nivo tlaka ali problem s starostjo vode. Želeli bi razbiti vodovodni sistem na DMA cone tako, da se pri tem hidravlične razmere ne poslabšajo. Veliko že razvitih metod je omejenih na majhne ali skeletizirane vodovodne sisteme. Zato je naš namen poiskati metodo za hitro in učinkovito particijo kompleksnih vodovodnih omrežij. Izmed več algoritmov je bil izbran algoritem za spektralno razbitje grafov. Nekateri hidravlični parametri so vključeni v metodo kot vhodni podatki algoritma za generiranje ustreznih rešitev. Generiranih je več rešitev, izmed katerih je izbrana optimalna. Vse rešitve so testirane z uporabo programa EPANET 2.0 in MATLAB 2015. Opisano metodo smo tudi testirali na realnem primeru.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 519.17:628.1(043.3)

**Author:** Marijan Gorjup

**Supervisor:** prof. Marjeta Kramar Fijavž, Ph. D.

**Co-supervisor:** assist. Daniel Kozelj, Ph. D.

**Title:** Using graph theory for designing district metered areas in water supply network

**Document type:** Master Thesis-University study

**Notes:** 68 p., 3 tab., 41 fig.

**Keywords:** water supply system, DMA, algorithm, graph theory

### **Abstract**

Many water distribution systems (WDS) have high percentage of non revenue water (NRW). In order to decrease the volume of NRW, district metered areas (DMAs) are introduced, where hydraulic parameters such as pressure and flow are measured. Knowing the volume of inlet water into the DMA and the volume of revenue water at the demand nodes, it is easy to calculate the volume of NRW. Dividing WDS into different DMAs enables the water management utilities faster identification of water losses and effective control over the whole system. However, there are also some negative effects such as lower pressure and problems related to water quality. The objective is to divide WDS into DMAs in such way that the hydraulic conditions don't get worse. Many of known methods are limited to small or skeletoned WDS. Therefore our aim is to find a fast and effective algorithm for partitioning complex networks. Among several algorithms the algorithm for spectral partitioning was selected. Some hydraulic parameters are included in the method as input data in order to generate hydraulically suitable solutions. Numerous solutions are obtained, among which the optimal is selected. All of them are tested with program EPANET 2.0 and MATLAB 2015 using the EPANET Programmer Toolkit. The proposed method was also tested on a real case study.

## **ZAHVALA**

Na začetku se želim zahvaliti vsem ljudem, ki so mi ponudili svojo pomoč in s tem prispevali k zaključku naloge, ki je nastajala daljše časovno obdobje.

Za vodenje in usmerjanje pri delu se zahvaljujem somentorju asist. dr. Danielu Kozelju in mentorici izr. prof. dr. Marjeti Kramar Fijavž.

Zahvala gre tudi staršema in preostalim članom družine, ki so mi kakorkoli pomagali.

Na pomembnem mestu se želim zahvaliti tebi Marija, ki si mi stala ob strani, ko sem te najbolj potreboval. Hvala za sočutno bližino, ki mi jo daješ.

## KAZALO VSEBINE

1	UVOD .....	1
2	KONCEPT MERILNEGA OBMOČJA OZIROMA DMA CONE .....	3
2.1	Ideja o zasnovi merilnih območij v VS .....	3
2.2	Odpravljanje vodnih izgub z uporabo merilnih območij .....	4
2.3	Prednosti in slabosti uporabe zasnovanih merilnih območij .....	6
2.4	Spreminjanje kakovosti vode v merilnem območju.....	7
2.5	Alternativa DMA conam.....	7
2.5.1	Koleratorji šuma .....	7
2.5.2	Monitoring parametrov VS.....	7
2.5.3	Uporaba spletnih modelov za detekcijo vodnih izgub .....	8
2.6	Sistem SCADA pri nadzoru in upravljanju VS .....	8
2.6.1	Integracija sistema SCADA in hidravličnega modela VS .....	9
2.6.2	Napake .....	9
2.6.3	Odzivi na napake.....	10
2.7	Zaporni elementi namenjeni izolaciji merilnih območij.....	10
2.8	Testiranje merilnega območja .....	12
2.9	Kategorizacija DMA con .....	12
2.10	Osnovni pojmi in enačbe hidravlike .....	13
3	TEORIJA GRAFOV .....	16
3.1	Pojem grafa .....	16
3.2	Uporaba grafov v VS .....	22
3.3	Algoritmi v teoriji grafov .....	23
3.3.1	Algoritem iskanja v globino.....	23
3.3.2	Algoritem iskanja v širino.....	24
3.3.3	Algoritem za iskanje najkrajše poti .....	25
3.3.4	Floyd-Warshallov algoritem.....	25



---

3.3.5	Razbitje grafov .....	26
3.3.6	Spektralno razbitje grafa .....	28
4	DRUGI PRISTOPI ZA ZASNOVO MERILNIH OBMOČIJ .....	32
4.1	Alvisi in Franchini .....	32
4.2	De Paola.....	32
4.3	Di Nardo in Di Natale.....	33
4.4	Diao .....	34
4.5	Hajebi .....	35
4.6	Ferrari.....	35
4.7	Galdiero.....	37
5	PRIPRAVA IN OPIS PODATKOV DELOVNEGA HIDRAVLICNEGA MODELA .....	38
5.1	Splošno o upravljalcu in VS Kranj .....	38
5.2	Vodni viri.....	38
5.3	Vodohrani .....	39
5.4	Delovni primer Planine in Primskovega.....	40
5.4.1	Splošni opis delovnega primera .....	40
5.5	Delovni primer Planine .....	43
6	UPORABLJENI PROGRAMI IN EVALVACIJA REŠITEV .....	44
6.1	Uporabljeni programi .....	44
6.1.1	EPANET 2.0.....	44
6.1.2	MATLAB.....	45
6.2	Kriteriji za določanje ustreznosti formiranih DMA con .....	46
6.2.1	Povezanost omrežja.....	46
6.2.2	Odpornostni indeks $I_r$ .....	47
7	UPORABLJENA METODA.....	50
7.1	Priprava vhodnih podatkov.....	50
7.2	Algoritem .....	50
7.2.1	Uteži matrike sosednosti .....	50

7.2.2	Število DMA con .....	52
7.2.3	Mejne cevi .....	54
7.2.4	Transportni vod in pretočnost DMA con .....	54
7.2.5	Statusi mejnih cevi .....	57
7.2.6	Preverjanje rešitev s hidravličnimi simulacijami.....	58
7.3	Rezultati.....	59
7.4	Preverjanje rešitev na terenu.....	62
7.5	Požarna voda .....	62
8	ZAKLJUČEK.....	65
VIRI	.....	66

## KAZALO SLIK

Slika 1: Sklopi vodne bilance (Ur.l. RS, št. 88/12) .....	1
Slika 2: Predstavljen koncept zasnove merilnih območij (Morrison, 2004) .....	3
Slika 3: Grafični prikaz pretokov preko časovnega niza (Morrison, 2004) .....	4
Slika 4: Povprečno ocenjene vodne izgube in poraba vode v nočnem času (Morrison, 2004) .....	5
Slika 5: Zaporni ventil (Aniton, 2016) .....	10
Slika 6: Regulacijski ventil (ESI.info, 2016) .....	11
Slika 7: Notranjost merilnega jaška (Komunala Kranj, 2016) .....	11
Slika 8: Graf je definiran s 4 točkami $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ in 6 povezavami $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$ .....	16
Slika 9: Neusmerjen (levo) in usmerjen graf (desno) .....	16
Slika 10: Primer večkratne povezave ( $e_1$ ali $e_2$ ) in zanke ( $e_3$ ) .....	17
Slika 11: Povezan (levo) in nepovezan graf (desno) .....	17
Slika 12: Primer drevesa .....	18
Slika 13: Stopnja točke, list in izolirana točka .....	19
Slika 14: Primer izomorfnosti dveh grafov .....	19
Slika 15: Matrika sosednosti grafa na Sliki 8 .....	20
Slika 16: Incidenčna matrika grafa na Sliki 8 .....	20
Slika 17: Laplaceova matrika grafa na Sliki 8 .....	20
Slika 18: Z različnima barvama sta označena dva podgrafa .....	21
Slika 19: Primer inducirane podgrafa na desni strani .....	21
Slika 20: Primer minimalnega vpetega drevesa (označen s sivo barvo) .....	22
Slika 21: S številkami označen vrstni red iskanja v globino v grafu $G$ .....	24
Slika 22: S številkami označen vrstni red iskanja v širino v grafu $G$ .....	25
Slika 23: Bloki v grafu .....	27
Slika 24: Drevo z bloki (bloki so označeni s črno, prerezni točki pa s sivo) .....	27

Slika 25: Primer dendograma za rez v grafu (Diao, 2013) .....	34
Slika 26: Ultrafiltracija Bašelj (Pitna voda zgornja Sava, 2016) .....	39
Slika 27: Vodohran Zeleni hrib se nahaja v okviru posestva Brdo pri Kranju (Pitna voda zgornja Sava, 2016) .....	40
Slika 28: Na karti označeno območje VS Primskovega in Planine (ARSO GIS, 2016).....	41
Slika 29: VS Planine in Primskovega v programu EPANET 2.0 .....	42
Slika 30: Smeri vtokov in iztoka na delovnem primeru Planine so označene s puščicami ....	43
Slika 31: Program EPANET 2.0 .....	44
Slika 32: Program MATLAB .....	45
Slika 33: Z rdečo barvo poudarjen transportni vod delovnega primera .....	55
Slika 34: Nepretočni coni .....	56
Slika 35: Voda, ki se kaskadno pretaka iz DMA A v DMA B .....	57
Slika 36: Zasnova DMA con pri $k = 4$ .....	59
Slika 37: Grafikon št. mejnih cevi.....	61
Slika 38: Grafikon odpornostnega indeksa $lr$ v odvisnosti od št. DMA con.....	62
Slika 39: Vrednosti tlakov pri maksimalni porabi vode brez pojava požara .....	63
Slika 40: Vrednosti tlakov pri požarnem primeru 1 (z modrim krogom je označena lokacija požara).....	63
Slika 41: Vrednosti tlakov pri požarnem primeru 2 (z modrim krogom je označena lokacija požara).....	64

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Kategorizacija DMA .....	13
Preglednica 2: Osnovni podatki pri zasnovi $k = 4$ .....	60
Preglednica 3: Osnovni podatki po zasnovanih DMA conah.....	60



## 1 UVOD

V svetu je veliko število vodovodnih sistemov (v nadaljevanju VS), ki imajo zelo velik delež neprodane količine vode (angl. Non-Revenue Water, NRW). Največji delež NRW pri tem imajo dejanske izgube (Slika 1). Vzrokov za dejanske vodne izgube je več. S poznavanjem razmer in nadzorom VS želi upravljalec zadostiti potrebam prebivalcev po pitni vodi, ki so priključeni na VS. Ker je cena vode v povezavi s stroški obratovanja, je cilj upravjalca znižati delež dejanskih vodnih izgub, kar posledično znižuje količino neprodane vode, in s tem znižati obratovalne stroške VS. Ena izmed možnosti za poznavanje in nadziranje razmer v VS je zasnova merilnih območij (angl. District Metered Area, DMA). DMA cone so posamezni izolirani predeli VS, kjer se na vtoku v posamezno DMA cono z merilnimi instrumenti merita pretok in tlak.

Sklopi vodne bilance za vodovode				
Vtok v vodovodni sistem [m <sup>3</sup> /leto]	Ugotovljena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	Obračunana poraba [m <sup>3</sup> /leto]	Obračunana merjena poraba (vključujoč izvoz vode) [m <sup>3</sup> /leto]	Prodane količine vode [m <sup>3</sup> /leto]
			Obračunana nemerjena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	
		Nebračunana poraba [m <sup>3</sup> /leto]	Neobračunana merjena poraba (vključujoč izvoz vode) [m <sup>3</sup> /leto]	Neprodane količine vode [m <sup>3</sup> /leto]
			Neobračunana nemerjena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	
	Vodne izgube [m <sup>3</sup> /leto]	Navidezne izgube [m <sup>3</sup> /leto]	Neugotovljena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	
			Nenatančnost meritev [m <sup>3</sup> /leto]	
		Dejanske izgube [m <sup>3</sup> /leto]	Dejanske izgube na vodih surove vode in na sistemih za obdelavo vode (če obstajajo) [m <sup>3</sup> /leto]	
			Puščanje na transportnih in razdelilnih vodih [m <sup>3</sup> /leto]	
		Puščanje in prelivi na transportnih in/ali razdelilnih vodohranih [m <sup>3</sup> /leto]		
		Puščanje na priključkih do merilnega mesta [m <sup>3</sup> /leto]		

Slika 1: Sklopi vodne bilance (Ur. l. RS, št. 88/12)

V grobem se po sklopih vodne bilance (Ur. l. RS, št. 88/12) deli voda na dva dela: prodana in neprodana količina vode. Prodana voda je količina vode, ki se večinoma evidentira na priključnih mestih porabnikov. V to kategorijo spada še obračunana nemerjena poraba vode. K neprodanim količinam vode pa spadajo dejanske izgube, navidezne izgube in neobračunana poraba. Na podoben način se definira ugotovljena poraba in vodne izgube. K ugotovljeni porabi spadata obračunana in neobračunana poraba. K vodnim izgubam prištevamo dejanske in navidezne izgube. Cilj upravljalca VS je znižati količino neprodane vode. Z meritvami in podatki o količini prodane vode je enostavno določiti količino neprodane vode.

Namen magistrske naloge je predlagati zasnovo merilnih območij v VS, ki upošteva tudi hidravlične kriterije. Poenostavljena shema vodovodnega omrežja (v nadaljevanju VO) spominja na strukturo grafa iz teorije grafov. Zaradi te podobnosti lahko za zasnovo merilnih območij uporabimo algoritme iz teorije grafov, ki so namenjeni razbitju osnovnega grafa na podgrafe. Kadar govorimo o topologiji cevovodov, ki sestavljajo VS, bomo uporabljali izraz vodovodno omrežje (VO). Ko pa upoštevamo poleg topologije cevovodov še obratovanje VS, pa bomo le-to poimenovali VS. Pri zasnovi DMA con bomo upoštevali tudi hidravlični kriterij, saj na ta način pridobimo rešitve, ki ne zadostujejo samo zakonitostim iz teorije grafov, temveč tudi hidravličnim zahtevam, ki so ključni za oskrbo prebivalcev s pitno vodo. Za oblikovanje DMA con je bil izbran algoritem iz teorije grafov, s katerim lahko v metodo učinkovito vključimo hidravlične kriterije. Algoritem lahko pripiše vsak točkovni element VO določenemu podgrafu. Izmed več oblikovanih rešitev se na podlagi odpornostnega indeksa  $I_r$  izbere optimalna rešitev (Todini, 2000). Upoštevati je treba, da nekatere izmed dobljenih rešitev niso hidravlično ustrezne in jih je zato potrebno dodatno ovrednotiti z odpornostnim indeksom  $I_r$  ali drugimi hidravličnimi kriteriji.

Cilji magistrske naloge so naslednji:

- spoznati delovanje merilnih območij oziroma DMA con,
- spoznati algoritme teorije grafov, ki bi se lahko uporabili za zasnovo merilnih območij,
- seznaniti se z dosedanjimi poskusi tujih raziskovalcev za zasnovo merilnih območij,
- spoznati se s programoma MATLAB in EPANET 2.0,
- preizkusiti izbrani algoritem na realnem primeru VS z upoštevanjem podatkov hidravličnega modela in
- komentirati pridobljene končne rešitve.



## 2 KONCEPT MERILNEGA OBMOČJA OZIROMA DMA CONE

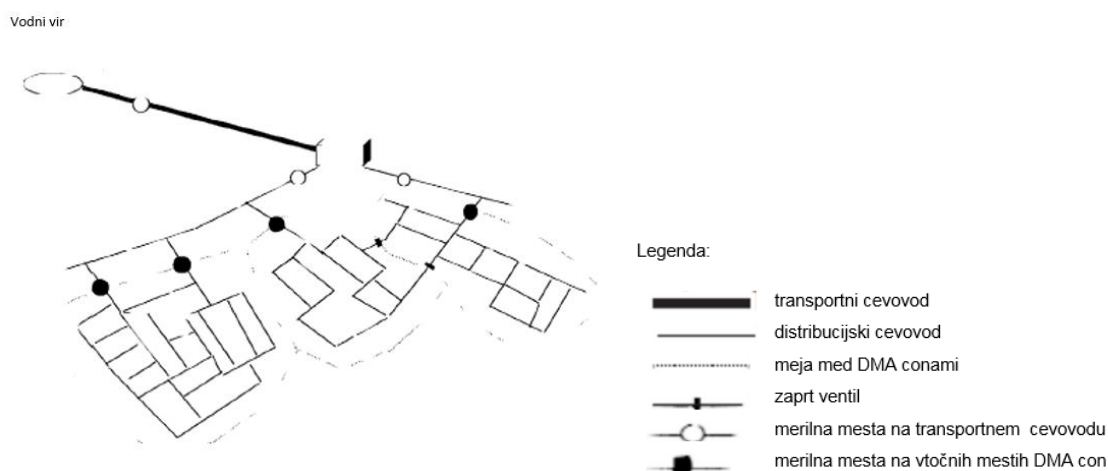
Na začetku tega poglavja so predstavljeni osnovni pojmi, ki se pojavljajo v povezavi z merilnimi območji v VS. Pri tem je predvsem poudarjena uporabnost in pomembnost vloge merilnih območij in kakšen je zgodovinski razvoj ideje tega koncepta. Opredeljene so tudi prednosti in slabosti, ki se pojavljajo z zasnovno merilnih območij v VS, ter nekatere njihove značilnosti.

### 2.1 Ideja o zasnovi merilnih območij v VS

Merilno območje ali DMA cona (angl. District Metered Area, DMA) je zaključen del VS, ki ima evidentirano količino vode, ki vstopa v cono in količino, ki odteka iz nje. Na podlagi meritev se izračuna bilanca vode. Poleg merjenja pretokov se stalno meri še tlak, saj je pomembna hidravlična spremenljivka, ki se je ne sme zanemariti. DMA cona se večkrat ujema z območjem tlačne cone. Običajno to velja za VS, ki se nahajajo na zelo razgibanem terenu. V tem primeru je smiselno, da tlačna cona in merilno območje zaradi regulacije tlaka sovpadata. Cona, v kateri se izvaja regulacija tlaka, se imenuje PMA (angl. Pressure Management Area).

Vloga DMA con je nadzor in učinkovito upravljanje z VS. Učinkovitejše upravljanje se doseže s hitrejšim lociranjem vodnih izgub. Prva ideja o DMA conah sega v rimske čase okoli leta 90 pred našim štetjem. V tem času je Sextus Julius Frontinus izdelal nekakšno primitivno merilno napravo, s katero je ugotovil vtok vode v VS. Merilna naprava je dajala rezultate s precejšnjim odstopanjem od realnega stanja, a je postavila koncept za idejo o merjenju pretokov. Od rimskih časov dalje se je tehnologija precej spremenila, vendar je ideja o merjenju pretokov ostala enaka. Kljub vsemu razvoju, ki vključuje novo opremo, delovanje raznovrstnih ventilov in zanesljivih meritev merilnih naprav, imajo lahko VS še vedno velike vodne izgube. Z različnimi ukrepi jih je mogoče zmanjšati, ne pa v celoti odpraviti.

Prvi resnejši poskus uvedbe DMA con so izvedli v Angliji v zgodnjih 80. letih 20. stoletja (Morrison, 2004). Idejo so najprej preizkusili v industrijskem območju. Lahko predpostavimo, da VS neke industrije predstavlja nekakšen miniaturni neodvisni del. Poraba vode je bila določena z manjšim številom odjemnih mest in veliko točkovno porabo. Z zapornimi ventili so izolirali območje na minimalno število dovodnih cevi. Pri tem je bilo potrebno določiti, katere cevi se lahko zapre, da še omogočajo normalno delovanje VS. Voda, ki vstopa oziroma izstopa iz DMA cone je evidentirana s pomočjo merilnih mest. Shematski primer delovanja DMA con lahko vidimo na Sliki 2.

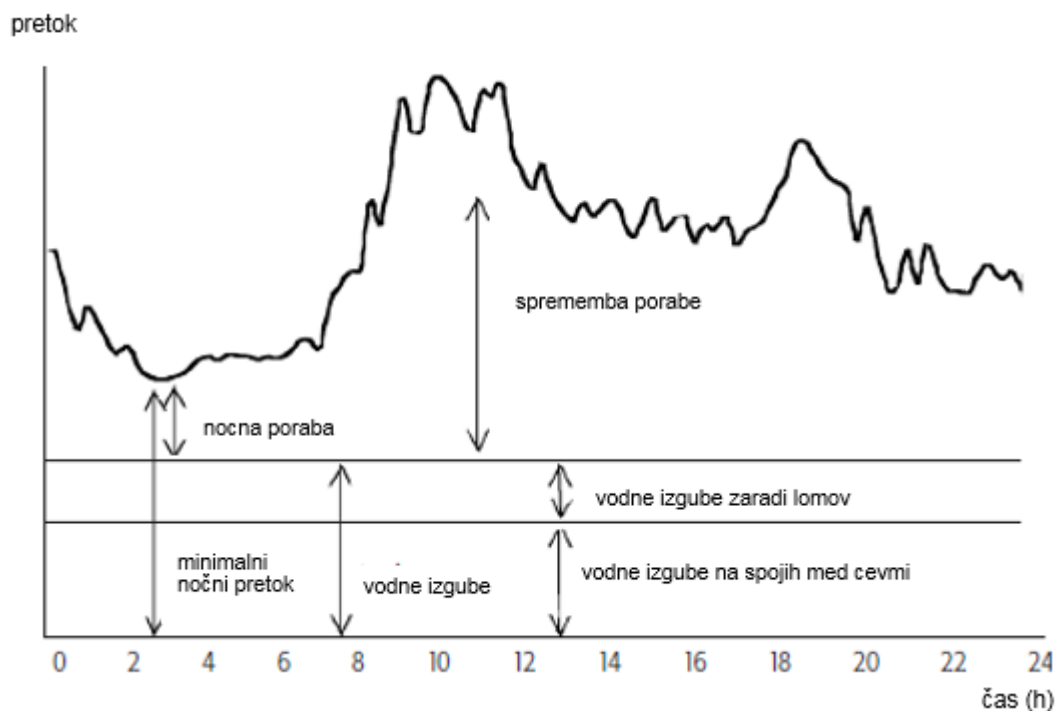


Slika 2: Predstavljen koncept zasnovanja merilnih območij (Morrison, 2004)

Za učinkovito uporabo DMA con je bistveno jasno razumevanje koncepta o vodnih izgubah. Poznamo dve vrsti vzrokov puščanja: netesnenje spojev ter poškodbe in lomi cevi. Netesnenje spojev predstavlja običajno majhne izgube in jih je le težko določiti. Pri tem se postavlja vprašanje o smiselnosti saniranja VS. Pri poškodbah in lomih cevi pa gre za izrazitejše iztekanje vode. Ker gre v tem primeru za večje količine iztekle vode, je zaželeno čim hitrejšo lociranje poškodb in lomov ter izvedba sanacije (Steinman in Kozelj, 2014).

## 2.2 Odpravljanje vodnih izgub z uporabo merilnih območij

Izgube se s pomočjo DMA con najbolj učinkovito identificirajo s stalnim spremljanjem nočnih pretokov za vsako cono posebej. Nenadna odstopanja od povprečnih razmer so lahko posledica lomov cevi. Razlike se pojavijo tako v vrednosti pretokov kot tudi tlakov. Spremembe v meritvah so prvi indikator, da je potrebno preveriti razmere na terenu. Vrednost pretoka se v primeru loma cevi poveča, vrednost tlaka pa zmanjša. Glede na primerjavo dinamike pretokov in tlakov v posameznih DMA conah se lahko določi nujnost ukrepanja. Lome cevi se zelo hitro odkrije zaradi nenadnih padcev tlaka. Z rednim nadzorovanjem pretokov se hitreje odkrijejo defekti v VS.



Slika 3: Grafični prikaz pretokov preko časovnega niza (Morrison, 2004)

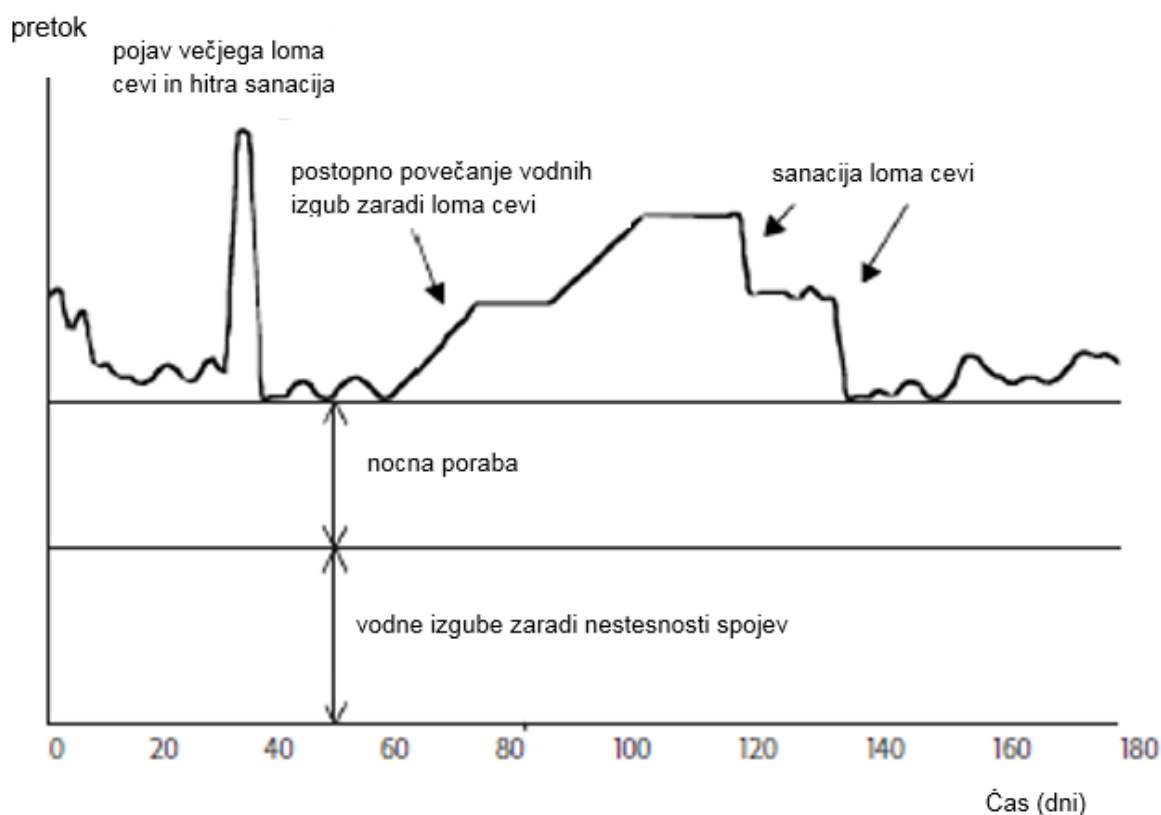
Uvedba DMA con omogoča hitrejšo identifikacijo in lociranje lomov cevi in tudi ustrezno ukrepanje. Z monitoringom lahko odkrijemo, v kateri coni je prišlo do loma cevi. Nato je treba odkriti natančno lokacijo loma cevi. Iz tega vidika naj bi bile velikosti DMA con čim manjše, da se lahko čim hitreje odkrije lom cevi v posamezni coni. Za natančno identifikacijo lokacije loma se najpogosteje uporabljajo akustične metode odkrivanja vodnih izgub. Na koncu pa je treba še izvesti sanacijo mesta okvare. Pogosto pojavljanje lomov cevi posledično dolgoročno vpliva na zmanjšanje tlaka v VS. Lahko pa vodi do napačnega spoznanja, da je v VS prišlo do loma cevi (začasne spremembe v VS, merske napake). Zato je zelo pomembno, da se zmanjša možnost pojava loma cevi. To se lahko doseže s tem, da so cevi izdelane iz ustreznih materialov, da lahko prenesejo večje obremenitve zaradi tlakov ali zunanjih obremenitev. Prav

tako je potrebno zmanjševati verjetnost pojavljanja hidravličnega udara, ki ravno tako poškoduje infrastrukturo cevovoda. Slednje se preprečuje z avtomatskim počasnim odpiranjem regulacijskih in zapornih ventilov.

DMA cone se uporabljajo kot orodje za nadzorovanje VS in zmanjševanje vodnih izgub. Pomagajo tudi ugotoviti, katera so najbolj kritična območja glede pojavljanja lomov cevi. Odpravljanje posameznih defektov se pozna samo na lokalni ravni, v velikih VS se spremembe sanirane lokacije slabše odražajo. Učinkovito upravljanje VS je tudi odvisno od zasnove območij DMA con. Po vzpostavitvi con in odpravi obsežnih puščanj se lahko prične izvajati monitoring. Novo zasnovano DMA cone je potrebno izvesti zelo pazljivo, saj privede do spreminjanja tlačnih razmer v VS.

Stalni monitoring zagotavlja hitro odkrivanje vodnih izgub. Julian Thornton je v članku *Managing Leakage by Managing Pressure* opozoril na možnost zmanjševanja vodnih izgub s spreminjanjem tlaka (Morrison, 2004). Manjše tlačne razmere v VS zmanjšujejo odtekanje vode iz odprtih. Tlak se lahko spreminja do te mere, da se porabnikom zagotavlja pitno vodo pri ustrezno visokem tlaku. Zaradi tega dejstva se upravljalci odločijo, da območja DMA con približno sovpadajo s tlačnimi PMA conami. Monitoring se zaradi lažjega upravljanja in nadziranja vključi v sistem SCADA (angl. Supervisory Control and Data Acquisition), ki omogoča aktivno spremljanje delovanja celotnega VS.

Razdelitev VS na DMA cone omogoča tudi oceno vodnih izgub. Ocena se naredi na podlagi pretokov, ko je poraba najmanjša. To se običajno zgodi ponoči, ko večina prebivalcev nekega območja spi in je zaradi tega poraba vode najmanjša. S pomočjo določenih tehnik se lahko določi, kolikšen delež vode pripada netesnosti spojev in kolikšen lomom cevi.



Slika 4: Povprečno ocenjene vodne izgube in poraba vode v nočnem času (Morrison, 2004)

Slika 4 prikazuje, kako se lahko s stalnim spremljanjem pretokov opazi hipno povečanje vrednosti nočnih pretokov. Vzrok tovrstnega pojava je lahko lom cevi in je zato potrebno

preveriti razmere na terenu. Pri nenadni spremembi pretoka gre lahko za večji lom cevi in posledično velike vodne izgube. Na Sliki 4 je ta proces prikazan v časovnem obdobju od 60. do 140. dneva. Po izvedeni sanaciji se vrednost pretoka zaradi približno enake porabe povrne v stanje pred lomom cevi. Če se pretok povečuje postopoma, obstaja možnost, da je nekje prišlo do poškodbe oziroma manjšega loma cevi. Zaradi tlaka v VS se odprtina stalno povečuje in postopoma iztekajo vedno večje količine vode. Če upravljalec v tem primeru zazna spremembe pretoka dovolj zgodaj, lahko na ta način zmanjša precejšne količine odtekle vode.

Ocenimo lahko, kolikšen delež vodnih izgub je mogoče zmanjšati glede na celotno porabo vode. Delež zmanjšanih izgub se lahko pretvori v denarno vrednost, ki je na ta način prihranjena. S tem se ugotovi, če je sanacija, povezana z zmanjšanjem vodnih izgub, poslovno upravičena. S primerjavami meritev posameznih con v enakih časovnih intervalih se lahko ugotovi, kakšen je trend vodnih izgub v VS. Če se vodne izgube stalno povečujejo, je treba izvesti ukrepe, ki bodo zmanjšali vodne izgube (Morrison, 2004).

### 2.3 Prednosti in slabosti uporabe zasnovanih merilnih območij

- Prednosti:

Poglavitna prednost uporabe DMA con je ugotavljanje deleža vodnih izgub s pomočjo analize nočnih pretokov in določanje okvirne lokacije puščanja vode. V začetku uvajanja DMA con so uporabljali mehanske merilne naprave, kasneje pa so razvili še ultrazvočne in elektromagnetne merilne naprave. Z razvojem več različnih podjetij, ki so na trg prinesle nove merilne naprave, se je po zakonitostih tržnega delovanja, cena merilnih naprav znižala. Poleg tega je prenos podatkov iz merilnih naprav v podatkovno bazo nadzornega centra avtomatiziran, kar omogoča hitro zbiranje in obdelavo podatkov. To so omogočile razne naprave za zajem in shranjevanje podatkov ter komunikacijski sistemi (Farley, 2010). S tem načinom so upravjalci veliko pripomogli k zmanjšanju časa identifikacije loma cevi. Poleg tega je možno tudi izolirati območje v primeru kontaminacije VS, kar se lahko opravi z zapiranjem zapornih ventilov, da se prepreči širjenje onesnaževanja (Farley, 2010).

- Slabosti:

Obstajajo pa tudi negativne posledice, ki se pojavijo z uvedbo DMA con. Predpostavimo, da imamo večji VS, ki ima zelo prepleteno oziroma mrežasto topologijo. Smeri toka so nam brez uporabe hidravličnega modela neznane, lahko pa se tudi pojavi dvosmerni tok. S tem ko ustvarjamo posamezno DMA cono, moramo najprej zapreti veliko število cevi, da dobimo neko samostojno neodvisno enoto. Za doseg tega cilja moramo imeti zahtevano število zapornih ventilov ali drugih elementov, ki prekinejo tok v cevi. Vsak zaporni ventil predstavlja strošek in v primeru velikega števila zaprtja cevi se s tem stroški povečajo. Nekatera VO je tudi težje razdeliti na posamezne DMA cone zaradi njihove topologije. Pri zelo razvejanem VO je lahko število DMA con zelo veliko. DMA cone dobijo topologijo drevesa, ki so lahko velika tudi samo nekaj hišnih priključkov. V tem primeru bi bilo zelo težko zasnovati takšne DMA cone, da ne bi bilo velikega števila posameznih con in bi hkrati njihova zasnova omogočala meritve, ki bi vplivale na učinkovitejše obratovanje VS. Negativni vplivi se pojavijo tudi v VS z nizkim tlakom. S prekinjanjem povezav znotraj VO se namreč lahko lokalno pojavijo prenizki tlaki. Analiza hidravličnih veličin lahko vodi do napačnih interpretacij meritev. To se lahko zgodi v primeru, ko se zaradi spreminjana delovanja regulacijskih ventilov spremenijo hidravlične razmere v VS. Zaradi slabše pretočnosti se lahko pojavijo tudi problemi s kakovostjo vode (Farley, 2010).

## 2.4 Spreminjanje kakovosti vode v merilnem območju

Z razdelitvijo VO na manjše DMA cone pridobimo več manjših območij, ki predstavljajo nekakšne izolirane enote od preostalega dela, z izjemo merilnih vtočnih oziroma iztočnih mest. Zaradi manjšega števila vtočnih oziroma iztočnih mest, prihaja do težav s kvaliteto vode. Do večjih težav prihaja v primeru, ko imamo opravka z nepretočnimi DMA conami. V tem primeru voda samo vteka v DMA cono in se porablja na priključnih mestih porabnikov. Poraba je lahko majhna, volumen vode v coni, ki se nahaja v VO, pa velik v primerjavi s porabo. Posledično so hitrosti vode v takem primeru majhne. Ustvarijo se tudi »slepi« deli območja vodovodnih cevi. Voda v tovrstnih ceveh skoraj povsem stagnira in postane problematična glede kakovosti vode. V takem primeru je nujno redno izpiranje VO preko hidrantov na območjih stagnacijskih con. Zasnova nepretočnih DMA con je manj primerna in bi bilo mogoče smiselno razviti metodo zasnove merilnih območij, ki bi vključevala poleg hidravličnih kriterijev tudi kriterije povezane s kakovostjo vode (Morrison et al., 2007).

## 2.5 Alternativa DMA conam

Zaradi enostavnejšega upravljanja in nadzorovanja delimo VS v manjše zaključene enote, ki jih izoliramo od preostalega dela omrežja. Vendar pa se z delitvijo VS na manjše enote ne strinja vsa tehnična stroka. Zato bomo v tem poglavju obravnavali druge alternative, ki prinašajo podobne koristi kot uvedba DMA con. Z razvojem tehnologij na področju vodovoda so se pojavile nove možnosti, ki se lahko uporabijo za zmanjševanje vodnih izgub.

### 2.5.1 Koleratorji šuma

S pomočjo koleracije šuma se lahko ugotovi lokacijo loma ali puščanja cevi (Farley, 2010). Omenjena tehnologija se je zelo hitro razvila in postala zelo pogosto uporabljana.

Na VS se namesti več senzorjev, ki zbirajo in analizirajo podatke na podlagi akustičnih šumov (Farley, 2010). Šume, ki bi lahko bili povezani s puščanjem vode, se preveri na terenu in po potrebi sanira okvaro. Na podlagi statističnih analiz so na realnem primeru uspeli 90 % okvar določiti lokacijo okvare na 2,5 metra natančno. Ostalih 10 % okvar je imelo preveliko napako za ustrezno določanje lokacije okvare. Je pa trenutno namestitvev koleratorjev še vedno sorazmeroma draga za stalno uporabo po celotnem VS.

### 2.5.2 Monitoring parametrov VS

Tehnologija omogoča spremljanje več parametrov, kot so npr. tlak, pretok in šum. Na podlagi teh treh parametrov se lahko določi lokacijo puščanja vode po celotnem sistemu brez kakršnekoli delitve omrežja ali ustvarjanja drugih manjših enot v omrežju.

Zaradi raznovrstne porabe preko dneva se analizira podatke med 3. in 4. uro zjutraj, ko je poraba v času 24 ur najmanjša. V tem času je namreč minimalni nočni pretok (Slika 3). Glede na referenčno stanje se vsakič znova primerja trenutno stanje in ugotavlja možna odstopanja od referenčnih razmer. Izgube so prisotne, če je zaznaven upad tlaka, povečanje pretoka in šuma.

### 2.5.3 Uporaba spletnih modelov za detekcijo vodnih izgub

Že kar nekaj časa obstaja želja po modelih za napovedovanje in ugotavljanje vodnih izgub. Eno izmed takšnih orodij je Burstfinder, ki ga je razvilo podjetje GL (Farley, 2010). Kot vhodni podatek se potrebuje hidravlični model VS. Potem se izvede hidravlična simulacija za določitev tlačnih razmer po celotnem sistemu. Orodje izvede optimizacijo na podlagi izračunanih tlakov in prikaže potencialna mesta za okvare v omrežju. Orodje je učinkovito za vse materiale cevi in omogoča identifikacijo nelegalnih odvzemov vode. Podobno orodje je razvilo tudi podjetje Bently Systems (Farley, 2010).

### 2.6 Sistem SCADA pri nadzoru in upravljanju VS

VS predstavlja strukturo z velikim številom elementov oziroma gradnikov, ki opravljajo specifične funkcije z namenom distribucije pitne vode od vodnega vira do končnih porabnikov. Med te elemente prištevamo cevovode, vodohrane, vodne vire, regulacijske in zaporne ventile, črpalke, zračnike, blatnike, hidrante, jaške,... Zaradi kompleksnosti delovanja je enostavneje spremljati in upravljati delovanje VS s pomočjo centralnega nadzornega centra.

Upravljalca VS lahko na enostaven način vodi in dostopa do podatkov o VS preko sistema SCADA (angl. Supervisory Control and Data Acquisition). Pridobljeni podatki se uporabijo za analizo namenjeno odpravljanju okvar ali izboljšanju obratovanja VS. Nadzorovanje in upravljanje gradnikov VS poteka daljinsko. V nadzornem centru se shranjujejo podatki o delovanju VS na podatkovni strežnik, kjer se podatki shranjujejo za daljše časovno obdobje.

Pri izvajanju monitoringa se lahko v nekem trenutku na strežnik shrani vrednost meritve, ki v večji meri odstopa od povprečnega stanja. V takšnih primerih se lahko v sistemu SCADA dodatno namesti alarme, ki uporabnika nemudoma obvestijo o teh odstopanjih. S tem se lahko hitreje preveri stanje na terenu in ugotovi možen vzrok odstopanja.

Pri analiziranju realnega VS namenjeno kalibraciji hidravličnega modela je potrebno izbrati časovno obdobje, ki v najmanjši meri odstopa od povprečnih razmer. S pomočjo sistema SCADA je uporabniku mogoča izbira in procesiranje podatkov izbranega intervala hitro in enostavno. Poleg tega so množice shranjenih podatkov organizirane in predstavljene na način, da so uporabne za upravljalca VS. Zaradi tega so podatki večkrat prikazani v grafični obliki.

Poznamo več možnih tipov izhodnih podatkov sistema SCADA (Walski et al., 2003):

- analogni podatki,
- digitalni podatki,
- impulzni podatki,
- statusi.

V skupino analogni podatki spadajo vsa števila opredeljena s ciframi. V omenjeno skupino spadajo tudi decimalna števila. V drugo skupino spadajo podatki, ki z binarnim načinom zapisa opredeljujejo stanje nekega elementa. To je lahko npr. vrednost 0 za zaprt oziroma vrednost 1 za odprt ventil. K impulznim podatkom spadajo podatki pridobljeni z vodomernimi urami. Lahko se zbirajo na lokaciji merilnega instrumenta ali nadzornega centra. Pri statusih gre za sposobnost identifikacije sistema SCADA možnih neveljavnih analognih podatkov. Razmere je potrebno preveriti še na terenu (Walski et al., 2003).

### 2.6.1 Integracija sistema SCADA in hidravličnega modela VS

Sistem SCADA shranjuje podatke o meritvah hidravličnih veličin, kot sta npr. tlak in pretok na različnih lokacijah za primer realnega VS. Zbrane podatke potem uporabi kot robne pogoje v hidravličnem modelu VS. Izdelovalec modela se mora odločiti, katere podatke bo uporabil kot robne pogoje in katere bo uporabil za preverjanje ustreznosti hidravličnega modela. Po izbiri in vstavitvi robnih pogojev se izvede hidravlična simulacija modela VS. Potem primerja rezultate hidravličnega modela in preostalih meritev namenjenih za preverjanje ustreznosti modela. V primeru odstopanj rezultatov hidravličnega modela in meritev se izvede še kalibracija modela.

### 2.6.2 Napake

Pri sistemu SCADA lahko prihaja do napak (Walski et al., 2003; Bailey in Wright, 2003). Možen vzrok napake nastane pri zgoščevanju podatkov. Ker gre namreč za veliko količino podatkov, jih je potrebno zgostiti (angl. compress), da zmanjšamo shranjevalni prostor. Te napake se pojavljajo pri analogni obliki podatkov. Zato mora uporabnik sistema SCADA ustrezno oceniti smiselnost zbranih podatkov. Druge napake so začasne. RTU (angl. Remote Terminal Unit) je vmesni člen namenjen prenosu in pretvorbi podatkov od merilnega instrumenta do strežnika nadzornega centra. Napaka se lahko zgodi pri prenosu teh podatkov v spomin strežnika nadzornega centra. V nadzornem centru se izpisujejo vrednosti, ki še niso bile posodobljene in se potem zaradi tega ponavljajo konstantne vrednosti, ker v naslednjem časovnem koraku vzame predhodno vrednost. Ta pojav se imenuje »backfill« mehanizem. Če je programska oprema kompatibilna s tem mehanizmom, potem se ti podatki ne izgubijo. Namen grafičnega prikaza podatkov je tudi v preverjanju podatkov. Napake je enostavneje odkriti v grafični obliki kot pa v stolpcu neke tabele.

Poseben primer se zgodi pri izpadu električne energije ali pri komunikacijskih okvarah med RTU in nadzornim centrom. V tem primeru ni več mogočega dostopa do podatkov in zato veljajo za manjkajoče podatke. Edino kar se lahko stori, je natančna določitev obdobja manjkajočih podatkov. Običajno so v sistemu SCADA tovrstni podatki označeni s posebnimi statusi, kot so npr. rdeče zastavice (angl. red flags). Značilnost za manjkajoče podatke so horizontalne linije pri grafikonih. Vrednosti so v tem primeru konstantne in različne od vrednosti 0. Sistem SCADA je namreč programiran po principu, da se zadnja vrednost ponavlja v naslednjih časovnih korakih, če pri tem ni bilo zabeležene nove vrednosti. Lahko pa so vrednosti tudi enake vrednosti 0, če je bila zadnja izmerjena vrednost enaka 0.

Poznane so še napake povezane z merilnimi instrumenti. Napake se pojavljajo zaradi nenatančnosti merilnih naprav. Te se zgodijo zaradi neumerjenosti merilnih naprav. Običajno je takšne napake težje odkriti. Lahko pa se preveri ustreznost podatkov s pomočjo neke druge merilne naprave, ki je po lokaciji blizu obravnavane merilne naprave. Potem se lahko preveri ustreznost rezultatov obravnavane merilne naprave.

Merilne naprave so primerne za določene intervale vrednosti. Problematične so vrednosti, ki se ne nahajajo znotraj tega intervala. Torej gre za neke ekstremne maksimalne oziroma minimalne vrednosti. Na grafikonih se to lahko opazi kot točkovne ekstreme ali platoje (Walski et al., 2003).

### 2.6.3 Odziv na napake

Uporabnik sistema SCADA v primeru identifikacije napake primerja nek drug časovni interval, ko še ni prišlo do napake. Možne vzroke napake lahko odkrije po značilnostih posameznih napak, kakor je to opisano v prejšnjem podpoglavju. Poleg tega se lahko uporabnik o možnih vzrokih napak posvetuje z operatorji sistema SCADA. Če ima uporabnik na razpolago ustrezno umerjen hidravlični model, si lahko pomaga tudi z njim. V vsakem primeru pa je pomembno, da se napake čim prej odpravijo, da se s tem lahko v prihodnosti omogoči nemoteno izvajanje obratovanja (Walski et al., 2003).

### 2.7 Zaporni elementi namenjeni izolaciji merilnih območij

Armature spadajo k elementom VS in opravljajo različne naloge glede na vrsto elementa. Armature so lahko ventili, lopute ali zasuni. Po uporabi armature delimo na (Steinman in Kozelj, 2014):

- zaporne,
- regulacijske,
- protipovratne,
- zračne,
- plovne,
- hidrante.

Od zgoraj omenjenih so za vzpostavitev in delovanje DMA con potrebne armature za zapiranje vode in regulacijske armature. Najbolj pomembne so zaporne armature. Z njihovo namestitvijo na cevi se lahko izolira DMA cona od preostalega dela omrežja. Potrebno je še preveriti, da so armature resnično zaprte in ne omogočajo pretoka vode v DMA cono ali iz nje. Nekatere armature so že vgrajene v VS in je potrebno samo spremeniti njihovo stanje na zaprto. Kjer pa armatur še ni nameščenih, je to potrebno storiti, da se lahko prepreči pretok vode. Za zapiranje vode se lahko uporablja zaporne zasune, lopute ali ventile.



Slika 5: Zaporni ventil (Aniton, 2016)



Velikokrat se zaradi učinkovitejšega obratovanja VS v DMA conah regulira vstopni tlak. Vstopni tlak se regulira na točki vtoka v DMA cono, kjer se izvajajo tudi meritve hidravličnih veličin. DMA cone se formira ravno zaradi večjih dejanskih vodnih izgub in se lahko zmanjša vstopni tlak ter s tem tudi iztekanje vode iz odprtih poškodovanih cevi. Takšna območja in upravljanje sistema se imenujejo PMA. Vendar pa mora pri tem upravljalec paziti, da vsakemu prebivalcu v DMA coni še vedno zagotavlja ustrezno visoke tlačne razmere za normalno uporabo vode. Zato se mora upravljalec seznaniti s točko uporabnika z najnižjim tlakom in glede na to točko pazljivo regulirati vstopni tlak DMA cone (Steinman in Kozelj, 2014).



Slika 6: Regulacijski ventil (ESI.info, 2016)

Če predpostavimo, da se DMA cona nahaja na ravnini (vse točke na enaki višini), potem bi imela točka, kjer vteka voda, najvišji tlak. Preostale točke cone, bi imele nižji tlak zaradi pojava linijskih energijskih izgub ob toku tekočine. To velja, če v DMA coni ni nobenih elementov, ki bi povečevale tlak (npr. črpalke).



Slika 7: Notranjost merilnega jaška (Komunala Kranj, 2016)

## 2.8 Testiranje merilnega območja

Preden bi se v VS vzpostavilo delovanje DMA con, naj bi se vsaka cona posebej preverila z ničelnim tlačnim testom (angl. zero pressure test) (Morrison et al., 2007). Testiranje je pomembno z vidika zagotavljanja pravilnega delovanja DMA cone. Ravno na podlagi tega testa se posledično ugotovi pravilnost delovanja zapornih ventilov in možnost identifikacije neznane odprte cevi.

Test poteka tako, da se zapre vodne vire in ponore, ki so povezani s cono. V tem primeru bi se morala vrednost tlaka znižati na vrednost 0 ali vsaj približati vrednosti 0. Iz tega pojava tudi izvira ime ničelni tlačni test.

Koraki ničelnega tlačnega testa so naslednji:

- označitev ventilov, ki mejijo na druge DMA cone,
- priprava testa za izvajanje med 01:00-05:00 uro,
- seznanjanje zaposlenih o izvajanju testa,
- obveščanje porabnikov o zapiranju vode,
- namestitev loggerjev za meritev tlaka znotraj cone,
- zapiranje dotokov v cono,
- analiziranje merjenih vrednosti tlaka.

S testom preverimo, ali so se vrednosti tlaka resnično znižale na vrednost 0, to je, ali so ventili resnično zaprti. Če se v desetih minutah vrednost tlaka bistveno ne spremeni, obstaja zelo velika verjetnost, da je vsaj ena cev še vedno odprta. Do tega lahko pride zaradi slabih evidenc o VS, predvsem zaradi naknadnih sprememb sistema, ki niso bile evidentirane. Če se tlak v desetih minutah ne spremeni, je potrebno ponovno preveriti vse zaporne ventile in po potrebi zagotoviti dodaten večji iztok vode preko hidranta. S tem naj bi se vrednost tlaka približala vrednosti 0. Če se vrednost tlaka še vedno ne spremeni, potem skoraj zagotovo obstaja še neka odprta cev. V tem primeru je potrebno ugotoviti, katera cev je še vedno odprta in cono napaja z vodo. Ko je test uspešen, se lahko nazaj vzpostavi prvotno stanje in začne z normalnim obratovanjem in monitoringom.

## 2.9 Kategorizacija DMA con

Pri zasnovi DMA con na terenu se preveri, ali se vrednosti posameznih hidravličnih veličin gibljejo v dovoljenih mejah. Preveriti je potrebno stanje z dinamično simulacijo, kjer se spremlja hidravlične veličine v izbranem obratovalnem ciklusu. Najboljši način je preverjanje ustreznosti hidravličnega modela z meritvami realnega VS. Potem se z izdelano projektno dokumentacijo, ki opisuje spremembe VO, izvede dela na terenu za zasnovo DMA con. Ko se vzpostavi novo stanje, je potrebno s stalnim monitoringom preverjati razmere v vseh DMA conah. Pri tem se s spremljanjem nočnih tlakov in pretokov ugotavlja novo nastale izgube.

Po daljšem časovnem obdobju se lahko ugotovi in določi posamezno kategorijo DMA cone. Na podlagi te kategorizacije se upošteva, katere DMA cone se prioriteto obravnava z namenom izboljšanja stanja razmer v VS (Preglednica 1).

Kategorija A opisuje razmere, ko je v DMA coni veliko število lomov cevi in po izračunu vodne bilance velik delež vodnih izgub. Ukrepanje v tem primeru je nujno, če želimo, da se izboljšajo trenutne razmere. Kategorija B opisuje razmere, ko je v DMA coni velik delež vodnih izgub, lomov cevi pa je načeloma malo. V tem primeru gre za obstoječe izgube in jih je potrebno najti z npr. začasnimi meritvami in jih na terenu identificirati ter sanirati. Kategorija C opisuje razmere, ko je nizka stopnja vodnih izgub in nizka stopnja lomov cevi, pri tem pa ni opaženega

trenda naraščanja obeh prej omenjenih pojavov. V tem primeru se mora nadaljnje opazovati in evidentirati nočne pretoke in ugotoviti, kaj se resnično dogaja s cono. Kategorija D pa opisuje DMA cone, ki dosegajo najvišjo raven oskrbe s pitno vodo glede stanja vodnih izgub in lomov cevi (Kölbl, 2014).

Preglednica 1: Kategorizacija DMA con (Kölbl, 2014)

<b>KATEGORIJA A</b>	<b>KATEGORIJA B</b>
<b>OPIS RAZMER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka stopnja lomov cevi</li> <li>• Visoka stopnja vodnih izgub</li> <li>• Naraščajoč trend v lomih cevi in vodnih izgubah</li> <li>• Sanacija lomov ne zmanjšuje vodnih izgub</li> </ul>	<b>OPIS RAZMER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka stopnja ali naraščajoče vodne izgube</li> <li>• Majhno število lomov cevi</li> </ul>
<b>UKREP</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Povečana rehabilitacija sistema</li> </ul>	<b>UKREP</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Povečana stopnja monitoringa in iskanja izgub na terenu</li> <li>• Iskanje podatkov o stanju bolj ogroženih delov omrežja</li> </ul>
<b>KATEGORIJA C</b>	<b>KATEGORIJA D</b>
<b>OPIS RAZMER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nizka stopnja lomov cevi</li> <li>• Nizka stopnja vodnih izgub</li> <li>• Ni zaznanega trenda naraščanja v lomih cevi in vodnih izgubah</li> </ul>	<b>OPIS RAZMER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uravnovešena stopnja lomov cevi</li> <li>• Uravnovešena stopnja vodnih izgub</li> </ul>
<b>UKREP</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nadaljnje opazovanje nočnih pretokov</li> </ul>	<b>UKREP</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nadaljevanje obratovanja in managementa z enako strategijo</li> </ul>

## 2.10 Osnovni pojmi in enačbe hidravlike

V tem podpoglavju so opisani osnovni pojmi in enačbe, ki se nanašajo na hidravlični izračun. Hidravlični model VS je model, ki simulira hidravlične višine vozlišč in pretoke vode v ceveh pri definiranih robnih pogojih vodohranov in vodnih virov ter definirani porabi odjemnih mest preko daljšega časovnega trajanja. Preko časovnih korakov so definirani robni pogoji lahko spremenljivi in so natančno določeni (pretok iz vodnega vira in poraba na odjemnih mestih), medtem ko so pri drugih omejeni na nek določen interval (npr. nivoji gladin v vodohranu). Za izračun hidravlične višine v vozliščih in pretoka vode v ceveh se uporabi iteracijska metoda reševanja nelinearnih enačb, tj. hidravlično uravnoteženje (angl. hydraulically balancing) (Rossman, 2000).

Enačba o ohranitvi mase pove, da je masa vode, ki vteka v cev in izteka iz nje, enaka minus porabe vode na tem odseku. Pri tem se upošteva, da ni nobenih dodatno priključenih cevi ali lomov cevi, ki bi omogočali iztok vode. Zapišemo jo na naslednji način (Walski et al., 2003):

$$\sum_{i=1}^{n_i} Q_i - U = 0 \quad (1)$$

$\sum_{i=1}^{n_i} Q_i$  = vsota količine vode, ki pride v vozlišče

$U$  = količina vode, ki se porabi v vozlišču

$n_i$  = število cevi, ki se stika v vozlišču

Druga enačba, ki je uporabljena pri preračunu hidravličnih razmer, je energijska enačba in nam podaja zvezo med nivojem energije med dvema prerezoma. Pri realni tekočini se zaradi trenjskih in lokalnih izgub pojavlja razlika v nivoju energije na začetku in koncu cevovodnega odseka. Nepovračljivi del energije se pojavlja v smeri vodnega toka. Na desnem delu enačbe sta člena o energijskih izgubah, ki predstavljata nepovračljivi del energije. Pri hidravlično dolgih cevovodih se upošteva samo linijske energijske izgube, lokalne se zanemari (Steinman, 2010). Energijska enačba se glasi (Walski et al., 2003):

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum_{p=1}^{n_p} h_p = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum_{L=1}^{n_L} h_L + \sum_{m=1}^{n_m} h_m \quad (2)$$

$z$  = višina

$P$  = tlak

$V$  = hitrost vode

$\gamma$  = gostota vode

$g$  = gravitacijski pospešek

$h_p$  = višina črpanja

$h_L$  = linijske energijske izgube

$h_m$  = lokalne energijske izgube

$n_p$  = število obratujočih črpalk med izbranimi točkama

$n_L$  = število cevi med izbranimi točkama

$n_m$  = število lokalnih energijskih izgub med izbranimi točkama

Linijske energijske izgube so v hidravličnem modelu izračunane po Darcy-Weissbachu (Walski et al., 2003):

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g} = \frac{8fLQ^2}{gD^5\pi^2} \quad (3)$$

$h_L$  = linijska energijska izguba

$f$  = Darcy-Weissbachov koeficient trenja

$g$  = gravitacijski pospešek

$L$  = dolžina cevi

$D$  = premer cevi

$V$  = povprečna hitrost vode

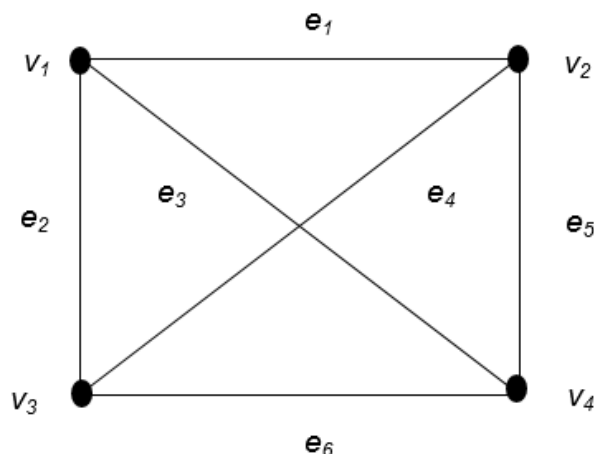
$Q$  = pretok vode

### 3 TEORIJA GRAFOV

V tem poglavju se bomo srečali z osnovnimi pojmi iz matematičnega področja, imenovanega teorija grafov. Spoznali se bomo samo s tistimi pojmi, ki jih bomo potrebovali v magistrski nalogi. Predstavljeni so algoritmi iz teorije grafov, ki bi jih bilo mogoče uporabiti za zasnovno merilnih območij v VS. Pri tem je obrazloženo, v kakšnem smislu bi jih bilo možno uporabiti za zasnovno DMA con. Osnovne definicije iz teorije grafov so povzete po knjigi Uvod v teorijo grafov (Wilson, 1997), razen če je v besedilu navedeno drugače.

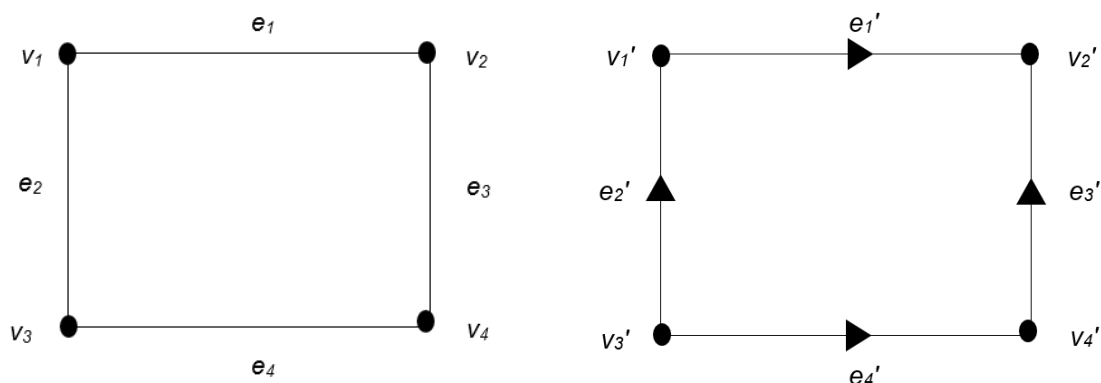
#### 3.1 Pojem grafa

Osnovna definicija grafa pove, da **graf** sestavlja neprazna množica elementov, ki jih imenujemo **točke**, in množica parov točk, ki jih imenujemo **povezave**. Graf  $G = (V, E)$  je definiran s pomočjo točk  $v \in V$  in povezav  $e \equiv uv \in E$ . Točke imenujemo tudi objekti, povezave pa relacije.



Slika 8: Graf je definiran s 4 točkami  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$  in 6 povezavami  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$

Graf je lahko usmerjen ali neusmerjen. **Usmerjen** graf sestavlja množica točk in urejenih parov med točkami ter je zaradi lastnosti urejenosti usmerjen. Usmerjen graf se imenuje tudi **digraf** in se ponazori s puščico na povezavi. Pri **neusmerjenem** grafu so povezave neurejeni pari točk.

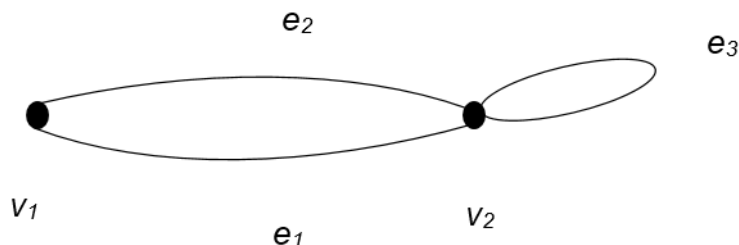


Slika 9: Neusmerjen (levo) in usmerjen graf (desno)

**Sprehod** dolžine  $k$  v grafu  $G$  je zaporedje  $k$  povezav (ne nujno različnih) grafa  $G$  oblike  $uv, vw, wx, \dots, yz$ . Tak sprehod označimo kot zaporedje točk  $uvw\dots yz$  in ga imenujemo sprehod med točkama  $u$  in  $z$  oziroma  $u$ - $z$  sprehod. Sprehod je kombinacija točk, kjer potujemo od ene točke do druge preko povezav. Pri vsakem sprehodu sta definirani dve točki: začetek in konec. Začetek in konec sta točki, iz katere začnemo oziroma končamo sprehod. Če točki nista sosednji, moramo obiskati več točk, da pridemo iz definiranega začetka do željenega cilja. Pri sprehodu se povezave lahko ponovijo.

Če so vse povezave sprehoda med sabo različne, potem ga imenujemo **enostavni sprehod**. Če so v enostavnem sprehodu vse točke med seboj različne, potem sprehod imenujemo **pot**. **Obhod** je sprehod, v katerem je začetna točka tudi končna točka. Če so pri obhodu vse točke različne, se imenuje **cikel**.

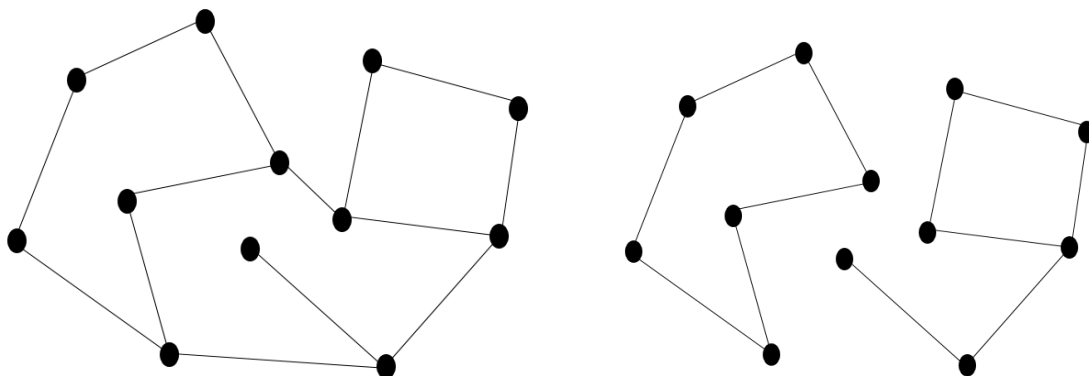
Poznamo več vrst povezav med točkami. Če je začetna točka hkrati končna točka povezave, se tovrstna povezava imenuje **zanka**. **Večkratna povezava** je povezava, kjer sta dve točki povezani z vsaj dvema povezavama.



Slika 10: Primer večkratne povezave ( $e_1$  ali  $e_2$ ) in zanke ( $e_3$ )

Poglejmo si primere na Sliki 8. Denimo, da želimo priti iz točke  $v_1$  v točko  $v_4$ . Tak sprehod bi bil lahko npr.  $v_1v_2v_3v_1v_2v_4$ . Pri tem primeru se nam je ponovila povezava  $v_1v_2 \equiv e_3$ , kar je za sprehod dovoljeno. Primer enostavnega sprehoda bi bil npr.  $v_1v_2v_4$ . Primer obhoda je npr.  $v_1v_2v_4v_3v_2v_1$ , medtem ko je primer cikla npr.  $v_1v_2v_4v_1$ .

Graf je **povezan**, če je vsak par poljubno izbranih točk  $u, v \in V$  povezan z  $u$ - $v$  sprehodom, sicer je graf nepovezan.

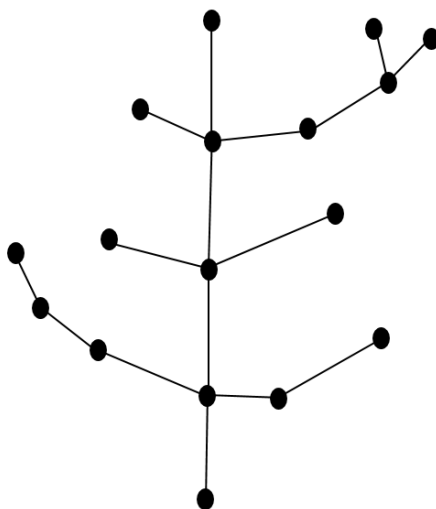


Slika 11: Povezan (levo) in nepovezan graf (desno)

**Stopnja točke**  $v \in V$  je število povezav v izbrani točki in jo označimo z oznako  $d(v)$ . Za vsako točko  $v \in V$  v grafu  $G$  je možno poiskati točko z minimalno oziroma maksimalno stopnjo.

Graf brez zank in večkratnih povezav imenujemo **enostaven graf**. Pomembna oblika pri obravnavanju naše magistrske naloge je graf v obliki drevesa in ga lahko kar enostavno imenujemo **drevo**. **Drevo** je enostaven povezan graf, ki ne vsebuje ciklov v svoji strukturi. Graf iz več dreves skupaj imenujemo **gozd**. Za vsako drevo velja enačba (4), ki nam pove, da je število povezav enako številu vozlišč, kateremu je odštet vrednost 1.

$$|E| = |V| - 1 \quad (4)$$



Slika 12: Primer drevesa

Točki  $u, v \in V$  sta **sosejni**, če je med njima povezava  $uv \in E$ . Neka izbrana točka  $v$  ima lahko več sosednjih točk. Tovrstne točke lahko združimo skupaj v množico točk in jo imenujemo **soseska**.

Pri tem bomo omenili še lemo o rokovanju. Lema o rokovanju je opisana z naslednjo enačbo:

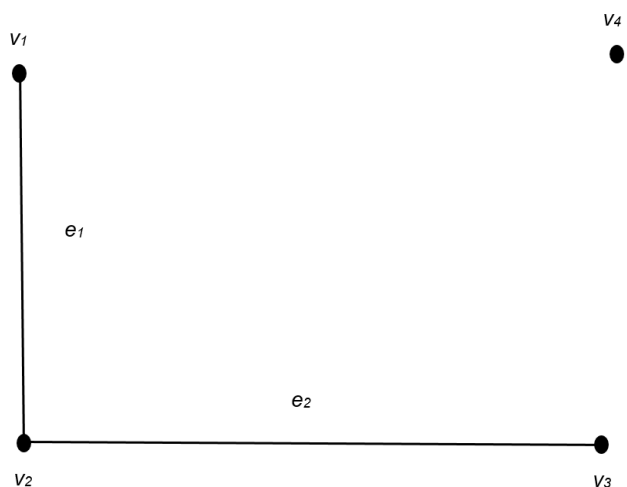
Za vsak graf  $G = (V, E)$  z  $n$  točkami:  $V: \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  velja:

$$\sum_{i=1}^n d(v_i) = 2|E| \quad (5)$$

**Lema o rokovanju** nam pove, da za vsak graf  $G$  velja, da je vsota stopenj vseh točk v grafu enaka dvakratnemu številu povezav  $|E|$ . Dokaz sledi iz dejstva, da ima vsaka povezava dva konca oziroma dve krajišči, ki predstavljata dve točki ter zaradi tega prispeva povezava k vsoti stopenj natanko 2. Podoben je primer rokovanja med ljudmi na zabavi. Za vsako rokovanje sta potrebni dve roki. Iz leme o rokovanju sledi pomembno dejstvo, da je za liho število povezav stopnja soda, saj vedno upoštevamo faktor 2. S pomočjo leme o rokovanju lahko na zelo enostaven način ugotovimo število povezav v grafu. Zato je primerna tudi za analiziranje kompleksnejših grafov. Točka s stopnjo ena se imenuje **list**, medtem ko je točka, ki ima stopnjo enako 0, **izolirana točka**.

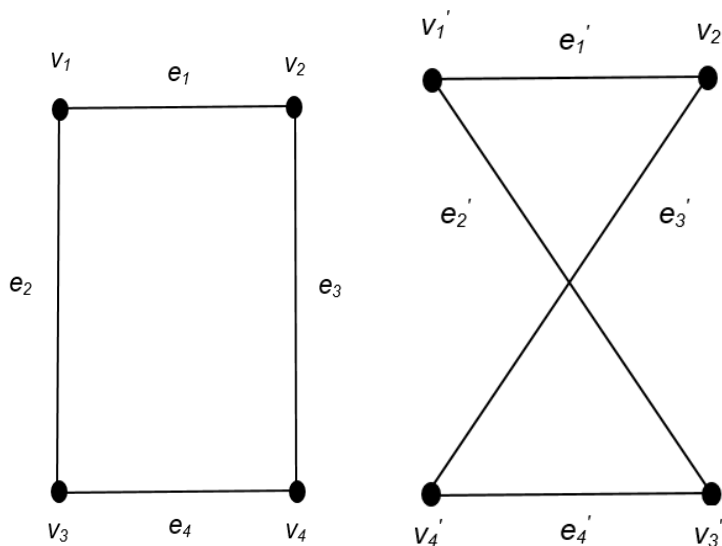


Na Sliki 13 so prikazani primeri, ki so povezani s stopnjo točke. Točka  $v_2$  ima stopnjo  $d(v_2) = 2$ , točki  $v_1$  in hkrati tudi  $v_3$  imata stopnjo  $d(v_1) = d(v_3) = 1$  in se imenujeta lista. Točka  $v_4$ , ki je brez stopnje, se imenuje izolirana točka.



Slika 13: Stopnja točke, list in izolirana točka

Definicija izomorfnosti grafov se glasi: dva grafa  $G_1$  in  $G_2$  sta **izomorfna**, če lahko  $G_2$  dobimo iz  $G_1$  tako, da spremenimo oznake točk – torej, če obstaja povratno enolična preslikava med točkami  $G_1$  in  $G_2$ , tako da sta točki  $u_1, v_1 \in G_1$  sosednji natanko takrat, ko sta pripadajoči točki  $u_2, v_2 \in G_2$  sosednji v  $G_2$ . Primer izomorfnih grafov je na naslednji sliki:



Slika 14: Primer izomorfnosti dveh grafov

Za zapis grafa  $G$  v matrični obliki uporabimo **matriko sosednosti**  $A$ . Grafi so pogosto predstavljeni v grafični obliki, vendar je za uporabo v algoritmih primernejša matrična oblika. Velikost matrike se določi s pomočjo števila točk v grafu. Matrika je kvadratna, kjer  $n$  točk predstavlja  $n \times n$  matriko. Element  $A_{ij}$  v matriki predstavlja povezavo med točkama  $v_i$  in  $v_j$ . Pri elementih matrike  $A$  vrednost 1 predstavlja povezavo med dvema točkama, če pa povezave ni, v matriki stoji vrednost 0. Možno pa je tudi, da nastopijo v matriki še druge vrednosti. Te vrednosti imenujemo **uteži** in lahko ustrezajo utežem bodisi na povezavi bodisi v točki. Za neusmerjene grafe vedno velja, da je matrika simetrična. Matrika sosednosti neusmerjenega neutženega grafa je torej definirana na naslednji način:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1; & v_i \text{ sosednja z } v_j \\ 0; & \text{sicer} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Slika 15: Matrika sosednosti grafa na Sliki 8

Druga vrsta matrike, s katero lahko predstavimo graf, je **incidenčna matrika**. Označimo incidenčno matriko kot matriko  $B$ . Incidenčna matrika običajno ni kvadratna. Incidenčna matrika je reda velikosti  $n \times m$ , kjer  $n$  predstavlja število točk v grafu in  $m$  število povezav. Za neusmerjene in neutružene grafe so možne vrednosti v matriki enake vrednostima 1 ali 0. Vrednost 1 predstavlja, da sta povezava in točka incidentni in obratno 0, da nista. Incidenčnost pomeni, da gre povezava iz oziroma v neko točko. V primeru usmerjenih grafov z vrednostjo -1 označimo, da gre povezava v točko in obratno z vrednostjo 1, da gre iz točke.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Slika 16: Incidenčna matrika grafa na Sliki 8

**Laplaceovo matriko** označimo z oznako  $L$  in je realna ter simetrična matrika reda velikosti  $n \times n$ , kjer vrednost  $n$  predstavlja število točk v grafu (UP FAMNIT, 2016). Diagonalni elementi matrike predstavljajo vrednosti, ki so enake stopnjam posameznih točk v grafu, preostali elementi matrike pa predstavljajo vrednost -1, če obstaja povezava med dvema točkama oziroma vrednost 0, če ni povezave med dvema točkama. Povezavo med dvema točkama v matriki določa lokacija elementa.

Če vpeljemo še matriko  $D$ , ki ima po diagonali vrednosti enake stopnjam točk v grafu in preostale vrednosti v matriki enake 0, potem lahko Laplaceovo matriko dobimo iz matrike sosednosti po naslednji enačbi:

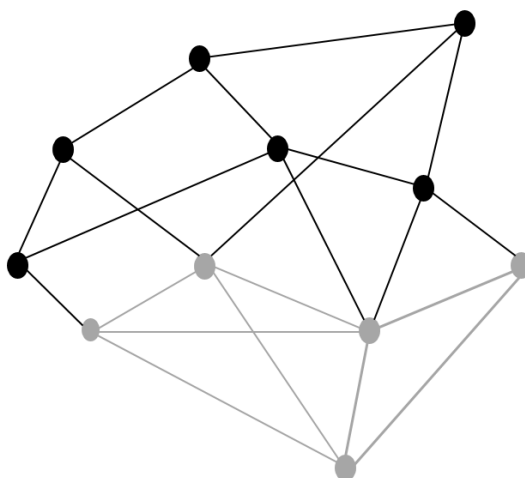
$$L = D - A \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{pmatrix}$$

Slika 17: Laplaceova matrika grafa na Sliki 8

Podana imamo dva grafa  $H = (V(H), E(H))$  in  $G(V(G), E(G))$ . Če velja, da je  $V(H) \subseteq V(G)$  in  $E(H) \subseteq E(G)$ , potem je  $H$  **podgraf** grafa  $G$ . Podgraf  $H$  ima lahko manj točk in manj povezav kot osnovni graf  $G$  in predstavlja del osnovnega grafa. Da je  $H$  podgraf grafa  $G$ , označimo na naslednji način:  $H \subset G$ . Če ima podgraf enako število točk kot osnovni graf  $G$  in je drevo, potem imenujemo podgraf  $H$  **vpeto drevo** (angl. spanning tree). Tovrsten podgraf vsebuje vse točke osnovnega grafa, ni pa nujno, da vsebuje tudi vse povezave osnovnega grafa. Ni pa mogoče,

da bi graf vseboval vse povezave in hkrati ne bi vseboval vseh točk, kajti če vsebuje povezavo, potem mora vsebovati obe krajišči (UC San Diego, Department of Mathematics, 2016).



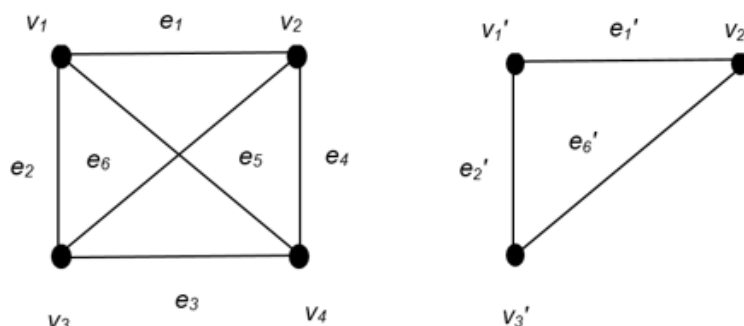
Slika 18: Z različnima barvama sta označena dva podgrafa

Podobno velja zgoraj omenjena zakonitost o vpetem drevesu tudi za **vpjet podgraf**, za katerega veljata naslednji dve enačbi:

$$V(H) = V(G) \tag{8}$$

$$E(H) \subseteq E(G) \tag{9}$$

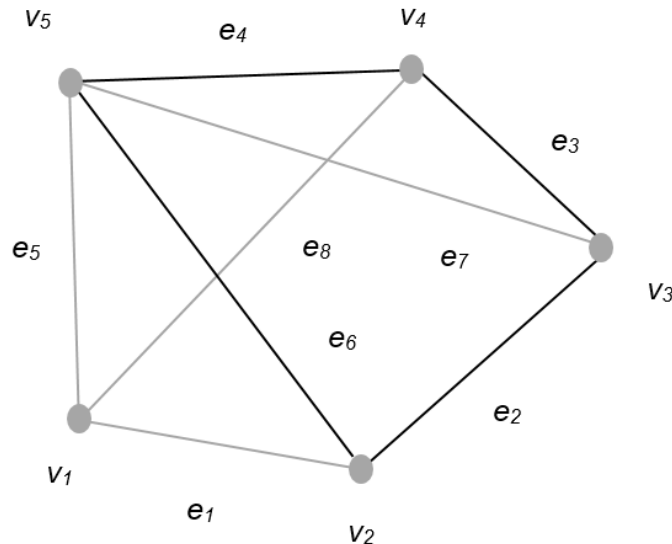
**Inducirani podgraf** je graf za katerega velja, da vsebuje vse povezave osnovnega grafa med danimi točkami.



Slika 19: Primer inducirane podgrafa na desni strani

Denimo, da je po izvajanju nekega algoritma VO razdeljeno na  $k$  DMA con. Število  $k$  je bilo vnaprej določeno kot vhodni podatek algoritma. Med vsako DMA cono je večje število mejnih cevi. Zamislimo si, da imamo  $k$  neodvisnih območij, ki niso med seboj povezana. Sedaj

poskušamo obiskati vsa neodvisna območja z minimalnim številom povezav. Po kratkem razmisleku ugotovimo, da je število teh povezav enako natančno  $k-1$  v vseh primerih. To pa je v bistvu ideja o **minimalnem vpetem drevesu** (Kozak, 1986).



Slika 20: Primer minimalnega vpetega drevesa (označen s sivo barvo)

### 3.2 Uporaba grafov v VS

V splošnem imamo podan nek graf sestavljen iz točk in povezav. Podobna je sestava VS, z izjemo nekaterih specifičnih elementov, kot so črpalke, ventili, zračniki, izpusti, ipd. Torej lahko posplošeno VO obravnavamo kot graf.

Pri VS nimamo opravka z zankami ali večkratnimi povezavami, vendar pa po drugi strani vsebujejo zelo veliko število ciklov. V tej magistrski nalogi bomo uporabljali matriko sosednosti, čeprav bi se prav tako lahko odločili za uporabo incidenčne matrike. Veliko število v literaturi dostopnih funkcij napisanih za uporabo algoritmov iz teorije grafov zahteva zapis v obliki matrike sosednosti.

Točke predstavljajo vozlišča v VO, ki so najštevilčnejši elementi VO. Predstavljajo vozlišča, vključujejo pa tudi druge posebne točkovne elemente, kot so vodohrani in vodni viri, vendar je teh občutno manj. Povezave so linijski elementi in predstavljajo običajno cevi. Linijske elemente predstavljajo tudi posebni elementi, kot so npr. črpalke in ventili. Pri uporabi različnih algoritmov obravnavamo samo dve skupini elementov: linijski in točkovni elementi. Zaradi tega dejstva nam ni potrebno elementov, kot so npr. vodni viri spreminjati v vozlišča. Mi smo se odločili, da ne bomo spreminjali vlog posebnih elementov. Če ne bi želeli upoštevati elementov s posebnimi vlogami, bi jih lahko enostavno odstranili iz strukture grafa. Po končani uporabi algoritma bi jih ponovno vstavili, da bi nemoteno nadaljevali s hidravličnim izračunom.

Pri VS je večji nabor podatkov hidravličnega modela uporabnih za definiranje uteži v strukturi grafa. Po potrebi določimo, katere podatke hidravličnega modela bomo upoštevali kot utež posameznega elementa v grafu. Utež je lahko na povezavi ali v točki. Za algoritem, kot je npr. iskanje najkrajše poti med dvema točkama, uporabimo podatek o pretoku ali premeru cevi kot utež na povezavi.

Če bi imeli vejičasti sistem, bi lahko predvidevali smer vodnega toka glede na porabo vode v vozliščih. Smer toka vode je v tem primeru definirana proti vsaki točki s pozitivno porabo vode. Glede na porabo v točkah je definiran pretok na vodnem viru oziroma vtok v VS. Če glede na robni pogoj tlaka na vodnem viru po energijski enačbi ni mogoče zadostiti pogoju porabe vode, je VS podvržen negativnim tlakom. V primeru mrežasto ali krožno zasnovanega VS pa ne poznamo smeri toka, še posebno v primerih, kjer imajo omrežja zelo veliko število ciklov. Tudi pri dinamični simulaciji je lahko tok dvosmeren. Zaradi tega razloga ne bomo uporabljali digrafov, temveč neusmerjene grafe. Neusmerjene povezave ne moremo direktno uporabiti, lahko pa jo definiramo kot dve usmerjeni povezavi, kar bomo tudi storili. S tem se število povezav v grafu dvakratno poveča.

### 3.3 Algoritmi v teoriji grafov

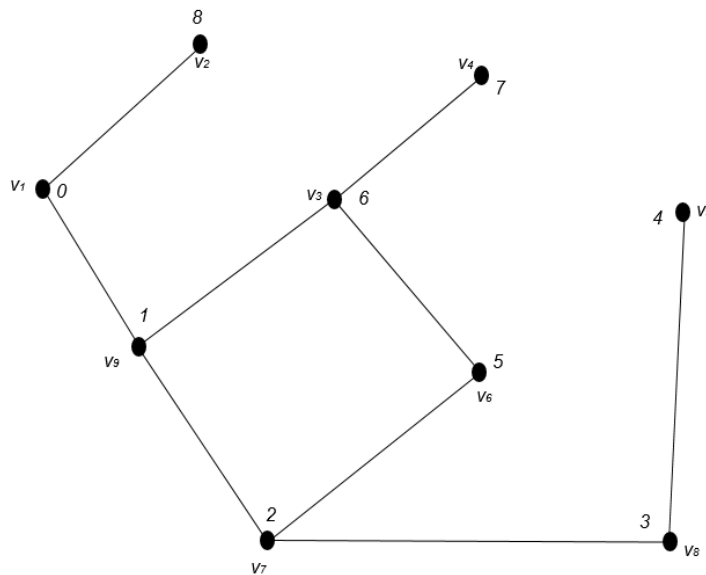
V tem razdelku so predstavljeni algoritmi iz teorije grafov, ki služijo doseganju raznovrstnih ciljev. Algoritme so razvili z namenom lažje obdelave podatkov. Če obravnavamo graf z malim številom povezav in točk, lahko algoritem uporabimo brez uporabe računalniških orodij. Za obravnavanje večjih in zelo kompleksnih grafov z visokimi stopnjami posameznih vozlišč pa postane uporaba računalnikov nujna.

#### 3.3.1 Algoritem iskanja v globino

DFS (angl. Depth First Searching) algoritem je algoritem iskanja v globino in predstavlja enega izmed algoritmov odkrivanja posameznih točk v grafu.

Vzemimo graf  $G$ , ki ga želimo obravnavati (Slika 21). Izberemo si neko začetno oziroma izhodiščno točko in jo označimo z oznako 0. Potem pogledamo v prvem koraku, katere so sosednje točke izbrani točki 0. Pri tem obiščemo eno izmed sosednjih točk. To izbrano točko označimo z oznako 1. Potem raziščemo, katere so sosednje točke točki 1 in zopet obiščemo eno izmed teh sosednjih točk. Vsakič ko obiščemo še neobiskano točko, ji pripišemo novo oznako, kot smo to storili s točkama 0 in 1. Algoritem nadaljujemo, dokler ne obiščemo točke s samo eno stopnjo, imenovano tudi list. Potem se vrnemo po poti nazaj po točkah, ki smo jih do sedaj obiskali proti izhodiščni točki 0. Na tej poti nazaj obiščemo še vse sosednje točke, ki jih do sedaj še nismo obiskali. Potem, ko zopet prispemo do izhodiščne točke 0, obiščemo na enak način še preostale sosednje točke izhodiščnemu vozlišču 0, dokler ne obiščemo vseh vozlišč povezanega grafa  $G$  (Kozak, 1986).

S tem bi lahko z uporabo bisekcije formirali dva podgrafa na osnovnem grafu, če izberemo dve različni točki, iz katerih bi lahko algoritem začeli izvajati. Če bi še vsaki točki ali povezavi pripisali neko utež, ki predstavlja npr. podatek hidravličnega modela, lahko formiramo podgrafe s podobnimi lastnostmi.



Slika 21: S številkami označen vrstni red iskanja v globino v grafu  $G$

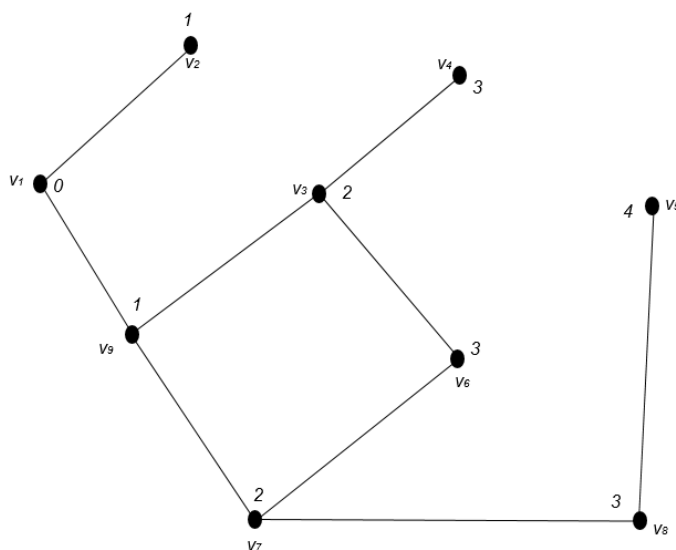
### 3.3.2 Algoritem iskanja v širino

BFS (angl. Breadth First Searching) algoritem se s slovenskim izrazom imenuje algoritem iskanja v širino. Tudi BFS algoritem je podobno kot prej omenjeni DFS algoritem namenjen odkrivanju oziroma obiskovanju točk v grafu, vendar na malo drugačen način. Spremeni se vrstni red obiskovanja (Kozak, 1986).

Vzemimo graf  $G$  z določenim številom točk in povezav (Slika 22). Na začetku izberemo neko vozlišče, ki predstavlja izhodiščno točko. Točka je lahko povsem naključno izbrana. Pri VS bi bil to lahko vodni vir, lahko pa gre za neko naključno izbrano vozlišče. V prvem koraku obiščemo vsa sosednja vozlišča izhodiščnemu vozlišču, ki smo ga izbrali na začetku. V drugem koraku obiščemo vse sosednje točke, ki so sosednje izbranim točkam v prejšnjem koraku s pogojem, da še niso bila predhodno obiskana. Slednji korak ponavljamo, dokler ne pridemo do cilja oziroma dokler ne obiščemo vseh točk.

Z njimi lahko poiščemo in zapišemo vse točke v grafu. Potek algoritma deluje neodvisno od cilja. Ko naredimo nekaj korakov algoritma, se točke delijo na dve glavni skupini: obiskane in neobiskane točke. Obiskana se imenujejo tudi »odprta« in neobiskana »zaprta«. Običajno se sestavi seznam, katere točke so bile obiskane v določenem koraku, da je odkrivanje točk v grafu bolj pregledno oziroma sistematično.

Podobno kot za algoritem iskanja v globino velja tudi za ta algoritem, da se z upoštevanjem uteži na elementih grafa formira grafe s podobnimi lastnostmi.



Slika 22: S številkami označen vrstni red iskanja v širino v grafu  $G$

### 3.3.3 Algoritem za iskanje najkrajše poti

Algoritem za iskanje najkrajše poti se uporablja za identifikacijo najkrajše poti od točke  $s \in V$  do točke  $t \in V$ , ki predstavljata začetek in konec poti v grafu  $G = (V, E)$  (Dijkstra, 1959). Med točkama  $s$  in  $t$  je več vmesnih točk. Da lahko pridemo od začetka do konca poti, moramo obiskati vmesne točke. Pri tem določimo vse možne različne poti med točkama  $s$  in  $t$  ter izberemo tisto, na kateri ima vsota uteži na povezavah posameznih poti minimalno vrednost. Izbrana pot predstavlja najkrajšo razdaljo v grafu. Če povezave v grafu nimajo uteži, potem predstavlja minimalno število povezav posamezne poti najkrajšo pot. Poleg uporabe v VO se algoritem lahko uporablja še pri ugotavljanju kapacitet prometnih povezav in za druge primere povezane s transportom snovi.

Algoritem za iskanje najkrajše poti opredeljuje samo dve točki, mi pa želimo obdelati vse točke. Zato nam ta algoritem ne zadostuje za zasnovo večjega števila podgrafov v osnovnem grafu. Idejo o iskanju najkrajše poti za obravnavanje vseh točk v grafu bomo uporabili v naslednjem podpoglavju.

### 3.3.4 Floyd-Warshallov algoritem

Posebna oblika algoritma najkrajše poti je Floyd-Warshallov algoritem (Algoritmy.net, 2016). Algoritem poišče vsakemu paru točk v grafu najkrajšo pot med njima. Vedno kadar govorimo o minimalni poti, se nanašamo na minimalno vsoto uteži na elementih (v tem primeru točk oziroma povezav) med dvema obravnavanima točkama. Uporaba je mogoča tudi za usmerjene in utežene grafe, ki imajo na točkah ali povezavah negativne ali pozitivne uteži. Lahko pa se negativnim utežem učinkovito izognemo z upoštevanjem negativne vrednosti predznaka uteži, ki ga apliciramo na usmerjenost povezave, tako da nimamo več nobene negativno predznačene uteži. Lahko pa preprosto zanemarimo negativne predznake uteži z uporabo absolutnih vrednosti, če nam rezultati algoritma po tej predpostavki še ustrezajo.

Število elementov na poti med dvema točkama je irelevantno, upošteva se samo minimalna možna vsota uteži na elementih. Večkratne povezave niso upoštene. Rezultat algoritma je v obliki matrike reda velikosti  $n \times n$ , kjer število  $n$  predstavlja število točk v grafu. Posamezne

vrednosti v matriki predstavljajo vsoto vseh uteži, ki so pozicionirane na poti med ustreznima dvema točkama. Prednost Floyd-Warshallovega algoritma je v njegovi preprostosti.

V Floyd-Warshallovem algoritmu obravnavamo matriko, ki predstavlja uteženo matriko sosednosti grafa. V samem poteku algoritma poiščemo vse poti med dvema izbranimi točkama in potem na koncu izberemo tisto, ki predstavlja minimalno vsoto uteži na elementih. Torej ugotovimo, da Floyd-Warshallov algoritem poišče zelo velik nabor poti, ki ga začasno shrani, vendar na koncu ohrani v spominu samo tisto pot, ki predstavlja najkrajšo pot. Torej ima lahko algoritem veliko začasnih rešitev, če ima graf veliko število elementov, kar pa se odraža na časovni zahtevnosti algoritma in shranjevalnem prostoru. Časovna zahtevnost algoritma je  $O(n^3)$ , kjer  $n$  predstavlja število elementov (Kozak, 1986).

To dejstvo bi lahko upoštevali, če bi želeli, da iz vodnega vira priteče voda do preostalih vozlišč z najmanjšo izgubo energije ali z najkrajšim časom potovanja delca vode. S tem je možno ugotoviti, katera vozlišča pripadajo posameznemu viru, iz katerega se neposredno napajajo z vodo. Problem se pojavi, če ima celotni VS samo en vodni vir. Podobno bi algoritem lahko uporabili, če želimo izbrati za uteži nadmorske višine točk. Pri tem lahko formiramo podgrafe, ki imajo podobne nadmorske višine in so si relativno blizu po lokaciji v grafu. Problematična je izbira točk (centroidov), katere primerjamo s preostalimi točkami v grafu. Za generiranje ustreznih rešitev algoritma je smiselno, da so te točke dovolj oddaljene med seboj. Natančnejša diskusija o uporabi Floyd-Warshallovega algoritma je vsebovana v končnem poglavju.

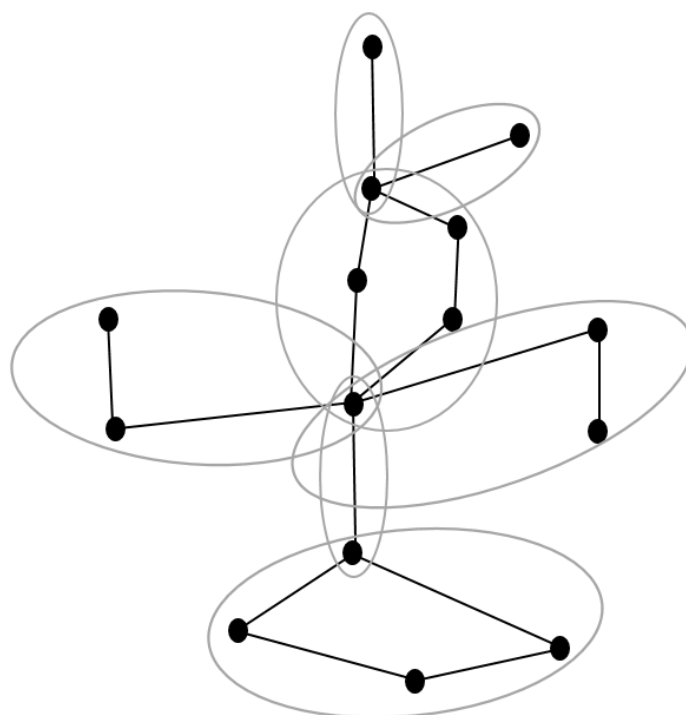
### 3.3.5 Razbitje grafov

Vnaprej se moramo spoznati še z nekaterimi pojmi. **Prerezna točka** je točka v grafu  $G$ , ki predstavlja stičišče dveh ali več povezav in z njeno odstranitvijo postane graf nepovezan. **Blok** v grafu  $G$  (Slika 23) je podgraf  $H$ , ki vsebuje večje število točk in povezav. Blok je lahko drevo ali graf s cikli. Edina možna pot iz enega v drug blok poteka preko prerezne točke. Če posamezne bloke nadomestimo s točkami, potem lahko spremenimo graf  $G$  v obliko drevesa.

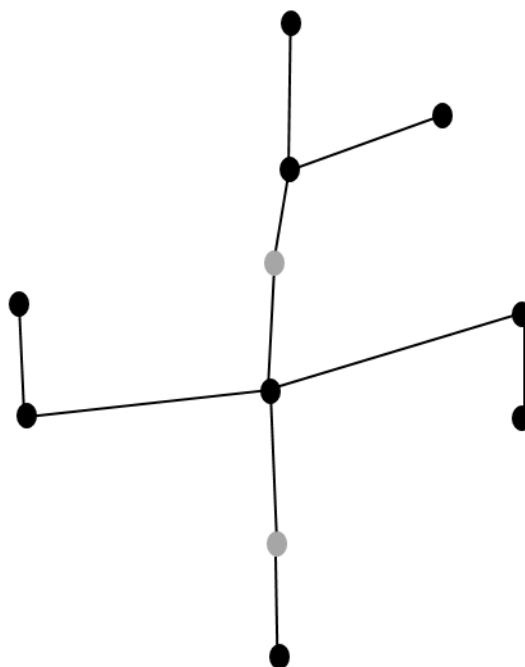
Pri tem se srečamo še s posebnim tipom povezave: most. **Most ali prerezna povezava** je povezava, ki loči dva bloka. Če odstranimo most med dvema blokoma, postane graf nepovezan. Z naslednjo lemo lahko enostavneje odkrijemo mostove: povezava  $e \in E(G)$  je most, če povezava  $e$  ni vključena v noben cikel v grafu  $G$ . Če pa graf ne vsebuje ciklov, je vsaka povezava v grafu most. Torej lahko to lemo uporabimo tudi za grafe, ki vsebujejo veliko ciklov, ki pa jih je v VO precej (Diestel, 2000).

Ideja o razbitju (particiji oziroma dekompoziciji) grafa je na prvi pogled zelo privlačna. VO odstranimo drevesne strukture in ostane samo še omrežje z zelo gosto mrežo. Vendar je ravno zaradi lastnosti gostega omrežja nemogoče identificirati mostove in nam na koncu preostane samo en kompleksen blok.





Slika 23: Bloki v grafu



Slika 24: Drevo z bloki (bloki so označeni s črno, prerezni točki pa s sivo)

### 3.3.6 Spektralno razbitje grafa

Ta algoritem bomo podrobneje pregledali, ker ga bomo kasneje uporabili pri praktičnem delu. Zato je pomembno razumevanje principa delovanja za učinkovito razbitje grafov.

Denimo, da imamo povezan graf  $G = (V, E)$ . Graf  $G$  želimo razdeliti na število  $k$  podgrafov  $V_1, V_2, \dots, V_k$ , ki jih združimo v množico  $P$  (enačba (10)). Število  $k$  je poljubno. Podgrafi  $V_1, V_2, \dots, V_k$  so med seboj disjunktni.

$$P = \{V_1, V_2, \dots, V_k\} \quad (10)$$

Razbitje je takšno, da vsaka točka grafa pripada samo enemu podgrafu. To sledi iz enačbe (11). Pri tem moramo še poudariti, da podobno velja za povezave, kjer večje število povezav pripada samo enemu podgrafu. Te povezave predstavljajo vse povezave med točkami znotraj enega podgraфа. To pomeni, da so podgrafi  $V_i$  inducirani podgrafi v  $G$ . Preostale povezave pa povezujejo dva podgrafa med seboj in jih zaradi dejstva, da krajišči povezave ne pripadata istemu podgrafu, ne moremo pripisati enolično samo enemu podgrafu  $V_i$ .

$$P = V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_k, \quad \text{kjer je } V_i \cap V_j = \emptyset, \quad \text{za } i \neq j \quad (11)$$

Razbitju  $P = \{V_1, V_2, \dots, V_k\}$  priredimo vrednostno funkcijo  $C(P)$ , ki je definirana z naslednjo enačbo:

$$C(P) := \sum_{i \neq j} \sum_{\substack{vv' \in E, \\ v \in V_i, v' \in V_j}} c_{vv'} \quad (12)$$

Funkcija  $C(P)$  sešteje uteži  $c_{vv'}$  na povezavah  $vv'$  med različnimi podgrafi. Naš cilj je poiskati takšno razbitje  $P$ , pri katerem je vrednost  $C(P)$  čim manjša. Pri tem moramo upoštevati, da so vse uteži na povezavah pozitivne. Za povezave, ki v grafu ne obstajajo, je vrednost uteži enaka 0. Če je vrednost uteži na povezavi enaka 0, se ne razlikuje od povezave, ki ne obstaja v grafu. Zato je takšnim povezavam potrebno dodeliti neko zanemarljivo neničelno vrednost.

Naslednji pogoj, ki ga particija zahteva, je maksimalno dovoljeno število točk v posameznem podgrafu. Število točk označimo z oznako  $l$  in predstavlja celo število. Število  $l$  je izračunano po enačbi (13). Pri tem število  $n$  predstavlja število vseh vozlišč v grafu  $G$  in  $k$  število podgrafov.

$$l = \lceil n/k \rceil \quad (13)$$

S tem zagotovimo, da posamezni zasnovani podgrafi niso preveliki in so vsi podgrafi približno enake velikosti glede števila točk. S tem sta definirana dva pogoja, ki jim algoritem skuša zadostiti:

- minimalna vrednostna funkcija  $C(P)$ ,
- maksimalno dovoljeno število točk v podgrafu  $l$ .

Če algoritem ne more zadostiti tema dvema pogojema, vsaj stremi k tema dvema ciljema in poišče rešitev, ki se jima najbolj približa.

Algoritem potrebuje za izvajanje 3 vhodne podatke:

- matriko sosednosti  $A$ ,
- število podgrafov  $k$ ,
- število ponavljanj  $r$ .

Algoritem poda po končanem izvajanju samo eno rešitev.

Algoritem je mogoče uporabiti na primeru omrežja VS. Matrika sosednosti  $A$  je nespremenljiv vhodni podatek, ki je definiran s topologijo VO. Število podgrafov  $k$  je spremenljiv vhodni podatek, ki potem v končni fazi predstavlja DMA cone. Število ponavljanj je odvisno od števila DMA con. Večje kot je željeno število DMA con, več ponavljanj je potrebno (torej je  $r$  večji), da algoritem poišče enolično končno rešitev.

Pri poljubnem razbitju lahko številu podgrafov  $k$  priredimo matriko  $M$ , ki je reda velikosti  $n \times k$ , kjer  $n$  predstavlja število točk v grafu in  $k$  število podgrafov. Matriko  $M := (M_{ij})$  bomo poimenovali **matrika  $k$ -razbitja** in je definirana kot:

$$M_{ij} = \begin{cases} 1; & v_i \in V_j \\ 0; & \text{sicer} \end{cases} \quad \text{za } \forall v_i \in V, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

Obratno velja, da vsaka matrika  $k$ -razbitja  $M$  poda neko  $k$ -razbitje.

Za matriko  $k$ -razbitja  $M$  veljajo naslednje lastnosti:

- V vsaki vrstici matrike  $M$  je samo en element enak vrednosti 1, preostali elementi so enaki 0 (to pomeni, da vsaka točka lahko pripada samo enemu podgrafu).
- Po stolpcih matrike  $k$ -razbitja  $M$  je vsota vedno enaka številu točk v posameznem podgrafu.
- Produkt matrike  $k$ -razbitja  $M$  in njene transponirane matrike je enotska matrika  $I$ , ki je reda velikosti  $n \times n$  (to pomeni, da je matrika  $M$  ortogonalna):

$$M * M^T = I \quad (15)$$

- Produkt transponirane matrike  $k$ -razbitja  $M$  in matrike  $k$ -razbitja  $M$  je diagonalna matrika, ki ima po diagonali število točk v posameznem podgrafu:

$$M^T * M = \text{diag}(|V_1|, |V_2|, \dots, |V_k|) \quad (16)$$

- Frobeniusova norma matrike  $k$ -razbitja  $M$  je enaka vrednosti kvadratnega korena vrednosti  $n$  (sl označuje sled matrike):

$$\|M\|_F = \sqrt{\text{sl}(M^T * M)} = \sqrt{n} \quad (17)$$

Iz teh lastnosti lahko potem ugotovimo, da je vrednostna funkcija  $C(P)$  povezana z vrednostjo:  $\text{sl}(M^T * M)$ . Torej, če želimo, da je vrednost funkcije  $C(P)$  čim manjša, mora biti sled produkta matrik  $M^T * M$  čim večja, kot pove enačba:

$$C(P) = \mathbf{1}_n^T * A * \mathbf{1}_n - \text{sl}(M^T * A * M) \quad (18)$$

Oznaka  $\mathbf{1}_n$  označuje vektor, ki ima vse koordinate enake 1. Torej je naš cilj poiskati ustrezno matriko  $M$ , da bo vrednost  $\text{sl}(M^T * A * M)$  maksimalna. Dokaz te formule je naveden v članku (Hespanha, 2004).

Pri izračunu si pomagamo s spektralnimi lastnostmi matrike  $A$ . Zato iz matrike sosednosti  $A$  izračunamo  $k$  največjih lastnih vrednosti  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  in njim pripadajoče ortonormirane lastne vektorje  $u_1, u_2, \dots, u_k$ . Lastne vrednosti zapišemo po diagonali v diagonalno matriko  $D$  in lastne vektorje po stolpcih v ortogonalno matriko  $U$ .

$$D := \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k] \quad (19)$$

$$U := [u_1, u_2, \dots, u_k] \quad (20)$$

Pri vsaki particiji potrebujemo samo  $k$  največjih lastnih vrednosti matrike sosednosti  $A$ , tako da se velikosti matrik  $D$  in  $U$  spreminjata s številom  $k$ .

Tako vedno velja, da je:

$$A * U = U * D \quad (21)$$

Matriko sosednosti  $A$  normaliziramo, da postane dvojno stohastična. Vse lastne vrednosti take matrike so realne. Maksimalna lastna vrednost je enaka 1, vse preostale so manjše od nje. Od tod sledi, da bo:

$$\text{sl}(M^T * A * M) \leq n \quad (22)$$

Sedaj poiščimo še matriko  $Z$ , za katero velja:

$$M := U * Z \quad (23)$$

Dobimo jo s pomočjo gručenja in uporabo lastnih vektorjev.

S pomočjo tega ugotovimo, da je naš cilj dosežen, če velja:

$$M := \arg \min_{\bar{M}} \|\bar{M} - UZ\|_F, \quad (24)$$

pri čemer  $\bar{M}$  predstavlja vse možne matrike  $k$ -razbitja in  $Z$  ustrežna matrika iz enačbe (23). Minimum poiščemo s projekcijo. Natančne izpeljave so navedene v članku (Hespanha, 2004).

Če je matrika sosednosti definirana brez uteži, v njej nastopajo le vrednosti 0 in 1. Potem algoritem poišče minimalno število cevi med različnimi DMA conami, ker so vse cevi, kjer povezave obstajajo, obravnavane enakovredno. Problem se pojavi, ko poskušamo uporabiti podatke hidravličnega modela kot uteži v matriki sosednosti  $A$ . Več vrst podatkov hidravličnega modela ne poda zadovoljivih rezultatov po izvajanju algoritma. Takšna podatka sta npr. nadmorska višina in starost vode, ki bi ju bilo smiselno uporabiti pri zasnovi DMA con. Bolj primerna kriterija za uporabo v spektralnem razbitju grafov sta premer cevi oziroma pretok vode v cevi. Algoritem pri izvajanju identificira takšne cevi med DMA conami, ki imajo manjše premere cevi oziroma manjše vrednosti pretokov. V ceveh z zaprtim statusom je po hidravličnem izračunu pretok vode enak vrednosti 0. V matriki sosednosti  $A$  so potem uteži na tovrstnih povezavah enake 0, kar pa privede do napak pri izvajanju algoritma, ker takšna povezava ni definirana v matriki. Zato je potrebno tem povezavam dodati neko majhno vrednost, da se jih lahko kasneje upošteva v algoritmu.

## 4 DRUGI PRISTOPI ZA ZASNOVO MERILNIH OBMOČIJ

V tem poglavju so predstavljeni pristopi drugih avtorjev, ki so se že ukvarjali z razbitjem VO na DMA cone. Nekateri avtorji upoštevajo v svojih pristopih manj vhodnih podatkov, ki vplivajo na zasnovno rešitve. Zato posledično dobijo več rešitev, od katerih so nekatere bolj oziroma manj primerne od preostalih. Število rešitev je tudi povezano s časovnim trajanjem izračuna različnih zasnov DMA con. Ustrezne rešitve se poišče z različnimi optimizacijskimi postopki.

### 4.1 Alvisi in Franchini

Postopek temelji na osnovi teorije grafov (Alvisi in Franchini, 2013). Metoda poda eno izmed ustrežnejših rešitev, vendar ni nujno, da je dobljena rešitev optimalna. Za podano VO pripiše vsa vozlišča k posameznim DMA conam in identificira cevi, ki mejijo med dvema različnima DMA conama. Kasneje se določi kombinacijo odprtih oziroma zaprtih cevi. Ustreznost zasnov DMA con se ugotovi s pomočjo Todinijevega odpornostnega indeksa  $lr$ . Preverja se tudi ustreznost zasnov za primer požarne obremenitve pri maksimalni porabi vode, ko so tlaki v omrežju minimalni.

Postopek je razdeljen na tri korake. V prvem koraku definiramo več možnih rešitev na osnovi algoritma iskanja v širino in algoritma najkrajše poti. Vnaprej določimo število DMA con in izračunamo, koliko je povprečno število vozlišč v posamezni DMA coni glede na celotno število vozlišč. Pri tem še dodatno določimo odstotek možnega odstopanja od povprečnega števila vozlišč. Pri uporabi algoritma iskanja v širino (BFS) izberemo poljubno vozlišče. Izbranemu vozlišču poiščemo vsa sosednja vozlišča in jih zapišemo v svoj sloj. Nato korake algoritma ponavljamo in pri tem v vsakem koraku vsa nova obiskana vozlišča zapišemo v samostojen sloj. Potem poiščemo takšno rešitev za posamezno DMA cono, da število vozlišč vsaj približno ustreza na začetku definiranimu povprečnemu številu vozlišč za posamezno DMA cono. Potem se ta postopek ponovi za vsa vozlišča v VO. S tem dobimo velik nabor možnih rešitev, ki pa niso vse ustrezne glede na hidravlične pogoje. Ko imamo vsa vozlišča v VO pripisana posameznim DMA conam, moramo določiti cevi, ki ostanejo odprte za omogočen dotok vode do vseh vozlišč. Pri tem avtorja predpostavljata, da ima vsaka DMA cona eno vtočno mesto, med mejami sosednjih DMA con pa definirata koeficient  $w$ . Koeficient  $w$  je izračunana vrednost, pri kateri je upoštevan premer, hrapavost in dolžina cevi in se kasneje izbere vtočno mesto glede na vrednost tega koeficienta.

V drugem koraku izberemo ustrezne rešitve. Le-te bomo poiskali s pomočjo algoritma najkrajše poti, kjer so linijske energijske izgube manjše. Uporabljen je algoritem najkrajše poti po Dijkstri (1959), kot utež pa se uporabi že prej definirani koeficient  $w$ . Za izbrane rešitve se potem izbere variante poti z minimalno vsoto vseh uteži na definirani poti.

V tretjem koraku potem izvedemo hidravlične simulacije za izbrane rešitve. Za vsako rešitev določimo odpornostni indeks  $lr$  in preverimo še hidravlično simulacijo za primer požarne vode. Iskane rešitve so rešitve z maksimalnim Todinijevim indeksom  $lr$ .

### 4.2 De Paola

De Paola et al. (2013) so razvili metodo za avtomatsko razbitje omrežja na posamezne DMA cone z upoštevanjem več tehničnih in ekonomskih kriterijev. Metoda temelji na teoriji grafov oziroma teoriji razvrščanja v skupine ter ima tri korake.

Pri uporabi metode se upošteva več kriterijev, usmerjenih predvsem v zmanjševanje stroškov, oziroma, da bi z določenimi finančnimi sredstvi zagotovili čim večji izkoristek investicije. Od podatkov hidravličnega modela se upošteva porabo vode na priključkih in linijske energijske izgube v vsaki DMA con posebej. Zato je priporočljivo zagotoviti vozliščem v vsaki DMA con približno enako nadmorsko višino. Pri ekonomskem vidiku se poleg zmanjševanja stroškov upošteva še koristi z uporabo DMA con. Stroške predstavljajo število zaprtih cevi oziroma vgradnja ventilov na cevi. V kategorijo stroškov spadajo še izgradnje jaškov in v njih nameščena merilna oprema. Metoda minimizira število zaprtih cevi za vzpostavitev DMA con. V kategorijo koristi spadajo manjše dejanske vodne izgube zaradi hitreje detekcije puščanja vode. Koristi prinašajo tudi možnost regulacije tlaka v cono, saj posamezne cone predstavljajo hkrati tlačne cone (PMA) zaradi upoštevanja enakosti nadmorskih višin vozlišč.

Vodne izgube se lahko zmanjša s pomočjo regulacije tlakov. Matematično to lahko izračunamo z minimizacijo. V enačbi upoštevamo, kakšen je dejanski tlak v vozlišču in kakšen je minimalni tlak določen po predpisih. Dejanski tlak se potem minimizira do vrednosti predpisanega tlaka. Postopek se ponovi za vsa vozlišča in poišče vozlišča z najmanjšim tlakom. Izbrana vozlišča potrebujejo posebno pozornost pri regulaciji tlaka, da ne prihaja do prenizkih vrednosti tlaka. Zelo podoben koncept je definiran pri Todinijevem odpornostnem indeksu  $lr$ .

Razdelitev grafa na podgrafe se opravi z algoritmom  $k$ -povprečja (angl.  $k$ -means). Glede na prej izračunane spremenljivke modela se verificira zasnovno DMA con in jih rangira po ustreznosti.

#### 4.3 Di Nardo in Di Natale

Metoda temelji na osnovi particije grafov. Tradicionalni način razbitja omrežja na DMA cone je temeljil na principu poskušanja (angl. trial and error). Metoda je preizkušena na realnem VS. Imamo podan graf s točkami in povezavami, ki predstavlja VO z vozlišči in cevmi. Cilj metode je zapreti čim manjše število cevi za vzpostavitev DMA con. Za razdelitev omrežja se uporabi rekurzivni bisekcijski algoritem (Di Nardo in Di Natale, 2013). Vsaka faza tega algoritma je implementirana v programsko orodje METIS v programu MATLAB.

Z uporabo rekurzivnega bisekcijskega algoritma dobimo družino podgrafov, pri kateri je potrebno narediti še minimizacijo. Z minimizacijo dobimo najmanjše možno število cevi, ki povezujejo dve sosednji DMA con.

Pri razdelitvi grafov na podgrafe se tako vsem cevem predpiše ustrezne uteži. Za definiranje uteži v matriki sosednosti se izbere podatke hidravličnega modela kot je npr. premer cevi, sprememba energije med dvema vozliščema ali pretok vode v cevi. Če pa se pri sestavi matrike sosednosti osredotoči na vozlišča, potem se uporabi parameter o porabi vode, ki je definiran v vozliščih porabnikov.

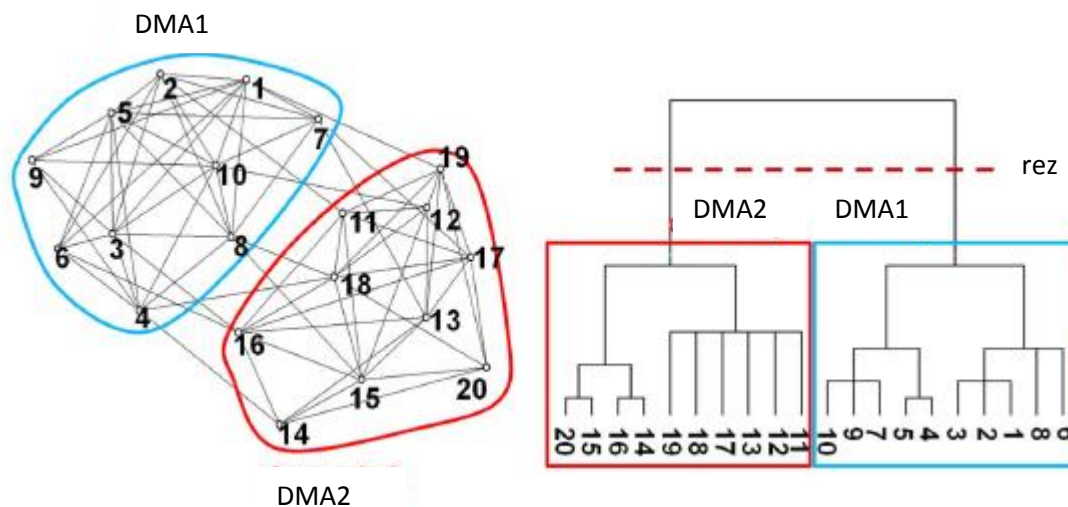
Po razdelitvi VO na DMA cone se tako za predhodno kot za novo nastalo stanje izračuna Todinijev odpornostni indeks  $lr$  ter primerja razlike v vrednostih. Pričakuje se, da je vrednost odpornostnega indeksa  $lr$  manjša po vzpostavitvi DMA con. Velikost DMA con se definira glede na število vozlišč. Vsako območje ima približno enako velikost. Hidravlično ustrežnejše rešitve se pojavljajo, kjer se upošteva uteži na ceveh in v vozliščih.

Metoda je bila preverjena na realnem VS, ki oskrbuje približno 10000 prebivalcev. Analizirano je bilo stanje za različno število DMA con. Glede hidravlike metoda ponuja ustrezne rešitve (visoke vrednosti odpornostnega indeksa  $lr$  glede na začetno stanje), vendar pri tem ni zagotovljeno, da je rešitev enolična. To se lahko razbere iz dejstva, da gre za skoraj uravnotežene rešitve (vrednost je lahko različna od 1,0 že pri majhnem številu DMA con).

#### 4.4 Diao

Metoda je nova in še v razvojnem zagonu, zato jo je potrebno v prihodnosti še dodatno naprej razvijati (Diao, 2013).

Algoritem temelji na teoriji, ki jo je razvil Clauset (2004). Clauset se pri razbitju grafa osredotoča na lastnost modularnosti ( $Q$ ) matrike sosednosti, ki je kot nekakšen indikator ustreznosti za posamezne podgrafe, pri tem pa predpostavi, da je graf povezan in neusmerjen. V celotnem VO poišče vozlišča z visoko stopnjo. Izbrane točke veljajo kot nekakšno jedro podgrafa in se jim postopoma dodaja sosednja vozlišča do stopnje, ko je med posameznimi podgrafi manjše število povezav. Zaradi boljše preglednosti nad izoblikovanimi podgrafi se izdelava zapisa postopnega razdeljevanja osnovnega grafa v obliki dendograma.



Slika 25: Primer dendograma za rez v grafu (Diao, 2013)

Metoda je avtomatska in poišče mejne cevi med posameznimi DMA conami. Mejne cevi dovajajo oziroma odvajajo vodo iz DMA cone. Potrebno je še določiti, katere cevi se pusti odprte oziroma se jih naknadno zapre. Optimizacijska metoda za določanje cevi enemu ali drugemu podgrafu je računsko zelo zamudna, zato se izbere dovodne cevi za vsako DMA cono posebej. Izberejo se glede na maksimalni premer. Problemi z omenjeno metodo se pojavijo s spreminjanjem hidravličnih razmer v VS, saj določimo dovodne cevovode vsaki DMA coni posebej, s tem pa zanemarimo sosednje vplive med DMA conami. Zaradi omenjenega razloga se analizira še občutljivost vozlišč glede na tlačne spremembe.

Algoritem je bil preizkušen na realnem VS z več kot 12000 vozlišči. Sistem je bil razbit na 43 DMA con, ki se gibljejo po velikosti od 500 do 5000 vozlišč. Rešitev zasnove je bila primerjana z ročno rešitvijo, ki jo je predlagal Grayman. Algoritem v primerjavi z ročno metodo ni generiral optimalne rešitve glede hidravličnih razmer, saj samo do neke mere reducira število zapornih ventilov (Diao, 2013).



## 4.5 Hajebi

Pomembno je poiskati metodo, katere rešitve hkrati ustrezajo hidravličnim zahtevanim pogojem in ne samo zakonitostim iz teorije grafov. Razvita je bila metoda za določanje DMA con v gravitacijskih VS (Hajebi, 2013), pri omejitvah zasnove pa so upoštevani kriteriji: minimalna razlika v nadmorski višini vozlišč, velikosti DMA con in hitrosti vode v ceveh. Pri optimizaciji so upoštevani parametri: minimalna razlika v nadmorski višini vozlišč, minimalna disipacija energije, minimalna raven tlaka v vozliščih in maksimalna odpornost omrežja.

Pri tem so se osredotočili na dejstvo o neodvisnosti vsake DMA cone od preostalega dela VS. Vsaka DMA cona mora biti neposredno priključena na vodni vir. V primeru okvar ali zaprtja odsekov cevi zaradi sanacije se s tem zagotovi neprekinjen dotok vode v vsako DMA cono. Poleg tega pa je enostavnejše spremljati razmere v posamezni DMA coni, če so cone med seboj neodvisne. Velikost DMA con je definirana glede na maksimalno oziroma minimalno število priključkov. Zgornja meja znaša 3000 in spodnja meja 500 priključkov. Vsaka DMA cona predstavlja skupino vozlišč s podobnimi hidravličnimi lastnostmi glede nadmorske višine oziroma hidravlične višine. Potrebni podatki hidravličnega modela za spremljanje so hitrost vode, tlačne razmere, višina vode v vodohranu, minimalno število merilnih postaj in zapornih ventilov, ki se na drugi strani odražajo v želji po čim manjši izgubi energije in čim večji tlačni odpornosti VS glede distribucije vode.

Najpomembnejše upoštevano dejstvo je neodvisnost posameznih con. Do sedaj so se samo trije avtorji ukvarjali z metodologijo, ki vključuje slednje dejstvo: Fernandez (2011), Di Nardo (2013) in Ferrari (2014). Vendar ima vsaka izmed njih druge pomanjkljivosti kot so npr. omejenost na majhna in enostavna omrežja, težavna izvedba v realni situaciji in neupoštevanje hidravličnih kriterijev.

Hajebi predlaga algoritem razvrščanja v skupine. Pri tem je VO razdeljeno na dve vrsti vozlišč: vodni viri in porabniki. Najprej je potrebno analizirati podano VO. Sprva razbere število vozlišč in cevi ter njihove vhodne podatke hidravličnega modela. Nastavi tudi omejitve glede števila priključkov za velikost posamezne DMA cone. Potem definira vse možne potencialne poti z začetkom v vodnem viru do vseh preostalih vozlišč v VS. Nato se lahko identificira skupine neodvisnih območij, ki so povezane s cevovodom vse do vodnega vira. Za definiranje poti se uporabi modificiran algoritem iskanja v globino (DFS). Na podoben način se definira transportni ali magistralni vod. Noben element transportnega voda ne sme biti vključen v neodvisna območja. Nato se preverijo neodvisna območja. Če ima neodvisno območje manjše število priključkov od minimalne meje 500, potem območje ne potrebuje merilnega mesta. Če ima območje večje število priključkov od maksimalne meje 3000, potem območje razdelimo na manjša območja z upoštevanim pogojem, da ima vsako območje neposredno povezavo na transportni vod oziroma vodni vir. Če pa se število povezav v neodvisnem območju nahaja med maksimalno in minimalno mejo, ga lahko upoštevamo kot samostojno DMA cono. Razdelitev na manjša območja se izvede z uporabo modificiranega algoritma iskanja v širino (BFS). V primeru večih možnih rešitev se poišče optimalno z uporabo genetskega algoritma in izhodnih spremenljivk. Metoda ima nekaj pomanjkljivosti. Prva je, da je omejena na gravitacijske VS (verjetno pri uporabi algoritma iskanj upošteva usmerjen graf). Druga je, da ni bila upoštevana kakovost vode. Tretja pa je, da ni nujno, da je podana rešitev optimalna, naj pa bi bila dovolj zadovoljiva glede neposlabšanega stanja hidravličnih razmer (Hajebi, 2014).

## 4.6 Ferrari

Pri Ferrarijevi (2014) je postopek zasnove DMA con razdeljen na tri korake:

- predhodna analiza VS,
- rekurzivni bisekcijski algoritem,
- hidravlično simuliranje nabora vseh generiranih rešitev.

V predhodni analizi se seznanimo s topologijo VO. Vsak VS je drugačen in ima svoje posebnosti, ki jih pri zasnovi DMA con nikakor ne smemo zanemariti. V VO se na podlagi vrednosti premerov cevi določi transportni vod. Premeri transportnih oziroma magistralnih vodov so veliki, saj služijo transportiranju zadostne količine vode v bolj oddaljene lokacije od vodnega vira. Avtorica metode predpostavlja, da cevi s premeri 300 mm ali več zadostujejo definiciji magistralnega voda. Magistralni vod nato odstrani iz sistema, kjer preostali del predstavlja distribucijsko omrežje. Posamezni deli omrežja z manjšim številom dovodnih cevi in ustrezno velikostjo lahko predstavljajo DMA cone in se jih pri metodi ne uspoštevata. Poleg samostojnih con se lahko prepozna območja, ki bi jih bilo potrebno v nadaljnjem koraku razdeliti na več DMA con. Tovrstna območja se imenujejo neodvisna območja. Značilnost neodvisnih območij je, da so neposredno povezana s transportnim vodom in imajo malo povezav s preostalim delom omrežja.

Pri vsakem neodvisnem območju preštajemo število priključkov. Ta podatek potrebujemo zaradi odločitve o deljenju neodvisnega območja na več DMA con. Morrison et al. (2007) so določili, da je zgornje število priključkov na DMA cono enaka 3000 in spodnja 500, če pri tem ni večjih vodnih izgub v obravnavanem omrežju. V nasprotnem primeru je lahko število priključkov na DMA cono manjše. Za analiziranje so možni trije primeri:

- št. priključkov > max. št. priključkov,
- min. št. priključkov < št. priključkov < max. št. priključkov,
- min. št. priključkov > št. priključkov.

V prvem primeru je potrebno neodvisno območje razdeliti na več DMA con. V drugem primeru nam ni potrebno nadaljnje razbiti območja, saj predstavlja neodvisno območje že DMA cona sama. V tretjem primeru pa je neodvisno območje premajhno, da bi ga bilo smiselno obravnavati kot samostojno DMA cono.

V nadaljevanju je potrebno še analizirati omrežje glede porabe vode. S temi podatki se namreč v nadaljnjem izračuna, kakšno je primerno število DMA con za obravnavano območje, poleg tega pa so s podatki o porabi določene tudi meje o velikosti posameznih DMA con. Vsaka DMA cona mora ustrezati navzgor omejeni maksimalni in navzdol minimalni porabi.

V rekurzivnem bisekcijskem algoritmu obravnavamo neodvisna območja, ki imajo večje število priključkov od 3000. Takšna območja je potrebno razbiti na manjše dele, ki potem v končni fazi predstavljajo DMA cone. Algoritem bazira na osnovi algoritma iskanja v širino (BFS), pri katerem je pomembna začetna točka iz katere se začne izvajati algoritem v več zaporednih korakih. Izhodišče je v našem primeru ena izmed cevi, ki povezuje transportni vod in prej definirano neodvisno območje. BFS algoritem odkriva sosednja vozlišča izbranemu začetnemu vozlišču. V več korakih lahko obiše vse več posrednih sosedov. Kot uteži v vozliščih upošteva porabo vode, vendar te vrednosti ne vplivajo na izbiro sosedov. Poraba v vozliščih je pomembna, ker v več zaporednih korakih kumulativno seštevata porabo vode z vsakim nadaljnjim korakom, dokler ne preseže neke določene vrednosti, ki predstavlja spodnji omejitveni velikostni kriterij glede porabe vode. Na tem mestu se BFS algoritem zaključi. Potem se izbere neka druga začetna točka, ki predstavlja neko drugo povezovalno vozlišče med transportnim vodom in obravnavanim neodvisnim območjem. BFS algoritem se na podoben način izvaja kot predhodno, dokler ne dosežemo spodnjega omejitvenega kriterija glede porabe vode oziroma dokler ne dosežemo množice vozlišč, ki so bila že odkrita v prvem izvajanju BFS algoritma. Priporočljivo je, da sta izbrani začetni točki po lokaciji bolj oddaljeni med seboj, da se množici obiskanih vozlišč BFS algoritmov ne srečata prekmalu, če je to glede na število povezovalnih točk možno.

V bistvu se z bisekcijo razbije neodvisno območje na dva dela. Če sta novonastali območji še vedno preveliki, ju je potrebno vsako posebej ponovno razdeliti na novi območji. Iz dveh območij potem dobimo štiri območja. Če katero še vedno ne ustreza omejitvenim kriterijem glede velikosti DMA con, ga je potrebno ponovno razbiti z bisekcijo na dva dela. Postopek ponavljamo, dokler vsi deli ne ustrezajo omejitvenim kriterijem. V zadnjem koraku je potrebno še preveriti, če so rešitve hidravlično ustrezne. Ustreznost rešitev se preveri z izvajanjem hidravlične simulacije v programu EPANET 2.0. Preverja se, ali so tlačne razmere po vozliščih še vedno dovolj visoke, da omogočajo nemoteno oskrbo s pitno vodo.

Metoda ima postavljene zelo velike intervale glede velikosti za porabo vode. Poleg tega uporabljeni BFS algoritem pri zasnovi ne upošteva rešitev minimiziranja števila cevi med dvema DMA conama. Zato privede do večjega števila zaprtih cevi, ki pa negativno vplivajo na tlačne razmere VS.

#### 4.7 Galdiero

Eno izmed natančnejših študij glede zasnove merilnih območij oziroma DMA con je v svojem doktorskem delu predstavil Galdiero (2015). V delu raziskuje, kakšna je smiselna sektorizacija VS s poudarkom na tem, kakšna bi bila najbolj optimalna zasnova DMA con v nekem realnem primeru VS. Pri tem upošteva različne parametre kot so poraba vode pri porabnikih in nadmorska višina vozlišč. Oba omenjena parametra veljata pri statični simulaciji kot fiksna parametra. Preverja pa se tudi izhodne spremenljivke, kot je npr. vrednost tlaka na vozliščih. Vrednost tlaka se pri spremenjeni zasnovi ne sme spustiti pod določeno minimalno zahtevano vrednost tlaka. Analizira se razliko med dejanskim in minimalnim zahtevanim tlakom. Poleg tega se upoštevajo še druge količine, ki se nanašajo na hidravlični izračun, kot so enačba o ohranitvi mase, enačba o energijskih izgubah, nivoji gladin v vodohranih in črpalne krivulje.

Vsaka spremenjena zasnova omrežja predstavlja strošek zaradi izgradnje merilnih jaškov, nabavne vrednosti merilnih instrumentov in merilne opreme ter predstavlja dodatno omejitev glede zasnove.

Za snovanje posamezne skupine podgrafov je uporabljen Floyd-Warshallov algoritem za iskanje najkrajših poti oziroma razdalj med dvema naključno izbranimi paroma točk. Za različno število DMA con na delovnem primeru poišče optimalno zasnovo omrežja. Za iskanje najboljše rešitve uporabi modificiran genetski algoritem NSGA-II, ki s ciljnim funkcijami upošteva omejitve glede zasnove omrežja.

Slabost metode je v dejstvu, da je zasnovana za omrežja z manjšim številom vozlišč in cevi. V doktorskem delu je sicer omrežje zasnovano za večji VS, vendar je skeletizirano do te mere, da vsebuje v strukturi le nekaj več kot 100 vozlišč. Če imamo opravka s kompleksnim VS, je opravljanje tega dela precej zamudno. Ravno reducirana velikost omogoča večje število izvajanja simulacij, ki se na koncu algoritma evalvirajo ob izbiri optimalne rešitve. Mogoče bi bilo bolje kakšno dejstvo predpostaviti in poiskati rešitve s krajšim časovnim trajanjem. S tem bi bila metoda lahko uporabna za večje VS (Galdiero, 2015).

## 5 PRIPRAVA IN OPIS PODATKOV DELOVNEGA HIDRAVLICNEGA MODELA

V tem poglavju je opisan primer realnega VS, na katerem bo preizkušena metoda za zasnovno merilnih območij. Primer predstavlja del celote VS Kranj. Za ustrezno zasnovno DMA con je potrebno natančno poznati VS in njegove posebnosti, saj je vsak sistem edinstven in ga je zato potrebno posebej obravnavati. Ravno zaradi tega dejstva je težko razviti neko splošno metodo za razbitje VS na optimalno število DMA con, ki bi bila uporabna za vsak sistem.

### 5.1 Splošno o upravljalcu in VS Kranj

Podjetje Komunala Kranj upravlja večje število VS v naslednjih občinah:

- Kranj,
- Naklo,
- Cerklje na Gorenjskem,
- Jezersko,
- Medvode,
- Preddvor,
- Šenčur.

Od zgoraj omenjenih občin se največji VS nahaja v občini Kranj, saj oskrbuje okoli 55000 prebivalcev. Poleg tega je v občini Kranj tudi veliko gospodarskih objektov, ki poleg velikega števila prebivalcev še dodatno povečujejo porabo vode. Količina porabljene vode v Kranju se spreminja vsako leto. Z uporabo podatkov o prodanih kubičnih metrov vode in števila prebivalstva v Kranju se lahko namreč izračuna povprečna poraba vode na prebivalca. Ena oseba na leto povprečno porabi 57 m<sup>3</sup> vode. Opaženo je, da se poraba vode v Kranju zmanjšuje, saj je bila leto predtem izračunana povprečna poraba 61 m<sup>3</sup> vode. Podatki o letni porabi vode so bili pridobljeni na Komunalni Kranj.

K temu trendu verjetno prispevata dva dejavnika. Prvi je zmanjševanje gospodarskih panog, ki predstavlja zelo velike porabnike vode, zato je vpliv tovrstnih subjektov nezanemarljiv. Drugi pa je osveščanje prebivalcev o varčevanju z vodo. V zadnjih letih je bilo v javnosti veliko govora o varčevanju z vodo. V primerjavi s prejšnjim dejavnikom se v tem primeru zmanjšana poraba vode zazna, če zelo veliko subjektov varčno ravna s porabo vode.

Komunala Kranj upravlja vsega skupaj 19 VS, vendar nekateri izmed njih predstavljajo zelo majhne VS. Primer majhnega VS je npr. Možnjanca, vendar se kljub njegovi majhnosti še vedno obravnava kot samostojen sistem. Dolžina vseh 19 VS predstavlja 740 kilometrov cevovoda (Komunala Kranj, 2016).

### 5.2 Vodni viri

Vodni viri, ki dovajajo vodo VS Kranj, se nahajajo na Čemšeniku, Bašlju, Novi vasi in na Krvavcu. Poseben vodni vir predstavlja vrtina na območju Gorenje Save. Prispevno območje za vodni vir Bašelj predstavljajo masivi vzpetin Strožič, Srednji vrh in Zaplata. Omenjeni masivi so v geološkem smislu karbonatne sestave. Voda, ki na površju ponika, se zbira na neprepustni plasti laminiranih skrilavcev. Zelo podoben vodni vir je tudi Nova vas, vendar gre pri slednjem za manjšo izdatnost vodnega vira.

V Bašlju se kakovost vode izboljšuje z izvajanjem postopka ultrafiltracije. Črpališče Gorenja Sava predstavlja vodni vir na terasni ravnici pri Šmarjetni gori. Voda se nahaja v prodnem

vodonosniku. Sloj proda znaša približno 20 metrov, gladina podtalne vode pa se nahaja 9 metrov pod koto površinskega terena. Vodonosnik je izpostavljen površinskim vplivom, saj poleg humusne plasti na površju ni nobenega drugega sloja, ki bi predstavljal zaščitno funkcijo. Problematična je lokacija, saj se nahaja v mestu Kranj, zato je možnih več virov onesnaženja vodnega vira. Prispevno območje Šmarjetne gore ne predstavlja velikega deleža vode, ker je njen masiv grajen iz skrilavcev, ki pa so slabše vodoprepustni. Zajetju Krvavec predstavlja prispevno območje masiv vzpetine Krvavec. Masiv je sestavljen iz apnenca in dolomita, ki ga okoli obdaja skrilavec in lapor. Prisotnost laporja in skrilavca ima v tem primeru izolacijsko funkcijo. Voda v obliki padavin pade na prispevno območje Krvavca, ponikne v karbonatne kamnine in na stiku z neprepustnimi kamninami prispe nazaj na površje v obliki izvira. Voda se zajema z uporabo drenaže. Skupna izdatnost vseh zajetij na Krvavcu je do 100 l/s (Komunala Kranj, 2016).



Slika 26: Ultrafiltracija Bašelj (Pitna voda zgornja Sava, 2016)

Pomembno je, da se pitna voda zagotovi iz več vodnih virov in ne samo enega. S tem se lahko zagotovi stalni dotok vode v VS v primeru sanacij ali drugih podobnih problemov povezanih z vodnimi viri. Poleg naštetih vodnih virov obstajajo še manjši vodni viri, ki zagotavljajo vodo v manjših količinah, oskrbujejo pa predvsem manjša naselja na obrobju občine. V primeru obilnih padavin je pri vodnih virih možna zakalitev vodnega vira.

Posamezni VS so povezani med seboj, zato se po magistralnih vodih preko VS Kranj doteka voda še v druge občine kot so občina Šenčur in deloma občina Naklo ter občina Preddvor.

### 5.3 Vodohrani

Vloga vodohranov v VS je, da začasno shranjujejo zadostne količine vode, ki se potem porabijo, ko je poraba vode v VS večja od srednje porabe. V VS Kranj je večje število vodohranov. Verjetno je še najbolj prepoznaven vodovodni stolp v Kranju, ki se nahaja ob Oldhamski cesti. Zgrajen je bil že leta 1910 in je visok 34 metrov. Prostornina vodohrana znaša 250 m<sup>3</sup> in je v takratnih časih in razmerah zadostoval potrebam pitne vode, vendar zaradi povečanega števila prebivalcev danes ne zadostuje več in je bilo tako potrebno zgraditi še



druge dodatne vodohrane. Zelo pomemben je vodohran Zeleni hrib, ki se nahaja v kompleksu posestva Brdo pri Kranju. Kapaciteta omenjenega vodohrana je 1500 m<sup>3</sup> vode. Vodohran je sestavljen iz več celic, ki so povezane med seboj. Vodohran Zeleni hrib se napaja iz vodnega vira Bašelj, kjer se voda čisti s postopkom ultrafiltracije (Komunala Kranj, 2016).



Slika 27: Vodohran Zeleni hrib se nahaja v okviru posestva Brdo pri Kranju (Pitna voda zgornja Sava, 2016)

#### 5.4 Delovni primer Planine in Primskovega

V tem podpoglavju je predstavljen del VS, na katerem bo preizkušen algoritem iz teorije grafov za zasnovno DMA con skupaj z evalvacijo posameznih rešitev. Obravnavano območje predstavlja del VS Kranj na območju Planine in Primskovega, ki je v nadaljnjem podrobneje opisan.

##### 5.4.1 Splošni opis delovnega primera

Del VS, za katerega je bil izdelan hidravlični model, je na območju Planine in Primskovega sestavljen iz 1284 vozlišč in 1333 cevi. Ker ne gre za samostojni VS, je potrebno odrezane dele sistema nadomestiti s fiktivnimi vodnimi viri in v njih definirati robne pogoje glede tlaka oziroma pretoka vode (Slika 28). Torej je VS potrebno »rezati«, kjer so poznane vrednosti tlakov in pretokov oziroma na lokaciji merilnih mest.



Slika 28: Na karti označeno območje VS Primskovega in Planine (ARSO GIS, 2016)

V VS Primskovega in Planine je 5 zunanjih merilnih mest na robnem območju. Merilna oprema je nameščena v podzemnih jaških. Z oznako J39 in J40 (Slika 29) sta definirani lokaciji merilnih jaškov, kjer se izvajajo meritve tlakov in pretokov na delu omrežja, ki predstavlja neposredno povezavo med območjem Primskovega in vodovodnim stolpom v Kranju. Smer vode v teh dveh primerih ni enosmerna, ker se spreminja glede na praznjenje oziroma polnjenje vodohrana. Z oznako J37 so evidentirani pretoki in tlaki vode, ki priteče iz Krvavca preko vodohrana v Adergasu, z J136 pa vodo, ki priteče iz Zelenega hriba. Na skrajnem JV je jašek z oznako J44 in predstavlja iztočno točko, kjer voda izstopa iz obravnavanega območja in vstopa v območje Čirč in drugih vasi na levem bregu reke Save (Gorjup, 2013).

Dve merilni mesti sta locirani znotraj Planine. Označeni sta z oznako J142 in J43. Ker je VS na območju Planine močno prepleten, je bilo potrebno zapreti večje število cevi, da sta se območji lahko izolirali od preostalega dela VS.

Višinska razlika med najnižjim in najvišjim vozliščem predstavlja približno 20 metrov. Torej gre v tem primeru za VS s precej podobnimi višinami in lahko rečemo, da gre za ravninski VS. Največje višinske razlike predstavljajo objekti, ki se nahajajo na prodnati terasi ob reki Kokri.

Na obravnavanem območju VS Planine in Primskovega je približno 40 % vodnih izgub (Komunala Kranj, 2016). Ravno zaradi želje po zmanjšanju visokega deleža dejanskih vodnih izgub je v VS smiselno zasnovati DMA cone in s tem hitreje identificirati vodne izgube.

Podatek o deležu izgub je pridobljen iz računa vodne bilance. Podatki o količini vode, ki vteka v obravnavano območje se pridobiva z izvajanjem stalnih meritev tlaka in pretoka na mestu vtoka vode. Če je obravnavano območje pretočno, potem se mora izvajati meritve še na mestu iztoka vode. Podatke o porabi vode zapisujejo vodomerne ure na posameznih vodovodnih priključkih in se potem na podlagi daljšega časovnega obdobja določi srednjo povprečno porabo vode (Komunala Kranj, 2016).





Slika 29: VS Planine in Primskovega v programu EPANET 2.0

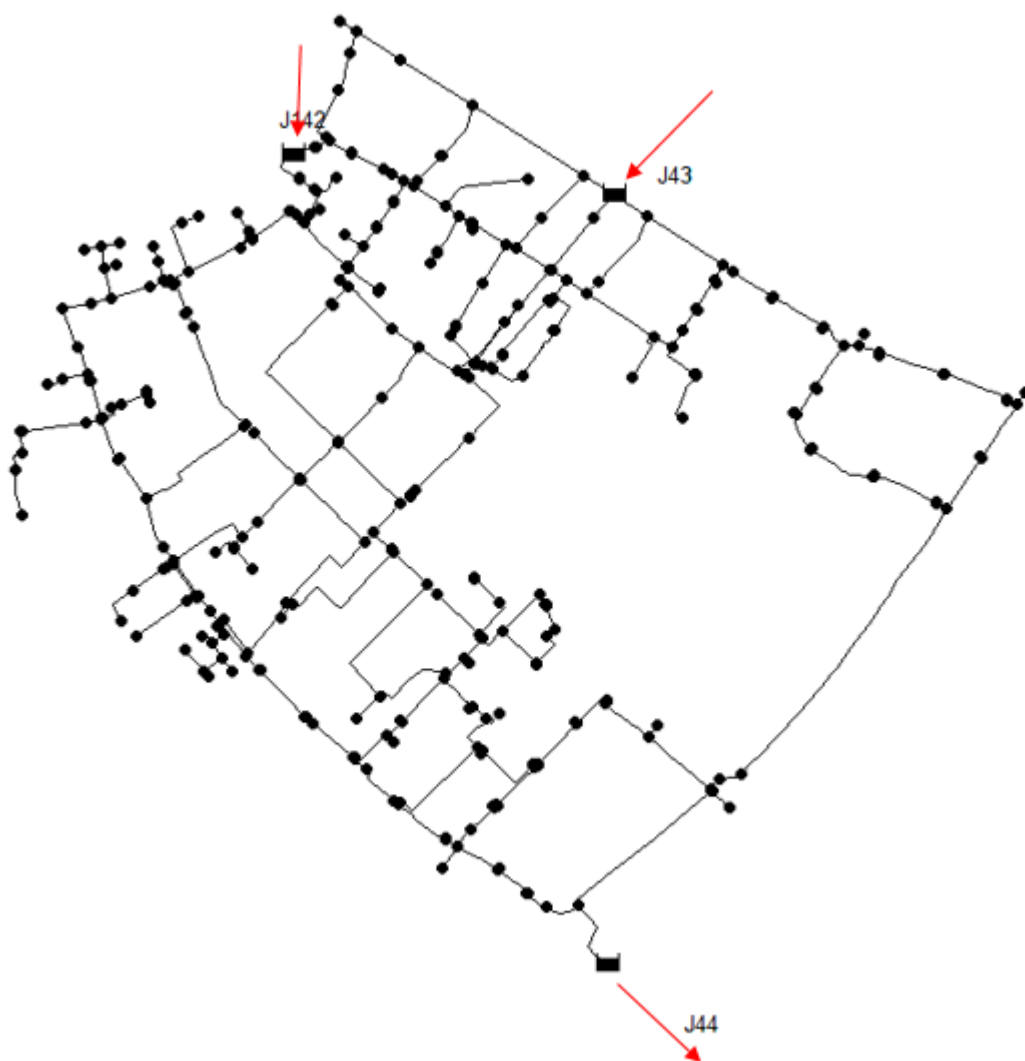
Vzrokov za večje količine vodnih izgub je več. Starost posameznih kosov cevi je lahko zelo različna, ker so bile cevi vgrajene po potrebi glede na širjenje naselja. Za starejše cevi obstaja namreč večja verjetnost, da pride do loma cevi. Pomemben je tudi material, iz katerega so narejene cevi, ker so nekateri materiali manj odporni na tlačne obremenitve ali zunanje obremenitve iz površja, kot so npr. prometne povezave. Možna so tudi puščanja vode zaradi netesnosti spojev med cevmi. Običajno gre v tem primeru za manjša puščanja vode daljšega časovnega trajanja v primerjavi z lomi cevi (Steinman in Kozelj, 2014).

V našem primeru gre verjetno za nezanemarljive količine puščanja vode zaradi poškodb in lomov cevi, ki so posledica večje starosti cevi, ni pa znano, kolikšen delež vodnih izgub spada k vodnim izgubam, ki nastanejo zaradi netesnosti spojev med cevmi. Poleg tega tudi ni poznano, ali gre za večje število lokacij manjšega puščanja vode ali manjše število lokacij večjega puščanja vode, čeprav se zelo velika puščanja vode hitreje zazna zaradi upada tlakov v VS. Upad tlaka se ugotovi z izvajanjem meritev na določenih mestih v VS, velikokrat so tudi porabniki vode tisti, ki opozorijo upravjalca na upad tlaka vode, ki ga opazijo v svojem bivališču. Porabnikom, ki so v neposredni bližini črpalk ali hidroforjev, je težje zaznati spremembe v tlaku. Črpalke začnejo obratovati z upadom tlaka v VS, torej okoliški prebivalci ne morejo zaznati upada, ker črpalke povečujejo tlak v sistemu. Enak primer se pojavi pri blokovskih objektih in stolpnica. Po drugi strani pa bi bil možen indikator vodnih izgub nenadno podaljšano časovno obratovanje črpalke in posledično tudi večje količine načrpane vode, ki se ne prišteva k narasli količini prodane vode (Komunala Kranj, 2016).



## 5.5 Delovni primer Planine

Hidravlični model VS na Planini je sestavljen iz 476 vozlišč in 500 cevi. Od 476 vozlišč dve vozlišči predstavljata vodni vir in eno predstavlja ponor oziroma prekinjene cevi. Vodna vira predstavljata merilni mesti znotraj Planine, omenjeni v prejšnjem odstavku, ponor pa predstavlja iztočno točko v Čirčah. Pri zasnovi merilnih območij je zaradi nižjih investicijskih stroškov smiselno upoštevati že zgrajene merilne jaške in obratovalne merilne naprave. Zaradi teh razlogov smo se odločili, da obravnavamo del VS, ki se nahaja med že delujočimi merilnimi postajami. Metoda zasnovne merilnih območij se bo izvajala na tem delovnem primeru, ker določena merilna mesta že obstajajo. Metoda bo preizkušena na statičnem hidravličnem modelu pri srednji porabi vode, analizirano pa bo stanje, ko so znotraj tega območja vse cevi odprte.



Slika 30: Smeri vtokov in iztoka na delovnem primeru Planine so označene s puščicami

## 6 UPORABLJENI PROGRAMI IN EVALVACIJA REŠITEV

V prvem delu tega poglavja sta predstavljena oba uporabljena programa ter kriterija, s katerima je najenostavnejše ovrednotiti generirane rešitve zasnov.

### 6.1 Uporabljeni programi

Pri praktičnem delu magistrske naloge sta bila uporabljena naslednja dva programa:

- EPANET 2.0
- MATLAB

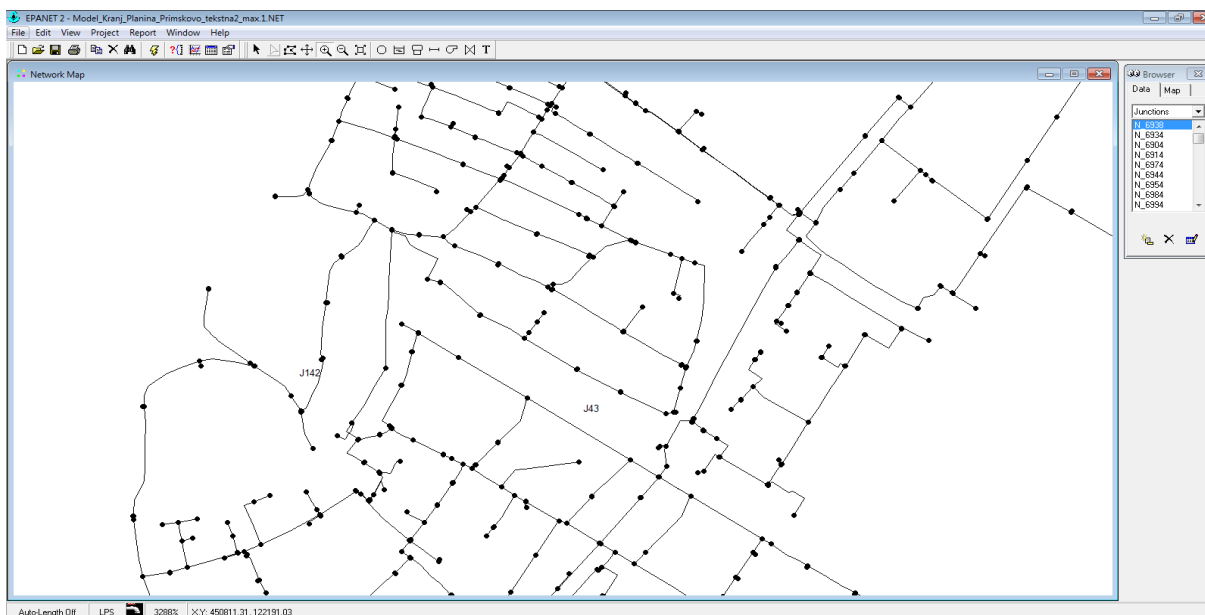
V nadaljevanju sta opisana oba programa oziroma delo z njima.

#### 6.1.1 EPANET 2.0

Program EPANET 2.0 je brezplačna programska oprema. Namenjen je izvajanju hidravličnih simulacij modelov VS. Za izvajanje hidravličnih simulacij potrebujemo hidravlični model, ki predstavlja VS. Linijske energijske izgube je mogoče določiti z uporabo ene izmed naslednjih treh enačb (Rossman, 2000):

- Darcy-Weissbach,
- Chezy-Manning,
- Hazen-Williams.

Hidravlični model je sestavljen iz vozlišč in cevi, ki predstavljajo točkovne in linijske elemente. Poleg teh so še drugi elementi s posebnimi vlogami in so lahko linijski ali točkovni. Primeri točkovnih elementov so vodohrani in vodni viri, medtem ko linijski elementi predstavljajo črpalke in ventile. Vsak element potrebuje določene zahtevane parametre, da se simulacija lahko izvede.



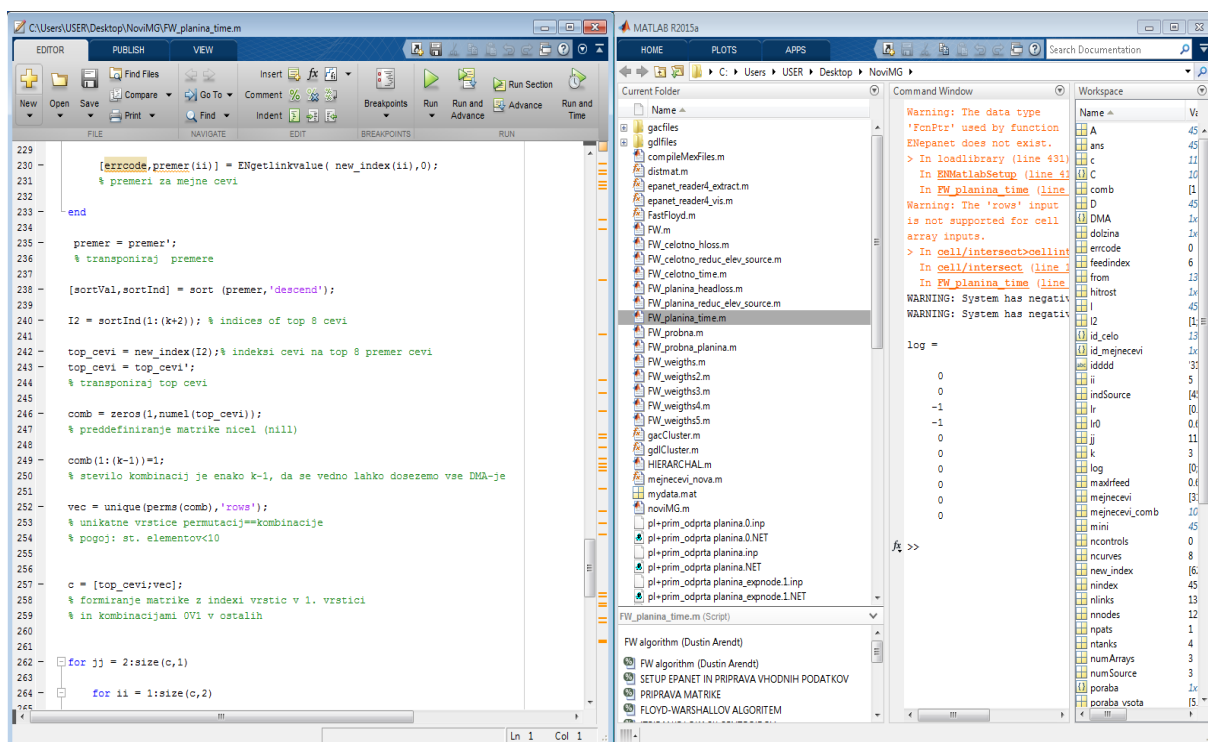
Slika 31: Program EPANET 2.0

Če hidravlični model nima določenih časovnih korakov, predstavlja tovrstna simulacija statično simulacijo. Statična simulacija lahko ponazarja razmere pri srednji, maksimalni, minimalni ali kritični porabi vode. S časovnimi koraki se običajno po priključnih mestih porabnikov spreminja definirana poraba vode. Osnovna poraba vode je na priključnih mestih definirana na podlagi srednje porabe vode in se v modelu spreminja s koeficienti porabe vode, ki so določeni v vzorcu porabe za vsak časovni korak posebej. V tem primeru hidravlični model predstavlja dinamični model.

Program EPANET 2.0 uporabniku omogoča grafični prikaz sheme VS. Omogoča tudi grafični prikaz elementov z enakimi ali podobnimi podatki hidravličnega modela. Prikaz vrednosti podatkov hidravličnega modela velja tako za parametre, kot tudi za izhodne spremenljivke hidravličnega izračuna. Možen je tudi pregled podatkov v obliki tabel ali grafikonov, ki jih je mogoče naknadno izvoziti.

### 6.1.2 MATLAB

V program MATLAB je mogoče uvoziti hidravlični model v datoteki .inp oblike z namenom spreminjanja parametrov in izvajanja hidravličnih simulacij. Izdelane so bili funkcije, s katerimi lahko spreminjamo vhodne podatke hidravličnega modela. Najprej se mora izvesti namestitev dinamične knjižnice programa EPANET 2.0, tj. datoteka .dll, da lahko uporabljamo programske funkcije, ki so zapisane v knjižnici. Potem moramo odpreti .inp datoteko hidravličnega modela, ki ga želimo obravnavati. S funkcijami tipa »ENget...« lahko pridobimo različne podatke hidravličnega modela, ki so lahko vhodni podatki hidravličnega modela ali rezultati hidravlične simulacije, s funkcijami tipa »ENset...« pa lahko spreminjamo parametre hidravličnega modela. Nato moramo izvesti hidravlično simulacijo s funkcijo »EnsolveH«. Rezultate hidravlične simulacije ali spremenjen hidravlični model lahko s funkcijami tipa »Ensave« shranimo v .inp obliki.



Slika 32: Program MATLAB

Elementi v hidravličnem modelu so zapisani z identifikatorji (id) in indeksi. Id elementa je enolična oznaka, ki lahko pripada samo enemu elementu v hidravličnem modelu. Ime je lahko sestavljeno iz črk, števil ter znakov in je tipa »char«. Indeks pa je oznaka, s katero tako kot pri id-ju enolično označimo element, vendar je indeks povezan z vrstnim redom oziroma lokacijo elementa v celotnem seznamu elementov hidravličnega modela. Vedno je prvi element označen z indeksom 1, medtem ko je indeks zadnjega elementa enak številu vseh elementov tega tipa. Za linijske in točkovne elemente sta sestavljena ločena seznama. V seznam točkovnih elementov spadajo vsa vozlišča, vodni viri in vodohrani, medtem ko v seznam linijskih elementov spadajo cevi, črpalke in razni ventili. Indeksi elementov vedno predstavljajo naravna števila.

Namen uporabe programa MATLAB je v tem, da lahko z njegovo pomočjo izdelamo algoritem in s tem avtomatizirano izvedemo večkratne ponovitve simulacij hidravličnega modela. Izvajanje takega algoritma je precej hitrejše, kot bi to lahko naredili s spreminjanjem parametrov in izvajanjem simulacij neposredno v programu EPANET 2.0.

## **6.2 Kriteriji za določanje ustreznosti formiranih DMA con**

### **6.2.1 Povezanost omrežja**

Po zasnovi DMA con se omrežje razbije na posamezna merilna območja, ki jih lahko obravnavamo kot nekakšne samostojne enote. Pri teoriji grafov lahko tako obravnavamo podgrafe. DMA cone omejujejo lokacije, ki so opremljene z ventili in merilnimi napravami ter stalno zaprtimi cevmi. V hidravličnem modelu se spreminja status cevi, ki lahko predstavlja odprto ali zaprto cev. S tem cevi ni potrebno dejansko izbrisati, ampak samo preprečimo možnost toka vode po tej cevi. Povsem enako velja za zaporne ventile. Pri tem postopku je potrebno še preveriti povezanost omrežja. Posamezne zaprte cevi lahko namreč preprečijo dotok vode do posameznih odjemnih mest v vozliščih, ki predstavljajo porabnike vode. Vsa vozlišča morajo imeti povezavo do korenkega vozlišča oziroma vodnega vira. V nasprotnem primeru je omrežje nepovezano. Pri tem moramo upoštevati samo cevi, ki so odprte. Torej preverjamo povezanost vodnega toka do vseh porabnikov.

V teoriji grafov obstajajo algoritmi, ki preverjajo povezanost grafov oziroma v našem primeru VO. Uporaba algoritmov je primerna pri grafih z velikim številom točk ali večkratnimi stopnjami, kjer graf postane nepregleden. Algoritmi preverjajo sosednost točk za vse točke v obravnavanem grafu. Do neke izbrane točke mora iz vsake druge točke obstajati vsaj ena povezava oziroma pot. V nasprotnem primeru je graf nepovezan.

Že uporaba BFS algoritma nam lahko pove, če je graf povezan ali ne. Pri BFS algoritmu izberemo začetno točko, ki predstavlja izhodiščno točko v VS ter bi bilo smiselno, da takšna točka predstavlja vodni vir, saj želimo preveriti, če je možno od izhodiščne točke dostopati do vseh preostalih točk v grafu. Po kratkem razmisleku ugotovimo, da vsaka kombinacija povezav med naključno izbranim vozliščem in vodnim virom predstavlja pot. Nabor vseh poti med vodnimi viri in preostalimi točkami zajema vse točke v grafu, vendar pa ni nujno, da zajema vse povezave v grafu. Pri VS je poraba vode definirana v vozliščih, zato je bistvenega pomena prehod od vodnega vira do preostalih točk v grafu in je potem za naše potrebe povsem zadovoljivo, da analiziramo samo povezljivost vsake naključno izbrane točke in vodnega vira, čeprav pri tem nismo upoštevali vseh cevi v grafu.

### 6.2.2 Odpornostni indeks $I_r$

VS je sistem, ki je sestavljen iz med seboj povezanih cevi in specifičnih elementov, ki opravljajo posebne naloge za transport pitne vode od vodnega vira do končnih porabnikov. V posameznem vozlišču se lahko stika več cevi, torej lahko v eno vozlišče priteče oziroma odteče voda po različnih poteh iz točke, ki predstavlja vodni vir. V primeru okvar in sanacij je smiselno, da odjemno mesto ni odvisno samo od ene dotočne cevi. Zato so VS zasnovani z velikim številom ciklov. Takšni so mrežasti ali krožni sistemi. V našem primeru zasnove merilnih območij bomo zapirali posamezne ventile, da bomo lahko izolirali območje od preostalega dela. S tem se zmanjša varnost zagotavljanja vode končnim porabnikom. Posamezne pridobljene rešitve se s primerjavo med seboj vnaprej definiranih kriterijev določi ustreznost posameznih rešitev. Eden izmed primernih kriterijev za tovrstno primerjavo je odpornostni indeks  $I_r$ . Formulacijo odpornostnega indeksa  $I_r$  je podal Todini (2000). Odpornost sistema je pomembna, ker s pomočjo odpornostnega indeksa  $I_r$  prikaže, kolikšna je stopnja varnosti distribucije vode pri motnjah (npr. požar ali lom cevi) v VO. V obeh primerih se poveča poraba vode zaradi povečanega odjema vode in zmanjša tlak v omrežju. Vrednost indeksa določa, ali bodo v tovrstnih razmerah okoliški prebivalci še imeli dovolj tlaka na razpolago, da bo voda pri njih lahko nemoteno tekla iz pip. Indeks  $I_r$  je izražen z močjo  $P$ , ki je izražena v wattih (W). Todini navaja tri različne primere moči.

Z vodnim virom je določena celotna moč  $PA$ , ki v VS omogoča zadostno vrednost tlaka vode pri končnih porabnikih. Definirana je s produktom specifične teže vode in vsote produkta izdatnosti vode ter hidravlične višine (angl. head) vseh vodnih virov. S tem določimo moč, ki je razpoložljiva v celotnem VS. Energijo je v VS mogoče povečati z vgraditvijo črpalk, ki na lokaciji črpalke točkovno povečajo nivo energije. Definicija celotne moči je predstavljena v enačbi (26).

Količina  $PD$  predstavlja disipacijo moči zaradi linijskih energijskih izgub. Nastanek linijskih energijskih izgub je posledica trenja vodnega toka z ostenjem cevovoda. Večje kot je trenje zaradi večje hrapavosti, večje so linijske energijske izgube. Cevi raznih materialov imajo različne vrednosti hrapavosti ostenja. Hrapavost se spreminja s staranjem cevovodov. Enačba (27) vsako cev posebej analizira glede na linijske izgube, nato produkte linijskih izgub in pretokov sešteje za vse cevi v VO in na koncu pomnoži s specifično gostoto vode, da dobimo skupno disipirano moč.

Količina  $PN$  pa predstavlja razpoložljivo moč, ki na koncu še ostane na posameznih vozliščih, ki ne predstavljajo vodohranov ali vodnih virov. To so vozlišča porabnikov in vmesna vozlišča pri cevovodu, uvedena z namenom, da ne predstavljajo predolgih enot posameznih cevi. Moč je v tem primeru definirana kot produkt specifične teže vode in vsote produkta energije ter porabe vseh vozlišč. Energija je v tem primeru predstavljena kot hidravlična višina. Šele s pomočjo hidravlične višine lahko ugotovimo smer, kamor voda dejansko teče. Teče namreč od višje hidravlične višine proti nižji. Pri tem predpostavljamo, da ni nobenih črpalk, ki zvišujejo energijo v VS. Vrednosti tlakov ne morejo ponazoriti smeri toka vode, ker ne upoštevajo nadmorske višine točk. Razpoložljiva moč je predstavljena v enačbi (28).

Ko imamo poračunane vse vrednosti različnih vrst moči, lahko preverimo, če smo pravilno izračunali posamezne količine vseh spremenljivk. To lahko storimo s kontrolnim izračunom, ki je predstavljen v enačbi (25). Če se kontrolni izračun ne izide, moramo še enkrat preveriti, če smo kje v predhodnih izračunih storili napako in ponovno preveriti kontrolni izračun. Ko imamo vse različne primere moči pravilno izračunane, lahko še izračunamo Todinijev odpornostni indeks  $I_r$ . Odpornostni indeks  $I_r$  se izračuna po enačbi (29). Vrednost  $PD_{max}$  je definirana kot razlika celotne moči  $PA$  in minimalne moči v vozliščih ter jo izračunamo po enačbi (30). Minimalna moč je zmnožek specifične teže vode in vsote porabe v vozliščih ter minimalne hidravlične višine. Minimalna hidravlična višina je v tem primeru vrednost, ki predstavlja nadmorsko višino vozlišč povečano za minimalno potrebno vrednost tlaka v posameznem vozlišču. Vrednost indeksa  $I_r$  je vedno manjša od vrednosti 1. Večja kot je vrednost

odpornostnega indeksa  $I_r$ , tem večja je zanesljivost zagotavljanja vode končnim porabnikom, ki so vključeni v VS.

Potrebne enačbe za določitev Todinijevega odpornostnega indeksa  $I_r$  so naslednje (Todini, 2000):

$$PA = PD + PN \quad (25)$$

$$PA = \gamma \sum_{s=1}^{n_s} q_s * H_s \quad (26)$$

$$PD = \gamma \sum_{j=1}^{n_j} q_j * H_j \quad (27)$$

$$PN = \gamma \sum_{i=1}^{n_i} Q_i * H_i \quad (28)$$

$$I_r = 1 - \frac{PD}{PD_{max}} \quad (29)$$

$$PD_{max} = PA - \gamma \sum_{i=1}^{n_i} Q_i * \bar{H}_l \quad (30)$$

$PA$  = celotna moč (W)

$PD$  = disipirana moč (W)

$PN$  = moč v vozliščih (W)

$\gamma$  = specifična teža vode (N/m<sup>3</sup>)

$n_s$  = število vodnih virov

$q_s$  = izdatnost vodnega vira (l/s)

$n_j$  = število cevi v VO

$q_j$  = pretok v posamezni cevi (l/s)

$n_i$  = število vozlišč v VO

$Q_i$  = poraba vode v posameznem vozlišču (l/s)

$PD_{max}$  = razpoložljiva moč glede načrtovanih pogojev v omrežju (W)

$H_s$  = hidravlična višina na vodnem viru (m)

$H_j$  = linijske izgube v posamezni cevi (m)

$H_i$  = hidravlična višina v posameznem vozlišču (m)

$H_i$  = minimalna hidravlična višina v posameznem vozlišču (m)

$I_r$  = odpornostni indeks (-)

## 7 UPORABLJENA METODA

V tem poglavju je podrobno opisana metoda in vsi njeni koraki, ki so bili potrebni, da se je v VS formiralo določeno število merilnih območij.

### 7.1 Priprava vhodnih podatkov

Najprej smo pripravili model VS v .inp datoteki. Vsem cevem na obravnavanem območju smo nastavili odprto stanje, da so bili pretoki omogočeni po vseh ceveh.

Pred začetkom dela mora biti hidravlični model v .inp obliki shranjen na enaki lokaciji kot delovna datoteka s povezavo na dinamično knjižnico. Nato smo s funkcijo »ENmatlabsetup« namestili dinamično knjižnico EPANET2.dll z vsemi njeni funkcijami. »ENopen« nam omogoča, da lahko hidravlični model v .inp obliki odpremo v programu MATLAB.

### 7.2 Algoritem

Nato smo v programu MATLAB s funkcijo »ENgetnetsize« poklicati informacijo o številu vseh vrst elementov VO. Potrebno se je zavedati, da pri uporabi teorije grafov potrebujemo informacijo o povezavah oziroma ceveh med posameznimi vozlišči za namen izdelave matrike sosednosti. Z uporabo funkcije »ENgetalllinks« dobimo dva vektorja, ki predstavljata začetno oziroma končno vozlišče vsake cevi. Dolžini obeh vektorjev sta enaki in predstavljata število cevi v VO, ki je shranjen v .inp datoteki. Z MATLAB-ovo funkcijo »accumarray« lahko z uporabo vektorjev začetnih in končnih vozlišč cevi in določene vrednosti (v našem primeru trenutno 1) sestavimo matriko sosednosti. Ko imamo matriko sosednosti pripravljeno, jo lahko skrčimo z MATLAB-ovo funkcijo »sparse«, ki povzroči, da se vsi neničelni elementi in njihove lokacije shranijo, ničelni pa ne. Veliko elementov matrike je enakih 0, zato je smiselno celotno matriko sosednosti shraniti v razpršeni (angl. sparse) obliki in s tem prihraniti na shranjevalnem prostoru.

#### 7.2.1 Uteži matrike sosednosti

Bistvenega pomena pri določanju zasnove merilnega območja je določitev uteži posameznih elementov v strukturi grafa. Utež je v matriki sosednosti določena na povezavi, vendar lahko s poznavanjem začetnega oziroma končnega vozlišča določene cevi prenesemo utež vozlišča na utež povezave. Od uteži je odvisno, kako se bodo oblikovala merilna območja, vendar z upoštevanim pogojem, da mora algoritem zasnove podgrafov pri izvedbi upoštevati tudi uteži. Kar precej dolgo časa smo razmišljali in preizkušali, katere podatke hidravličnega modela uporabiti kot uteži matrike sosednosti, ki se odražajo na končnih rezultatih zasnove DMA con. Vedno se moramo vprašati, kakšen je cilj naše naloge. Naš cilj je zasnovati takšna merilna območja, da imamo čim manjše število vtočnih mest in zaprtih cevi.

Pri uporabi algoritma spektralnega razbitja grafov, ki je opisan v podpoglavju 3.3.6, sta v ospredju pogoja o vrednostni funkciji in velikosti vsakega podgraфа glede na število elementov.

Prvi pogoj o vrednostni funkciji izbere tisto rešitev, ki ima minimalno vsoto vrednosti uteži na ceveh med posameznimi podgrafi. Torej je smiselno, da so te uteži, ki jih obravnava algoritem čim manjše in so v povezavi s hidravličnimi lastnostmi VS. Zelo smiselna utež iz tega vidika bi bil pretok vode v cevi. Pretok vode v cevi je lahko tudi enak 0, če nimamo definirane porabe v vozlišču na koncu cevi. Zato je potrebno predpostaviti tem cevem majhne vrednosti pretokov,



vendar smo kasneje ugotovili, da takšne vrednosti v nekaterih primerih lahko močno vplivajo na zasnovno merilnih območij. Za pravilno delovanje algoritma morajo biti uteži na tovrstnih ceveh večje od 0. Zato smo se odločili za definiranje takšne uteži, ki je v vseh ceveh različna od 0. Odločili smo se za kombinirano utež. To je utež, ki je sestavljena iz več podatkov hidravličnega modela skupaj. Za takšen pristop smo se odločili, ker želimo pri zasnovi zajeti več različnih podatkov, ki izboljšujejo zasnovno DMA con.

Prvi podatek je parameter notranjega premera cevi. Za notranji premer cevi smo se odločili, ker je povezan s pretokom cevi in je definiran v vseh ceveh ne glede na hidravlični izračun. Drugi podatek je spremenljivka hidravlična višina. V tej spremenljivki sta zajeta dva podatka: parameter nadmorska višina vozlišča in spremenljivka tlak v vozlišču. Nadmorska višina je pomembna z vidika možnega ustvarjanja PMA con, tlak pa je tudi v korelaciji s pretokom vode. Na mestu uteži povezave se je upoštevala končna oziroma manjša hidravlična višina, ker smer toka vode poteka proti manjši hidravlični višini. Oba parametra sta normirana in seštetata v skupno enovito utež. Podatek o notranjem premeru cevi je fiksna, medtem ko je spremenljivka hidravlična višina deloma fiksna (nadmorska višina vozlišča) in deloma spremenljiva (tlak v vozlišču).

Parametra o porabi vode nismo upoštevali, ker ga je težavno vključiti zaradi velikega števila vozlišč brez porabe. Porabe se lahko tudi precej razlikujejo med seboj, zato je težko določiti takšno vrednost, ki ne bi vplivala na končno rešitev zasnovne.

Pogoj o velikosti podgrafov pa poskrbi, da posamezni podgrafi niso preveliki oziroma po drugi strani premajhni. Če se formira večji podgraf, so posledično drugi podgrafi manjši. Pogoj o velikosti podgrafov je zaradi tega zelo pomemben. Če je poraba vode približno enakomerno porazdeljena po VS, že pogoj o velikosti vpliva na enakomerno vsoto porabe po DMA conah.

Če bi se omejili na kakovost vode in bi imeli število DMA con omejeno na število vtočnih in iztočnih cevi (v našem primeru 3), bi lahko po drugi strani uporabili Floyd-Warshallov algoritem. Za referenčne točke oziroma centroide bi izbrali vtočna in iztočna mesta. Predstavljajmo si, da želimo priti iz neke točke do vseh preostalih točk po čim krajši poti oziroma razdalji. Torej moramo za algoritem upoštevati takšno utež, ki ponazarja gibanje delca vode od začetne do vsake druge naključno izbrane točke v grafu. Zato se nam zdi smiselno, da bi se kot utež v matriki sosednosti lahko upošteval čas, ki ga delec vode porabi za transportiranje od vodnega vira do vsakega drugega naključno izbranega vozlišča VS.

Čas transporta vode pa lahko določimo iz hitrosti vode v posamezni cevi, katere vrednost se deli z dolžino cevi, da pridobimo časovno enoto. Za analizo bi obravnavali vrednosti hitrosti vode pridobljene iz simulacije hidravličnega modela pri srednji porabi vode. Predpostavili bi, da je za grobo zasnovno merilnih območij zadostno upoštevati srednje povprečne razmere v hidravličnem modelu. Poleg tega pa se vrednosti hitrosti vode pri različnih obtežbenih primerih (maksimalna, srednja in minimalna poraba vode) precej podobne med seboj.

Spremenljivka hitrost vode je zelo uporabna za Floyd-Warshallov algoritem, ker se vrednosti hitrosti izbrane cevi in njene sosednje cevi ne razlikujejo prav veliko. Če pa bi razlike med vrednostmi hitrosti vode bile večje, potem obstaja zelo velika verjetnost, da bi na tej lokaciji nastalo razmejitveno mesto oziroma mejna cev med dvema DMA conama. Če se takšna razlika pojavi na lokaciji precej blizu referenčne točke, je zasnova rešitve neustrezna, saj formirana DMA cona ne predstavlja dovolj velikega območja, da bi se lahko upoštevala kot samostojna cona. Povsem mogoča je možnost pojavljanja samo nekaj cevi in vozlišč, ki bi pripadala eni DMA coni. To se lahko zgodi, če upoštevamo druge podatke hidravličnega modela kot uteži matrike sosednosti. Povsem logično je, da imajo cevi, ki so lokacijsko bližje vodnemu viru drugačne karakteristike kot cevi, ki so bližje vozliščem porabnikov (npr. premer cevi). Zaradi tega dejstva lahko pride do večjih razlik med utežmi posameznih dveh cevi, ki sta v bistvu sosednji cevi, kar pa negativno vpliva na iskanje najkrajše razdalje med dvema vozliščema pri

izvajanju Floyd-Warshallovega algoritma. Problematični primer se pojavi, če ima VS samo eno vtočno mesto. Potem se lahko formira samo ena DMA cona za mogoče zelo kompleksno VO. Zaradi tega dejstva se nismo odločili za uporabo Floyd-Warshallovega algoritma, čeprav podaja primerne in uporabne zasnove, če se za centroide določi vtočna in iztočna mesta. Poleg tega je slabost še omejenost na določeno število DMA con in nima vpliva na velikost DMA con.

V nadaljnjih korakih razvoja uporabe Floyd-Warshallovega algoritma bi bilo mogoče zanimivo preveriti, v kakšni meri prihaja voda iz referenčnega vozlišča do vsakega drugega izbranega vozlišča v VS in kakšna je korelacija s hitrostjo vode. Sledenje se lahko izračuna s programom EPANET 2.0 in za vsako izbrano vozlišče preveri delež pripadnosti vode posameznemu vodnemu viru oziroma začetnemu vozlišču. Deleži so izraženi procentualno. Izračunane rezultate bi se mogoče lahko uporabilo kot utež in kombiniralo s časom potovanja, da bi se kasneje lahko upoštevala pri formiranju uteži za matriko sosednosti.

### 7.2.2 Število DMA con

Pri metodi zasnove merilnih območij se vedno pojavi vprašanje o številu merilnih območij, ki ga moramo določiti še pred uporabo algoritma. S tem vprašanjem je neposredno povezana tudi velikost posameznega merilnega območja. Pri večjem številu merilnih območij so posamezna merilna območja manjša in pri manjšem številu merilnih območij so večja. To velja, če so merilna mesta približno enake velikosti. V naši metodi želimo, da so DMA cone približno enake velikosti.

Večje število merilnih območij je povezano tudi z večjim številom merilnih mest in merilnih instrumentov, ki jih je potrebno namestiti v jaške. Vendar je s tem po drugi strani VO razdeljeno na manjše enote in je zato možno hitreje in natančneje identificirati lome cevi. Enostavnejše je tudi nadzorovanje razmer v VS. Narediti je potrebno analizo stroškov in koristi, ki jih določeno število DMA con prinaša. Vložena investicijska vrednost potrebna za zasnovno merilnih DMA con se mora na daljši rok povrniti z regulacijo tlaka v DMA coni in hitrejšim odkrivanjem dejanskih vodnih izgub.

Primerno število DMA con je obravnavala Ferrarrijeva (2014). To se lahko določi na podlagi podatkov o porabi vode na priključnih mestih. Glede na porabo vode je mogoče določiti primerno število DMA con. Število con pa ni enolično določeno, ampak je podano kot minimalno oziroma maksimalno število DMA con.

Takšen način se nam zdi primeren, ker nam metoda poda več rešitev za različno število DMA con in bi jih potem bilo možno primerjati med seboj v fazi evalvacije.

Minimalno in maksimalno število DMA con je definirano po naslednjih enačbah:

$$W_{dmin} = \frac{W_{tot}}{C_{tot}} C_{max} \quad (31)$$

$$W_{dmax} = \frac{W_{tot}}{C_{tot}} C_{min} \quad (32)$$

$W_{dmin}$  = minimalna poraba (l/s)

$W_{dmax}$  = maksimalna poraba (l/s)

$W_{tot}$  = celotna poraba (l/s)

$C_{tot}$  = celotno število priključkov

$C_{max}$  = maksimalno število priključkov v DMA coni

$C_{min}$  = minimalno število priključkov v DMA coni

Pri tem moramo še definirati  $K_{min}$  in  $K_{max}$ :

$$K_{max} = \frac{W_d}{W_{dmin}} \quad (33)$$

$$K_{min} = \min\left(\frac{W_d}{W_{dmax}}, n_c\right) \quad (34)$$

$K_{min}$  = minimalno število DMA

$K_{max}$  = maksimalno število DMA

$W_{dmax}$  = določena maksimalna poraba (l/s)

$W_{dmin}$  = določena minimalna poraba (l/s)

$W_d$  = celotna poraba (l/s)

$n_c$  = število povezav s transportnim vodom

Vendar pa kaj kmalu ugotovimo, da navedene formule nudijo zelo velik interval sprejemljivosti rešitev glede števila DMA con in velikosti DMA cone glede porabe vode. Dejanske vodne izgube so možne tudi v predelih z majhno porabo, kjer se voda samo transportira naprej v druga območja. Zato bomo glede velikosti upoštevali samo približno enakomerno število vozlišč v vsaki DMA coni oziroma le strmeli k temu cilju, kar pa je že vključeno v spektralno razbitje grafov.

Število DMA con je sicer najbolj odvisno od dejanskih vodnih izgub v VS. Kjer so evidentirani večji deleži izgub, je smiselno zasnovati manjše DMA cone. Morrison et al. (2007) navaja, da je primerna velikost DMA cone glede na število priključkov, podano z minimalnim in maksimalnim številom priključkov na DMA cono. Meji predstavljata zelo velik interval ravno zaradi raznolikosti VS. Minimalna meja je načeloma lahko še manjša, če so bile ugotovljene večje vodne izgube.

Pri naši nalogi smo se odločili, da formiramo enakomerne DMA cone, za število  $k$  izberemo različna števila, zasnujemo rešitve ter primerjamo neprekinjenost vodnega toka in odpornostni indeks  $lr$ . Število  $k$  spreminjamo, dokler so rešitve še smiselne oziroma se formirajo dovolj velike DMA cone. Ko imamo matriko sosednosti pripravljeno, jo lahko uporabimo kot vhodni

podatek za algoritem spektralnega razbitja. Algoritem poleg matrike sosednosti zahteva še število DMA con  $k$  in število ponavljanj  $r$ . Matrika sosednosti  $A$  in število ponavljanj  $r$  je fiksno, medtem ko se število DMA con  $k$  spreminja. Algoritem vsakemu vozlišču, ki je vključeno v VO, pripiše oznako o pripadnosti posameznemu podgrafu.

### 7.2.3 Mejne cevi

Linijskih elementov algoritem spektralnega razbitja ne obravnava, ampak je možno pripadnost posameznemu podgrafu narediti s poizvedbo začetnih in končnih vozlišč vseh linijskih elementov, saj algoritem pripiše vsakemu vozlišču oznako, s katero ugotovimo pripadnost posameznemu podgrafu. Torej lahko tudi cevem posredno določimo pripadnost posameznim podgrafom. Vendar pa to ne velja za vse cevi. Cevi so definirane z začetnim oziroma končnim vozliščem. Za nekatere cevi velja, da začetno in končno vozlišče pripada različnim podgrafoma, zato ju ne moremo pripisati niti prvemu niti drugemu podgrafu. Tovrstne cevi bomo obravnavali posebej in jih bomo poimenovali mejne cevi, saj predstavljajo mejne oziroma povezovalne elemente med posameznimi DMA conami. Cilj našega raziskovanja in dela je, da bi bilo število mejnih cevi čim manjše.

Na lokacijo mejne cevi se izvede vgradnja merilnega jaška z ustrezno merilno opremo ali pa se cev zapre z zapornimi elementi, če želimo, da postane element nepretočen. Lahko bi se sicer odločili, da bi pri algoritmu iskali mejna vozlišča namesto mejnih cevi, saj vozlišča predstavljajo točkovne elemente kot so tudi jaški. Možno bi bilo tudi na drugačen način pristopiti k temu problemu. V definiciji matrike sosednosti bi morali namesto vseh linijskih elementov definirati fiktivna vozlišča. Torej bi naš novi graf imel dvakrat toliko cevi kot prvotni graf, število vozlišč pa bi se s prvotnega števila vozlišč povečalo za prvotno število cevi. Uteži grafa se prenesejo na novonastala fiktivna vozlišča, nove cevi pa so brez uteži. Še drugi, mogoče enostavnejši pristop bi bil zamenjava vlog med cevmi in vozlišči, torej cevi postanejo vozlišča, vozlišča pa postanejo cevi. V tem primeru ne moremo upoštevati kriterija uteži kot vhodni podatek algoritma. Mi smo se sicer odločili za primer, ko algoritem ugotovi pripadnost vseh točkovnih elementov posameznim DMA conam, posredno pa poiščemo še mejne cevi. Za izbrani pristop smo se odločili, ker obstaja precej velika verjetnost, da na lokaciji mejnega vozlišča v realnosti ni možna izgradnja jaška, ki mora ustrezati določenim dimenzijam, da vanj vstavimo vso potrebno opremo. Nekatere mejne cevi predstavljajo daljše elemente in se lahko lokacija jaška spreminja glede na razpoložljivo kapaciteto prostora in lokacijo začetnega oziroma končnega vozlišča, s katerima je definirana cev. Pri ceveh kratkih dolžin pa ne moremo spreminjati lokacije jaška glede na razpoložljivi prostor.

### 7.2.4 Transportni vod in pretočnost DMA con

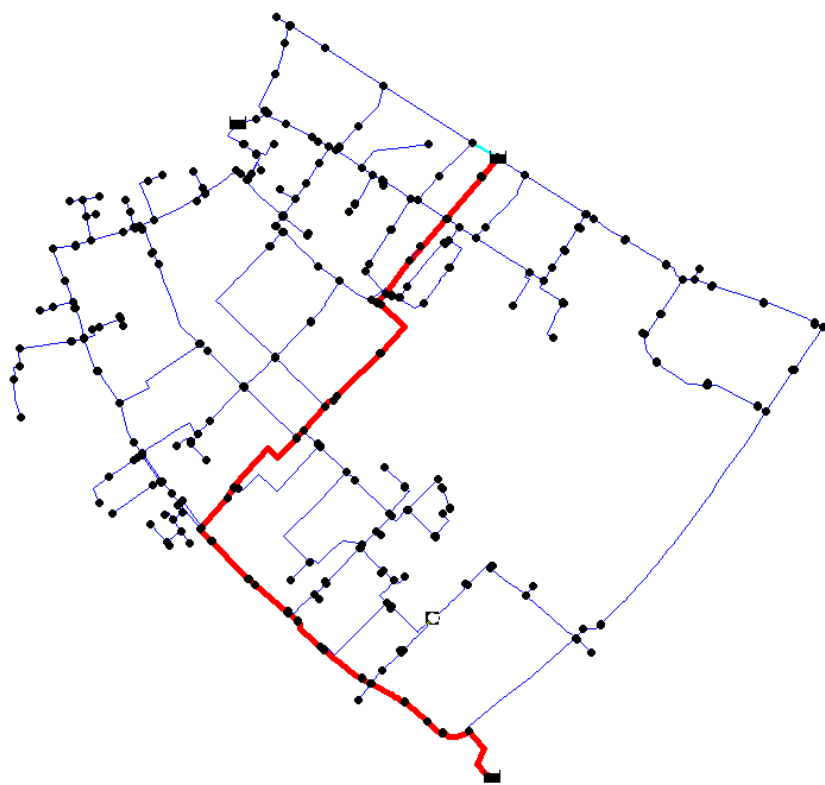
Namen umeščanja DMA con v VS je enostavnejši nadzor nad celotnim delovanjem sistema. Večkrat je bilo že poudarjeno, da bi se pri oblikovanju magistralni vod izločil iz postopka zasnove (Morrison et al., 2007), saj naj bi se pri tem obravnavalo le distribucijsko omrežje. Po končanem oblikovanju con, naj bi imele vse formirane cone neposredno povezavo na magistralni vod z namenom zagotavljanja stalnega vodnega vira. Transportni vod namreč direktno povezuje vodni vir in distribucijsko omrežje. S tem se vsaki DMA coni zagotovi dostop do vodnega vira.

Vendar pa se pri tem lahko pojavijo določeni problemi. Problemi se lahko pojavijo v povezavi s tem, kaj se privzema kot magistralni vod. Prvi indikator, ki bi bil na prvi pogled primeren, je notranji premer cevi DN. Vendar po krajšem premisleku ugotovimo, da določanje neke vrednosti premera (npr. 300 mm in več) ni primerno generalno za vse VS, ker v manjših sploh

ni cevi s takšnimi premeri ali pa so določeni odseki takšnih dimenzij zaprti. Pomembna je še neprekinjenost transportnega voda od vodnega vira do najbolj oddaljenih predelov distribucijskega omrežja. Zato bi bil v tem primeru boljši indikator pretok v cevi od začetnega vozlišča (tj. vodni vir) do preostalih predelov omrežja. Poiskala naj bi se pot z maksimalnim pretokom.

Ko imamo definiran transportni vod, se pojavijo še drugi problemi. Če poteka transportni vod preko močno prepletenega VO, potem obstaja zelo veliko točkovnih priključitvenih mest med distribucijskim omrežjem in transportnim vodom. Za izoliranje posamezne cone bi morali zapreti zelo veliko število cevi z nekaterimi izjemami, ki bi predstavljale vtok v DMA cono. Torej se v tem primeru pojavijo problemi zaradi same zasnove in topologije VO. Problematični so tudi manjši predeli omrežja v obliki drevesa, ki imajo korenisko vozlišče na transportnem vodu. Če se cev med transportnim vodom in drevesom zapre, potem preprečimo dotok vode v drevesno strukturo.

Zato smo se odločili, da odstranimo transportni vod iz postopka zasnove DMA con, če le ta zelo očitno izstopa od preostalega dela omrežja. Takšen primer je, ko ima zelo malo točkovnih priključitvenih povezav na preostali del. V našem delovnem primeru, ne bomo definirali in odstranili transportnega voda, ker je v preveliki meri povezan s preostalim delom. Na spodnji sliki je z rdečo barvo označena cev, po kateri se pretaka največja količina vode v delovnem primeru. Pri tem še enkrat poudarjamo, da so vse cevi v delovnem območju odprte.

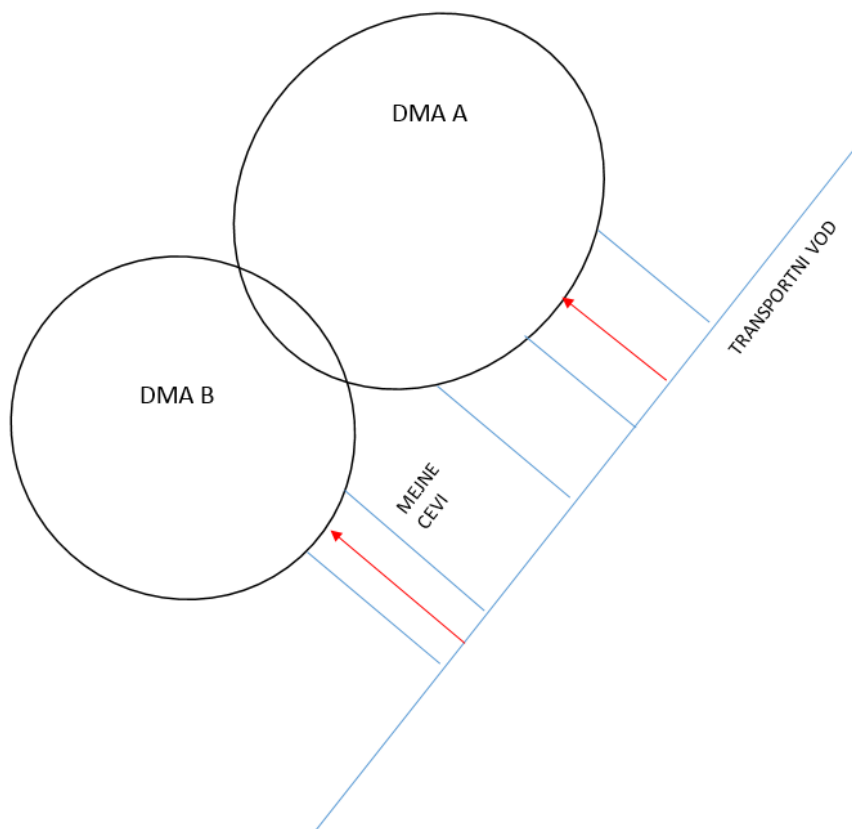


J44

Slika 33: Z rdečo barvo poudarjen transportni vod delovnega primera

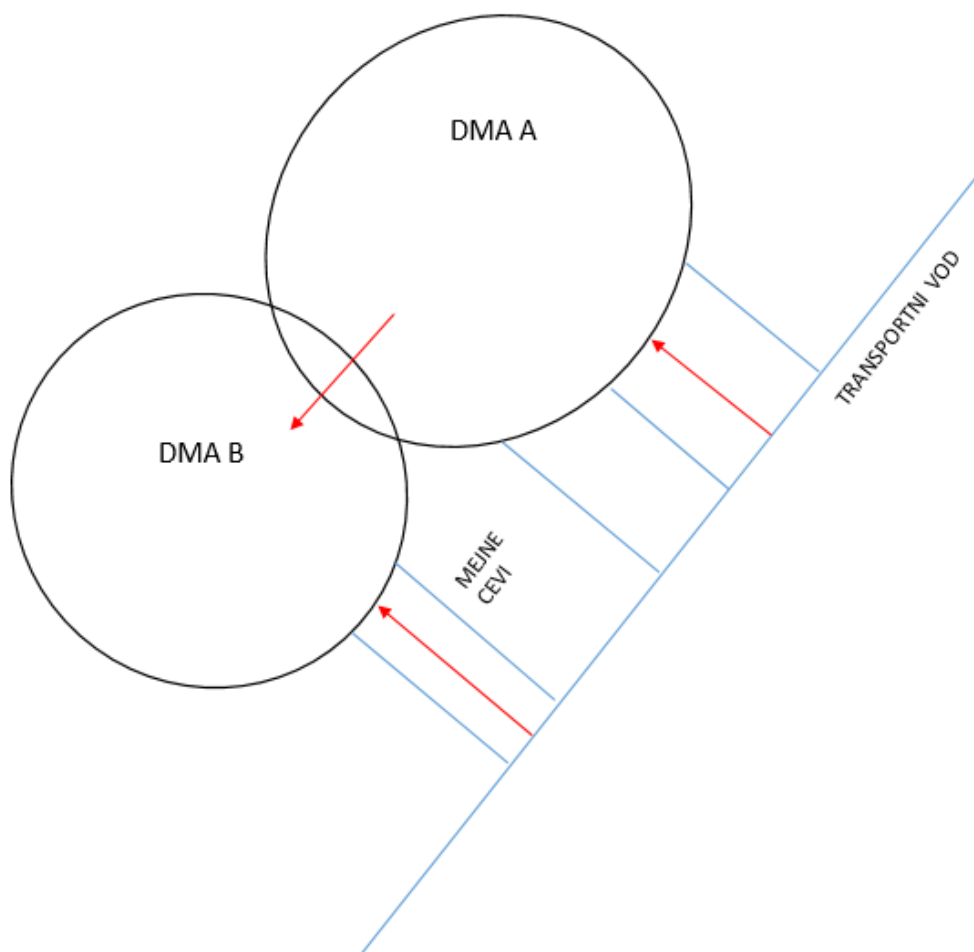
Na tem mestu se potem pojavi še vprašanje o povezanosti oziroma odvisnosti DMA con med seboj. Lahko imamo primer, ko se vsaka DMA cona napaja iz vodnega vira preko transportnega voda. Vsaka DMA cona je neodvisna od drugih con in se napaja po enakem principu neposredno iz vodnega vira ter je nepretočna. Tovrstne bomo poimenovali nepretočne cone. Prednost takšnih con je, da jih v primeru onesnaževanja ali okvar lahko zapremo in pri

tem preostali del sistema še vedno normalno obratuje. Slabost pa je v kakovosti vode, ker voda samo vteka v cono in se porablja na odjemnih mestih. Če gre za majhno gospodinjstvo porabo in imamo velike notranje premere cevi, je hitrost vode lahko zelo majhna, kar slabo vpliva na zdravstveno ustreznost vode. DMA cone je v teh primerih potrebno redno izpirati preko hidratov na slepih odsekih. Primer take zasnove je prikazan na Sliki 34. Na sliki sta prikazani dve DMA coni, ki sta neodvisni med seboj in sta povezani neposredno na vodni vir preko transportnega voda. Rdeči puščici ponazarjata smer vodnega toka.



Slika 34: Nepretočni coni

Drugi primer pa je, da sta dve ali več DMA con povezanih med seboj. S tem se lahko izboljša pretočnost posameznih con, pri katerih se prepreči zastajanje vode v posamezni coni. Tovrstne cone bomo poimenovali pretočne cone. V tem primeru voda teče oziroma se pretaka iz ene v drugo DMA cono. Torej prva DMA cona zagotavlja dotok drugi DMA coni in je zato odvisna od prve. S takim principom delovanja se izboljša pretočnost in s tem tudi kakovost VS, ker imamo manj možnih lokacij, kjer bi voda lahko zastajala. Pojavijo pa se problemi, če pride do kakršnekoli okvare, zaradi katere bi bilo potrebno zapreti celotno območje. S tem se potem prepreči dotok vode v vse DMA cone, ki se napajajo iz iste cone. Poleg tega je tudi pregled in nadzor nad celotnim sistemom slabši. Razmere za takšen primer so prikazane na Sliki 35. Situacija je skoraj identična kot na Sliki 34, vendar sta v primerjavi z njo DMA coni povezani.



Slika 35: Voda, ki se kaskadno pretaka iz DMA A v DMA B

V našem primeru se bodo na območju transportnega voda formirale DMA cone. Te cone bodo pretočne, ker voda prehaja iz ene DMA cone v drugo. DMA cone, ki niso pozicionirane na območju transportnega voda pa so nepretočne in se bodo napajale z vodo iz pretočnih DMA con. Nepretočnim conam je potrebno izdelati načrt rednega izpiranja vode preko hidrantov.

### 7.2.5 Statusi mejnih cevi

Ko imamo formirane DMA cone in definirane mejne cevi med posameznimi DMA conami, se lahko odločimo, da bi nekatere cevi zaprli in s tem omejili število merilnih mest, vendar pa moramo na preostalih mejnih ceveh še vedno namestiti zaporne elemente, seveda če ti še niso bili nameščeni v času načrtovanja VS. Sedaj se postavi vprašanje, katere in koliko cevi lahko zapremo, da ne poslabšamo kakovosti storitve distribucije vode končnim porabnikom. Stremimo k temu, da bi bilo zaprtih mejnih cevi čim več in merilnih mest čim manj, vendar še vedno v takšnem obsegu, da so v VS na razpolago ustrezno visoke tlačne razmere in so pretoki ter tlaki v posameznih DMA conah evidentirani s pomočjo stalnega monitoringa.

V poglavju o teoriji grafov smo definirali pojem minimalno vpeto drevo, kar bomo uporabili na tem mestu. Imamo namreč  $k$  skupin (v našem primeru DMA con). Če želimo z minimalnim številom povezav obiskati vse skupine, ugotovimo, da je število povezav enako natanko  $k-1$ . Vrednost  $k-1$  predstavlja število mejnih cevi, na katerih bodo nameščeni merilni jaški z vso

zahtevano opremo. S tem zagotovimo dotok vode vsem DMA conam in izvajanje monitoringa vode za kasnejši izračun bilance. S tem smo definirali število odprtih cevi.

Sedaj se moramo še odločiti, katere cevi bodo ostale odprte. To smo storili s kombinacijami iz področja kombinatorike. Na razpolago imamo neko določeno število, denimo  $m$  mejnih cevi. Poznano je minimalno število odprtih cevi, da lahko vsem DMA conam zagotovimo dotok vode. To je vrednost  $k-1$ . Ko imamo oba podatka pripravljena, moramo napraviti takšno zaporedje števil, kjer je  $k-1$  mest enaka vrednosti 1, preostala mesta v zaporedju pa so enaka vrednosti 0. Mesta, kjer se nahajajo vrednosti 1 oziroma 0, trenutno še niso pomembna. Za zaporedje poiščemo vse možne kombinacije. Kombinacije lahko združimo v matriko, ki ima število vrstic enako številu kombinacij. Matrika bi bila lahko tudi transponirana, pomembno je le, da jo pravilno definiramo, ko jo uporabimo pri nastavljanju statusov cevi na vrednost 0 oziroma 1 za vse mejne cevi. To lahko storimo s funkcijo »ENsetlinkvalue« v MATLAB-u. V tem koraku pa so pomembna mesta vrednosti 0 oziroma 1 v posamezni kombinaciji, saj se bodo v zanki nanašala na indekse cevi.

Za vsako izbrano kombinacijo se nastavijo statusi cevi na določeno vrednost za vse mejne cevi. Torej moramo v »for« zanki iterirati po indeksih mejnih cevi in ne po zaporedju naravnih števil do števila vseh mejnih cevi. Za možno kombinacijo statusov cevi se potem izvede hidravlična simulacija, ki je potrebna za pridobitev rezultatov hidravličnega modela namenjenih izračunu Todinijevega odpornostnega indeksa  $I_r$ . V naboru možnih rešitev dobimo več rešitev, ki se povečuje z naraščajočim številom DMA con in posledično tudi mejnih cevi. Torej, če imamo večje število DMA con, se poveča tudi število mejnih cevi, vendar je tudi v neki meri v povezavi s številom stopenj v vozliščih VO. V VO, ki ima zelo gosto mrežasto ali krožno zasnovano strukturo oziroma je število stopenj vozlišč zelo veliko, lahko pričakujemo večje število mejnih cevi, ki jih je potrebno v nadaljnjih korakih analizirati. To dejstvo seveda vpliva na povečani računski čas celotnega algoritma.

### 7.2.6 Preverjanje rešitev s hidravličnimi simulacijami

Potem smo poiskali rešitve z maksimalnim odpornostnim indeksom  $I_r$ , vendar je bilo kljub temu smiselno analizirati rešitve, ki so imele manjše ali celo negativne odpornostne indekse  $I_r$ . Zato smo shranjevali posamezne rešitve v obliki .inp datoteke in jih analizirali v programu EPANET 2.0 ter preverjali, kaj se dejansko dogaja v našem VS.

Nekatere rešitve so hidravlično neustrezne, kar se odraža v negativnih tlakih v VS. Tovrstne rešitve smo odstranili iz nabora rešitev. Izkazalo se je, da v kombinaciji cevi, kjer smo z vrednostjo  $k-1$  definirali število odprtih cevi, eni DMA con namenilo več kakor eno cev, posledično pa neki drugi DMA con nobene (DMA cona nima vodnega vira). S tem se je neki DMA con preprečil dotok vode. V celotni DMA con s prekinjenim dotokom vsem vozliščem izračuna negativne tlake. Prihajalo je tudi do drugi napak, kot je npr. smer toka na vodnih virih. V hidravličnem modelu je takšna situacija možna, v realnosti pa ni. Problem je v tem, da smo z robnimi pogoji nadomestili preostali del VS. Zato je pri vsaki izdelani rešitvi smiselno preveriti še druge stvari, kot so delovanje vodnih virov, gladine vode v vodohranih, itd.

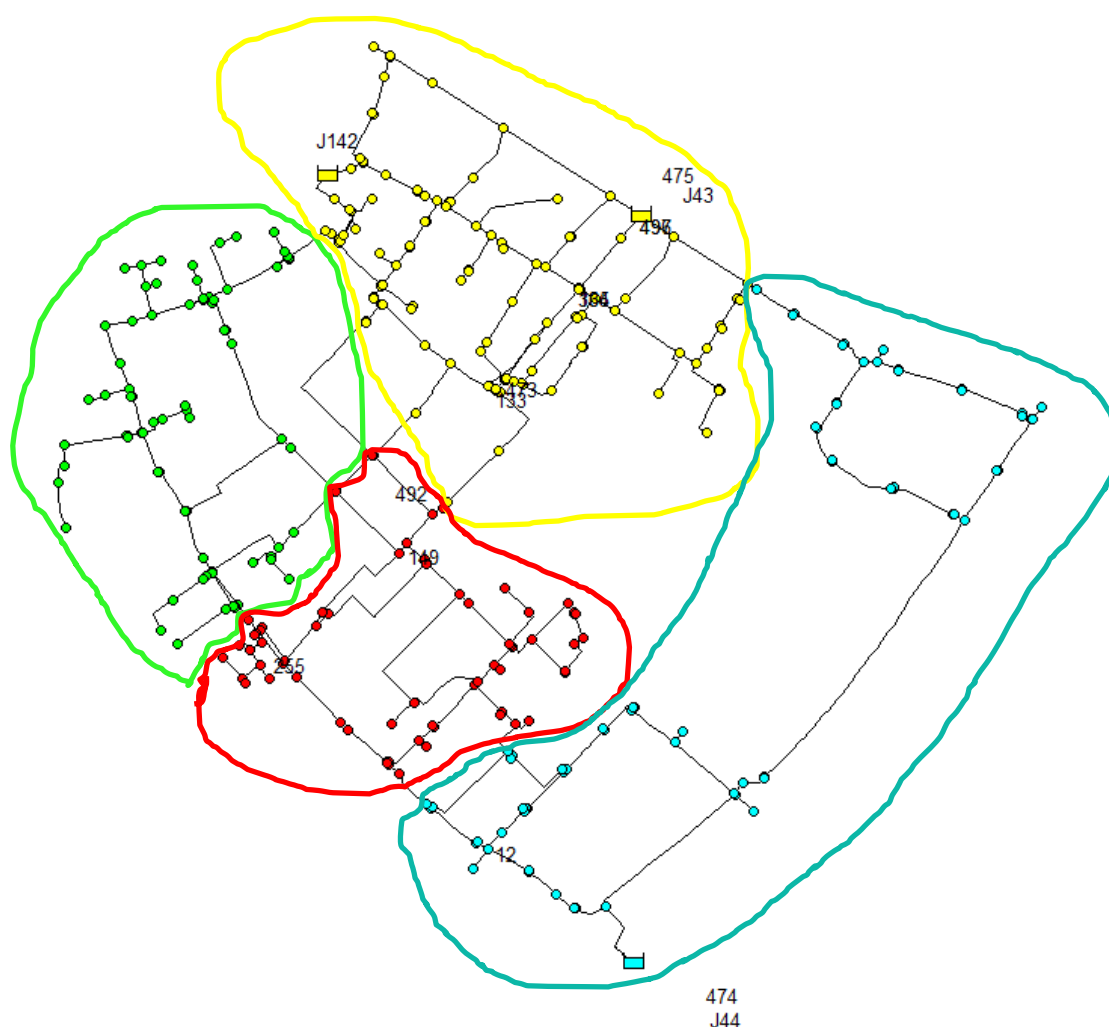
Problem smo rešili na ta način, da smo v obravnavano območje zajeli večji del VS, vendar smo z algoritmom spektralnega razbitja obravnavali samo delovno območje Planine, preostali del VS (Primskovo) pa je deloval kot vplivno območje za boljše ponazarjanje dejanskih hidravličnih razmer. Vplivno območje v našem primeru predstavlja območje Primskovega in S del Planine. V okoliškem delu je namreč večje število vodohranov: vodohran Smladnik, vodovodni stolp v Kranju in vodohran Adergas. Vsi trije vodohrani vplivajo na hidravlične razmere v VS na Planini in je zaradi tega dejstva potrebno v analizo zajeti večji del VS, ki prikazuje realnejšo sliko hidravličnih razmer.



Poleg tega se je na mestu vtoka v Čirče nadomestil vodni vir z vozliščem, v katerega smo definirali porabo enako vrednosti iztoka vode v Čirče. To se nam zdi smiselno, da se lahko v območje Čirč dovede enaka količina vode kot pri prvotnem stanju in s tem zagotavlja zadostna količina vode porabnikom v naselju Čirče in preostalih naselij.

### 7.3 Rezultati

Po iskanju maksimalnega odpornostnega indeksa smo s pregledom posameznih rešitev prišli do ugotovitve, da je najvišji odpornostni indeks pri  $k = 4$  (edino večjo vrednost doseže pri  $k = 2$ , vendar je tedaj število DMA con premajhno). Zasnove posameznih DMA con so z različnimi barvami prikazane na spodnji sliki.



Slika 36: Zasnova DMA con pri  $k = 4$

V spodnjih preglednicah so podani osnovni podatki za rešitev  $k = 4$ .

Preglednica 2: Osnovni podatki pri zasnovi  $k = 4$ 

<i>k</i>	4
<i>Ir1</i>	0.684
število rešitev	20/120
<i>Ir4</i>	0.646
število mejnih cevi	10
število merilnih mest	3
število zapornih ventilov	7

Preglednica 3: Osnovni podatki po zasnovanih DMA conah

	število vozlišč	število cevi	vsota porabe vode [l/s]	dolžina cevi [m]	povprečna nadmorska višina [m]
<b>DMA1</b>	92	94	7.55	1743	383.63
<b>DMA2</b>	83	85	1.51	3410	384.09
<b>DMA3</b>	107	108	5.53	3282	384.00
<b>DMA4</b>	170	179	14.58	4662	387.36

Prvotni odpornostni indeks je enak vrednosti 0.684. Po zasnovi DMA con se vrednost zniža na 0.646. Torej se nam nova zasnova VS ne poslabša pretirano glede tlačnih razmer, vendar bo v nadaljevanju preverjen še primer za maksimalno porabo vode v kombinaciji s pojavom požara.

Generiranih rešitev pri  $k = 4$  je skupno 120. Ker preverjamo vse kombinacije, je število rešitev z negativnimi tlaki kar 57 od skupnih 120 rešitev. Pri tem še dodatno spoznamo, da je kar 43 rešitev takšnih, ki imajo v vsaj enem vozlišču tlake manjše od 25 m. Torej je samo 20 od celotnih 120 rešitev takšnih, ki bi bile primerne glede tlačnih razmer za zasnovano DMA con.

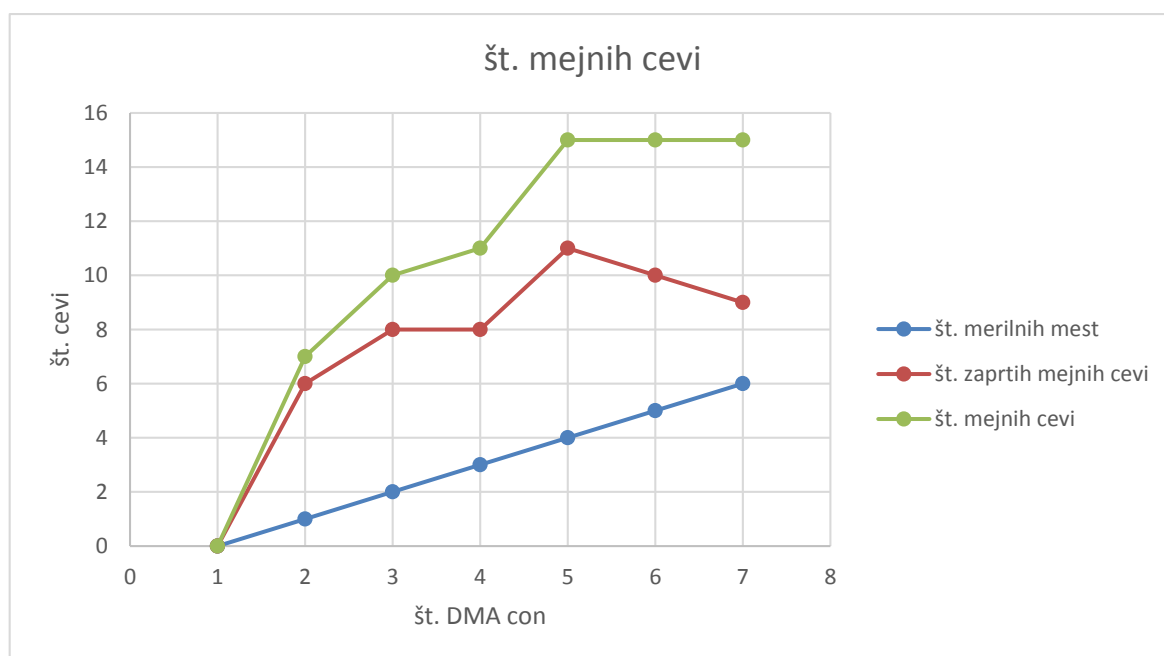
Če še naprej analiziramo rešitve glede števila elementov, ugotovimo, da so precej enakomerne med seboj. Najmanjša in največja cona se razlikujeta približno za faktor 2. Do večjih razlik prihaja pri porabi vode. Še najbolj izrazita je cona DMA4, ki ima zelo veliko porabe v primerjavi s preostalimi conami. Lokalno se v VS pojavi večja koncentrirana poraba vode, ki zaradi vsote porabe vpliva na veliko končno vrednost.

Glede na vsoto dolžin cevovodov v posamezni DMA coni pa ugotovimo, da se maksimalna cona in minimalna cona razlikujeta za približno faktor 3. Ker pa je VS na ravnini, je povprečna nadmorska višina posamezne DMA cone nekaj več kot 380 m.

Pri tem je bilo ugotovljeno, da je maksimalni odpornostni indeks *Ir* povezan z nastavljenjo kombinacijo odprtih statusov cevi z maksimalnimi premeri. Poleg tega je bilo še ugotovljeno, da je pri rešitvi z enako potjo transportnega voda kot pri začetnem stanju odpornostni indeks maksimalen.

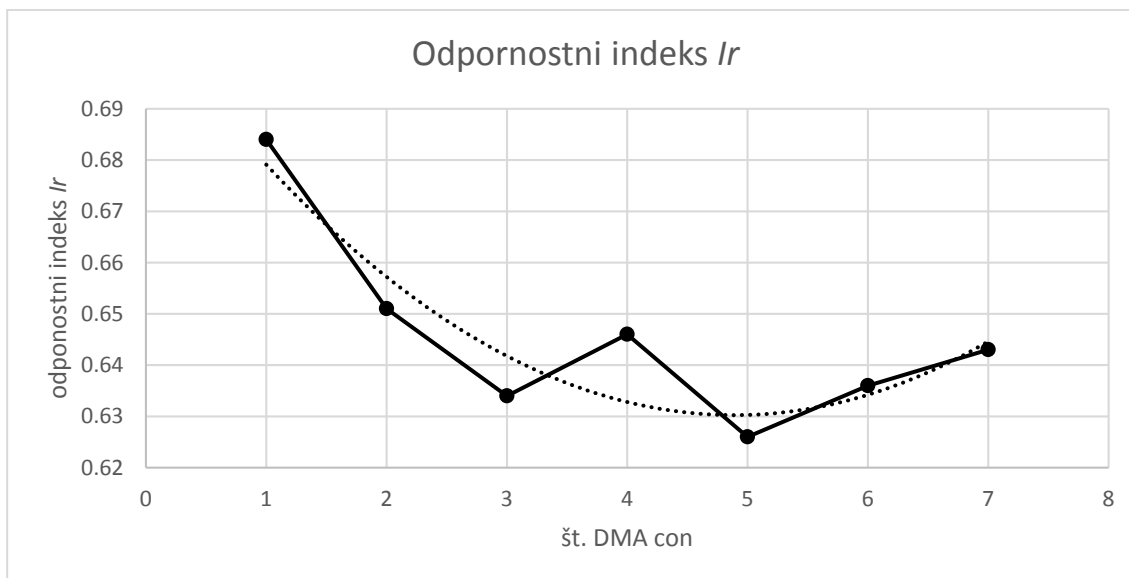
Čeprav smo z maksimalnim odpornostnim indeksom  $lr$  iskali optimalno rešitev za določeno število DMA con, smo pregledali še rešitve za različno število DMA con. Rešitev  $k = 1$  predstavlja stanje, ko je VO nerazdeljeno in je celotno območje ena sama cona. Pregledovali smo rešitve do  $k = 7$ , kjer se prenehajo formirati ustrezne rešitve zaradi majhnosti posameznih DMA con, ne samo glede porabe vode, temveč tudi števila vozlišč oziroma cevi.

Zanimivo je spreminjanje števila mejnih cevi pri različnih vrednostih  $k$ . Zaradi uporabe koncepta minimalno vpetega drevesa je število merilnih mest enako vrednosti  $k-1$  in je linearno naraščajoče. Število mejnih cevi tudi narašča, vendar je zelo zanimivo, da se potem ustali pri  $k = 5, 6$  in  $7$ . To verjetno sledi iz posledice definicije vrednostne funkcije  $C(P)$ , ki lahko vpliva tudi na število mejnih cevi, seveda, če je to v povezavi z minimalno vsoto uteži na teh ceveh. Razlika med številom mejnih cevi in številom merilnih mest predstavlja število zaprtih mejnih cevi. Torej lahko vidimo, da generalno število mejnih cevi narašča z naraščajočim številom DMA con. Koncept o uporabi minimalnega drevesa je uporabljen zaradi nižjih stroškov vgradnje merilnih mest in njihovega monitoringa.



Slika 37: Grafikon št. mejnih cevi

Za odpornostni indeks  $lr$  smo ugotovili, da večje število DMA con zmanjšuje odpornostni indeks  $lr$ . Vendar se pri večjem številu DMA con ( $k = 6$  in  $7$ ) spet rahlo dviguje. Vzrok tega pojava je možen v številu zaprtih mejnih cevi, ki se z večanjem števila DMA con zmanjšuje in s tem povečuje pretočnost VS, kar pa zagotavlja večjo varnost glede vodooskrbe.

Slika 38: Grafikon odpornostnega indeksa  $I_r$  v odvisnosti od št. DMA con

#### 7.4 Preverjanje rešitev na terenu

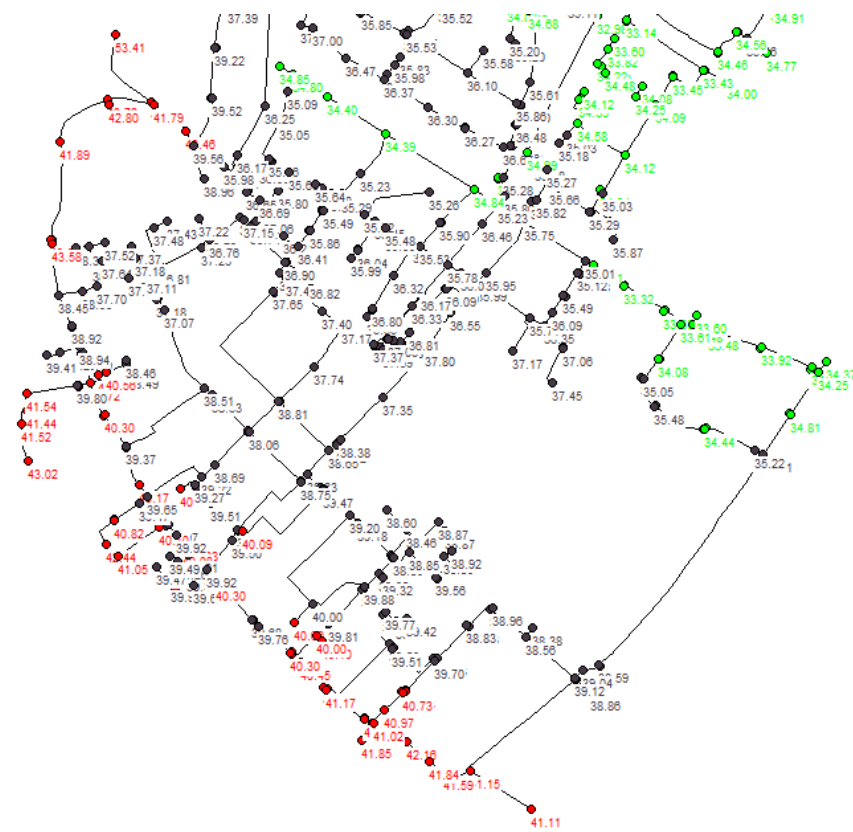
Izračun po predhodno opisani metodi prikaže posamezne lokacije na terenu, kjer naj bi se zgradili merilni jaški in v njih namestili potrebno merilno opremo. Lokacije merilnih jaškov so določene na podlagi topologije hidravličnega modela in se pri tem ne upošteva dejanskih okoliških razmer na terenu. Vsako rešitev in lokacijo je potrebno preveriti na terenu, če je njena rešitev sploh izvedljiva. V to področje spadajo okoliščine, ki so povezane s prometnimi površinami in drugimi omejitvami ter otežujejo izgradnjo merilnega jaška. V vsakem pogledu je pomembna zahtevnost izgradnje jaška, ki je v povezavi z investicijskimi stroški izgradnje jaška.

#### 7.5 Požarna voda

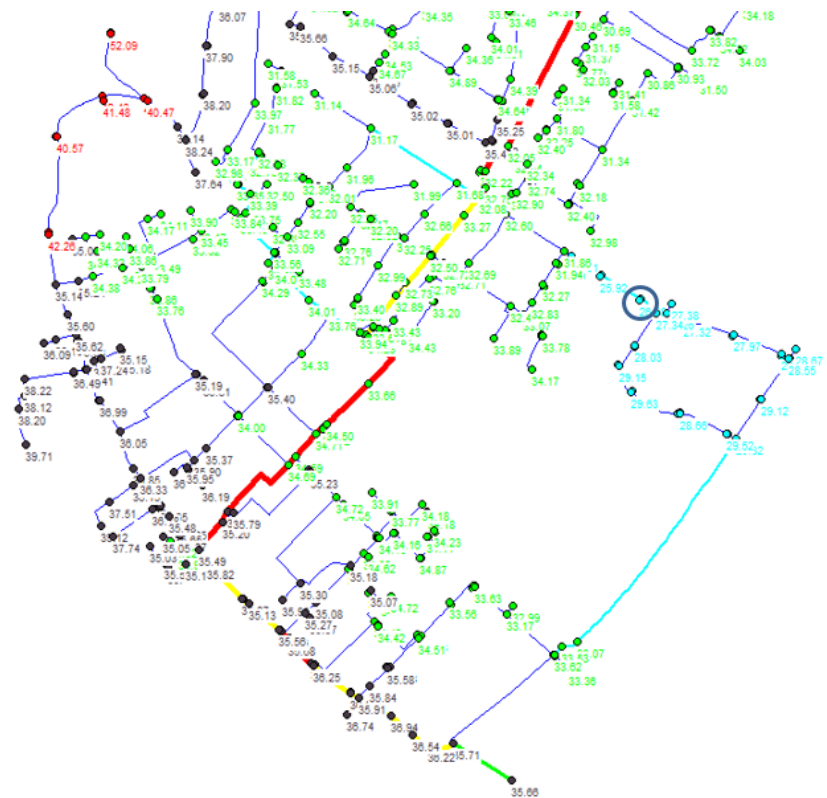
Metodo smo preizkusili na primeru simulacije hidravličnega modela, ko je poraba vode srednja oziroma prikazuje povprečne razmere v VS. Z uporabo in izvajanjem izdelane metode smo pridobili nekoliko drugačno zasnovo VO od prvotne. Zaradi tega dejstva se spremenijo hidravlične razmere v VS.

Vendar pa želimo rešitev še vedno preveriti za merodajni primer tj. kritično porabo vode. Kritična poraba vode se zgodi, ko je poraba v sistemu maksimalna, pri tem pa se pojavi še primer požara. Ker je poraba vode pri porabnikih največja, se potem posledično tudi vrednosti tlakov znižajo na najnižji nivo, kjer pa odvzem vode iz VS preko hidrantov še dodatno zmanjšujejo vrednosti tlakov. Želimo se namreč prepričati, da imamo pri tem obtežbenem primeru v VS še vedno ustrezne tlačne razmere, da imajo okoliški prebivalci nemoteno oskrbo s pitno vodo.

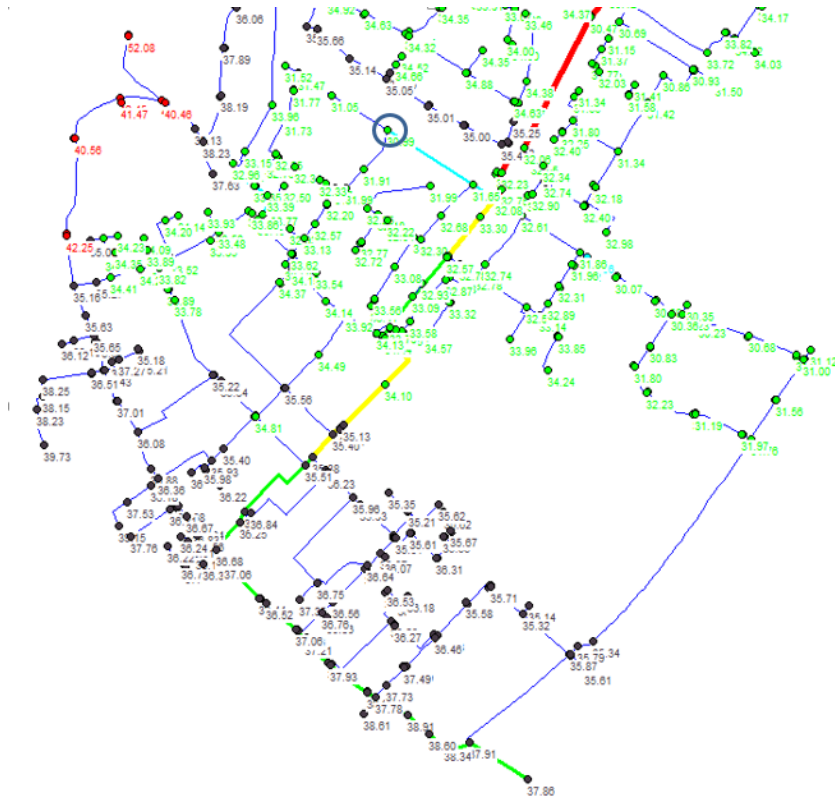
Prepričati se želimo, da je za gašenje požara na razpolago zadostna količina vode in da so tlačne razmere še vedno dovolj visoke. Podatki o simuliranju požara v VS so povzeti iz Pravilnika o tehničnih normativih za hidrantno omrežje za gašenje požarov (UL SFRJ, 30/1991). Simulirana sta dva požarna primera: požarni primer 1 in požarni primer 2. V obeh primerih vrednosti tlakov ustrezajo določbam iz pravilnika.



Slika 39: Vrednosti tlakov pri maksimalni porabi vode brez pojava požara



Slika 40: Vrednosti tlakov pri požarnem primeru 1 (z modrim krogom je označena lokacija požara)



Slika 41: Vrednosti tlakov pri požarnem primeru 2 (z modrim krogom je označena lokacija požara)

## 8 ZAKLJUČEK

V magistrski nalogi so bili spoznani osnovni pojmi glede DMA con in značilnosti njihove vgradnje ter obratovanje v VS. Pregledan je bil širši obseg tematike iz teorije grafov, ki se ga lahko upošteva pri zasnovi DMA con. Pregledan in analiziran je bil nabor znanstvenih člankov, v katerih so se nekateri že ukvarjali z zasnovo DMA con v VS.

V nalogi je bilo preizkušenih več algoritmov, izmed katerih je bil na koncu izbran tisti, ki je generiral najbolj ustrezne rešitve. Izbira algoritma je argumentirana, kot tudi preostali algoritmi, ki niso bili izbrani. Nato je opisan realni delovni primer, na katerem je bil algoritem preizkušen. V zadnjem poglavju je opisano, kako je potekala in se razvijala zasnova metode ter je podana analiza rezultatov.

Pri oblikovanju metode in preizkušanju na realnem delovnem primeru smo prišli do naslednjih pomembnih ugotovitev:

- težavno določiti metodo za zasnovo DMA con, ki bi bila primerna za kompleksne realne primere VS,
- težavna izločitev transportnega voda zaradi same zasnove VS,
- uporaba spektralnega razbitja grafov za večje VS,
- generiranje približno enako velikih DMA con glede števila vozlišč,
- izbira podatkov hidravličnega modela za uteži matrike sosednosti-niso vsi podatki ustrezni,
- minimalno predpostavljeno definiranje ničelnih podatkov hidravličnega modela za namen definiranja povezave v matriki sosednosti lahko občutno vpliva na zasnovo rešitve,
- ustreznost rešitev pri uporabi neničelnih podatkov hidravličnega modela za vhodni podatek matrike sosednosti,
- generiranje večjega števila rešitev, pri katerem ostane pripadnost vozlišč posameznim DMA conam fiksna, spreminjajo se statusi mejnih cevi za odkrivanje optimalne rešitve,
- večje število rešitev je neustreznih glede tlačnih razmer,
- maksimalni odpornostni indeks  $lr$  pri več različnih rešitvah za enak  $k$  je dosežen, če ostane prvotna transportna pot enaka in neprekinjena,
- maksimalni odpornostni indeks  $lr$  je povezan z maksimalnimi premeri mejnih cevi,
- odpornostni indeks  $lr$  v splošnem pada z naraščajočim številom DMA con,
- stroški povezani s spreminjanjem zasnove VS naraščajo z naraščajočim številom DMA con zaradi višjega števila merilnih mest,
- obvezno dodatno preverjanje rešitev kljub visokemu odpornostnemu indeksu  $lr$ ,
- izbrana rešitev je pri kritični porabi vode še vedno ustrezna glede tlačnih razmer.

Za konec bi na tem mestu poudaril še možnost za dodatno oblikovanja uteži matrike sosednosti z uporabo parametrov povezanih s kakovostjo vode. V tem primeru je hidravlični model dinamičen, saj iščemo parametre, ki so odvisni od časa. Kakovost vode se lahko simulira z dodatkom EPANET-MSX. S tem bi bilo možno upoštevati tudi kakovost vode pri zasnovi DMA con.

## VIRI

- Alvisi, S., Franchini, M. 2014. Heuristic procedure for the automatic creation of district metered areas in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 11, 2: 137-159.
- Bailey, D., Wright, E. 2003. *Practical SCADA for industry*. Oxford, Elsevier: str. 222-230.
- Clauset, A., Newman, M., Moore, C. 2004. Finding community structure in very large networks. *Phys. Rev. E*, 70(6), 066111.  
[doi: 10.1103/PhysRevE.70.066111](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.066111)
- De Paola, F., Fontana, N., Galdiero, E. et al. 2013. Optimal design of district metered areas in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 70: 449-457.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Musmarra, D. et al. 2013. A district sectorization for water network protection from intentional contamination. *Procedia Engineering*, 70: 515-524.
- Diao, K., Zhou, Y., Rauch, W. 2013. Automated creation of district metered areas boundaries in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139, 2: 184-190.
- Diestel, R. 2000. *Graph Theory*. New York, Springer-Verlag: str. 9-11.
- Dijkstra, E. W. 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1: 269–271.
- Farley, M. 2010. Are there alternatives to DMA? *Asian Water*, 12: 10-16.
- Fernandez, A. H. 2011. Improving water network management by efficient division into supply clusters. PhD Thesis. Valencia, Universitat Politecnica de Valencia.
- Ferrari, G., Savic, D., Becciu, G. 2014. Graph-Theoretic Approach and Sound Engineering Principles for Design of District Metered Areas. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 140, 12: 04014036.  
[doi:10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000424](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000424)
- Galdiero, E. 2015. Multi-Objective Design of District Metered Areas in Water Distribution Networks. PhD Thesis. Naples, University of Naples Federico II, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering.
- Gorjup, M. 2013. Zgodovinski pregled in trenutno stanje vodopreskrbe v vodovodnem sistemu Kranj. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Hajebi, S., Temate, S., Barrett, A. et al. 2014. Distribution Network Sectorization Using Structure Partitioning and Multi-Objective Optimization. *Procedia Engineering*, 89: 1144-1151.
- Kozak, J. 1986. Podatkovne strukture in algoritmi. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS: str. 40, 135-138, 228, 251.
- Morrison, J. 2004. Managing leakage by District Metered Areas: A practical approach. *Water*, 21: 44-46.
- Morrison, J., Rogers, D., Tooms, S. 2007. *DMA Guidance Notes*. London, IWA Publishing: str. 17, 18, 20-22.



Rossman, L. A. 2000. Epanet 2, Users Manual. Cincinnati, U. S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory: str. 9, 10, 40, 41.

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: str. 20, 21, 60.

Todini, E. 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban Water, 2, 3: 115–122.

Walski, T., Chase, D., Savic, D. et al. 2003. Advanced Water Distribution Modeling and Management. Waterbury, Heastad Methods: str. 30-33, 49-51, 85, 235-249.

Wilson, R., Watkins, J. 1997. Uvod v teorijo grafov. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije: str. 17-25, 41-46, 98-110, 186-197, 201-205, 235-237.

### **Zakoni in pravilniki:**

Pravilnik o tehničnih normativih za hidrantno omrežje za gašenje požarov. UL SFRJ št. 30/1991: 553-555.

Uredba o oskrbi s pitno vodo. Uradni list RS, 88/12.

### **Elektronski viri:**

Algoritmy.net.

<http://www.programming-algorithms.net/article/45708/Floyd-Warshall-algorithm> (Pridobljeno 25. 4. 2016.)

Aniton.

<http://www.aniton.si/text/RZVNJAV825.html> (Pridobljeno: 1. 5. 2016.)

ARSO GIS.

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso) (Pridobljeno 20. 9. 2015.)

ESl.info.

<http://www.buildingservicesindex.co.uk/entry/37137/Herz-Valves-UK/Cast-iron-double-regulating-valves/> (Pridobljeno: 1. 5. 2016.)

Hespanha, J. 2004. An efficient MATLAB Algorithm for Graph Partitioning. Technical Report. University of California.

<http://www.ece.ucsb.edu/~hespanha/published/tr-ell-gp.pdf> (Pridobljeno 1. 4. 2016.)

Kölbl, J. 2014. An International View of Performance Measures. Efficient Water Distribution Seminar, Birmingham.

<http://www.watercourseevents.com/downloads/15%20%20Joerg%20Koelbl.pdf> (Pridobljeno 14. 6. 2016.)

IOBČINA.

<http://gis.iobcina.si/gisapp/default.aspx?a = kranj> (Pridobljeno 20. 9. 2015.)

Komunala Kranj.

<http://www.komunala-kranj.si/vodovodno-omre%C5%BEje> (Pridobljeno 3. 5. 2016.)

Projekt pitna voda zgornja Sava.

[www.pitnavoda-zgornjasava.si](http://www.pitnavoda-zgornjasava.si) (Pridobljeno 3. 5. 2016.)

Graph Theory. UC San Diego, Department of Mathematics.

<http://www.math.ucsd.edu/~jverstra/154-part4-2014.pdf> (Pridobljeno 23. 3. 2016.)

Uvod v uporabo graf-teoretičnih matrik v kemiji, Fakulteta za Matematiko, Naravoslovje in Informacijske tehnologije (UP FAMNIT).

[http://www.sicmm.org/~FAMNIT-knjiga/wwwSI/The\\_Adjacency\\_Matrix-15.htm](http://www.sicmm.org/~FAMNIT-knjiga/wwwSI/The_Adjacency_Matrix-15.htm) (Pridobljeno 23. 3. 2016.)

### **Neobjavljeni viri:**

Dobrovoljec, B. 2016. Podatki o VS. Osebna komunikacija. (21. 1. 2016.).

Steinman, F., Kozelj, D. 2014. Zapiski s predavanj predmeta Vodovod in priprave pitne vode. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.