

UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivana D. Čipranić

**METODOLOGIJA IZBORA  
OPTIMALNE VELIČINE  
OSNOVNE ZONE BILANSIRANJA (OZB)  
U VODOVODNIM SISTEMIMA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivana D. Čipranić

**METHODOLOGY FOR THE SELECTION  
OF OPTIMUM SIZE OF DISTRICT  
METERED AREAS (DMA) IN WATER  
DISTRIBUTION SYSTEMS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015.

Univerzitet u Beogradu  
Građevinski fakultet

Ivana Ćipranić, dipl.inž.građ.

METODOLOGIJA IZBORA OPTIMALNE VELIČINE  
OSNOVNE ZONE BILANSIRANJA (OZB)  
U VODOVODNIM SISTEMIMA

Doktorska disertacija

**Mentor:**

dr Marko Ivetić, redovni profesor  
Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

**Članovi komisije:**

1. dr Marko Ivetić, redovni profesor  
Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
2. dr Miloš Stanić, vanredni profesor  
Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
3. dr Goran Sekulić, vanredni profesor  
Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

Datum odbrane  
doktorske disertacije:

---

Beograd

## **METODOLOGIJA IZBORA OPTIMALNE VELIČINE OSNOVNE ZONE BILANSIRANJA (OZB) U VODOVODNIM SISTEMIMA**

### **Rezime**

Prethodnih decenija je prepoznata opasnost od ugrožavanja vodnog resursa. Paralelno sa tim, gotovo u svim evropskim zemljama, specifična potrošnja vode je imala trend porasta. Povećanje potrošnje vode po glavi stanovnika, je najprije posljedica povećanja gubitaka u vodovodnim sistemima. Poznato je da se gubici vode iz sistema za snabdijevanje ne mogu potpuno eliminisati, ali se mogu kontrolisati. Podjelom vodovodnog sistema na zone znatno se olakšava posao kontrole gubitaka. Opšte prihvaćen naziv za te zone je "District Metered Areas" (DMA), tj osnovne zone bilansiranja (OZB). Osnovna zona bilansiranja je definisana kao zasebna oblast vodovodnog sistema, obično kreirana zatvaranjem zatvarača ili potpunim prekidom cjevovoda, koja ima svoj ulaz i izlaz. U zoni se mjeri količina vode koja ulazi i izlazi iz te oblasti.

Dekompozicija vodovodnog sistema na osnovne zone bilansiranja nije ni malo jednostavan zadatak, jer zavisi od više faktora. Faktori koji utiču na veličinu osnovne zone bilansiranja su tehničke i ekonomske prirode. Kontrola pritiska je važan tehnički faktor u procesu smanjenja gubitaka. Upravljanje pritiskom je danas priznato kao jedna od najisplativijih metoda za smanjenje gubitaka vodovodnih sistema. Ekonomski faktori su najčešće odlučujući u procesu formiranja OZB. Pravilna analiza ekonomskih faktora, koji prate dekompoziciju sistema na OZB je presudni činilac, na osnovu kojeg se preduzeća koja upravljaju vodovodnim sistemima odlučuju na korak zoniranja sistema. Osim faktora tehničke i ekonomske prirode, sociološki faktori su prepoznati kao važni

u procesu podjele sistema na zone. Pod sociološkim faktorima se podrazumjeva uticaj društvene zajednice na važnost rada na smanjenju gubitaka u vodovodnim sistemima.

Obzirom na dosadašnju praksu, pojavila se potreba da se uticaji navedenih faktora objedine u jedinstvenu metodologiju, koja će preciznije definisati postupak određivanja optimalne veličine OZB. Predmet istraživanja, koje je sprovedeno u ovom radu, je analiza faktora koji utiču na izbor optimalne veličine OZB u vodovodnim sistemima. Analizirani su faktori tehničke i ekonomske prirode. Shodno toj analizi, definisana je metodologija izbora optimalne veličine OZB.

**Ključne riječi:** vodovodni distributivni sistem, gubici vode, dobit, osnovna zona bilansiranja, pritisak, troškovi, upravljanje gubicima

**Naučna oblast:** Građevinarstvo

**Uža naučna oblast:** Komunalno i sanitarno inženjerstvo

**UDK:** 626/628.161.1(043.3)

## **METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF OPTIMUM SIZE OF DISTRICT METERED AREAS (DMA) IN WATER DISTRIBUTION SYSTEMS**

### **Summary**

Drinking water supplies have been seriously endangered over the recent decades. In parallel, specific water consumption per capita has grown in almost every country. The significant increase of water consumption per capita predominantly occurs as a result of the increase of water loss in distribution systems. It is well known that water losses from the supply systems cannot be eliminated. However, they can be controlled. Decomposition of water distribution networks into areas enables better water loss management. The generally accepted term for the areas is "District Metered Areas" (DMAs). District Metered Area is defined as a separate part of the water supply system, normally created by closing the valve or by a complete break of the pipeline, which has its entry and exit point. In the area the quantity of water coming in and out is measured.

Decomposition of water supply systems into district metered areas is not a simple task as it depends on a number of factors. The factors influencing the size of district metered areas are grouped into technical and economic ones. Pressure control represents a relevant technical component in the process of water loss reduction. Nowadays pressure management has been recognized as one of the most economical methods for water loss reduction in distribution systems. Economic factors usually play the most crucial role in creating DMAs.

The proper analysis of economic factors, associated with the decomposition of the system into DMAs, is of high importance, depending on which water companies decide upon the district metering. Apart from the technical and economic factors, social factors have been emphasized as significant in the process of dividing the distribution system into areas. The social factors refer to the influence of social community on the very water loss reduction in the distribution systems.

According to the former practice, a need to consolidate the impacts of the stated factors into a unique methodology has emerged. The aim of the methodology would be to define more precisely the procedure of determining the optimum size of DMAs. The subject of the research, conducted in this paper, is the analysis of the factors influencing the selection of the optimum size of DMAs in water supply systems. The technical and economic factors are examined. According to the analysis, the methodology concerning the selection of the optimum size of DMAs is defined.

**Keywords:** benefit, costs, district metered area, leakage management, water distribution system pressure, water losses

**Scientific field:** Civil Engineering

**Field of Research:** Sanitary Engineering

## SADRŽAJ

<b>1 UVOD</b> .....	1
<b>1.1 Predmet i cilj istraživanja</b> .....	6
<b>1.2 Struktura teze</b> .....	7
<b>2 ISTORIJAT RAZVOJA OSNOVNIH ZONA BILANSIRANJA (OZB)</b> .....	9
<b>3 TEORIJSKE OSNOVE I DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA</b> .....	16
<b>3.1 Faktor upravljanja pritiskom kao načinom upravljanja gubicima</b> .....	17
3.1.1 Efekat pritiska na stanje gubitaka u vodovodnim sistemima .....	17
3.1.1.2 Metode za upravljanje pritiskom .....	33
3.1.2 Redukcija pritiska kao najpouzdanija metoda upravljanja gubicima .....	34
3.1.2.1 Konceptija modela za optimalno raspoređivanje reducira pritiska u mreži sistema .....	35
3.1.3 Odnos između pritiska i veličine isticanja na postojećim pukotinama i učestanosti pojave novih gubitaka .....	43
3.1.4 Ekonomske posljedice redukcije pritiska u sistemu .....	45
<b>3.2 Ekonomski faktori koji utiču na formiranje optimalne veličine OZB</b> .....	46
3.2.1 Troškovi formiranja osnovnih zona bilansiranja .....	47
3.2.2 Troškovi pretrage osnovnih zona bilansiranja .....	48
3.2.3 Ukupni troškovi .....	53
<b>3.3 Ostali faktori koji utiču na formiranje veličine OZB</b> .....	54
<b>4 SOPSTVENA ISTRAŽIVANJA</b> .....	56
<b>4.1 Teorijska postavka i dokaz teze</b> .....	56
4.1.1 Upravljanje baznim gubicima .....	61
4.1.2 Upravljanje gubicima iz pukotina .....	63
<b>4.2 Teorijski primjer primjene metodologije u formiranju OZB</b> .....	64
4.2.1 Opis šeme vodovodnog sistema .....	64
4.2.2 Formiranje OZB u vodovodnom sistemu iz primjera i analiza troškova .....	70
4.2.3 Veličina OZB u funkciji gustine priključaka .....	73
4.2.4 Simulacija različitih stanja nastalih formiranjem OZB .....	74



<b>4.3 Simulacija sistema koji se snabdijeva vodom iz dva rezervoara, formiranje OZB i njihov uticaj na smanjenje gubitaka i troškova .....</b>	<b>88</b>
4.3.1 Kriterijumi za formiranje OZB u vodovodnom sistemu iz primjera .....	94
4.3.2 Simulacija stanja u sistemu nastalom formiranjem OZB sa manjim brojem priključaka i analiza dobiti i troškova .....	95
4.3.3 Simulacija stanja u sistemu nastalom formiranjem OZB sa većim brojem priključaka i analiza dobiti i troškova .....	101
4.3.4 Analiza troškova u funkciji od veličine OZB za dati primjer.....	104
4.3.5 Posljedice podjele sistema na zone.....	105
<b>4.4 Rekapitulacija dobijenih rezultata .....</b>	<b>106</b>
<b>5 PRIMJER PRIMJENE PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA FORMIRANJU OZB U VODOVODNOM SISTEMU PODGORICE .....</b>	<b>108</b>
<b>5.1 Sadašnje stanje vodovoda Podgorice .....</b>	<b>108</b>
5.1.1 Istorijat razvoja vodovoda Podgorice .....	108
5.1.2 Vodovodni sistem Podgorice danas.....	109
5.1.3 Upravljanje vodovodnim sistemom Podgorice.....	110
5.1.4 Simulacija sadašnjeg stanja vodovodnog sistema Podgorice.....	116
<b>5.2 Formiranje OZB, simulacija i rezultati simulacije sistema vodovodnog sistema Podgorice nakon formiranja OZB .....</b>	<b>118</b>
5.2.1 Upravljanje gubicima u zoni sa nižim pritiscima .....	118
5.2.2 Upravljanje gubicima u zoni sa visokim pritiscima .....	129
<b>5.3 Komentar dobijenih rezultata i prijedlog mjera .....</b>	<b>133</b>
<b>6 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....</b>	<b>135</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>140</b>
<b>SPISAK SLIKA .....</b>	<b>149</b>
<b>SPISAK TABELA .....</b>	<b>153</b>
<b>SPISAK OZNAKA .....</b>	<b>155</b>

# 1

## UVOD

Raspoložive zalihe vode za piće, na svim kontinentima, imaju trend stalnog smanjivanja. Ovakav trend je posljedica velikog porasta broja stanovnika, razvoja industrije i neadekvatnog upravljanja vodnim resursima, koji su ograničeni. Sa druge strane potrebe za novim količinama pijaće vode postaju sve veće usljed nekontrolisane urbanizacije prostora i stvaranja gradova sa velikom gustom naseljenosti.

Osim što je očigledan nedostatak količina pijaće vode na Zemlji, ugrožen je i njihov kvalitet, kao posljedica raznih zagađenja koje sa sobom nose urbanizacija i industrijalizacija prostora.

Čovjek svojim aktivnostima direktno djeluje na raspoloživost resursa vode za piće. Zadnjih decenija je prepoznata opasnost od nedostatka dovoljne količine voda za piće i preduzete su razne mjere na njihovom očuvanju. Potrošnja vode po glavi stanovnika, u toku XX vijeka, gotovo u svim evropskim zemljama je imala trend porasta. Nesumnjivo, povećanje potrošnje vode po glavi stanovnika, je prvenstveno posljedica

povećanja gubitaka u vodovodnim sistemima. Zbog toga je aktivnost na njihovom smanjenju i kontroli jedna od aktivnosti kojoj se takođe posvećuje velika pažnja.

Poznato je da se gubici vode iz sistema za snabdijevanje ne mogu potpuno eliminisati, ali se mogu kontrolisati tako da budu u ekonomski isplativim granicama.

Spisak problema koje donose gubici vode je dugačak:

- visoki stvarni gubici zahtjevaju da se zahvata, prerađuje i transportuje više vode nego što su to potrebe korisnika – potrošača;
- dodatna energija koja se troši za prečišćavanje i transport opterećuje postrojenja za proizvodnju energije;
- curenja, isticanja i preliivanja često uzrokuju veće štete i povećanu odgovornost isporučioaca vode;
- gubici često nađu put do kanalizacije pa se dešava da povećavaju količine vode koja se prečišćava na postrojenju za otpadne vode;
- visoki gubici vode koji uzrokuju nedostatak i restrikcije u snabdijevanju vodom, mogu biti ograničavajući faktor razvoja regiona.<sup>(72)</sup>

U cilju što preciznijeg definisanja gubitaka u različitim državama, uvedena je standardizovana međunarodna terminologija. Radna grupa IWA je, na osnovu pozitivne prakse iz većeg broja država, preporučila kao međunarodni standard tabelu 1.1 za sračunavanje bilansa vode. Tabela služi kao ključna postavka praktičnijeg proračuna gubitaka vode.<sup>(1)</sup>

Preporuka IWA za sračunavanje bilansa vode je u svijetu sve više prihvaćena ili se promovise u izvornom ili nešto izmenjenom obliku u Njemačkoj, Australiji, Malti, Južnoj Africi, Novom Zelandu, Kanadi, SAD, Austriji, Brazilu, Kipru, ali u nizu zemalja u razvoju npr. Gani, Jordanu, Kazahstanu, Maleziji, Omanu, Palestini, Saudi Arabiji, Uzbekistanu i drugim.<sup>(71)</sup>

Sve analize se rade na godišnjem nivou ( $m^3$ /god). Godišnji obim gubitaka vode sastoji se od dva odvojena tipa gubitaka – stvarni (fizički) i prividni (nefizički) gubici.

Stepen gubitaka je često veći od nekog prihvatljivog nivoa. U tabeli 1.2 dati su podaci o gubicima, preuzeti iz nacionalnih izvještaja različitih država. Podaci su u %, i odnose se na udio nenaplaćene vode (NRW) u ukupnoj unijetoj vodi u sistem (SIV).

Tabela 1.1 IWA preporuka za sračunavanje bilansa vode<sup>(1)</sup>

Ukupno unijeta voda u sistem (SIV)	Registrovana potrošnja	Fakturisana potrošnja	Naplaćena izmjerena potrošnja	Voda od koje se dobija prihod
			Naplaćena neizmjerena potrošnja	
		Nefakturisana potrošnja	Nenaplaćena izmjerena potrošnja	Voda od koje nema prihoda (NRW)
			Nenaplaćena neizmjerena potrošnja	
	Gubici vode - razlika ukupno unijete zapremine vode i registrovane potrošnje	Prividni gubici-zbir neovlašćene potrošnje i gubitaka nastalih kao posljedica neispravnosti mjernih uređaja	Neovlašćena potrošnja	
			Gubici usljed neispravnosti mjernih uređaja	
		Stvarni gubici	Gubici na glavnim dovodima	
			Gubici i preliivanja u rezervoarima i pumpnim stanicama	
			Gubici na priključcima kod korisnika	

Tabela 1.2 Podaci iz nacionalnih izvještaja o odnosu NRW/SIV<sup>(1)</sup>

<i>Grad ili država</i>	<i>NRW/SIV %</i>
Malezija	36,4
Italija	30÷40
Koreja	29,3
Finska	12÷25
Francuska-seocka naselja	10÷40
Francuska-gradska naselja	10÷30
Hong Kong	30,5
Portugalija	18÷58
Murcia, Španija	9,7
Norveška	40
Danska	7,6
Bangkok, Tajland	38,8
Mađarska	24
USA	5÷37
Tajvan -provincija	23,1
Taipei, Tajvan	41,8

Postalo je više nego jasno, da je smanjenje gubitaka u vodovodnim sistemima (tj. smanjenje potrošnje po glavi stanovnika) racionalnije i prihvatljivije rješenje od angažovanja novih vodnih resursa.

U slučaju velikih vodovodnih sistema, koji se sastoje od stotina kilometara cijevi, pronalaženje mjesta curenja nije ni malo jednostavno. Podjelom sistema na zone (sektore) znatno se olakšava posao kontrole gubitaka. Opšte prihvaćen naziv za te zone

je "District Metered Areas" (DMA), tj osnovne zone bilansiranja (OZB). OZB je definisana kao zasebna oblast vodovodnog sistema, obično kreirana zatvaranjem zatvarača ili potpunim prekidom cjevovoda, koja ima svoj ulaz i izlaz. U zoni se mjeri količina vode koja ulazi i izlazi iz te oblasti.

Početni zadatak OZB je utvrđivanje djelova mreže, koji imaju najviše gubitaka, da bi se raspoloživi resursi usmjerili ka kritičnim djelovima sistema. Postepeno, cilj OZB postaje smanjenje gubitaka u cijelom sistemu na prihvatljiv nivo, da bi u konačnom taj zadatak prerastao u zadatak održanja i upravljanja takvim stanjem. Upravljanje OZB je uspješno samo ako je dio sveukupnog održivog djelovanja u sistemu. Kao tehnika je dio stalne, dugoročne strategije za praćenje, smanjenje i kontrolu curenja<sup>(58)</sup>. Da bi tehnika bila održiva moraju biti zadovoljena tri ključna uslova:

- posvećenost problemu ljudi iz preduzeća, koji upravljaju vodovodnim sistemom;
- pravilno tehničko razumijevanje problematike;
- postojanje organizacionog i informacionog sistema.

Svođenjem vodovodnih sistema na jasno definisane zone, sa poznatim ulazom i izlazom, stvaraju se uslovi za mogućnost boljeg upravljanja gubicima.

Definisanje veličine OZB nije ni malo jednostavan zadatak. Taj zadatak obuhvata analizu mnogo faktora, koji utiču na konačnu formu sistema izdjeljenog na OZB. Faktori koji utiču na veličinu OZB su tehničke, ekonomske i sociološke prirode.

Analiza i kontrola *pritiska* su važni faktori u procesu smanjenja gubitaka. Upravljanje pritiskom je jedan od alata smanjenja gubitaka u sistemu. Danas je ta mjera priznata kao jedna od najisplativijih metoda za smanjenje gubitaka vodovodnih sistema. *Topografija sistema* je često limitirajući faktor u procesu formiranja OZB. To se prvenstveno odnosi na način na koji visinsko zoniranje utiče na formiranje OZB i smanjenje pritiska u njima. Često, u praksi topografija sistema diktira podjelu na OZB. *Ekonomske faktori* su najčešće presudni i odlučujući u procesu formiranja OZB. Pravilna analiza troškova i dobiti, koji nastaju formiranjem OZB, je presudni činilac, na osnovu kojeg se preduzeća koja upravljaju vodovodnim sistemima odlučuju na korak zoniranja sistema. Pod *sociološkim faktorima* se podrazumjeva uticaj društvene zajednice na rad na smanjenju

gubitaka u vodovodnim sistemima. Potrošači moraju postati svjesni svoje uloge u procesu borbe protiv gubitaka u vodovodnim sistemima. Podrška zajednice je neophodna za povećanje efektivnosti tehničkih i ekonomskih intervencija na sistemu. Neophodno je podizanje nivoa svijesti lokalnog stanovništva i njihova saradnja.

Ova doktorska disertacija se bavi definisanjem opšte metodologije za izbor optimalne veličine osnovne zone bilansiranja u vodovodnim sistemima. Metodologija je zasnovana na analizi faktora tehničke i ekonomske prirode, i dobiti koja se ostvaruje pravilnim upravljanjem tim faktorima.

## **1.1 PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA**

Predmet istraživanja, koje je sprovedeno u ovom radu, je analiza faktora koji utiču na definisanje opšte metodologije za određivanje optimalne veličine osnovne zone bilansiranja u vodovodnim sistemima. Analizirani su faktori tehničke i ekonomske prirode. Redukcija pritiska u sistemu je prepoznata kao tehnički faktor. Ekonomski uticaju su svrstani u tri grupe: troškovi pretrage OZB, troškovi formiranja OZB i troškovi i dobiti nastali redukcijom pritiska u sistemu.

U cilju boljeg razumijevanja pojma "troškova pretrage" OZB u sistemu, objašnjen je pojam prijavljenog i neprijavljenog curenja u vodovodnim sistemima.

Cilj je da se, kroz analizu tehničkih i ekonomskih parametara koji prate formiranje i pretragu OZB, ocijeni na koji način bi bilo najbolje izdijeliti vodovodni sistem na zone. Veličina zone diktira troškove koji se javljaju kao posljedica njene pretrage, a ujedno od veličine zona zavise troškovi potrebni za njihovo formiranje.

Osim analize ekonomskih parametara koji prate formiranje i pretragu OZB, efekat pritiska je važan faktor u upravljanju gubicima, u smislu smanjenja i održavanja niskog nivoa gubitaka u vodovodnoj mreži. Na praktičnim primjerima, koji su dati u radu, analizirana je dobit koja nastaje redukcijom pritiska u sistemu.

Ideja u ovom radu je definisanje optimalne veličine OZB, koju prate minimalni ukupni troškova, svedeni na godišnji nivo.

Veličina OZB će uticati na nivo gubitaka koji može da se odredi. Kod manjih OZB je brža identifikacija i lociranje pukotine i veća vjerovatnoća identifikacije manjih pukotina. U velikoj OZB će biti veći gubici i noćna potrošnja korisnika, što će značiti da curenje predstavlja manji dio minimalnog noćnog protoka i na taj način se tačnost određivanja gubitaka smanjuje.

## 1.2. STRUKTURA TEZE

Teza je organizovana u šest poglavlja, i to:

1. UVOD. Uvodno poglavlje u kome se definiše predmet i cilj istraživanja koje je sprovedeno u tezi.
2. ISTORIJAT RAZVOJA OSNOVNIH ZONA BILANSIRANJA (OZB). U ovom poglavlju dat je hronološki pregled nastajanja i razvijanja osnovnih zona bilansiranja-OZB, kao i razlozi zbog kojih se javila potreba za formiranjem zona.
3. TEORIJSKE OSNOVE I DOŠADAŠNJA ISTRAŽIVANJA. U ovom poglavlju je, u dijelu 3.1, opisan uticaj pritiska na veličinu gubitaka u sistemu. Upravljanje pritiskom je danas priznat model smanjenja gubitaka. Navedene su metode upravljanja pritiskom, od kojih je izdvojena i detaljnije opisana redukcija pritiska, kao najpouzdanija metoda upravljanja pritiskom. U dijelu 3.2 opisani su ekonomski faktori koji utiču na izbor optimalne veličine OZB. U okviru ekonomskih faktora analizirani su troškovi formiranja i troškovi pretrage osnovnih zona bilansiranja. Troškovi formiranja su vezani za troškove: ugradnje mjerača, prekida cjevovoda, spajanja cjevovoda... dok su troškovi pretrage vezani za pretragu osnovne zone bilansiranja. Glavni faktor koji definiše troškove pretrage je dužina cijevi unutar zone koja se pretražuje i učestanost pojave pukotina. Osim tehničkih faktora (upravljanje pritiskom) i ekonomskih faktora (troškovi pretrage i formiranja zona), na konačan oblik zone imaju uticaja i drugi faktori: topografija vodovodnog sistema, stanje infrastrukture



sistema, problem kvaliteta vode, ciljevi preduzeća koje gazduje vodovodnim sistemom, njegova razvojna politika...

4. SOPSTVENA ISTRAŽIVANJA. U ovom poglavlju dat je teorijski prikaz istraživanja, kroz opis načina upravljanja baznim gubicima i gubicima iz pukotina. Predložena je metodologija koja će biti primjenjena na konkretnim primjerima vodovodnih sistema. Primjenom definisane metodologije u procesu formiranja OZB, kroz simulaciju različitih stanja sistema u programskom paketu "Epanet", dolazilo se do definisanja različitih veličina OZB. Analizom troškova u funkciji od veličine OZB, vršen je odabir optimalne veličine zone, za svaki od konkretnih primjera. Analiza troškova je obuhvatila analizu troškova i dobiti od: redukcije pritiska, formiranja i pretrage OZB. Na kraju poglavlja dat je komentar dobijenih rezultata.
5. PRIMJER PRIMJENE PREDLOŽENIH METODOLOGIJA NA FORMIRANJU OZB U VODOVODNOM SISTEMU PODGORICE. U ovom poglavlju je prikazano trenutno stanje u vodovodnom sistemu grada Podgorice. Kako u tom sistemu od nedavno postoji sistem mjerenja i praćenja podataka (SCADA), ti podaci su poslužili za modeliranje sistema, u skladu sa izmjerenim podacima. Za oblasti u sistemu, u kojima su postojali tačni i u kontinuitetu registrovani podaci o pritisku i protoku, dobijen je model u programskom paketu "Epanet" koji odgovara stvarnom stanju sistema. Na takvom modelu, je primjenjena definisana metodologija iz poglavlja 4. i komentarisani rezultati.
6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA. U ovom poglavlju su analizirani najvažniji rezultati, naučni i stručni doprinos disertacije i dati su opšti zaključci, preporuke i pravci budućih istraživanja u ovoj oblasti.

# 2

## **ISTORIJAT RAZVOJA OSNOVNIH ZONA BILANSIRANJA (OZB)**

Problem gubitaka u vodovodnim sistemima odavno je interesantan naučnicima širom svijeta. Da ne postoji vodovodni sistem koji nema gubitaka naveo je još davne 1892. godine William Hope. Morris (1967) je dao pregled potencijalnih uzročnih faktora koji dovode do pojave pukotina na vodovodnim cijevima. Prvi izveštaj u kome je dat pregled postupaka za kontrolu curenja u vodovodnim sistemima može se naći kod Goodvin (1980).<sup>(71)</sup> Bilo je neophodno upozoriti na posljedice koje sa sobom nose gubici, osoblje koje rukovodi vodovodnim sistemima. Takođe, bilo im je potrebno približiti problematiku i metode za rješavanje gubitaka u vodovodnim sistemima. Prvi počeci organizovanog djelovanja u tom cilju se javljaju u Velikoj Britaniji, 80-tih godina prošlog vijeka.

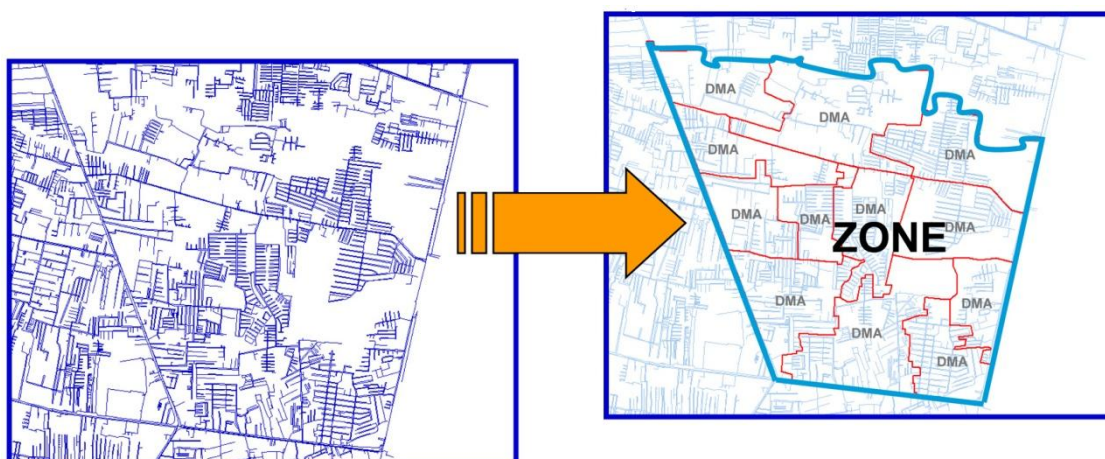
U Velikoj Britaniji, 1980. godine je objavljen izvještaj pod nazivom “Leakage Control Policy and Practice” (Strategija i praksa u kontroli gubitaka)<sup>(93)</sup>. Cilj izvještaja je bio da se definiše postupak koji bi bio najpogodniji za kontrolu curenja u bilo kom vodovodnom sistemu.

Izveštaj se sastojao od tri nezavisna dijela:

- prvi dio: namjenjen ljudima koji rukovode vodovodnim sistemima;
- drugi dio: priručnik za definisanje politike za kontrolu gubitaka;
- treći dio: priručnik za kontrolu gubitaka, primjenljiv u praksi.

U priručniku za kontrolu gubitaka je predloženo formiranje zona, sa preporučenom veličinom 1000÷3000 priključaka unutar zone, u kojima bi bilo omogućeno mjerenje protoka. Predloženo je formiranje zona zatvaranjem određenog broja zatvarača ili potpunim prekidom cjevovoda. U zoni bi se mjerila količina vode koja ulazi i izlazi iz te oblasti. Obično se predviđalo da mjerač protoka mjeri potrošnju u noćnim satima, npr 00-04h. Analizom protoka je određivan nivo gubitaka. Tada je predloženo da se te zone nazovu DMA ("District Meter Areas"), što je postao opšte prihvaćen naziv (slika 2.1). Kod nas je prihvaćen naziv osnovne zone bilansiranja (OZB).

Kasnije je ovaj priručnik zamjenio set od devet izvještaja datih u "Managing Leakage Series"(1994). Namjera seta izvještaja je bila da bude alat za upravljanje gubicima. Izveštaji se i dalje koriste u nekim sferama upravljanja gubicima.



*Slika 2.1 Prikaz zoniranja sistema*

Ova metodologija je 80-tih godina prošlog vijeka primijenjena u Velikoj Britaniji, najprije u gradu Plymouth, zatim u zapadnom Londonu<sup>(26)</sup>. Iskustvo stečeno projektovanjem i sprovođenjem metodologije na ova dva primjera, pružilo je bitne smjernice za definisanje i upravljanje kasnije formiranim zonama, prvenstveno na području Velike Britanije. Koncept podjele na OZB i upravljanja vodovodnim sistemima na osnovu tog koncepta je prezentovan 1994. u "Managing Leakage", a zatim ažuriran 1999. izvještajem pod nazivom "A Manual of DMA Practice". Zahvaljujući promociji koncepta od strane "Water Loss Task Force" (danas "Water Loss Specialist Group"), Internacional Water Association (IWA), OZB su uvedene u vodovodne mreže zemalja u svim djelovima svijeta.

Mišljenje većine stručnjaka iz ove oblasti je, da je prva faza razvoja strategije smanjenja NRW (Non Revenue Water- voda od koje nema prihoda), definisanje vodnog bilansa (kvantifikovanje komponenti i prioriteta aktivnosti), zatim podjela na zone. Ovaj fazni koncept je uveden u "Losses in Water Distribution Networks – A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control"<sup>(28)</sup>, a kasnije 2004. U "Developing a Non-Revenue Water Reduction Strategy"<sup>(54)</sup>.

Uspjeh koji je postignut u borbi protiv gubitaka, primjenom OZB, je uglavnom bio zbog brzog razvoja mjerne tehnike i tehnologije prikupljanja podataka, od ranih 80-tih do danas. Kada je uspostavljena prva OZB samo su postojali mehanički mjerači, koji su robustni, pouzdani, tačni i imali su široku primjenu. U novije vrijeme počeli su da se koriste elektromagnetni i ultrazvučni mjerači protoka, koji podjednako dobro mjere kao mehanički, ali su značajno pojeftinili proces mjerenja u DMA, zbog masovnije proizvodnje istih i zbog činjenice da se mogu ukopavati i baterijski napajati pa nema potrebe za izgradnjom mjernih kućica. Nove tehnologije za snimanje i prenos podataka, danas omogućavaju brže prikupljanje i prenos podataka, odnosno bržu analizu prikupljenog materijala, a samim tim i kraće vrijeme potrebno za lociranje pukotine u sistemu.

Instaliranje mjerača protoka i pritiska na odgovarajućim mjestima u sistemu je omogućilo mjerenje noćnog protoka i pritiska u sistemu. Noćni protok, onaj koji se

mjeri u periodima minimalne potrošnje, predstavlja osnovu za rad na zonama i definiše prioritete za intervencije na gubicima (tj. otkrivanje i sanaciju pukotina). Proces otkrivanja, lociranja i popravke pukotina poznat je kao aktivna kontrola gubitaka - AKG (Active Leakage Control, ALC).

U poslednjoj četvrtini prošlog vijeka, kontrola gubitaka preko AKG je sa velikim uspjehom primjenjena u vodovodnim mrežama širom svijeta. Dokazana je kao veoma uspješna i predstavlja dio globalnog plana za smanjenje gubitaka. Ali, ova tehnika zahtjeva pažljivo razumijevanje i ne treba je posmatrati kao brzo rješenje. Nasuprot tome, ona predstavlja sredstvo koje omogućuje efikasnije upravljanje gubicima i zahtjeva odlučno upravljanje i odgovarajuće ljudske resurse da bi bila uspješna<sup>(39)</sup>. Najprikladnija kontrola gubitaka preko AKG je uglavnom određena karakteristikama vodovodne mreže i lokalnim uslovima, koji često uključuju finansijska ograničenja za nabavku opreme i drugih resursa (Farley i Trow, 2003)<sup>(71)</sup>. Veliki broj preduzeća koji gazduju vodovodnim sistemima i dalje pribjegavaju pasivnoj kontroli gubitaka. Pasivna kontrola gubitaka podrazumjeva reagovanje preduzeća samo u slučaju prijave curenja u vodovodnom sistemu, tj. čekaju da problem curenja bude vidno evidentiran. U tom slučaju se kreće u pretragu sistema, pomoću raznih tehnika, u cilju lociranja tačnog mjesta curenja. Sve to predstavlja neizbježan problem za potrošače.<sup>(71)</sup>

Politika aktivne kontrole podrazumjeva sledeće metode: aktivnu kontrolu gubitaka i aktivno upravljanje pritiskom.

Gubici zavise od pritiska u sistemu, veći pritisak znači veći gubitak i obrnuto. Najprije je Wiggert (1968) koristio jednačinu koja opisuje vezu gubitaka i pritiska. Iako je jednačina i danas široko u upotrebi, moramo imati u vidu da ona ne daje dobre rezultate kada je cijev napravljena od krutih materijala (Greyvenstein i Van Zyl 2005) i u slučaju negativnih pritisaka (Todini 2003). Kasnije je usvojena jednačina koja ima širu primjenu, jer omogućava usvajanje raznih vrijednosti eksponenta  $N$  (preko kojeg je defisana zavisnost gubitaka od pritiska u mreži). Dokazano je da vrijednost eksponenta zavisi od materijala cijevi, vrste gubitka, karakteristika okolnog zemljišta i potrošnje vode (Casa et al. 2005; Greyvenstein i Van Zyl 2005, Walski et al. 2006, Noack i Ulanicki 2006). Van Zyl i Clayton (2005) su uočili da kada se curenje predstavlja

zavisno od pritiska, potrošnja vode treba da prati istu proceduru. Više o curenju na mjestu pukotine na cijevi i njegovim karakteristikama se može naći kod Beck et al.(2005a,b) i Coetzer et al.(2006). Takođe postoje u literaturi razne studije o modeliranju zavisnosti gubitka od pritiska. Modeliranje bazirano na koeficijentu curenja i površini pukotine može se naći u radovima May(1994), Vela et al.(1995), Simpson i Vitkovsky (1997), Vitkovsky i Simpson (1997), Dunlop (1999), Hernandez et al. (1999), Stathis i Loganathan (1999), Alonso et al. (2000), Rossman (2000), Ulanicki et al. (2000), Ulanicka et al. (2001), Vitkovsky et al. (2003a) i Verde (2005). Modeliranje koje uključuje karakteristike cijevi je obrađeno kod Germanopoulos (1985, 1995), Vairavamoorthy i Lumbers (1998), Martinez et al. (1999), Reis i Chaudry (1999), Tucciarelli et al. (1999), Ainola et al. (2000) i Dias et al. (2005).<sup>(71)</sup> Tokom XX vijeka su rađena brojna istraživanja na temu zavisnosti pritisak-protok kroz otvor (pukotinu). Lambert (2005)<sup>(50)</sup> navodi da je upravljanje pritiskom osnov za bilo koju strategiju upravljanja gubicima. Takođe zaključuje da pravilno upravljanje pritiskom može da smanji učestalost pojave novih pukotina u vodovodnim sistemima i predlaže metodologiju za računanje zavisnosti između pritiska u sistemu i gubitaka.

Rješenje efikasnije kontrole pritiska je takođe u podjeli mreže na zone. Podjela mreže na zone omogućava formiranje sistema stalne kontrole pritiska, što omogućava smanjenje pritiska u pojedinim zonama, čime se smanjuje i nivo gubitaka, protok na pojedinim pukotinama, kao i stepen učestalosti pojave pukotina na godišnjem nivou. Ovakva struktura olakšava praćenje rada sistema i omogućava upravljanje pritiskom na tim područjima. Uobičajena oznaka za tu zonu je PMA (“Pressure Management Areas”).

Upotreba koncepta OZB se pokazala kao prikladna u borbi protiv gubitaka za razne konfiguracije vodovodnih sistema, bilo da je riječ o sistemima sa registrovanim ili neregistrovanim potrošačima, bilo da se radi o sistemima sa periodičnim ili neprekidnim snabdijevanjem vodom (Morrison i Tooms, 2007)<sup>(58)</sup>. Thornton (2002)<sup>(82)</sup> predlaže nove metodologije za otkrivanje stvarnih i prividnih gubitaka, kao i načine kako se računa benefit od redukcije pritiska. U priručniku za OZB (“A Manual of DMA Practice”) izdatom od UK Water Industry Research (1999) data su detaljna uputstva i koraci prema kojima se predlaže sprovođenje koncepta OZB u cilju smanjenja gubitaka u

vodovodnim sistemima. Koraci su: definisanje OZB, monitoring gubitaka, odabir opreme potrebne za detekciju gubitaka, obuka osoblja, upravljanje pritiskom, rješavanje problema i pravilno upravljanje podacima. Primjer uspješne implementacije OZB koncepta i upravljanja pritiskom u cilju smanjenja gubitaka su prikazali Walski, Kaufman, Gangemi i Malos (2001)<sup>(92)</sup> na jednom vodovodnom sistemu u Sjevernoj Americi. Ovo je od posebnog interesa jer je jasno sugerisano da su ove tehnologije primjenjive i efikasne i u Sjevernoj Americi. Obradović (1999)<sup>(61)</sup> navodi da je sistem kontrolnih vodomjera neophodan da bi se ostvarila efikasna kontrola gubitaka u distribucijskoj mreži. Prednosti tog sistema su sledeće: može se graditi postupno; oprema za mjerenja, obradu i prenos podataka je jeftina i pristupačna; cjelokupna akcija može se organizovati unutar vodovoda sa vlastitim snagama; prikupljeni podaci su od trajne koristi za vodovod i to ne samo za obračun gubitaka. Sistem kontrolnih vodomjera nije zamjena za telemetrijski sistem. Ta dva sistema treba razvijati paralelno jer služe različitim namjenama, ali u međusobnom skladu jer se mogu dopunjavati (Obradović & Lonsdale, 1998)<sup>(59)</sup>. Ulaganja su velika, ali je modernizacija vodovoda neizbežna. Sekulić (2003)<sup>(77)</sup> u svojoj doktorskoj disertaciji bavio se prijedlozima modernizacije vodovodnih sistema sa mjerama reorganizacije sistema i formiranja zona uz korišćenje buster pumpi i uređaja za kontrolu i redukciju pritiska u mreži.

“U svijetu se smatra da je aktivna politika upravljanja gubicima u vodovodnim sistemima od suštinskog interesa za normalno i racionalno gazdovanje vodnim resursima. Ova politika može donijeti velike uštede, što je dokazano u praksi i ulaganje u zahvatanje novih količina vode se može smatrati opravdanim samo ako su uvedene mjere aktivne kontrole gubitaka vode iz sistema. Obzirom da se gubici ne mogu u potpunosti eliminisati, treba odrediti njihov minimalan, tj. neizbežan nivo. Tradicionalni pokazatelji gubitaka vode, široko prihvaćeni u svijetu uglavnom su se bazirali na procentu izgubljene vode u odnosu na upuštenu u sistem. Zahvaljujući aktivnostima radne grupe međunarodnog udruženja za vodu IWA u poslednjoj deceniji, dokazano je na praktičnim primjerima da ovaj pristup sadrži puno manjkavosti i predložena je nova metodologija određivanja sveobuhvatnih pokazatelja uspješnosti rada vodovodnih sistema, kako bi svaki sistem mogao da provjeri svoju efikasnost, a pored toga mogao i da uporedi svoje tehničke karakteristike sa drugim sistemima u okruženju i u svijetu. U

Srbiji su učinjeni prvi koraci ka uvođenju IWA metodologije. Metodologija je pokazala primjenljivost i na srpske sisteme snabdijevanja vodom. Pokazale su se i određene manjkavosti u smislu vjerodostojnosti podataka koji su prikupljeni od vodovodnih sistema, zbog ograničene tačnosti i načina prikupljanja, pa je potrebno uložiti nove napore ka poboljšanju stanja vodovoda u Srbiji (Radivojević, Milićević, Petrović, 2013)<sup>(73)</sup>.



# 3

## TEORIJSKE OSNOVE I DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Kao što je navedeno u uvodnom poglavlju, cilj je da se kroz analizu dobiti, nastale od upravljanja tehničkim i ekonomskim parametrima, odredi optimalna veličina zone, tj ona veličina za koju je dobit najveća.

Kao tehnički parametar je prepoznat efekat pritiska. Efekat pritiska u ovoj disertaciji posmatran sa ekonomske strane. Za razne slučajeve podjele sistema na zone, računata je neto dobit koja nastaje kao posljedica upravljanja pritiskom u sistemu. Paralelno je za svaki od slučajeva računata dobit kroz analizu ekonomskih faktora, u koje spadaju dobiti od formiranja i pretrage OZB.

Radi boljeg razumijevanja načina analize svih parametara u nastavku je dat teorijski prikaz efekta pritiska na gubitke (poglavlje 3.1) i prikaz ekonomskih parametara, koji prate razna stanja podjele vodovodnog sistema (poglavlje 3.2). Kroz teorijske prikaze svih razmatranih parametara data su i dosadašnja istraživanja o njima.

## **3.1 FAKTOR UPRAVLJANJA PRITISKOM KAO NAČIN UPRAVLJANJA GUBICIMA**

Količina vode koja ističe na mjestu pukotine na vodovodnoj cijevi je u vezi sa pritiskom. Učestalost pojave novih pukotina je takođe funkcija pritiska u sistemu. Smanjenje pritiska izaziva smanjenje protoka na mjestu curenja, kao i smanjenje porasta broja novih pukotina. Preduzeća koja gazduju vodovodnim sistemima su prepoznala da im pravilno upravljanje pritiskom donosi velike uštede.

### **3.1.1 EFEKAT PRITISKA NA STANJE GUBITAKA U VODOVODNIM SISTEMIMA**

Efekat pritiska, nesumnjivo ima veliki uticaj u smislu smanjenja i održavanja niskog nivoa gubitaka u vodovodnoj mreži. Gubici su u funkciji od pritiska u sistemu. Odnosno, veći pritisak znači veći gubitak i obrnuto. Iako je ta veza opšte prihvaćena, treba biti na oprezu u slučajevima kada cijev nije od čvrstog materijala ili kada je pritisak u sistemu negativan.<sup>(5)</sup>

Kao ključni faktor u borbi protiv gubitaka izdvaja se upravljanje pritiskom. Obično se upravljanje pritiskom svodi na redukciju pritisaka u sistemu. Visoki pritisci imaju za posljedice veće gubitke na mjestu postojećih pukotina i veću vjerovatnoću pojave novih pukotina.

Da bi upravljanje pritiskom bilo efikasna mjera u cilju smanjenja gubitaka, potrebno je:

- definisati zone potrošnje;
- uraditi analizu potrošnje, da bi se identifikovali tipovi potrošnje i ograničenja;
- odrediti položaj mjernih uređaja za mjerenje protoka i pritiska (uobičajeno je postavljanje na mjestu ulaza i izlaza iz sistema i na kritičnim mjestima);
- uraditi matematički model svih režima rada, da bi se pokazali rezultati (ovdje se misli na matematički model, stanja sistema prije i nakon preduzetih mjera upravljanja pritiskom);

- analizirati troškove i dobiti koji nastaju primjenom metoda upravljanja pritiskom.

Jednačina kojom je predstavljena veza pritiska i protoka na mjestu isticanja je bazirana na Toričelijevoj jednačini i glasi<sup>(14)</sup>:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gP} \quad (3.1)$$

gdje je:

- $Q$  -protok;
- $C_d$  -koeficijent protoka;
- $A$  -površina pukotine;
- $g$  -ubrzanje sile zemljine teže;
- $P$  -pritisak na mjestu isticanja.

U praksi je u upotrebi sledeća veza između pritiska i protoka na mjestu curenja:

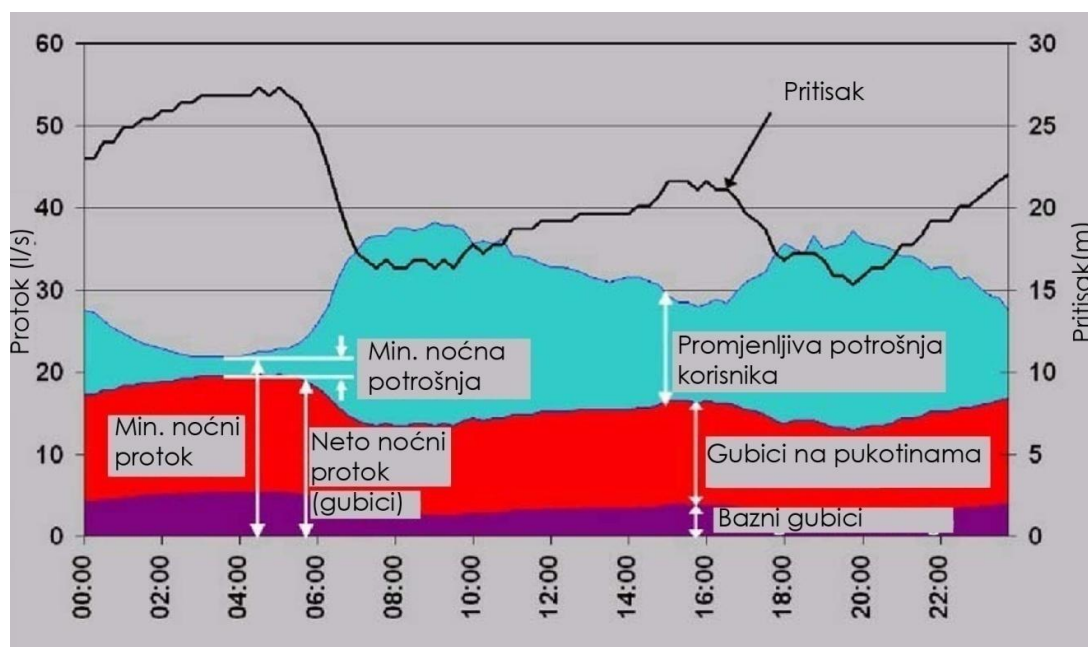
$$L_1 = L_0 \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^N \quad (3.2)$$

gdje je:

- $P_0$  -početni pritisak na mjestu curenja;
- $L_0$  -početni protok na mjestu curenja;
- $P_1$  -korigovani pritisak na mjestu curenja;
- $L_1$  -korigovani protok na mjestu curenja;
- $N$  -eksponent koji zavisi od tipa pukotine i materijala cijevi. Varira od 0.5 do 2.5.

Često se pretpostavlja (zbog jednostavnosti) da prosječna vrednost eksponenta  $N$  u velikim sistemima sa različitim materijalima cjevovoda iznosi 1, podrazumjevajući linearnu vezu između protoka curenja i pritiska.

Pritisak u vodovodu varira u zavisnosti od protoka. Ako se protok povećava (kao na primjer u vrijeme najveće potrošnje u sistemu), pritisak će se smanjiti, čime se smanjuju i gubici, kao što je prikazano na slici 3.1.<sup>(39)</sup>



Slika 3.1 Promjena protoka, pritiska i gubitaka u vodovodnoj mreži<sup>(39)</sup>

Osnovni zadatak za pravilno modeliranje gubitaka je određivanje adekvatnog eksponenta  $N$  u jednačini 3.2.

Postoji nekoliko matematičkih modela, kojim je definisana ta veza, koji su bazirani na eksperimentalnim istraživanjima. Germanopoulos (1985) je predložio nelinearnu jednačinu koja daje zavisnost protoka i pritiska, sa stepenom  $N=1,18$ . Hikki (1981) je definisao da je eksponent  $N=0,5$  za pukotine na cijevima, dok su Ashcroft i Taylor (1983) ustanovili da se eksponent  $N$  kreće u opsegu  $1,39 \div 1,72$  za prereze na cijevima. Ustanovljeno je da eksponent  $N$  varira u zavisnosti od tipa pukotine:  $N=0,5$  za ustaljenu površinu pukotine,  $N=1,5$  za pukotinu čija veličina varira sa promjenom pritiska,  $N=2,5$  za podužnu pukotinu (May, 1994). U 50 testova sprovedenih od strane Lamberta (1997, 2001), vrijednost eksponenta  $N$  se kretala u opsegu  $0,52 \div 2,79$ , sa srednjom vrijednošću  $N=1,15$ . U dosadašnjim istraživanjima je pokazano da vrijednost eksponenta zavisi od tipa pukotine, materijala cijevi, hidrauličkih karakteristika okolnog zemljišta u kom je

cijev položena i potrošnje vode (Cassa et al., 2005; Greyvenstein and Van Zyl, 2005; Walski et al., 2006; Noak and Ulanicki, 2006). Van Zyl i Clayton (2005) su zapazili, da kada se gubitak analizira u funkciji od pritiska, potrošnja bi trebalo isto tako da se posmatra. Razne studije o zavisnosti pritiska i gubitaka se mogu naći u dosadašnjim istraživanjima. Neke od mogu se naći u radovima May (1994), Vela et al.(1995), Simpson i Vitkovský (1997), Dunlop(1999), Hernandez et al.(1999), Stathis i Loganathan(1999), Alonso et al.(2000), Rossman(2000), Ulanicki et al.(2000), Ulanicka et al.(2001), Vitkovský et al.(2003) i Verde (2005). Modeliranje koje uključuje i karakteristike cijevi može se naći kod Germanopolis(1985;1995), Vairavamoorthy i Lumbers(1998), Martinez et al.(1999), Reis i Chaudry(1999), Tucciarelli et al.(1999), Ainola et al.(2000) i Dias et al.(2005).<sup>(5)</sup>

Tim za upravljanje pritiskom, formiran pri IWA Water Loss Task Force (WLTF), predložio je korišćenje FAVAD (Fixed and Variable Area Discharges) koncepta, predloženog od strane May (1994)<sup>(49)</sup>.

May (1994) je predložio da gubitak iz pukotina zavisi od pritiska sa eksponentnom 0,5, a bazni gubici sa eksponentnom 1.5:

$$q_l = k \cdot p^N \quad (3.3)$$

gdje je:

$q_l$  gubitak;

$k$  koeficijent gubitka;

$p$  pritisak;

$N$  eksponent gubitka, (koji iznosi 0.5 za gubitke usljed pukotina u vodovodnoj mreži, 1.5 za bazne gubitke).

*Lambert et al.* (1998)<sup>(36)</sup> i *May* (1994) su se složili u tome da eksponent gubitka može biti čak 2.5, pogotovo za plastične cijevi.

Postoji i dilema oko načina na koji treba ukupne gubitke u mreži procijeniti. Za vodovodne mreže u kojima nema mjerenja potrošnje obično se kao pokazatelj prisutnosti gubitaka koristi test minimalne noćne potrošnje. Ukupne procijenjene

gubitke u mreži potrebno je raspodijeliti na čvorove. Najveći dio baznih gubitaka se dešava kroz konekcije i fitinge. Navedene pretpostavke su dovele do sledeće jednačine, za svaki čvor:

$$q_{i_i}(t) = k_i \cdot p_i^{N_i}(t) \quad (3.4)$$

gdje je:

$q_{i_i}(t)$  gubitak u čvoru "i" u vremenu t;

$p_i(t)$  pritisak u čvoru "i" u vremenu t;

$\sim$  eksponent gubitka;

$k_i = \beta \cdot d_i(12:00)$  koeficijent gubitka u čvoru "i", izračunava se na osnovu srednje vrijednosti potrošnje, npr u 12 sati (podne), u datom čvoru,  $\beta$  je konstanta;

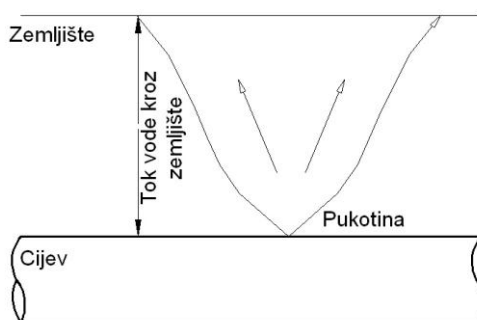
$d_i$  potrošnja.

### **Uticaj vrste tla na gubitke u vodovodnim sistemima**

U većini modela predstavljeno je da je curenje pod uticajem otvora (pukotine). Thomas Walski et al. su došli do zaključka da je, u nekim slučajevima, curenje na mjestu pukotine pod nezanemarljivim uticajem tla, u kom su cijevi položene. Uticaj tla je posljedica dodatnih gubitaka energije, usljed kretanja vode kroz zemljište, koji se dešavaju između mjesta pukotine i površine zemljišta.

Ako je pukotina velika, voda će se kretati kroz zemljište i stići do površine terena. U tom slučaju pijezometarski nivo van cijevi će u suštini postati stalan. Zaključak je da će se kod manjih pukotina dodatni gubici energije dešavati između mjesta pukotine i površine zemljišta, usljed kretanja vode kroz zemljište, slika 3.2.

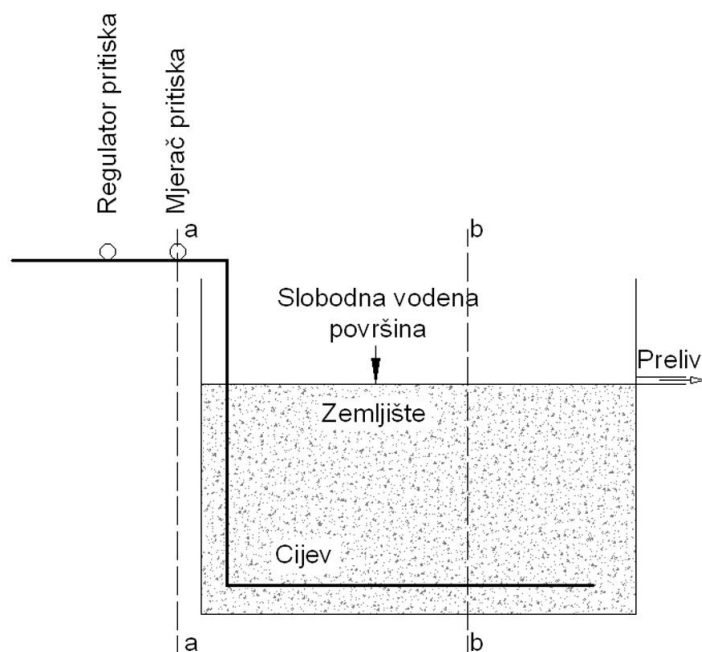
Može se desiti da su gubici energije kroz zemljište veći od gubitka energije na pukotini. Zanimarivanjem ove činjenice u procesu modeliranja rada sistema, nastaje model koji ne odgovara stvarnom stanju sistema.



Slika 3.2 Prikaz kretanja vode kroz zemljište

Na osnovu izučene literature, zaključak je da su najcjelovitiji prikaz uticaja tla na gubitke u vodovodnim sistemima, dali Thomas Walski et al.<sup>(91)</sup>. Ovdje je dat kratak prikaz njihovog eksperimenta, načina na koji je definisan OS broj i rezultata koji su proizašli iz tog eksperimenta.

Na slici 3.3 dat je šematski prikaz aparature za potrebe eksperimenta.



Slika 3.3 Prikaz instalacije eksperimenta

Aparatura se sastoji od cijevi, na kojoj su izbušene pukotine, regulatora i mjerača pritiska, cilindra sa ispunom od pijeska, u koji je položena cijev, i prelivne cijevi. Razmatrana su dva slučaja, da bi se uvidjela razlika između isticanja koje je

kontrolisano gubitkom energije toka vode kroz zemljište i isticanja koje je kontrolisano gubitkom energije na mjestu pukotine. U prvom slučaju, nazvanom "kratka aparatura", cilindar je visine 48cm, prečnika baze 38cm i visine prelivne cijevi 43cm. U drugom slučaju, nazvanom "dugačka aparatura", cilindar je visok 157cm, iz razloga većih gubitaka energije koji nastaju usljed kretanja vode kroz materijal koji je u cilindru. Prečnik baze je 10.2cm. U slučaju ovog cilindra, ostvarena je veća brzina toka, jer je poprečni presjek manji. Cijev na kojoj su pukotine je položena po dnu cilindra. Vršeni su eksperimenti za razne veličine pukotina na cijevi, u opsegu 1.067 mm ÷ 9.35mm. Ulazni pritisak je podešavan regulatorom pritiska. Materijal, kojim su ispunjeni cilindri, je pijesak, jer je otporan na sabijanje i može izdržati više ispitivanja za redom, bez znatne promjene hidrauličke provodljivosti. Dno cilindra, odnosno prostor oko cijevi, je ispunjen šljunkom, radi lakšeg isticanja vode.

U toku eksperimenta mjeračem je mjereno ulazni pritisak. Količina vode koja je iscurela kroz otvore je mjerena sakupljanjem vode koja prelije u određenom vremenskom intervalu. Mjereni su protoci za pritiske: 69, 103, 137, 172 i 206 kPa, za sve veličine pukotina. Da bi se odredio koeficijent protoka za isticanje kroz pukotine,  $C_d$ , mjereno je protok za svih 5 slučajeva pritiska u cijevi, bez prisustva pijeska (slobodno isticanje). Vrijednosti izmjenog koeficijenta protoka su se kretale u opsegu 0.71÷0.76.

Vršeni su eksperimenti za različite veličine otvora, razne protoke, pritiske i brzine kretanja vode kroz zemljište, za oba slučaja, kratke i dugačke aparature.

#### Definisanje OS broja

Na osnovu šeme opisanog eksperimenta, kroz energetska jednačinu koja povezuje pritisak i protok za presjeke a i b, slika 3.3., moguće je prikazati gubitke energije na mjestu otvora i gubitke energije kroz zemljište zajedničkim modelom.

Energetska jednačina izgleda ovako:

$$z_a + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{v_a^2}{2g} = z_b + \frac{p_b}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} + h_p + h_o + h_s \quad (3.5)$$



gdje je:

$h_p$  - gubitak energije u cijevi;

$h_o$  - gubitak energije na mjestu pukotina;

$h_s$  - gubitak energije kroz zemljište.

Imajući u vidu da su gubici u cijevi zanemarljivo mali u odnosu na ostale gubitke (jer je dužina cijevi mala), nad vodenom površinom je atmosferski pritisak ( $p_b / \gamma = 0$ ), energetska jednačina izgledaće ovako:

$$z_a + \frac{p_a}{\gamma} - z_b = h_o + h_s \quad (3.6)$$

$$Q = KA \left( \frac{h_s}{L} \right) \quad (3.7)$$

gdje je:

$K$  - koeficijent filtracije;

$A$  - površina poprečnog presjeka zemljišta;

$h_s$  - gubitak energije kroz zemljište;

$L$  - dužina toka.

Prema tome, gubitak energije toka vode kroz zemljište iznosi:

$$h_s = \frac{QL}{KA} \quad (3.8)$$

Proticaj na mjestu pukotine se računa na osnovu jednačine:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gh_o} \quad (3.9)$$

gdje je:

$C_d$  koeficijent protoka;

$A_o$  površina poprečnog presjeka pukotine;

$h_o$  gubitak energije na mjestu pukotine.

Iz prethodne jednačine je gubitak energije na mjestu pukotine:

$$h_o = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{C_d A_o} \right)^2 \quad (3.9)$$

Kombinacijom jednačina za  $h_o$  i  $h_s$ , sa energetsom jednačinom, dobija se:

$$z_a + \frac{p_a}{\gamma} - z_b = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{C_d A_o} \right)^2 + \frac{QL}{KA} \quad (3.10)$$

odnosno:

$$H_c = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{C_d A_o} \right)^2 + \frac{QL}{KA} \quad (3.11)$$

Dijeljenjem ove jednačine sa drugim sabirkom dobija se:

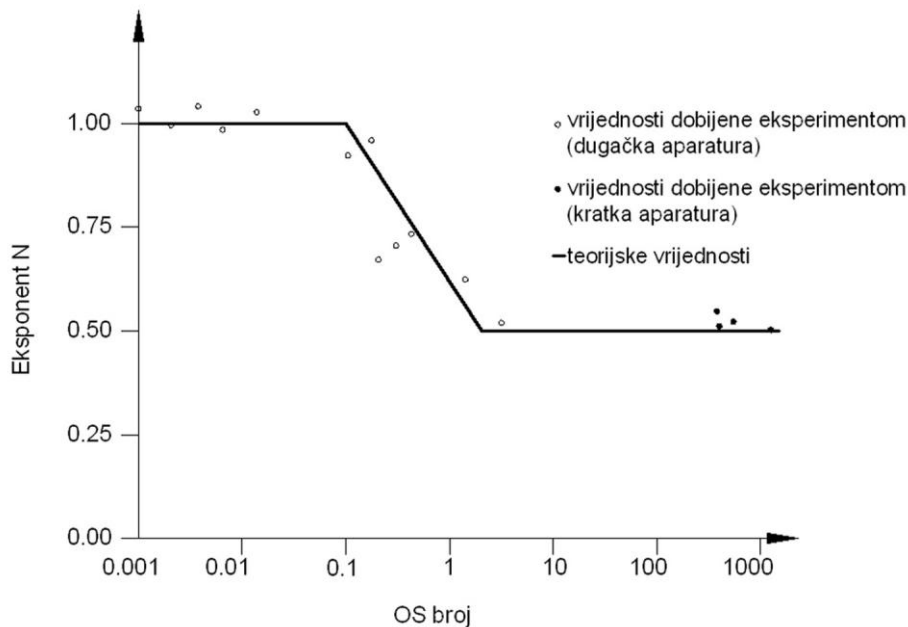
$$\frac{H_c KA}{QL} = \frac{KAQ}{2gL} \left( \frac{1}{C_d A_o} \right)^2 + 1 \quad (3.12)$$

Prvi sabirak predstavlja odnos između gubitaka na mjestu otvora i gubitaka kroz tlo. Taj broj je nazvan OS-broj (Orifice/Soil number) <sup>(91)</sup>:

$$OS = \frac{KAQ}{2gL} \left( \frac{1}{C_d A_o} \right)^2 = \frac{h_o}{h_s} \quad (3.13)$$

OS broj je bezdimenzionalan broj, koji služi kao indikator tipa tečenja koje se ostvaruje u nekom slučaju. Odnosno OS broj ukazuje da li u nekom slučaju dominiraju gubici energije toka vode kroz tlo ili dominiraju gubici energije na mjestu otvora.

Iz rezultata eksperimenata dobijena je zavisnost eksponenta  $N$  iz jednačine 3.2 i OS broja, slika 3.4.



Slika 3.4 Dijagram zavisnosti eksponenta  $N$  i OS broja (preuzeto iz<sup>(91)</sup>)

Kada broj OS ima vrijednost 1, gubici energije kroz tlo i gubici energije na mjestu otvora su jednaki. Kada je  $OS < 0.1$  dominiraju gubici kroz tlo, a kada je  $OS > 10$  dominiraju gubici na mjestu otvora.

Iz dijagrama na slici 3.4 se vidi da za veliku vrijednost OS broja, eksponent  $N$  ima vrijednost 0.5, ukazujući na to da je curenje u zavisnosti od gubitka energije na mjestu pukotine. U ovom slučaju gubitak energije kroz zemljište je zanemarljiv. Kada OS ima vrijednost oko 1, curenje na pukotini je funkcija gubitaka energije kroz tlo, jednako kao i gubitaka energije na mjestu pukotine. Male vrijednosti OS broja ( $h_s > h_o$ ), ukazuju na to da je curenje na pukotini pod uticajem gubitka energije kroz zemljište. Opseg u kom se odigrava prelaz sa jednog kontrolisanog stanja na drugo je veoma mali, a to je slučaj kada je vrijednost OS broja blizu 1.

Navedene analize ukazuju na to da se na osnovu vrijednosti OS broja mogu predvidjeti uslovi koji utiču na curenje na mjestu gubitka. Odnosno na osnovu vrijednosti OS broja

zaključujemo da li je curenje u zavisnosti od proticanja kroz otvor na pukotini ili od kretanja vode kroz okolno zemljište.

Ovim testiranjem se pokazalo sledeće: da bi curenje na mjestu isticanja bilo pod uticajem gubitaka energije kroz zemljište, što znači malu vrijednost OS broja, potrebna je relativno velika vrijednost protoka na mjestu pukotine. To znači da u većini sredina, zemljište vjerovatno neće uticati značajno na curenje na mjestu gubitka. Da bi se to desilo, očigledno je potrebna velika brzina fluida.

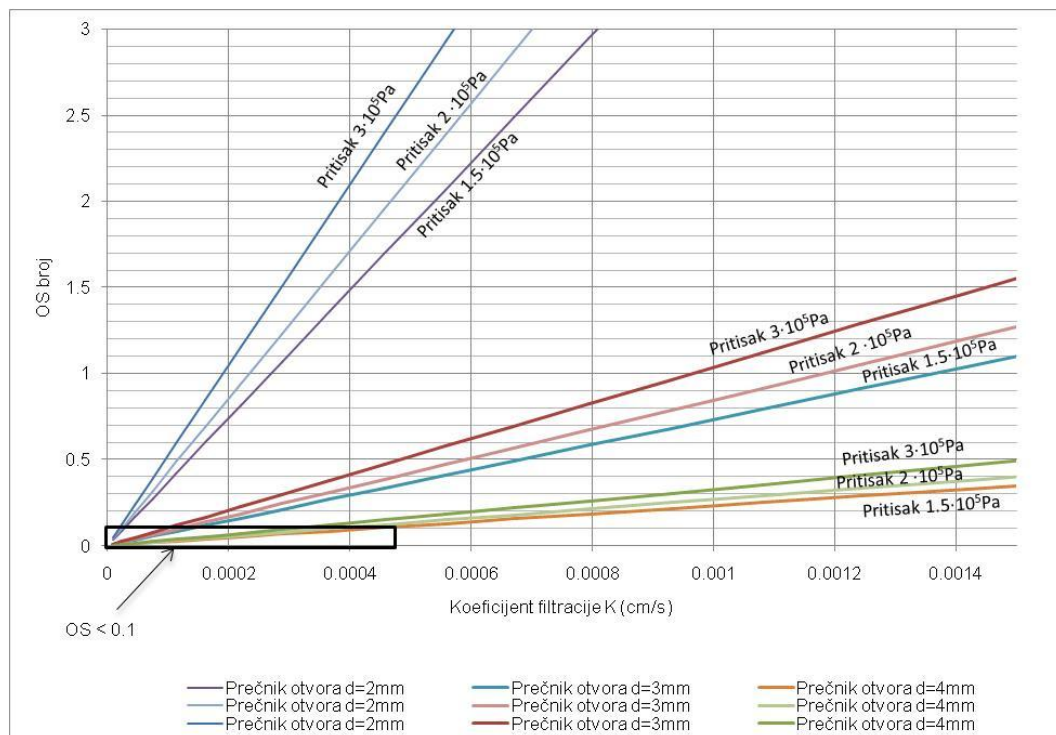
U realnim sistemima, obično je OS broj veći od 1.0, što ukazuje na to da dominiraju gubici na mjestu curenja u odnosu na gubitke kroz zemljište.

U slučajevima za  $OS < 1$ , trebalo bi da se desi veliko curenje u zemljištu slabe provodljivosti, pa da se zaključi da je curenje na pukotini pod uticajem gubitka energije kroz zemljište.

#### Analiza uticaja vrste tla na vrijednost OS broja

Za različite vrijednosti koeficijenta filtracije okolnog zemljišta, veličine pukotina na cijevima i pritiska u sistemu, računate su vrijednosti OS broja (na osnovu jednačine (3.13)). Iz dijagrama na slici 3.5 se vidi da je curenje na mjestu isticanja pod uticajem gubitaka energije toka vode kroz zemljište (slučaj  $OS < 0.1$ ), u slučajevima kad je veća vrijednost protoka na mjestu pukotine (veći prečnik pukotine) i kada je manji koeficijent filtracije okolnog tla. Takođe, zaključeno je da je pri datim uslovima, za pritisak u sistemu od 1.5 bar, taj uticaj veći nego za pritisak od 3 bar.

Uokvireno polje na dijagramu šematski predstavlja stanja sistema, za koja bi bilo potrebno modelirati gubitke energije kroz zemljište i time upotpuniti hidraulički model cjelokupnog sistema. Geološki sastavi vrsta tla kojima odgovaraju ovako niske vrijednosti koeficijenta filtracije su: gline, prašine, prašinski pijeskovi...<sup>(16)</sup>



Slika 3.5 Zavisnost OS broja od koeficijenta filtracije okolnog zemljišta i veličine pukotina na cijevima, za variran pritisak u sistemu<sup>(16)</sup>

Iz svega navedenog zaključeno je da u slučajevima kada je  $OS < 0.1$ , model gubitaka u sistemima bi trebalo upotrijebiti.

#### Uvođenje novih parametara i osvrt na definiciju OS broja<sup>(40)</sup>

Maksimalni proticaj kroz otvor gdje voda curi ( $Q_{\max}^o$ ) je u slučaju kada ne postoji uticaj okolnog zemljišta. Ako imamo to u vidu jednačina 3.11 postaje:

$$H_c = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{\max}^o}{C_d A_o} \right)^2 \quad (3.14)$$

Odnosno:

$$Q_{\max}^o = C_d A_o \sqrt{2gH_c} \quad (3.15)$$

Dijeljenjem jednačine 3.11 sa jednačinom 3.14 i uvođenjem smjene,  $q = Q/Q_{\max}^o$ , dobija se:

$$1 = q^2 + \frac{QL}{KA} \frac{2g(C_d A_o)^2}{(Q_{\max}^o)^2} \quad (3.16)$$

Uvođenjem veličine:

$$Q_{\max}^s = KA \frac{H_c}{L} \quad (3.17)$$

koja uslovno predstavlja maksimalni proticaj filtracijom kroz cilindar površine baze A i dužine L, drugi član jednačine 3.16 se može pojednostaviti, pa jednačina glasi:

$$1 = q^2 + q \frac{Q_{\max}^o}{Q_{\max}^s} \quad (3.18)$$

Ovdje se lako dolazi do kriterijuma za zanemarivanje uticaja filtracije kroz okolno zemljište. Ako se postavi uslov da se zanemaruje svako smanjenje curenja, usljed uticaja okolnog tla, koje je manje od npr 5%, dobijamo:

$$Q \geq 0.95 \cdot Q_{\max}^o \quad (3.19)$$

Odnosno:

$$1 \geq q \geq 0.95 \quad (3.20)$$

Da bi ovaj uslov bio ispunjen iz jednačine 3.18 se dobija:

$$\frac{Q_{\max}^O}{Q_{\max}^S} < 0.1 \quad (3.21)$$

Ako se postavi malo slobodniji uslov, da se zanemaruje svako smanjenje curenja koje je manje od 10%,  $Q_{\max}^O / Q_{\max}^S$  bi trebalo da bude manje od 0.2.

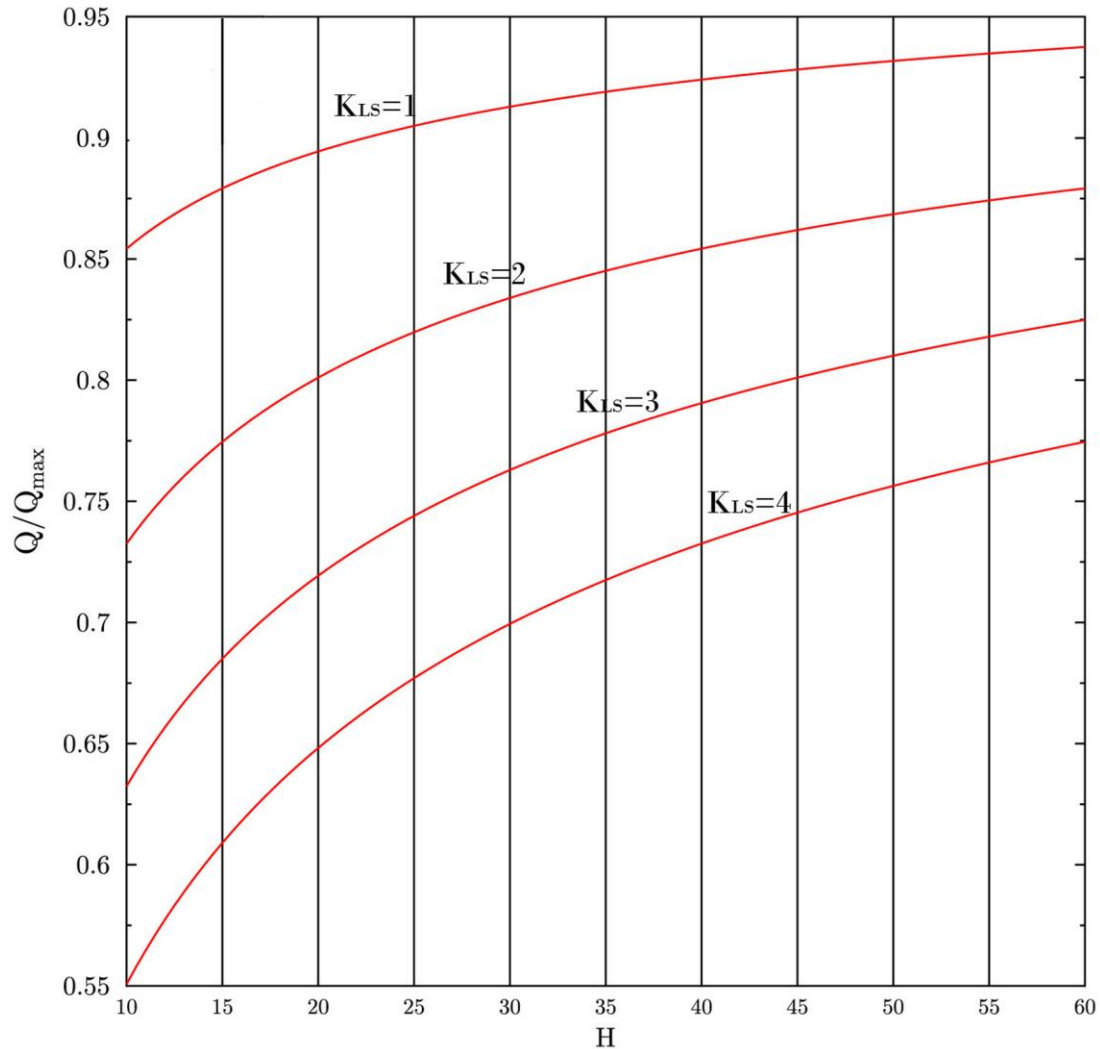
Odnos dva proticaja se može napisati i u sljedećem obliku:

$$\frac{Q_{\max}^O}{Q_{\max}^S} = \frac{C_d A_o \sqrt{2g} \sqrt{H_c}}{\frac{KA}{L} H_c} = K_{LS} \frac{\sqrt{H_c}}{H_c} \quad (3.22)$$

U jednačini 3.22,  $K_{LS}$ , je pravi parametar jer ne zavisi ni od pritiska (odnosno visine pritiska) ni od proticaja (odnosno veličine gubitka na curenje). Jedina mana mu je što je dimenzionalan, ali ako se ima u vidu da su i kriterijumi vezani za klasifikovanje gubitaka usljed curenja često u apsolutnim mjerama, to nije veliki problem.

Broj  $OS$  jeste bezdimenzionalan ali najvažniji njegov nedostatak je što u sebi sadrži proticaj, a proticaj zavisi od tog broja.

Na osnovu jednačine 3.22 moguće je napraviti dijagrame koji bi omogućili kvantifikaciju efekata smanjenja pritiska u različitim uslovima. Jedan takav dijagram prikazan je na slici 3.6, gdje je za četiri odnosa karakteristika zemljišta i veličina otvora ( $K_{LS} = 1, 2, 3, 4$ ), prikazana zavisnost proticaja od visine pritiska u cijevi na mjestu u blizine pukotine. Na ordinati je prikazana relativna vrijednost u odnosu na proticaj koji bi bio da okolno zemljište ne utiče na proticaj na mjestu curenja ( $Q_{\max}^O$ ). Pored ovoga postoji uticaj visine pritiska na proticaj curenja.



Slika 3.6 Uticaj promjene pritiska na smanjenje curenja usljed filtracije kroz zemljište

Pošto i  $OS$  i  $K_{LS}$  potiču iz iste jednačine očigledno je da postoji veza između ova dva indikatora. Lako se može pokazati da važi relacija:

$$OS = \frac{q}{K_{LS}} \sqrt{H_c} \quad (3.23)$$



Već je rečeno da  $OS$  broj predstavlja odnos gubitka energije na isticanju kroz otvor pukotine ( $h_o$ ) i gubitka usljed filtracije ( $h_s$ ), odnosno bezdimenzionalnu vrijednost gubitka ( $h_o$ ) kada je osnovna veličina ( $h_s$ ). I kada se koristi  $K_{LS}$  kao pokazatelj moguće je izraziti bezdimenzionalno gubitke energije. Osnovna veličina je raspoloživa visina pritiska  $H_c$ , što je pogodnije (i logičnije).

Kako je  $q = Q/Q_{\max}^o$ , slijedi:

$$\frac{h_o}{H_c} = q^2 \quad (3.24)$$

Kombinacijom jednačina 3.13, 3.23 i 3.22 dobija se:

$$\frac{h_s}{H_c} = K_{LS} \frac{q}{\sqrt{H_c}} = 1 - q^2 \quad (3.25)$$

Na osnovu prethodnih relacija i dijagrama na slici 3.6, u nastavku je dato poređenje dva pristupa, preko  $OS$  i preko  $K_{LS}$ .

Analizirane su dvije varijante za dvije vrijednosti  $K_{LS} = 2$  i  $K_{LS} = 4$ , kojima mogu da odgovaraju sljedeće karakteristike isticanja i porozne sredine:

- isticanje bez uticaja porozne sredine, pri visini pritiska  $60m$ , je oko  $110l/h$ , odnosno  $220l/h$ . Brojilac u  $K_{LS}$  je približno jednak  $4 \cdot 10^{-6} m^{5/2}/s$ , odnosno  $8 \cdot 10^{-6} m^{5/2}/s$ ;
- porozna sredina, shematizovana kao u eksperimentu Walskog, ima karakterističnu površinu  $A = 0.2m^2$ , karakterističnu dužinu  $L = 1.0m$  i koeficijent filtracije  $K = 10 \cdot 10^{-6} m/s$ .

Tabela 3.1. Veza  $OS$  i  $K_{LS}$

$H_c$ [m]	$K_{LS} = 2$				$K_{LS} = 4$	
	$Q_{\max}^o$ [l/s]	$q$ [-]	$Q$ [l/s]	$OS$ [-]	$q$ [-]	$OS$ [-]
20	64	0.80	51	1.79	0.65	0.73
40	90	0.86	77	2.71	0.73	1.15
60	110	0.88	97	3.41	0.775	1.50

Vidi se da broj  $OS$  značajno mijenja svoju vrijednost, a karakteristike otvora i porodne sredine su ostale iste. Za  $K_{LS} = 2$  upoređene su vrijednosti curenja bez (kolona 2) i sa uticajem okolnog zemljišta (kolona 4). Primjećuje se da je razlika ista u apsolutnoj vrijednosti.

### 3.1.1.2 Metode za upravljanje pritiskom

Upravljanje pritiskom u vodovodnoj mreži obično se sastoji od:

- upravljanja vrijednostima pritiska (redukcija pritiska);
- visinskog zoniranja.

Najčešće je u upotrebi redukcija pritiska.

Redukcija pritiska se može sprovesti raznim metodama:

- uspostavljanjem granica među zonama, unutar kojih se vrši redukcija, radi lakšeg upravljanja;
- kontrolom rada pumpi;
- ugrađivanjem kontrolnih reducirara na ulazu u zone;
- definisanjem režima rada reducirara u određenim periodima dana;
- kontrolom protoka prema potrošnji u naselju.

Sve ove metode imaju za cilj smanjenje gubitaka u vodovodnom sistemu, odnosno u krajnjem smanjenje troškova vodovodnog sistema.

### **3.1.2 REDUKCIJA PRITISKA KAO NAJPOUZDANIJA METODA UPRAVLJANJA GUBICIMA**

Uobičajena je praksa da vodovodni sistemi mrežu izdjele na zone, radi lakšeg upravljanja i kontrolisanja pritiska. Nakog toga slijedi odabir odgovarajućih mjesta u sistemu gdje će se postaviti reducir pritiska, koji će kontrolisati pritisak na ulazu u zonu. Rad reducira pritiska mora biti baziran na najnižem mogućem pritisku u sistemu (kod tzv. "kritičnog potrošača"), tj. moraju biti zadovoljene potrebe za pritiskom svih potrošača, uz obezbjeđenje rezerve radi sigurnosti rada. Problem optimalnog rasporeda reducira pritiska za kontrolu pritiska je bio predmet mnogih istraživanja.

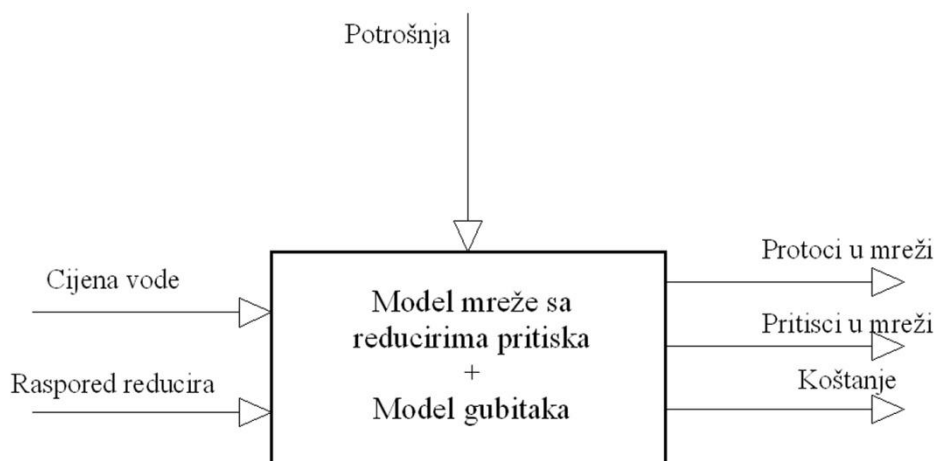
Sterling i Bargiela (1984) razvili su algoritam za izračunavanje optimalnog režima rada reducira pritiska.<sup>(10)</sup> Autori su pokušali da minimizuju odstupanja postojećih stanja vodovodnih mreža od optimalnog pretpostavljenog stanja mreže, sa optimalnim režimom rada reducira, ali pri tome nijesu uzeli u obzir jedan vrlo bitan faktor – gubitke. Vairavamoorthy i Lumbers (1998) analizirali su optimalan položaj reducira pritiska. Tucciarelli (1999) je razvio algoritam za procjenu gubitaka vode, nastalih usljed malih propuštanja, na bazi maksimalizacije funkcije vjerovatnoće. Savic i Walters(1995) i Reis i Chaudhry(1997) su razvili modele za optimalan raspored reducira pritiska.<sup>(77)</sup>

Ulanicki (1998) je razvio algoritam za optimalno raspoređivanje reducira pritiska i predložio metode za upravljanje pritiskom za "off-line" i "on-line" korišćenje. Algoritam i struktura kontrole pritiska opisani su u nastavku rada. Ovaj algoritam je sproveden, testiran i dao je zadovoljavajuće rezultate tokom projekta kontrole pritiska za "Thames Water Utilities"<sup>(88)</sup>.

#### **3.1.2.1 Konceptcija modela za optimalno raspoređivanje reducira pritiska**

U ovoj disertaciji predlaže se primjena nekog od već postojećih modela za raspoređivanje reducira pritiska u sistemu.

Metoda Ulanickog se temelji na određivanju optimalnog rasporeda reducira pritiska za date nivoe potrošnje, uzimajući u obzir model gubitaka. Šema modela prikazana je na slici 3.7.



Slika 3.7 Šema modela za optimalnu kontrolu pritiska

Pod pretpostavkom da je tečenje stacionarno, promjene u podešavanju reducira pritiska uzrokuju promjene u protoku i pritisku u sistemu.

Problem kontrole pritiska je klasičan problem optimizacije u kom je raspored reducira računat u toku nekog vremena rada sistema.

Komponente procesa optimalne regulacije pritiska su:

- ciljna funkcija – minimiziranje koštanja vode koja ulazi u mrežu;
- prošireni model mreže – model sa gubicima;
- ograničenja – u vidu nejednačina.

#### *Ciljna funkcija*

Ciljna funkcija podrazumjeva minimizaciju troškova proizvodnje vode što uključuje tretman, transport i distribuciju vode koja ulazi u sistem. Ciljna funkcija treba da uzme u

obzir i ostale troškove: troškove rada reducira pritiska, eventualne troškove kazni usljed posljedica devijacije pritiska u sistemu... Kako je sve ove troškove teško uzeti u obzir, za potrebe kontrole pritiska, dovoljno je uzeti u razmatranje cijenu isporučene vode, za razmatrani vremenski period.

Ciljna funkcija:

$$\phi_t = \sum_{i \in I_b} c_i(t) q_i(t), t \in T \quad (3.26)$$

gdje je:

$q_i$      protok;

$c_i$      jedinična cijena vode (uključuje troškove zahvatanje, tretmana i transporta vode);

$I_b$      broj graničnih čvorova;

$T$      broj vremenskih koraka.

Pretpostavljeno je da zona potrošnje sadrži skup graničnih čvorova  $I_b$ , koji su povezani sa vanjskim čvorovima (koji ne pripadaju zoni), preko reducira pritiska.

Pod pretpostavkom da potrošnja nije ograničena pritiskom, minimiziranje ukupnih troškova graničnih protoka je ekvivalentno minimiziranju gubitaka.

*Prošireni model za potrebe optimalne kontrole pritiska*

U cilju uspostavljanja optimalne kontrole pritiska, glavnu ulogu ima raspored reducira u sistemu. Osnovni uslov je da sve promjenljive zadovoljavaju jednačine hidrauličkog modela<sup>(88)</sup>.

A) Jednačine modela:

1. Veza pijezometarske kote i protoka u cijevi, koja ima za početak čvor "i", a za kraj čvor "j", može biti izražena Hazen-Williams-ovom formulom:

$$h_i - h_j = R_{ij} \cdot q_{ij} \cdot |q_{ij}|^{0.852} \quad (3.27)$$

2. Ako se zatvarač, nalazi između "i" i čvora "j", jednačina glasi:

$$h_i - h_j = K_{ij}(v_{ij}) R_{ij} \cdot q_{ij} \cdot |q_{ij}|^{0.852} \quad (3.28)$$

gdje je:

$h_i$  kota piezometra u čvoru "i";

$h_j$  kota piezometra u čvoru "j";

$R_{ij}$  otpor bilo u cijevi ili na zatvaraču (linijski i lokalni);

$K_{ij}$  koeficijent gubitka u zavisnosti od stepena otvorenosti zatvarača  $v_{ij}$ . Ako je zatvarač otvoren  $K_{ij}=1$ . Teoretski, za potpuno zatvoren zatvarač  $K_{ij} \rightarrow \infty$ ;

$q_{ij}$  protok kroz cijev "i-j".

3. Jednačina održanja mase:

$$\sum_{k \in Ni^+} q_{ki} - \sum_{k \in Ni^-} q_{ik} = d_i + l_i \quad (3.29)$$

gdje je:

$Ni^+$  skup čvorova povezanih sa čvorom "i", kao konačnim čvorom;

$Ni^-$  skup čvorova povezanih sa čvorom "i", kao polaznim čvorom;

$d_i$       potrošnja;

$l_i$       gubitak.

Uobičajeni hidraulički modeli nemaju informaciju mogućnost modeliranja gubitaka vode u mreži. Gubici su u tim modelima obično obuhvaćeni kroz čvornu ili usputnu potrošnju. Kontrola pritiska zahtjeva poboljšani hidraulički model, koji ima obuhvaćene gubitke, ali ne, kao do sada, kroz potrošnju.

4. Jednačina veze pritiska i gubitaka:

$$l_i = k_i \cdot p_i^N = k_i \cdot (h_i - H_i)^N \quad (3.30)$$

gdje je:

$k_i$       koeficijent gubitka;

$N$       eksponent gubitka;

$H_i$       visinska kota čvora "i".

Na ovaj način se podrazumjeva da se gubici raspoređuju na čvorove. Skup ovih čvorova u nastavku biće označen sa  $I_d$ .

Eksponent  $N$  se kreće od 0.5 do 2.5, kako je već ranije rečeno. Koeficijent gubitka  $k_i$  zavisi od potrošnje u svakom čvoru.

B) Procjena gubitaka

Procijenjena ukupna vrijednost gubitaka je distribuirana na čvorove, proporcionalno njihovoj potrošnji. Pretpostavljeno je da su ukupni gubici jednaki minimalnoj noćnoj potrošnji, koja se dešava u vremenu  $t_{\min}$ .<sup>(88)</sup>

$$q(t_{\min}) = \sum_{i \in I_d} l_i(t_{\min}) = \sum_{i \in I_d} k_i \cdot p_i(t_{\min})^N = \sum_{i \in I_d} \beta \cdot d_i(t_{\min}) \cdot p_i(t_{\min})^{1.1} \quad (3.31)$$

gdje je:

$d_i(t_{\min})$  gubitak u čvoru "i" u vremenu  $t_{\min}$ ,

$p_i(t_{\min})$  pritisak u čvoru "i" u vremenu  $t_{\min}$ ,

$\sim$  eksponent gubitka, usvojena je vrijednost 1.1 (kao prosječna vrijednost za mreže u kojima se pojavljuju i bazni gubici i procurivanje na pukotinama),

$k_i$  koeficijent gubitka.

Koeficijent gubitka  $k_i$  se računa iz:

$$k_i = \beta \cdot d_i(t_{\min}) \quad (3.32)$$

gdje je:

$\beta$  konstanta.

Konstanta  $\beta$  se računa iz jednačine:

$$\beta = \frac{q(t_{\min})}{\sum_i d_i(t_{\min}) \cdot p_i(t_{\min})^{1.1}} \quad (3.33)$$

Stvarna potrošnja, potrošnja bez gubitaka,  $\bar{d}_i(t)$ , dobijena je za svaki čvor oduzimanjem gubitka od ukupne potrošnje:



$$\bar{d}_i(t) = d_i(t) - k_i \cdot p^{1.1}_i(t) \quad (3.34)$$

za svaki vremenski trenutak  $t$ .

Jednačine koje predstavljaju gubitke dodate su standardnim jednačinama za opis tečenja u vodovodnim mrežama. Time je dobijen proširen model kojim je omogućena održiva kontrola pritiska i analize gubitaka.

### *Ograničenja*

Ograničenja u problemu optimizacije predstavljaju zahtjeve koje se odnose na promjenljive u modelu. Na listi ograničenja se nalaze uslovi koji obezbjeđuju nesmetan rad sistema.

Ograničenja su:

1. Protok koji ulazi u mrežu mora biti pozitivan:

$$q_{b,i} \geq 0 \quad (3.35)$$

2. Granični protok mora biti u skladu sa ograničenjima snabdijevanja (kapacitet postrojenja za tretman vode, kapacitet pumpnog postrojenja ...):

$$q_{b,i} \leq q_{b,i \max} \quad (3.36)$$

$q_{b,i \max}$  maksimalni protok u graničnom čvoru

3. Pritisak u graničnom čvoru mora biti u opsegu koji nameću granični uslovi:

$$h_{b \max,i} \geq h_{b,i} \geq h_{b \min,i} \quad (3.37)$$

$h_{b \max,i}$ ,  $h_{b \min,i}$  maksimalni i minimalni dostupan pritisak u graničnom čvoru.

4. Pritisak u kritičnom čvoru mora biti u preporučenim granicama:

$$h_{t\max,i} \geq h_{t,i} \geq h_{t\min,i} \quad (3.38)$$

$h_{t\max,i}, h_{t\min,i}$  maksimalni i minimalni preporučeni pritisak u kritičnom čvoru.

5. Pritisak u svim čvorovima mora biti u granicama:

$$h_{i\max,i} \geq h_{i,i} \geq h_{i\min,i} \quad (3.39)$$

#### *Iskustva u primjeni prethodnih teorijskih postavki modela optimizacije*

Algoritam za optimalan plan rada reducira pritiska u sistemu je kodiran u matematičkom jeziku GAMS (Brooke, 1992), a numeričko rješenje ne-linearnom metodom riješeno je modelom CONOPT-om (Drud, 1985). Numeričko rješenje problema je u formi skupa optimalnih operativnih krajnjih položaja reducira pritiska. Optimalan položaj minimizira dotok u mrežu i zadovoljava sva ograničenja koja diktira mreža. Optimalni položaj je važeći za dati nivo potrošnje. Skup optimalnih položaja reducira u toku vremena se naziva optimalan plan rada reducira. Optimalan plan rada reducira omogućuje teoretski minimum koštanja vode koja ulazi u sistem, uz zadovoljenje svih ograničenja u mreži. Softver za proračun optimalnog plana rada reducira može biti korišćen za "off-line" planiranje, kao što su procjene smanjenja pritiska i nivoa curenja. Takođe može biti korišćen i za "on-line" kontrolu pritiska. "On-line" kontrola pritiska može biti implementirana u dva slučaja: 1) planirana kontrola i 2) povratna kontrola (Ulanicki, 2000). Planirana kontrola raspoređuje reducira na osnovu planirane potrošnje u mreži. Povratna kontrola koristi protok kao zamjenu za parametre reducira. Reducir je podešen tako da izlazni pritisak zavisi od protoka na zatvaraču.

Da bi proces optimalnog rasporeda reducira pritiska u sistemu bio što uspješniji, neophodno je da procjenjeni gubici u modelu u što većem stepenu odgovaraju stvarnim gubicima. tj problem se svodi na problem modeliranja gubitaka u hidrauličkom modelu mreže.



### 3.1.3 ODNOS IZMEĐU PRITISKA I UČESTANOSTI POJAVE NOVIH GUBITAKA

Visoki pritisci u sistemu imaju za posljedicu, ne samo povećanje otvora postojećih pukotina, nego i pojavu novih.

Učestanost naglih promjena pritiska u sistemu, smanjuje prosječni vijek trajanja cjevovoda. U slučajevima nekontinualnog snabdijevanja, učestanost pojave novih pukotina može biti preko 10 puta veća, nego u slučajevima kontinualnog snabdijevanja, sa ujednačenim pritiskom u toku vremena.<sup>(51)</sup>

Smanjenje učestanosti pojave pukotina se ostvaruje redukcijom pritiska u mreži, zavisnost je prikazana sledećom jednačinom (Pearson *et al.*, 2005)<sup>(2)</sup>:

$$\frac{BF_1}{BF_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{N1} \quad (3.40)$$

gdje je :

$P_0$  -pritisak prije redukcije;

$P_1$  -pritisak nakon redukcije;

$BF_0$  -frekvencija pojave pukotina prije redukcije pritiska;

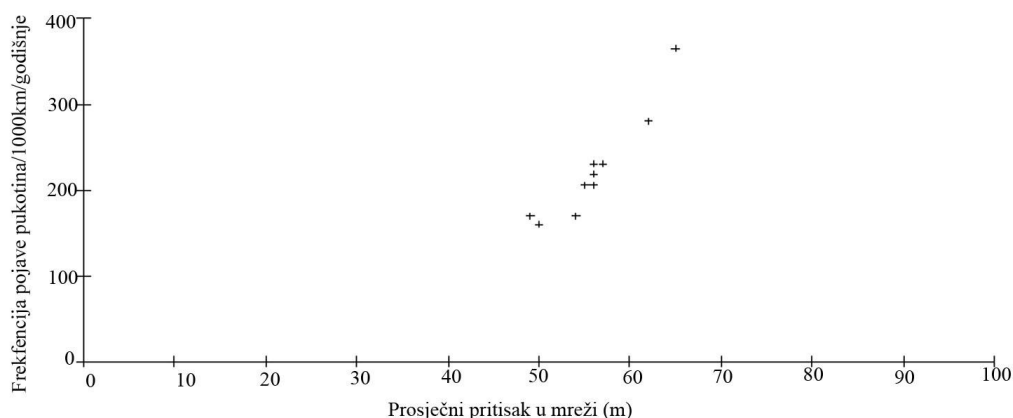
$BF_1$  -frekvencija pojave pukotina nakon redukcije pritiska;

$N1$  -eksponent koji zavisi od saobraćajnog opterećenja, zemljanog nadsloja iznad cijevi, radnog pritiska u odnosu na projektovani pritisak, starosti cijevi, karakteristika okolnog zemljišta, kvaliteta izvođenja, materijala cijevi i temperaturnih oscilacija.

Thornton i Lambert (2005), na osnovu svojih istraživanja, preporučuju vrijednost za eksponent  $N$  u opsegu  $0,5 \div 6,5$ , dok analize Pearsona (2005) ukazuju na opseg  $0,2 \div 8,5$  (srednja vrijednost 2,47) za glavne dovodne cjevovode i opseg  $0,2 \div 12$  (srednja vrijednost 2,36) za distributivne cjevovode. Rezultat studije iz 112 sistema u 10 zemalja (Thornton & Lambert, 2007) procjenjuju srednju vrijednost  $N=1,4$ , za pritiske koji su definisani kao maksimalni pritisci u sistemu.<sup>(2)(83)</sup>

U proteklim godinama, na osnovu podataka koji pokazuju značajno smanjenje broja pukotina u 112 zona u kojima se upravlja pritiskom (PMA) u 12 zemalja (Thornton&Lambert, 2006; Thornton&Lambert, 2007), međunarodno je priznato da se na učestanost pojave pukotina može uticati na način da se upravlja pritiskom.<sup>(51)</sup>

U Velikoj Britaniji postoje podaci o tome kako se učestanost pojave pukotina mijenja u funkciji od promjene pritiska, kako unutar OZB, tako i unutar velikih vodovodnih sistema, slika 3.8. U oba slučaja, podaci ukazuju na to, da u sistemima koji se kontinualno snabdijevaju vodom, nagli porast frekfencije pojave pukotina se dešava kada pritisak pređe vrijednost oko 3,5 do 4 bar.<sup>(51)</sup>



*Slika 3.8 Frekfencija pojave pukotina u zavisnosti od prosječnog pritiska u mreži, u većem vodovodnom sistemu u Velsu<sup>(51)</sup>*

Ne postoji jasno definisana u zavisnost između povećanja pritiska i frekfencije pojave novih pukotina, ali je nesumnjivo jasno da oscilaciju pritiska i povećanje pritiska u mreži doprinose pojavi novih pukotina. Pojava novih pukotina dovodi do povećanja postojećih gubitaka, odnosno povećanja troškova. U velikim sistemima, sa velikom frekfencijom pojave novih pukotina, obično glavni trošak je otkrivanje i sanacija novih pukotina. Upravljanje pritiskom je mjera koja je, osim za smanjenje procurivanja na postojećim pukotinama, jednako važna i za smanjenje frekfencije pojave novih pukotina.

### 3.1.4 EKONOMSKE POSLJEDICE REDUKCIJE PRITISKA U SISTEMU

Cilj upravljanja pritiskom u vodovodnim sistemima je smanjenje gubitaka, bez smanjenja kvaliteta usluga potrošačima. Kao što je prethodno navedeno ovo se obično postiže instaliranjem odgovarajućeg broja reducira pritiska, koji održavaju minimalni potreban pritisak na kritičnim mjestima u sistemu. Neto korist od sprovođenja postupka upravljanja pritiskom se obično ocjenjuje procjenom troškova instaliranja reducira pritiska i dobiti koja je posljedica smanjenja gubitaka (Ulanicki et al., 2000).<sup>(88)</sup> Ekonomska analiza upravljanja pritiskom je rađena i na bazi uštede zbog smanjenja frekvencije pojave novih pukotina u sistemu (Bragalli & Sacchi, 2002; Girard & Stewart, 2007)<sup>(11)(30)</sup>

Razvijeni su i matematički modeli za izračunavanje dobiti i troškova upotrebom reducira pritiska u sistemu (Awad et al., 2008)<sup>(2)</sup>. Awad et al. su razvili model koji uzima u obzir direktne i indirektne troškove i dobiti od redukcije pritiska. Model je razvijen da može da se koristi kao dio metodologije za optimalan izbor lokacije i parametara reducira pritiska u distributivnom sistemu. Određivanje dobiti od redukcije pritiska u mreži se sastoji od: dobiti od smanjenja curenja, dobiti od smanjenja učestanosti pojave novih pukotina, dobiti od uštede energije, dobiti od smanjenja potrošnje, dobiti od indirektnih posljedica smanjenja utroška vode, dobiti od smanjenja ulaganja u proces aktivne kontrole gubitaka, dobiti od smanjenja kontakata sa potrošačima (usljed smanjenih problema sa: pukotinama, visokim pritiskom, niskim pritiskom,...). Na suprotnoj strani dobiti stoje troškovi koji se svodena troškove instaliranja i/ili održavanja reducira pritiska.<sup>(2)</sup>

U ovoj doktorskoj disertaciji ekonomska dobit od redukcije pritisaka je posmatrana kroz direktnu dobit koju preduzeće koje upravlja sistemom ostvari od smanjenja curenja, a trošak je određivan kroz troškove instaliranja i održavanja reducira pritiska. Konačna podjela vodovodnog sistema na OZB se zasniva na ekonomskim razlozima.

## 3.2 EKONOMSKI FAKTORI KOJI UTIČU NA IZBOR OPTIMALNE VELIČINE OZB

Od svih faktora koji prate problematiku formiranja OZB u sistemu, najčešće su ekonomski faktori odlučujući. Na kraju, cilj preduzeća koje upravlja vodovodnim sistemom i jeste smanjenje troškova i povećanje dobiti. Stoga je pravilna analiza ekonomskih faktora, od velikog značaja za kvalitetnu podjelu sistema na OZB. U procesu podjele sistema na OZB javljaju se troškovi formiranja i troškovi pretrage OZB. Osim troškova pretrage, neophodno je analizirati i *troškove formiranja OZB* u sistemima. Minimalizacija ukupnih troškova (zbir troškova formiranja i pretrage) ima za cilj pravilan odabir veličine OZB u sistemu.

U cilju boljeg razumijevanja troškova pretrage OZB u sistemu, objašnjen je pojam prijavljenog i neprijavljenog curenja vodovodnim sistemima.

*Prijavljeno curenje* se definiše kao curenje koje je prijavljeno vodovodnom preduzeću za snabdijevanje vodom, obično od strane potrošača koji imaju probleme sa snabdijevanjem, ili od ljudi koji primijete da voda izlazi iz zemlje. Prijavljeno curenje je uglavnom vidljivo i često ga karakterišu veliki protoci.

Najveći godišnji gubici često nastaju usljed *neprijavljenog curenja*, jer je trajanje curenja kod njih uglavnom duže. Kod neprijavljenog curenja, na vrijeme otkrivanja pukotine, utiče praksa upravljanja gubicima: bez upravljanja gubicima, vodovodno preduzeće neće biti svjesno postojanja gubitka.

Da se zaključiti da je glavni faktor, koji utiče na smanjenje gubitaka usljed pukotina nastalih u distributivnoj mreži, *vrijeme*, odnosno brzina otkrivanja mjesta pukotine. Kod prijavljenih pukotina je brzina lociranja i sanacije pukotine presudna za njeno otklanjanje. U slučaju otkrivanja i eliminisanja neprijavljenog curenja, a koje je često veće od prijavljenog, važnu ulogu igra periodično pretraživanje sistema. Troškovi pretrage su vezani za periodično pretraživanje sistema.

### 3.2.1 TROŠKOVI FORMIRANJA OSNOVNIH ZONA BILANSIRANJA

Podjela sistema na OZB nosi sa sobom neophodne intervencije na postojećoj infrastrukturi vodovodnih sistema (uvođenje zatvarača, mjerača protoka, mjerača pritiska, čak ukidanje nekih dionica, ili uvođenje novih...). U zavisnosti od konfiguracije sistema, i stepena intervencija na njemu, troškovi formiranja mogu biti manji ili veći. Veličina OZB utiče na troškove njihovog formiranja: što je manja OZB, troškovi su veći, zbog potrebe za većim brojem zatvarača i mjerača protoka.

*Troškovi opreme za mjerenje koja je instalirana na početku*

Troškovi postavljanja opreme za formiranje OZB su svedeni na godišnji nivo množenjem investicije sa faktorom CRF(Cost Recovery Factor). Faktor je definisan sledećom jednačinom (Hicks 1999)<sup>(2)</sup>:

$$CRF = \frac{I(1+I)^M}{(1+I)^M - 1} \quad (3.41)$$

gdje je:

I - godišnja kamatna stopa;

M - broj godina.

Godišnji troškovi održavanja opreme su pretpostavljeni da su fiksni procenat njenih godišnjih troškova.

*Troškovi prekida, uklanjanja postojećih ili dodavanja novih cjevovoda*

Troškovi prekida cjevovoda, uklanjanja postojećih i dodavanja novih cjevovoda su svedeni na godišnje troškove. Ponekad su za formiranje OZB neophodne ozbiljne intervencije, a sve u cilju obezbeđenja dovoljne količine vode korisnicima, i zahtjevanog pritiska u sistemu.



### 3.2.2 TROŠKOVI PRETRAGE OSNOVNIH ZONA BILANSIRANJA

Radi boljeg razumijevanja troškova pretrage najprije su objašnjene metode za otkrivanje gubitaka u zoni, koje se sreću u dosadašnjim istraživanjima.<sup>(64)</sup> Gubici u jednoj OZB mogu se izračunati na osnovu dvije metode, to su:

- bilans ukupnih količina;
- analiza noćne potrošnje.

Bilans ukupnih količina se računa na osnovu razlike izmjerenih ukupnih individualnih potrošnji u zoni i ukupnog dotoka vode u zonu. Ta razlika predstavlja vodu za koju se ne zna gdje je utrošena (Unaccounter for Water, UFW). To je voda koja je došla do potrošača, ali nije izmjerena zbog netačnosti mjerenja (korisnički vodomjeri ne mogu da registruju male protoke - curenja kod korisnika, pa se to prenosi kao gubitak distributivnog sistema), loše procjene nemjerene potrošene vode, ili neovlašćene potrošnje. Na osnovu IWA metodologije ta voda predstavlja prividne gubitke (Apparent Losses, AL). Na osnovu ove metode se ne može jasno utvrditi koliki su stvarni gubici.

Analiza noćne potrošnje može se koristiti samo ako se raspoložuje pouzdanim podacima. Potrebno je da se podaci registruju pomoću dobrih instrumenata, sistematski, neprekidno i sa mjernim ciklusom ne dužim od 15-20 minuta<sup>(64)</sup>. Visoka noćna potrošnja je pokazatelj lošeg stanja sistema i velikih gubitaka. U nekim slučajevima postoji tendencija rasta noćne potrošnje, što ukazuje na povećanje gubitaka. A u nekim slučajevima noćna potrošnja je visoka ali stabilna, što ukazuje da gubitaka ima, ali da se radi o pukotinama koje se ne mjenjaju tokom vremena. U primjerima u literaturi zapaženi su i vodovodni sistemi u kojima je cijev pukla, ali se noćna potrošnja nije znatnije promjenjena.<sup>(64)</sup> Na osnovu posmatranja dijagrama noćne potrošnje, u većim zonama je teže uočiti procurivanje na cjevovodu, dok je u manjim zonama to lakše.

U pregledu literature se nalaze i predlozi periodične pretraga zona.<sup>(36)</sup> To je prvenstveno važno radi otkrivanja i eliminisanja neprijavljenog curenja, a koje je obično puno veće od prijavljenog procurivanja. Period nakon koga se kreće u pretragu sistema, direktno definiše troškove održavanja tog sistema. Kod neprijavljenog curenja, na vrijeme

otkrivanja pukotine utiče veličina vremenskog intervala, nakog koga se curenje ispituje. Da bi se definisali troškovi pretrage OZB, potrebno je znati nakon kog vremenskog perioda se kreće u akustičku pretragu sistema. Češća pretraga sistema, znači veće troškove i obrnuto. U slučaju neprijavljenog curenja sistem se pretražuje periodično, najbolje nakon vremena koje je definisano kao "optimalno vrijeme pretrage sistema". Da bi se odredilo optimalno vrijeme, potrebno za pretragu OZB, pretpostavljeno je da se pretraživanje dešava periodično. Period za pretragu označen je sa  $T_I$ .<sup>(36)</sup>

Gubitak vode koji se dešava u periodu,  $T_I$ , pod pretpostavkom da su pukotine uniformno raspoređene, iznosi<sup>(36)</sup>:

$$WL^{T_I} = \int_0^{T_I} RL_{OZB} F_o (T_I - t) dt = RL_{OZB} F_o T_I^2 / 2 \quad (3.42)$$

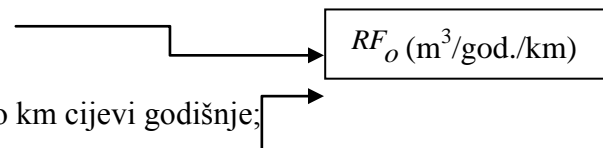
gdje je:

$R$  gubitak vode ( $m^3/god./pukotini$ );

$F_o$  učestalost neprijavljenih pukotina po km cijevi godišnje;

$L_{OZB}$  dužina distributivnih cijevi (km);

$t$  vrijeme.



Ukupni godišnji troškovi sistema sa gubicima, se sastoje od cijene vode koja je izgubljena usljed procurivanja i cijene akustičkih pretraga sistema:

$$C_{OZB}^{god} = [cRL_{OZB} F_o T_I^2 / 2 + C_{pretraga}^{OZB}] / T_I = cRLF_o T_I / 2 + C_{pretraga}^{OZB} / T_I \quad (3.43)$$

gdje je:

$c$  krajnja cijena vode ( $€/m^3$ );

$C_{pretraga}^{OZB}$  koštanje akustičke pretrage vodovodnog sistema.

Pretpostavka je da se pretraga vrši u veoma kratkom periodu u poređenju sa vremenom  $T_I$  i da je gubitak vode tokom pretrage mali i nije uzet u proračun.

Optimalni period intervencije  $T_I^{optimum}$ , je period koji minimizira ukupne godišnje troškove. Dobija se iz uslova:

$$\frac{dC_{OZB}^{god}}{dT} = 0 \quad (3.44)$$

$$cRL_{OZB}F_o / 2 - C_{pretraga}^{OZB} / T_I^2 = 0 \quad (3.45)$$

Optimalno vrijeme pretrage iznosi:

$$T_I^{optimum} = \sqrt{\frac{2C_{pretraga}^{OZB}}{cRL_{OZB}F_o}} \quad (3.46)$$

Troškovi akustičke pretrage vodovodnog sistema iznose:

$$C_{pretraga}^{OZB} = \frac{L_{OZB}}{v_{pretraga}} Nr \cdot P \cdot F_t \quad (3.47)$$

gdje je:

$L_{OZB}$  dužina distributivnih cijevi (km);

$v_{pretraga}$  brzina pretrage sistema (km/god./radni tim);

$Nr$  broj radnika u radnom timu;

$P$  godišnja plata radnika;

$F_t$  koeficijent opštih troškova.

Minimalni godišnji troškovi, koji se sastoje od cijene vode koja je izgubljena usljed procurivanja i cijene akustičkih pretraga sistema, se dobijaju kombinacijom jednačina 3.43 i 3.47:

$$C_{\min}^{god} = cRLF_o T_I / 2 + C_{pretraga}^{OZB} / T_I = \frac{cRLF_o T_I^2 + 2C_{pretraga}^{OZB}}{2 \cdot T_I} \quad (3.48)$$

$$C_{\min}^{god} = \frac{cRLF_o \left( \sqrt{\frac{2C_{pretraga}^{OZB}}{cRL_{OZB} F_o}} \right)^2 + 2C_{pretraga}^{OZB}}{2 \cdot \sqrt{\frac{2C_{pretraga}^{OZB}}{cRL_{OZB} F_o}}} \quad (3.49)$$

$$C_{\min}^{god} = \sqrt{2cRL_{OZB} F_o C_{pretraga}^{OZB}} \quad (3.50)$$

Kombinacijom jednačina 3.47 i 3.50 dobija se konačan izraz za minimalne godišnje troškove u funkciji od:  $L_{OZB}$ ,  $v_{pretraga}$ ,  $Nr$ ,  $P$ ,  $Ft$ ,  $c$ ,  $R$  i  $F_o$ :

$$C_{\min}^{god} = L_{OZB} \sqrt{\frac{2cRF_o Nr \cdot P \cdot Ft}{v_{pretraga}}} \quad (3.51)$$

Iz jednačine 3.46, koja definiše optimalno vrijeme pretrage, slijedi:

$$cRL_{OZB} F_o (T_I^{optimum})^2 / 2 = C_{pretraga}^{OZB} \quad (3.52)$$

Lijeva strana jednačine 3.52 se odnosi na zapreminu vode koja je izgubljena usljed procurivanja, tokom perioda  $T_I^{optimum}$ . Drugim riječima, najekonomičnije vrijeme za preduzimanje akustičke pretrage sistema je kada troškovi vode koja je izgubljena usljed procurivanja budu jednaki cijeni pretrage sistema.

U nekim slučajevima je potrebno krenuti u saniranje sistema kad se evidentira procurivanje. To je slučaj prijavljene pukotine. U nastavku je objašnjen takav slučaj. U pretragu OZB se krenulo zbog evidentiranja gubitka vode usljed pukotine na vodovodnoj cijevi. U ovom slučaju, minimalni godišnji troškovi, koji se sastoje od koštanja vode i troškova pretraživanja sistema u cilju otkrivanja mjesta pukotine, (ne uključujući troškove opreme za mjerenje koja je instalirana na početku u svakoj OZB), jednaki su:

$$C_{\min}^{god} = C_{gub} + C_{pretraga} + C_{servise} = N_{OZB} cR_{glavni} L_{OZB} F_o (T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke}) \quad (3.53)$$

$$+ N_{OZB} L_{OZB} F_o C_{pretraga}^{OZB} + N_{OZB} cR_{servis} L_{OZB} F_o^{servis} \left( \frac{1}{F_o^{glavni} L_{OZB}} \right) / 2$$

gdje je:

- $C_{gub}$  cijena vode koja je izgubljena usljed procurivanja;
- $C_{pretraga}$  cijena pretrage sistema u cilju otkrivanja pukotina;
- $C_{servis}$  cijena vode koja je izgubljena u toku saniranja pukotine.

Odgovarajući godišnji gubici vode, ne uključujući bazne gubitke i prijavljene gubitke, jednaki su:

$$WL_{ukupni}^{god} = N_{OZB} R_{glavni} L_{OZB} F_o^{glavni} (T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravka}) + N_{OZB} L_{OZB} F_o^{glavni} C_{pretraga}^{OZB} + \quad (3.54)$$

$$N_{OZB} cR_{servis} L_{OZB} F_o^{servis} \left( \frac{1}{F_o L_{OZB}} \right) / 2$$

gdje je:

$N_{OZB}$	broj OZB u sistemu;
$c$	krajnja cijena vode (€/m <sup>3</sup> );
$R_{glavni}$	prosječan gubitak na glavnoj pukotini (m <sup>3</sup> /god.);
$L_{OZB}$	dužina distributivne cijevi u OZB;
$F_o$	učestalost pukotina na cijevi (pukotina/km/god.);
$T_{svjesnosti}$	vrijeme svjesnosti, vrijeme potrebno da se detektuje procurivanje na pukotini, posmatranjem dijagrama noćne potrošnje;
$T_{lociranja}$	vrijeme lociranja pukotine, jednako je 1/2 vremena pretrage OZB;
$C_{pretraga}^{OZB}$	koštanje pretrage cijele OZB;
$R_{servis}$	prosječan gubitak vode u toku popravke kvara (m <sup>3</sup> /god.);
$F_o^{servis}$	učestalost popravke pukotina (pukotina/km/god.).

### 3.2.3 UKUPNI TROŠKOVI

Nakon definisanja troškova formiranja i troškova pretrage OZB, moguće je sračunati *ukupne godišnje troškove* za jednu OZB:

$$C_{ukupno}^{god} = C_{pretraga}^{god} + C_{form}^{god} \quad (3.55)$$

Prilikom definisanja veličine OZB, vodi se računa da ukupni godišnji troškovi budu minimalni.

### 3.3 OSTALI FAKTORI KOJI UTIČU NA FORMIRANJE VELIČINE OZB

Kao što je navedeno zadatak formiranja OZB obuhvata analizu: pritiska u sistemu, topografije sistema, ekonomskih i socioloških faktora. Važan činilac koji potvrđuje uspješnost formiranja OZB je i neznatan uticaj na kvalitet snabdijevanja vodom korisnika.

Faktori koje treba uzeti u obzir prilikom projektovanja OZB su:

- zahtjevani ekonomski nivo gubitaka;
- veličina (geografska oblast i broj priključaka potrošača);
- tip izgradnje (blokovi zgrada, pojedinačne porodične kuće...);
- varijacija u visinskim kotama zemljišta;
- moguća promjena kvaliteta vode;
- zahtjevani pritisci;
- potrošnja neophodna za zaštitu od požara;
- broj zatvarača koje treba zatvoriti;
- broj mjerača koji se koriste za monitoring protoka;
- veliki potrošači treba da imaju svoje mjerače koji se tretiraju kao izlazni mjerači iz OZB;
- stanje infrastrukture.<sup>(39)</sup>

Formiranje OZB podrazumjeva uvođenje zatvarača i prekidanje cjevovoda, čime se stvaraju grane u mreži, tj "slijepi" krajevi u sistemu. To kao posljedicu može imati pogoršanje *kvaliteta vode*, u odnosu na stanje prije podjele na OZB. Ovaj problem se može djelimično ublažiti sa programom ispiranja. Tamo gdje se smatra da bi kvalitet vode mogao da predstavlja problem, tačke u kojima se vrši ispiranje treba da budu uzete u obzir pri projektovanju zona.

Očigledno je da stvarne granice moraju biti dio kompromisa ukoliko će se OZB formirati uz *minimalne promjene infrastrukture*. Na primjer, postojeći zatvarač se možda ne nalazi tačno na "mrtvoj" tački, tako da se mora koristiti sledeći najbliži

zatvarač. U nekim slučajevima bilo bi ekonomičnije da se cjevovodi povežu, naročito ukoliko bi to omogućilo sprovođenje upravljanja pritiskom<sup>(39)</sup>.

Često se dešava u praksi, da se odstupa od usvojenog koncepta podjele na OZB, zbog rasporeda postojeće infrastrukture.

Cilj svakog preduzeća koje gazduje vodovodnim sistemom jeste, i treba da bude, povećanje procenta naplate isporučene vode, čemu formiranje OZB svakako dobrinosi, pa je često to jedna od osnovnih motiva za donošenje odluke o formiranju zona. Preduzeća koja gazduju vodovodnim sistemom obično imaju sopstvene kriterijume za određivanje najpogodnije metode za smanjenje gubitaka i definisanje izbora veličine OZB. Obično su ti kriterijumi diktirani ciljevima preduzeća i njegovom kadrovskom politikom.

Proces automatizacije, nadzora i telemetrije sistema, svakako je lakše sprovesti kod sistema koji će imati uređene OZB, pa je formiranje zona jedan od uslova razvoja tog sektora vodovodne mreže.

Sociološki faktor, odnosno saradnja sa krajnjim korisnicama u procesu poboljšanja performansi vodovodnog sistema, je jedan od faktora procesa formiranja OZB. Ako je iskustvo formiranja OZB pozitivno u jednom naselju ili njegovom dijelu, ono će se lakše prihvatiti od strane potrošača, jer u krajnjem, dio benefita pripada i njima, kroz manji račun i kontinualno snabdijevanje vodom. To se može postići javnim programima i edukacijom stanovništva o problemu gubitaka. Intervencije koje stanovništvo može izvesti u okviru svoje infrastrukture (sanacija dotrajalih fittinga i cijevnog materijala), mogu da pomognu u smanjenju gubitaka u cjelosti.

Jasno je da će svi navedeni faktori uticati na konačan odabir granica OZB.



# 4

## SOPSTVENA ISTRAŽIVANJA

### 4.1 TEORIJSKA POSTAVKA I DOKAZ TEZE

#### *Metodologija sopstvenih istraživanja*

Za sada nema univerzalno prihvaćene metodologije i lako raspoloživih matematičkih modela koji su široko u upotrebi i koji se mogu jednostavno koristiti u procesu formiranja OZB. Razloga za to ima više, a vezani su za kompleksnu prirodu procesa. Naime, kao što je naprijed navedeno, faktori koji utiču na proces formiranja su različite prirode. Ovim radom se želi predložiti metod koji će se što više približiti realnim situacijama u vodovodnim sistemima i kojim se želi što preciznije definisati ograničen broj parametaram koji utiču na odabir optimalne veličine OZB.

U ovom poglavlju je predstavljen koncept koji podrazumjeva:

- formiranje osnovnih zona bilansiranja i odabir odgovarajućih mjesta u sistemu gdje će se postavljati reducirati pritisaka, radi regulisanja pritiska na ulazu u zonu. Rad reducira pritisaka mora biti baziran na najnižem zahtjevanom pritisku u sistemu, uz obezbjeđenje rezerve radi sigurnosti rada. Nakon izbora mjesta i režima rada reducira pritisaka, analiziraće se troškovi i dobiti, za pojedine scenarije rada reducira u sistemu, koji su simulirani matematičkim modelom. U okviru poglavlja predložena je metodologija formiranja pomenutih zona;
- analizu troškova i dobiti, za razne scenarije podjele na OZB, u koju ulaze troškovi i dobiti od redukcije pritiska, troškovi od formiranja OZB i troškovi od pretrage OZB. U okviru poglavlja 3 ove disertacije predložena su rješenja pomoću kojih se određuju pomenuti troškovi i dobiti;
- konačan izbor optimalne veličine OZB.

Najprije je analiza predloženog koncepta izvršena teoretski, a zatim i na praktičnim primjerima vodovodnih sistema.

##### *Podjela gubitaka*

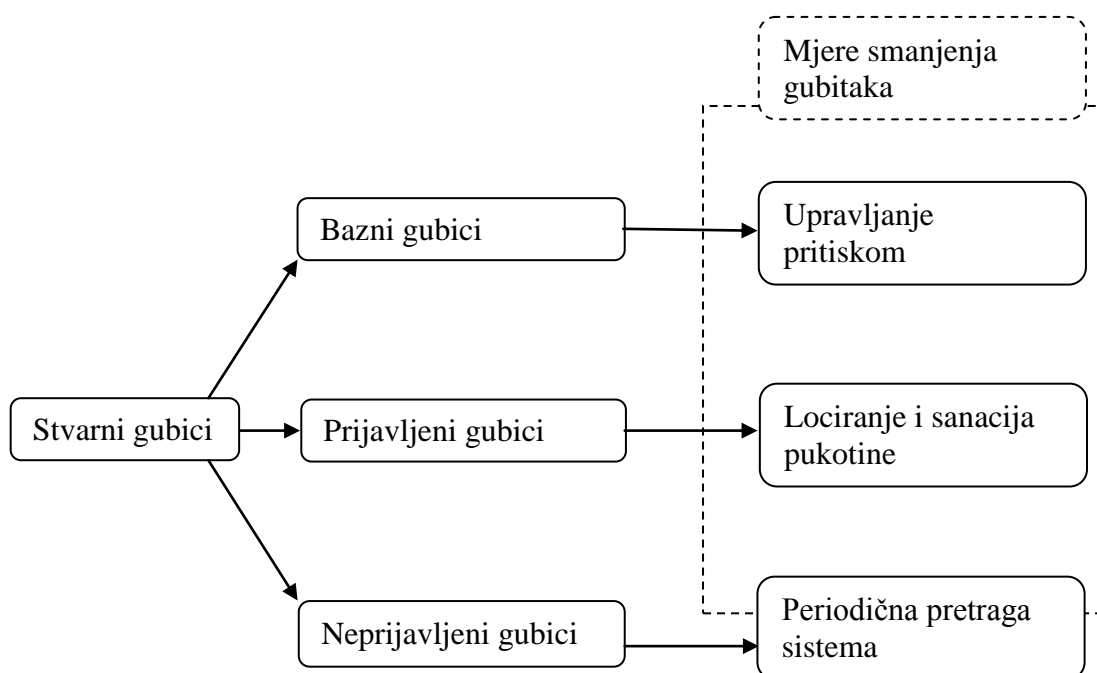
Da bi se na kvalitetan i pouzdan način upravljalo gubicima vode, potrebno je: detaljno analizirati prirodu gubitaka, pronaći adekvatna rješenja i sprovesti strategiju djelovanja, a sve u cilju smanjenja gubitaka vode, odnosno u krajnjem smanjenja troškova vodovodnog sistema.

Detaljno analiziranje gubitaka podrazumjeva određivanje oblika i veličine gubitka. U tom cilju, u dosadašnjoj literaturi stvarni gubici su podijeljeni na komponente i to na bazne gubitke i gubitke iz pukotina. Najprije je O'Day 1982 predložio tu podjelu.<sup>(71)</sup>

*Bazni gubici* su pojedinačno mali i zbog toga teško uočljivi pomoću instrumenata, jer predstavljaju procurivanja kroz male pukotine. Shodno tome, upravljanje baznim gubicima se svodi na kontrolisano upravljanje pritiskom, pomoću kojeg se smanjuju troškovi koji nastaju usljed baznih gubitaka.

*Gubici iz pukotina* su gubici usljed postojanja pukotina u vodovodnoj mreži, koje mogu biti otkrivene kao vidne ili pomoću instrumenata. Shodno tome se dijele na prijavljene i neprijavljene gubitke.

- A) *Prijavljeni gubici*. Oni se definišu kao curenje koje je prijavljeno vodovodnom preduzeću obično od strane potrošača koji imaju probleme sa snabdijevanjem ili od ljudi koji primijete da voda izlazi iz zemlje. Prijavljeno curenje je uglavnom vidljivo i često ga karakterišu veliki protoci. Kod prijavljenih pukotina je brzina lociranja i sanacije pukotine presudna za njeno otklanjanje.
- B) *Neprijavljeni gubici*. Najveći godišnji gubici često nastaju usljed neprijavljenog curenja, jer je trajanje curenja kod njih uglavnom duže. Kod neprijavljenog curenja, na vrijeme otkrivanja pukotine, utiče praksa upravljanja gubicima: bez upravljanja gubicima, vodovodno preduzeće neće biti svjesno postojanja gubitka. U slučaju otkrivanja i eliminisanja neprijavljenog curenja, koje je često veće od prijavljenog, važnu ulogu igra pretraga sistema. Može se zaključiti da je glavni faktor, koji utiče na smanjenje neprijavljenih gubitaka, vrijeme, odnosno brzina otkrivanja mjesta pukotine.



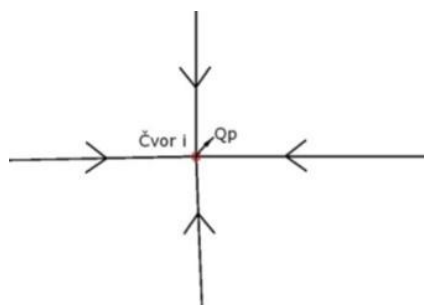
Slika 4.1 Šema upravljanja gubicima od zavisnosti od tipa gubitka

Iz ovoga slijedi da je kontrola pritiska kao tehnički faktor vezana za bazne gubitke, a da su za prijavljene i neprijavljene gubitke vezani troškovi pretrage sistema, troškovi lociranja i sanacije pukotina. Pravilnim upravljanjem baznim gubicima i gubicima iz pukotina dolazi se do najboljih rezultata sa stanovišta smanjenja ukupnih gubitaka u vodovodnim sistemima.

Shodno opisu faktora koji prate podjelu sistema na OZB, da se zaključiti da se konačna podjela vodovodnog sistema na OZB zasniva na finansijskim razlozima. Na osnovu toga predloženi su sledeći koraci u postupku formiranja OZB:

### 1. Definisanje zona.

Imajući u vidu potrebu održanja funkcionalnosti rada vodovodnog sistema nakon podjele na OZB, kao logično rješenje se nametnulo da se u procesu formiranja OZB krene oko čvorova u vodovodnoj mreži koji su “ponori” u sistemu, slika 4.2. To su čvorovi sa velikom potrošnjom, koji imaju dotok vode iz većine okolnih cijevi. Prema "IWA Guidance Notes" preporučena veličina OZB, koja se koristi u praksi, je od 500 do 3.000 priključaka potrošača<sup>(43)</sup>.



Slika 4.2 Šema čvora koji predstavlja “ponor” u vodovodnom sistemu

Prilikom formiranja zona vodi se računa o “skeletizaciji sistema” i o tome da pritisci u sistemu budu zadovoljavajući, da se ne ugrozi uredno snabdijevanje potrošača.

**2. Redukcija pritiska.**

Nakon podjele sistema na OZB različitih veličina, iz preporučenog opsega (500÷3.000 priključaka), potrebno je za svaki scenario podjele analizirati mogućnost redukcije pritiska i definisati položaj i podešavanje reducira pritiska.

**3. Cost-benefit analiza mjere redukcije pritiska**

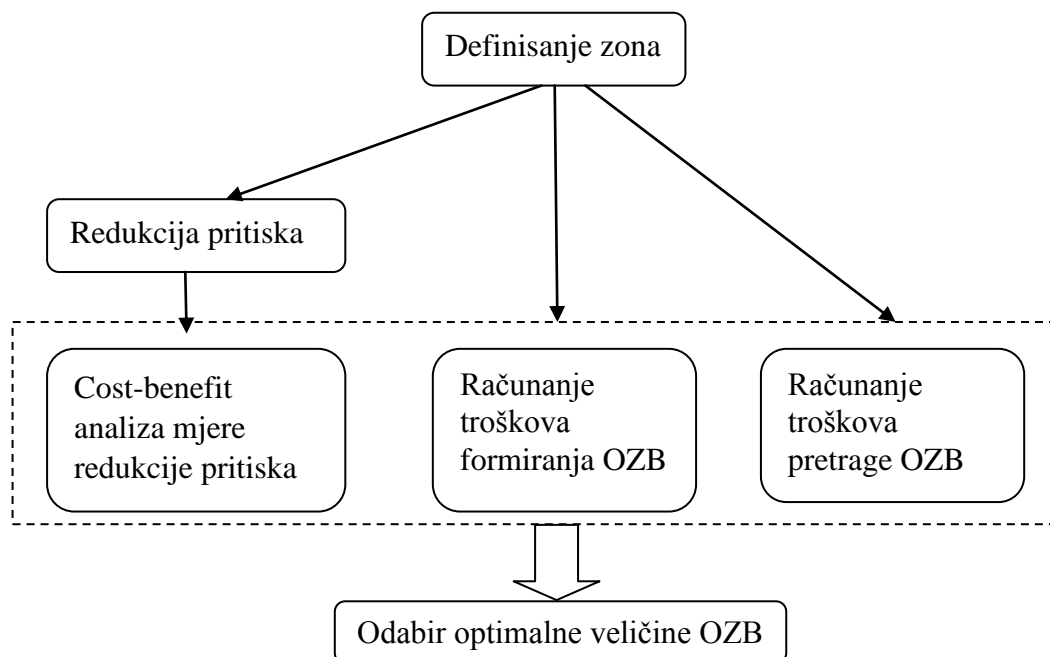
Ukoliko ima mjesta za redukciju pritiska, kao mjeru smanjenja gubitaka, potrebno je sračunati finansijsku dobit koja nastaje usljed smanjenja curenja, kao posljedice redukcije pritiska. Na strani troškova stoje troškovi instaliranja i održavanja reducira pritiska u zoni.

**4. Računanje troškova formiranja i pretrage OZB.**

Paralelno sa analizom dobiti i troškova koje nastaju redukcijom pritiska, analiziraju se troškovi formiranja i pretrage OZB, za razne slučajeve podjele sistema na OZB, shodno naprijed usvojenim jednačinama.

**5. Odabir optimalne veličine OZB.**

Nakon objedinjavanja dobiti i troškova sračunatih pod tačkama 3. i 4. predložene metodologije, za razne scenarije podjele sistema na zone, vrši se odabir optimalne veličine OZB. Optimalna veličina OZB je vezana za najveću godišnju dobit, odnosno najmanje godišnje troškove.



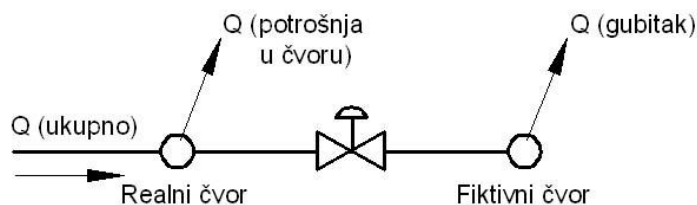
Slika 4.3 Šema predložene metodologije

Predložena metodologija može se primjeniti na sistem bilo koje veličine i konfiguracije.

#### 4.1.1 UPRAVLJANJE BAZNIM GUBICIMA

Kao što je nevedeno, baznim gubicima se upravlja tako što se upravlja pritiskom. U cilju kvalitetnog upravljanja pritiskom, važno je definisati vezu između pritiska i protoka na mjestu curenja.

Količina gubitaka trebalo bi da bude posmatrana kao funkcija učestalosti pojave isticanja i pritiska koji vlada na mjestu njihove pojave<sup>(76)</sup>. U osnovi metod treba da se sastoji od različitog tretiranja dva tipa čvora potrošnje u matematičkom modelu mreže, koji se mogu prikazati kao korisnički čvor i nekorisnički čvor. Prvi je stvarni, postojeći čvor mreže dok se drugi uvodi kao fiktivni, kako je prikazano na slici 4.4.



Slika 4.4 Zamjena pukotina u modelu fiktivnim regulacionim ventilom

Za potrebe proračuna gubitaka, gornja slika se može prihvatiti kao hipoteza tako da se može simulirati isticanje koristeći karakteristike običnog regulacionog zatvarača, odnosno njegovog koeficijenta gubitaka, koji se može jednostavno definisati kroz kalibraciju modela pri stanju minimalne potrošnje u mreži. Protok, odnosno količina gubitaka za prikazano stanje, biće funkcija razlike pritiska u realnom čvoru mreže i pritiska na izlazu fiktivnog čvora i koeficijenta gubitaka simuliranog zatvarača:

$$Q_g = k_i (P - P_i)^N \quad (4.1)$$

gdje je:

$Q_g$  količina istekle vode – gubitka u čvoru  $i$ ;

$k_i$  koeficijent gubitaka simuliranog regulacionog zatvarača, emiter koeficijent;

$P$  izmjereni stvarni pritisak u realnom čvoru  $i$ ;

$P_i$  izlazni pritisak na mjestu isticanja, ako je isticanje u atmosferu onda je njegova vrijednost 0;

$N$  eksponent.

U ovom radu je za potrebe modeliranja vodovodnih sistema korišćen programski paket "Epanet". Modeliranja gubitaka u "Epanet"-u se vrši pomoću opcije "Emitter Coeff", koja je vezana na čvor u modelu. Problem modeliranja gubitaka u "Epanet"-u se svodi na pravilan odabir vrijednosti za "Emitter" koeficijente.

##### *Primjena u realnim uslovima*

Prilikom modeliranja gubitaka u realnom sistemu, bolji rezultati se dobijaju ako se gubitak rasporedi duž sistema, nego kad se lokalizuje u jednoj tački. Nakon pravilnog modeliranja gubitaka, planira se redukcija pritiska. Redukcija pritiska može da ima za efekat brojne nepoželjne posljedice. Potrošači koji su najvisočiji u sistemu najprije mogu da trpe zbog redukcije pritiska. Problemi koji nastaju usljed smanjena pritiska mogu se izbjeći tako što će se pritisak redukovati samo noću, npr od 21-06h, kada ne postoje pikovi u potrošnji. Naravno, ova mjera se lako može sprovesti u modelu, dok se u realnom sistemu teško sprovodi u djelo iz dobro poznatih razloga.

Iz svega prethodno navedenog, da se zaključiti sledeće:

- jednačina  $Q = kP^N$  je sasvim adekvatna za modeliranje gubitka na mjestu otvora koji ima konstantan poprečni presjek;
- modeli mogu da pomognu da ukažu na potrebu za redukcijom pritiska i koje su zone kritične (u slučaju smanjenja pritiska).

Redukcija pritiska najviše ima efekta na sisteme sa velikim gubicima, koji su na pretežno ravničarskom terenu. U većini ostalih slučajeva, kontrola pritiska može da se primjeni samo kada nema pikova potrošnje u sistemu.

#### **4.1.2 UPRAVLJANJE GUBICIMA IZ PUKOTINA**

Gubici iz pukotina su gubici vode usljed pukotina nastalih u distributivnoj mreži, koje se mogu klasifikovati kao prijavljene i neprijavljene. Brzina kojom se mjesto pukotine otkrije i kasnije popravi, utiče na ukupne gubitke iz ovih pukotina:

$$\text{Zapremina gubitka} = (\text{protok kroz pukotinu}) \times (\text{vrijeme trajanja curenja})$$

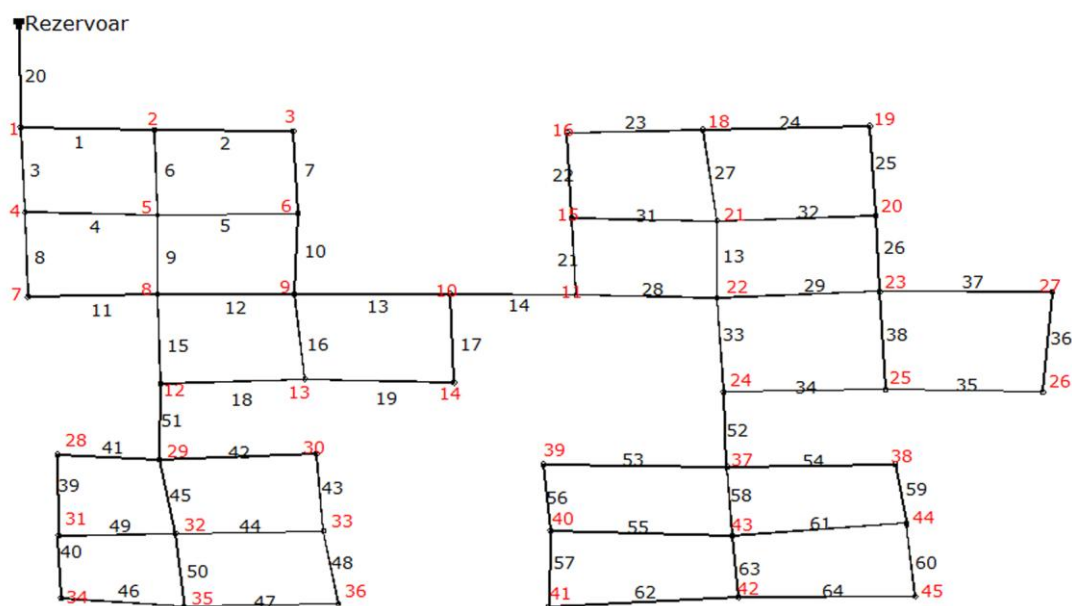
Lociranje pukotina nije lak zadatak, naročito jer su mnoge nevidljive. Podjelom sistema na OZB smanjuje se vrijeme koje je potrebno za identifikaciju, lokaciju i saniranje pukotine.



## 4.2 TEORIJSKI PRIMJER PRIMJENE METODOLOGIJE ZA FORMIRANJE OZB

### 4.2.1 OPIS ŠEME VODOVODNOG SISTEMA

Na slici 4.5 je prikazana teorijska šema vodovodnog sistema, koji je poslužio za dokazivanje predložene metodologije. Sistem se snabdijeva iz rezervoara, koji se nalazi na koti 80m. Usvojeno je da je gustina priključaka u vodovodnom sistemu uniformna i iznosi 300 priključaka/km. U datom sistemu su pretpostavljeni postojeći gubici vode od 45%. Sistem se sastoji od dvije visinske zone. Niža zona je oko 20 m niža od visoke zone, tako da su pritisci u tom dijelu veći za oko 2 bara.



Slika 4.5 Šema vodovodne mreže sa oznakama čvorova i veza

Tabela 4.1 Podaci o čvorovima

Oznaka čvora ID	Nadmorska visina (m)	Potrošnja (l/s)
29	15	0.3
30	16	0.6
34	18	0.9
41	18	0.8
28	18	0.55
44	18	0.65
35	19	0.3
36	19	0.75
33	19	0.8
31	19	0.55
40	19	0.3
42	19	0.25
43	19	1
39	20	0.5
38	20	0.65
45	20	0.6
32	20	1
37	21	0.8
11	29	0.5
7	33	0.5
8	35	0.6
21	35	2
26	36	0.8
20	36	0.8
23	36	0.75
18	37	0.6
10	37	1
14	37	0.7
27	37	0.35
19	37	0.5
4	37	1
9	38	0.75
12	38	0.85
6	38	0.7
3	38	1
5	38	2
13	38	0.9
24	38	0.35
15	39	0.5
25	39	0.65
16	39	0.5
22	39	0.75
2	40	0.5
1	42	1

Tabela 4.2 Podaci o cijevima

Oznaka cijevi	Dužina m	Prečnik mm	Hrapavost
43	200	150	140
44	200	150	140
41	200	150	140
42	200	150	140
47	200	150	140
48	200	150	140
45	200	150	140
46	200	150	140
35	200	150	140
36	200	150	140
33	200	200	140
34	200	150	140
39	200	150	140
40	200	150	140
37	200	150	140
38	200	150	140
59	200	150	140
60	200	150	140
57	200	150	140
58	200	150	140
63	200	150	140
64	200	150	140
61	200	150	140
62	200	150	140
51	200	200	140
52	200	200	140
49	200	150	140
50	200	150	140
55	200	150	140
56	200	150	140
53	200	150	140
54	200	150	140
11	200	150	140
12	200	200	140
9	200	200	140
10	200	150	140
15	200	200	140
16	200	150	140
13	200	200	140
14	200	200	140
3	200	150	140
4	200	150	140
1	200	200	140
2	200	150	140
7	200	150	140
8	200	150	140

Oznaka cijevi	Dužina m	Prečnik mm	Hrapavost
5	200	150	140
6	200	200	140
27	200	150	140
28	200	200	140
25	200	150	140
26	200	150	140
31	200	150	140
32	200	150	140
29	200	150	140
30	200	150	140
19	200	150	140
20	200	250	140
17	200	150	140
18	200	150	140
23	200	150	140
24	200	150	140
21	200	150	140
22	200	150	140

Vodovodni sistem je modeliran programskim paketom "Epanet". Modeliranje gubitaka u sistemu, koji ima nivo gubitaka 45%, je sprovedeno uvođenjem "Emitter " koeficijenta, preko kojih se gubici prikazuju u čvoru potrošnje, prema jednačini:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i^N \quad (4.2)$$

gdje je:

- Q            gubitak;  
n            broj čvorova u modelu;  
 $C_i$         "Emitter" koeficijent;  
 $P_i$         pritisak u čvoru;  
N            eksponent.

Tabela 4.3 Potrošnja u sistemu u toku dana, kada nema gubitaka

Čas	$K_h$	Potrošnja u sistemu	Zapremina potrošene vode u času	Ukupna zapremina potrošene vode
(h)	-	(l/s)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
1	0,4	13	46,8	46,8
2	0,3	13	46,8	93,6
3	0,3	9	32,4	126
4	0,2	18	64,8	190,8
5	0,4	26	93,6	284,4
6	0,6	48	172,8	457,2
7	1,1	58	208,8	666
8	1,3	53	190,8	856,8
9	1,2	58	208,8	1065,6
10	1,3	62	223,2	1288,8
11	1,4	80	288	1576,8
12	1,8	71	255,6	1832,4
13	1,6	67	241,2	2073,6
14	1,5	62	223,2	2296,8
15	1,4	53	190,8	2487,6
16	1,2	49	176,4	2664
17	1,1	40	144	2808
18	0,9	48	172,8	2980,8
19	1,1	58	208,8	3189,6
20	1,3	53	190,8	3380,4
21	1,2	49	176,4	3556,8
22	1,1	35	126	3682,8
23	0,8	18	64,8	3747,6
24	0,4	18	64,8	<b>3812,4</b>

Tabela 4.4 Potrošnja u sistemu u toku dana, kada postoje gubici 45%

Čas	$K_h$	Potrošnja u sistemu	Zapremina potrošene vode u času	Ukupna zapremina potrošene vode
(h)	-	(l/s)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
1	0,4	52	187,2	187,2
2	0,3	52	187,2	374,4
3	0,3	47	169,2	543,6
4	0,2	55	198	741,6
5	0,4	63	226,8	968,4
6	0,6	85	306	1.274,4
7	1,1	94	338,4	1.612,8
8	1,3	90	324	1.936,8
9	1,2	94	338,4	2.275,2
10	1,3	97	349,2	2.624,4
11	1,4	115	414	3.038,4
12	1,8	107	385,2	3.423,6
13	1,6	102	367,2	3.790,8
14	1,5	97	349,2	4.140
15	1,4	88	316,8	4.456,8
16	1,2	85	306	4.762,8
17	1,1	77	277,2	5.040
18	0,9	85	306	5.346
19	1,1	92	331,2	5.677,2
20	1,3	88	316,8	5.994
21	1,2	85	306	6.300
22	1,1	70	252	6.552
23	0,8	54	194,4	6.746,4
24	0,4	54	194,4	<b>6.940,8</b>

Praksa je da se na osnovu upoređivanja rezultata dobijenih u "Epanet"-u, sa mjerenim vrijednostima u vodovodnom sistemu, usvoji koeficijent  $C_i$  koji najbolje odgovara stvarnom stanju gubitaka u sistemu.

Za dati vodovodni sistem, u programu "Epanet", usvojen je "Emitter Coeff." 0.225 za svaki čvor, čijim uvođenjem u model se ostvaruje nivo gubitaka na nivou cijelog sistema od 45%.

Potrošnja vode u sistemu datom na slici 4.5, za slučaj da nema gubitaka je prikazana u tabeli 4.3. Podaci o potrošnji su rezultat modeliranja sistema u programskom paketu "Epanetu" i preuzeti su iz dijagrama "System Flow" iz tog programa.

Potrošnja u sistemu sa gubicima, u toku 24 h, data je u tabeli 4.4.

Prema tome gubici vode u sistemu su:

$$V_g = \frac{6.940,8 - 3.812,4}{6.940,8} = 45\%$$

### **4.2.2 FORMIRANJE OZB U VODOVODNOM SISTEMU IZ PRIMJERA I ANALIZA TROŠKOVA**

Najprije je potrebno izvršiti definisanje zona, prema načinu objašnjenom u poglavlju 4.1. Prilikom formiranja zona vodi se računa da pritisci u sistemu budu zadovoljavajući, da se ne ugrozi uredno snabdijevanje potrošača. Nakon podjele sistema na OZB, potrebno je analizirati mogućnost redukcije pritiska i prema tome definisati položaj i podešavanje reducira pritiska. Ukoliko ima mjesta za redukciju pritiska, kao mjeru smanjenja gubitaka, potrebno je sračunati finansijsku dobit koja nastaje usljed smanjenja curenja. Takođe treba sračunati i troškove formiranja i pretrage zona, za razne slučajeve podjele sistema na OZB.

Za proračun troškova pretrage prema jednačini 3.47:

$$C_{pretraga}^{OZB} = \frac{L_{OZB}}{v_{pretraga}} Nr \cdot P \cdot Ft$$

usvojene su sledeće vrijednosti:

$v_{pretraga} = 253 \text{ km/god}$  brzina pretrage sistema;

$Nr = 2$  broj radnika u radnom timu;

$P = 19.200\text{€}$  godišnja plata radnika;

$Ft = 1.5$  koeficijent opštih troškova.

Mjerenjem količine vode na ulazu u zonu može da se uoči pojava pukotine unutar zone. Obično se to zaključi praćenjem i analizom dijagrama noćne potrošnje. Nakon toga se kreće u pretragu zone. Što je dužina cijevi unutar OZB manja, manji su i troškovi pretrage te zone, jer se iz jednačine 3.47 vidi da direktno zavise od dužine cijevi u zoni ( $L_{OZB}$ ). Ako sistem izdijelimo na veći broj manjih zona znači da će troškovi pretrage biti manji, jer je veća vjerovatnoća bržeg lociranja i popravke kvara kod manje zone. Troškovima pretrage je potrebno dodati i trošak usljed izgubljene vode, koja je curila kroz pukotinu, do trenutka popravke pukotine, tako da ukupni troškovi pretrage iznose:

$$C_{pretraga}^{OZB} = \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} Nr \cdot P \cdot Ft + cR L_{OZB} F_o \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} \quad (4.3)$$

Logično je pretpostaviti da je prosječni vremenski interval, nakon koga je otkrivena pukotina na polovini ukupnog vremena potrebnog da se cijela zona pretraži.

U prethodnoj jednačini potrebno je odrediti proizvod:

$$R \cdot F_o = ?$$



Kao što je već navedeno:

$R$  -gubitak vode ( $m^3$ /god./pukotini),

$F_o$  -učestalost neprijavljenih pukotina po km cijevi godišnje.

Odnosno, proizvod  $R \cdot F_o$  predstavlja zapreminu izgubljene vode na godišnjem nivou, po kilometru cijevi sistema:

$$R \cdot F_o = V_{gub}^{god} / km$$

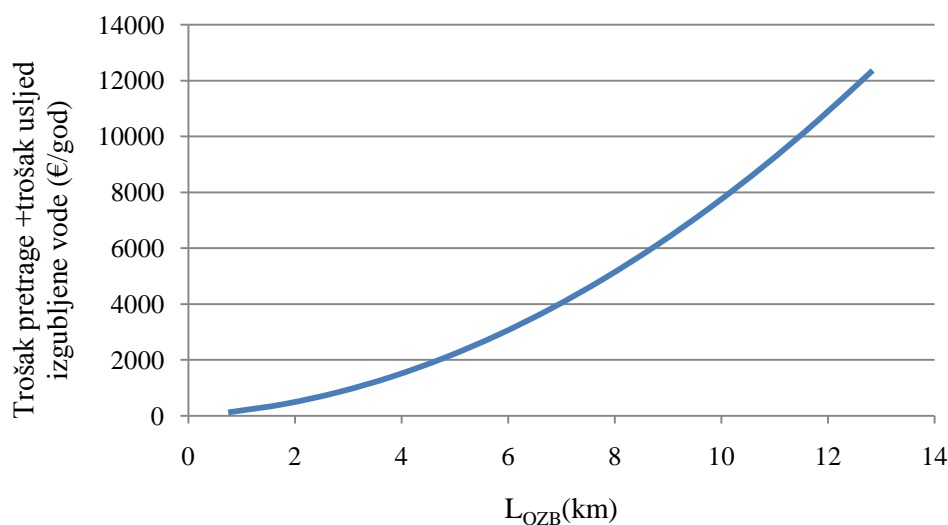
Za vodovodni sistem iz primjera, gubici vode na godišnjem nivou (imajući u vidu pretpostavku da su pukotine uniformno raspoređene duž svih cijevi u sistemu), po kilometru cijevi vodovodnog sistema, iznose:

$$V_{gub}^{god} = 365dana \cdot 3.128,4m^3 / dan / 12.8km = 89208,3m^3 / km$$

Ukupna dužina cijevi u sistemu je  $L=12.8$  km.

Godišnji broj pretraga zona zavisi od frekfencije pojave pukotina na cijevima. U poglavlju 3 je data veza frekfencije pojave pukotina i pritiska u sistemu.

Na slici 4.6 prikazani su godišnji troškovi pretrage zona sistema datog u primjeru u funkciji  $L_{OZB}$ . U ove troškove spadaju i troškovi usljed izgubljene vode, do trenutka sanacije pukotine. Jasno se vidi da veća OZB ima i veće troškove. Radi preglednosti dijagrama i što jasnijeg uočavanja zavisnosti troškova pretrage od veličine zone, troškovi su računati na osnovu pretpostavke da se javlja 1 pukotina u toku godine u sistemu. U primjerima koji slijede će se računati troškovi pretrage u zavisnosti od učestanosti pojave pukotina po kilometru cijevi godišnje.



Slika 4.6 Godišnji troškovi pretrage u funkciji od dužine cijevi unutar zone

### 4.2.3 VELIČINA OZB U FUNKCIJI GUSTINE PRIKLJUČAKA

Iz dijagrama na slici 4.6 jasno je da troškovi, koji se sastoje od cijene vode koja je izgubljena usljed procurivanja i cijene akustičkih pretraga sistema, rastu sa porastom dužine cijevi u okviru OZB ( $L_{OZB}$ ). Veličina OZB zavisi i od gustine priključaka na vodovodnoj mreži.

Preporučena veličina OZB, koja se koristi u praksi, obuhvata od 500 do 3.000 priključaka (IWA Guidance Notes)<sup>(43)</sup>:

$$500pr < L_{OZB} < 3.000pr$$

U ovom primjeru je sistem izdjeljen na zone, tako što se vodilo računa da se broj priključaka nađe u preporučenom opsegu.

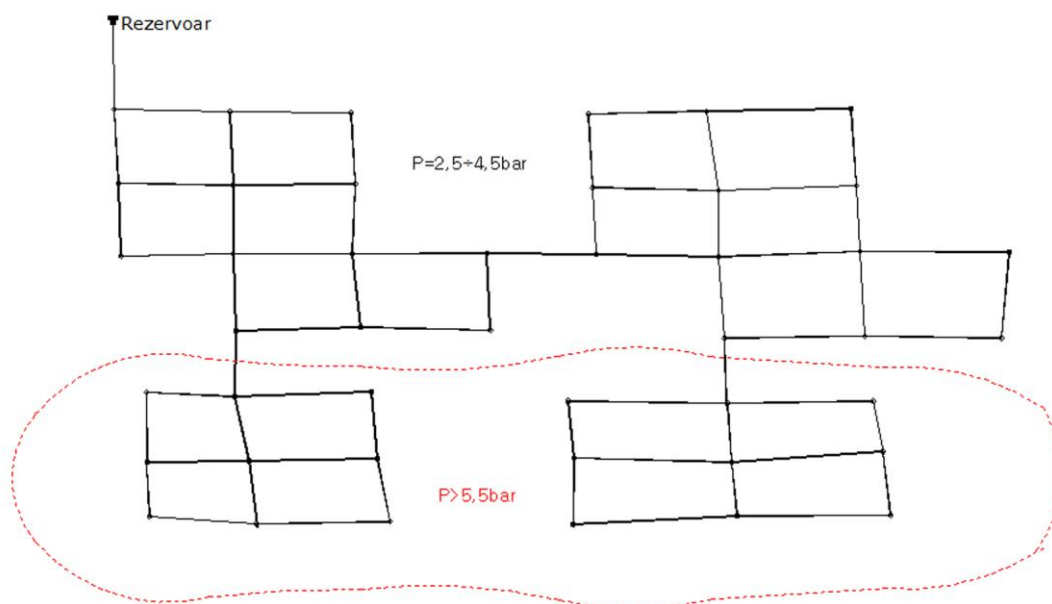
U nastavku je za sva tri slučaja podjele sistema izvršena analiza troškovi i dobiti, koje sa sobom nose pojedini scenariji podjele sistema. U prvom slučaju sistem će se posmatrati kao jedna zona, u drugom je sproveden postupak formiranja dvije OZB, a u trećem četiri.

Ideja je da se uporede ukupni godišnji troškovi (formiranja i pretrage OZB) i ukupna godišnja dobit (usljed redukcije pritiska) i kao optimalno rješenje izabere rješenje sa minimalnim troškovima.

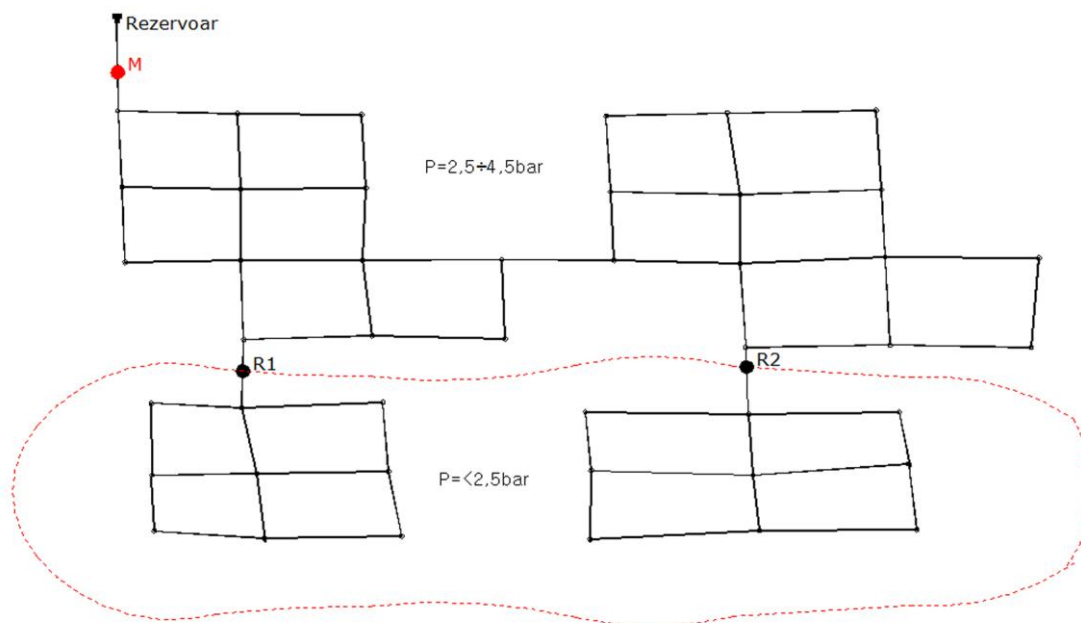
#### 4.2.4 SIMULACIJA RAZLIČITIH STANJA NASTALIH FORMIRANJEM OZB

**1. Nema podjele sistema na zone. Vrš se samo redukcija pritiska u sistemu i analizira njen uticaj na smanjenje gubitaka i troškova.**

Prvo je potrebno odabrati odgovarajuća mjesta u sistemu gdje će se postaviti reducirati pritiska, koji će kontrolisati pritisak u zoni, ili dijelu zone. Kao što se vidi na slici 4.7, jedan dio sistema u satu minimalne potrošnje ima pritiske veće od 5,5 bara. U satu maksimalne potrošnje pritisci su u tom dijelu sistema su u opsegu 4,2÷5,2bara. Na mjestima ulaska vode u te oblasti potrebno je planirati ugradnju reducira pritiska, slika 4.8.



Slika 4.7 Zone sa upisanim vrijednostima pritiska u sistemu



Slika 4.8 Položaj reducira pritiska u sistemu

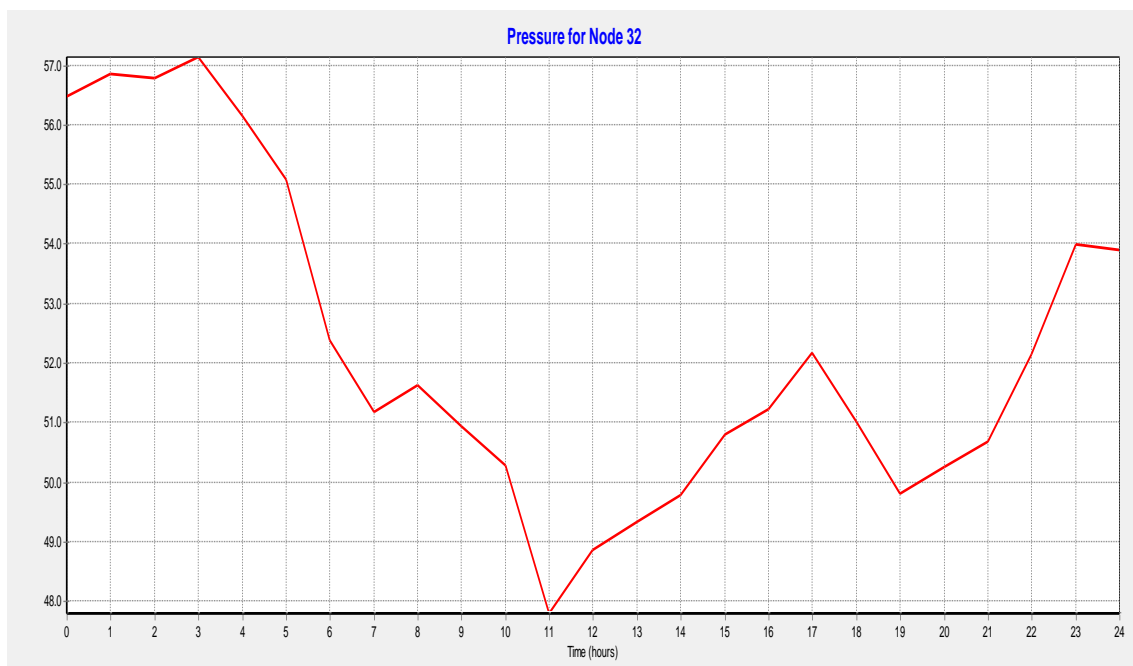
U modelu sistema prikazanog na slici 4.5, postavljeni su reduciri pritiska (R1 i R2), koji će kontrolisati pritisak na ulazu u oblasti sa visokim pritiscima. Karakteristike reducira su podešene tako da je njihov rad baziran na najnižem zahtjevanom pritisku u sistemu u satu maksimalne potrošnje, uz obezbjeđenje rezerve radi sigurnosti rada. Analizom novog sistema dolazi se do zaključka da su pritisci u sistemu zadovoljavajući  $H_i > H_{\text{zaht}} = 2\text{bara}$ .

Prema jednačini 3.2:

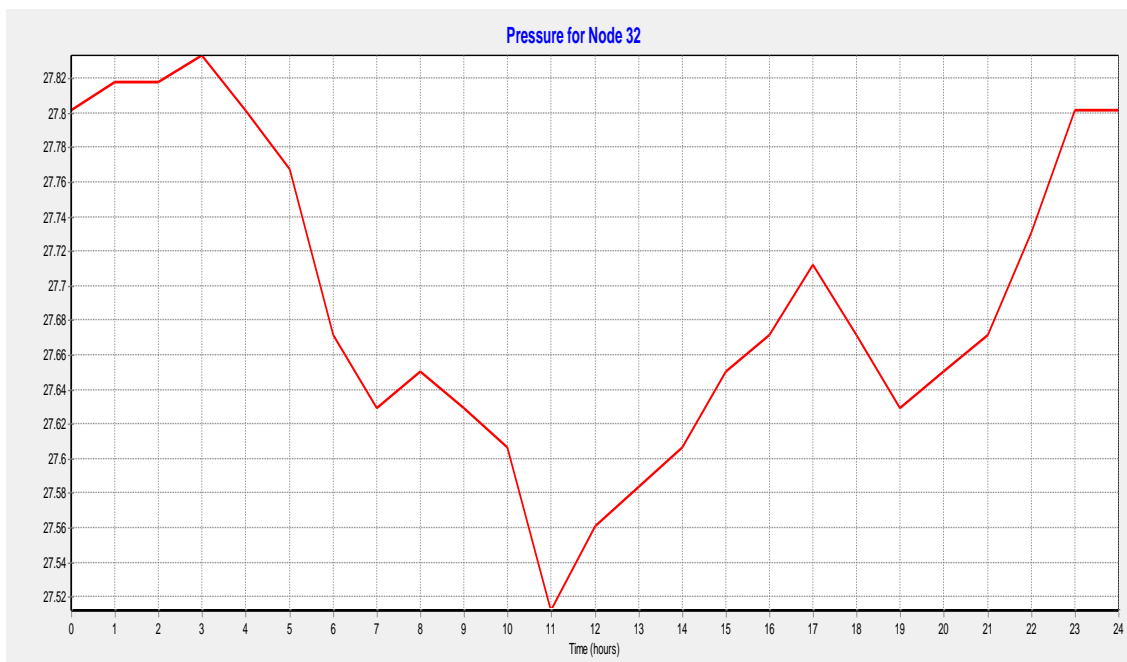
$$L_1 = L_0 \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^N$$

računato je smanjenje gubitaka u funkciji smanjenja pritiska. Kako su pritisci u nekim djelovima sistema visoki ( $>5,5\text{bar}$ ), to je bilo moguće redukovati pritisak 50%. Na slici 4.9 prikazana je promjena pritiska nakon redukcije u karakterističnom čvoru.

a)



b)



Slika 4.9 Pritisak u čvoru 32: a) prije redukcije pritiska, b) nakon redukcije

Gubici vode u sistemu, na račun smanjenja pritiska u dijelu sistema, su umanjeni za:

$$\frac{\Delta L_{\text{poslijeredukcije}}}{L_{\text{prije.redukcije}}} = \frac{782,1m^3}{3128,4m^3} = 25\% .$$

gdje je:

$\Delta L_{\text{poslijeredukcije}}$  -ušteđena zapremina vode u toku dana(na račun redukcije pritiska);

$L_{\text{prije.redukcije}}$  -gubici u toku dana, u sistemu bez redukcije pritiska.

To znači da je udio gubitaka (nakon redukcije pritiska) u cjelokupnoj potrošnji sistema:

$$\frac{(3128,4 - 782,1)m^3}{(6940,8 - 782,1)m^3} = \frac{2346,3m^3}{6158,7m^3} = 38\%$$

Smanjenjem pritiska u sistemu smanjuje se i frekfencija pojave novih pukotina na cijevima, prema jednačini 3.40:

$$\frac{BF_1}{BF_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{N1}$$

Ako je frekfencija pojave pukotina u sistemu sa pritiscima u opsegu 5÷6 bara iznosila<sup>(51)</sup>:

$$BF_0 = 180\text{pukotina}/1000\text{km}/\text{godišnje}$$

Nakon smanjenja pritiska za 50%, frekfencija pojave pukotina iznosi:

$$BF_1 = 180 \cdot (0,5)^{0,5} = 127,2\text{pukotina}/1000\text{km}/\text{godišnje}$$

To znači da je u vodovodnom sistemu iz primjera, čija je ukupna dužina cijevi 12.8km, broj pukotina na godišnjem nivou:

$$m = 127,2 \frac{12,8}{1000} = 1,63$$

Analiza troškova i dobiti za dati slučaj

- *Troškovi instalacije reducira pritiska i mjerača protoka*

Na slici 4.8, su naznačena oznakom "R1" i "R2", mjesta u sistemu na kojima je potrebno ugraditi reducirare pritiska, a oznakom "M" mjesto ugradnje mjerača protoka. Troškovi ugradnje su svedeni na godišnje troškove. Koštanje (P), je sprovedeno na 5 godina, sa diskontnom stopom 5%. Godišnji troškovi iznose:

$$C_{form}^{god} = 5500 \frac{0,05(1+0,05)^5}{(1+0,05)^5 - 1} = 1.270,3\text{€}$$

Godišnji troškovi održavanja opreme su pretpostavljeni da su fiksni procenat njenih godišnjih troškova, i već su uračunati su u cijenu.

- *Troškovi pretrage*

Nakon redukcije pritiska, gubici vode na godišnjem nivou (imajući u vidu pretpostavku da su pukotine uniformno raspoređene duž svih cijevi u sistemu), po kilometru cijevi sistema, iznose:

$$V_{gub}^{god} = 365 \text{dana} \cdot 2346,3 \text{m}^3 / \text{dan} / 12,8 \text{km} = 66906,2 \text{m}^3 / \text{km}$$

Troškovi pretrage sistema, čija je dužina ukupna dužina cijevi 12,8 km, računati su prema jednačini 4.3, i iznose:

$$C_{pretraga}^{OZB} = m \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} N r \cdot P \cdot F_t + c R L_{OZB} F_o \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} = 13206\text{€}$$

gdje je:

$m$  - broj pretraga zone u toku godine, u zavisnosti od učestanosti pojave pukotina (odnosno broj pukotina u sistemu na godišnjem nivou). U ovom slučaju je izračunato  $m=1,63$ . Usvojena je jedinična cijena vode  $c=0,5\text{€/m}^3$ .

- *Dobit od redukcije pritiska*

Smanjenje gubitaka na dnevnom nivou u iznosu od  $\Delta V=782.1 \text{ m}^3$  vode se ostvarilo uvođenjem dva reducira pritiska.

Imajući u vidu cijenu vode od  $0,5 \text{ €/m}^3$ , ušteda vodovodnog sistema na godišnjem nivou iznosi:

$$D_{god} = 0,5 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 782,1 \text{m}^3 \cdot 365 = 142.715\text{€}$$

- *Ukupna dobit*

Ukupna dobit, na period od 5 godina, dobija se kada se od dobiti nastale redukcijom pritiska oduzmu troškovi instalacije reducira pritiska, mjerača protoka i troškovi pretrage cijelog sistema. Prema tome dobit iznosi:

$$D_{god}^{ukupno} = 5 \cdot (142.751 - 13.206 - 1270.3) = 641.373,5\text{€}$$

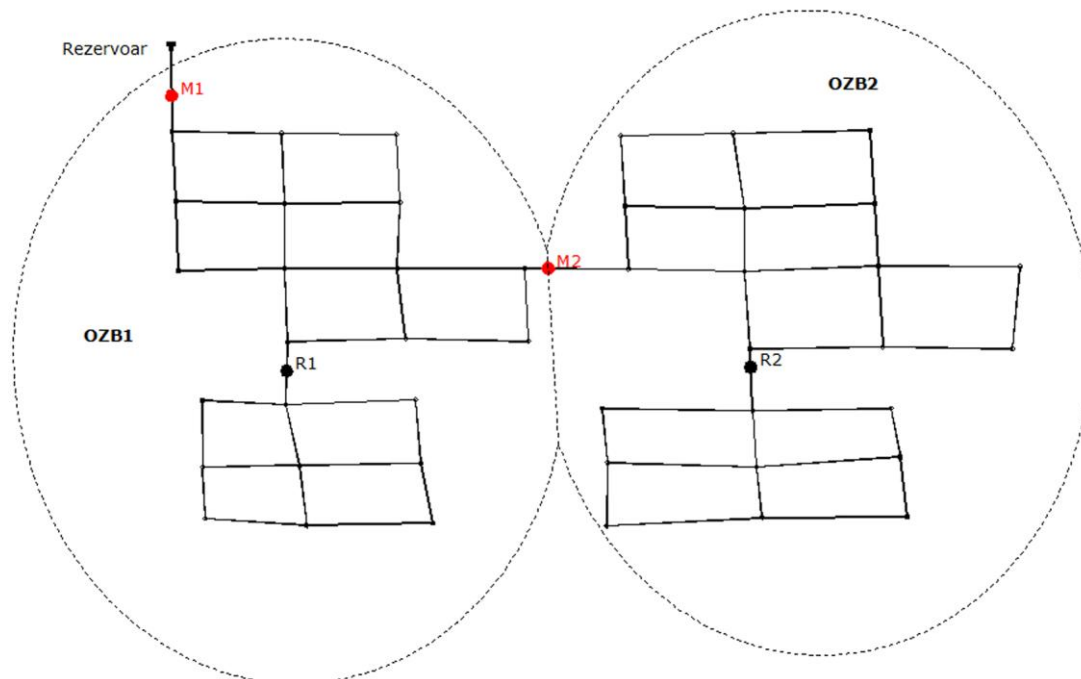
Redukcijom pritiska se ostvarila znatna dobit. Iako je ova mjera pokazala dobre rezultate, ne treba odustati od pretrage sistema. Pretraga sistema je važna radi pravilnog upravljanja gubicima u sistemu. Pretraga sistem je jeftinija ukoliko se sitem izdijeli na zone.

U nastavku su obrađeni slučajevi podjele sistema na zone. Podjela sistema na zone, nosi sa sobom smanjenje dužine cijevi koja se pretražuje, a samim tim i smanjenje troška pretrage zone kao i troška usljed izgubljene vode do trenutka sanacije pukotine.



## 2. Simulacija sistema podijeljenog na dvije OZB i analiza troškova i dobiti

Na način, kako je to opisano u poglavlju 4.1, formiraju se OZB oko čvorova sa velikom potrošnjom. U ovom slučaju je izvršena podjela sistema na dvije OZB. Na slici 4.10 je prikazan sistem nakon formiranja zona.



Slika 4.10 Šema vodovodne mreže sa dvije OZB

Kako su pritisci u sistemu, nakon podjele na dvije OZB i dalje ostali visoki, to se i u ovom slučaju planira ugradnja dva reduktora pritiska, na slici označena sa "R1" i "R2". Podjelom sistema na dvije zone, potrebno je vršiti mjerenje protoka na ulazu u svaku od zona. Na slici su prikazana mjesta na kojima se planira ugradnja mjerača protoka, i označena su sa "M1" i "M2". Analizom izmjerene protoka, obično posmatranjem noćne potrošnje, evidentira se pojava pukotine unutar OZB, nakon čega se kreće u pretragu zone.

Analiza troškova i dobiti za dati slučaj

- *Troškovi instalacije reducira pritiska i mjerača protoka*

Koštanje (P), je sprovedeno na 5 godina, sa diskontnom stopom 5%. Godišnji troškovi iznose:

$$C_{form}^{god} = 7500 \frac{0,05(1+0,05)^5}{(1+0,05)^5 - 1} = 1.732,3\text{€}$$

Godišnji troškovi održavanja opreme su pretpostavljeni da su fiksni procenat njenih godišnjih troškova, i već su uračunati su u cijenu.

- *Troškovi pretrage*

Troškovi pretrage unutar jedne zone, čija je dužina ukupna dužina cijevi 6,4 km, računati su prema jednačini 4.3, i iznose:

$$C_{pretraga}^{OZB} = m \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} N_r \cdot P \cdot F_t + cR L_{OZB} F_o \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} = 3.895,5\text{€}$$

Treba napomenuti da je, kao i u prethodnom slučaju, pretpostavljeno da se otkrivanje mjesta pukotine desilo na polovini vremenskog intervala potrebnog za pretragu svih cijevi unutar zone. Imajući u vidu sračunatu frekvenciju pojave pukotina na 1000km godišnje za vodovodni sistem iz primjera, broj pretraga zone u toku godine iznosi  $m=1,63$ .

- *Dobit od redukcije pritiska*

Kao i u prethodnom slučaju, za 782,1 m<sup>3</sup> vode su smanjeni gubici (na dnevnom nivou) u vodovodnom sistemu uvođenjem dva reducirana pritiska.

Imajući u vidu cijenu vode od 0,5 €/m<sup>3</sup>, ušteda vodovodnog sistema iznosi:

$$D_{god} = 0,5 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 782,1 \text{m}^3 \cdot 365 = 142.715 \text{€}$$

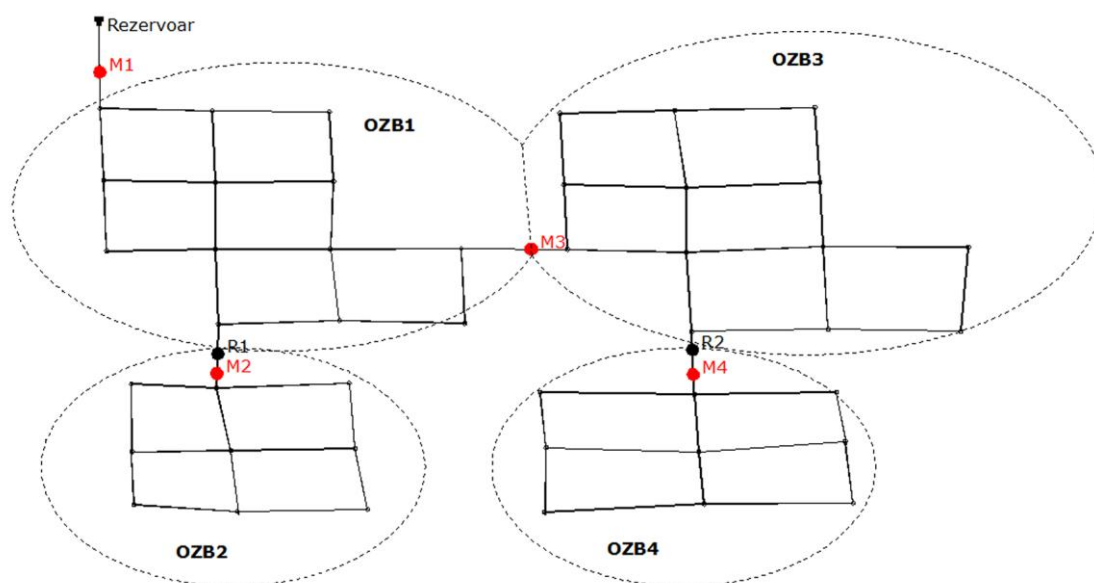
- *Ukupna dobit*

Ukupna dobit, na period od 5 godina, dobija se kada se od dobiti nastale redukcijom pritiska oduzmu troškovi ugradnje dva reducirana, dva mjerača protoka i troškovi pretrage cijelog sistema (u koje spadaju troškovi izgubljene vode), i iznosi:

$$D_{god}^{ukupno} = 5 \cdot (142.751 - 3.895,5 - 1.732,3) = 685.616 \text{€}$$

### **3. Simulacija sistema podijeljenog na četiri OZB i analiza troškova i dobiti**

U ovom slučaju izvršena je podjela sistema na četiri zone. Zone su se formirale oko čvorova sa oznakama 5, 21, 32 i 43, kao čvorova sa najvećom potrošnjom. Rezultat podjele je sistem prikazan na slici 4.11.



Slika 4.11 Šema vodovodne mreže sa četiri OZB

I u ovom slučaju planira se ugradnja dva reducira pritiska, na slici označena sa "R1" i "R2", koji regulišu pritisak u zonama OZB2 i OZB4, kao zonama sa visokim pritiskom. Kako je sistem sada izdjeljen na četiri OZB, to je potrebno planirati četiri mjerača protoka, na ulazu u svaku od zona. Na slici su mjerači protoka označeni sa "M1", "M2", "M3" i "M4". Kako je dužina cijevi unutar manjih zona kraća, to će u ovom slučaju troškovi pretrage (u koje je uračunat i trošak usljed izgubljene vode) biti i najmanji (u odnosu na slučajeve 1. i 2.).

#### Analiza troškova i dobiti za dati slučaj

- *Troškovi instalacije reducira pritiska i mjerača protoka*

Koštanje (P), je sprovedeno na 5 godina, sa diskontnom stopom 5%. Godišnji troškovi iznose:

$$C_{form}^{god} = 11.500 \frac{0,05(1+0,05)^5}{(1+0,05)^5 - 1} = 2.656,2\text{€}$$

Godišnji troškovi održavanja opreme su pretpostavljeni da su fiksni procenat njihovih godišnjih troškova, i već su uračunati u cijenu.

- *Troškovi pretrage*

Troškovi pretrage unutar jedne zone, čija je dužina ukupna dužina cijevi 3,5 km (za zone OZB1 i OZB3) i 2,5km (za zone OZB2 i OZB4), računati su prema jednačini 4.3, i iznose:

Za zone OZB1 i OZB3:

$$C_{pretraga}^{OZB} = m \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} N r \cdot P \cdot F_t + c R L_{OZB} F_o \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} = 1.459,3\text{€}$$

za zone OZB2 i OZB4:

$$C_{pretraga}^{OZB} = m \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} N r \cdot P \cdot F_t + c R L_{OZB} F_o \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} = 877,1\text{€}$$

U analizu ukupnih troškova će se uzeti u obzir troškovi pretrage većih zona (OZB1 i OZB3), usvajaći time "kritičniju" pretpostavku, da je došlo do pojave pukotine u većoj zoni.

- *Dobit od redukcije pritiska*

Dobit of redukcije pritiska je ostala nepromjenjena u odnosu na prethodne slučajeve:

$$D_{god} = 0,5 \frac{\text{€}}{m^3} \cdot 782,1 m^3 \cdot 365 = 142.715\text{€}$$

- *Ukupna dobit*

Ukupna dobit u ovom slučaju iznosi:

$$D_{god}^{ukupno} = 5 \cdot (142.751 - 2.656,2 - 1.459,3) = 693177,5\text{€}$$

#### **4. Pregled troškova i dobiti za analizirane slučajeve podjele sistema na zone**

U prethodnom je izvršena analiza troškova pretrage i troškova instalacije reducira pritiska i mjerača protoka, kao i dobiti od redukcije pritiska, za data tri slučaja:

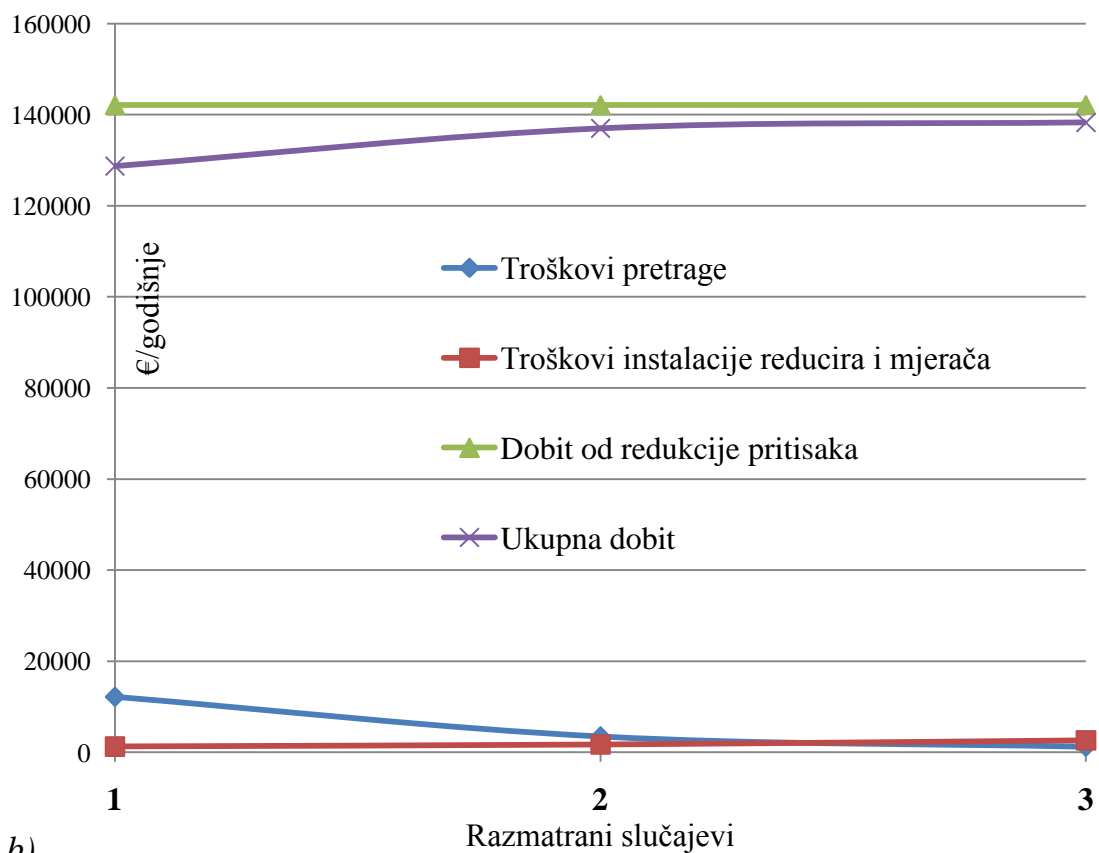
**Slučaj 1.** U prvom slučaju se vršila redukcija pritiska u sistemu, bez podjele sistema na zone. U slučaju potrebe za pretragom pretražuje se cio sistem. Troškovi instalacije mjerača protoka i reducira pritiska u ovom slučaju su najmanji, ali su troškovi pretrage najveći.

**Slučaj 2.** Sistem je podijeljen na dvije OZB. U slučaju potrebe za pretragom pretražuje se samo zona u kojoj je evidentirano pucanje cijevi. Pritisci su i dalje visoki, jer podjela na zone nije uticala na smanjenje pritiska, tako da je dobit od redukcije pritiska ista kao u slučaju 1. Troškovi instalacije mjerača protoka i reducira pritiska u ovom slučaju su veći nego u slučaju 1., ali su troškovi pretrage manji.

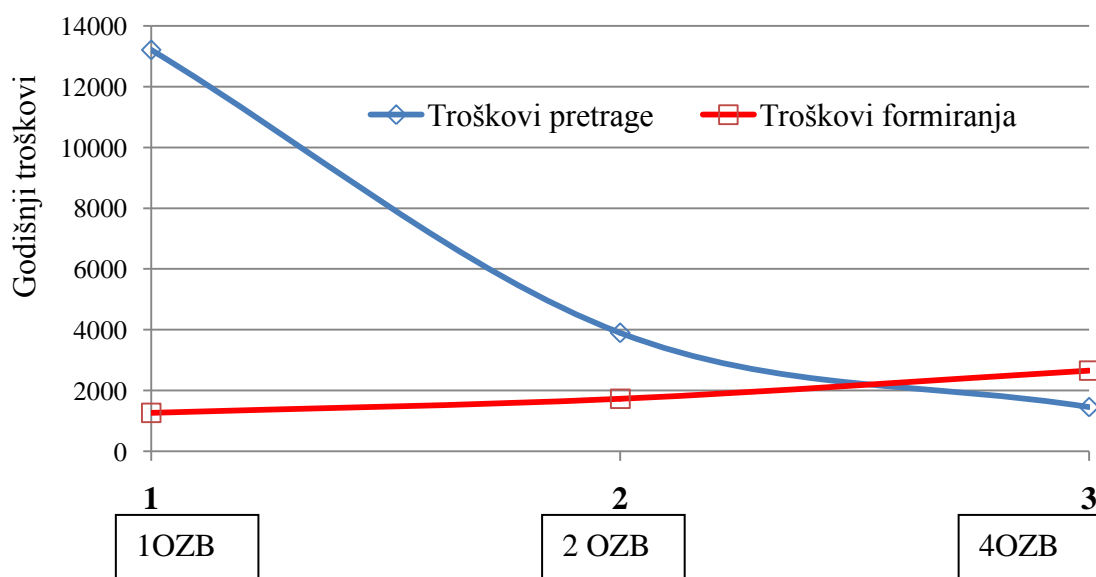
**Slučaj 3.** Sistem je podijeljen na četiri OZB, samim tim su troškovi instalacije najveći u ovom slučaju. Ali su zato troškovi pretrage najmanji, jer je u ovom slučaju dužina cijevi duž kojih se vrši pretraga najmanja. Podjela na zone nije uticala na promjenu pritiska u sistemu, tako da je i ovdje očigledna dobit od redukcije pritiska.

U tabeli 4.5, date su uporedo dobiti od redukcije pritiska, troškovi pretrage i troškovi instalacije reducira pritiska i mjerača protoka za sva tri slučaja. Troškovi i dobiti su posmatrani na godišnjem nivou. Kako su pritisci u dijelu sistema bili visoki, to je redukcijom pritiska ostvarena i najveća dobih. Nakon redukcije pritiska potrebno je nastaviti sa održavanjem sistema. U tom cilju je potrebno vršiti pretrage radi otkrivanja i sanacije pukotina.

a)



b)



Slika 4.12 a) Troškovi i dobiti za opisane slučajeve 1., 2. i 3.; b) zavisnost troškova formiranja i održavanja od broja OZB u jednom sistemu

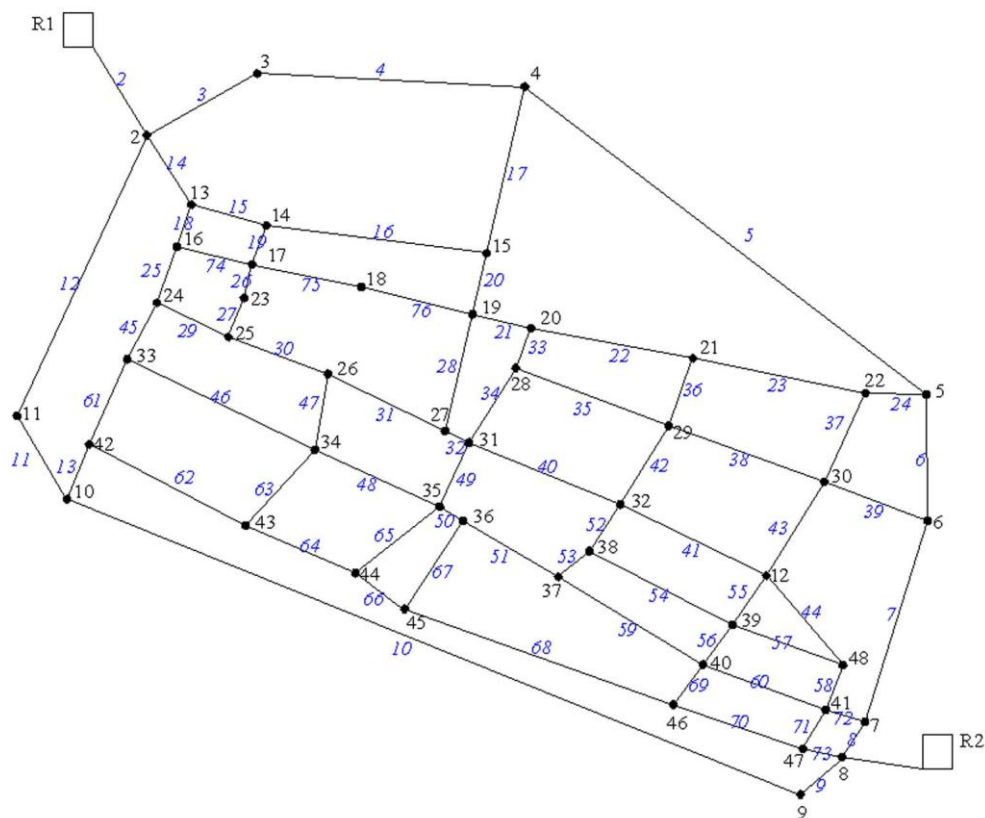
Tabela 4.5 Analiza godišnjih troškova i dobiti u zavisnosti od veličine OZB

	<i>Troškovi pretrage €</i>	<i>Troškovi instalacije reducira pritiska i mjerača protoka €</i>	<i>Dobit od redukcije pritisaka €</i>	<i>Ukupna dobit €</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C-(A+B)</i>
Slučaj 1.	13.206	1.270,3	142.175	127.698,7
Slučaj 2.	3.895,5	1.732,3	142.175	136.547,2
Slučaj 3.	1.459,3	2656,2	142.175	138.059,5



### 4.3 SIMULACIJA SISTEMA KOJI SE SNABDIJEVA VODOM IZ DVA REZERVOARA, FORMIRANJE OZB I NJIHOV UTICAJ NA SMANJENJE GUBITAKA I TROŠKOVA

Kao sledeći primjer, na kome je primjenjena metodologija izbora optimalnih veličina OZB, izabran je prstenasti vodovodni sistem koji se snabdijeva iz dva rezervoara. Na slici 4.13 je prikazana teorijska šema vodovodnog sistema, koja odgovara mreži glavnog distributivnog sistema grada Ferrara, Italija(19). Sistem se snabdijeva iz dva rezervoara, koji se nalaze na koti 41m. Glavna distributivna mreža se sastoji se od 49 čvorova, 76 cijevi, prečnika od 150 do 500mm. Gustina priključaka nije uniformna, prikazana je u tabeli 4.6, podaci o čvornoj potrošnji i nadmorskoj visini čvorova u tabeli 4.7, a podaci o cijevima u tabeli 4.8. U datom sistemu su pretpostavljeni gubici vode od 25.4%.



Slika 4.13 Šema vodovodne mreže

Ovaj primjer vodovodnog sistema, kao pretežno ravničarski, sa već regulisanim pritiscima, je izabran za primjenu opisane metodologije, da bi se pokazala primjenjivost metodologije u i na ovakve sistemime. U prethodno obrađenom teorijskom modelu, pokazalo se da je redukcija pritiska najispativija metoda smanjenja gubitaka za konkretan slučaj. U primjeru vodovodnog sistema grada Ferrara, jasno će se uočiti zavisnost troškova formiranja i troškova pretrage od veličine zona unutar sistema.

Tabela 4.6 Broj priključaka u pojedinim dionicama

Dionica oznaka	Potrošnja (m <sup>3</sup> /s)	Broj priklj.	Dionica oznaka	Potrošnja (m <sup>3</sup> /s)	Broj priklj.	Dionica oznaka	Potrošnja (m <sup>3</sup> /s)	Broj priklj.
1	0	0	26	0,003	309	51	0,01	1029
2	0	0	27	0,002	206	52	0,006	617
3	0,003	309	28	0,003	309	53	0,009	926
4	0,003	309	29	0,003	309	54	0,005	514
5	0,006	617	30	0,004	411	55	0,00225	231
6	0,008	823	31	0,005	514	56	0,003	309
7	0,006	617	32	0,004	411	57	0,003	309
8	0,004	411	33	0,004	411	58	0,003	309
9	0,009	926	34	0,004	411	59	0,007	720
10	0,01	1.029	35	0,004	411	60	0,003	309
11	0,005	514	36	0,005	514	61	0,003	309
12	0,004	411	37	0,004	411	62	0,005	514
13	0,005	514	38	0,003	309	63	0,006	617
14	0,003	309	39	0,005	514	64	0,009	926
15	0,002	206	40	0,004	411	65	0,01	1.029
16	0,003	309	41	0,00325	334	66	0,014	1.440
17	0,004	411	42	0,004	411	67	0,013	1.337
18	0,002	206	43	0,00225	231	68	0,01	1.029
19	0,003	309	44	0,00325	334	69	0,004	411
20	0,003	309	45	0,003	309	70	0,004	411
21	0,003	309	46	0,004	411	71	0,003	309
22	0,005	514	47	0,006	617	72	0,003	309
23	0,006	617	48	0,007	720	73	0,004	411
24	0,007	720	49	0,006	617	74	0,003	309
25	0,003	309	50	0,009	926	75	0,007	720
						76	0,006	617

Tabela 4.7 Podaci o čvorovima

Čvor oznaka	Čvorna potrošnja (l/s)	Nadmorska visina (m)	Čvor oznaka	Čvorna potrošnja (l/s)	Nadmorska visina (m)
2	5	11	25	4,5	10
3	3	10	26	7,5	9
4	6,5	11	27	6	8
5	10,5	10	28	6	10
6	9,5	9	29	8	12
7	6,5	10	30	7,125	11
8	8,5	11	31	4	10,5
9	9,5	10	32	8,625	10
10	10	8	33	5	6
11	4,5	9	34	11,5	7
12	5,5	8	35	16	8
13	3,5	8,5	36	16	9
14	4	10	37	13	10
15	5	6	38	10	10
16	4	11	39	6,625	11
17	8	12	40	6,5	11
18	6,5	10	41	6	10
19	7,5	11	42	6,5	7
20	6	8	43	10,5	8
21	8	7	44	16,5	8,5
22	8,5	8	45	18,5	9
23	2,5	8	46	9	9,5
24	4,5	7	47	5,5	10
			48	4,625	11

Tabela 4.8 Podaci o cijevima

Dionica oznaka	Dužina (m)	Prečnik (mm)	Dionica oznaka	Dužina (m)	Prečnik (mm)	Dionica oznaka	Dužina (m)	Prečnik (mm)
1	1	500	26	177	200	51	309	200
2	1	500	27	125	150	52	150	150
3	260	450	28	479	300	53	174	150
4	600	450	29	282	350	54	397	150
5	1.200	450	30	263	350	55	169	300
6	600	400	31	202	350	56	179	300
7	800	400	32	53	350	57	340	150
8	200	400	33	155	150	58	99	400
9	500	450	34	352	150	59	458	200
10	2.100	500	35	165	150	60	386	200
11	500	500	36	325	150	61	135	400
12	1.000	500	37	378	150	62	560	250
13	304	400	38	275	150	63	319	150
14	341	250	39	239	150	64	193	250
15	211	150	40	404	350	65	393	300
16	422	150	41	368	350	66	60	250
17	530	300	42	391	150	67	243	150
18	254	250	43	230	150	68	647	300
19	253	200	44	405	350	69	236	200
20	231	300	45	215	350	70	422	300
21	159	250	46	575	150	71	245	400
22	457	250	47	211	150	72	5	400
23	314	250	48	258	150	73	32	450
24	74	250	49	278	300	74	259	150
25	193	250	50	48	200	75	155	150
						76	230	200

Vodovodni sistem je modeliran programskim paketom "Epanet". Modeliranje sistema, koji ima nivo gubitaka 25.4%, je sprovedeno uvođenjem "Emitter" koeficijenta, preko kojih se gubici prikazuju u čvoru potrošnje. Za dati vodovodni sistem, u programu "Epanet", usvojen je "Emitter" koef. 0.52, čijim uvođenjem u model se ostvaruje nivo gubitaka 25.4%.

Potrošnja vode u sistemu za slučaj da nema gubitaka je prikazana u narednoj tabeli:

*Tabela 4.9 Potrošnja u sistemu u toku dana, bez gubitaka*

Čas	$K_h$	Potrošnja u sistemu	Zapremina potrošene vode u času	Ukupna zapremina potrošene vode
(h)	-	(l/s)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
1	0,4	146	525,6	525,6
2	0,3	110	396	921,6
3	0,3	110	396	1317,6
4	0,4	146	525,6	1843,2
5	0,4	146	525,6	2368,8
6	0,6	220	792	3160,8
7	1,1	400	1440	4600,8
8	1,2	440	1584	6184,8
9	1	365	1314	7498,8
10	0,9	322	1159,2	8658
11	0,8	290	1044	9702
12	1,2	440	1584	11286
13	1,5	540	1944	13230
14	1,8	658	2368,8	15598,8
15	1,8	658	2368,8	17967,6
16	1,6	584	2102,4	20070
17	1,1	400	1440	21510
18	1,2	440	1584	23094
19	1,4	510	1836	24930
20	1,3	465	1674	26604
21	1,2	440	1584	28188
22	1,2	440	1584	29772
23	0,8	290	1044	30816
24	0,4	146	525,6	<b>31341,6</b>

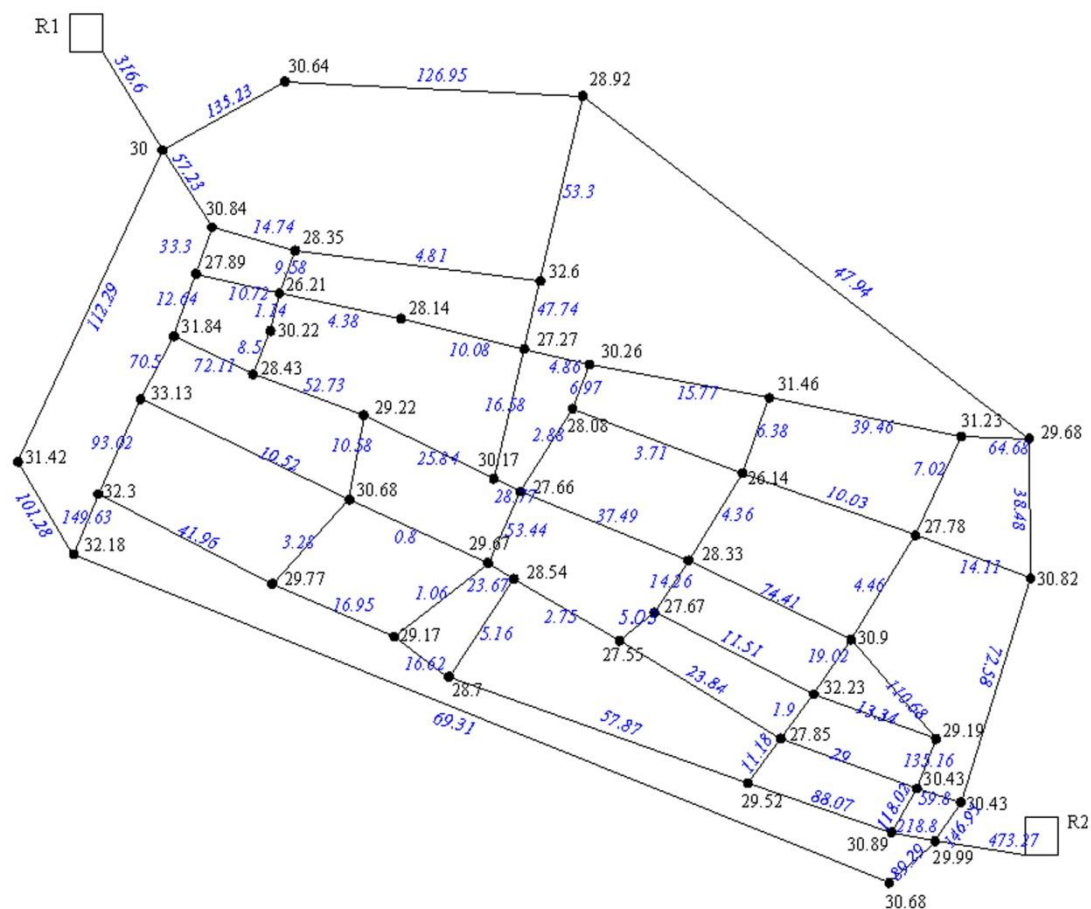
Tabela 4.10 Potrošnja u sistemu u toku dana, sa ostvarenim gubicima od 25.4%

Čas	$K_h$	Potrošnja u sistemu	Zapremina potrošene vode u času	Ukupna zapremina potrošene vode
(h)	-	(l/s)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
1	0,4	280	1.008	1.008
2	0,3	250	900	1.908
3	0,3	250	900	2.808
4	0,4	280	1.008	3.816
5	0,4	280	1.008	4.824
6	0,6	355	1.278	6.102
7	1,1	540	1.944	8.046
8	1,2	570	2.052	10.098
9	1	500	1.800	11.898
10	0,9	460	1.656	13.554
11	0,8	430	1.548	15.102
12	1,2	580	2.088	17.190
13	1,5	680	2.448	19.638
14	1,8	788	2.836,8	22.474,8
15	1,8	788	2.836,8	25.311,6
16	1,6	420	1.512	26.823,6
17	1,1	540	1.944	28.767,6
18	1,2	570	2.052	30.819,6
19	1,4	642	2.311,2	33.130,8
20	1,3	610	2.196	35.326,8
21	1,2	580	2.088	37.414,8
22	1,2	580	2.088	39.502,8
23	0,8	430	1.548	41.050,8
24	0,4	280	1.008	<b>42.058,8</b>

Uz usvajanje "Emitter" koef. 0.52, u svakom čvoru, ostvareni su gubici u sistemu:

$$V_g = \frac{42058.8 - 31341.6}{42058.8} = 25,4\%$$

Na slici 4.14 je prikazano stanje sistema (sa modeliranim gubicima) u satu maksimalne potrošnje.



Slika 4.14 Šema vodovodne mreže (sa gubicima) sa podacima o pritiscima u čvorovima (m) i protocima kroz cijevi u satu maksimalne potrošnje (l/s)

### 4.3.1 KRITERIJUMI ZA FORMIRANJE OZB U VODOVODNOM SISTEMU IZ PRIMJERA

Ista metodologija koja je primjenjena na vodovodnom sistemu iz prethodnog primjera, primjenjuje se i na ovaj sistem. Rezultati primjene metodologije na različite sisteme, doprinose formiranju kvalitetnijeg zaključka i dokazuju opštu primjenljivost metodologije.

Za dati vodovodni sistem potrebno je formirati osnovne zone bilansiranja (OZB), imajući u vidu ostvarivanje minimalnih godišnjih troškova. Ranije definisani koraci u postupku formiranja OZB su:

- A) Formiranje zona i odabir odgovarajućih mjesta u sistemu gdje će se postaviti reducir pritiska, koji će kontrolisati pritisak na ulazu u zonu. Rad reducira pritiska mora biti baziran na najnižem mogućem pritisku u sistemu, uz obezbjeđenje rezerve radi sigurnosti rada.
- B) Analiza troškova za razne scenarije formiranja OZB. Troškovi se sastoje od troškova formiranja OZB i troškova njihove pretrage. Za dati sistem, sračunati su godišnji troškovi pretrage, koji se sastoje od cijene vode koja je izgubljena usljed procurivanja i cijene akustičkih pretraga sistema.

### **4.3.2 SIMULACIJA STANJA U SISTEMU NASTALOM FORMIRANJEM OZB SA MANJIM BROJEM PRIKLJUČAKA I ANALIZA DOBITI I TROŠKOVA**

Preporučena veličina OZB, koja se koristi u praksi, obuhvata od 500 do 3.000 priključaka (IWA Guidance Notes). U skladu sa tim, vodovodni sistem je podijeljen na OZB, čiji broj priključaka je bliži donjoj preporučenoj granici-500 priključaka. Na dionicama gdje to nije bilo moguće, osnovna zona bilansiranja sadrži veći broj priključaka, ali u granicama preporučenih vrijednosti. Izvršena je podjela na dva načina: na zone čiji broj priključaka je bliži donjoj, a zatim na zone čiji broj priključaka je bliži gornjoj preporučenoj granici. Izabrane su "granične" veličine radi slikovitijeg prikaza predložene metodologije. Naravno, vodovodni sistem je bilo moguće izdijeliti na bilo koje OZB, čija veličina je iz opsega preporučenih veličina (500÷3.000 priključaka).

U procesu formiranja OZB se krenulo oko čvorova u vodovodnoj mreži koji su tkz. "ponori" u sistemu. To su obično čvorovi sa velikom potrošnjom, koji imaju dotok vode iz većine okolnih cijevi.

Prilikom formiranja zona vodilo se računa o "skeletizaciji sistema". Za potrebe formiranja OZB izbjegavalo se prekidanje i zatvaranje dionica koja imaju veće

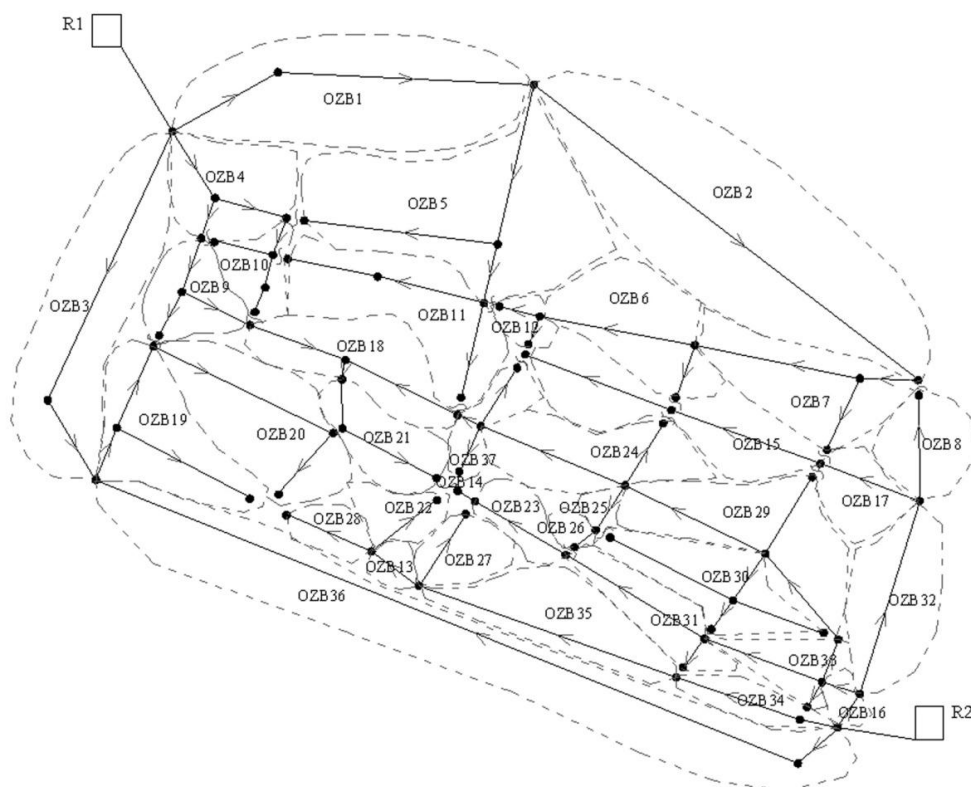


prečnike. Te cijevi predstavljaju glavne (primarne) distributivne vodove. Prekidanje i zatvaranje cijevi se planiralo na dionicama koje pripadaju mreži sekundarnih distributivnih vodova. Proces “skeletizaciji sistema” se zasniva na procjeni hidrauličke važnosti svakog od njenih dijelova.

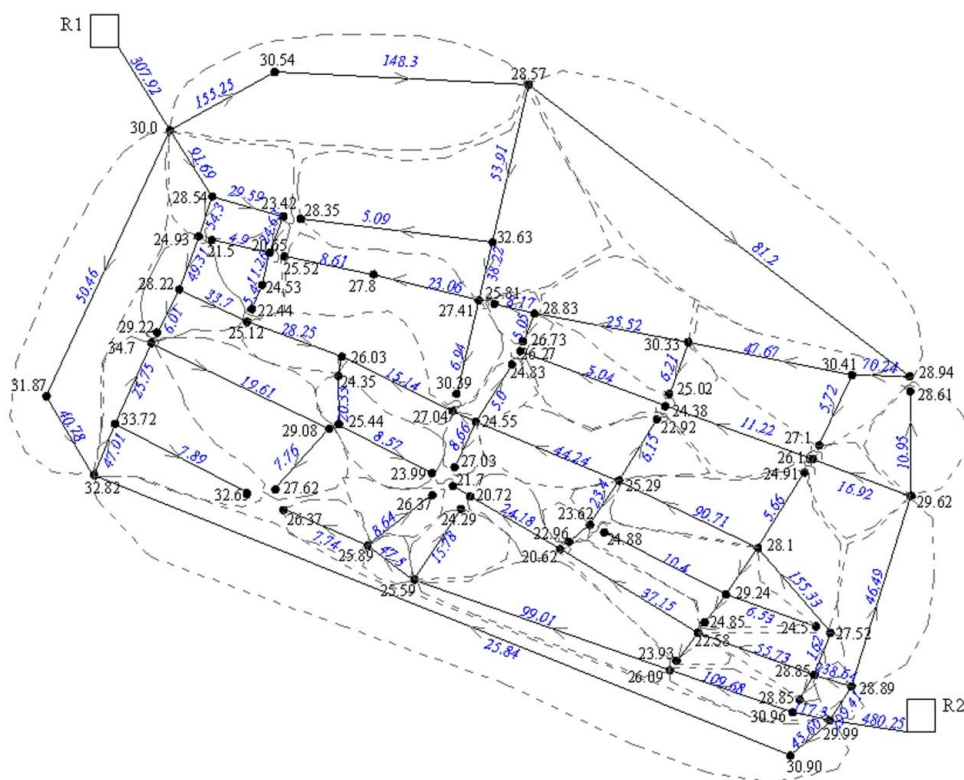
Osim toga vodilo se računa i da pritisci u sistemu budu zadovoljavajući:

$$H_i > H_{\text{zah}} = 2\text{bar}$$

Na taj način formirano je 37 osnovnih zona bilansiranja. Na slici 4.15 je dat sistem sa formiranim zonama. Na slici 4.16 prikazano je stanje takvog sistema u satu maksimalne potrošnje.



Slika 4.15 Šema vodovodne mreže sa 37 OZB



Slika 4.16 Šema vodovodne mreže sa 37 OZB u satu maksimalne potrošnje, sa podacima o pritiscima u čvorovima (m) i protocima u cijevima (l/s)

### Definisanje položaja reducira pritiska

U modelu sistema prikazanog na slici 4.15, analizirana je potreba za postavljanjem reducira pritiska. Konfiguracija sistema je takva da nije bilo mjesta za redukciju pritiska, jer bi bilo onemogućeno obezbjeđenje neophodnog pritiska svim potrošačima. Ipak, OZB su formirane radi praćenja bilansa vode unutar njih, uz pomoć instaliranja mjerača protoka. Praćenjem bilansa vode za pojedine zone se ocjenjuje kvalitet održavanja OZB, koje se sastoji od pretrage zone, zatim lociranja i sanacije pukotina.

### ***Troškovi formiranja***

Kao što je definisano predloženom metodologijom, analiziraće se i u ovom sistemu troškovi formiranja osnovnih zona bilansiranja i troškovi pretrage tako formiranih zona. U troškove formiranja OZB ulaze troškovi formiranja svih novih čvorova u mreži, prekida cjevovoda, ugradnje mjerača protoka.

Koštanje (P), je sprovedeno na 5 godina, sa diskontnom stopom 5%. Koštanje opreme, potrebnog rada i materijala za formiranje 37 OZB, za sistem koji je dat u primjeru, iznosi približno 129.400€. U ove troškove ulaze troškovi instalacije mjerača protoka i svi troškovi za radove koji su neophodni za prekide cjevovoda kao i godišnji troškovi održavanja opreme.

Godišnji troškovi iznose:

$$C_{form}^{god} = 129400 \frac{0.05(1+0,05)^5}{(1+0,05)^5 - 1} = 29.888\text{€}$$

### ***Troškovi pretrage***

Mjerači protoka su postavljeni na ulazu u svaku zonu, sa ciljem identifikacije pukotina unutar zone. Prema već definisanoj jednačini u poglavlju 4, troškovi pretrage osnovnih zona bilansiranja zavise od dužine cijevi unutar posmatrane zone. Prosječna dužina cijevi 37 zona iznosi:

$$L_{prosj} = \frac{\sum L_{OZB}}{37} = 681.7m$$

Troškovi pretrage su sračunati za zonu predstavljenu prosječnom dužinom cijevi od 681,7m. U nastavku je data tabela sa dužinama cijevi u pojedinim zonama.

Tabela 4.11 Dužine cijevi u pojedinim zonama , za slučaj podjele na 37 OZB

<i>Oznaka zone</i>	<i>Dužina cijevi unutar zone <math>L_{OZB}(m)</math></i>
OZB 1	860
OZB 2	1.200
OZB 3	1.500
OZB 4	779
OZB 5	1.183
OZB 6	782
OZB 7	766
OZB 8	600
OZB 9	690
OZB 10	814
OZB 11	864
OZB 12	314
OZB 13	60
OZB 14	48
OZB 15	440
OZB 16	205
OZB 17	239
OZB 18	670
OZB 19	999
OZB 20	894
OZB 21	364
OZB 22	393
OZB 23	309
OZB 24	795
OZB 25	150
OZB 26	174
OZB 27	243
OZB 28	193
OZB 29	1.003
OZB 30	1.085
OZB 31	694
OZB 32	800
OZB 33	730
OZB 34	454
OZB 35	647
OZB 36	2.600
OZB 37	683

Troškovi pretrage, osim što zavise od dužine cijevu unutar posmatrane zone, zavise i od učestanosti pojave pukotina na cijevima.

Ako se na osnovu pritisaka u sistemu pretpostavi frekfencija pojave pukotina 100pukotina/1000km/godišnje, to znači da je očekivani godišnji broj pukotina u ovom vodovodnom sistemu:

$$m = 100 \frac{25,2}{1000} = 2,52$$

U troškove pretrage osim akustičke pretrage sistema, ulaze i troškovi usljed izgubljene vode na mjestu pukotine.

$$C_{pretraga}^{OZB} = m \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} N_r \cdot P \cdot F_t + cR L_{OZB} F_o \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} = 267\text{€}$$

#### *Ukupi troškovi*

Godišnji troškovi u slučaju podjele sistema na 37 zona su:

$$C_{ukupno} = 29.888\text{€} + 267\text{€} = 30.155\text{€}$$

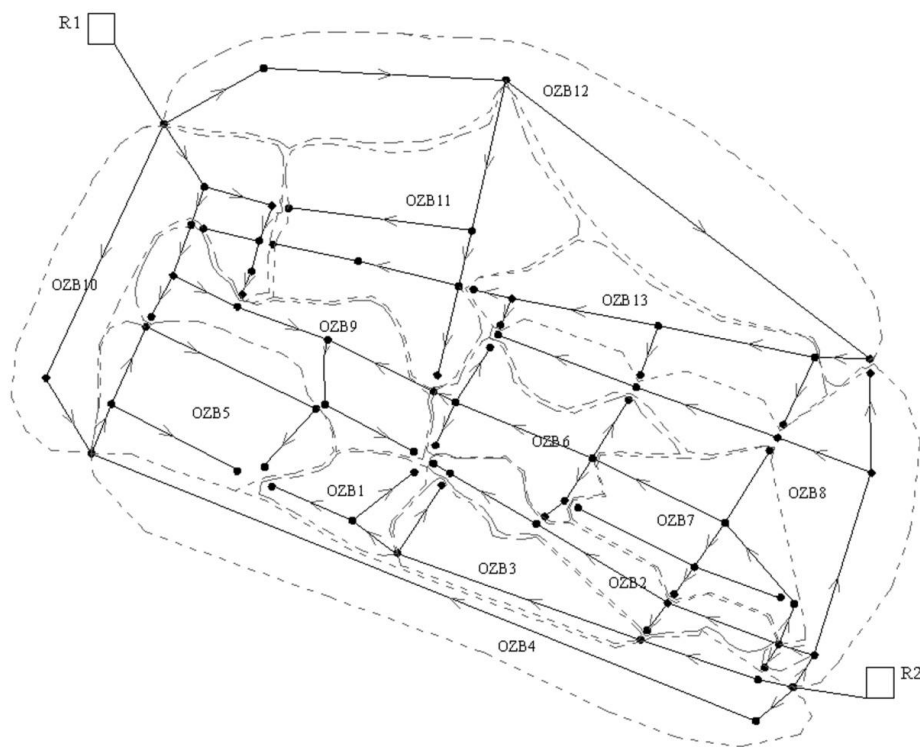
Iz ovoga se zaključuje koliko su troškovi pretrage manjih zona zanemarljivo mali u odnosu na trošak formiranja tih zona.

### 4.3.3 SIMULACIJA STANJA U SISTEMU NASTALOM FORMIRANJEM OZB SA VEĆIM BROJEM PRIKLJUČAKA I ANALIZA DOBITI I TROŠKOVA

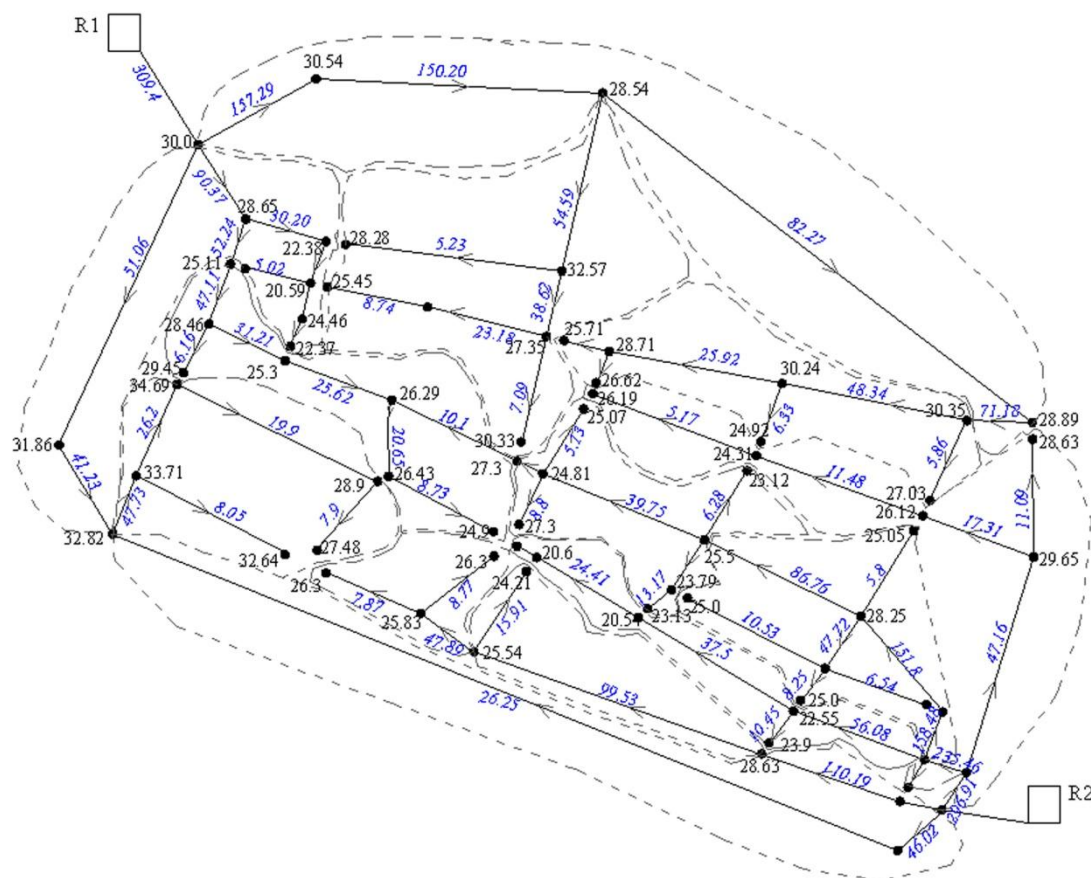
U ovom slučaju, vodovodni sistem je podijeljen na OZB, čiji broj priključaka je bliži gornjoj preporučenoj granici-3000 priključaka.

Na isti način kao u prethodnim slučajevima uproces formiranja OZB, se krenulo oko čvorova u vodovodnoj mreži koji su tkz. “ponori” u sistemu, vodeći računa da budu zadovoljeni svi već navedeni uslovi za nesmetano funkcionisanje sistema.

Formirano je 13 osnovnih zona bilansiranja. Na slici 4.17 je dat sistem sa formiranim zonama. Na slici 4.18 prikazano je stanje takvog sistema u satu maksimalne potrošnje.



Slika 4.17 Šema vodovodne mreže sa 13 OZB



Slika 4.18 Šema vodovodne mreže sa 13 OZB u satu maksimalne potrošnje, sa podacima o pritiscima u čvorovima (m) i protocima u cijevima (l/s)

### Definisanje položaja reducira pritiska

U modelu sistema prikazanog na slici 4.18, analizirana je potreba za postavljanjem reducira pritiska. Kao i u prethodnom slučaju, konfiguracija novonastalog sistema (izdjeljenog na OZB), je takva da nije bilo mjesta za redukciju pritisaka, jer bi bilo onemogućeno obezbjeđenje neophodnog pritiska svim potrošačima. Ipak, OZB su formirane radi praćenja bilansa vode unutar njih, čijim praćenjem u toku vremena se ocjenjuje kvalitet održavanja OZB.

**Troškovi formiranja**

U troškove formiranja OZB ulaze troškovi formiranja svih novih čvorova u mreži, prekida cjevovoda, ugradnje mjerača protoka.

Ekonomska analiza je sprovedena na period od 5 godina, sa diskontnom stopom 5%. Koštanje opreme, potrebnog rada i materijala za formiranje 13 OZB, za sistem koji je dat u primjeru, iznosi približno 61.900€. U ove troškove ulaze troškovi instalacije mjerača protoka i svi troškovi za radove koji su neophodni za prekide cjevovoda.

Godišnji troškovi iznose:

$$C_{form}^{god} = 61.900 \frac{0,05(1+0,05)^5}{(1+0,05)^5 - 1} = 14.297\text{€}$$

**Troškovi pretrage**

U nastavku je data tabela sa dužinama cijevi u pojedinim zonama.

*Tabela 4.12 Dužine cijevi u pojedinim zonama, za slučaj podjele na 13 OZB*

Oznaka zone	Dužina cijevi unutar zone $L_{OZB}(m)$
OZB 1	646
OZB 2	1.437
OZB 3	890
OZB 4	3.054
OZB 5	1.893
OZB 6	1.802
OZB 7	2.187
OZB 8	2.529
OZB 9	1.724
OZB 10	3.093
OZB 11	2.047
OZB 12	2.134
OZB 13	1.788

Prosječna dužina cijevi unutar jedne zone iznosi:

$$L_{prosj} = \frac{\sum L_{OZB}}{13} = 1940m$$



Za prosječnu dužinu cijevu unutar zone sračunati su troškovi pretrage, prema jednačini 4.3, i iznose 1143€.

### ***Ukupi troškovi***

Godišnji troškovi formiranja i pretrage 13 zona su:

$$C_{ukupno} = 14.297\text{€} + 1143\text{€} = 15440\text{€}$$

## **4.3.4 ANALIZA TROŠKOVA U FUNKCIJI OD VELIČINE OZB ZA DATI PRIMJER**

U tabeli 4.13, dati su uporedo troškovi pretrage i formiranja OZB u oba slučaja, na godišnjem nivou.

*Tabela 4.13 Analiza godišnjih troškova u f-ji od broja OZB*

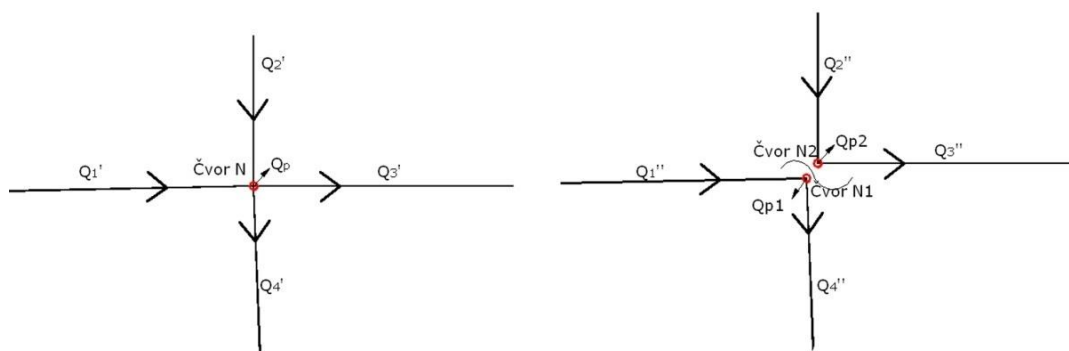
	<i>Troškovi formiranja zona €</i>	<i>Troškovi pretrage unutar jedne zone prosječne dužine €</i>	<i>Ukupni troškovi €</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A+B</i>
37 OZB	29.888	267	30.155
13 OZB	14.297	1143	15.440

Sprovedenjem mjera smanjenja gubitaka, na način kako je opisano u ovom slučaju, tj pretragom sistema i otkrivanjem i saniranjem pukotina u znatnoj mjeri bi se smanjili gubici u sistemu koji iznose 10.717m<sup>3</sup>/dan, odnosno 3.911.778m<sup>3</sup>/god. Iz analize troškova jasno se vidi da je skuplje rješenje podjela sistema na 37 OZB, ipak sa aspekta upravljanja gubicima nije uvijek pravilan izbor rješenje koje je u startu jeftinije. Komenatri na račun adekvatne podjele sistema su dati u poglavlju 4.4, u nastavku rada.

### 4.3.5 POSLJEDICE PODJELE SISTEMA NA ZONE

#### *Promjena hidrauličkih parametara kao posljedica podjele sistema na zone*

Kao što je navedeno, sve simulacije stanja vodovodnog sistema su vršene u programskom paketu "Epanet". Potrošnja u ovom programu se predstavlja preko opcije "Base Demand" i vezana je za čvor mreže (čvorna potrošnja). Programski paket "Epanet" nema mogućnost da cijevima dodijeli potrošnju po  $m^1$ . Stoga se prilikom podjele sistema na OZB, vršila i promjena čvorne potrošnje, u novonastalim čvorovima modela, slika 4.19. U ovom slučaju se vršila podjela čvorne potrošnje na jednake djelove. U realnom sistemu, u kom postoji podatak o potrošnji po  $m^1$  cijevi, podjela čvorne potrošnje bi se vršila proporcionalno potrošnji duž cijevi, koje su vezane za taj čvor. Na taj način bi bili zadovoljeni neophodni uslovi za kvalitetno snabdijevanje potrošača, nakon podjele sistema.

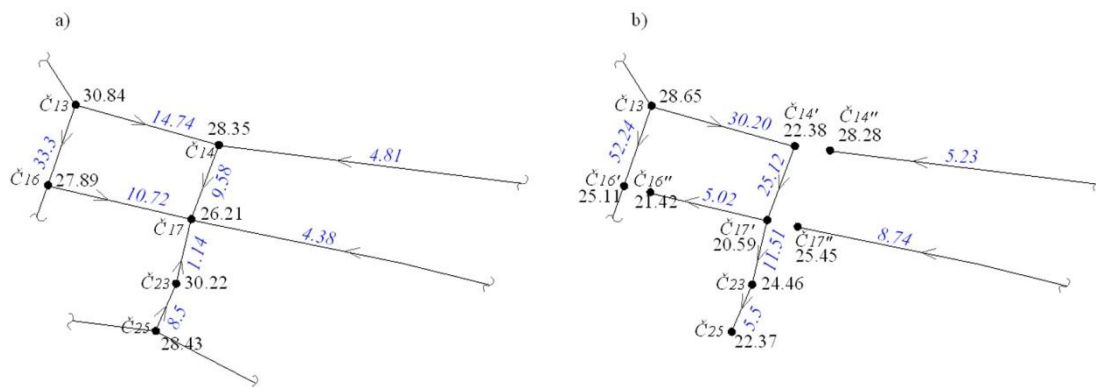


*Slika 4.19 Šema podjele čvora u modelu*

Na ovaj način, podjelom sistema na zone, dolazi do promjene hidrauličkih parametara u sistemu (protok, pritisak....). Ali obezbjeđenje potrebnih količina vode i neophodnog pritiska svim potrošačima su uslovi, koji moraju biti zadovoljeni i nakon podjele sistema.

Na karakterističnim dionicama u sistemu iz primjera, je vršena analiza promjene protoka u cijevima i pritiska u čvorovima, za slučaj prije i poslije podjele sistema na zone, slika 4.20. Osim promjene veličine protoka u dionicama Č16-Č17, Č17-Č23 i

Č23-Č25 došlo je i do promjene smjera toka vode, što je posljedica snabdijevanja sistema iz dva rezervoara.



Slika 4.20 Pritisaci u čvorovima i protoci u cijevima, u satu maksimalne potrošnje, a) prije i b) poslije podjele sistema na zone

## 4.4 REKAPITULACIJA DOBIJENIH REZULTATA

U teorijskom primjeru, koji je obrađen u poglavlju 4.2, dolazi se do zaključka da bi najekonomičnije rješenje bilo da cio sistem bude jedna zona. Izabrani "pilot" sistem, na kome je prikazana usvojena metodologija je relativno mali sistem, tako da svojom veličinom i brojem priključaka ulazi u opseg preporučene veličine OZB. Glavna dobit u ovakvom sistemu se ostvaruje redukcijom pritisaka. Naravno, analizirani su troškovi i dobiti (od redukcije pritiska, formiranja i pretrage zona), za slučaj podjele sistema na dvije i više zona. Analize, u konkretnom primjeru, su pokazale da promjenom konfiguracije sistema, podjelom na zone, stanje pritisaka se ne mjenja. Tako da se i ne mjenja dobit koju je moguće ostvariti redukcijom pritisaka. Primjer je karakterističan iz razloga visokih pritisaka u sistemu, i poslužio je da se pokaže koliko je mjera smanjenja pritisaka u sistemu efikasna mjera. Kao takva, ova mjera se obično sprovodi prva. Nakon dovođenja pritisaka na prihvatljiv nivo, nikako se ne treba zaustaviti u borbi protiv gubitaka. Tada je potrebno razviti strategiju upravljanja gubicima, a to

podrazumjeva podjelu sistema na zone radi lakšeg praćenja promjene noćne potrošnje i radi bržeg lociranja pukotine.

Rezultati ovoga primjera su dokaz dosadašnjih iskustava, koja se nalaze u pregledu literature, kojim se potvrđuje opravdanost mjere smanjenja gubitaka, prije svega redukcijom pritiska.

Radi prikaza upravljanja sistemom, koji već ima regulisane pritiske, a ipak veliki gubici u sistemu postoje, izabran je vodovodni sistem grada Ferrara. Ovaj primjer je obrađen u poglavlju 4.3. Nakon podjele sistema na OZB, usvojenom metodologijom, analiza je pokazala da nema mjesta za mjeru smanjenja gubitaka redukcijom pritiska u mreži, jer je novonastala konfiguracija sistema takva da bi redukcija pritiska onemogućila uredno snabdijevanje vodom svih potrošača. Ipak, OZB su formirane radi praćenja bilansa vode unutar njih, pomoću mjerača protoka. Praćenjem bilansa u toku vremena se ocjenjuje kvalitet održavanja OZB. Prema tome, u ukupnoj ekonomskoj analizi troškova nije ušla dobit od redukcije pritiska, već samo troškovi nastali formiranjem i pretragom OZB. Analiza troškova je pokazala da je skuplje rješenje podjela sistema na 37 OZB. Ali, ako bi se pravilnim upravljanjem gubicima u tako izdjeljenom sistemu, smanjili gubici makar 2%, moglo bi se reći da je investicija podjele na 37 OZB opravdano rješenje. Iako je skuplje, ovo rješenje sa sobom nosi određene prednosti u odnosu na podjelu sistema na 13 zona. Prva prednost je što su troškovi pretrage ovako malih zona zanemarljivo mali u odnosu na investiciju. Osim toga, u manjoj zoni je lakše evidentirati pojavu pukotine, analizom dijagrama noćne potrošnje. Veća zona sa sobom nosi i veću vjerovatnoću težeg uočavanja curenja usljed nove pukotine.

Iz prethodno navedenog da se zaključiti da je određivanje najekonomičnijeg rješenja izbora veličine zone (u cilju kvalitetnog upravljanja gubicima u vodovodnim sistemima) u funkciji godišnjih troškova i dobiti, složen zadatak koji zavisi on niza parametara. Pravilnom analizom vodovodnog sistema, vrste gubitaka u njemu, kao i odgovarajućih troškova i dobiti, dolazi se do optimalnog rješenja.

# 5

## **PRIMJER PRIMJENE PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA FORMIRANJE OZB U VODOVODNOM SISTEMU PODGORICE**

### **5.1 SADAŠNJE STANJE VODOVODA PODGORICE**

#### **5.1.1 ISTORIJAT RAZVOJA VODOVODA PODGORICE<sup>(57)</sup>**

Ideja o potrebi izgradnje savremenog vodovoda na području Podgorice, prvi put je zabilježena početkom XX vijeka, kada je o tome pisao i Cetinjski vjesnik. Isti list je 1912. godine objavio vijest da je Opštinski odbor Podgorice donio odluku da izdvoji tadašnjih 320.000 perpera za izgradnju vodovoda. Zbog ratnih sukoba koji su ubrzo uslijedili, međutim, gradnja je odložena.

Nakon Drugog svjetskog rata, 1947.godine izrađen je prvi projekat vodovoda. Narednih godina obavljani su istražni radovi na osnovu kojih je 1951. godine donijeta odluka o izgradnji vodozahvata na Marezi. Kaptaza na Marezi sa pumpnom stanicom i dovodni

cjevovod od Mareze do Podgorice, dug šest kilometara, izgrađeni su tokom 1952. godine. Voda sa Mareze je 1. marta 1953. godine potekla je sa 15 javnih česama. Arterije gradskog vodovoda ubrzo su postale sve brojnije i već 1954. godine je postavljeno 36 javnih česmi. Pet godina kasnije i u Tuzima je izgrađen vodovod.

Bušenjem i opremanjem bunara prvo na Koniku, a zatim i u Zagoriču 1969. godine počinje dvojni sistem snabdijevanja vodom. Razvoj grada zahtjevao je još veće količine vode, tako da je 1971. pušten u rad i drugi bunar u Zagoriču, a nešto kasnije još dva.

Problem nestašice vode u ljetnjim mjesecima bio je posebno izražen sredinom sedamdesetih godina, ali zbog nedostatka finansijskih sredstava počinje da se rješava tek 11 godina kasnije, kada su obavljeni složeni radovi na crpnoj stanici Mareza 2. Konačno, sredinom 1997. godine kapacitet vodovodnog sistema Podgorice je povećan za dodatnih 500 l/s.

Razvoj grada stalno je zahtjevao dodatne količine vode, tako je krajem devedesetih godina prošlog i sredinom prve decenije ovog vijeka na Čemovskom polju izbušeno pet bunara kapaciteta 410l/s. Posljednjih godina izgrađeni su vodovodi i na području Milješa, Pipera, Dinoše i Vuksanlekića, dok je za bezvodni kraj Kuča izbušen i opremljen bunar na Bioču, koji ima dovoljan kapacitet za snabdijevanje 20 kućkih sela.

### **5.1.2 VODOVODNI SISTEM PODGORICE DANAS**

Danas, preduzeće „Vodovod i kanalizacija“ Podgorica, snabdijeva vodom preko 150.000 stanovnika Glavnog grada putem vodovodnog sistema dužine oko 1155 km koji se prostire od vodoizvorišta Mareza, preko cijele teritorije Glavnog grada do obala Skadarskog jezera, odnosno Gradskih opština Golubovci i Tuzi. U sistemu vodosnabdijevanja nalazi se šest glavnih vodoizvorišta: Mareza, Zagorič, Čemovsko polje, Vuksanlekići, Milješ i Dinoša sa instalisanim kapacitetima 2300l/s i dnevnom isporukom vode od 100.000 m<sup>3</sup>/dan. Sistem raspolaže sa četiri glavna rezervoara: Ljubović, Gorica, Vuksanlekići, Lekovića gora, ukupne zapremine 6.000m<sup>3</sup>. U planu je izgradnja centralnog gradskog rezervoara, kapaciteta 20.000m<sup>3</sup> na brdu Vršak. U sistemu je povezano i sedam pumpnih stanica: Mareza1, Mareza2, Zagorič, Čemovsko

polje, Dinoša, Milješ, Vuksanlekići. Kontrola i nadgledanje vodovodnog sistema vrši se iz upravne zgrade. U ovom trenutku na vodovodni sistem priključeno je 83% stanovništva Glavnog grada sa stalnom tendencijom uvećavanja.

Vodovodna mreža je izgrađena od cijevi različitog materijala (AC, liveno gvozdene, PVC, polietilen, ductile,...), maksimalnog prečnika 800mm.

### **5.1.3 UPRAVLJANJE VODOVODNIM SISTEMOM PODGORICE**

#### *O SCADA sistemu*

SCADA sistem je sistem koji služi za automatizaciju opštih procesa, koji će koristiti za prikupljanje podataka sa senzora i instrumenata lociranih na udaljenim stanicama i za prenos i prikazivanje tih podataka u centralnoj stanici u svrhu nadzora i upravljanja. SCADA(engl. Supervisory Control And Data Acquisition) predstavlja sistem za mjerenje, praćenje i kontrolu industrijskih sistema. SCADA sistemi su programska podrška za nadzor i upravljanje industrijskim procesima. Kao što joj ime kaže, ona nema potpunu kontrolu nad sistemom, već je više orijentisana ka nivou nadgledanja i nadziranja.

Uz pomoć efikasnih sistema nadziranja i alarmiranja mogu da se riješe i uklone problemi prije nego što postanemo svijesni njihovog postojanja.

*Ciljevi uvođenja SCADA sistema su:*

*Smanjenje troškova:* potreban je manji broj radne snage, manji su troškovi prevoza, postižu se uštede u vremenu, postiže se veći stepen sigurnosti izvršenja radnih procesa.

*Raspoloživost i integritet sistema.* Od SCADA sistema se očekuje da bude otporan na greške i da obezbjedi kontinualan rad.

*Fleksibilnost i proširenje sistema.* Osnovni uslov za postizanje ovog cilja je definisanje spona („interface“) među fizičkim i programskim elementima.

*Realno vrijeme.* SCADA sistem ima sposobnost da prati čitav sistem u realnom vremenu. Realno vrijeme se odnosi na sposobnost sistema da reaguje na alarm procesa sa vrlo malim kašnjenjem u odnosu na dinamiku razvoja procesa. Reakcija sistema treba da bude u skladu sa kontrolnim ciljevima.

*Visoka pouzdanost.* Sistem predstavlja mozaik komponenti od kojih se očekuje određen, što veći stepen pouzdanosti. U implementaciji sistema potrebno je uzeti u obzir pouzdanost pojedinih komponenti, dok za komponente dobijene od strane trećih lica potrebno je procijeniti pouzdanost i poboljšati je u što većoj mjeri pomoću odgovarajućih uređaja.

*Visoka dostupnost.* U ovom slučaju dio vremena u kom se sistem zaustavlja zbog kvara održavanja, popravki treba svesti na minimum, prema tome dostupnost treba da je na veoma visokom nivou. Dostupnost se može odnositi na čitav sistem ili na pojedine djelove istog i jeste karakteristika koja je ograničena i koja se razlikuje prema vrsti procesa koji je pod kontrolom.

*Stepen interakcije čovjek-mašina.* Svaka realizacija funkcije sistema za nadzor i kontrolu podrazumjeva stvaranje podsistema koji će biti odgovoran za interakciju operatera i samog sistema i ta funkcija se naziva čovjek-mašina interfejs (HMI).

Neke od najvažnijih osobina SCADA sistema:

- pristup kvantitativnom određivanju važnih procesa;
- otkrivanje kao i ispravljenje problema čim počnu;
- mjerjenje trendova tokom vremena;
- otkrivanje i eliminisanje neefikasnosti;
- kontrola velikih složenih procesa sa malim brojem stručnih osoba.

SCADA sistem daje mogućnost da ma koliko veliki prostor bio sa postavljenjem većeg broja senzora, on čitav bude pokriven, da se prati više stvari u realnom vremenu.



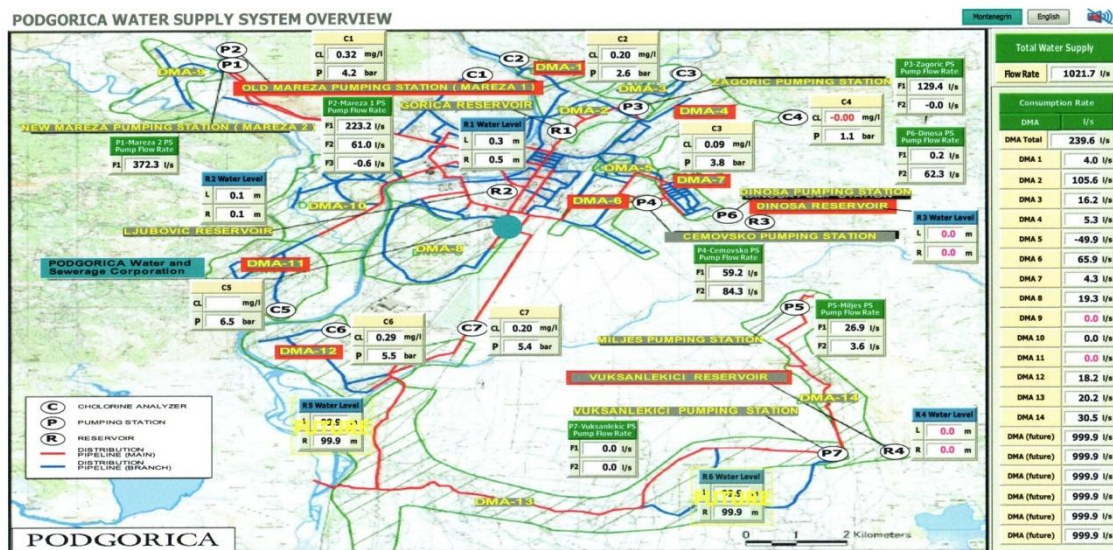
Postoje četiri vrste SCADA komponenti:

1. Senzori (digitalni, analogni) i kontrola releja-koji direktno sa interfejsa upravljaju sistemom.
2. Telemetrijske jedinice (RTU). To su male kompjuterske jedinice razmještene na terenu, na određenim lokacijama i služe kao lokalni sabirni punktovi za prikupljanje informacija sa senzora i isporuku komande za kontrolu releja.
3. Scada Master jedinica predstavljaju veće računare koji obezbjeđuju ljudski interfejs za sistem i automatski reguliše sistem upravljanja kao odgovor na senzor ulaza.
4. Komunikacijske mreže povezuje SCADA Master jedinicu i RTU na terenu.

#### *SCADA u vodovodnom sistemu grada Podgorice*

SCADA sistem je, u preduzeću koje upravlja vodovodnom mrežom grada Podgorice, implementiran 2012. godine. Njegove osnovne funkcije su prikupljanje podataka i nadzor, dok se kontrolna funkcija još ne primjenjuje na centralnoj lokaciji, na tome će se raditi u budućnosti. Pumpna stanica "Mareza 2" je potpuno automatizovana i na njoj se koristi kontrolna funkcija. SCADA sistem ima sposobnost da prati čitav proces u realnom vremenu, potom stvara bolju i jednostavniju regulaciju sistema i tako se optimizuju procesi kontrole.

Prikupljeni podaci se posmatraju na 2 SCADA računara na centralnoj (glavnoj) lokaciji. Za nadgledanje su obično zasluženi operateri i inženjeri, a pod pojmom upravljanja misli se na praćenje, zadavanje pravila rada i telemetriju.



Slika 5.1 Šematski prikaz vodovodnog sistema grada Podgorice u SCADA sistemu

Procesi u SCADA sistemima obično imaju od hiljadu do nekoliko stotina hiljada ulazno izlaznih podataka. Što se tiče primjene SCADA sistema u vodovodu grada Podgorice, ona vrši prikupljanje podataka sa udaljenih uređaja i šalje ih u bazu podataka centralnog glavnog servera gdje se vrši obrada i analiza tih podataka.



Slika 5.2 SCADA server

Na centralnoj lokaciji (MCC – glavna kontrolna soba) nalazi se sledeća oprema:

- SCADA serveri (primarni i sekundarni);
- SQL serveri baze podataka (primarni i sekundarni);
- router (služi za komunikaciju sa uređajima na terenu);
- 2 switch-a (lan mreža);
- KVM sistem (monitor, tastatura, miš, RGB/VGA switch);
- UPS (za neprekidno napajanje).



*Slika 5.3 Glavna kontrolna soba*

Unutar sistema postoji LAN (local area network) mreža koja povezuje korisničke računare (HMI) sa serverima SCADA sistema. Na SCADA računarima vrši se monitoring cjelokupnog sistema.

Na terenu postoji 30 mjernih stanica, koje su instalirane u prepoznatljivim objektima, postavljenim širom Podgorice. Od toga je u sedam mjernih stanica instaliran mjerac rezidualnog hlora i pritiska, a u 23 mjerac pritiska i protoka.



*Slika 5.4 Mjerno mjesto*

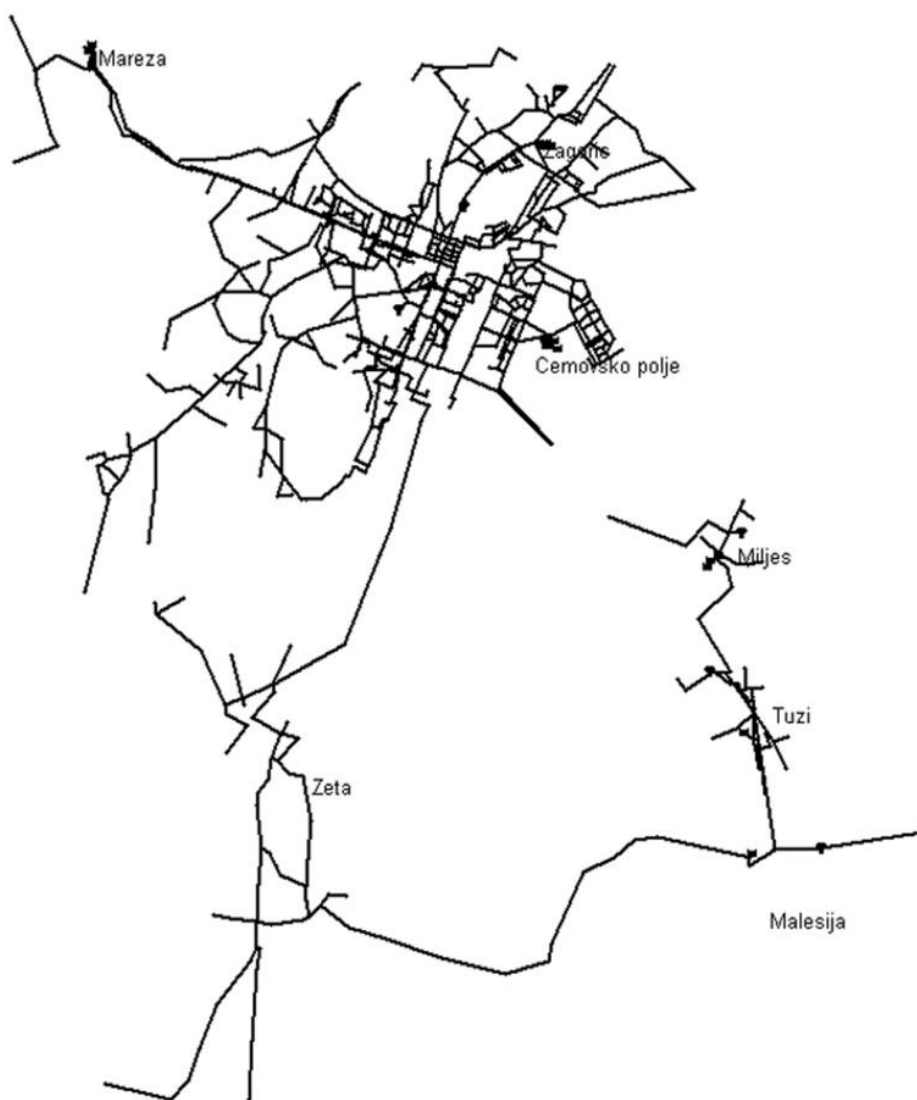


*Slika 5.5 Mjerač pritiska*

Prikupljeni podaci sa terena se šalju u SCADA server preko GPRS sistema a samo tri pumpne stanice (Zagorič, Mareza1 i Mareza2) koriste optičke kablove.

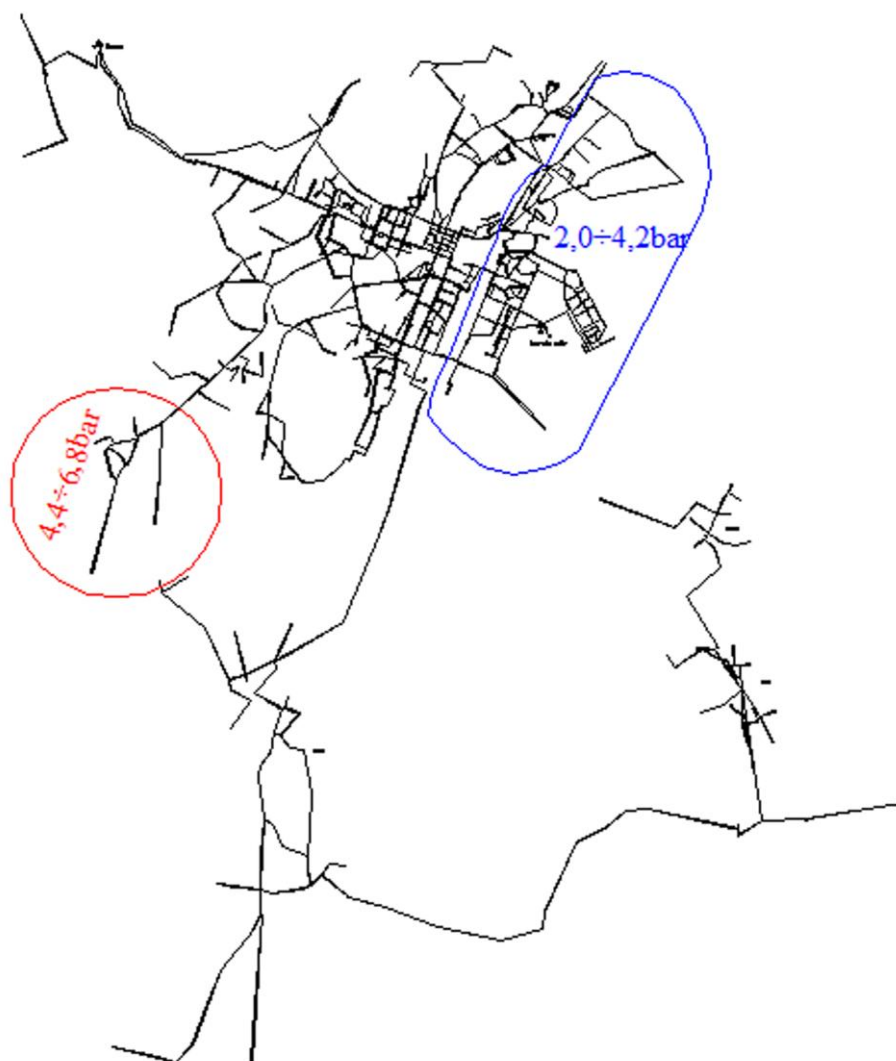
### 5.1.4 SIMULACIJA SADAŠNJEG STANJA VODOVODNOG SISTEMA PODGORICE

U programskom paketu “Epanet” je izvršena simulacija sadašnjeg stanja vodovodnog sistema. Gubici u sistemu iznose oko 45%. Pritisci variraju u opsegu 2.6÷6.8 bar (noćna potrošnja) i u opsegu 1.2÷5.6 bar (dnevna potrošnja).



Slika 5.6 Šema sistema

Sa aspekta različitih vrijednosti pritiska, vodovodni sistem grada Podgorice je specifičan. Iako je grad Podgorica pretežno izgrađen u ravničarskom predjelu, oscilacije u pritiscima unutar sistema postoje. Razlog leži u konceptu snabdijevanja vodom pumpanjem iz podzemnih vodozahvata i bunara. U zavisnosti od položaja zone u odnosu na pumpno postrojenje, pritisak može da bude veoma visok ili nizak. Iz razloga raznolikosti sistema izabrane su dvije oblasti za primjenu predložene metodologije: jedna sa pritiscima 2,0÷4,2 bara, a druga sa pritiscima 4,4÷6,8 bara. Zone su prikazane na slici 5.7.



Slika 5.7 Šema sistema za naznačenim oblastima koje su razmatrane u radu



## **5.2 FORMIRANJE OZB, SIMULACIJA I REZULTATI SIMULACIJE SISTEMA VODOVODNOG SISTEMA PODGORICE NAKON FORMIRANJA OZB**

### **5.2.1 UPRAVLJANJE GUBICIMA U ZONI SA NIŽIM PRITISCIMA**

Uvidom u podatke prikupljene u mjernim mjestima sistema, o pritisku i protoku, dobijene su sve potrebne informacije za pravilno postavljanje modela u programskom paketu “Epanet”. Odstupanja izmjerenih podataka od podataka iz modela na nekim mjestima su bila neznatna, a na nekim nijesu.

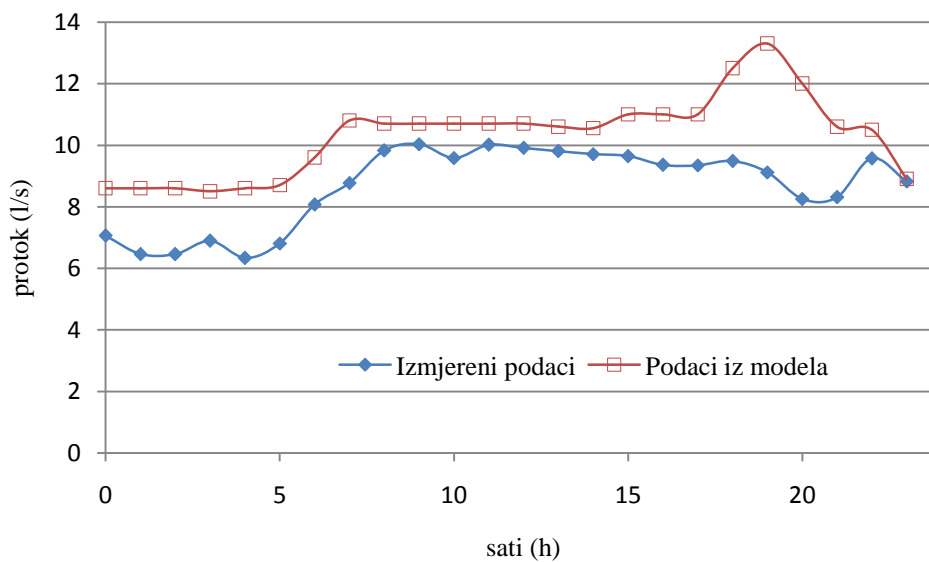
Kako je sistem mjerenja i praćenja podataka u vodovodnoj mreži grada Podgorice relativno novijeg datuma (2012), to nijesu na svim mjernim mjestima tačno i u kontinuitetu registrovani mjereni podaci. Iz toga razloga, u ovom radu nije cijela vodovodna mreža uzeta u razmatranje i podjelu na OZB, već jedan njen dio za koji su postojali u kontinuitetu registrovani i tačni podaci sa mjernih mjesta.

Kao primjer je prikazano poređenje podataka o protoku, sa mjernog mjesta F6, koje se nalazi u zoni nižeg pritiska, koja je odabrana za primjenu metodologije. Položaj tog mjernog mjesta u modelu je naznačen na slici 5.8. Na slici 5.9 je prikazana razlika u izmjerenom protoku na mjernom mjestu F6 i protoku dobijenom kao rezultat iz “Epanet“-a (model prije korekcije). Nakon korigovanja parametara u “Epanet“-a, dobijen je model koji u velikoj mjeri odgovara stvarnom stanju u sistemu. Korekcije u modelu, na bazi izmjerenih veličina, u najvišoj mjeri su se odnosile na parametre gubitaka u sistemu. Dijagram na slici 5.10 prikazuje razliku između izmjerenih podataka i podataka dobijenih iz modela, nakon unešenih korekcija. Na tom dijagramu se vidi da su odstupanja neznatna, i da model odgovara stvarnom stanju.

Ovako dobijen model vodovodnog sistema grada Podgorice, je poslužio za primjenu kriterijuma za podjelu na OZB, definisanih u prethodnom poglavlju i analizu novonastalog stanja.



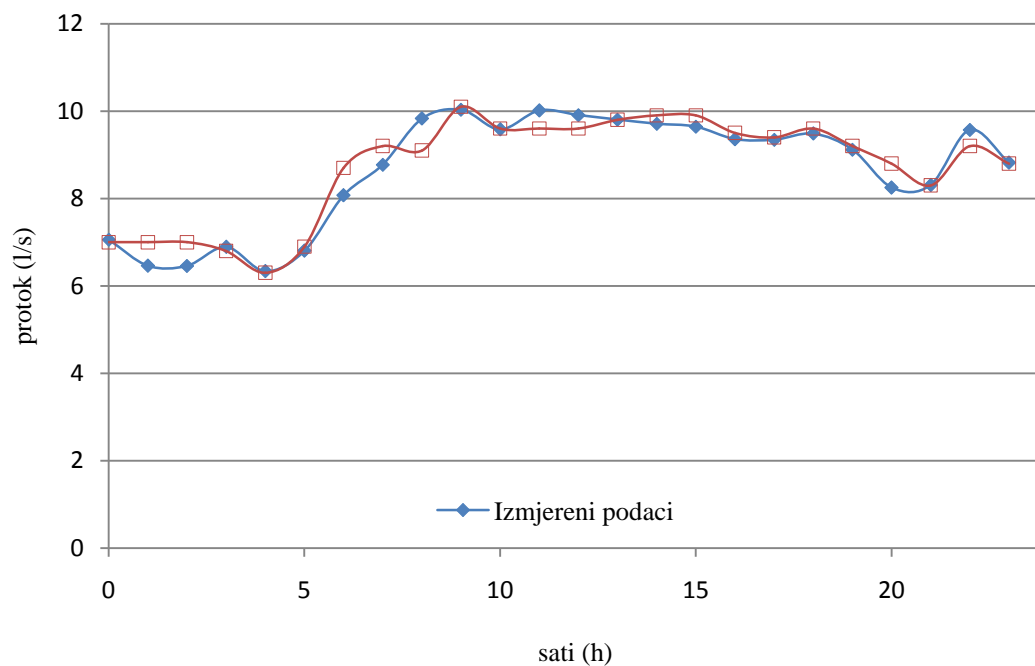
Slika 5.8 Šema sistema sa naznačenim položajem mjernog mjesta F6



Slika 5.9 Promjena protoka u toku dana na mjernom mjestu F6-izmjerene podaci i podaci iz modela(prije korekcije)



5 PRIMJER PRIMJENE PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA FORMIRANJU OZB U VODOVODNOM SISTEMU PODGORICE



Slika 5.10 Promjena protoka u toku dana na mjernom mjestu F6-izmjereni podaci i podaci iz modela (nakon korekcije)



Slika 5.11 Šema sistema sa prikazanom oblasti koja je izdjeljena na OZB

Na slici 5.11 prikazana je oblast, koja će u nastavku biti izdijeljena na zone i analizirana. Prosječna gustina priključaka u toj oblasti iznosi oko 89 priključka/km. Ukupna dužina cjevovoda u toj oblasti iznosi 47,6 km, prečnici se kreću u opsegu 80÷400mm.

Za datu oblast, potrebno je formirati osnovne zone bilansiranja (OZB), imajući u vidu ostvarivanje minimalnih godišnjih troškova. Kao što je definisano u ranijim poglavljima, primjena predložene metodologije se sastoji od sledećih koraka:

**1. Definisanje zona.**

Imajući u vidu zadržavanje funkcionalnosti rada vodovodnog sistema nakon podjele na OZB, kao logično rješenje se nametnulo da se u procesu formiranja OZB krene oko čvorova u vodovodnoj mreži koji su “ponori” u sistemu. Prilikom formiranja zona vodi se računa o “skeletizaciji sistema” i o tome da pritisci u sistemu budu zadovoljavajući, da se ne ugrozi uredno snabdijevanje potrošača.

**2. Redukcija pritiska.**

Nakon podjele sistema na OZB različitih veličina (iz opsega 500÷3.000 priključaka), potrebno je za pojedine slučajeve analizirati mogućnost redukcije pritiska u tako izdijeljenom sistemu.

**3. Računanje ekonomske dobiti od redukcije pritiska.**

Ukoliko ima mjesta za redukciju pritiska, kao mjeru smanjenja gubitaka, potrebno je sračunati finansijsku dobit usljed smanjenja curenja, kao posljedice redukcije pritiska, i troškove koji prate taj proces.

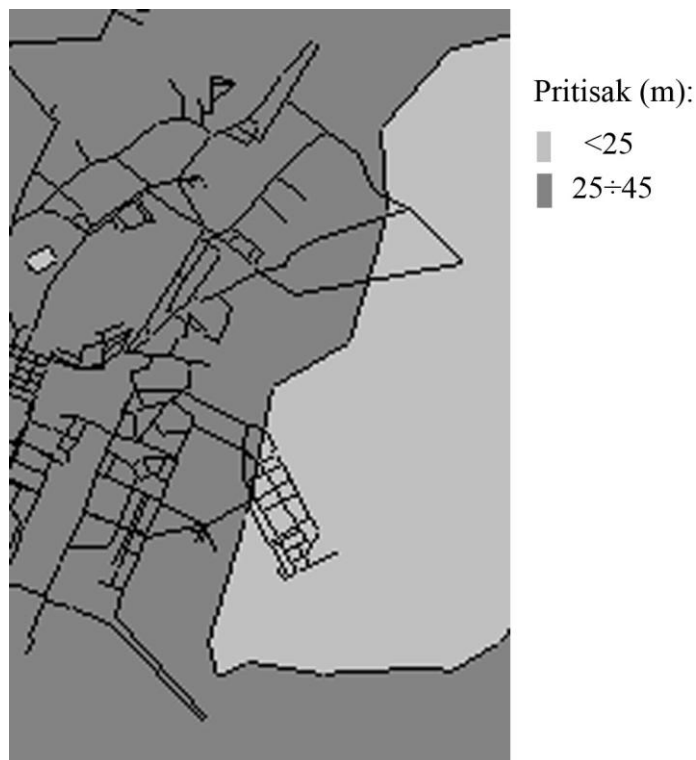
**4. Računanje troškova formiranja i pretrage OZB.**

Paralelno sa analizom dobiti i troškova koje nastaje redukcijom pritiska, analiziraju se troškovi pretrage i formiranja za razne slučajeve podjela sistema na OZB, shodno naprijed usvojenim jednačinama.

**5. Odabir optimalne veličine OZB.**

Objedinjavanjem dobiti i troškova sračunatih pod tačkama 3. i 4. predložene metodologije, za razne scenarije podjele sistema na zone, vrši se odabir optimalne veličine OZB. Optimalna veličina OZB je vezana za najveću godišnju dobit, odnosno najmanje troškove.

Na slici 5.12 prikazani su pritisci u sistemu, prije podjele na OZB. Analizom pritisaka koji se javljaju u dijelu mreže, koja je predmet podjele na OZB, došlo se do zaključka da nema potrebe za redukcijom pritisaka u sistemu, jer bi redukcija pritisaka onemogućila uredno snabdijevanje vodom svih potrošača.

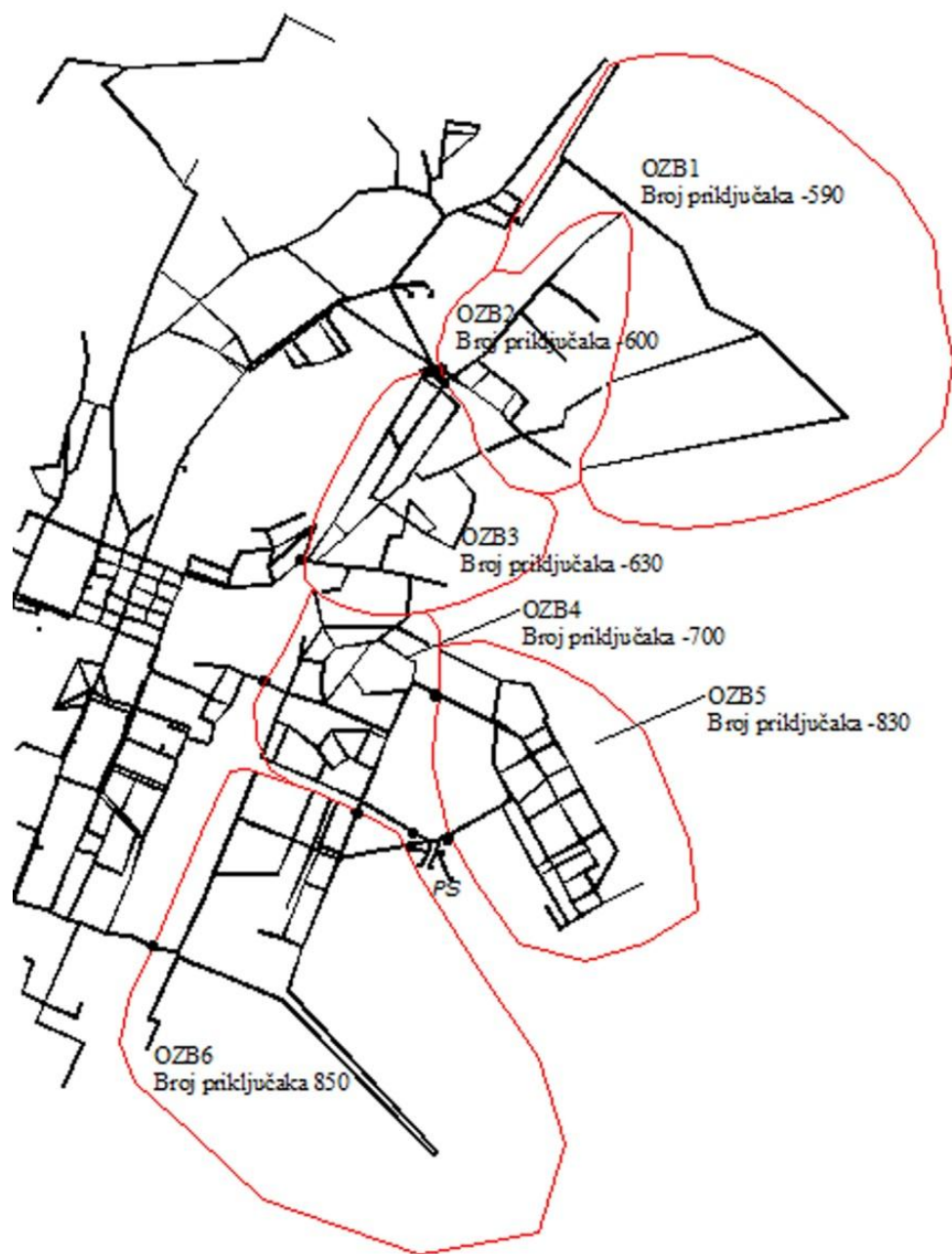


Slika 5.12 Pritisci u sistemu u satu maksimalne potrošnje

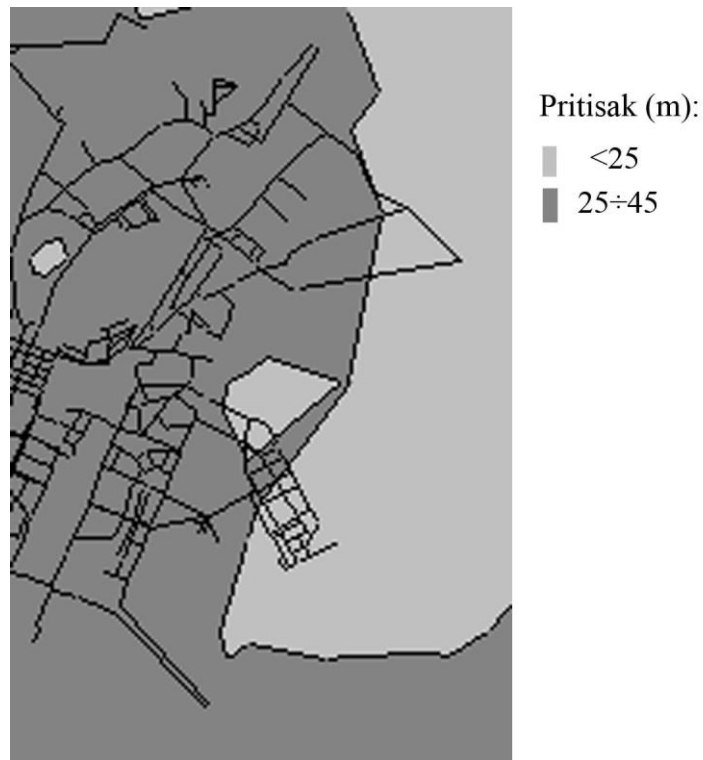
#### **Sistem sa manjim OZB - analiza dobiti i troškova**

Predmetna zona broji oko 4.200 vodovodnih priključaka. U skladu sa preporučenom veličinom zone, oblast je podijeljena na OZB, čiji broj priključaka je bliži donjoj preporučenoj granici-500 priključaka. Kako je već naznačeno u prethodnim poglavljima, u procesu formiranja OZB se krenulo oko čvorova u vodovodnoj mreži koji su tkz. “ponori” u sistemu.

Na taj način formirano je 6 osnovnih zona bilansiranja. Formiranje zona je ostvareno prekidanjem cjevovoda na 11 mjesta. Radi praćenja stanja u formiranim OZB planirana je ugradnja 7 mjerača protoka, uz zadržavanje postojećeg na mjernom mjestu F6. Na slici 5.13 je dat sistem sa formiranim zonama i brojem priključaka u svakoj od njih. Na slici 5.14 prikazano je stanje pritiska takvog sistema u satu maksimalne potrošnje.



Slika 5.13 Šema dijela vodovodne mreže sa 6 OZB



Slika 5.14 Šema dijela vodovodne mreže sa 6 OZB u satu maksimalne potrošnje, sa prikazanim zonama pritiska

U troškove formiranja OZB ulaze troškovi formiranja svih novih čvorova u mreži, prekida cjevovoda, ugradnje mjerača protoka. Koštanje (P) je sprovedeno na 5 godina, sa diskontnom stopom 5%. U troškove spadaju svi troškovi na montaži 9 mjerača protoka i troškovi prekida cjevovoda na 9 mjesta u sistemu. Godišnji troškovi iznose:

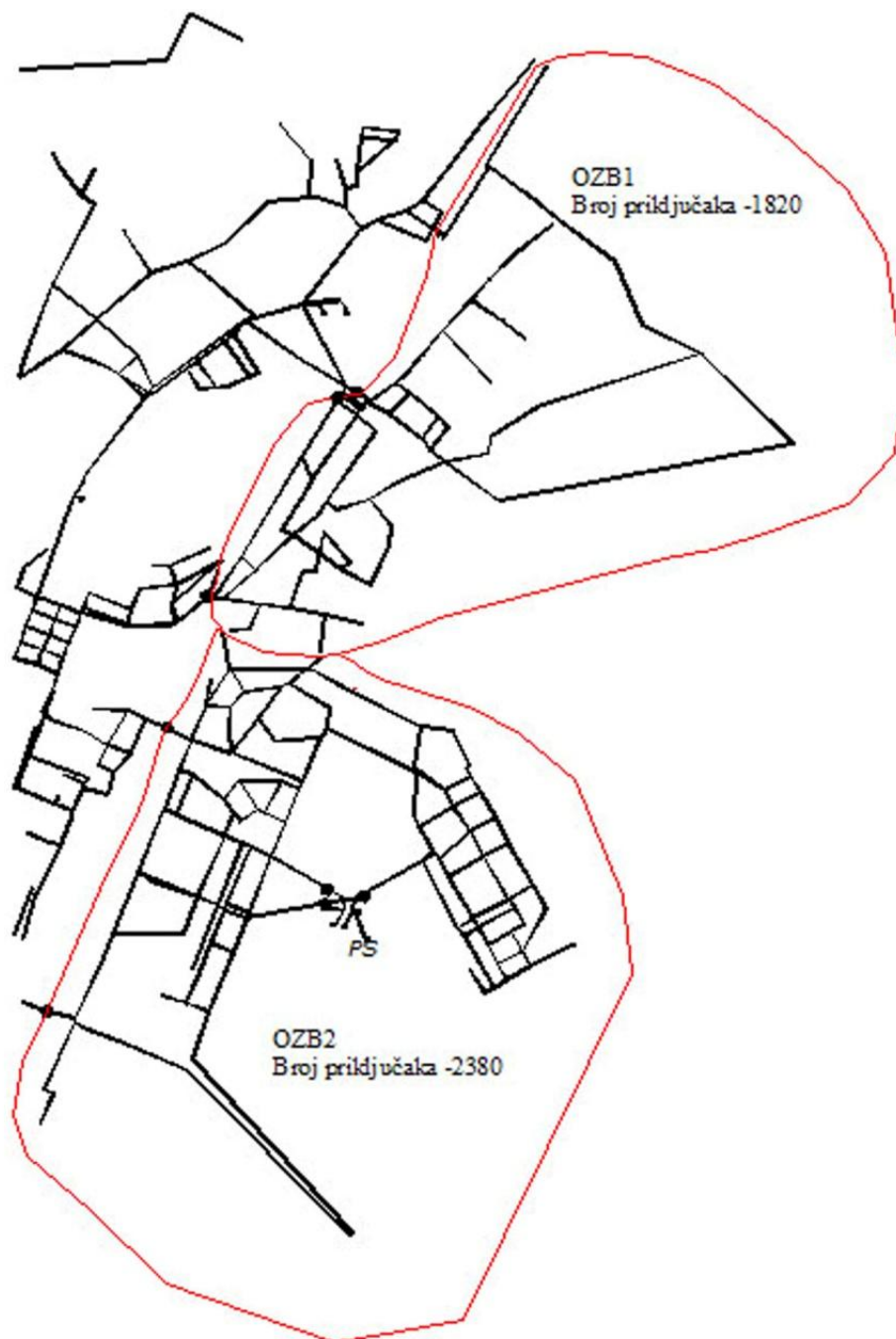
$$C_{form}^{god} = 70.250\text{€}$$

Dužina cijevu unutar zone iznosi oko 8km. Prema već definisanoj jednačini, godišnji troškovi pretrage zona zavise od  $L_{OZB}$  i u ovom slučaju iznose:

$$C_{pretraga}^{OZB} = m \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} N_r \cdot P \cdot F_t + cR L_{OZB} F_o \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} = 4.900\text{€}$$

Prvi sabirak predstavlja cijenu akustičkih pretraga sistema, a drugi cijenu vode koja je izgubljena usljed procurivanja.

*Sistem sa većim OZB - analiza dobiti i troškova*



*Slika 5.15 Šema dijela vodovodne mreže sa 2 OZB*

U ovom slučaju, vodovodni sistem je podijeljen na OZB, čiji broj priključaka je bliži gornjoj preporučenoj granici – 3.000 priključaka. Pri tom je korišćena već opisana metodologija.

Formirane su 2 osnovne zona bilansiranja. Formiranje zona je ostvareno prekidanjem cjevovoda na 2 mjesta. Radi praćenja stanja u formiranim OZB planirana je ugradnja 5 mjerača protoka, uz zadržavanje postojećeg na mjernom mjestu F6. Na slici 5.15 je dat sistem sa formiranim zonama. Na slici 5.16 prikazano je stanje takvog sistema u satu maksimalne potrošnje.



*Slika 5.16 Šema dijela vodovodne mreže sa 2 OZB u satu maksimalne potrošnje, sa prikazanim zonama pritiska*

U troškove formiranja ulaze troškovi instalacije 5 mjerača protoka i svi troškovi za radove koji su neophodni za prekide cjevovoda, na 2 mjesta u sistemu. Godišnji troškovi održavanja opreme su pretpostavljeni da su fiksni procenat njenih godišnjih



troškova, i već su uračunati su u cijenu. Troškovi formiranja na godišnjem nivou iznose 42.000€.

Kako su dobijene zone sa većom dužinom cijevi, u odnosu na prethodni slučaj, to su i troškovi pretrage znatno veći. Dužina cijevi u zoni je 25km. Godišnji troškovi pretrage osnovnih zona bilansiranja, koje su formiranje u ovom slučaju, iznose:

$$C_{pretraga}^{OZB} = m \frac{L_{OZB}}{2 \cdot v_{pretraga}} \cdot Nr \cdot P \cdot Ft + cR \cdot L_{OZB} \cdot F_o \cdot \frac{(T_{svjesnosti} + T_{lociraja} + T_{popravke})}{2} = 44.166€$$

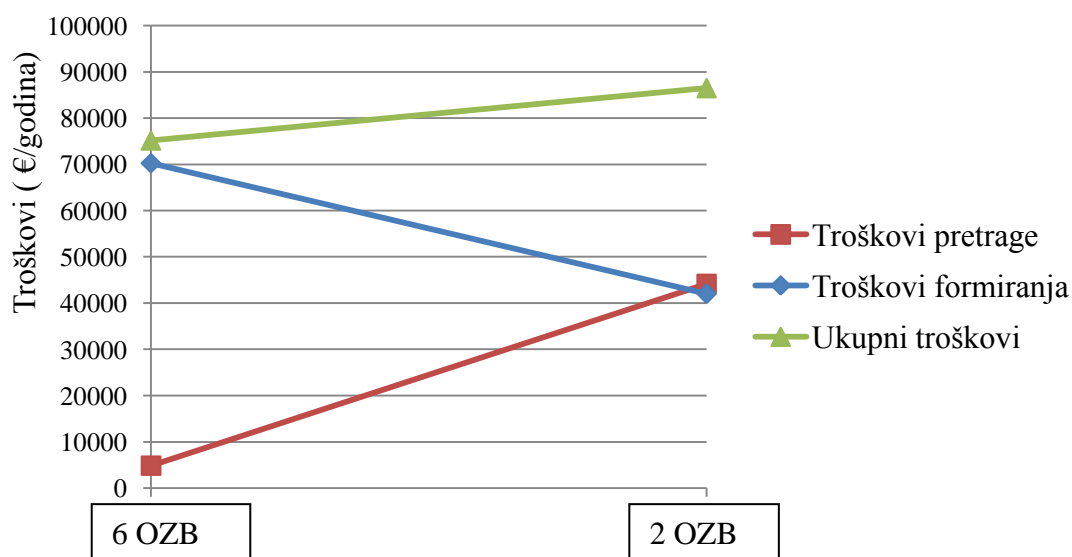
### ***Analiza troškova u funkciji od veličine OZB za dati primjer***

U tabeli 5.1., dati su uporedo troškovi pretrage i formiranja zona u oba slučaja, na godišnjem nivou.

*Tabela 5.1 Analiza godišnjih troškova u zavisnosti od broja OZB*

	<i>Troškovi formiranja</i> €	<i>Troškovi pretrage</i> €	<i>Ukupni troškovi</i> €
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A+B</i>
6 OZB	70.250	4.900	75.150
2 OZB	42.000	44.166	86.466

Ovom analizom se pokazalo da je optimalnije rješenje podjela ovog dijela sistema na manje zone. Time se smanjuju znatno troškovi pretrage sistema. Osim toga, u slučaju manjih zona, na dijagramu noćne potrošnje lakše se evidentira pojava pukotine.

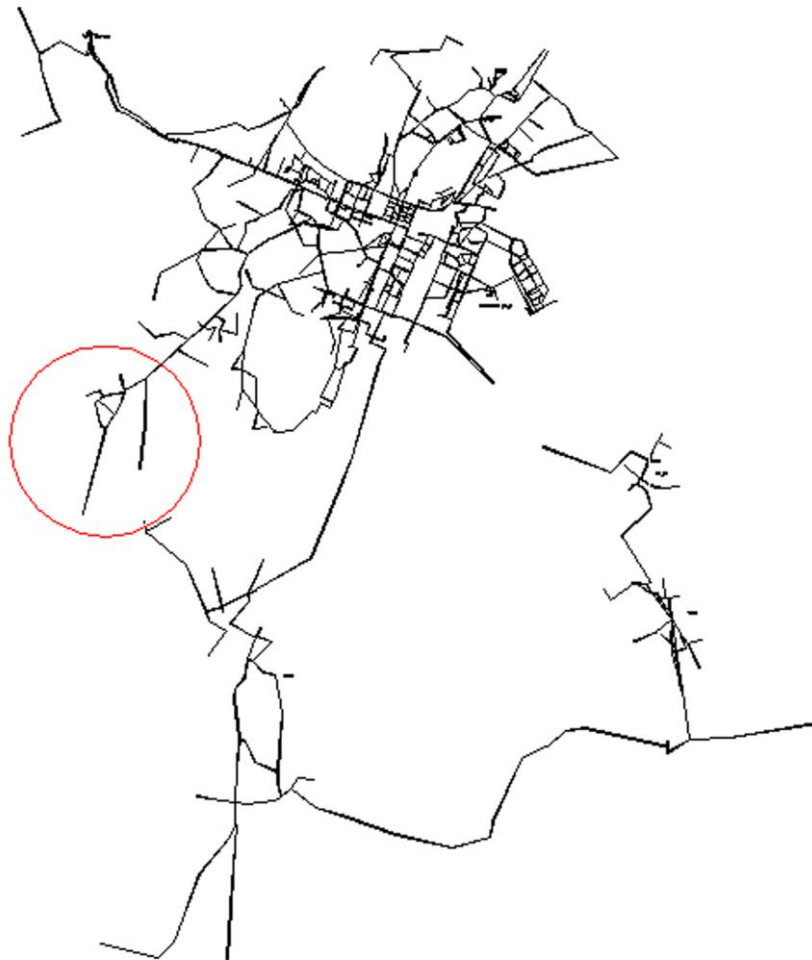


Slika 5.17 Godišnji troškovi u zavisnosti od broja OZB

## 5.2.2 UPRAVLJANJE GUBICIMA U ZONI SA VISOKIM PRITISCIMA

Na slici 5.18 prikazana je oblast sa pritiscima u opsegu 4,4÷6,8. Prosječna gustina priključaka u toj oblasti iznosi oko 150 priključaka/km. Ukupna dužina cjevovoda u toj oblasti iznosi 4 km, prečnici se kreću u opsegu 50÷250mm.

Kako je ukupan broj priključaka u ovoj oblasti 600, to se cijela zona može smatrati kao jedna OZB, bez potrebe za usitnjavanjem na manje zone. Ova oblast je izabrana za analizu troškova, da bi se pokazala efikasnost redukcije pritiska kao mjere smanjenja gubitaka.



Slika 5.18 Šema sistema sa prikazanom oblasti u koj su visoki pritisci

Prema jednačini 3.2:

$$L_1 = L_0 \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^N$$

računato je smanjenje gubitaka u funkciji smanjenja pritiska.

Usvojen je eksponet  $N=1$ , a odnos pritiska nakon i prije redukcije je  $P_1/P_0=0,5$ .

Prema tome smanjenje gubitaka u ovom slučaju iznosi:

$$\frac{L_1}{L_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^N = 0,5$$

Udio gubitaka u ukupnoj potrošnji ovog dijela sistema, nakon redukcije pritiska, iznosi:

$$\frac{G_{\text{poslijeredukcije}}}{P_{\text{ukupna}}} = 22,5\% .$$

Smanjenjem pritiska u ovom dijelu sistema smanjuje se i frekvenija pojave novih pukotina na cijevima, prema jednačini 3.40:

$$\frac{BF_1}{BF_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{N1}$$

#### Analiza troškova i dobiti za dati slučaj

- *Troškovi instalacije reducira pritiska i mjerača protoka*

Zbog konfiguracije zone, za potrebu redukcije pritiska u ovoj zoni je planirana ugradnja jednog reducira pritiska, na ulazu u zonu. Takođe je potrebno ugraditi i mjerač protoka radi evidentiranja pukotina unutar posmatrane zone.

Godišnji troškovi instalacije reducira pritiska i mjerača protoka iznose:

$$C_{\text{form}}^{\text{god}} = 4500 \frac{0,05(1+0,05)^5}{(1+0,05)^5 - 1} = 1.040\text{€}$$

- *Troškovi pretrage*

Nakon redukcije pritiska gubici vode su se znatno smanjili. Kako je potrebno nastaviti sa pravilnim upravljanjem gubicima, to je neophodno vršiti pretragu sistema nakon evidentiranja pukotine unutar zone.

Troškovi pretrage ove zone, čija je dužina ukupna dužina cijevi 4 km, računati su prema jednačini 4.3, i iznose:

$$C_{\text{pretraga}}^{\text{OZB}} = m \frac{L_{\text{OZB}}}{2 \cdot v_{\text{pretraga}}} N r \cdot P \cdot F_t + c R L_{\text{OZB}} F_o \frac{(T_{\text{svjesnosti}} + T_{\text{lociraja}} + T_{\text{popravke}})}{2} = 1.510\text{€}$$

- *Dobit od redukcije pritiska*

Smanjenje gubitaka na dnevnom nivou, u iznosu od  $\Delta V=583\text{m}^3$  vode se ostvarilo uvođenjem reducira pritiska.

Imajući u vidu cijenu vode od  $0,5 \text{ €/m}^3$ , ušteda vodovodnog sistema na godišnjem nivou iznosi:

$$D_{god} = 0,5 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 583\text{m}^3 \cdot 365 = 106.398\text{€}$$

- *Ukupna dobit*

Ukupna dobit, na period od 5 godina, dobija se kada se od dobiti nastale redukcijom pritiska oduzmu troškovi instalacije reducira pritiska, mjerača protoka i troškovi pretrage cijelog sistema. Prema tome dobit iznosi:

$$D_{god}^{ukupno} = 5 \cdot (106.398 - 1.510 - 1.040) = 519.240\text{€}$$

Ova oblast vodovodnog sistema grada Podgorice je izabrana za analizu, da bi se pokazano koliko je redukcija pritisaka efikasna mjera u borbi protiv gubitaka. Naravno, ova metoda je primjenljiva samo u sistemima sa visokim pritiscima. Ipak, nakon dovođenja sistema u stanje sa nižim pritiscima, potrebno je i dalje održavati i/ili smanjivati nivo gubitaka.

### **5.3 KOMENTAR DOBIJENIH REZULTATA I PRIJEDLOG MJERA**

Kako je vodovodni sistem grada Podgorice raznolik, kada su u pitanju vrijednosti pritiska, to je za primjenu predložene metodologije odabrana jedna oblast za niskim pritiscima, i jedna sa visokim. Analizom ova dva različita slučaja, jasno se vide razlike u konceptu upravljanja gubicima, iako je nivo gubitaka visok u obje oblasti.

Konfiguracija dijela sistema sa nižim pritiscima (varijacija pritiska u toku dana je u opsegu 2÷4,2bara), obrađenog u ovom poglavlju, i stanje u njemu je takvo da nije bilo mjesta za redukciju pritiska kao mjeru upravljanja gubicima. Shodno tome, u skladu sa definisanom metodologijom, izvršena je podjela sistema na OZB iz razloga efikasnijeg održavanja i upravljanja sistemom, što podrazumjeva lociranje i sanaciju postojećih pukotina i spriječavanje eventualne pojave novih pukotina u sistemu. OZB su formirane radi praćenja bilansa vode unutar njih, pomoću ugrađenih mjerača protoka. Praćenjem bilansa za svaku OZB, u toku vremena, se ocjenjuje kvalitet upravljanja i održavanja OZB. Sprovedenjem mjera smanjenja gubitaka, na način kako je opisano u ovom slučaju, tj. pretragom sistema i otkrivanjem i saniranjem pukotina u znatnoj mjeri bi se smanjili gubici u ovom dijelu vodovodne mreže grada Podgorice. Imajuću u vidu preporučenu veličinu OZB, u opsegu 500÷3000 priključaka, razmatrani dio sistema je podijeljen na dva načina. U prvom slučaju je podijeljen na 2 OZB, a u drugom na 6 OZB. Analiza troškova formiranja i pretrage OZB, je pokazala da je isplativije rješenje podjela na 6 zone, zbog manjih ukupnih troškova svedenih na godišnji nivo. Iz analize troškova se isto zaključuje da je udio troškova pretrage u slučaju većih zona, zanemarljiv u ukupnim troškovima, tj dominiraju troškovi formiranja zona. Pretraga OZB (koja definiše troškove pretrage), bi dala rezultate u cilju smanjenja gubitaka, prvenstveno zbog otkrivanja neprijavljenog curenja. Instaliranjem novih mjerača

protoka i njihovom implementacijom u već postojeći SCADA sistem vodovodnog sistema grada Podgorice, bilo bi omogućeno praćenje promjena koje nastaju kao posljedica sanacije pukotina. Pravilnim praćenjem i upravljanjem sistemom, nakog podjele na OZB, iz godine u godinu gubici bi se smanjivali, i investicija podjele na OZB bi bila opravdana.

Druga razmatrana zona vodovodnog sistema grada Podgorice je zona sa visokim pritiscima. Pritisci u toku dana variraju u opsegu 4,4÷6,8bara. Blizina pumpne stanice glavnog izvorišta grada je glavni razlog tako visokih pritisaka. Na ovom slučaju je dokazano koliko je mjera smanjenja pritisaka u sistemu efikasna mjera u borbi protiv gubitaka. Kao takva, ova mjera se obično sprovodi prva. Nakon dovođenja pritisaka na prihvatljiv nivo, nikako se ne treba zaustaviti u borbi protiv gubitaka. Tada je potrebno razviti startegiju upravljanja gubicima, a to podrazumjeva praćenje bilansa potrošnje unutar zone i analizu dijagrama noćne potrošnje radi bržeg lociranja pukotine. Rezultati ovoga primjera su dokaz dosadašnjih iskustava, koja se nalaze u pregledu literature, kojim se potvrđuje opravdanost mjere smanjenja gubitaka, prije svega redukcijom pritisaka.

# 6

## ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Cilj istraživanja ove disertacije je definisanje opšte metodologije za izbor optimalne veličine osnovne zone bilansiranja (OZB), primjenljive na sve vodovodne sisteme. Razvijena metodologija se bazično oslanja na određivanje ekonomske dobiti nastale nakon podjele sistema na OZB, na adekvatan način po predloženom modelu u ovom radu. Ekonomske dobiti se ostvaruju od dobiti od redukcije pritisaka i od pretrage i formiranja osnovnih zona bilansiranja različitih veličina. Promjenom veličine OZB, na koje je vodovodni sistem izdijeljen, mijenjaju se i dobiti koji prate tu podjelu. Minimalni ukupni trošak, odnosno najveća dobit, svedeni na godišnji nivo, određuju optimalnu veličinu OZB za dati vodovodni sistem.



U okviru teze definisana metodologija je primjenjena na tri različita vodovodna sistema. Birani su sistemi različitih veličina, struktura i karakteristika, da bi se pokazala opšta primljenljivost metodologije. Promjenom veličine OZB, za različite vodovodne sisteme dobijeni su različiti rezultati.

1. Najprije je metodologija primjenjena na teorijskoj šemi vodovodnog sistema (poglavlje 4.2). Glavna dobit u ovakvom sistemu se ostvaruje redukcijom pritisaka. Primjer je karakterističan iz razloga visokih pritisaka u sistemu, i poslužio je da se pokaže koliko je mjera smanjenja pritisaka u sistemu efikasna mjera. Kao takva, ova mjera se obično sprovodi prva. Nakon dovođenja pritisaka na prihvatljiv nivo, nikako se ne treba zaustaviti u borbi protiv gubitaka. Tada je potrebno razviti strategiju upravljanja gubicima, a to podrazumjeva podjelu sistema na zone radi lakšeg praćenja promjene noćne potrošnje i radi bržeg lociranja pukotine. Za razne scenarije podjele sistema na zone, računati su odgovarajući troškovi pretrage i formiranja OZB, i u skladu sa tim izabrano je rješenje sa minimalnim troškovima kao optimalno.
2. U nastavku je, kroz predloženu metodologiju, izvršena podjela vodovodnog sistema, čija mreža odgovara mreži glavnog distributivnog sistema grada Ferrara, Italija (poglavlje 4.3). Ovaj sistem je izabran radi prikaza upravljanja sistemom, koji već ima regulisane pritiske, a ipak veliki gubici u sistemu postoje. Nakon podjele sistema na OZB usvojenom metodologijom, analiza pritisaka koji se javljaju u takvom sistemu, je pokazala da nema mjesta za mjeru smanjenja gubitaka redukcijom pritisaka u mreži, jer je novonastala konfiguracija sistema takva, da bi redukcija pritiska onemogućila uredno snabdijevanje vodom svih potrošača. Ipak, OZB su formirane radi praćenja bilansa vode unutar njih, pomoću mjerača protoka. Praćenjem bilansa u toku vremena se ocjenjuje kvalitet upravljanja OZB. Analiza troškova je pokazala da je skuplje rješenje podjela sistema na manje zone. Ali, ako bi se pravilnim upravljanjem gubicima u tako izdijeljenom sistemu, smanjili gubici makar 2%, moglo bi se reći da je investicija podjele na manje OZB opravdano rješenje. Iako

je skuplje, ovo rješenje sa sobom nosi određene prednosti u odnosu na podjelu sistema na veće zona. Prva prednost je što su troškovi pretrage ovako malih zona zanemarljivo mali u odnosu na investiciju formiranja zona. Osim toga, u manjoj zoni je lakše evidentirati pojavu pukotine.

3. Kao posljednji primjer za verifikaciju predložene metodologije odabran je vodovodni sistem grada Podgorice, zbog mogućnosti kontrole efekata podjele na OZB, jer je u njemu integrisan automatizovani sistem za mjerenje, praćenje i kontrolu (SCADA). Pomoću raspoloživih podataka o pritiscima i protocima, preuzetih iz implementiranog sistema, u programskom paketu "Epanet" je modelirana vodovodne mreža, koja odgovara realnom stanju sistema. Na takvom hidrauličkom modelu je primjenjena predložena metodologija. Vodovodni sistem grada Podgorice odlikuje se razlikama u pritisku. Za analizu su odabrani dijelovi sistema sa niskim pritiscima, a zatim sa visokim. U prvom slučaju redukcija pritisaka, kao mjera smanjenja gubitaka, nije mogla biti primjenjena na novonastali sistem, jer su pritisci u takvim granicama vrijednosti, da bi njihova redukcija ugrozila uredno snabdijevanje potrošača. Shodno tome, u ukupnoj ekonomskoj analizi nije ušla dobit od redukcije pritiska, već dobit koja nastaje od pretrage OZB. Praćenjem bilansa, pomoću mjerača protoka bi se u toku vremena ocjenjio kvalitet upravljanja gubicima unutar svake od OZB. Analiza troškova formiranja i pretrage je pokazala da je isplativije rješenje podjela na manje OZB, zbog manjih ukupnih troškova svedenih na godišnji nivo. U drugom slučaju je dokazano koliko je mjera smanjenja pritisaka u sistemu efikasna mjera u borbi protiv gubitaka.

Da se zaključiti da za razne konfiguracije vodovodnih sistema, primjena ove metodologije daje različita rješenja. Svaki vodovodni sistem je jedinstven, prema tome primjenjena metodologija za razne sisteme daje i različite optimalne veličine OZB. Metodologija je primjenljiva na sve konfiguracije sistema. Zbog kompleksnosti prirode gubitaka u vodovodnim sistemima, za sada nema univerzalno prihvaćene metodologije i lako raspoloživih modela, koji su široko prihvaćeni i koji se mogu jednostavno koristiti

u procesu formiranja OZB. Naime, kao što je u disertaciji navedeno, faktori koji utiču na proces formiranja su različite prirode.

Rezultati, dobijeni u okviru ove disertacije, imaju naučni doprinos, u smislu da je formiran model za sveobuhvatnu analizu mnogobrojnih faktora, koji utiču na smanjenje gubitaka u vodovodnom sistemu. Analizirani su faktori koji utiču na bazne gubitke i faktori koji utiču na gubitke iz pukotina, tako da definisani model obuhvata upravljanje svim gubicima u sistemu, kako baznim, tako i gubicima iz pukotina.

Na osnovu rezultata primjene metodologije za izbor optimalne veličine OZB, koji su prikazani u ovoj disertaciji, formirani model može da ima široku primjenu u stručnoj praksi. Npr. primjena formiranog modela na vodovodni sistem grada Podgorice, uz pravilno praćenje i upravljanje novonastalim sistemom, uz pomoć postojećeg SCADA sistema, bi dala rezultate u cilju smanjenja gubitaka, prvenstveno zbog otkrivanja neprijavljenog curenja.

Preporuke za dalja istraživanja:

1. Razvoj algoritma kojim bi bilo omogućeno implementiranje definisane metodologije u neki od programskih paketa, koji tretiraju hidraulički model mreže;
2. U okviru definisane metodologije, u segmentu redukcije pritiska primjeniti neki od postojećih algoritama, ili razviti novi, za određivanje optimalnog rasporeda reducira pritiska;
3. Modeliranje gubitaka u vodovodnim sistemima je razvijeno kroz dosta modela. Ipak, potrebno je upotpuniti postojeće modele parametrima koji do sad nijesu bili obuhvaćeni programima za modeliranje gubitaka. Jedan od tih parametara je uticaj tla na gubitke u vodovodnim sistemima.

4. Razvoj modela za analizu dobiti od redukcije pritiska. Osim dobiti od smanjenja procurivanja (koja je uzimana u obzir u ovoj disertaciji), u analizi dobiti od redukcije pritiska mogu da uđu i dobiti od: smanjenja učestanosti pojave novih pukotina, smanjenja utrošene energije u vodovodnom sistemu... ;
  
5. Razvoj ekonomskih modela za sveobuhvatnije praćenje ekonomskih faktora, koji prate podjelu sistema na OZB.

## **LITERATURA:**

1. Alegre et al, Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Performance Measures, IWA Manual of Best Practice, 2000.
2. Awad H., Kapelan Z., Savić D., Analysis of Pressure Management Economics in Water Distribution Systems, Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA 2008, August 17-20, Kruger National Park, South Africa, 2008.
3. AWWA (American Water Works Association), Water Audits and Loss Control Programs, 3rd Ed. (Manual of Water Supply Practice M-36). Denver, CO: American Water Works Association, 2009.
4. Babić B., Đukić A., Stanić M., Managing water pressure for water savings in developing countries, Water SA, Vol 40, No 2, 2014.
5. Babić B., doktorska disertacija, Unapredjenje metodologije za vrednovanje i poboljšanje performansi vodovodnih sistema, Beograd, 2014.
6. Bessey S. G. , Some developments in pressure reduction, J. Inst. Water Engl: Sci., 39(6), 501-505., 1985.
7. Bessey, S. G. et al. , Managing Leakage, UK Water Industry, Water Research Centre, Marlow, Engleska, 1994.
8. Bessey S.G., Water savings from flow modulated pressure control, Best practice programme, Department of Energy, UK, 1990.
9. Bourblanc M., Social participation in water governance and management: critical and global perspectives, Int J Water Resour Dev 26(4):709–713, 2010.
10. Bradley J., Mevissen M., Valve Placement in Water Networks: Mixed-Integer Non-Linear Optimization with Quadratic Pipe Friction, 2012.

11. Bragalli C., Sacchi S., Burst frequency and leakage related to pressure control in water distribution network, Leakage Management – IWA Conference, Cyprus 20 – 22 November 2002. IWA Specialised Conference, Leakage Management, Conference Proceedings, ISBN 9963875904, Cyprus, November 2002.
12. Branisavljević N., Čipranic I., Prodanović D., Ivetić D., Softverska podrška određivanju osnovnih zona bilansiranja vodovodnih mreža. Zbornik radova sa 14. međunarodne konferencije „Vodovodni i kanalizacioni sistemi“, Jahorina, 2014.
13. Butler David, Leakage Detection and Management, Halma Water Management, 2009.
14. Cassa, A.M., Van Zyl J.E., Predicting the leakage exponents of elastically deforming cracks in pipes, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013, 2014.
15. Cesario, L. Modeling, analysis an design of water distribution systems, AWWA, Denver, USA, 1995.
16. Čipranic I., Sekulić G., The Analysis of the Influence of Soil on Leakage in Water Supply Systems, The Journal Tehnički vjesnik/Technical Gazette, Print: ISSN 1330-3651, Online: ISSN 1848-6339, 2015.
17. Covas D. I. C., Jacob A. C., Ramos H. M., Water Losses' Assessment in an Urban Water Network, IWA World Water Congress held in Vienna, doi:10.2166/wpt.2008.061, 2008.
18. Covas D., Jacob A. , Ramos H., Bottom-Up Analysis For Assessing Water Losses: A Case Study, 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30, 2006.
19. Creaco E., Franchini M., Alvisi S., Optimal Placement of Isolation Valves in Water Distribution Systems Based on Valve Cost and Weighted Average Demand Shortfall, Water Resour Manage, 2010.
20. EPA, Leakage Management Technologies, 2007.

21. Fahid K. Rabah, Amjad E. Jarada, Leakage control and hydraulic modeling for intermittent water supply systems – Gaza city case study, the 4th International Engineering Conference (IEC4) "Towards the Engineering of the Twenty First Century", Faculty of Engineering - Islamic University, Gaza, Palestine, 15 – 16 October, 2012.
22. Fanner P., Assessing Real Water Losses: a practical approach. *Water* 21, 2004.
23. Fanner P., Sturm R., Thornton J., Liemberger R., Davis S., Hoogerwerf T., Leakage Management Technologies, Awwa Research Foundation, 2007.
24. Fantozzi M., Lambert A., Including the Effects of Pressure Management in Calculations of Short-Run Economic Leakage Levels, IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007', Conference Proceedings (3 vols) ISBN 978-973-7681-24-9; Session C1 of Volume 1, Bucharest, September 2007.
25. Fantozzi M., Lambert A., Recent developments in predicting the benefits and payback periods of introducing different pressure management options into a Zone or small distribution system IWA Conference 'Water Loss Management 2008', Skopje (FYROM), June 2008.
26. Farley M., Are There Alternatives to the DMA?, *Asian Water*, 2010.
27. Farley M., Liemberger R., Developing a Non-Revenue Water Reduction Strategy, Part2: Planning and Implementing the Strategy
28. Farley M., Trow S., Losses in Water Distribution Networks , A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control, London, IWA, 2003.
29. Farley Malcolm, Leakage Management and Control - A Best Practice Training Manual, WHO, 2001.
30. Girard M., Stewart R.A., Implementation of pressure and leakage management strategies on the gold coast, Australia: Case study, *Journal of Water Resources Planning and Management*. 133 (3): 210-217., 2007.
31. Gomes R., Marques A., Sousa J., District Metered Areas Design Under Different DecisionMakers' Options: Cost Analysis, *Water Resour Manage*, DOI 10.1007/s11269-013-0424-y, 2013.

32. Gomes R., Sousa J., Sá Marques A., Influence of Future Water Demand Patterns on the District Metered Areas Design and Benefits Yielded by Pressure Management, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI, 2013.
33. Hamilton S., Charalambous B., Leak Detection, Tehnology and Implementation, IWA Publising, 2013.
34. Hamilton Stuart, Active leakage control in low pressure situations, AWW Magazine, April 2009.
35. Hunaidi O., Acoustic Leak Detection Survey Strategies for Water Distribution Pipes, Construction Technology Update No.79, May 2012.
36. Hunaidi, O. Brothers, K., Optimum size of district metered areas, Water Loss 2007, Bucharest, Romania, Sept. 23-26, 2007.
37. Iličić Kristijan, Kovač Jurica, Systematic Approach in Analysis of Pressure/Burst Frequency relationship, the 5<sup>th</sup> Conference IWA Water loss Reduction Specialist Conference, Južna Afrika, April 2009.
38. Ivetić D., Stanić M., Vasilić Ž., Prodanović D., Algoritam za segmentaciju vodovodne mreže pomoću postojećih izolacionih zatvarača, 2014.
39. Ivetić M., Prodanović D., Janković, Lj., Osnovne zone bilansiranja-upustvo, Beograd, 2008.
40. Ivetic M., privatna komunikacija, 2015.
41. Ivetić D., Stanić M., Vasilić Ž., Prodanović D., Podela vodovodne mreže na osnovne zone bilansiranja korišćenjem topoloških matrica povezanosti. Zbornik radova sa 14. međunarodne konferencije „Vodovodni i kanalizacioni sistemi“, Jahorina, 2014.
42. Ivetić M., Računska hidraulika- tečenje u cevima, Beograd, 1996.
43. IWA, District Metered Areas, Guidance Notes, 2007.
44. Jeffcoate Philip, Saravanapavan Arumukham, The Reduction and Control of Unaccounted-for Water Working Guidelines, World Bank Technical Paper Number 72, 1987.



45. Kapelan Zoran, Savić Dragan, Giustolisi Orazio, Berardi Luigi, Razvoj matematičkih modela za predviđanje broja kvarova na vodovodnim i kanalizacionim cevima upotrebom EPR-a, 14 Savetovanje SDHI, Fruška Gora, Srbija, nov. 2006.
46. Kingdom Bill, Liemberger Roland, Marin Philippe, The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries & How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting, Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series, Paper No. 8, 2006.
47. Kirmeyer G.J., Richards W., Smith C.D., An assessment of water distribution systems and associated research needs. Denver, CO: AWWA Research Foundation: Distribution Systems, 1994.
48. Kwan S.Y., Shou S., Kimshaiyong T., Sathiasothy S., Chan K., Pressure Management – A Strategic Measure to Reduce Non-Revenue Water in Hong Kong, Water Practice & Technology, IWA Publishing, doi:10.2166/wpt.2009.065, 2009.
49. Lambert A, Fantozzi M., Recent Developments in Pressure Management, 2013.
50. Lambert A., Lalonde, Using practical predictions of economic intervention frequency to calculate short-run economic leakage level, with or without pressure management, Proc. Of IWA Specialised Conference Leakage, Halifax, 2005.
51. Lambert A., What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems?, IWA Conference 'System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management' in Brno, Czech Republic, May 2000.
52. Lambert A., Thornton J., Pressure: Bursts Relationships: Influence of Pipe Materials, Validation of Scheme Results, and Implications of Extended Asset Life, Water Loss Conference, 2012.
53. Lambert A.O., Accounting for Losses – the Bursts and Background Estimates Concepts, Journal of the Institution of Water and Environmental Management, Volume 8 (2), pp 205-214., 1994.

54. Liemberger R., Farley M., Developing a Non-Revenue Water Reduction strategy, Asian Water, 2004.
55. MacDonald G., Yates C.Y., DMA Design and Implementation, a North American Context, Leakage Conference, 2005.
56. Macke Steffen, Battermann Arne, A Strategy to Reduce Technical Water Losses for Intermittent Water Supply Systems, 2001.
57. Monografija vodovoda grada Podgorice, 2013.
58. Morrison J., Tooms S., Sustainable DMA Management to Monitor and Reduce Leakage, Water21 (Issue 9.2) pp31-32, IWA Publishing, 2007.
59. Obradović D. i P. B. Lonsdale, Public Water Supply: Models, Data and Operational Management, E & FN Spon, London, Engleska, 1998.
60. Obradović D., Kontrola gubitaka u vodovodnim sistemima, saopštenje na savetovanju "Savremeni vodovodi, informatika i operativno upravljanje", Beograd 16.-17. novembra 1999, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, 1999.
61. Obradović D., Kontrola gubitaka vode pomoću kontrolnih vodomera, Zbornik radova "Voda za 21. vek", 22.-24. mart 1999, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, str. 345-357, 1999.
62. Obradović D., Organizacija sistema merenja i upravljanja u savremenim vodovodnim sistemima, Voda i sanitarna tehnika, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, Br. 6, 1997, str. 5-25., 1997.
63. Obradović D., Savremena tehnologija i vodovodni sistemi – neka iskustva, Zbornik radova "Voda za 21. vek", 22.-24. mart 1999, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, str. 327-336., 1999.
64. Obradović D., Savremeni vodovodi, informatika i operativno upravljanje, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, 1999.
65. Pearson D., Trow S.W., Calculating Economic Levels of Leakage, 2005.

66. Petrović N., Kapor R., Pop Trajković V., Smanjenje gubitaka u vodovodnoj mreži na osnovu merenja proteklih zapremina i pritisaka, Savjetovanje: Vodovod i kanalizacija '95, Bar, Crna Gora, 1995.
67. Pilcher R., Hamilton S., Chapman H., Filed D., Ristovski B., Stapely S., Leak Location & Repair Guidance Notes, 2007.
68. Pilcher R., The benefits of effective maintenance and improvement of District Meter Areas
69. Prabhata K. Swamee, Ashok K. Sharma, Design of Water Supply Pipe Networks, ISBN-10: 0470178523 | ISBN-13: 978-0470178522 | Publication Date: February 8, 2008.
70. Priscoli J.D., What is public participation in water resources management and why is it important?, *Water, Int* 29(2):21–227, 2004.
71. Puust R., Kapelan Z., Savic D.A., Koppelt., A Review of Methods for Leakage Management in Pipe Networks, *Urban Water Journal*, 7:1, 25-45, 2009.
72. Radivojević D., doktorska disertacija, Tehnički pokazatelji za ocenu stanja i predlog mera za unapređenje uspešnosti funkcionisanja manjih vodovodnih sistema u Republici Srbiji, Univerzitet u Nišu, 2013.
73. Radivojević D., Milićević D., Petrović N., Technical Performance Indicators, IWA Best Practise for Water Mains and the First Steps in Serbia, *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering Vol. 5, No 2*, 2007.
74. Sashikumar N., Mohankumar M. S., Sridharan K., Modelling an Intermittent Water Supply, *World Water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia*, 2003.
75. Schmid R., Review of Modeling Software for Piped Distribution Networks, Skat Foundation, 2002.
76. Sekulić G., Ćipranić I., Komunalna hidrotehnika-teorijske osnove i rješeni primjeri, 2013.
77. Sekulić G., doktorska disertacija, Primena pumpnih stanica za usputno povećanje pritiska u vodovodnim sistemima, Beograd, 2003.

78. Sekulić G., Čipranić I., Problematika modeliranja gubitaka u vodovodnim sistemima, 14. Savetovanje SDHI, Fruška Gora, Srbija, nov. 2006.
79. Skworcow P., Hossam AbdelMeguid, Ulanicki B., Bounds P., Optimal pump scheduling with pressure control aspects: case studies, Integrating Water Systems: Proceedings of the Tenth International Conference on Computing and Control in the Water Industry, Ed., Joby Boxall, Čedo Maksimović, University of Sheffield, UK, Sept. 2009.
80. Stephen M., Economics of Distribution System Management, Fifteenth Meeting of the Urban Think Tank, 2003.
81. Thiemann R., Henessy S., Practical Steps to Reduce Apparent Water Losses. Opflow May 2005.
82. Thornton, J., Water Loss Control Manual. ISBN 0071374345, McGraw Hill, New York, USA, 2002.
83. Thornton J., Lambert A., Managing Pressures to Reduce New Break, Water21, December, 2006.
84. Thornton J., Lambert A., Pressure Management Extends Infrastructure Life and Reduces Unnecessary Energy Costs, IWA Special Conference 'Water Loss 2007', Bucharest, Romania, 23-27, September 2007.
85. Thornton J., Managing Leakage by Managing Pressure, IWA Water Loss Task Force, Water 21, 2003.
86. Thornton, J., Sturm, R., Kunkel, G., Water Loss Control Manual (2nd Edition), McGraw-Hill, 2008.
87. Tortajada C., Joshi Y.K, Water Demand Management in Singapore: Involving the Public, Water Resources Management An International Journal – Published for the European Water Resources Association (EWRA), ISSN 0920-4741, Water Resour Manage, DOI 10.1007/s11269-013-0312-5, 2012.
88. Ulanicki B., AbdelMeguid H., Bounds P. and Patel R., Pressure Control in District Metering Areas with Boundary and Internal Pressure Reducing Valves, 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA, 2008.

89. Ulanicki B., Bounds P.L.M., Rance J.P., Reynolds L.: Open and closed loop pressure control for leakage reduction. *Urban Water*, Volume 2, Issue 2, 105-114. DOI:10.1016/S1462-0758(00)00048-0, 2000.
90. Vairavamoorthy, K., Lumbers, J., Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control, *Journal Of Hydraulic Engineering*, 124(11), 1146–1154, 1998.
91. Walski T., Bezts W., Posluszny E., Weir M., Whitman B., Modeling Leakage Reduction Through Pressure Control, *American Water Works Asociaton*, 2006.
92. Walski T., Kaufman D., Gangemi A., Malos W., Establishing a System Submetering Project, *American Water Works Association, Annual Conference Proceedings*, 2001.
93. Water Authorities Association, Water Research Centre, Leakage Control Policy and Practice, 1985.
94. Water Loss Group: IWA Task Force: Best Practice Performance Indicators for Non Revenue Water and Water Loss Components: A Practical Approach, *Proceedings of IWA Conference 'Leakage Management: A Practical Approach'*, Halifax, Canada, 2005.

## **SPISAK SLIKA**

<b>Slika 2.1</b>	<i>Prikaz zoniranja sistema</i>	10
<b>Slika 3.1</b>	<i>Promjena protoka, pritiska i gubitaka u vodovodnoj mreži</i>	19
<b>Slika 3.2</b>	<i>Prikaz kretanja vode kroz zemljište</i>	22
<b>Slika 3.3</b>	<i>Prikaz instalacije eksperimenta</i>	22
<b>Slika 3.4</b>	<i>Dijagram zavisnosti eksponenta <math>N</math> i OS broja</i>	26
<b>Slika 3.5</b>	<i>Zavisnost OS broja od koeficijenta filtracije okolnog zemljišta i veličine pukotina na cijevima, za variran pritisak u sistemu</i>	28
<b>Slika 3.6</b>	<i>Uticaj promjene pritiska na smanjenje curenja usljed filtracije kroz zemljište</i>	31
<b>Slika 3.7</b>	<i>Šema modela za optimalnu kontrolu pritiska</i>	35
<b>Slika 3.8</b>	<i>Frekvencija pojave pukotina u zavisnosti od prosječnog pritiska u mreži, u većem vodovodnom sistemu u Velsu</i>	44
<b>Slika 4.1</b>	<i>Šema upravljanja gubicima od zavisnosti od tipa gubitka</i>	58
<b>Slika 4.2</b>	<i>Šema čvora koji predstavlja “ponor” u vodovodnom sistemu</i>	59
<b>Slika 4.3</b>	<i>Šema predložene metodologije</i>	61
<b>Slika 4.4</b>	<i>Zamjena pukotina u modelu fiktivnim regulacionim ventilom</i>	62

<i>Slika 4.5</i>	<i>Šema vodovodne mreže sa oznakama čvorova i veza</i>	64
<i>Slika 4.6</i>	<i>Godišnji troškovi pretrage u funkciji od dužine cijevi unutar zone</i>	73
<i>Slika 4.7</i>	<i>Zone sa upisanim vrijednostima pritiska u sistemu</i>	74
<i>Slika 4.8.</i>	<i>Položaj reducira pritiska u sistemu</i>	75
<i>Slika 4.9</i>	<i>Pritisak u čvoru 32: a) prije redukcije pritiska, b) nakon redukcije</i>	76
<i>Slika 4.10</i>	<i>Šema vodovodne mreže sa dvije OZB</i>	80
<i>Slika 4.11</i>	<i>Šema vodovodne mreže sa četiri OZB</i>	83
<i>Slika 4.12</i>	<i>a)Troškovi i dobiti za opisane slučajeve 1.,2. i 3.; b) zavisnost troškova formiranja i održavanja od broja OZB u jednom sistemu</i>	86
<i>Slika 4.13</i>	<i>Šema vodovodne mreže</i>	88
<i>Slika 4.14</i>	<i>Šema vodovodne mreže (sa gubicima) sa podacima o pritiscima u čvorovima (m) i protocima kroz cijevi u satu maksimalne potrošnje(l/s)</i>	94
<i>Slika 4.15</i>	<i>Šema vodovodne mreže sa 37OZB</i>	96
<i>Slika 4.16</i>	<i>Šema vodovodne mreže sa 37OZB u satu maksimalne potrošnje,sa podacima o pritiscima u čvorovima (m) i protocima u cijevima (l/s)</i>	97
<i>Slika 4.17</i>	<i>Šema vodovodne mreže sa13OZB</i>	101

<b>Slika 4.18</b>	<i>Šema vodovodne mreže sa 13 OZB u satu maksimalne potrošnje, sa podacima o pritiscima u čvorovima (m) i protocima u cijevima (l/s)</i>	102
<b>Slika 4.19</b>	<i>Šema podjele čvora u modelu</i>	105
<b>Slika 4.20</b>	<i>Pritisци u čvorovima i protoci u cijevima, u satu maksimalne potrošnje, a) prije i b) poslije podjele sistema na zone</i>	106
<b>Slika 5.1</b>	<i>Šematski prikaz vodovodnog sistema grada Podgorice u SCADA sistemu</i>	113
<b>Slika 5.2</b>	<i>SCADA server</i>	113
<b>Slika 5.3</b>	<i>Glavna kontrolna soba</i>	114
<b>Slika 5.4</b>	<i>Mjerno mjesto</i>	115
<b>Slika 5.5</b>	<i>Mjerač pritiska</i>	115
<b>Slika 5.6</b>	<i>Šema sistema</i>	116
<b>Slika 5.7</b>	<i>Šema sistema za naznačenim oblastima koje su razmatrane u radu</i>	117
<b>Slika 5.8</b>	<i>Šema sistema sa naznačenim položajem mjernog mjesta F6</i>	119
<b>Slika 5.9</b>	<i>Promjena protoka u toku dana na mjernom mjestu F6-izmjereni podaci i podaci iz modela(prije korekcije)</i>	119



<i>Slika 5.10</i>	<i>Promjena protoka u toku dana na mjernom mjestu F6 -izmjereni podaci i podaci iz modela (nakon korekcije)</i>	<i>120</i>
<i>Slika 5.11</i>	<i>Šema sistema sa prikazanom oblasti koja je izdjeljena na OZB</i>	<i>120</i>
<i>Slika 5.12</i>	<i>Pritisci u sistemu u satu maksimalne potrošnje</i>	<i>123</i>
<i>Slika 5.13</i>	<i>Šema dijela vodovodne mreže sa 6 OZB</i>	<i>124</i>
<i>Slika 5.14</i>	<i>Šema dijela vodovodne mreže sa 6 OZB u satu maksimalne potrošnje, sa prikazanim zonama pritisaka</i>	<i>125</i>
<i>Slika 5.15</i>	<i>Šema dijela vodovodne mreže sa 2 OZB</i>	<i>126</i>
<i>Slika 5.16</i>	<i>Šema dijela vodovodne mreže sa 2 OZB u satu maksimalne potrošnje, sa prikazanim zonama pritisaka</i>	<i>127</i>
<i>Slika 5.17</i>	<i>Godišnji troškovi u zavisnosti od broja OZB</i>	<i>129</i>
<i>Slika 5.18</i>	<i>Šema sistema sa prikazanom oblasti u koj su visoki pritisci</i>	<i>130</i>

## **SPISAK TABELA**

<b>Tabela 1.1</b>	<i>IWA preporuka za sračunavanje bilansa vode</i>	3
<b>Tabela 1.2</b>	<i>Podaci iz nacionalnih izvještaja o odnosu NRW/SIV</i>	4
<b>Tabela 3.1</b>	<i>Veza OS i <math>K_{LS}</math></i>	29
<b>Tabela 4.1</b>	<i>Podaci o čvorovima</i>	65
<b>Tabela 4.2</b>	<i>Podaci o cijevima</i>	66
<b>Tabela 4.3</b>	<i>Potrošnja u sistemu u toku dana, kada nema gubitaka</i>	68
<b>Tabela 4.4</b>	<i>Potrošnja u sistemu u toku dana, kada postoje gubici 45%</i>	69
<b>Tabela 4.5</b>	<i>Analiza godišnjih troškova i dobiti u zavisnosti od veličine OZB</i>	87
<b>Tabela 4.6</b>	<i>Broj priključaka u pojedinim dionicama</i>	89
<b>Tabela 4.7</b>	<i>Podaci o čvorovima</i>	90
<b>Tabela 4.8</b>	<i>Podaci o cijevima</i>	91
<b>Tabela 4.9</b>	<i>Potrošnja u sistemu u toku dana, bez gubitaka</i>	92
<b>Tabela 4.10</b>	<i>Potrošnja u sistemu u toku dana, sa ostvarenim gubicima od 25.4%</i>	93

<b>Tabela 4.11</b>	<i>Dužine cijevi u pojedinim zonama, za slučaj podjele na 37 OZB</i>	99
<b>Tabela 4.12</b>	<i>Dužine cijevi u pojedinim zonama, za slučaj podjele na 13 OZB</i>	103
<b>Tabela 4.13</b>	<i>Analiza godišnjih troškova u f-ji od broja OZB</i>	104
<b>Tabela 5.1</b>	<i>Analiza godišnjih troškova u zavisnosti od broja OZB</i>	128

## **SPISAK OZNAKA**

<i>AKG</i>	<i>Aktivna kontrola gubitaka</i>
<i>AL</i>	<i>Apparent Losses</i>
<i>ALC</i>	<i>Active Leakage Control</i>
<i>BF<sub>0</sub></i>	<i>Frekvencija pojave pukotina prije redukcije pritiska</i>
<i>BF<sub>1</sub></i>	<i>Frekvencija pojave pukotina nakon redukcije pritiska</i>
<i>C<sub>d</sub></i>	<i>Koeficijent protoka</i>
<i>C<sub>gub</sub></i>	<i>Cijena vode koja je izgubljena usljed procurivanja</i>
<i>C<sub>pretraga</sub></i>	<i>Cijena pretrage sistema u cilju otkrivanja pukotina</i>
<i>C<sub>servis</sub></i>	<i>Cijena vode koja je izgubljena u toku saniranja pukotine</i>
<i>C<sub>pretraga</sub><sup>OZB</sup></i>	<i>Koštanje akustičke pretrage vodovodnog sistema</i>
<i>C<sub>min</sub><sup>god</sup></i>	<i>Minimalni godišnji troškovi</i>
<i>c<sub>i</sub></i>	<i>Jedinična cijena vode</i>
<i>CRF</i>	<i>Cost Recovery Factor</i>
<i>DMA</i>	<i>District Metering Area</i>
<i>FAVAD</i>	<i>Fixed and Variable Area Discharges</i>
<i>F<sub>o</sub></i>	<i>Učestalost neprijavljenih pukotina</i>
<i>I</i>	<i>Godišnja kamatna stopa</i>
<i>IWA</i>	<i>International Water Assotiation (Medunarodno udruženje za vode)</i>
<i>K</i>	<i>Koeficijent filtracije</i>
<i>k<sub>i</sub></i>	<i>Koeficijent gubitka</i>
<i>L<sub>0</sub></i>	<i>Početni protok na mjestu curenja</i>
<i>L<sub>1</sub></i>	<i>Korigovani protok na mjestu curenja</i>

$L_{OZB}$	<i>Dužina distributivnih cijevi u OZB</i>
$M$	<i>Broj godina</i>
$N$	<i>Eksponent kojim se definiše zavisnost pritiska i curenja</i>
$N_{OZB}$	<i>Broj OZB u sistemu</i>
$NRW$	<i>Non Revenue Water (Nenaplaćena voda)</i>
$OS$	<i>Orifice Soil Number</i>
$OZB$	<i>Osnovna zona bilansiranja</i>
$OFWAT$	<i>Office of Water Services</i>
$P_0$	<i>Početni pritisak na mjestu curenja</i>
$P_1$	<i>Korigovani pritisak na mjestu curenja</i>
$PMA$	<i>Pressure Management Areas</i>
$Q$	<i>Protok</i>
$SCADA$	<i>Supervisory Control And Data Acquisition (sistem za mjerenje, praćenje i kontrolu industrijskih sistema)</i>
$SIV$	<i>System Input Volume (Ukupna unijeta voda u sistem)</i>
$T_{lociranja}$	<i>Vrijeme lociranja pukotine</i>
$T_{svjesnosti}$	<i>Vrijeme svjesnosti</i>
$T_I^{optimum}$	<i>Optimalni period intervencije</i>
$UFW$	<i>Unaccounter for Water</i>
$v_{pretraga}$	<i>Brzina pretrage sistema</i>
$WL^{T1}$	<i>Gubitak vode koji se dešava u periodu, <math>T_1</math></i>
$WLTF$	<i>Water Loss Task Force</i>

## Biografija autora

Ivana Ćipranić, rođena Nikolić, rođena je 01.04.1978. godine u Nikšiću. Osnovnu školu i Gimnaziju je završila u Nikšiću. Dobitnik je diplome "Luča". Na Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore upisala se 1996. godine. Diplomirala je na Građevinskom fakultetu u Podgorici 2002. godine, sa prosjekom 9,0. Dobitnik je studentske nagrade grada Podgorice "19. decembar" i plakete Univerziteta Crne Gore za najboljeg studenta Univerziteta, oblast tehničkih nauka.

Poslijediplomske studije na Građevinskom fakultetu u Beogradu upisala je 2003/04 godine. Student je doktorskih studija Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu od 2007. godine.

Od 2002. godine do danas zaposlena je na Građevinskom fakultetu u Podgorici, u zvanju saradnika u nastavi, na više predmeta hidrotehničkog smjera: Hidraulika I, Komunalna hidrotehnika I, Komunalna hidrotehnika II, Osnovi hidrotehnike, Hidrotehničke građevine.

Učestovala je aktivno sa brojnim privrednim organizacijama i bila povezana sa radom u struci i privredi kroz veliki broj projekata, tehničkih revizija i nadzora na hidrotehničkim objektima. Objavila je preko 25 radova publikovanih u domaćim i stranim časopisima, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu. Osnovni interes u njenom dosadašnjem naučnoistraživačkom radu odnosi se na probleme iz oblasti komunalne hidrotehnike.

Član je Inženjerske Komore Crne Gore.

Udata je za supruga Nikolu, ima dva sina i kćerku, Luku, Andriju i Janu.

Prilog 1.

## Izjava o autorstvu

Potpisani-a Ivana D. Ćipranić

broj indeksa 929/07

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

METODOLOGIJA IZBORA OPTIMALNE VELIČINE  
OSNOVNE ZONE BILANSIRANJA (OZB) U VODOVODNIM SISTEMIMA

---

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nijesam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Prilog 2.

## Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Ivana D.Ćipranić

Broj indeksa 929/07

Studijski program Građevinarstvo

Naslov rada Metodologija izbora optimalne veličine osnovne zone bilansiranja (OZB) u vodovodnim sistemima

Mentor dr Marko Ivetić, red. prof. Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Potpisani/a Ivana D.Ćipranić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični Podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**Prilog 3.**

## **Izjava o korišćenju**

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju Pod naslovom:

Metodologija izbora optimalne veličine osnovne zone bilansiranja (OZB)

u vodovodnim sistemima

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo

2. Autorstvo - nekomercijalno

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerade

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo - nekomercijalno – djeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

6. Autorstvo - djeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.