

# Numerička analiza strujanja u mreži vodovodnog sustava

---

Mrša, Laura

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:248720>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA U MREŽI  
VODOVODNOG SUSTAVA**

Rijeka, rujan 2022.

Laura Mrša

0069086509

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA U MREŽI  
VODOVODNOG SUSTAVA**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, rujan 2022.

Laura Mrša

0069086509

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**  
Predmet: **Hidraulički strojevi**  
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Laura Mrša (0069086509)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Numerička analiza strujanja u mreži vodovodnog sustava / Numerical analysis of flow in the water supply network system**

### Opis zadatka:

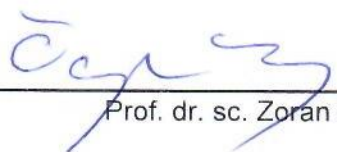
U radu je potrebno na temelju dostupnih podataka analizirati strujanje fluida za mrežu vodovodnog sustava upotrebom alata za 1D numeričku analizu toka fluida. Numerički model analiziranog sustava mora obuhvatiti sve bitne elemente sustava koji utječu na tok fluida. Numeričkom analizom potrebno je utvrditi padove tlakova i pojedinačne protoke u sustavu.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.


*Laura Mrša*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZVEDBI RADA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradila samostalno, svojim znanjem te uz pomoć navedene literature prema „Uputama za izradu i samoarhiviranje završnog/diplomskog rada“ i prema „Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija“ Tehničkog fakulteta u Rijeci.

U Rijeci, 13.09.2022.

---

Laura Mrša

## ZAHVALA

Zahvaljujem se Komunalnom društvu Vodovod i kanalizacija d.o.o. Rijeka na osiguranoj dokumentaciji te svim djelatnicima koji su mi pružili pomoć i dali potrebne upute za primjenu programa i podataka korištenih u ovom radu. Posebno se zahvaljujem mentorima, prof. dr. sc. Zoranu Čariji i asist. dr. sc. Ivani Lučin na pomoći i savjetima prilikom izrade završnog rada.

# SADRŽAJ

<b>1.</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>KARAKTERISTIKE VODOVODNOG SUSTAVA .....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>QGIS.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b>Izrada mreže.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2</b>	<b>Prebacivanje mreže iz QGIS-a u EPANET .....</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>EPANET.....</b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>Matematički hidraulički model.....</b>	<b>8</b>
<b>4.2</b>	<b>Elementi mreže .....</b>	<b>11</b>
<b>4.3</b>	<b>Izrada EPANET modela .....</b>	<b>15</b>
4.3.1.	Čvorovi i cijevi u mreži .....	16
4.3.2.	Pumpe .....	20
4.3.3.	Rezervoar i spremnik za vodu.....	21
<b>5.</b>	<b>ANALIZA MOGUĆNOSTI OPSKRBE NOVOG NASELJA .....</b>	<b>22</b>
<b>6.</b>	<b>KAPACITET MREŽE U SLUČAJU NASTANKA POŽARA .....</b>	<b>27</b>
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>33</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>34</b>
<b>9.</b>	<b>POPIS OZNAKA, VELIČINA I JEDINICA .....</b>	<b>35</b>
<b>10.</b>	<b>SAŽETAK.....</b>	<b>36</b>
<b>11.</b>	<b>SUMMARY.....</b>	<b>37</b>
<b>12.</b>	<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>38</b>
<b>13.</b>	<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>40</b>

# 1. UVOD

Vodovodni sustav služi za opskrbu stanovništva vodom. Obuhvaća cjevovode i pridružene svrsishodne dijelove kojima se voda iz vodospreme razvodi do krajnjih potrošača. Prilikom dizajniranja sustava cjevovoda potrebno je zadovoljiti višestruke kriterije, kao što je osiguranje potrebne količine vode zadovoljavajuće kvalitete pri dozvoljenim tlakovima. Najznačajniji izazovi s kojima se trenutačno suočavaju sustavi distribucije vode su: zastarjela infrastruktura, sve veća potražnja za pitkom vodom, održavanje kvalitete pitke vode, oslabljena infrastruktura kao rezultat neučinkovitosti sustava, pitanja zaštite okoliša i cijena energije. Glavni uzrok curenja i kvarova u infrastrukturi su značajne promjene tlaka u cijevima unutar sustava distribucije vode. Kako bi se spriječili veliki tlakovi u sustavu potrebno je redovito provoditi kontrole te ugraditi ventile namijenjene za otvaranje i zatvaranje protoka tekućine.

Za lakše upravljanje vodoopskrbom širokog područja potrebni su vrlo razvijeni softveri koji će olakšati izgradnju, analizu i kontrolu hidrauličkih modela mreža za distribuciju vode bilo koje složenosti. Najpoznatiji su EPANET i QGIS.

EPANET je softverska aplikacija koja se koristi diljem svijeta za modeliranje sustava distribucije vode. Razvijen je kao alat za razumijevanje kretanja i sudbine sastojaka pitke vode unutar distribucijskih sustava i može se koristiti za mnoge različite vrste aplikacija u analizi distribucijskih sustava. QGIS korisnicima omogućava stvaranje, uređivanje, vizualizaciju, analizu i objavljivanje geoprostornih informacija. Pomoću dodatka QGIS Red može se geo-referencirati sve elemente mreže te također izgraditi i analizirati hidraulički model mreže za distribuciju vode.

Cilj ovog rada je pomoću dobivenih podataka od Vodovoda i kanalizacije d.o.o. Rijeka učitati hidrauličku mrežu u oba navedena softvera te analizirati tok fluida, svojstva elemenata mreže te utvrditi padove tlakova i protoke u sustavu. Hidraulička mreža koja će se analizirati u radu, stvarna je mreža malog naselja Glavani u općini Kostrena. Glavani imaju oko 490 stanovnika te se nalaze na nadmorskoj visini od 100 do 240 m. Analizirat će se kako nadmorska visina utječe na tlakove i protoke u sustavu te je li postojeći sustav sposoban opskrbiti još jedno naselje ili pružiti dovoljno vode za gašenje požara.

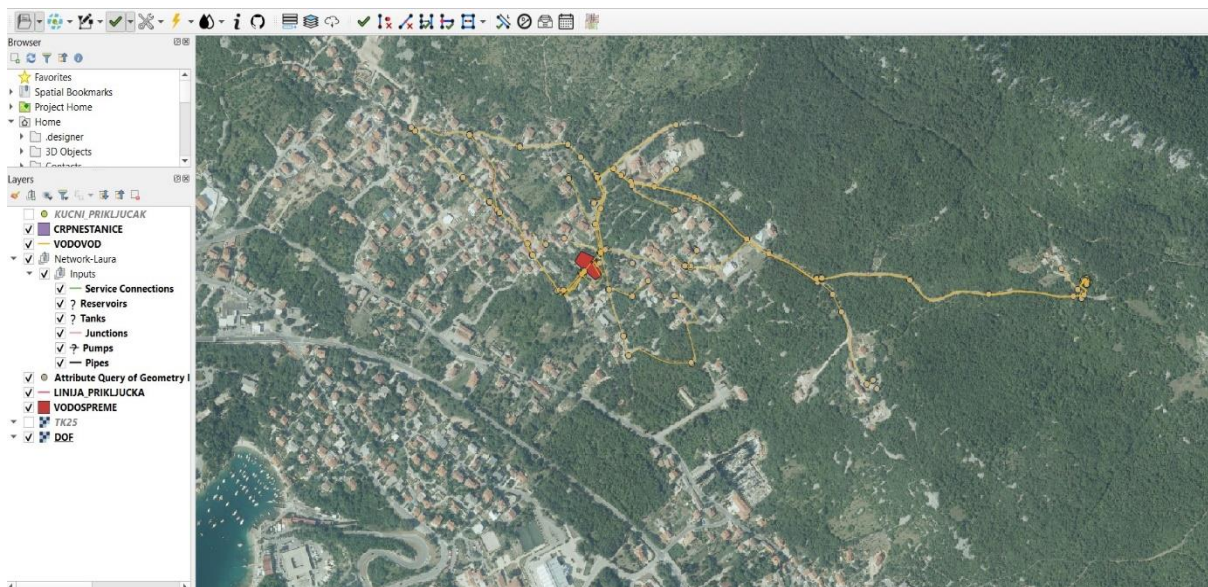


## 2. KARAKTERISTIKE VODOVODNOG SUSTAVA

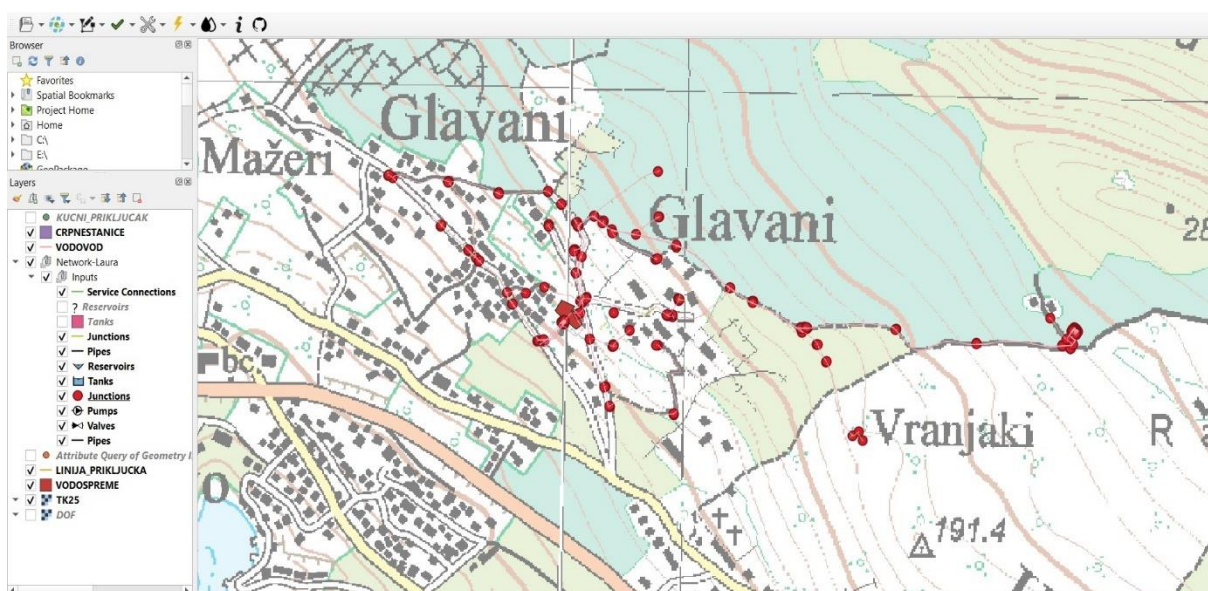
Komunalno društvo Vodovod i kanalizacija d.o.o. za vodoopskrbu i odvodnju, Rijeka isporučitelj je vodnih usluga na području četiri grada: Rijeke, Bakra, Kastva i Kraljevice te pet općina: Čavle, Jelenje, Klana, Kostrena i Viškovo. Područje pružanja usluge površine je 517 kvadratnih kilometara i na njemu živi oko 186 000 stanovnika. Zdravstvena ispravnost vode koja se isporučuje je izvrsna zahvaljujući kvaliteti vode podzemnih krških vrela kojeg određuju stijene vapnenca i dolomita. Na širem riječkom području postoji čak šest izvora vode visoke kakvoće koja su spojena jedinstvenim sustavom vodoopskrbe. Najznačajnija izvorišta su Zvir i Rječina. Vodoopskrbni sustav sastoji se od 54 vodospreme, 32 crpne stanice, 125 redukcijskih stanica, 6 405 hidranata i 43 895 vodovodnih priključaka. [1]

Vodovodna mreža koja će se analizirati u ovom radu jednaka je stvarnoj mreži malog mjesta Glavani iznad Kostrene. Podaci potrebni za izradu mreže preuzeti su od Vodovoda i kanalizacije, Rijeka. Dobivene su koordinate svih elemenata, njihovi nazivi i svojstva. Ono što čini QGIS posebno zanimljivim je mogućnost pozicioniranja vodovodne mreže na stvarnim geografskim kartama. Vodovod Rijeka je preuzeo digitalni ortofoto i topografsku kartu sa stranice Državne geodetske uprave te posjeduje detaljan satelitski prikaz cijele Hrvatske na kojem je pozicionirana vodovodna mreža. Mreža se sastoji od 177 cijevi, 172 čvora, dvije pumpe, jednog rezervoara i jednog spremnika za vodu.

Prema uputama dobivenih od Vodovoda učitana je topografska karta i digitalni ortofoto cijele Hrvatske kao podloga mreži u QGIS-u verzije 3.26.1. Moguće ih je preuzeti s interneta ili učitati kao URL. Izgled kompletne vodovodne mreže pozicionirane na kartama prikazan je na slikama 2.1. i 2.2.



Slika 2.1. Digitalni ortofoto s vodovodnom mrežom

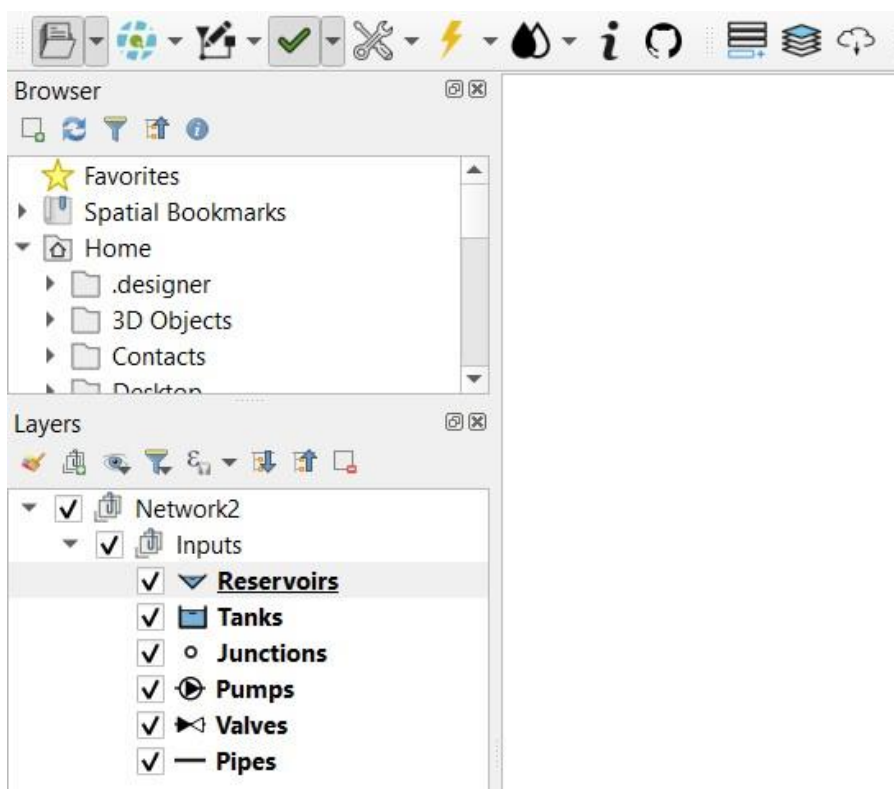


Slika 2.2. Topografska karta s vodovodnom mrežom

### 3. QGIS

Mreža je izvorno izrađena u softveru QGIS. QGIS (Quantum Geographic Information System) je besplatan softver otvorenog koda koji korisnicima omogućava stvaranje, uređivanje, vizualizaciju, analizu i objavljivanje geoprostornih informacija. Mnogo je prednosti korištenja QGIS-a. Softver nudi besplatne online izvore i karte dostupne za preuzimanje. QGIS također prihvaća mnoge vektorske formate datoteka. Ima razvijene dodatke koji se stalno nadograđuju od kojih je za ovaj rad najvažniji QGIS Red.

QGIS Red je besplatan QGIS dodatak razvijen za pomoć u izgradnji i analizi hidrauličkih modela mreža za distribuciju vode bilo koje složenosti. Dodatak omogućuje geo-referenciranje svih mrežnih elemenata, korištenje geografskih pozadinskih slojeva, vizualizaciju podataka po slojevima i ostalo. QGIS Red se oslanja na relacijsku bazu podataka SHP i DBF datoteka jednostavnu za korištenje, temeljenu na modelu podataka EPANET-a te može lako uvesti i izvesti datoteke EPANET-a. Sučelje dodatka QGIS Red prikazano je na slici 3.1.



Slika 3.1. Sučelje dodatka QGIS Red

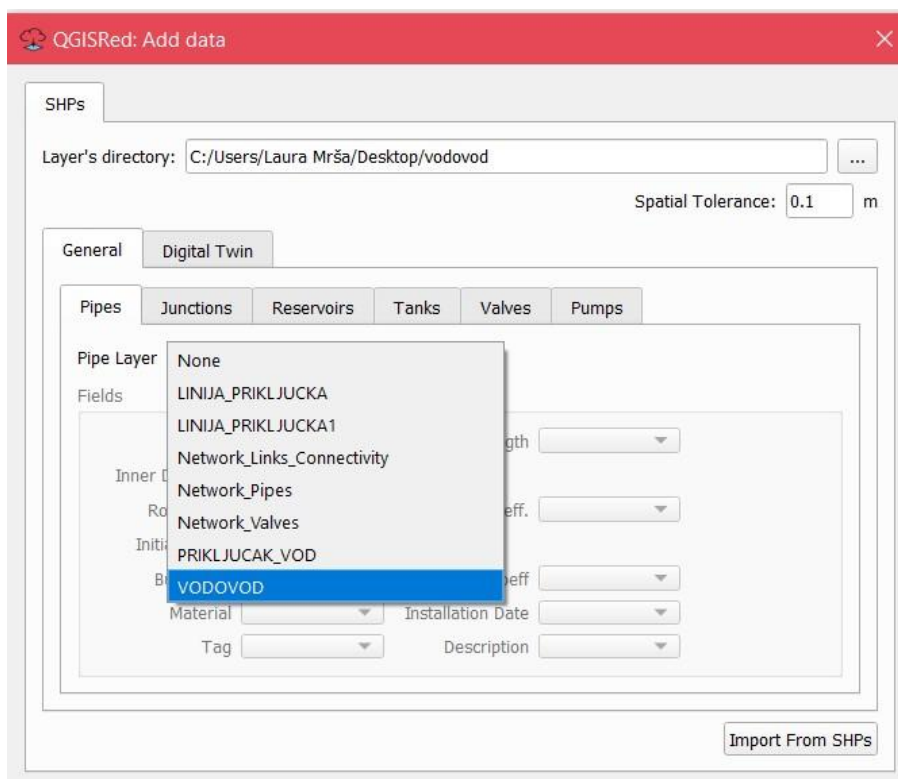
### 3.1 Izrada mreže

Datoteke potrebne za razvoj mreže, preuzete su s postojećeg projekta u QGIS-u sa svim karakteristikama cjevovoda, crpne stanice, priključaka, spremnika i ostalog. Postoje četiri različita formata datoteke (Slika 3.2). SHP je format za pohranu podataka o geometrijskom položaju i atributima geografskih značajki, njega prihvaća QGIS. PRJ je obična tekstualna datoteka koja opisuje koordinatni sustav i podatke o projekciji. CFS je softverska distribucija paketa i DBF datoteka baze podataka.

	LINIJA_PRIKLJUČKA.csf	1.8.2022. 12:32	CSF datoteka
	LINIJA_PRIKLJUČKA	1.8.2022. 12:32	dbf
	LINIJA_PRIKLJUČKA.prj	1.8.2022. 12:32	PRJ datoteka
	LINIJA_PRIKLJUČKA	1.8.2022. 12:32	AutoCAD Shape S...

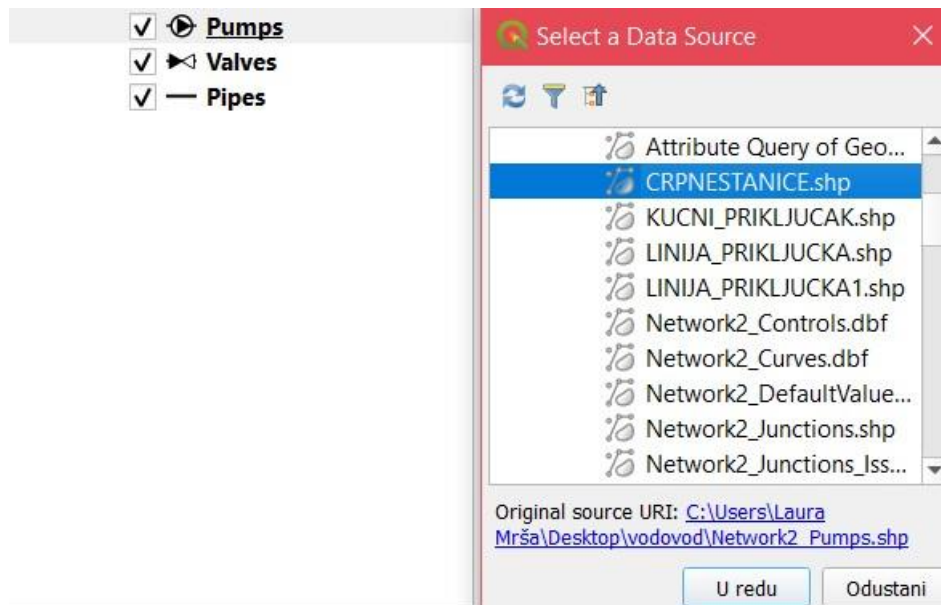
Slika 3.2. Vrste preuzetih datoteka

Za otvaranje navedenih datoteka u QGIS-u treba izraditi novi projekt te uvesti datoteke preko „import data“. Kao vrstu datoteka bira se SHP te se za svaki element u mreži može izabrati odgovarajuća SHP datoteka (Slika 3.3).

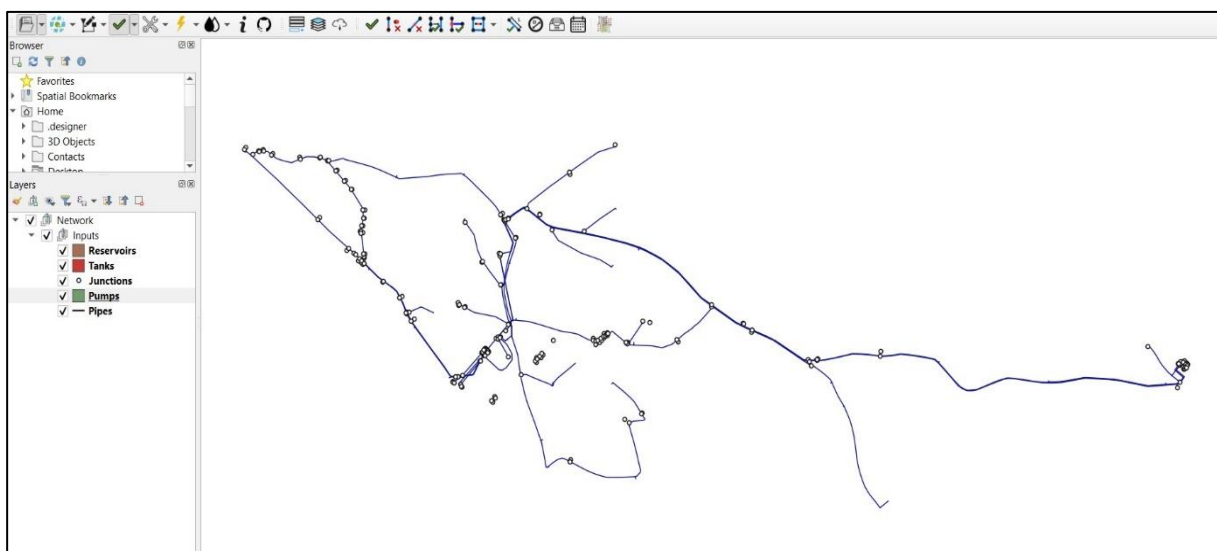


Slika 3.3. Umetanje elemenata u program

Ovdje može nastati problem kada se za pojedini element ponude krive datoteke te je tada potrebno naknadno učitati iste. Nakon uvoza datoteka stvori se mreža s odabranim datotekama, a u prozoru za „layers“ je potrebno kliknuti na nedostajuće elemente i odabrati „change data source“ (Slika 3.4.) te konačno pridružiti elementu pravu datoteku i mreža je gotova (Slika 3.5).



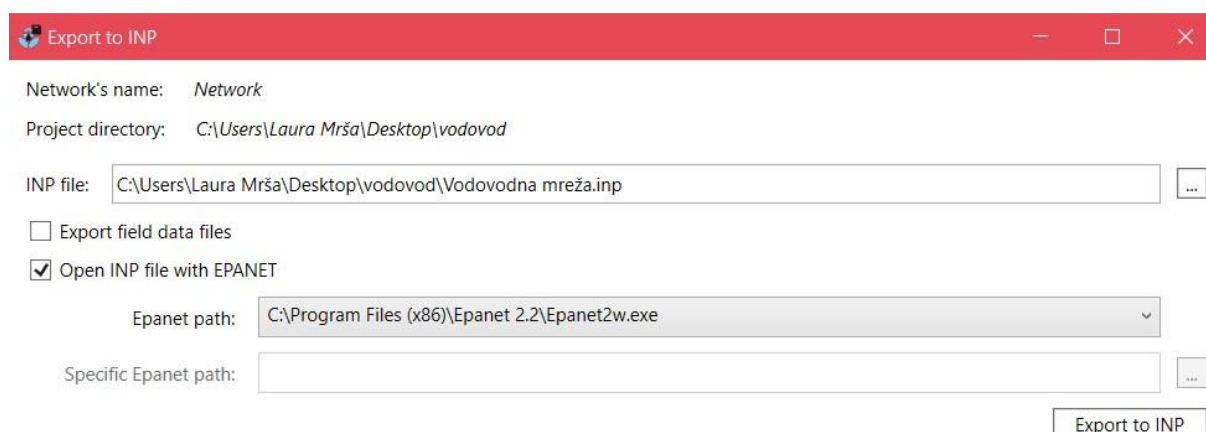
Slika 3.4. Mijenjanje izvora datoteke



Slika 3.5. Gotova mreža u QGIS-u

### 3.2 Prebacivanje mreže iz QGIS-a u EPANET

Dodatak QGIS Red pruža mogućnost izvoza podataka mreže u INP datoteku (Slika 3.6). Kada je završena izrada mreže izabere se izvoz u INP datoteku u kojoj će biti ispisani svi podaci o elementima u mreži. Podaci se učitaju u prethodno napravljenoj praznoj INP datoteci.



Slika 3.6. Izvoz u INP datoteku

Kada je izrađena INP datoteka (Slika 3.7), potrebno ju je otvoriti u EPANET-u. Gotova mreža je učitana iz INP datoteke sa identičnim svojstvima i položajima kao u QGIS-u.

```
[JUNCTIONS]
;ID          Elev          Demand          Pattern
J1           99.33           0.0045          1
J10          109.45          0

[COORDINATES]
;Node        X-Coord          Y-Coord
J1           342504.960       5021181.136
J10          342598.473       5021174.942

[RESERVOIRS]
;ID          Head          Pattern
2           115

[TANKS]
;ID          Elevation        InitLevel        MinLevel        MaxLevel        Diameter
3           241              3                1                4                5

[PIPES]
;ID          Node1          Node2          Length          Diameter
10588       J116          J115          0.211          500
10593       J197          J116          491.512        500
```

Slika 3.7. Skraćena INP datoteka

## 4. EPANET

### 4.1 Matematički hidraulički model

EPANET je softverska aplikacija koja se koristi za modeliranje sustava distribucije vode. Danas inženjeri i konzultanti koriste EPANET za projektiranje i dimenzioniranje nove vodne infrastrukture, rekonstrukciju postojeće zastarjele infrastrukture, optimiziranje rada spremnika i pumpi, smanjenje potrošnje energije, istraživanje problema s kvalitetom vode i pripremu za hitne slučajeve. U ovom radu korišten je EPANET verzije 2.2.

Metoda korištena u EPANET-u za rješavanje jednadžbi kontinuiteta protoka i gubitka specifične energije (ukupne visine energije – „head“), koji karakteriziraju hidrauličko stanje cijevne mreže u danom trenutku, može se nazvati hibridnim pristupom čvor-petlja. Todini i Pilati (1987.) i kasnije Salgado et al. (1988.) su ga odlučili nazvati „metodom gradijenta“. Slični pristup su opisali Hamam i Barmeller („Hibridna metoda“, 1971.) i Osiadacz („Metoda Newtonove petlje-čvor“, 1987.). Jedina razlika između ovih metoda je način na koji se protok ažurira nakon novog probnog rješenja za pronađene ukupne visine energije čvorova. Budući da je Todinijev pristup jednostavniji, on je primijenjen u EPANET-u.

Prvi set jednadžbi opisuje cjevovod s  $N$  spojnih čvorova i  $NF$  fiksnih čvorova (spremnik i rezervoar). Odnos između gubitka visine između spojnih čvorova „i“ i „j“ zadan je jednadžbom:

$$H_i - H_j = h_{Lij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (4.1.)$$

Gdje je:

$H$  – visina energije

$h_L$  – gubitak visine

$r$  – koeficijent linijskog otpora

$Q$  – protok

$n$  – eksponent protoka

$m$  – koeficijent lokalnog otpora

Vrijednost koeficijenta linijskog otpora  $r$  ovisit će o formuli koja se koristi. Za pumpu koja se nalazi između dva čvora „i“ i „j“, gubitak energije  $h_{Lij}$  je negativan pa ukupna energija raste nizvodno. Dobitak energije na pumpi može se napisati u ovom obliku:

$$h_{Lij} = -\omega^2 (h_0 - r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega}\right)^n) \quad (4.2.)$$

Gdje je:

$h_0$  - energija zatvaranja pumpe

$Q_{ij}$  - protok kroz dionicu  $ij$  na kojoj se nalazi pumpa

$\omega$  - relativni broj okretaja pumpe

$r, n$  – koeficijenti koji definiraju kvadratnu parabolu radne karakteristike pumpe

Očuvanje energije duž cijevi između čvora „i“ i „j“ zahtijeva da je pad energije jednak gubitku energije:

$$H_i - H_j = h_{Lij}(Q_{ij}) \quad (4.3.)$$

Drugi set jednadžbi koji mora biti zadovoljen je kontinuitet protoka oko svih čvorova:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad (4.4.)$$

Gdje je:

$D_i$  – zahtijevani protok na i-tom čvoru

Za skup poznatih ukupnih visina fiksnih čvorova tražimo rješenje za sve visine  $H_i$  i protoke  $Q_{ij}$  koji zadovoljavaju prvi set jednadžbi.

EPANET koristi Todinijevu Metodu gradijentnog rješenja za rješavanje ovog sustava. Počinje s početnom pretpostavkom protoka svake cijevi koji ne moraju zadovoljavati jednadžbu kontinuiteta protoka. Radi se iteracijsko popravljanje tih početnih vrijednosti. Svakom iteracijom nađena je nova ukupna visina  $H$  rješavanjem matrične jednadžbe (4.5.):

$$AH = F \quad (4.5.)$$

Gdje je:

$A$  – (NxN) Jacobijeva matrica

$H$  – (Nx1) vektor nepoznatih ukupnih visina  $H$

$F$  – (Nx1) vektor desne strane

Dijagonalni elementi su suma svih promjena za i-ti promatrani čvor po svim susjednim stupcima:



$$A_{ij} = \sum_j g_{ij} \quad (4.6.)$$

Ne dijagonalni članovi, različiti od nule su:

$$A_{ij} = -g_{ij} \quad (4.7.)$$

pri čemu je  $g_{ij}$  inverzna derivacija gubitka u vezi između čvorova „i“ i „j“ s obzirom na protok, odnosno, koliko brzo se mijenja ukupna energija po jediničnoj promjeni protoka.

Za cijevi računa se kao derivacija jednadžbe (4.1.):

$$g_{ij} = nr|Q_{ij}|^{n-1} + \frac{\partial r}{\partial Q_{ij}}|Q_{ij}|^n + 2m|Q_{ij}| \quad (4.8.)$$

Za pumpe računa se kao derivacije jednadžbe (4.2.):

$$g_{ij} = n\omega^2 r \left( \frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^{n-1} \quad (4.9.)$$

Za desnu stranu slobodni vektor F sastoji se od neto neravnoteže protoka u čvoru i faktora korekcije protoka:

$$F_i = \sum_j \left( Q_{ij} + \frac{h_{Lij}}{g_{ij}} \right) - D_i + \sum_f \frac{H_f}{g_{if}} \quad (4.10.)$$

gdje se posljednji izraz jednadžbe (4.10.) primjenjuje na sve veze koje povezuju spojni čvor „i“ s fiksnim čvorom „f“ s poznatom visinom  $H_f$ .

Rješavanjem jednadžbe (4.5.) dobivene su nove vrijednosti visina te su iz izraza (4.11.) pronađeni novi protoci između čvorova „i“ i „j“:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \Delta Q_{ij} \quad (4.11.)$$

Gdje je  $\Delta Q_{ij}$  opisan jednadžbom (4.12.):

$$\Delta Q_{ij} = \frac{h_{Lij} - h_i + h_j}{g_{ij}} \quad (4.12.)$$

Jednadžbe (4.5.) i (4.11.) se opet rješavaju do ispunjenja odgovarajućih kriterija konvergencije ili dok promjene u protoku ne postanu zanemarive. Formula ažuriranja protoka (4.11.) uvijek rezultira u kontinuitetu protoka oko svakog čvora nakon prve iteracije. [2]

## 4.2 Elementi mreže

Čvorovi su mjesta u kojima se spajaju cijevi i gdje voda ulazi ili izlazi iz mreže. Za primjer, na slici 4.1. prikazana su svojstva čvora J1. Zadane su mu koordinate, nadmorska visina („elevation“), potražnja („demand“), osnovna potražnja („base demand“), visina energije („head“), tlak i kvaliteta vode, no ona će u ovom radu biti zanemarena. Čvor J1 ima zadan „Base demand“ odnosno osnovnu potražnju koju mora zadovoljiti uz potrošnju vode po satima. Ostali čvorovi koji nemaju zadanu osnovnu potražnju mogu se gledati kao spojnice cijevi te oni nemaju potrošače.

Junction J1			
Property	Value		
*Junction ID	J1	Demand Categories	1
X-Coordinate	342504.960	Emitter Coeff.	
Y-Coordinate	5021181.136	Initial Quality	
Description		Source Quality	
Tag		Actual Demand	0.00
*Elevation	99.33	Total Head	243.08
Base Demand	0.0045	Pressure	143.75
Demand Pattern	1	Quality	0.00

Slika 4.1. Svojstva čvora J1

Cijevi su definirane dužinom, promjerom, koeficijentom hrapavosti i koeficijentom lokalnih gubitaka koji nije zadan. U cijevima se može očitati: protok, brzina, gubitci, faktor trenja, brzina reakcije, kvaliteta i ostalo. U ovom radu će se najviše promatrati protok i brzina vode u cijevima. Na slici 4.2. je prikazan primjer svojstva jedne cijevi iz mreže.

Pipe 10588	
Property	Value
*Pipe ID	10588
*Start Node	J116
*End Node	J115
Description	
Tag	
*Length	0.211
*Diameter	500
*Roughness	0.1
Loss Coeff.	0
Initial Status	OPEN
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	0.00
Velocity	0.00
Unit Headloss	0.00
Friction Factor	0.000
Reaction Rate	0.00
Quality	0.00
Status	Open

Slika 4.2. Svojstva cijevi 10588

Pumpa je okarakterizirana krivuljom pumpe koja predstavlja odnos između visine dizanja i količine protoka koju pumpa može isporučiti. Visina dizanja je tlak kojeg pumpa prenosi na vodu i iscrtava se na okomitoj (Y) osi krivulje u metrima. Količina protoka ucrtana je na vodoravnoj (X) osi u l/s. Ispravna krivulja pumpe mora imati pad visine s povećanjem protoka. EPANET će isključiti pumpu ako sustav zahtijeva visinu višu od prve točke na krivulji, to jest visinu za isključivanje. [2]

Rezervoar je čvor koji predstavlja beskonačan vanjski izvor vode u mreži. Svojstva mu se sastoje od konstantne visine energije i ukupnog utjecanja („Net inflow“) koji je u minusu jer voda istječe iz spremnika (Slika 4.3).

Reservoir 2	
Property	Value
*Reservoir ID	2
X-Coordinate	342803.468
Y-Coordinate	5020943.364
Description	
Tag	
*Total Head	115
Head Pattern	
Initial Quality	
Source Quality	
Net Inflow	-2.23
Elevation	115.00
Pressure	0.00
Quality	0.00

*Slika 4.3. Svojstva rezervoara*

Spremnik za vodu je čvor sa skladišnim kapacitetom, gdje volumen pohranjene vode može varirati s vremenom tijekom simulacije (Slika 4.4). Primarna ulazna svojstva spremnika su: promjer, početni vodostaj, minimalni vodostaj i maksimalni vodostaj. Spremnik mora raditi unutar svojih minimalnih i maksimalnih razina. EPANET zaustavlja istjecanje ako je spremnik na minimalnoj razini. Također, zaustavlja svaki dotok ako je spremnik na najvećoj razini s obzirom da je njegovo svojstvo „Can overflow“, odnosno smije istjecati, postavljeno da ne smije (Slika 4.4).

Tank 3	
Property	Value
*Tank ID	3
X-Coordinate	343676.786
Y-Coordinate	5020931.222
Description	
Tag	
*Elevation	241
*Initial Level	3
*Minimum Level	1
*Maximum Level	4
*Diameter	5
Minimum Volume	0
Volume Curve	
Can Overflow	No
Mixing Model	Mixed
Mixing Fraction	
Reaction Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Net Inflow	-6.97
Elevation	244.00
Pressure	3.00
Quality	0.00

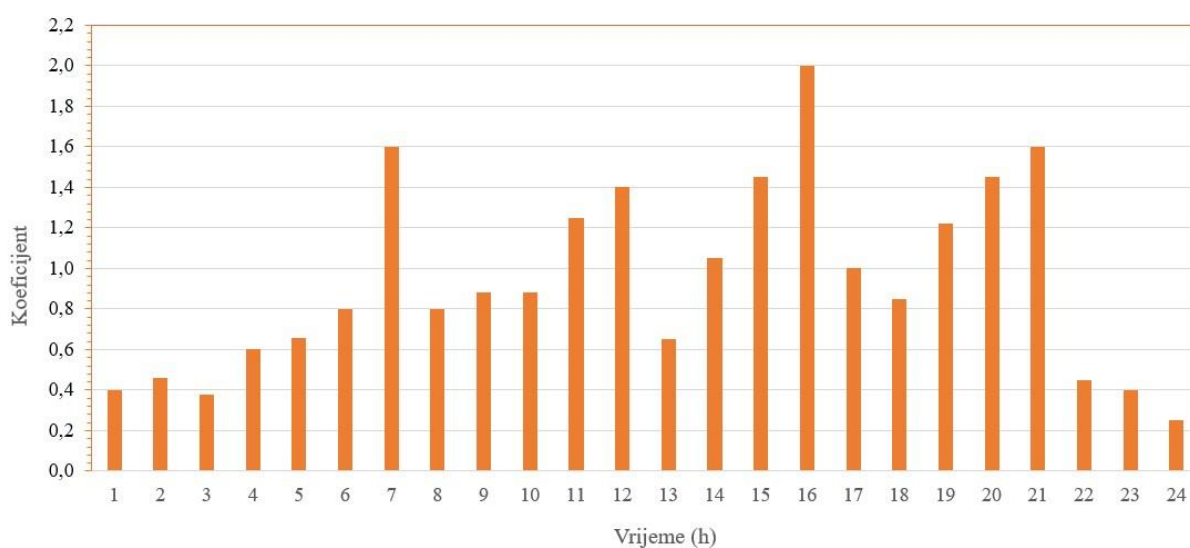
Slika 4.4. Svojstva spremnika za vodu

### 4.3 Izrada EPANET modela

Hidraulička mreža sadrži cijeli sustav vodoopskrbne mreže mjesta Glavani. Cijevi su definirane duljinom, promjerom te hrapavosti kao što je slučaj u stvarnosti. U čvorove su unesene nadmorske visine i izračunata potrošnja, a pumpama definirane Q-H krivulje. Ukupno su obuhvaćeni sljedeći elementi u cjelokupnoj mreži:

- 172 čvora
- 177 cijevi
- 2 spremnika
- 2 pumpe

Zadan je vremenski obrazac potrošnje vode po satima (Slika 4.5). Vremenski obrazac odnosno „time pattern“ je skup koeficijenata koji se mogu množiti s određenom vrijednosti kako bi se izračunalo njeno variranje tijekom vremena. Vremenski obrasci mogu biti povezani sa zahtjevom za vodu, visinom rezervoara, rasporedu pumpi, no u ovoj mreži pripisani su samo čvorovima.



Slika 4.5. Dijagram potrošnje vode po satima za stanovništvo

#### 4.3.1. Čvorovi i cijevi u mreži

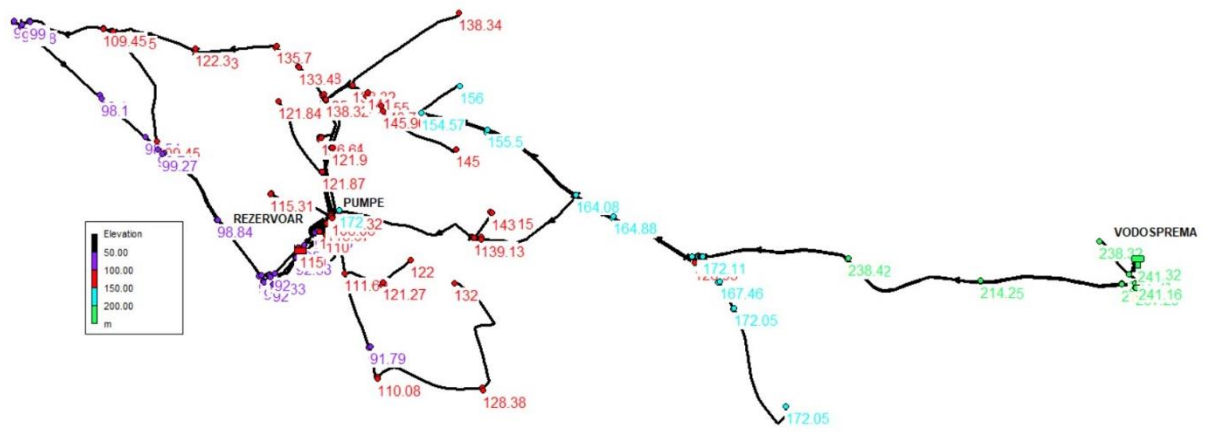
Mreža sadrži 45 potrošača kojima je osnovna potražnja 0,0045 l/s u svakom čvoru. Također, svim čvorovima je zadan isti „Demand pattern“, točnije „Time pattern“ koji propisuje potražnju vode po satima (Slika 4.5). Najzanimljiviji parametar čvorova za proučavanje je tlak. Tlak je u EPANET-u izražen u metrima. Računa se kao razlika visine energije čvora i nadmorske visine čvora. Prema primjeru (Slika 4.1), visina energije u čvoru J1 je 243,08 m, nadmorska visina je 99,33 m, što daje hidrostatski tlak od 143,75 m. Jedan metar hidrostatskog tlaka jednak je 0,098 bar. Stoga, tlak u čvoru J1 iznosi oko 14 bar. To je prevelika vrijednost koja bi razorila cjevovod i izlazne elemente. Naime, tlak u cjevovodu ne smije prelaziti vrijednost od 6,5 bar koju je lakše postići na ravnim područjima nego u naseljima velikih visinskih razlika kao što su Glavani. Kako bi se visoki tlakovi izbjegli potrebno je ugraditi regulacijske ventile koji će kontrolirati visinu tlaka.

Također, u mreži je zadana mala osnovna potražnja potrošača koja ne zahtjeva gotovo nikakav protok vode kroz mrežu, voda je ispunila cijevi i zaustavila se. Dakle i brzina vode u cijevima jednaka je nuli. Kada se promotri Bernoullijeva jednadžba (4.13), vidljivo je da se smanjenjem brzine povećava tlak. To objašnjava izrazito velike tlakove u čvorovima. Da bi se smanjio tlak treba povećati potražnju te tako povećati protok i brzinu te smanjiti pritisak vode u čvorovima.

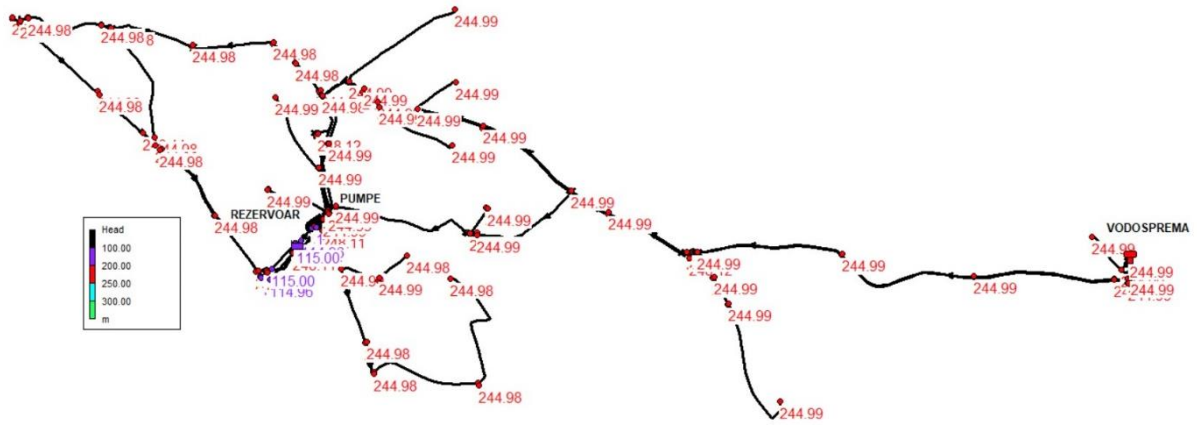
$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H \quad (4.13.)$$

Na sljedećim slikama moguće je vidjeti parametre čvorova i parametre cijevi.

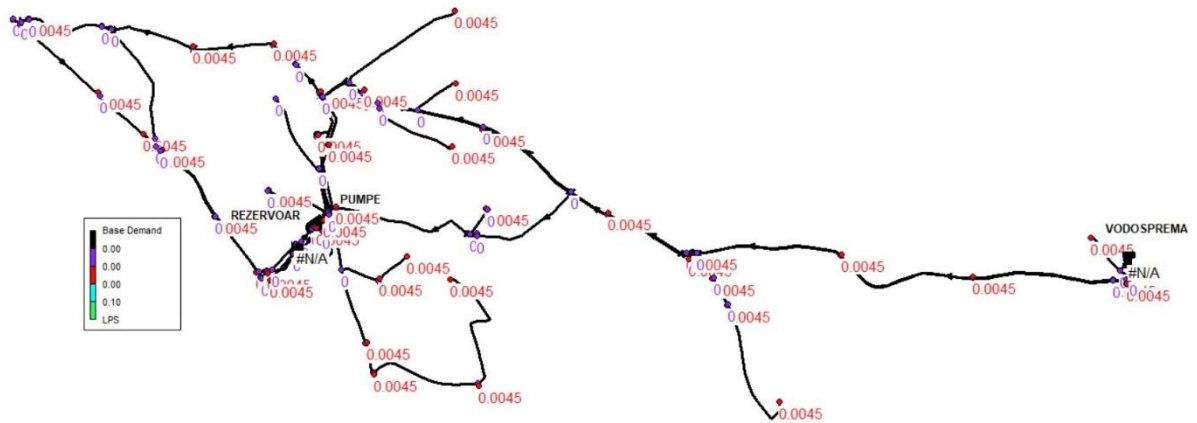
Parametri čvorova su: nadmorska visina čvora (Slika 4.6), visina energije (Slika 4.7), osnovna potražnja (Slika 4.8) i tlak u čvoru (Slika 4.9).



Slika 4.6. Nadmorska visina čvorova mreže

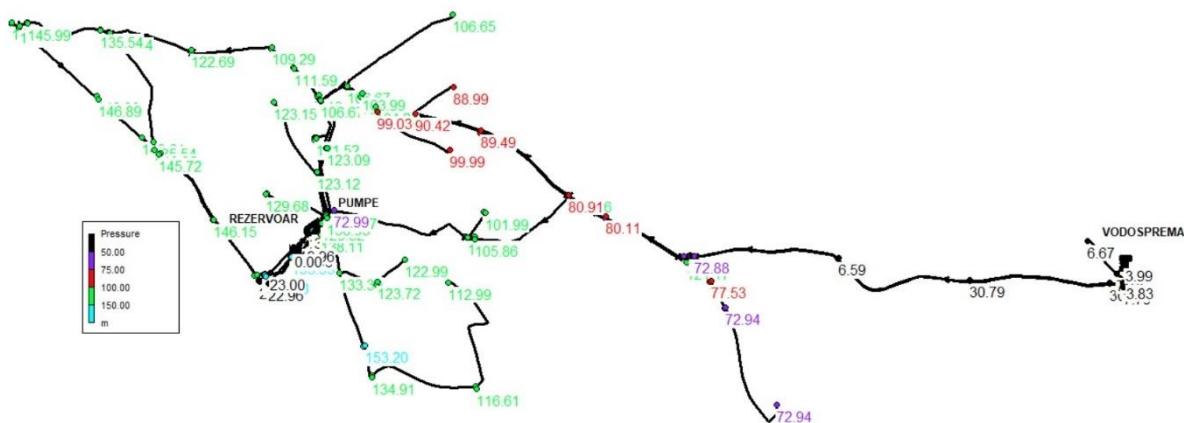


Slika 4.7. Visina energije čvorova mreže



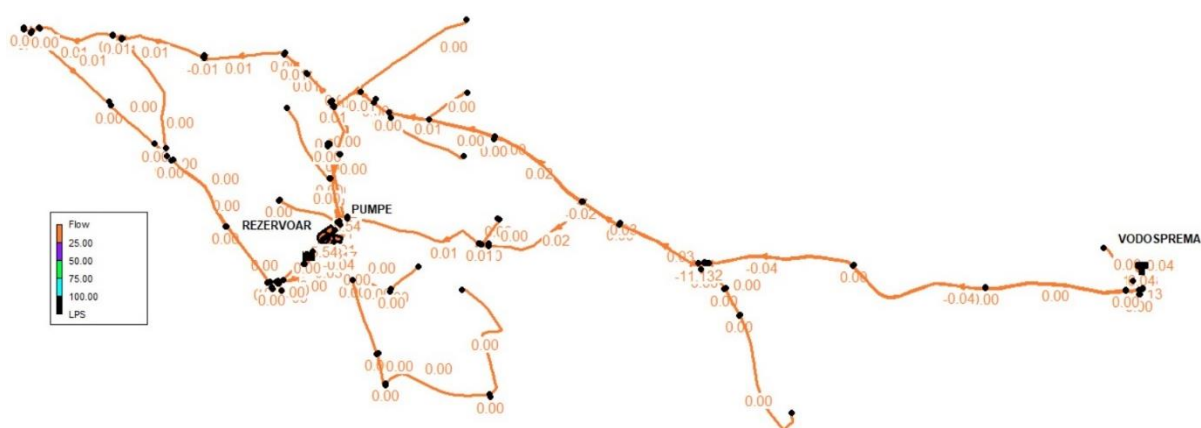
Slika 4.8. Osnovna potražnja čvorova mreže



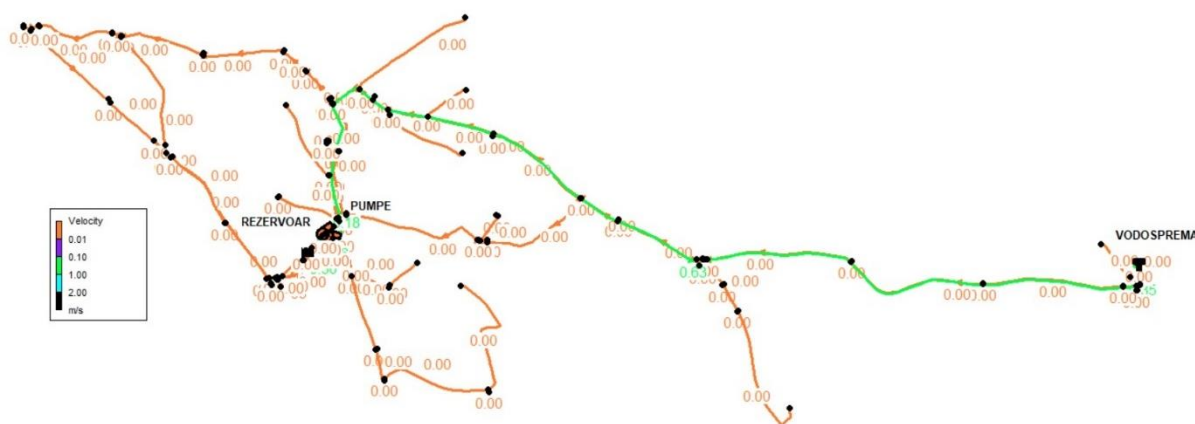


Slika 4.9. Tlak čvorova mreže

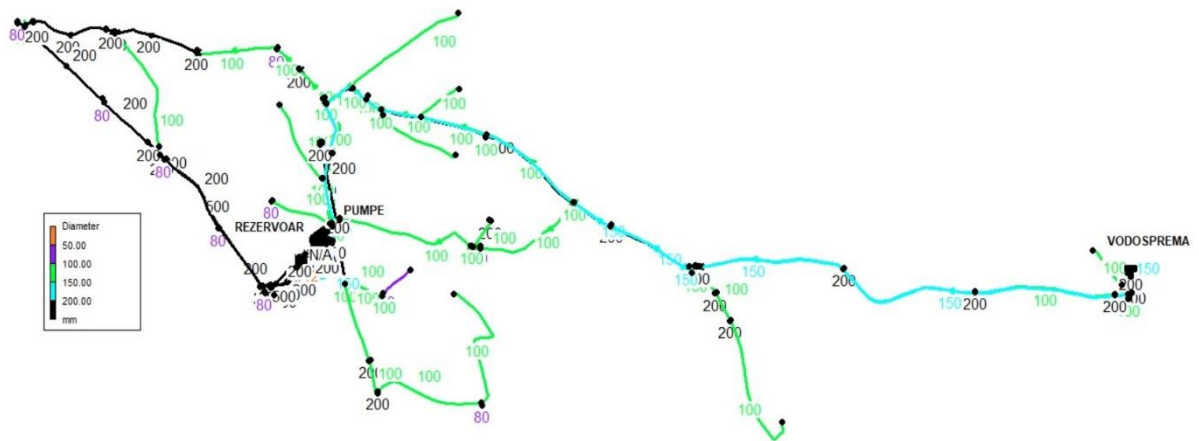
Parametri koji se računaju u cijevima su: protok (Slika 4.10), brzina (Slika 4.11), promjer cijevi (Slika 4.12), duljina cijevi (Slika 4.13) i faktor trenja u cijevima (Slika 4.14).



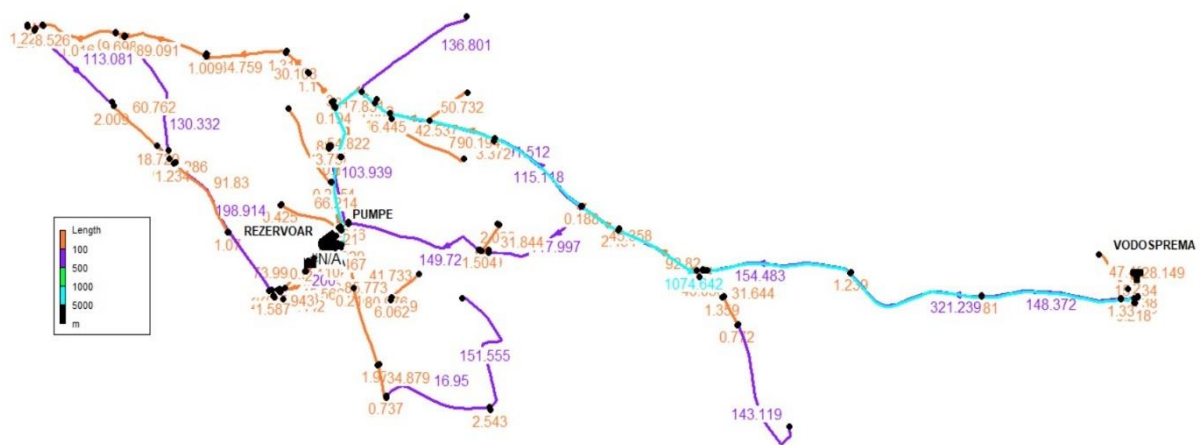
Slika 4.10. Protok vode u cijevima



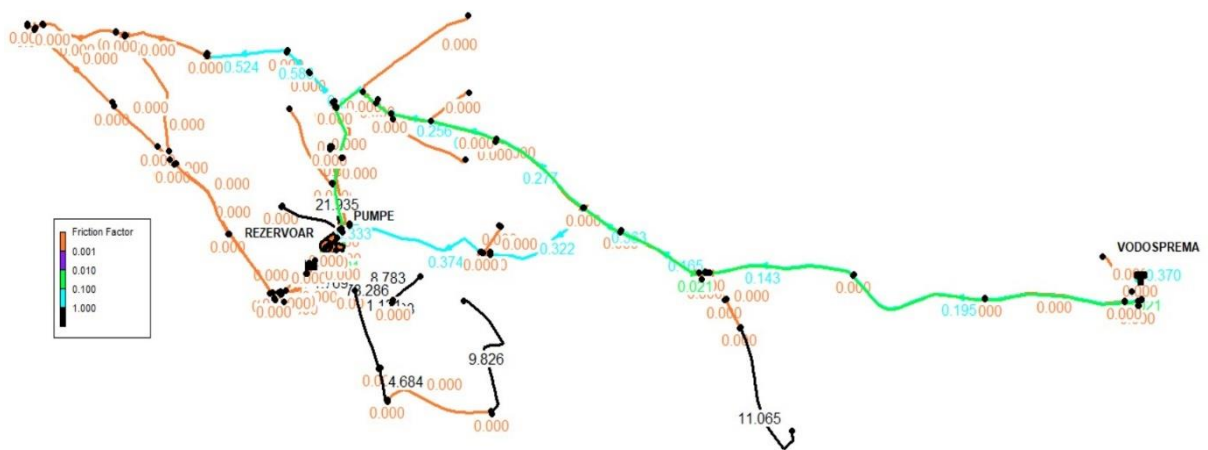
Slika 4.11. Brzina vode u cijevima



Slika 4.12. Promjer cijevi



Slika 4.13. Duljina cijevi

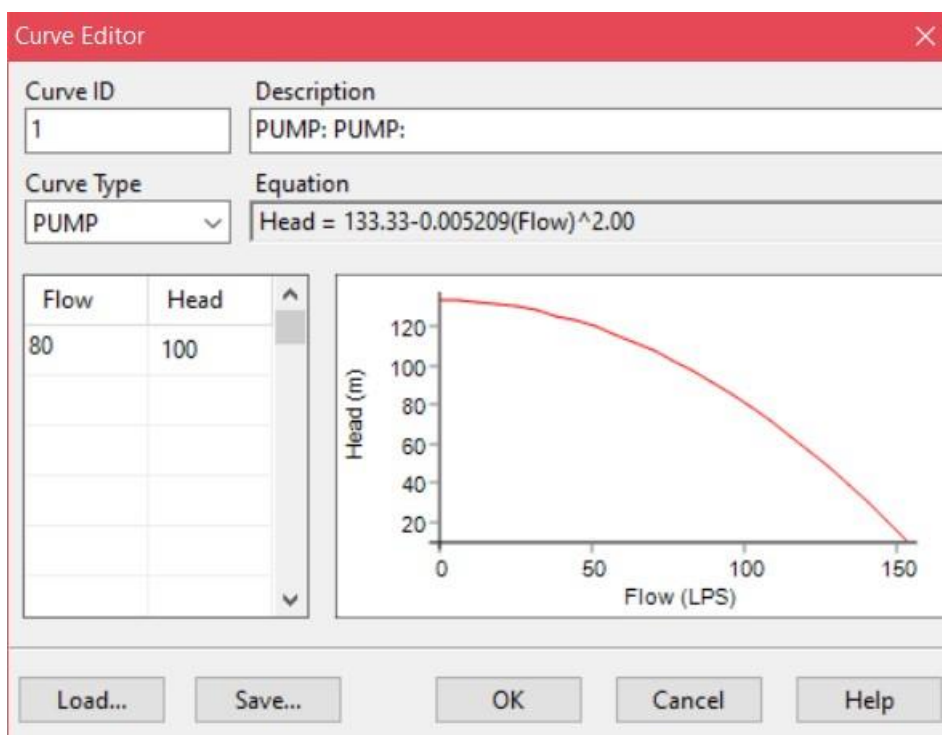


Slika 4.14. Faktor trenja u cijevima

### 4.3.2. Pumpe

U ovoj mreži koriste se dvije pumpe definirane krivuljom pumpe s jednom točkom. Točka je definirana kombinacijom jedne visine dizanja i protoka koji predstavljaju željenu radnu točku pumpe. EPANET ispunjava ostatak krivulje pretpostavljajući da je visina zatvaranja pri nultom protoku jednaka 133% projektirane visine i da je maksimalni protok pri nultoj visini jednak dvostrukom projektiranom protoku. Zadani uvjeti mogu se opisati funkcijom (4.14.) iz koje proizlazi krivulja pumpe (Slika 4.15). Zadana visina dizanja je 100 m i protok 80 l/s.

$$H = 133,3 - 0,005209(Q)^2 \quad (4.14.)$$



Slika 4.15. Krivulja pumpe

Optimalna vrijednost visine dizanja pumpi koje se koriste u ovoj mreži je 100 m. Kada se postavi visina od 80 m javlja se upozorenje da su obje pumpe zatvorene jer ne mogu dostaviti potrebnu energiju (Slika 4.16).

```
WARNING: Pump 1 closed because cannot deliver head at 0:00:00 hrs.  
WARNING: Pump 3 closed because cannot deliver head at 0:00:00 hrs.
```

*Slika 4.16. Upozorenje o zatvaranju pumpi*

Kada je izabrana visina od 300 m javlja se drugo upozorenje koje ukazuje na nestabilnost sustava (Slika 4.17). Naime, maksimalan broj pokušaja za rješavanje nelinearnih jednadžbi koje upravljaju mrežnom hidraulikom u određenoj vremenskoj točki je oko 40. U ovom slučaju hidrauličko rješenje nije pronađeno unutar maksimalnog broja pokušaja te se može poduzeti zaustavljanje simulacije u ovoj točki (11:57:54 h) ili u svrhu postizanja konvergencije nastaviti s 10 dodatnih pokušaja. Radi moguće nestabilnosti, ova visina dizanja nije optimalna.

```
WARNING: Maximum trials exceeded at 11:57:54 hrs. System may be unstable.
```

*Slika 4.17. Upozorenje o nestabilnom sustavu*

Međutim, pri zadanoj visini dizanja od 100 m i protoku 80 l/s, utvrđeno je da obje pumpe nesmetano rade te opskrbljuju cijelu mrežu vodom.

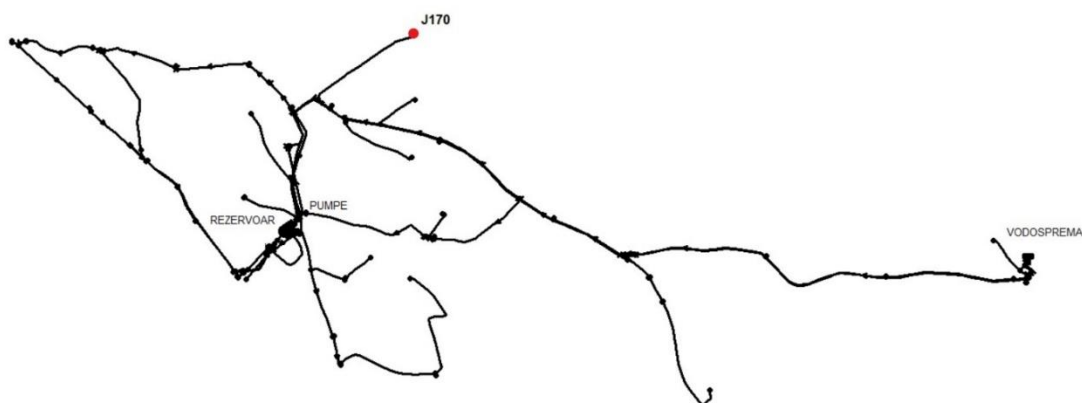
#### 4.3.3. Rezervoar i spremnik za vodu

Rezervoar se nalazi na visini od 115 m iz kojeg obje pumpe pumpaju vodu u čvorove na većim visinama dok nekolicina cijevi ispod rezervoara odvode vodu nizvodno slobodnim tokom na manje visine. Također, rezervoar opskrbljuje i spremnik za vodu kada se dosegne minimalna razina vode u spremniku.

Spremnik za vodu ima promjer od 5 m, početna razina vode u spremniku je 3 m, minimalna je 1 m, a maksimalna 4 m.

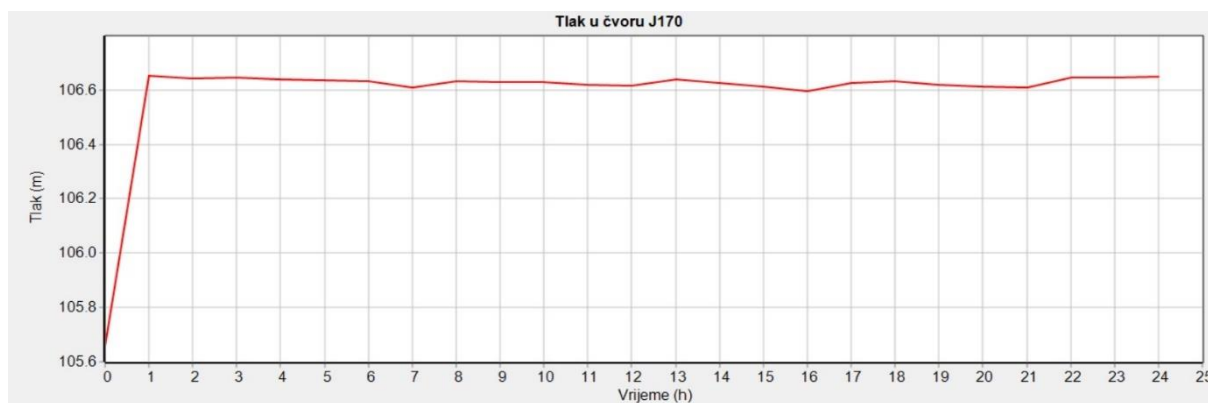
## 5. ANALIZA MOGUĆNOSTI OPSKRBE NOVOG NASELJA

Može se promotriti slučaj proširenja naselja koje će se opskrbiti vodom iz iste mreže. Cjevovod novog naselja bit će povezan na čvor J170 (Slika 5.1). Ovaj slučaj se može simulirati tako da se u čvoru J170 poveća osnovna potražnja dok će potrošnja po satima ostati ista. Analizira se koja je maksimalna osnovna potražnja koju mreža može zadovoljiti u tom čvoru tako da se ni u jednom trenutku ne prekine dovod vode u taj čvor, odnosno zamišljeno novo naselje. Dovod vode se najbolje može vidjeti na grafu ovisnosti tlaka o vremenu i ovisnosti protoka o vremenu. Ako je tlak u nekom satu manji ili jednak nuli, dovod vode je prekinut zbog preopterećenja mreže. Isto pravilo vrijedi i za protok vode.

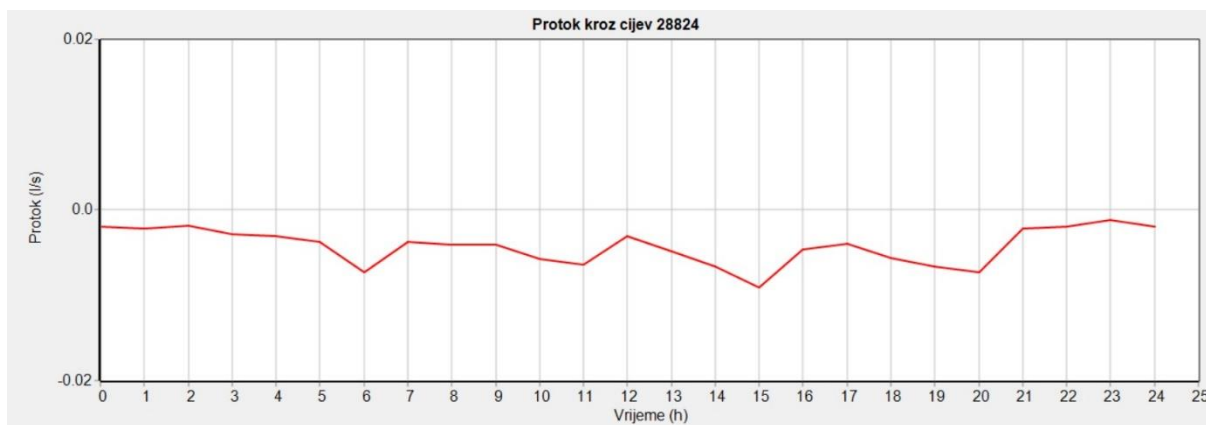


Slika 5.1. Pozicija čvora J170 u mreži

Kada osnovna potražnja u čvoru J170 iznosi 0,0045 l/s, tlak naglo poraste pri pokretanju simulacije i ostane otprilike konstantan s obzirom na to da je protok gotovo jednak nuli (Slika 5.2).



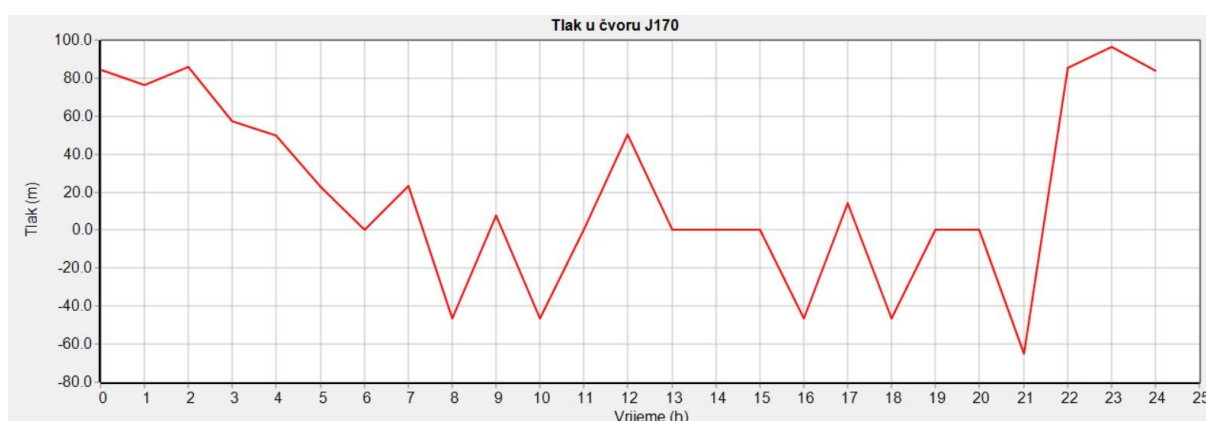
Slika 5.2. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 0,0045 l/s



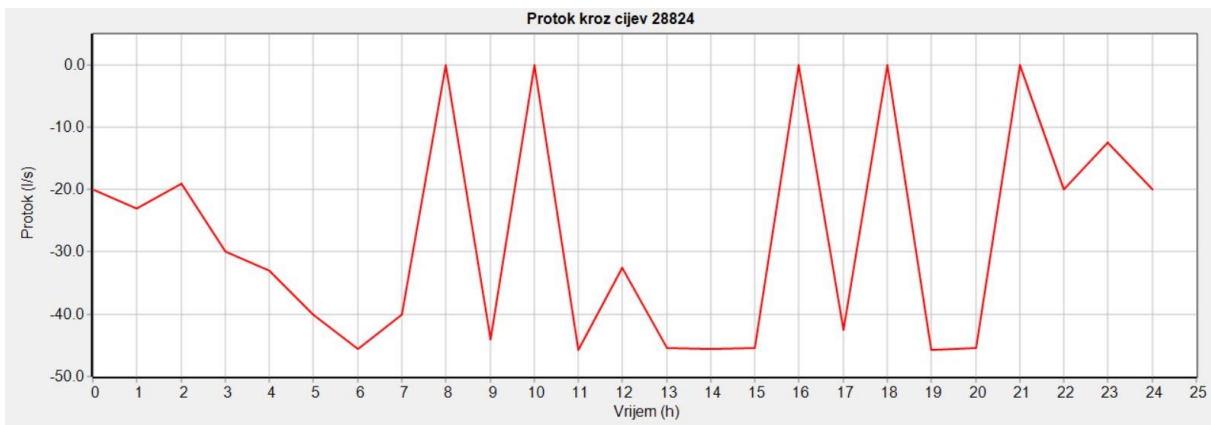
Slika 5.3. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 0,0045 l/s

Na grafu je vidljivo da je protok uvijek negativan (Slika 5.3). Naime, kada se voda kreće iz čvora niže visine u čvor više visine protok je negativan. Stoga, promjenom smjera toka vode kroz cijev protok postaje pozitivan, no u ovom slučaju to nije potrebno mijenjati.

Za početak može se zadati poprilično velika vrijednost kako bi se promotrio odgovor mreže. Zadana je osnovna potražnja od 50 l/s u čvoru J170. Tlak u čvoru u početno vrijeme pao je na 84 m (Slika 5.4), a protok porastao na 20 l/s (Slika 5.5). Dakle tlak se odmah smanjio, a protok povećao. Nadalje, kako se potrošnja po satima povećavala tako se povećavao i protok kroz cijev, a tlak u čvoru J170 smanjivao. No u satima najveće potražnje i tlak i protok padaju na vrijednost ispod ili jednako nuli što ukazuje na prekinuti dovod vode u čvor. Vidljivo na navedenim grafovima, to su sati: 8, 10, 16, 18 i 21 sat. Za bolje rezultate, treba smanjiti osnovnu potražnju.

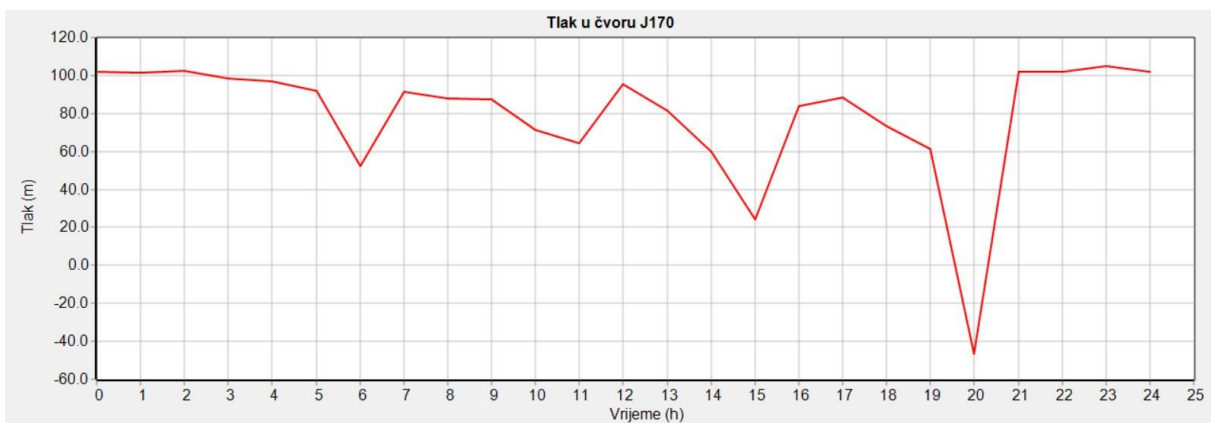


Slika 5.4. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 50 l/s

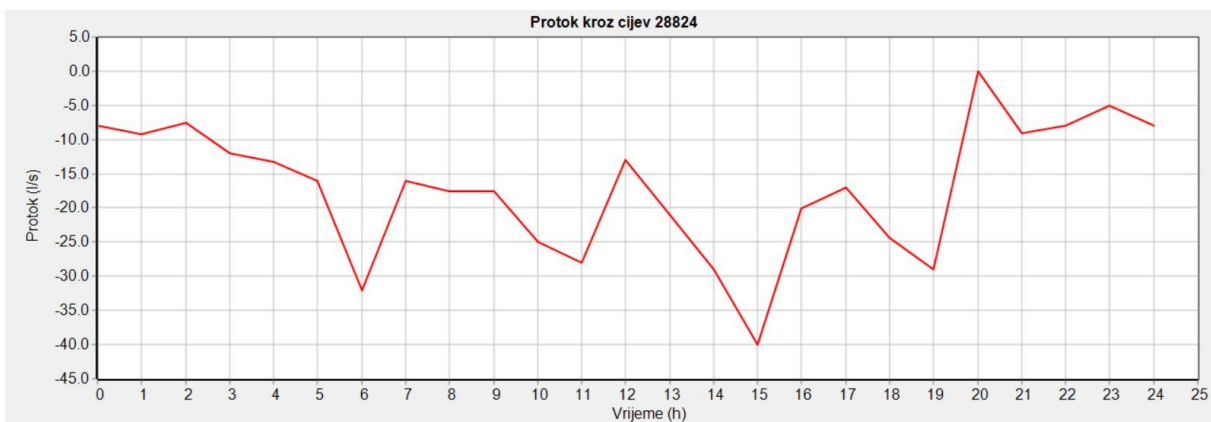


Slika 5.5. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 50 l/s

Zadana je nova osnovna potražnja od 20 l/s s kojom je odgovor daleko stabilniji, no u 20 sati tlak pada na -40 m i protok na nulu (Slike 5.6. i 5.7). Dakle potražnju treba još smanjiti.

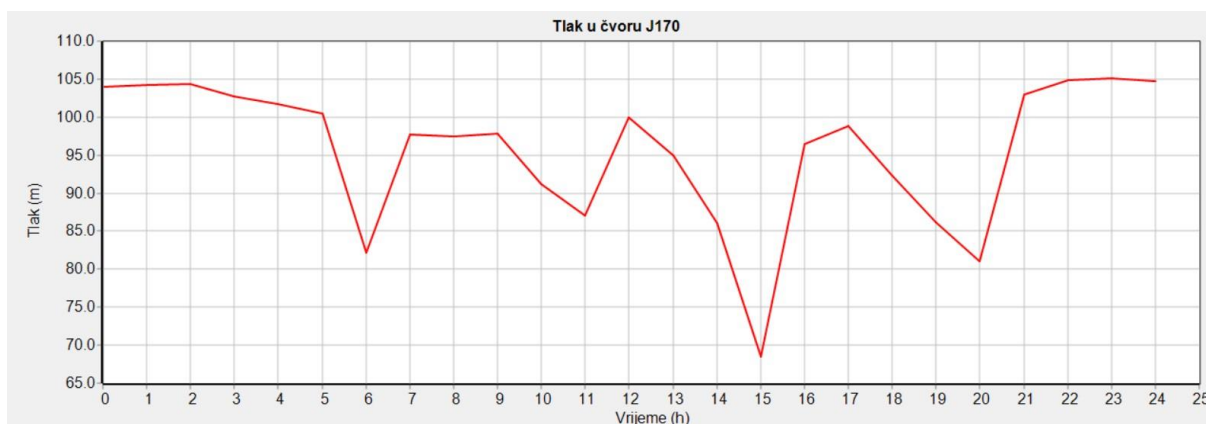


Slika 5.6. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 20 l/s

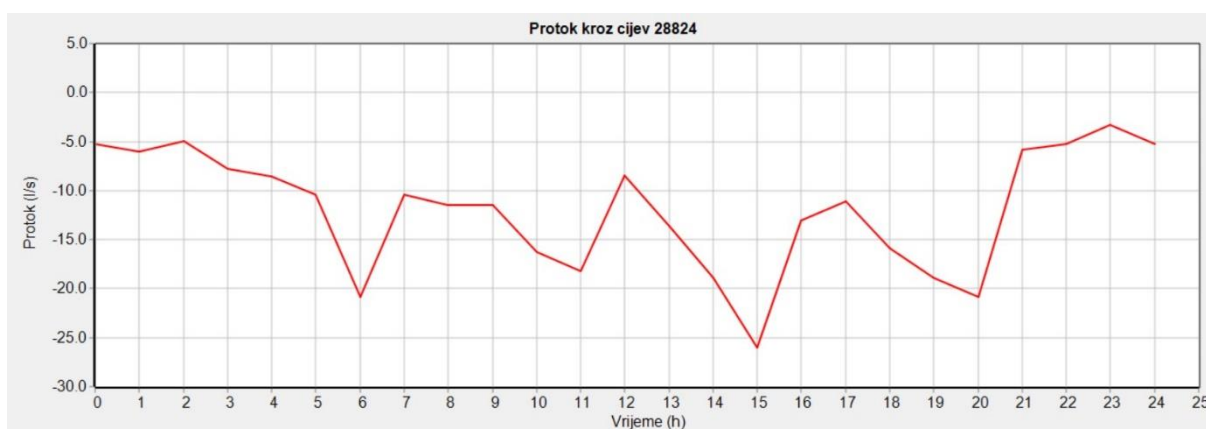


Slika 5.7. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 20 l/s

Ako se postavi osnovna potražnja od 10 l/s, tlak u početnom stanju je gotovo jednak tlaku kada je osnovna potražnja 0,0045 l/s, a protok malo veći od nule (Slika 5.8 i 5.9). Dobiveni grafovi su međusobno gotovo isti te su sve vrijednosti veće od nule. Sa zadanom potražnjom mreža bi mogla raditi neometano, no to nije granično stanje kojega se pokušava postići. Granična vrijednost osnovne potražnje nalazi se između 10 l/s i 20 l/s te je potrebno svaku vrijednost zasebno zadati i pronaći graničnu.



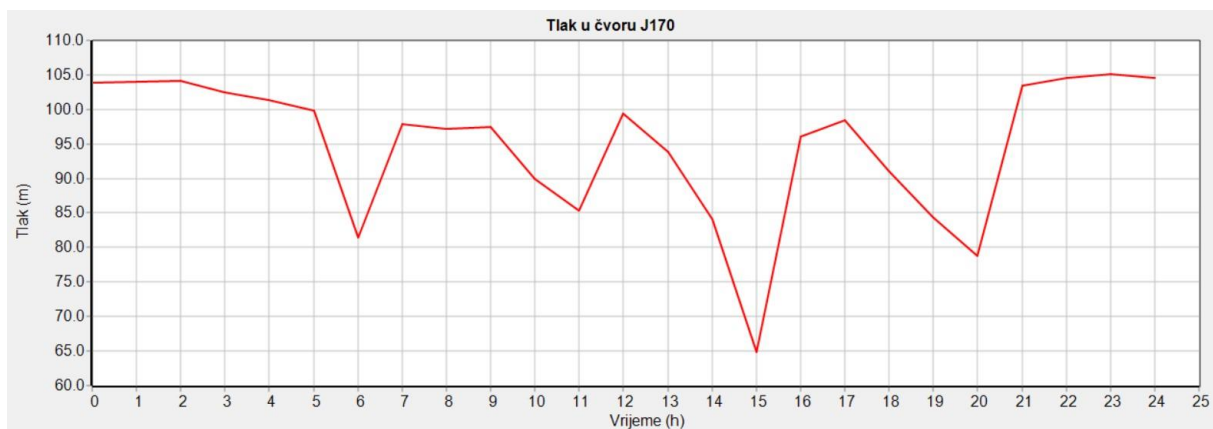
Slika 5.8. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 10 l/s



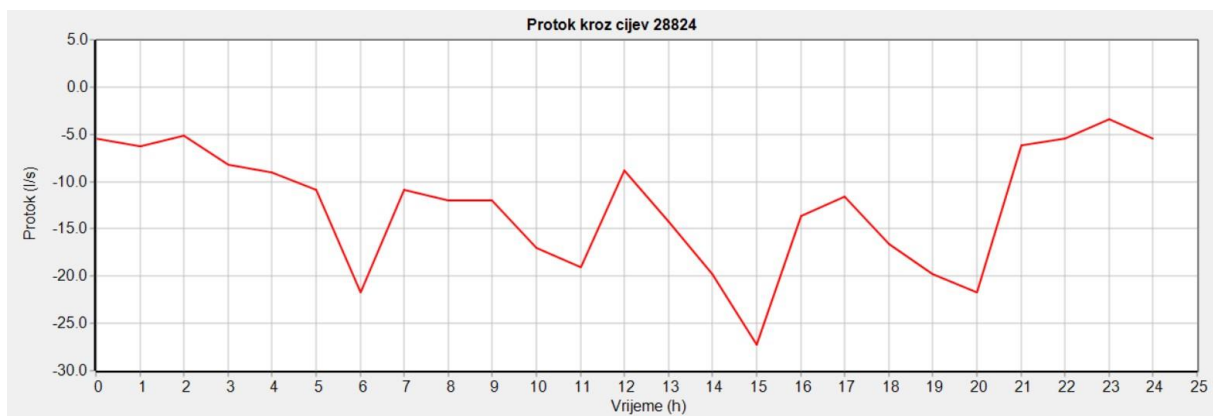
Slika 5.9. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 10 l/s

Kao rezultat, dobivena je vrijednost od 13,6 l/s. To je maksimalna osnovna potražnja u čvoru J170 koja zadovoljava sve uvjete. Ako se potražnja poveća na 13,7 l/s, u 21 h je zaustavljen dotok vode u čvor. Na grafovima (Slike 5.10. i 5.11.) je lako uočljivo da su sve vrijednosti različite od nule te je mreža stabilna.





Slika 5.10. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 13,6 l/s



Slika 5.11. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 13,6 l/s

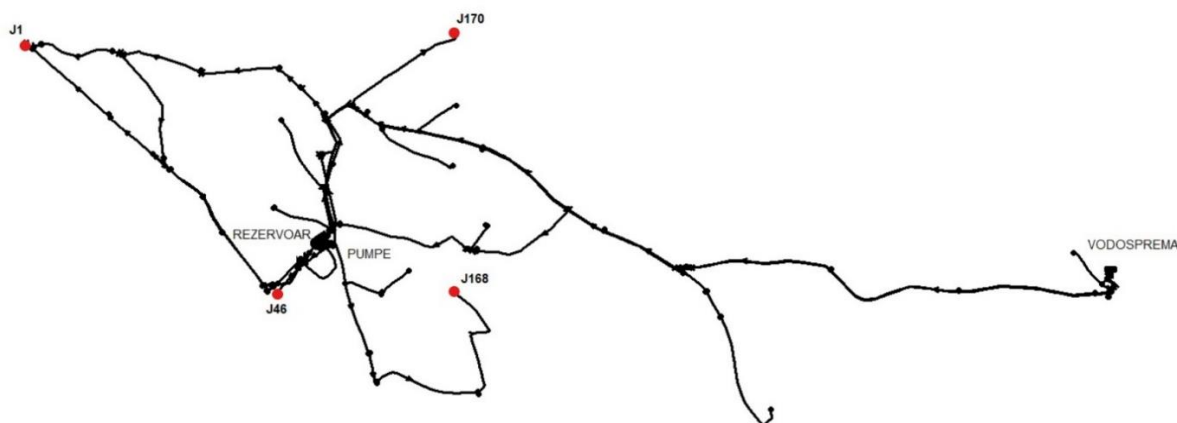
S dobivenim rezultatima može se izračunati koliko bi stanovnika imalo novo naselje koje ima osnovnu potražnju od 13,6 l/s. Stanovnik Hrvatske prosječno potroši 140-160 litara vode na dan. Pretpostavit će se da stanovnik prosječno troši 150 l/dan vode. Kada se potrošnja pretvori u l/s, dobije se da stanovnik troši 0,0017361 l/s vode. U čvoru J170 dozvoljena je najveća potražnja od 13,6 l/s dakle moguće je opskrbiti naselje od 7 833 stanovnika, veće od cijele općine Kostrena.

## 6. KAPACITET MREŽE U SLUČAJU NASTANKA POŽARA

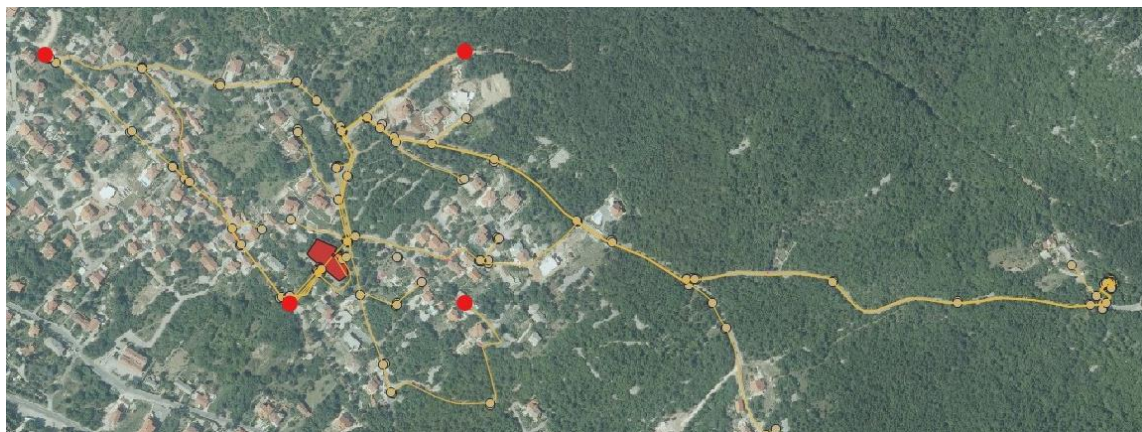
Može se promotriti slučaj nastanka požara u naselju Glavani na nekoliko lokacija. Proučit će se kolika može biti maksimalna osnovna potražnja u čvorovima na lokaciji požara koju mreža može zadovoljiti u svim satima.

Za zaštitu naseljenih mjesta hidrantskom mrežom za gašenje požara potrebno je osigurati najmanje protočnu količinu vode od 10 l/s. [3] U prethodnom poglavlju je dobivena maksimalna vrijednost potražnje od 13,6 l/s u čvoru J170 koja može zadovoljiti i zahtjev za zaštitu naseljenih mjesta od požara, no ispitat će se maksimalna potražnja u više čvorova.

Izabrane su 4 lokacije, odnosno čvora kojima će se promijeniti potražnja dok se ne postigne granična vrijednost. To su čvorovi: J1, J46, J168 i J170. Pretpostavit će se da su na tim čvorovima smješteni hidranti za gašenje požara. Na slikama 6.1. i 6.2. su prikazane lokacije navedenih čvorova.

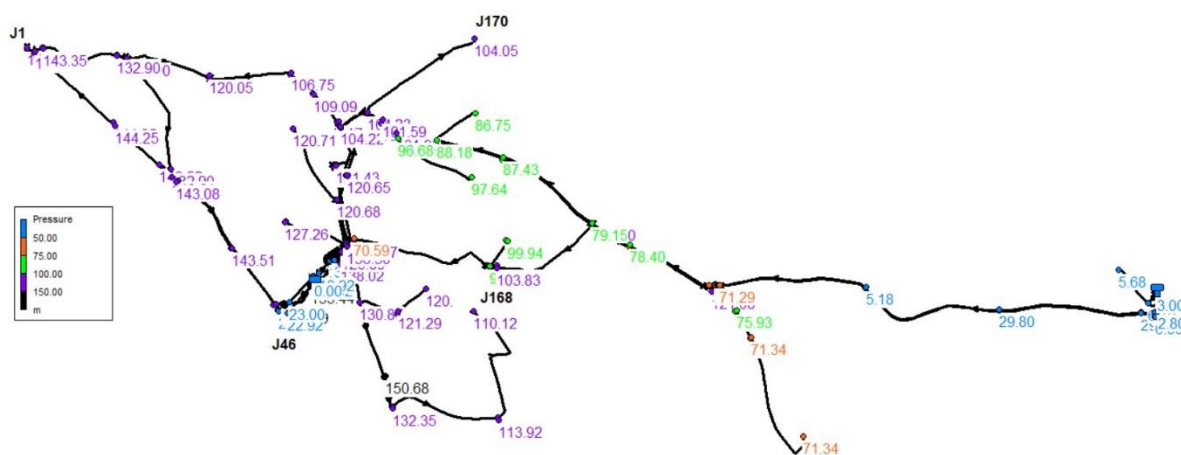


Slika 6.1. Čvorovi iz kojih će se odvoditi voda za gašenje požara

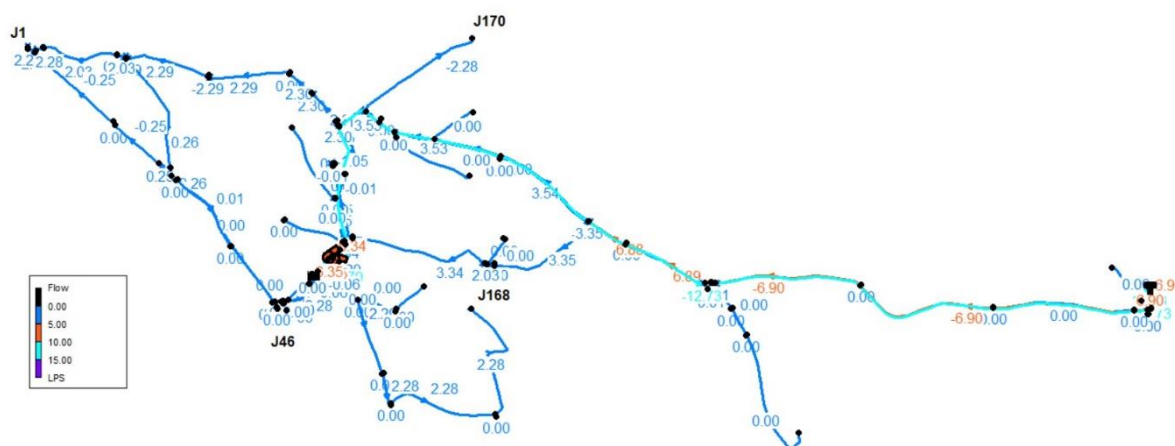


Slika 6.2. Čvorovi iz kojih će se odvoditi voda za gašenje požara na digitalnom ortografu

Postupak analize je isti kao u prethodnom poglavlju. Ako je zadana prevelika osnovna potražnja tlak u čvorovima i protok u cijevima bit će jednak ili manji od nule što znači da je dotok vode zaustavljen i zahtjev je prevelik. Raznim pokušajima, za navedena četiri čvora, dobivena je vrijednost od 5,7 l/s osnovne potražnje koju mreža može zadovoljiti (Slike 6.3. i 6.4).



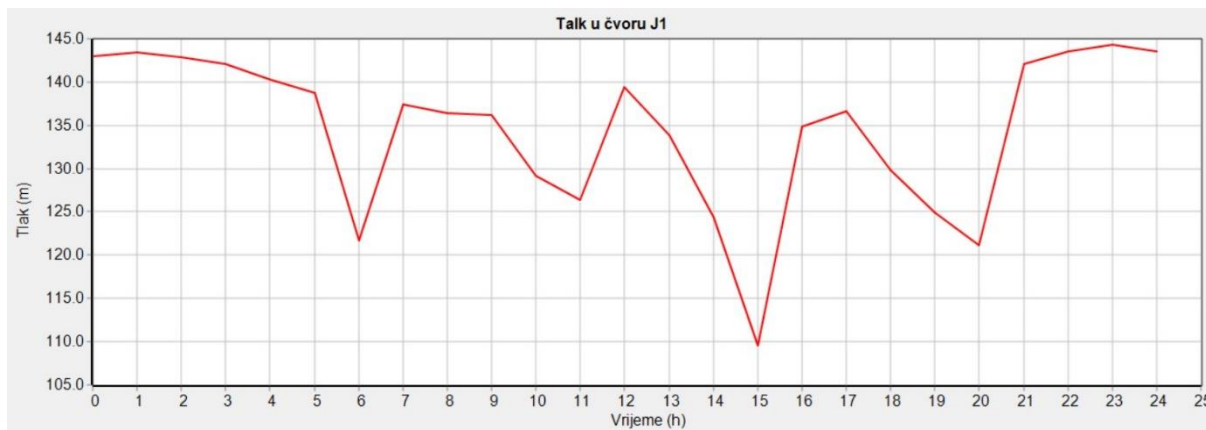
Slika 6.3. Tlakovi u svim čvorovima mreže u slučaju požara



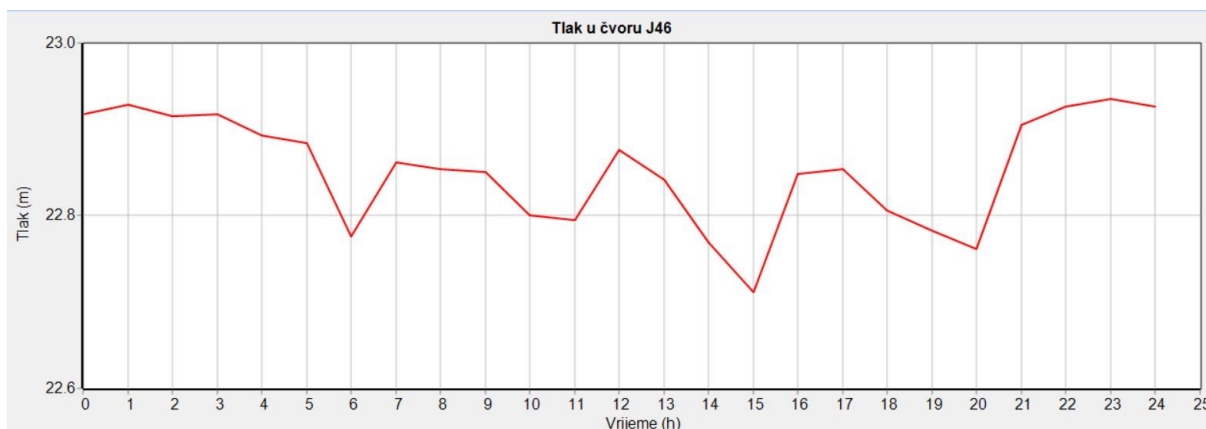
Slika 6.4. Protoci u svim cijevima mreže u slučaju požara

Na slikama je vidljivo da su se tlakovi u čvorovima smanjili zbog povećanja protoka u cijevima. Na sljedećim slikama prikazani su grafovi tlak-vrijeme za svaki navedeni čvor. Tlak ni u jednom trenutku ne pada ispod nule te je dovod vode konstantan u svim čvorovima. Tlak u čvoru J46 iznosi 22 m dok u ostala tri čvora prelazi 100 m. Naime, voda slobodno teče kroz cijev 1314, nizvodno iz rezervoara u čvor J46. Visina energije čvora J46 je gotovo jednaka visini rezervoara pa je tlak jednak razlici visine rezervoara (115 m) i visine čvora J46 (93 m).

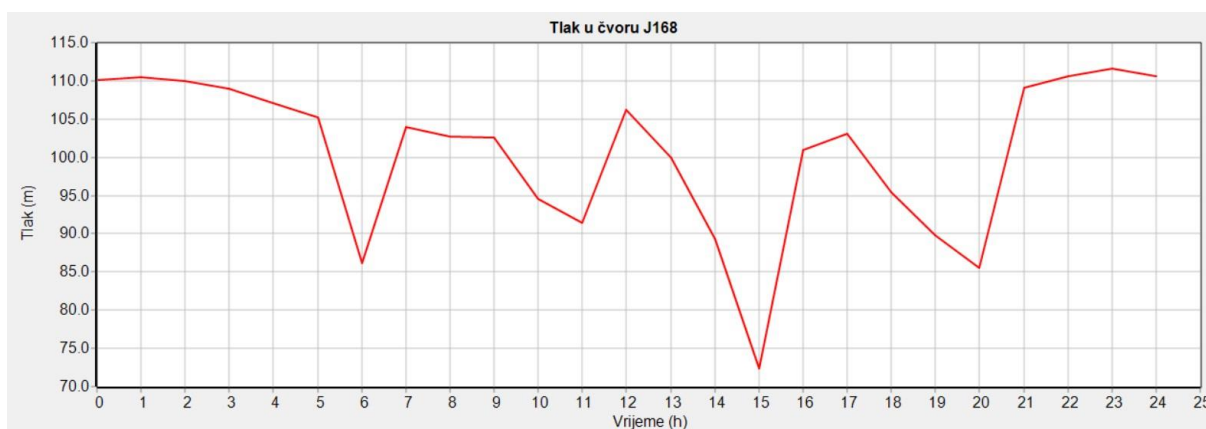
U cijevima koje su povezane na ostala tri čvora, voda se doprema pumpom iz rezervoara te se podiže na veću nadmorsku visinu. Pumpa stvara velike tlakove na ulazu cijevi pa se ukupna vrijednost tlaka povećava.



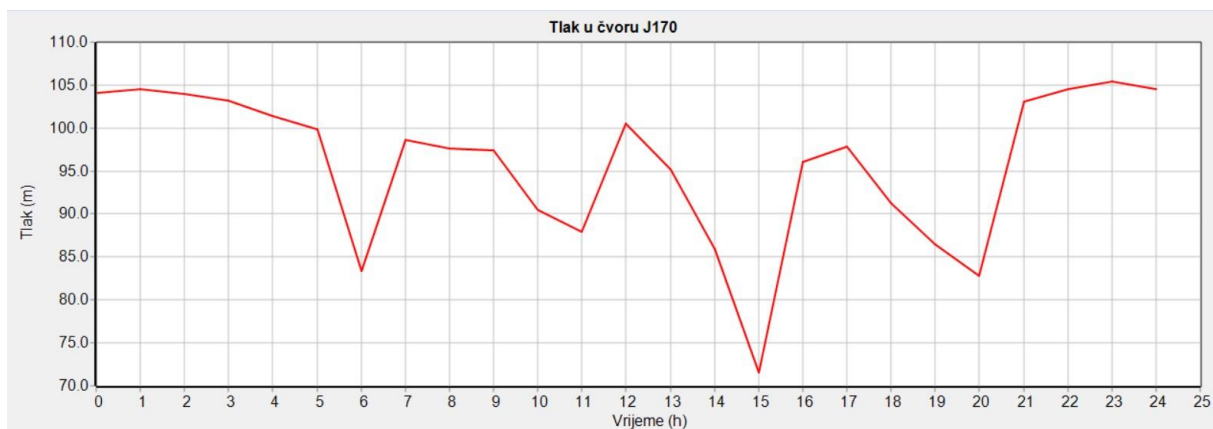
Slika 6.5. Graf tlak-vrijeme u čvoru J1 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s



Slika 6.6. Graf tlak-vrijeme u čvoru J46 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s

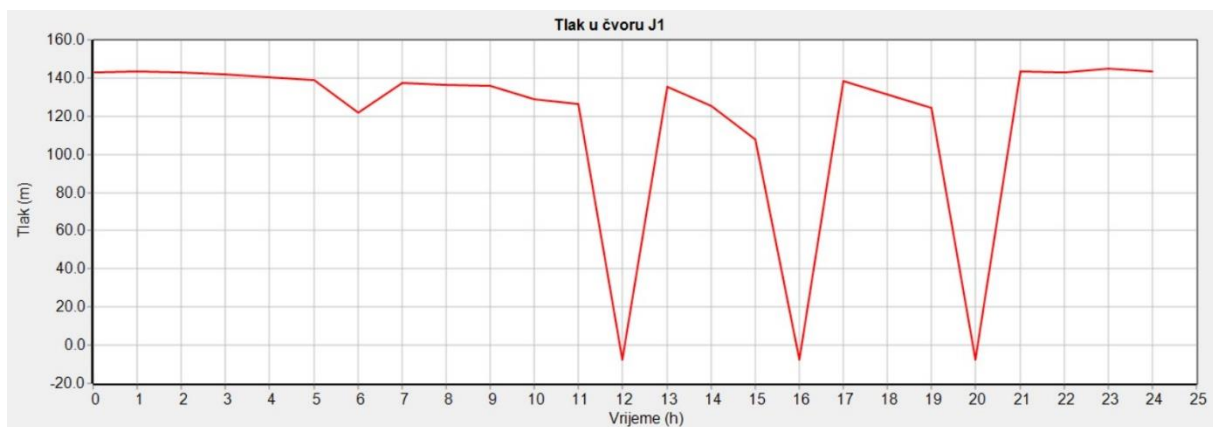


Slika 6.7. Graf tlak-vrijeme u čvoru J168 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s

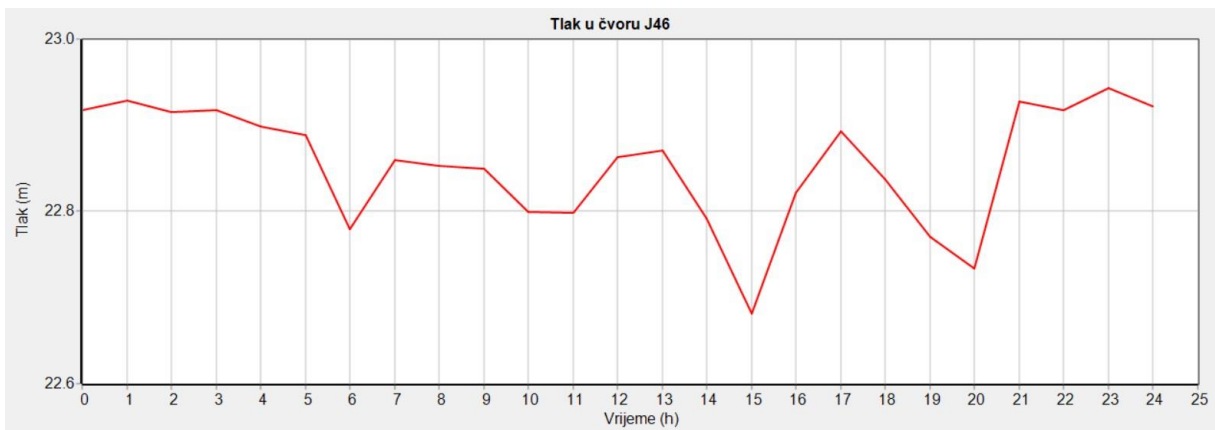


Slika 6.8. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s

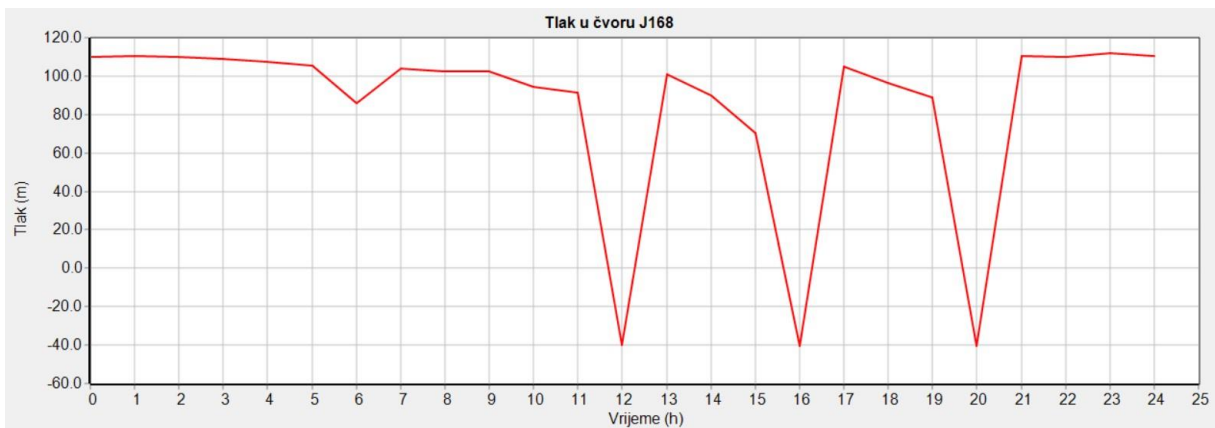
Za provjeru može se samo jednome čvoru povećati osnovna potražnja na 5,8 l/s i odmah u svim čvorovima padne tlak ispod nule u određenim satima, osim čvora J46 kojemu tlak ostaje isti (prikazano na sljedećim slikama).



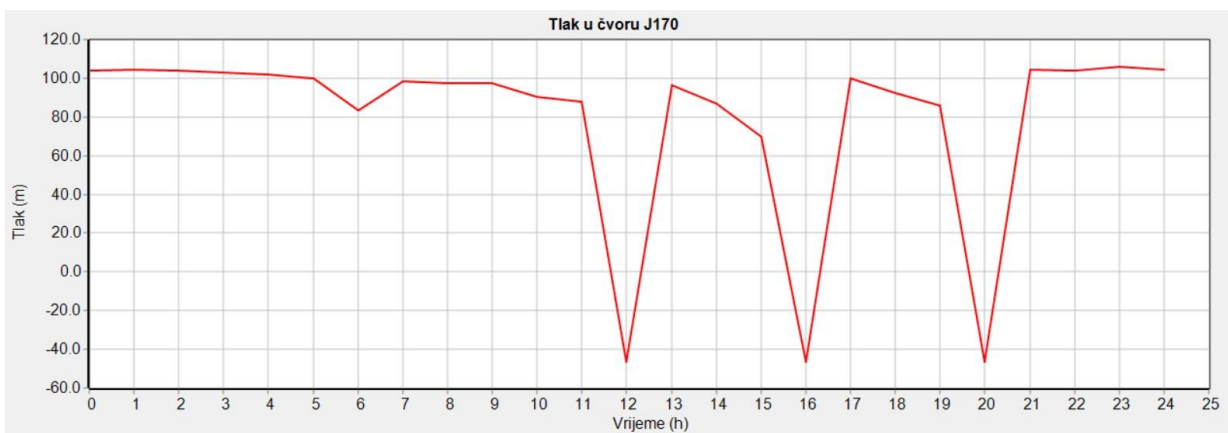
Slika 6.9. Graf tlak-vrijeme u čvoru J1 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s



Slika 6.10. Graf tlak-vrijeme u čvoru J46 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s



Slika 6.11. Graf tlak-vrijeme u čvoru J168 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s



Slika 6.12. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s

Iz priloženog može se zaključiti da je granična vrijednost osnovne potražnje 5,7 l/s pri kojoj se u svakom trenutku dovodi voda u čvorove. Dobivena vrijednost je izrazito velika, čak 1267 puta veća od osnovne potražnje jednog potrošača. Kada se zbroji osnovna potražnja svakog pojedinog čvora, sveukupna osnovna potražnja ova četiri čvora koju mreža u svakom trenutku može zadovoljiti iznosi 22,8 l/s. Vrijednost zadovoljava zahtjev za zaštitu naseljenog mjesta od požara.

U tablici 6.1. prikazano je koliko je potrebno vode za gašenje požara ovisno o njegovom specifičnom opterećenju MJ/m<sup>2</sup> i tlocrtnoj površini objekta m<sup>2</sup>. Vidljivo je da se ovisno o specifičnom požarnom opterećenju može ugastiti požar na tlocrtnoj površini od minimalno 300 m<sup>2</sup> i maksimalno 10 000 m<sup>2</sup>. [3]

Tablica 6.1. Potrebna količina vode za gašenje požara

Specifično požarno opterećenje, [MJ m <sup>-2</sup> ]	Najmanji protok, [l s <sup>-1</sup> ], ovisno o tlocrtnoj površini objekta, [m <sup>2</sup> ], koji se štiti							
	≤ 100	101 do 300	301 do 500	501 do 1 000	1 001 do 3 000	3 001 do 5 000	5 001 do 10 000	> 10 000
≤ 200	10	10	10	10	10	10	10	15
≤ 500	10	10	10	10	15	20	20	25
≤ 1 000	10	10	10	15	20	20	25	30
≤ 2 000	10	10	15	20	25	30	35	*
> 2 000	10	15	20	30	30	35	*	*

## 7. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad obuhvaća izradu hidrauličke mreže mjesta Glavani te razmatranje promjena protoka i tlakova. Za izradu modela korišten je program QGIS, a za proračun modela EPANET. Oba softvera su besplatni programi za modeliranje vodoopskrbnog sustava i hidrauličku analizu koja se temelji na osnovnim zakonima mehanike fluida.

Mreža je pomoću preuzetih datoteka uspješno izrađena u QGIS-u te prebačena u EPANET. Hidraulički proračun u EPANET-u izvršen je za vremenski period od 24 sata. Odmah je utvrđeno da su tlakovi u čvorovima previsoki te da su protoci gotovo jednaki nuli, stoga je potrebno ugraditi ventile za regulaciju tlaka koji ne smije prelaziti vrijednost od 6,5 bar.

Izvršena je simulacija vodoopskrbnog sustava u dva slučaja:

- Proširenje mreže u čvoru J170 radi opskrbe novog naselja. Vodovodna mreža je sposobna opskrbiti naselje s brojem stanovnika većim od općine Kostrena te smanjiti tlakove u sustavu.
- Kapacitet mreže u slučaju nastanka požara. Iz zadana četiri čvora, odnosno četiri zamišljena hidranta moguće je ugasiti požar na površini od 300 do 10 000 m<sup>2</sup>. Dobiveni rezultat zadovoljava zahtjev za zaštitu naseljenog mjesta od požara.



## 8. LITERATURA

- [1] „Podatci o Riječkom cjevovodu“, s Interneta, <https://www.kd vik-rijeka.hr/>, 8. rujna 2022.
- [2] US Environmental Protection Agency, EPANET 2.2 User Manual 2020.
- [3] Kirin I.: „Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara“, Narodne novine, broj: 511-01-52-89075-2005, Zagreb, 10. siječnja 2006.

## 9. POPIS OZNAKA, VELIČINA I JEDINICA

$m$	metar, mjerna jedinica za dužinu
$l/s$	litara sekundi, mjerna jedinica za protok
$bar$	mjerna jedinica za tlak
$g$	gravitacijsko ubrzanje / $m/s^2$
$Q$	stvarni protok / $m^3/s$
$p$	tlak / bar
$\rho$	gustoća / $kg/m^3$
$z$	geometrijska visina / m
$H$	visina energije / m
$v$	brzina / m/s

## 10. SAŽETAK

U radu je opisan postojeći sustav vodoopskrbne mreže Glavana sa svim elementima te njihovim karakteristikama. Za izradu mreže korišten je softver QGIS, a za numeričku analizu korišten je EPANET. Napravljena je analiza postojećeg stanja protoka i tlakova unutar vodoopskrbne mreže.

Analizirane su situacije opskrbe vodom novog naselja te za potrebe gašenja požara. Dobiveni rezultati su zadovoljavajući, pokazano je da mreža može dodatno opskrbiti poprilično veliko naselje kao i osigurati gašenje požara većih razmjera.

**Ključne riječi:** vodovodna mreža, QGIS, EPANET

## **11. SUMMARY**

The paper describes the existing water supply network of the location Glavani with its elements and their characteristics. QGIS software is used to create the network and EPANET is used for numerical analysis. An analysis of the current state of flow and pressures inside the network was made.

The analyzed situations are: supply of the new settlement and supply in the occurrence of fire. The obtained results are satisfactory, the network can additionally supply a rather large settlement as well as ensure the extinguishing of a very demanding fire.

**Keywords:** water network, QGIS, EPANET

## 12. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Digitalni ortofoto s vodovodnom mrežom</i> .....	3
<i>Slika 2.2. Topografska karta s vodovodnom mrežom</i> .....	3
<i>Slika 3.1. Sučelje dodatka QGIS Red</i> .....	4
<i>Slika 3.2. Vrste preuzetih datoteka</i> .....	5
<i>Slika 3.3. Umetanje elemenata u program</i> .....	5
<i>Slika 3.4. Mijenjanje izvora datoteke</i> .....	6
<i>Slika 3.5. Gotova mreža u QGIS-u</i> .....	6
<i>Slika 3.6. Izvoz u INP datoteku</i> .....	7
<i>Slika 3.7. Skraćena INP datoteka</i> .....	7
<i>Slika 4.1. Svojstva čvora J1</i> .....	11
<i>Slika 4.2. Svojstva cijevi 10588</i> .....	12
<i>Slika 4.3. Svojstva rezervoara</i> .....	13
<i>Slika 4.4. Svojstva spremnika za vodu</i> .....	14
<i>Slika 4.5. Dijagram potrošnje vode po satima za stanovništvo</i> .....	15
<i>Slika 4.6. Nadmorska visina čvorova mreže</i> .....	17
<i>Slika 4.7. Visina energije čvorova mreže</i> .....	17
<i>Slika 4.8. Osnovna potražnja čvorova mreže</i> .....	17
<i>Slika 4.9. Tlak čvorova mreže</i> .....	18
<i>Slika 4.10. Protok vode u cijevima</i> .....	18
<i>Slika 4.11. Brzina vode u cijevima</i> .....	18
<i>Slika 4.12. Promjer cijevi</i> .....	19
<i>Slika 4.13. Duljina cijevi</i> .....	19
<i>Slika 4.14. Faktor trenja u cijevima</i> .....	19
<i>Slika 4.15. Krivulja pumpe</i> .....	20
<i>Slika 4.16. Upozorenje o zatvaranju pumpi</i> .....	21
<i>Slika 4.17. Upozorenje o nestabilnom sustavu</i> .....	21
<i>Slika 5.1. Pozicija čvora J170 u mreži</i> .....	22
<i>Slika 5.2. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 0,0045 l/s</i> .....	22
<i>Slika 5.3. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 0,0045 l/s</i> .....	23
<i>Slika 5.4. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 50 l/s</i> .....	23
<i>Slika 5.5. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 50 l/s</i> .....	24
<i>Slika 5.6. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 20 l/s</i> .....	24

<i>Slika 5.7. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 20 l/s .....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 5.8. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 10 l/s.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 5.9. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 10 l/s .....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 5.10. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 13,6 l/s.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 5.11. Graf protok-vrijeme za cijev 28824 kada je osnovna potražnja 13,6 l/s .....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 6.1. Čvorovi iz kojih će se odvoditi voda za gašenje požara.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 6.2. Čvorovi iz kojih će se odvoditi voda za gašenje požara na digitalnom ortografu .....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 6.3. Tlakovi u svim čvorovima mreže u slučaju požara .....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 6.4. Protoci u svom cijevima mreže u slučaju požara .....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 6.5. Graf tlak-vrijeme u čvoru J1 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s .....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 6.6. Graf tlak-vrijeme u čvoru J46 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 6.7. Graf tlak-vrijeme u čvoru J168 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 6.8. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 5,7 l/s.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 6.9. Graf tlak-vrijeme u čvoru J1 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s .....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 6.10. Graf tlak-vrijeme u čvoru J46 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 6.11. Graf tlak-vrijeme u čvoru J168 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 6.12. Graf tlak-vrijeme u čvoru J170 kada je osnovna potražnja 5,8 l/s.....</i>	<i>31</i>

### **13. POPIS TABLICA**

*Tablica 6.1. Potrebna količina vode za gašenje požara..... 32*