

Hidraulička analiza sustava Valtura s prijedlogom poboljšanja

Škoda, Karmelo

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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:190:284640>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**HIDRAULIČKA ANALIZA SUSTAVA VALTURA S
PRIJEDLOGOM POBOLJŠANJA**

Rijeka, rujan 2019.

Karmelo Škoda

0069076521

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**HIDRAULIČKA ANALIZA SUSTAVA VALTURA S
PRIJEDLOGOM POBOLJŠANJA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Komentor: izv. prof. dr. sc. Siniša Družeta

Rijeka, rujan 2019.

Karmelo Škoda

0069076521

Rijeka, 8. ožujka 2019.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**
Predmet: **Mehanika fluida**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Karmelo Škoda (0069076521)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Hidraulička analiza sustava Valtura s prijedlogom poboljšanja/Valtura
System Hydraulic Analysis with Improvements**

Opis zadatka:

S hidrauličkog motrišta opisati sustav navodnjavanja Valtura. Teoretski obraditi gubitke strujanja. Koristiti komercijalni softver za definiranje geometrije i potrebnih fizikalnih parametara sustava. Proračunati sve lokalne i duljinske gubitke te analizirati sustav pri različitim režimima navodnjavanja i predložiti poboljšanja sustava.

Završni rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Polje znanstvenog područja: Temeljna tehničke znanosti.
Grana znanstvenog područja: Mehanika fluida.

Karmelo Škoda

Zadatak uručen pristupniku: 18. ožujka 2019.
Rok za predaju rada: 14. svibnja 2020.

Mentor:

Lado Kranjčević

prof. dr. sc. Lado Kranjčević
Siniša Družeta

izv. prof. dr. sc. Siniša Družeta (komentor)

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Kristian Lenić

prof. dr. sc. Kristian Lenić

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Sukladno članku 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno, u suradnji s mentorom izradio završni rad na temu „HIDRAULIČKA ANALIZA SUSTAVA VALTURA S PRIJEDLOGOM POBOLJŠANJA“ u razdoblju od 18. ožujka do 16. rujna 2019. godine.

Rijeka, rujan 2019.

Karmelo Škoda

0069076521

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA NAVODNJEVANJA	2
2.1. Akumulacijsko jezero Bakranjuša	3
2.2. Crpna stanica.....	4
2.3. Cjevovodi	8
2.4. Rolomat.....	11
3. TEORIJA STRUJANJA U CIJEVIMA	12
3.1. Glavna svojstva fluida.....	12
3.1.1. Gustoća	12
3.1.2. Viskoznost.....	12
3.2. Zakon očuvanja mase.....	14
3.3. Zakon očuvanja količine gibanja	15
3.4. Bernoullijeva jednadžba.....	16
3.5. Računanje gubitaka strujanja u realnom cjevovodu.....	18
3.5.1. Dužinski gubici	18
3.5.2. Lokalni gubici	20
4. TEHNIČKI PODACI I PRIKAZ MODELIRANJA	21
4.1. Applied Flow Technology (AFT) Fathom	21
4.2. Primjer načina rada u AFT Fathomu.....	22
4.3. Geometrija distribucijskih cijevi sustava navodnjavanja	24
5. HIDRAULIČKA ANALIZA	26
5.1. Slučaj 1: Zona A	27
5.2. Slučaj 2: Zona B.....	28
5.3. Slučaj 3: Zona A i B.....	29
5.4. Slučaj 4: Cijeli sustav.....	31
5.5. Slučaj 5: Prošireni sustav	33
5.5.1. Računanje gubitaka za dodani cjevovod	37
5.5.2. Dužinski gubici u dodanom cjevovodu.....	37
5.5.3. Lokalni gubici u dodanom cjevovodu.....	39
6. ZAKLJUČAK	40
7. LITERATURA	41
8. DODACI	42
8.1. Popis slika	42
8.2. Popis tablica	44
SAŽETAK	45
ABSTRACT	46

1. UVOD

Uloga navodnjavanja je poboljšati fizička svojstva tla dodavanjem određene količine vode na umjetan način s ciljem postizanja najpovoljnije razine vlage za vrijeme vegetacije te u konačnosti dobivanje optimalnog uroda. Općenito navodnjavanje služi u uzgoju poljoprivrednih kultura, održavanju krajolika i obnavljanju tla u suhim područjima ili tijekom razdoblja sa malom količinom oborina. Navodnjavanje također ima i primjenu u proizvodnji usjeva, uključujući zaštitu od smrzavanja, suzbijanje rast korova na poljima žita i sprječavanje konsolidacije tla.

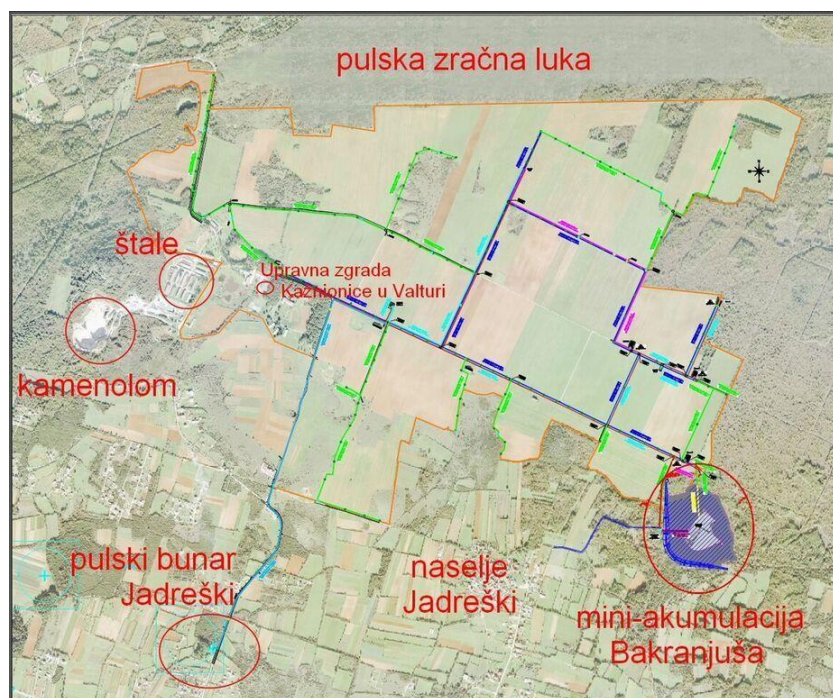
Štoviše navodnjavanje se koristi i za hlađenje stoke, suzbijanje prašine, odlaganje kanalizacijskih voda i u rudarstvu. U Hrvatskoj se navodnjava oko 0,46% poljoprivrednih površina ili približno 10 000 ha, a te su površine daleko ispod realnih potreba i mogućnosti. S obzirom na taj podatak Hrvatska se smješta na jedno od posljednjih mjesta u Europi što se tiče navodnjavanja. Potrebe navodnjavanja u svrhu biljne proizvodnje nisu jednaka na cijelom prostoru Hrvatske. Navodnjavanje se u ravničarskom dijelu Hrvatske primjenjuje kao dopunska mjera, dok se u primorskim, južnim krajevima navodnjavanje primjenjuje kao redovita mjera za gotove sve kulture.

U ovom završnom radu promatrati ćemo sustav navodnjavanja Valtura. Tu se nalazi kaznionica gdje kroz društveno koristan rad zatvorenici izvršavaju svoju kaznu. U prvom dijelu rada s hidrauličkog motrišta je opisan sustav navodnjavanja Valtura. Nadalje, teoretski su obrađeni gubici strujanja. U drugom dijelu završnog rada analiziran je način rada sustava u raznim slučajevima te sa dodatnim poljem za navodnjavanje.

2. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA NAVODNJAVANJA

Danas, kaznionica u Valturi koristi čak 440 ha poljoprivredne površine u Valturskom polju za vlastitu poljoprivrednu proizvodnju. Uzgajaju se ratarske kulture (400 ha), povrtlarske kulture (30 ha) te vinogradi i masline (10 ha).

Na samom početku 50ih i 60ih godina, sustav navodnjavanja pokrivaio je svega polovicu današnje poljoprivredne površine, a sastojao se od tri bunara (ukupnog kapaciteta 46 l/s) i četiri akumulacijskih bazena (od kojih je u kasnijim godinama samo jedan ostao u funkciji) te pripadnog cjevovoda. Zbog neispravnosti sustava i prevelike poljoprivredne površine javila se potreba za obnovom i proširenjem sustava. Trenutni sustav navodnjavanja sastoji se od akumulacije Bakranjuša, crpne stanice, proširene cjevovodne mreže za distribuciju te tri bunara s pripadnim bazenima i cjevovodnom mrežom za prebacivanje vode iz bunara u akumulaciju Bakranjuša. Nadalje, izgrađen je cjevovod dug 2,3 km koji je povezan na izvor Jadreški iz kojega se po potrebi dovodi voda u akumulaciju Bakranjuša.



- Obuhvat sustava navodnjavanja Kaznionice, 440 ha
- Tlačni distribucijski cjevovod saniran 2009.-2011., cca. 8km
- Novi tlačni distribucijski cjevovod u izgradnji 2012.-2014., cca. 5km
- Novi dovodni cjevovod u izgradnji 2012.-2014., cca. 2,3 km

Slika 2.1. Shema sustava za navodnjavanje Valtura

2.1. Akumulacijsko jezero Bakranjuša

Sustav navodnjavanja Valtura započinje sa akumulacijskim jezerom Bakranjuša (Slika 2.3.) koji ima ulogu spremnika iz kojeg se crpi voda koja služi za navodnjavanje. Jezero je umjetno izgrađeno 2015. godine u mjestu Šišanu nedaleko od Pule. Ono je izgrađeno na mjestu gdje je već postojala prirodna depresija te površina jezera iznosi 11,7 ha. Kapacitet akumulacijskog jezera iznosi 632.000 metara kubnih sa svojom najnižom točkom koja se nalazi na visini od 47 m iznad razine mora (m.n.m) dok je istovremeno najviša točka do koje se jezero puni 58 m.n.m.

Dno jezera je obloženo PEHD folijom debljine 2 mm te zaštićeno kamenom oblogom. Najvažniji dio čini nasuta brana dužine 700 m i visine 7 m koja zatvara prirodnu depresiju sa zapadne i južne strane. Kruna brane je široka 5 m, a nagib uzvodnog i nizvodnog pokosa iznosi 1:2. Razlika između najniže točke akumulacije i krune brane je 12,5 m. Jezero se puni tijekom cijele godine količinom od 46 l/s pomoću pumpa koje crpe vodu iz obližnjih bunara. Dovod vode je omogućen zahvaljujući betonskom kanalu i mreži dovodnih cjevovoda. Kod svake akumulacije nužna je kontrola odnosno mjerenje razine vode koje se izvodi preko mjerenja tlaka kojim voda djeluje na dno, a za to koristimo hidrostatske mjerače.



Slika 2.2. Akumulacijsko jezero Bakranjuša prilikom izgradnje



Slika 2.3. Današnji prikaz akumulacijskog jezera

2.2. Crpna stanica

Crpna stanica Bakranjuša je građevina ukopanog tipa na -8.8 m, dimenzija 12,3 x 8 m, a služi za smještaj crpki i ostale hidromehaničke i elektro-opreme. Ona je udaljena od akumulacije 12 m, a s njom je povezana s dvostrukim usisnim PEHD cjevovodom, nazivnog promjera DN500 koji je dug 135 m. U njoj se nalazi sabirni cjevovod duljine 7,7 m i vezni elementi. Uloga veznih elementa je da spajaju sabirni cjevovod i crpke, a njih čine: cijevi ukupne duljine 1,3 m, koljena (90°), redukcija između cijevi (DN 300/250, DN 250/200) i leptirasti zaporni ventili.


U crpnoj stanici smještene su paralelno četiri visokotlačne višestupanjske centrifugalne pumpe u člankastoj izvedbi čiji je proizvođač „Croatia pumpe“. Tri su pumpe radne dok se četvrta koristi po potrebi. Svaka pumpa ima maksimalnu snagu od 160 kW sa kapacitetom od minimalno 60 l/s. Nazivni broj okretaja ovih pumpi je 1485 o/min sa korisnošću od 94,9 %. Potrebna snaga na vratilu je 128,5 kW, uz stupanj djelovanja od 74,9 %. Ove pumpe imaju zatvoreni radijalni rotor s kugličnim ili valjkastim ležajevima koji se održavaju podmazivanjem s mašću. Na izlazu crpke je spojen cjevovod koji odvodi vodu te je distribuirao po obradivoj površini. Na ulaznoj i izlaznoj strani crpke se nalaze priključci nazivnog promjera DN 200. Za potrebe crpne stanice izgrađena je trafostanica sa snagom od 481 kW.



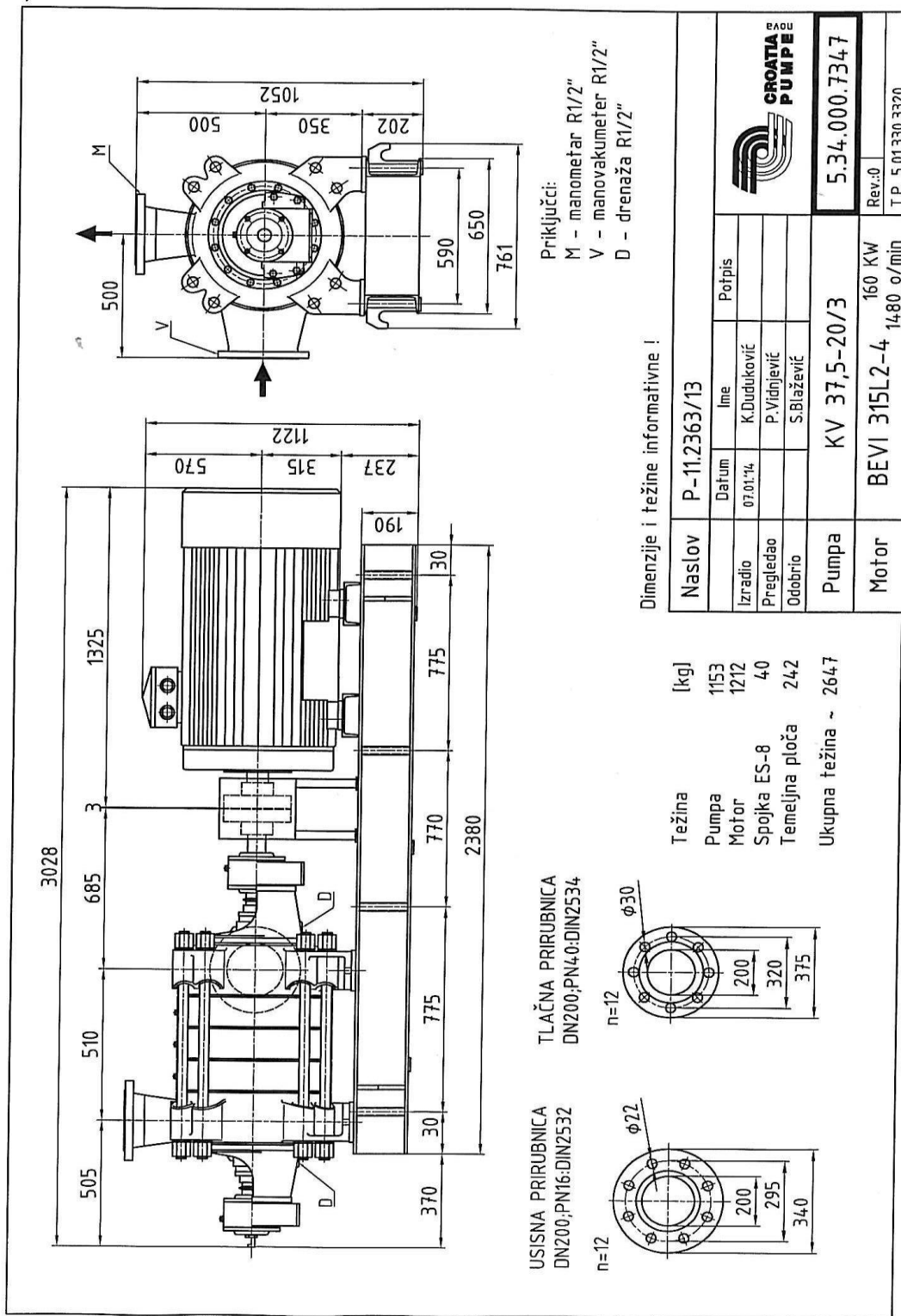
Slika 2.4. Sabirni cjevovod



Slika 2.5. Četiri visokotlačne centrifugalne pumpe

		List tehničkih podataka:			11.2363/13		
		KV 37,5-20/3			List: 1/1		
Kupac:		Namjena:			Pozicija:		Kom.
Vodotehnika d.d.		Pumpa čiste vode			1.		4
PODACI O MEDIJU:				POGONSKI PODACI:			
01.	Medij	Čista voda		33.	Količina dobave	85 l/s	
02.	Temperatura Medija, T.M.	20 °C		34.	Visina dobave	115 m	
03.	Gustoća @ T.M.	1000 kg/m ³		35.	NPSH	2,75 m	
04.	Kinematički viskozitet @ T.M.	1 cSt		36.	Nazivni broj okretaja-nominalni	1485 o/min	
05.	Tlak isparavanja @ T.M.	0,02 bar,a		37.	Potrebna snaga na vratilu	128,5 kW	
06.	PH vrijednost @ T.M.	7		38.	Stupanj djelovanja	74,9 %	
07.	Sadržaj krutih tvari	No		39.	Ugrađena snaga	160 kW	
08.	Veličina čestica	-		40.	Broj stupnjeva	3	
09.				41.	Smjer okretaja gledano sa PS 1	desni	
MATERIJALI:				RADNI UVJETI:			
10.	Kučišta	EN-GJL 250 (SL 25)		42.	Tlak na ulazu u crpku	0 bar	
11.	Kolo rotora	EN-GJL 250 (SL 25)		43.	Tlak na izlazu iz crpke	11,3 bar	
12.	Rasporni prsten	EN-GJL 250 (SL 25)		44.	Ispitni tlak kućišta	1,7 MPa	
13.	Vratilo	42CrMo4 (Č.4732)		45.	Hlađenje brtvenog prostora	-	
14.	Statorska kola	EN-GJL 250 (SL 25)		46.	Hlađenje ležajeva	-	
15.	Tuljak vratila	EN-GJL 250 (SL 25)		47.	Brtvena voda m ³ /h / bar	-	
16.				48.	Kategorija prostora	neeksplozivna	
17.	Temeljna ploča	S235JRG2 (Č.0361)		49.	NPSH raspoloživi	- m	
18.	Spojka	EN-GJL 250 (SL 25)		MOTOR:			
19.				50.	Proizvođač	BEVI	
KONSTRUKCIJA:				51.	Tip / Oblik / IP	3D 315L2-4	B3 IP 55
20.	Montaža kućišta	horizontalno		52.	Snaga / Koristnost	160 kW	94,9 %
21.	Rastavljanje kućišta	radijalno		53.	Broj okretaja	1480 o/min	
22.	Tip kućišta	sekciono		54.	Napon / Frekven.	400 V	50 Hz
23.	Prirubnica	DN	PN	DIN	Položaj	55. Nazivna / Potezna struja	
24.	Usis	200	16	2533	HD	341,8	2358,4
25.	Tlak	200	40	2535	VG	56. PEX zaštita	
						Ne	
26. Tip rotora				SPECIFIKACIJA OPREME I USLUGA			
		radijalni - zatvoreni		57.	Naziv dijela	Opseg isporuke	
27.	Ležajevi	kuglični/valjkasti		58.	Pumpa	+	
28.	Podmazivanje	mast		59.	Motor	+	
29.	Brtvljenje	mehanička brtva		60.	Temeljna ploča + štitnik spojke	+	
30.	Tip brtve			61.	Spojka	+	
31.				62.			
32.	Spojka, tip / veličina	Elastična; ES-8		63.			
33.				64.			
NAPOMENE:							
- Položaj prirubnice: Usis - HD-Horizontalno desno Tlak - VG-vertikalno gore							
AKZ (Anti korozivna zaštita) - Osnovni premaz - Dvokomponentni epoksi cink premaz 2 x 40+50 µm Završni premaz - Dvokomponentni epoksi premaz 2 x 40+50 µm (RAL5015-plava)							
Izdavao:	P.Vidnjević		Pregledao:	S.Blažević		Odobrio:	
						Datum:	2014-01-07
						Rev.	0

Slika 2.6. Osnovne informacije o korištenoj pumpi



Slika 2.7. Prikaz nacrtu pumpe

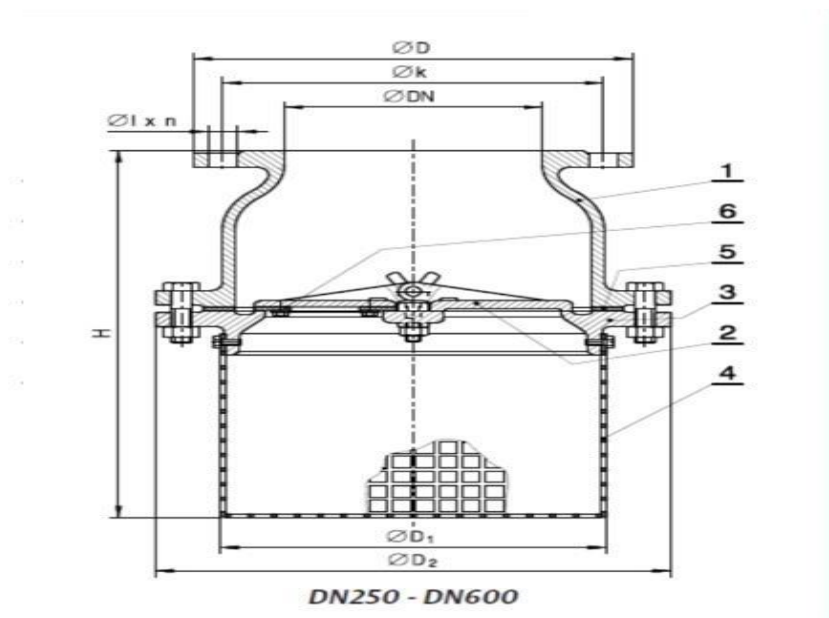
2.3. Cjevovodi

S pomoću dvije paralelne dovodne cijevi koje su smještene u iskopanom tunelu duljine 130 m i promjera 1,6 m omogućeno je dovođenje vode iz akumulacijskog jezera do crpne stanice. To su cijevi od polietilena, dužine 130 m te nazivnog promjera DN600. Jedna cijev se stalno koristi dok se druga cijev upotrebljava u slučaju oštećenja ili začepljenja prve cijevi. Karakteristika ovih cijevi je da imaju vrlo nisku hrapavost radi materijala od kojeg su napravljene što je pogodno za fluid poput vode jer što je manja hrapavost bit će u konačnosti manji dužinski gubici.



Slika 2.8. Dovodne cijevi u tunelu

Na usisu ovih cijevi nalazi se usisna košara, prikazana na slici 2.9. Uloga ovih košara je da spriječi prolaz krutih čestica odnosno nečistoća iz akumulacijskog jezera u crpnu stanicu. Na kraju usisne cijevi odnosno u košari nalazi se nepovratni ventil koji služi da se usisna cijev potpuno ne isprazni.



Slika 2.9. Usisna košara

Između akumulacije i crpne stanice nalazi se revizorsko okno (Slika 2.10.) dimenzija 3 x 3 m i visine 13,2 m. U okno dolazi voda iz dovodnog cjevovoda te se ponovno usisava u dvije cijevi nazivnog promjera DN500 i duljine 1 m koje vode u crpnu stanicu. Tu se pojavljuju dva lokalna gubitka uzrokovana istjecanjem vode iz dovodnog cjevovoda i usisom vode u cijevi prema pumpama.

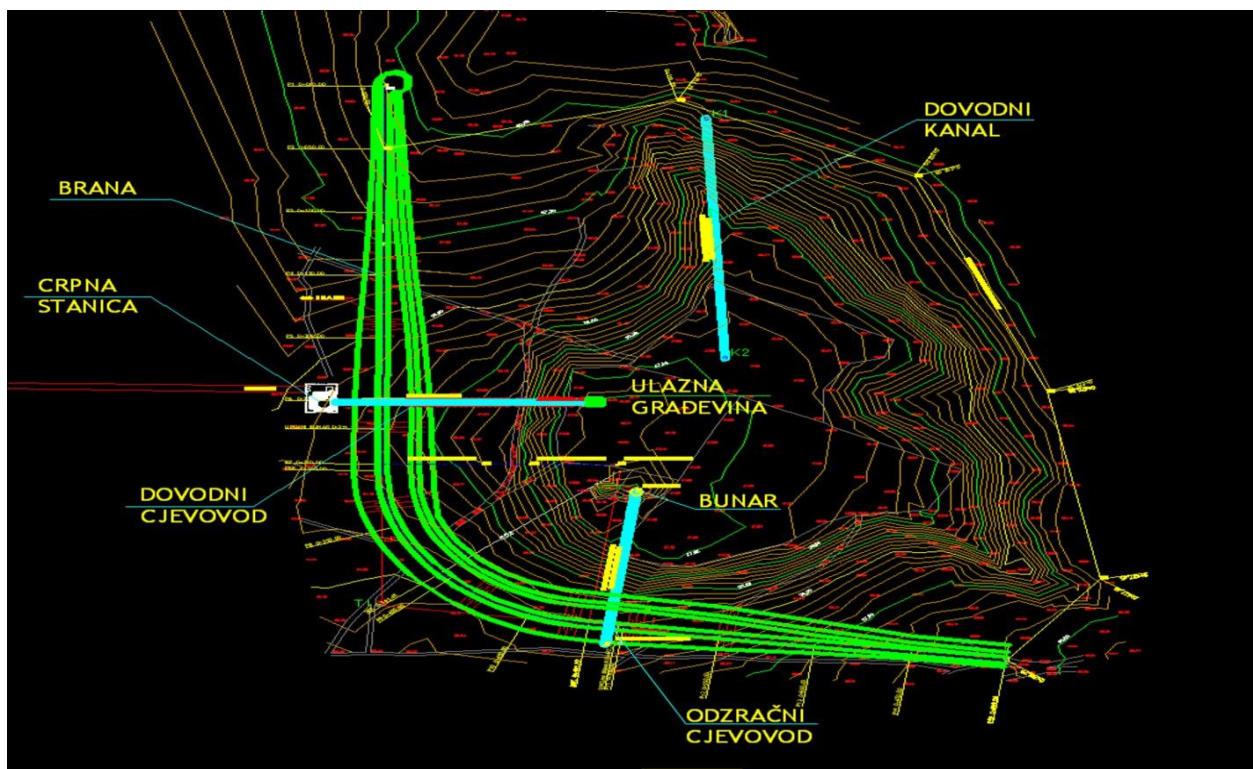


Slika 2.10. Revizijsko okno



Slika 2.11. Cijevi na ulazu u crpnu stanicu

Ostatak cjevovoda sustava sastoji se od tlačnog opskrbnog cjevovoda dužine 4223 m i nazivnih promjera (DN100, DN150 i DN200), dovodnog cjevovoda iz bunara Jadreški, dužine 2330 m s promjerom DN300 te od cjevovoda koji služe za navodnjavanje i distribuciju, a imaju ukupnu duljinu 14415 m, promjera DN 100, 125, 200 i 300. Na distribucijskim cjevovodima se nalazi hidranti promjera 100 mm na razmacima od 80 m. Hidranti se većinom koriste u svrhu navodnjavanja, ali neki mogu imati funkciju odzračnih ventila ili muljnih ispusta.



Slika 2.12. Prikaz akumulacije i ostatka sustava

2.4. Rolomat

Rolomat je transportni uređaj za navodnjavanje na kojem se nalazi namotana cijev. On sadrži jednu prijenosnu snažnu glavu raspršivača koji ima ulogu prskanja vode u kružnom obliku. Taj raspršivač je povezan sa pomičnim kolicima preko cijevi. Okretanje koluta sa crijevom ostvareno je zahvaljujući radu motora odnosno turbine s kojom se teško crijevo može uvlačiti ili izvlačiti ovisno o potrebi. Turbina koristi energiju gibanja stlačene vode iz pumpa prema rolomatu te postupno namotava crijevo svaki put kada voda struji u sustavu. Pomična kolica rolomata mogu se premjestiti gdje god je potrebno, sve dok su spojena na izvor odnosno na hidrant. Rolomati se mogu bez problema koristiti na poljima nepravilnog oblika, na složenim i pristupačnim područja koja se ne mogu pravilno navodnjavati zbog dalekovoda ili sličnih prepreka. Moderni rolomati sadrže računalo koje omogućuje preciznije i bolje navodnjavanje. Za navodnjavanje u sustavu Valtura trenutno se koriste rolomati tipa OCMIS 110 (Slika 2.13.) i Irrigazione Veneto 110, maksimalnog kapaciteta 25-27 l/s i potrebnog minimalnog tlaka 6 bar.



Slika 2.13. Rolomat OCMIS 110

3. TEORIJA STRUJANJA U CIJEVIMA

3.1. Glavna svojstva fluida

3.1.1. Gustoća

Kod homogenog fluida odnosno fluida koji ima gustoću jednaku u svakoj točki, prava gustoća je jednaka njegovoj prosječnoj gustoći. Gustoća takvog nestlačivog fluida je određena kao omjer ukupne mase fluida i ukupnog volumena koji zauzima fluid.

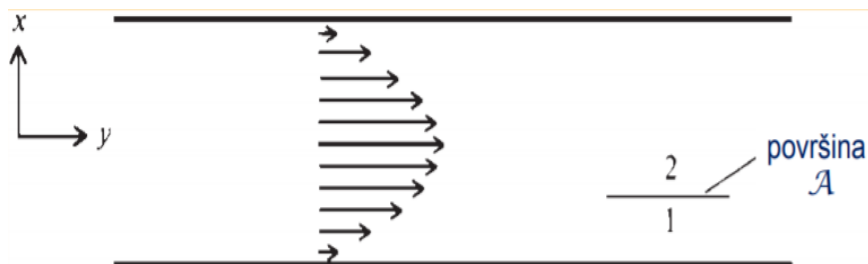
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Kod nehomogenog fluida kad se promatrani volumen razdijeli u manje dijelove, te se na isti način izračuna njihova prosječna gustoća, dobiju se različite vrijednosti odnosno pojedini dijelovi su gušći, dok su drugi rjeđi. Iz tog razloga prava gustoća kod nehomogenog fluida se računa kao gustoća u točki, na način da se odredi granična vrijednost omjera mase i volumena za sve sitniji i sitniji dio tvari oko te točke. Na osnovu ovoga gustoća se definira na način:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (3.2)$$

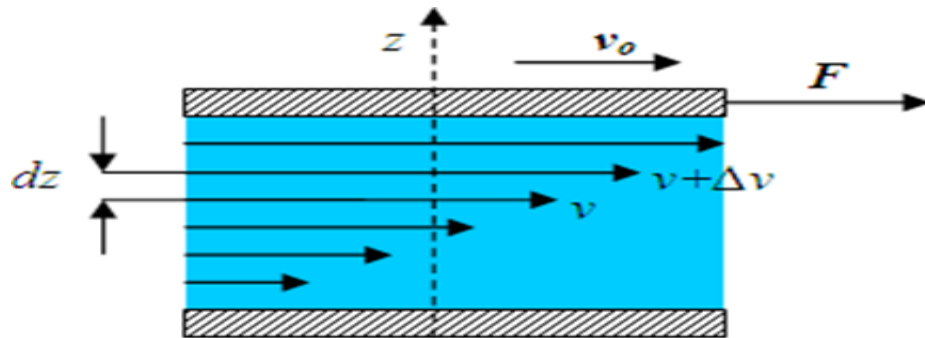
3.1.2. Viskoznost

Viskoznost je svojstvo fluida kod kojega se pojedini slojevi tečenja opiru gibanju jednog u odnosu na drugi. To opiranje se javlja zbog sila viskoznosti koje su slične trenju jer djeluju u smjeru suprotnom od gibanja tekućine te ju usporavaju. Te sile nastaju kao posljedica među molekularnih interakcija s kojima se molekule tekućine međusobno privlače i na taj način se opiru smicanju susjednih slojeva. Na viskoznost također utječe veličina i oblik molekule. Na slici 3.1 je prikazan fluid koji teče između dvije paralelne ploče:



Slika 3.1. Prikaz strujanja fluida kroz dvije ploče

Viskoznost i njezina pripadna svojstva mogu se najlakše prikazati eksperimentom kod kojega imamo fluid i dvije paralelne ploče od kojih je jedna fiksna, a na drugu djeluje sila. Ploča će se gibati konstantnom brzinom v_0 zbog unutarnjeg trenja između ploče i fluida u dodiru što ima za posljedicu da je vanjska sila F uravnotežena sa silom viskoznosti. Tako će gornja ploča povući za sobom sloj fluida u dodiru koji će imati najveću brzinu, a taj dodirni sloj će povući za sobom susjedni sloj koji će imati nešto manju brzinu i tako dalje.



Slika 3.2. Viskoznost

Iz ovoga dobijemo da je sila viskoznosti jednaka sljedećem izrazu:

$$F = \eta S \frac{dv}{dz} \quad (3.3)$$

gdje je η koeficijent viskoznosti, dv/dz je gradijent brzine i S je površina ploče.

Kao posljedica djelovanja sile, nastaje smično naprezanje koje djeluje na fluid između tih ploča.

Ovakvo svojstvo fluida je opisano sa Newtonovim zakonom viskoznosti:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.4)$$

gdje je τ smično naprezanje, du/dy brzina kutne deformacije pri jednodimenzionalnom strujanju fluida, a μ dinamički koeficijent viskoznosti.

Jedno od bitnih karakteristika viskoznosti kod tekućina je ta da se smanjuje povećanjem temperature, dok se promjenom tlaka viskoznost značajno ne mijenja. Često se koristi u inženjerstvu kinematička viskoznost koja opisuje otpor fluida tečenju kad na njega djeluje sila teža. Ova vrijednost se dobije omjerom dinamičkog koeficijenta viskoznosti i gustoće fluida:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.5)$$

3.2. Zakon očuvanja mase

Ovaj zakon se dobije se primjenom Reynoldsovog transportnog teorema, a govori o tome kako se masa ne mijenja neovisno od procesima koji utječu na nju u zatvorenom sustavu. Njime se najbolje opisuje strujanje u cijevima gdje vrijedi da masa na ulazu u kontrolni volumen mora bi jednaka masi na izlazu iz kontrolnog volumena, a to je prikazano ovim izrazom:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \dot{m} \quad (3.6)$$

gdje je v [m/s] srednja brzina po presjeku, ρ [kg/m³] srednja gustoća po presjeku, a \dot{m} [kg/s] maseni protok.

Uvođenjem varijable volumnog protoka koji se dobije umnoškom brzine fluida i poprečnog presjeka cijevi:

$$Q = v A \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (3.7)$$

početni izraz se može svesti na :

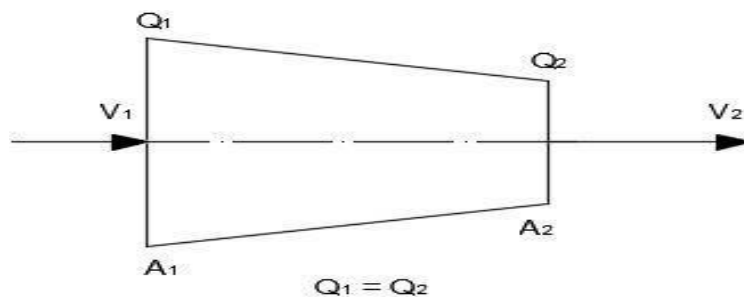
$$\begin{aligned} Q_1 \rho_1 = Q_2 \rho_2 = \dot{m} \\ \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \end{aligned} \quad (3.8)$$

U slučaju stacionarnog strujanja sa nestlačivim fluidom odnosno uz nepromjenjivu gustoću fluida vrijedi da je volumni protok konstantan kroz svaki poprečni presjek cijevi (Slika 3.1.).

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (3.9)$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = \text{const.}$$

U konačnosti smo dobili izraz koji nam je vrlo koristan pri proračunima cjevovoda.



Slika 3.3. Prikaz strujanja kod suženja cijevi

3.3. Zakon očuvanja količine gibanja

Zakon ravnoteže količine gibanja za materijalni volumen glasi :

$$\frac{D}{Dt} \int_{MV} \rho \vec{v} dV = \int_{MV} \vec{f} \rho dV + \int_{MS} \sigma_n dS \quad (3.10)$$

Kako bi dobili oblik zakona količine gibanja za kontrolni volumen moramo primijeniti Reynoldsov transportni teorem na početni izraz:

$$\int_{CV} \frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} dV + \int_{CS} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{CV} \vec{f} \rho dV + \int_{CS} \vec{\sigma} dS \quad (3.11)$$

Ovaj izraz govori kako je suma brzine promjene količine gibanja kontrolnog volumena i protoka količine gibanja kroz kontrolnu površinu jednaka sumi ukupne masene sile i površinske sile koje djeluju na kontrolni volumen. Prethodni izraz može se sažeti tako da je promjena količine gibanja u vremenu i dotok količine gibanja kroz granicu kontrolnog volumena jednak resultantnoj sili (masena + kontaktna) koja djeluje na kontrolni volumen:

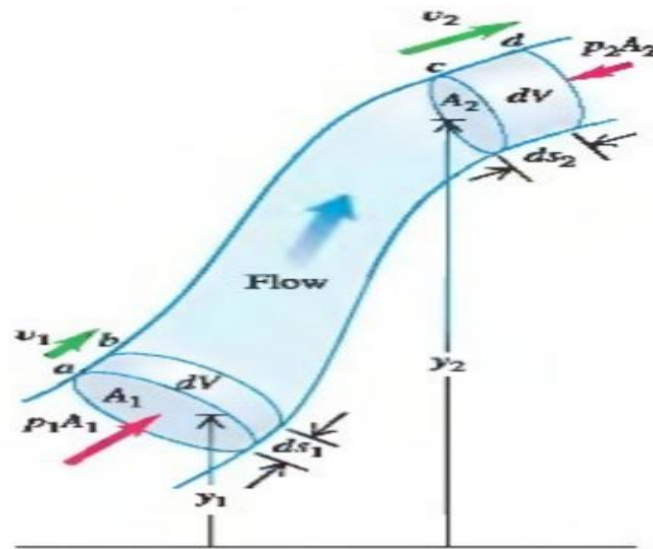
$$\sum \vec{F} = \int_{CV} \vec{f} \rho dV + \int_{CS} \vec{\sigma}_n d \quad (3.12)$$

U konačnosti ako pretpostavimo da se radi o stacionarnom odnosno nestlačivom strujanju iz prethodnog izraza slijedi impulsni zakon.

$$\sum \vec{F} = \rho Q (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad \text{ili} \quad \sum \vec{F} = \dot{m} (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (3.13)$$

3.4. Bernoullijeva jednađzba

S ovom jednađzбом najbolje je opisan odnos između brzine, tlaka i gustoće tekućine u kretanju. Ona proizlazi iz zakona očuvanja energije koji govori da je ukupna energija tekućine konstantna duž cijele strujne cijevi u slučaju uravnoteženog strujanja idealne tekućine, a porastom brzine tekućine pada njen hidrostatski tlak i obratno. Ako zbrojimo hidrostatski tlak i hidrodinamički tlak u strujanju tekućine koje je vodoravno dobijemo ukupan tlak koji je na svakom presjeku cijevi konstantan. Primjena Bernoullijeve jednađzbe u inženjerstvu je široka, kao na primjer polijetanje zrakoplova, kod kojeg zahvaljujući razlici statičkih tlakova proizvodi se sila koja podiže zrakoplov. Bernoullijeva jednađzba se može izvesti na mnogo načina, ovo je jedan od njih:



Slika 3.4. Prikaz cijevi u presjeku

Na početku se koristimo teoremom rad-energija. Fluid se na početku nalazi između a i c, te nakon vremena dt dolazi u položaj bd. U tom vremenu proći će volumen količine:

$$dV = A_1 ds_1 = A_2 ds_2 \quad (3.14)$$

Rad koji je obavljen na fluidu, a kojeg obavljaju vanjski dijelovi fluida i gravitacijska sila u vremenu dt iznosi:

$$dW = p_1 A_1 ds_1 - p_2 A_2 ds_2 = (p_1 - p_2) dV \quad (3.15)$$

Sljedeći dio Bernoullijeve jednađzbe čini kinetička energija odnosno ukupna promjena kinetičke energije. Na njezinu veličinu utječu faktori poput brzine, poprečni presjek cijevi i prijeđeni put. Ona se dobije kao razlika kinetičkih energija sa kraja i početka dt -a.

$$dK = \frac{1}{2} \rho dV (v_2^2 - v_1^2) \quad (3.16)$$

Zadnji dio Bernoullijeve jednadžbe odnosi se na potencijalnu gravitacijsku energiju čija vrijednosti ovisi od mase, gravitacijskom ubrzanju te visini. Ukupna promjena potencijalne gravitacijske energije dobijemo tako da oduzmemo potencijalnu energiju fluida u posljednjem trenutku sa potencijalnom energijom na početku:

$$dU = \rho dV g (y_2 - y_1) \quad (3.17)$$

Kombiniranjem svih ovih izraza dolazimo do:

$$(p_1 - p_2) dV = \frac{1}{2} \rho dV (v_2^2 - v_1^2) + \rho dV g (y_2 - y_1) \quad (3.18)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (y_2 - y_1)$$

Daljnijim sređivanjem dolazimo do konačnog izraza za Bernoullijevu jednadžbu koji glasi:

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3.19)$$

Ovaj izraz se odnosi na idealan fluid koji je nekompresibilan, te se viskoznost zanemaruje. U slučaju strujanja realnog fluida koriste se modificirane Bernoullijeve jednadžbe koji uzimaju u obzir sve gubitke koje se javljaju kod strujanja realnog fluida.

3.5. Računanje gubitaka strujanja u realnom cjevovodu

Ukupni gubici su predstavljeni članom h_g u proširenoj Bernoullijevoj jednadžbi koja opisuje realno strujanje fluida od ulaznog do izlaznog presjeka cijevi te ju možemo definirati kao:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_g - h_s \quad (3.20)$$

Ulazni i izlazni presjek je predstavljen indeksima 1 i 2

p - tlak [Pa]

ρ - gustoća fluida [kg/m^3]

g - vrijednost gravitacijskog ubrzanja [$9,81 \text{ m/s}^2$]

v - brzina fluida [m/s]

z - visina presječenog dijela [m]

h_g - ukupni gubici između presjeka [m]

h_s – u ovom slučaju hidraulički stroj je crpka te se umjesto h_s uvrštava dobavna visina crpke

$$h_s = h_p \text{ [m]}$$

Ukupni gubici u realnom cjevovodu se dobiju zbrojem duljinskih i lokalnih gubitaka odnosno:

$$h_g = h_{DUZ} + h_{LOK} \quad (3.20)$$

3.5.1. Dužinski gubici

Ovi gubici posljedica su djelovanja trenja u realnoj cijevi i proporcionalni su duljini cijevi, približno proporcionalni kvadratu brzine te obrnuto proporcionalni unutarnjem promjeru cijevi. Veličina ovih gubitaka ovisi o nekoliko faktora poput: gustoća fluida, površinska hrapavost unutarnje stijenke cijevi te viskoznost fluida. Treba spomenuti još da ovi gubici nisu ovisni o tlaku.

Dužinski gubici računaju se s pomoću izraza Darcy-Weisbacha koji glasi:

$$h_{duz} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} [m] \quad \text{ili} \quad h_{duz} = \lambda \frac{8LQ^2}{g\pi^2 D^5} [m] \quad (3.21)$$

gdje je λ faktor trenja koji je određen eksperimentalno, a u općem je slučaju može se odrediti kao funkcija Reynoldsova broja i relativne visine k/D hrapavosti stijenke cijevi.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\pi D \mu} \quad \text{ili} \quad Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (3.22)$$

U prethodnim izrazima oznake predstavljaju sljedeće: L je duljina cjevovoda; D je promjer cjevovoda; v je srednja brzina strujanja fluida; Q je protok; μ je dinamička viskoznost fluida, a $\nu = \mu / \rho$ predstavlja kinematičku viskoznost.

Za strujanje u okruglim cijevima se uzima da je strujanje laminarno do $Re=2300$, a pri višim Reynoldsovim brojevima se uzima da je turbulentno. Međutim za područje Reynoldsova broja od 2300 do približno 4000 faktor trenja se teško može odrediti što rezultira niskom pouzdanošću proračuna. Za laminarno strujanje lako se određuje faktor trenja na način:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \text{ za } Re < 2300 \quad (3.23)$$

iz izraza je vidljivo da faktor trenja ne ovisi od hrapavosti stijenke cijevi kod laminarnog strujanja. Kod turbulentnog strujanja najčešće se koristi približna Colebrookova formula koja glasi:

$$\lambda = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3.24)$$

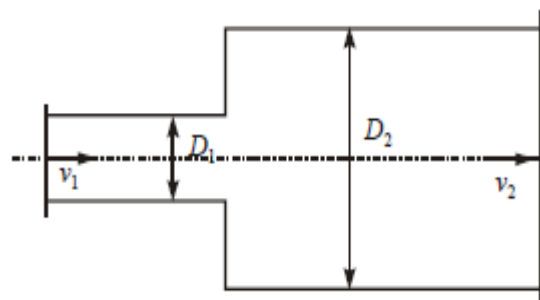
Ova formula je primjenjiva praktički za čitavo područje Moodyjeva dijagrama uz $Re > 500$. Ovaj izraz vrijedi za hidraulički glatke cijevi ($k/D=0$) i za područje potpuno izražene turbulencije ($Re \rightarrow \infty$). Zavisnost faktora trenja λ od Reynoldsova broja Re i relativne visine k/D hrapavosti stijenke cijevi je prikazana grafički Moodyevim dijagramom.

3.5.2. Lokalni gubici

Ovi gubici nastaju kao posljedica odvajanja struje fluida od stijenke cijevi odnosno nastajanja zona gdje se fluid vrtloži i uzima energiju iz primarne struje. To se odvija prilikom strujanja kroz koljena, ventile, zasune, filtre, prigušnice, sapnice, nagla proširenja i slično. Gledajući lokalno u svim nabrojanim situacijama, strujanje je trodimenzijsko, ali se to strujanje događa u prostoru zanemarivih dimenzija u odnosu na ukupnu duljinu cjevovoda pa se takav prostor smatra točkom cjevovoda, a nastali gubitak lokalnim. Pošto je gubitak mehaničke energije vezan uz strujanje znači da će i visina lokalnih gubitaka biti razmjerna visini kinetičke energije prema izrazu:

$$h_{lok} = k \frac{v^2}{2 \cdot g} [m] \quad \text{ili} \quad h_{lok} = k \frac{8 \cdot Q^2}{D^4 \cdot g \cdot \pi^2} [m] \quad (3.25)$$

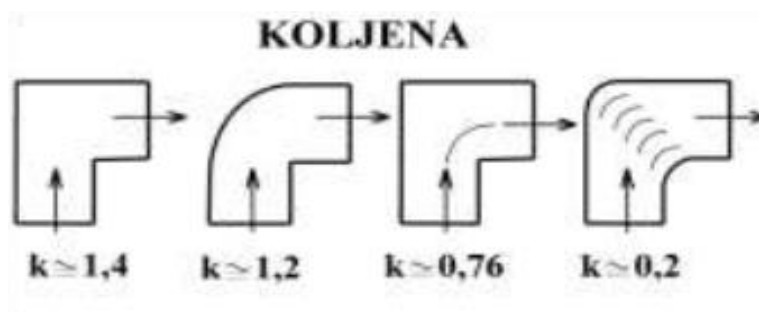
gdje je K koeficijent lokalnog gubitka te se određuje eksperimentalno. Za slučaj da ulazna i izlazna brzina nisu jednake uz koeficijent lokalnog gubitka mora biti definiran i izraz za visinu lokalnih gubitaka kako bi se znalo uz koju se visinu kinetičke energije računaju gubici. Na prikazanoj slici definiran je koeficijent lokalnog gubitka za slučaj naglog proširenja.



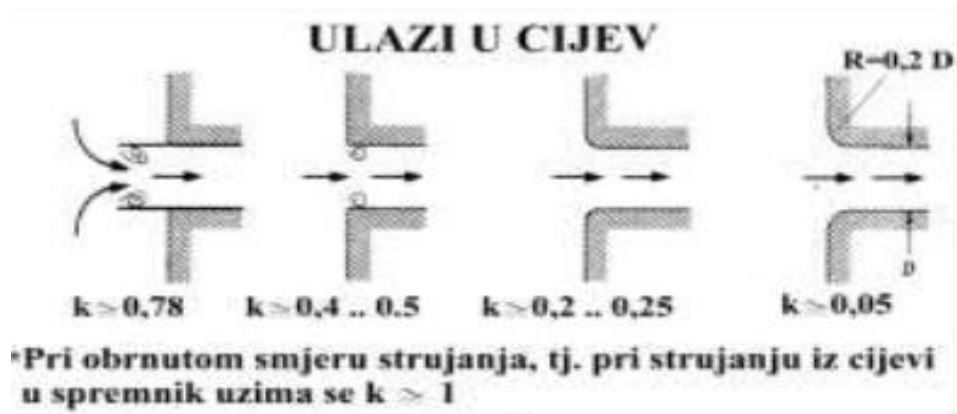
$$K = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2$$

$$h_{m} = K \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (3.26)$$

Slika 3.5. Koeficijent K za naglo proširenje



Slika 3.6. Koeficijent K kod koljena



Slika 3.7. Koeficijent K kod ulaza u cijevi

4. TEHNIČKI PODACI I PRIKAZ MODELIRANJA

4.1. Applied Flow Technology (AFT) Fathom

AFT Fathom je program koji služi kao pomoćno sredstvo inženjerima kod analize protoka u cijevima. Može se koristiti za modeliranje i simuliranje raznih inženjerskih sustava, a uglavnom se koristi za računanje pada tlaka i raspodjelu protoka plinova i tekućina s malom brzinom strujanja u cjevovodima i kanalima. Program radi uspješno zahvaljujući algoritmima koji sadrže Newton-Raphson-ovu metodu matrične iteracije. Štoviše, bazu programa čini Bernoullijeva jednačica i Reynoldsov broj s pomoću kojih se može napraviti proračun hidrauličkog sustava. Najpogodniji je za sustave koji kao radni fluid koriste vodu, naftu, kriogeno gorivo, rashladna sredstva i slično.

Ovaj program omogućuje modeliranje raznolikih sustava poput:

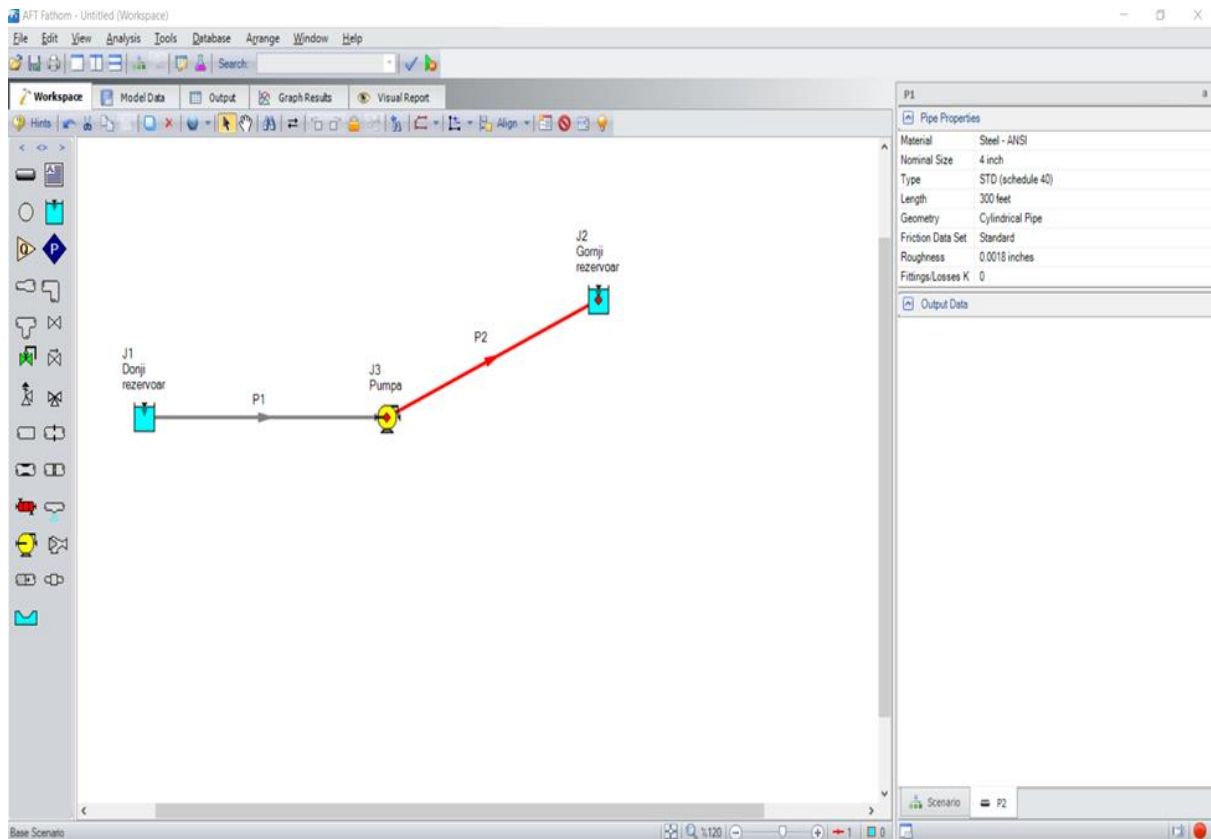
- otvoreni i zatvoreni (recirkulirajući) sustavi
- mrežni sustavi koji se granaju ili petljaju, bez ograničenja broja petlji
- sustavi pod tlakom i gravitacijski sustavi
- pumpani sustavi, uključujući više crpki paralelno ili u seriji
- crpke s promjenjivom brzinom, kontroliranim tlakom, kontroliranim protokom,
- sustavi s ventilima za regulaciju tlaka i / ili protoka
- sustavi sa zatvorenim ventilima i isključene crpke
- sustavi s promjenjivom gustoćom i viskoznošću

Na kraju simulacije dobiju se izlazne vrijednosti poput protoka, brzine strujanja, pada tlaka i slično koje su smještene u tablice radi bolje preglednosti i jednostavnosti. Program također ima i opciju prikazivanja dobivenih rezultata na grafovima i shemama. Sve podatke koje generira AFT Fathom trebali bi se provjeriti drugim inženjerskim metodama radi bolje preciznosti i smanjenja pogrešaka.

4.2. Primjer načina rada u AFT Fathomu

Za prikaz način rada programa promatrati ćemo sustav koji se sastoji od opskrbnog rezervoara, pumpe, rezervoara za pražnjenje i dvije cijevi. Najprije se iz „kutije alata“ u radni prostor dovlače dva rezervoara i pumpa te se povežu cijevima, nakon čega slijedi njihovo dimenzioniranje.

Za primjer potrebne su proizvoljne vrijednosti za dužinu, materijal i promjer cijevi, a za rezervoare potrebno je unijeti vrijednosti poput nadmorske visine, površinskog tlaka te visine cijevi. Još je potrebno zadati protok pumpe i njezinu nadmorsku visinu te je sustav spreman za simulaciju. Pretpostavlja se da su stalna svojstva tekućine.



Slika 4.1. Prikaz radnog prostora programa

Nakon pokretanja simulacije program generira izlazne podatke te ih smješta u tablice. Budući da nas u ovom slučaju zanima zahtjevi za crpku za ovaj sustav, odaberemo karticu „Sažetak Pumpe“, gdje su vidljivi neki osnovni zahtjevi koja pumpa treba imati da bi sustav bio funkcionalan poput tlaka, masenog protoka, snage i slično.

AFT Fathom - završni lagani primjer.fth (Output)

File Edit View Analysis Tools Database Arrange Window Help

Workspace Model Data Output Graph Results Visual Report

General Warnings Pump Summary Reservoir Summary

Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (m3/hr)	Mass Flow (kg/sec)	dP (bar)	dH (meters)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (kW)	BEP (m3/hr)	% of BEP (Percent)	NPSHA (meters)	NPSHR (meters)
3	Show	Pumpa	115.0	31.88	6.774	69.21	100.0	N/A	21.63	N/A	N/A	12.98	N/A

Pipes

Pipe	Name	Vol. Flow Rate (m3/hr)	Velocity (meters/sec)	P Static Max (bar)	P Static Min (bar)	Elevation Inlet (meters)	Elevation Outlet (meters)	dP Stag. Total (bar)	dP Static Total (bar)	dP Gravity (bar)	dH (meters)	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)
1	Pipe	115.0	3.889	1.231	1.220	0	0.00	0.01183	0.01183	0.000	0.1209	1.231	1.220	1.307	1.295
2	Pipe	115.0	3.889	7.994	1.231	0	57.00	6.76239	6.76239	5.579	12.0879	7.994	1.231	8.069	1.307

All Junctions Pump Reservoir

Jct	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m3/hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)	Loss Factor (K)
1	Donji rezervoar	1.013	1.307	1.013	1.307	115.0	31.88	0
2	Gornji rezervoar	1.013	1.307	1.013	1.307	115.0	31.88	0
3	Pumpa	1.220	7.994	1.295	8.069	115.0	31.88	0

Base Scenario 130%

Slika 4.2. Prikaz izlaznih podataka

Osim podatka za pumpu, prikazane su značajne vrijednosti za cijevi i rezervoare kao što je brzina strujanja i tlakovi u cijevima što nam daje bolji uvid u sustav koji analiziramo i dimenzioniramo. Ako želimo još dodatno vizualizirati sustav s pomoću kartice „vizualno izvješće“, sustav možemo obojati u različite boje ovisno o tlakovima, protocima, brzinama strujanja i slično. Program ima i opciju prikazivanja grafova, tako se može generirati i krivulja za pumpu za ovaj slučaj. Ovo je ustvari osnova rada programa.

4.3. Geometrija distribucijskih cijevi sustava navodnjavanja

Osnovu distribucijskog sustava čine cijevi koje su napravljene od polietilena velike gustoće (HDPE) različitih unutarnjih promjera (110,2 mm, 158,6 mm, 198,2 mm, 277,6 mm i 556,6 mm) i duljina. Na početku je potrebno za svaku cijev minimalno definirati promjer, duljinu, materijal, te apsolutnu hrapavost cijevi koja iznosi 0,0015 mm, a ovisi o materijalu cijevi.

The image shows a software interface for defining pipe properties. The main window is titled "Pipe Properties". At the top, there are fields for "Number" (22), "Name" (Pipe), and "Copy Data From Pipe...". To the right, "Upstream Junction" is 22 and "Downstream Junction" is 23. Below these are buttons for "OK", "Cancel", "Jump...", and "Help". The main area has several tabs: "Pipe Model", "Fittings & Losses", "Insulation", "Design Alerts", "Optional", "Notes", and "Status". The "Pipe Model" tab is active, showing "Pipe Material" as "(User Specified)", "Pipe Geometry" as "Cylindrical Pipe", "Inner Diameter" as 198.2 mm, and "Length" as 218 meters. The "Friction Model" section has "Data Set" set to "User Specified" and "Absolute Roughness" as 1.5E-06 meters. A "Load Default" button is also present.

Slika 4.3. Definiranje cijevi distribucijskog sustava

U početnim odnosno dovodnim cijevima definiran je još i Hazen-Williamsov faktor sa vrijednošću od 140 koji je određen ovisno o materijalu cijevi. Sustav se sastoji od 237 cijevi sa ukupnom duljinom od približno 16 km. Na slici 4.4 su prikazane dobivene varijable za cijevi nakon pokretanja simulacije, a odnose se na vrijednosti poput brzine strujanja, volumnog protoka, tlakova i slično.

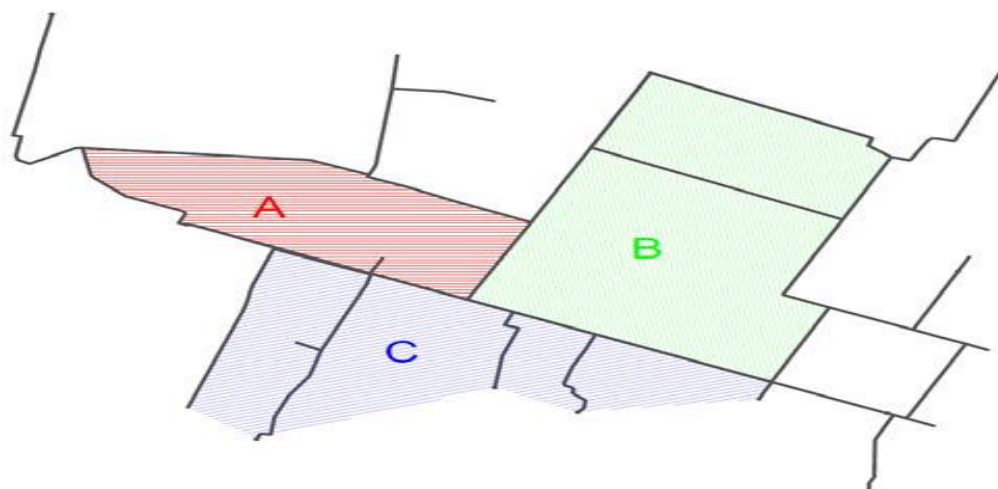
Pipe	Name	Vol. Flow Rate (liter/sec)	Velocity (meters/sec)	P Static Max (bar)	P Static Min (bar)	Elevation Inlet (meters)	Elevation Outlet (meters)	dP Stag. Total (bar)	dP Static Total (bar)	dP Gravity (bar)	dH (meters)	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)
1	Pipe	240.000	1.22231	8.497	8.493	55.00	54.88	-0.00417339	-0.00417339	-0.0117479	0.0773688858	8.493	8.497	8.500	8.504
2	Pipe	240.000	1.22231	8.497	8.431	54.88	55.47	0.06535914	0.06535914	0.0577615	0.0776047696	8.497	8.431	8.504	8.439
3	Pipe	240.000	1.22231	8.431	8.030	55.47	59.16	0.40166902	0.40166902	0.3612562	0.4127913308	8.431	8.030	8.439	8.037
4	Pipe	240.000	1.22231	8.030	7.851	59.16	60.63	0.17855507	0.17855507	0.1439155	0.3538212126	8.030	7.851	8.037	7.859
5	Pipe	61.745	1.02018	7.853	7.723	60.63	61.85	0.13070963	0.13070963	0.1194393	0.1151190546	7.853	7.723	7.859	7.728
6	Pipe	0.000	0.00000	7.728	7.585	61.85	63.31	0.14293651	0.14293651	0.1429365	0.0000000000	7.728	7.585	7.728	7.585
7	Pipe	0.000	0.00000	7.597	7.585	63.31	63.19	-0.01174837	-0.01174837	-0.0117484	0.0000000000	7.585	7.597	7.585	7.597
8	Pipe	0.000	0.00000	8.007	7.597	63.19	59.00	-0.41020708	-0.41020708	-0.4102071	0.0000000000	7.597	8.007	7.597	8.007
9	Pipe	0.000	0.00000	8.007	8.007	59.00	59.00	0.00000000	0.00000000	0.0000000	0.0000000000	8.007	8.007	8.007	8.007
10	Pipe	61.745	2.00128	7.708	7.093	61.85	65.21	0.61497885	0.61497885	0.3289493	2.9216071276	7.708	7.093	7.728	7.113
11	Pipe	61.745	2.00128	7.093	6.563	65.21	67.77	0.52968065	0.52968065	0.2506275	2.8503481960	7.093	6.563	7.113	6.583
12	Pipe	0.000	0.00000	6.583	6.428	67.77	69.36	0.15566337	0.15566337	0.1556634	0.0000000000	6.583	6.428	6.583	6.428
13	Pipe	0.000	0.00000	6.428	6.428	69.36	69.36	0.00000000	0.00000000	0.0000000	0.0000000000	6.428	6.428	6.428	6.428
14	Pipe	61.745	2.00128	6.627	6.563	67.77	66.73	-0.06414457	-0.06414457	-0.1018168	0.3847970384	6.563	6.627	6.583	6.647
15	Pipe	61.745	2.00128	6.756	6.627	66.73	64.45	-0.12833817	-0.12833817	-0.2232163	0.9691183799	6.627	6.756	6.647	6.776
16	Pipe	178.255	2.94518	7.924	7.815	60.63	59.13	-0.10838374	-0.10838374	-0.1468523	0.3929317785	7.815	7.924	7.859	7.967
17	Pipe	178.255	2.94518	7.924	7.900	59.13	58.01	0.02326244	0.02326244	-0.1096498	1.3576122375	7.924	7.900	7.967	7.944
18	Pipe	178.255	2.94518	7.908	7.900	58.01	56.52	-0.00726447	-0.00726447	-0.1458729	1.4157956251	7.900	7.908	7.944	7.951
19	Pipe	178.255	2.94518	7.908	7.853	56.52	55.60	0.05423491	0.05423491	-0.0900698	1.4739789288	7.908	7.853	7.951	7.897
20	Pipe	178.255	2.94518	7.853	7.774	55.60	55.00	0.07986797	0.07986797	-0.0587405	1.4157956251	7.853	7.774	7.897	7.817
21	Pipe	178.255	2.94518	7.774	7.637	55.00	55.00	0.13670974	0.13670974	0.0000000	1.3964016383	7.774	7.637	7.817	7.680
22	Pipe	53.914	1.74746	7.665	7.153	55.00	57.80	0.51177971	0.51177971	0.2741237	2.4275020610	7.665	7.153	7.680	7.168
23	Pipe	53.914	1.74746	7.153	6.706	57.80	60.30	0.44752436	0.44752436	0.2447537	2.0711711351	7.153	6.706	7.168	6.721
24	Pipe	115.660	3.74874	6.651	6.642	60.30	60.30	0.00878468	0.00878468	0.0000000	0.0897298260	6.651	6.642	6.721	6.712
26	Pipe	61.745	2.00128	6.756	6.756	64.45	64.25	-0.00074391	-0.00074391	-0.0195800	0.1923985192	6.756	6.756	6.776	6.776
27	Pipe	61.745	2.00128	6.901	6.756	64.25	62.00	-0.14493319	-0.14493319	-0.2202776	0.7695940767	6.756	6.901	6.776	6.921

Slika 4.4. Izlazni podaci za distribucijske cijevi u sustavu

Osim cijevi potrebno je definirati i čvorišta odnosno grane cjevovoda na način da se upiše potrebna vrijednost elevacije. U konačnosti da bi sustav bio ispravan i kako bi se zadovoljile potrebe navodnjavanja. potrebno je dodijeliti protok, u ovom slučaju njegova vrijednost zahvaljujući paralelnom radu četiri pumpe iznosi 240 l/s na elevaciji od 55 m sa pripadnim tlakom od 8.5 bara

5. HIDRAULIČKA ANALIZA

Aktualni sustav navodnjavanja podijeljen je u tri zone, nazvane A, B i C. Trenutno nije moguće navodnjavati sve zone istovremeno zbog manjka uređaja za navodnjavanje nego se navodnjavanje provodi u samo jednoj od zona i u slučaju potrebe zone A i B se mogu navodnjavati istovremeno. U ovom trenutku koriste se dva rolomata koji su u mogućnosti zadovoljiti trenutne potrebe za navodnjavanjem, ali se planira ugrađivanje dodatnih uređaja u skoroj budućnosti. Uređaji za navodnjavanje koriste protok vode od 25 l/s te na svaki aktivni hidrant montirana je cijev promjera 120 mm sa duljinom od 10 m.



Slika 5.1. Podjela sustava navodnjavanja po zonama

Analizirat ćemo sustav za različite slučajeve koji će obuhvaćati navodnjavanje određenih zona, cjelokupnog sustava, proširenje sustavu na dodatnu zonu te će se provesti simulacije za navedene slučajeve (Tablica 5.1).

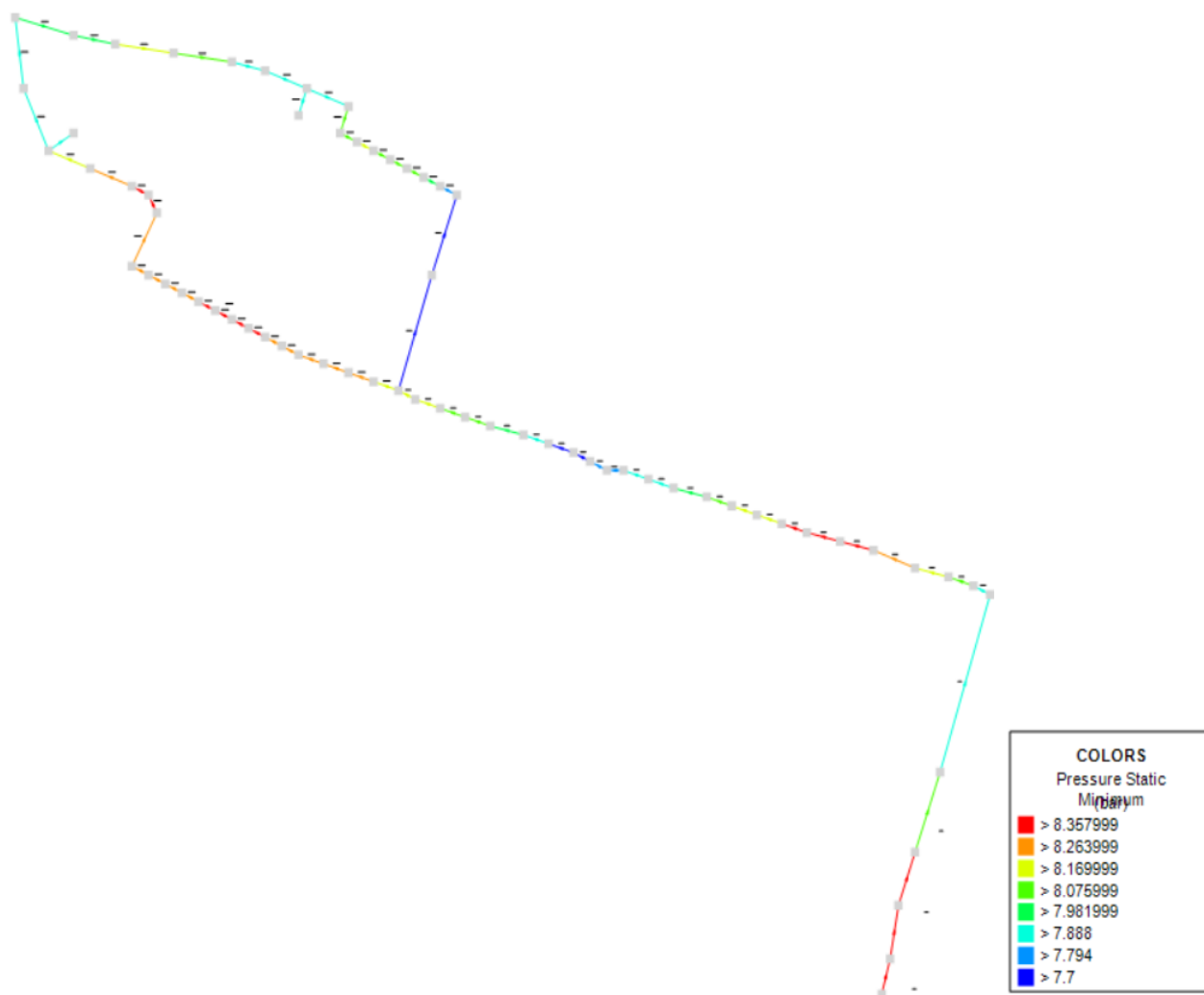
Tablica 5.1. Analiza sustava za različite slučajeve

Slučaj	Navodnjavanje	Broj aktivnih uređaja
1	Zona A	2
2	Zona B	1
3	Zona A i B	3
4	Cijeli sustav	5
5	Prošireni sustav	6

Svi slučajevi će biti provedeni sa tlakom na crpnoj stanici od 8,5 bara, iz razloga što je potrebno dobiti tlak na svim aktivnim izlaznim hidrantima s minimalnom vrijednošću od 6 bara. Kad bi tlak bio niži od toga sustav ne bi mogao pravilno raditi jer voda tada nema dovoljnu energiju da prekrije potrebnu površinu. Nasuprot tome, preveliki tlak isto nije preporučen jer je tada voda u jako sitnom obliku te joj se lagano može promijeniti smjer istjecanja djelovanjem okoline. Također prevelik tlak može dovesti i do kvarova u vodoopskrbnom sustavu ili oštećenja uređaja za navodnjavanje.

5.1. Slučaj 1: Zona A

Ovdje sustav služi za navodnjavanje jednog područja (zone A), Pošto su u ovom slučaju dva rotomata u radu, ukupni protok u sustavu iznosi $Q = 50$ l/s



Slika 5.2. Tlakovi u sustavu za slučaj 1

Iz dobivene simulacije i dobivenih izlaznih varijabli možemo zaključiti da sustav može pravilno funkcionirati i navodnjavati površinu, jer je najmanji tlak u sustavu 7,745 bara. U ovom slučaju sustav u potpunosti zadovoljava uvjete o potrebnim tlakovima u cijevima. Što se tiče tlakova na hidrantima dobivene su sljedeće vrijednosti tlakova (tablica 5.2).

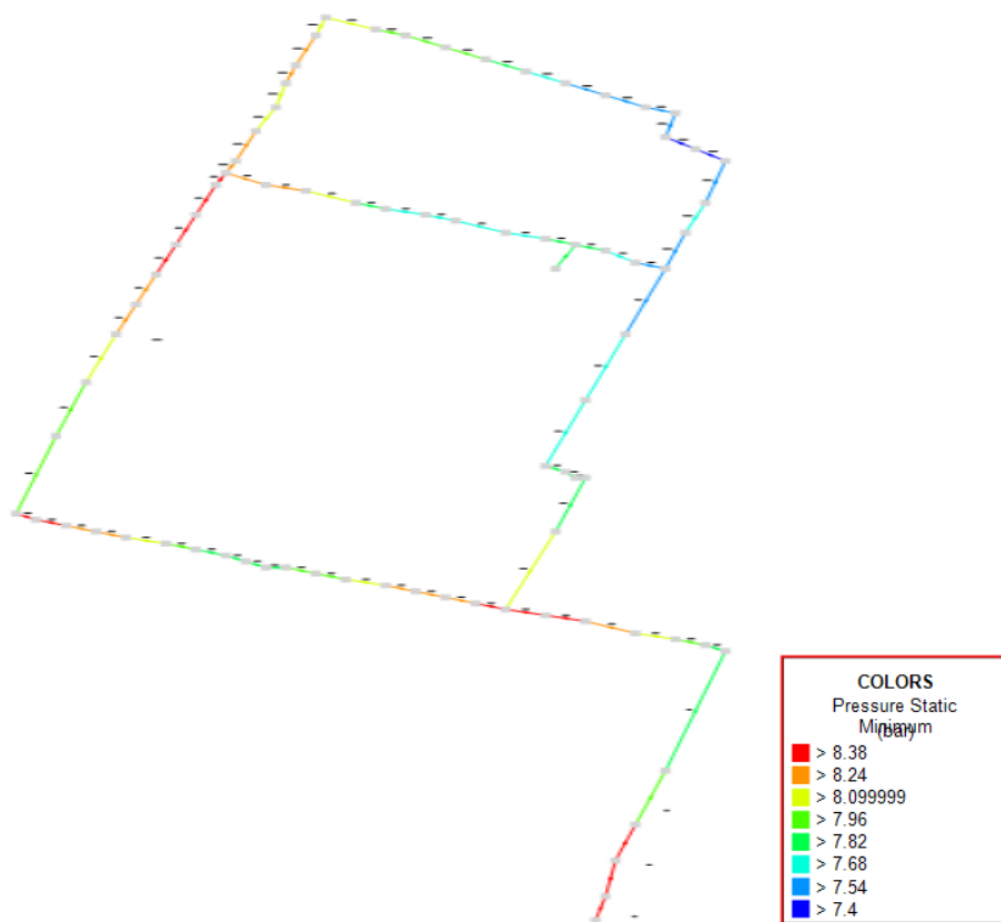
Tablica 5.2. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 1

Tlak na crpnoj stanici	$p_{cs} = 8,5$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J158	$p = 7,898$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J173	$p = 7,942$ bar

Prema dobivenim rezultatima zaključujemo da će se navodnjavanje vršiti pravilno jer su dobiveni tlakovi na svim hidrantima veći od 6 bara.

5.2. Slučaj 2: Zona B

Ovdje sustav služi za navodnjavanje jednog područja (zone B) i to sa jednim uređajem za navodnjavanje što znači da će ukupni protok u sustavu biti $Q = 25$ l/s.



Slika 5.3. Tlakovi u sustavu za slučaj 2

Iz prikazanih podataka vidljivo je kako tlakovi u sustavu ne prelaze najveći dopušteni tlak od 10 bar za HDPE cijevi, što ima za posljedicu miran rad sustava. Nadalje, tlak na hidrantu prikazan je u sljedećoj tablici:

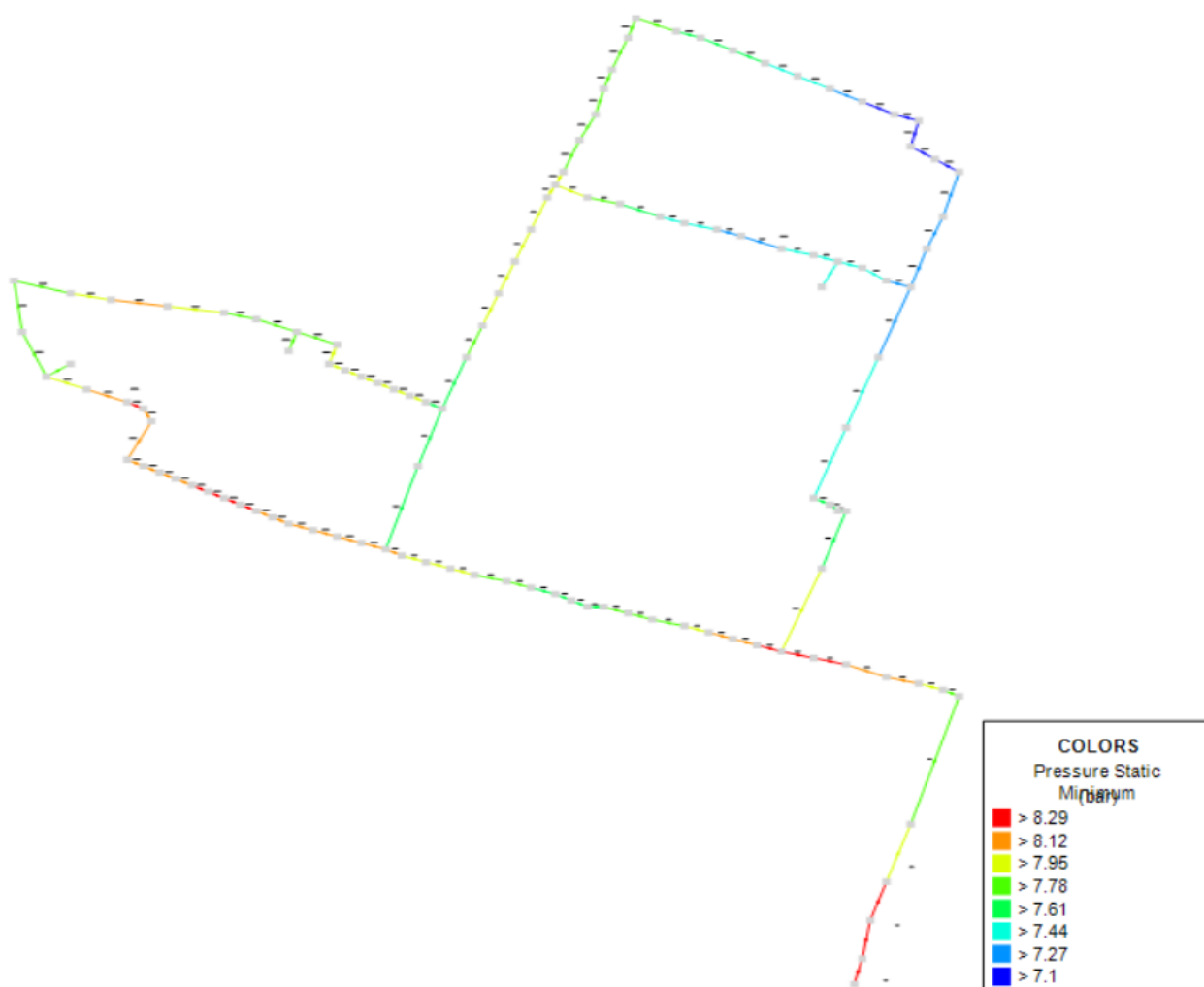
Tablica 5.3. Tlak na hidrantu kod slučaja 2

Tlak na crpnoj stanici	$p_{cs} = 8,5$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J92	$p = 7,896$ bar

Na temelju dobivenih podataka možemo zaključiti da će jedan aktivan hidrant moći bez problema obaviti zadanu funkciju jer izlazna vrijednost tlaka na hidrantu je veća od 6 bara.

5.3. Slučaj 3: Zona A i B

Tu se analizira sustav kad je potrebno istovremeno navodnjavati dva područja (zona A i zona B), a to će se vršiti zahvaljujući tri uređaja za navodnjavanje sa ukupnim izlaznim protokom $Q = 75$ l/s



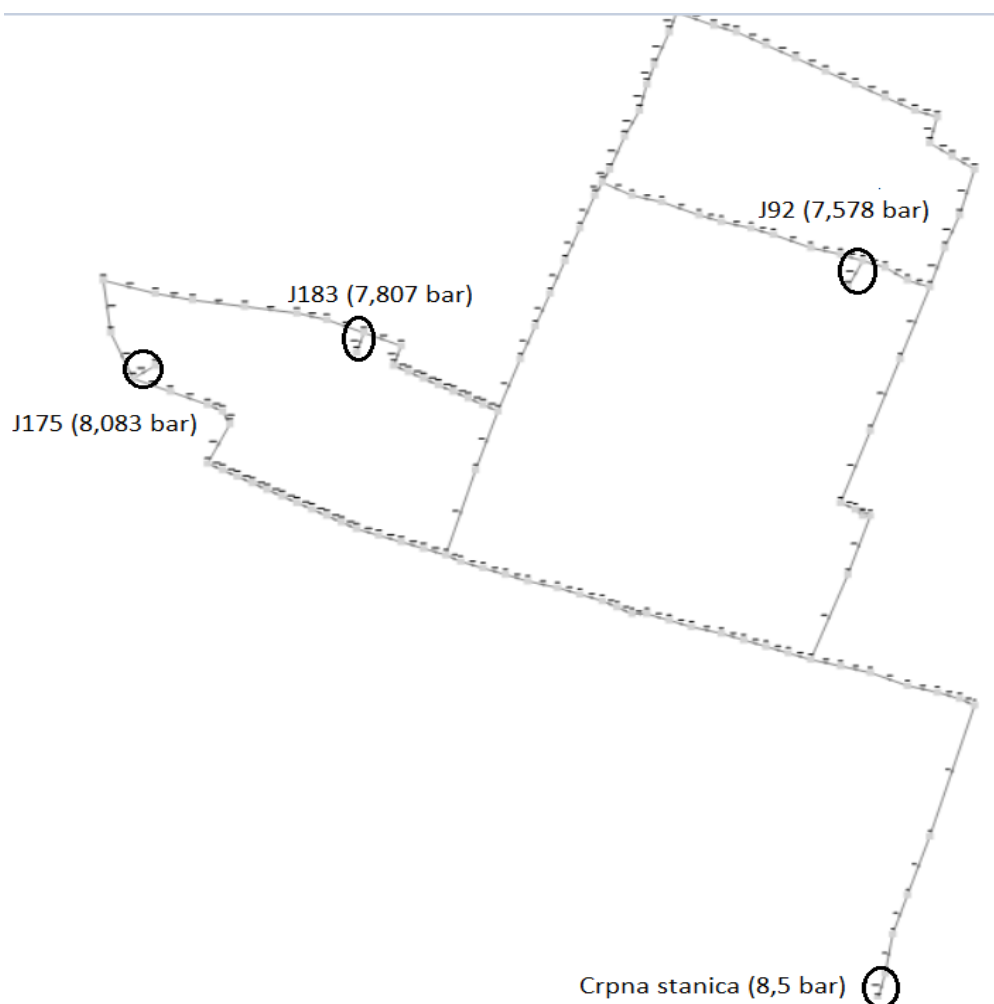
Slika 5.4. Tlakovi u sustavu za slučaj 3

Najmanji tlak u cijevi iznosi 7,109 bara, što je veće od potrebne vrijednosti te će sustav raditi optimalno.

Tablica 5.4. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 3

Tlak na crpnoj stanici	$p_{cs} = 8,5 \text{ bar}$
Tlak na aktivnom hidrantu J92	$p = 7,578 \text{ bar}$
Tlak na aktivnom hidrantu J175	$p = 8,083 \text{ bar}$
Tlak na aktivnom hidrantu J183	$P = 7,807 \text{ bar}$

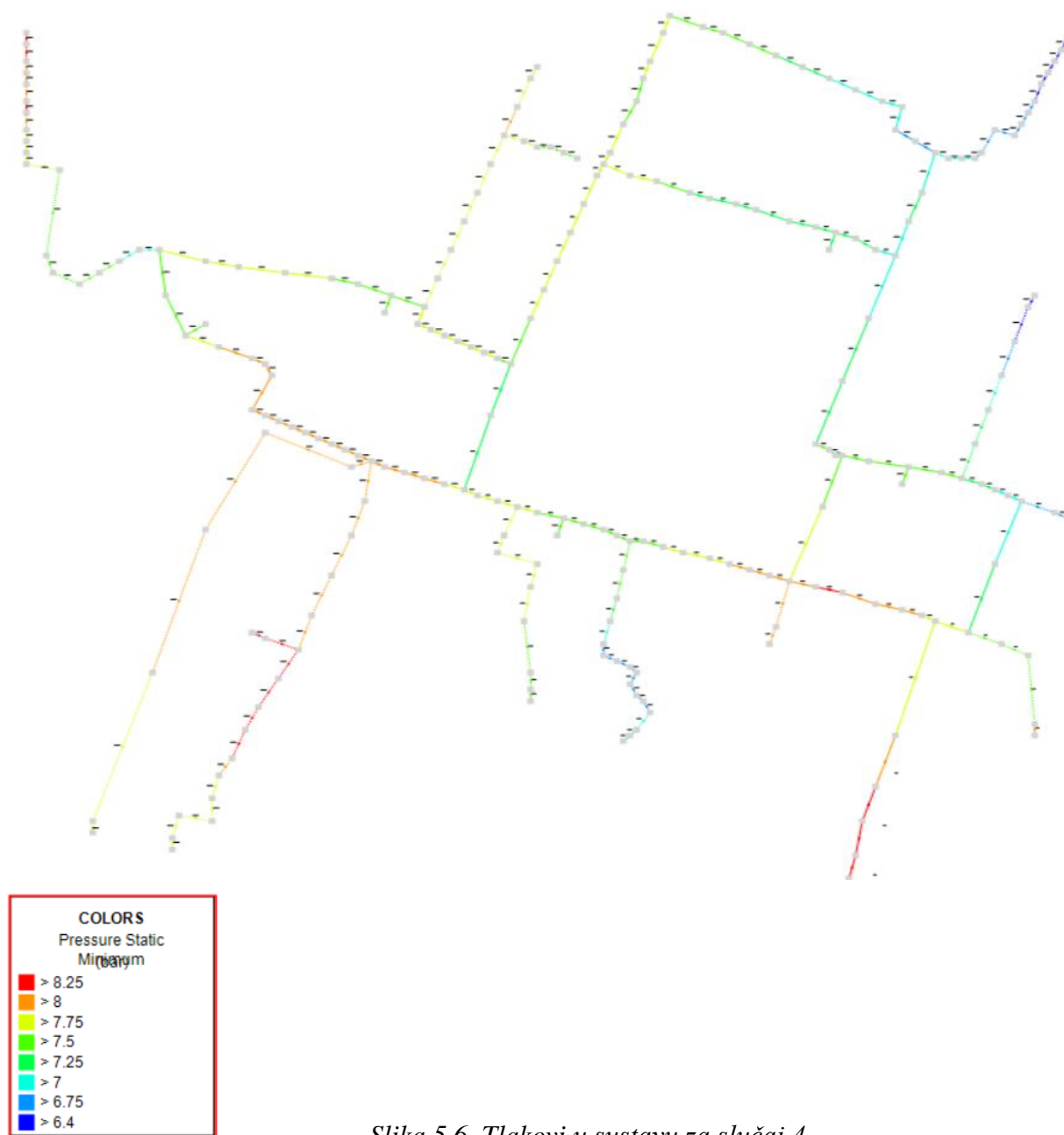
Iz tablice vidimo da su svi tlakovi na izlazu iz aktivnih hidranata veći od 6 bara i to znači da će sustav normalno funkcionirati.



Slika 5.5. Položaj aktivnih hidranata u sustavu

5.4. Slučaj 4: Cijeli sustav

U ovom scenariju navodnjavanje bi se vršilo istovremeno za sve zone odnosno za čitavu poljoprivrednu površinu sustava. Da bi ono bilo uspješno koriste se pet uređaja za navodnjavanje, ukupnog protoka $Q = 125$ l/s.



Slika 5.6. Tlakovi u sustavu za slučaj 4

U cijevi 1 ostvaren je maksimalan tlak u iznosu od 8,497 bara što se dalo i pretpostaviti jer ta cijev spaja glavni cjevovod sa crnom stanicom. Minimalan tlak je dobiven u cijevi 115 u iznosu od 6,466 bara.

Tablica 5.5. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 4

Tlak na crpnoj stanici	$p_{cs} = 8,5$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J175	$p = 7,910$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J183	$p = 7,639$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J92	$p = 7,436$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J45	$p = 7,740$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J30	$p = 7,653$ bar

Dobiveni tlakovi su unutar dopuštenih granica, no ovakav slučaj bi se u stvarnosti rijetko realizirao iz razloga što nema potrebe da cijeli sustav radi jer se obradive površine velikih površina ne obrađuju istovremeno.

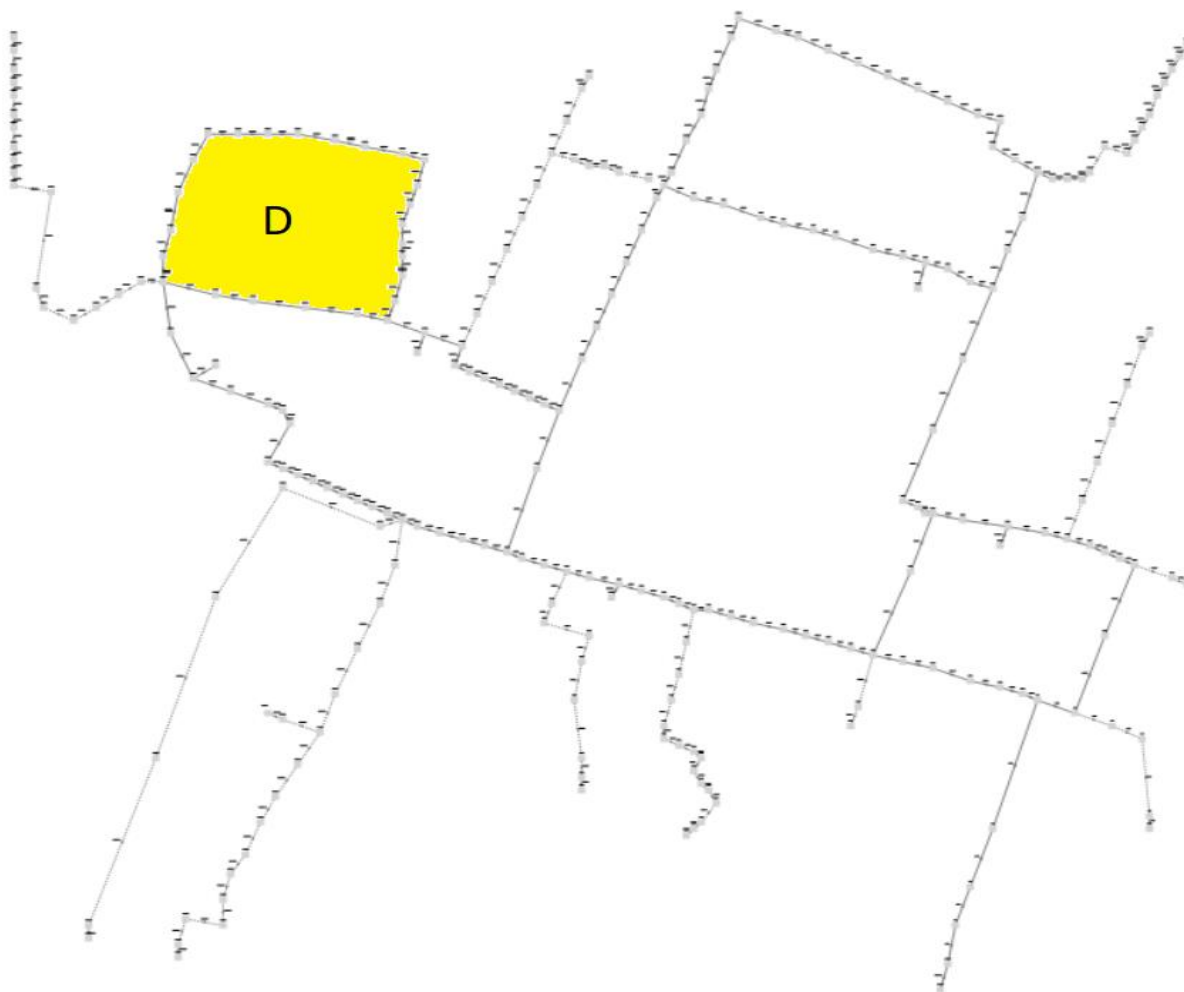


Slika 5.7. Položaj aktivnih hidranata u sustavu

Ako usporedimo vrijednosti izlaznih tlakova hidranata može se zaključiti da vrijednost tlaka generalno opada sa njegovom udaljenošću od crpne stanice.

5.5. Slučaj 5: Prošireni sustav

Nakon što je analiziran postojeći distribucijski sustav navodnjavanja u prethodnom poglavlju, sustav ćemo proširiti na još jedno dodatno polje te ćemo vidjeti hoće li sustav moći navodnjavati i to dodatno polje i kako će to utjecati na tlakove u ostatku sustava. Dodatno polje nazvano je zonom D.



Slika 5.8. Prošireni sustav sa zonom D

Sustav smo proširili sa dvadeset dodatnih cijevi raznih duljina sa unutarnjim promjerom od 163.2 mm. Za apsolutnu hrapavost u cijevi uzeta je ista vrijednost kao što je i u ostatku sustava, a iznosi $1,5 \cdot 10^{-6}$ m. Ukupna duljina proširenog dijela cjevovoda je 1755 m te bi mogao služiti za navodnjavanje postojećih ili pak nekih drugih poljoprivrednih kultura.

Tablica 5.6. Prikaz dimenzija novog cjevovoda

Cijev br	Dužina cijevi	Unutarnji promjer	Apsolutna hrapavost
1	86 m	163.2 mm	1.50E-06 m
2	100 m	163.2 mm	1.50E-06 m
3	94 m	163.2 mm	1.50E-06 m
4	115 m	163.2 mm	1.50E-06 m
5	120 m	163.2 mm	1.50E-06 m
6	99 m	163.2 mm	1.50E-06 m
7	60 m	163.2 mm	1.50E-06 m
8	82 m	163.2 mm	1.50E-06 m
9	48 m	163.2 mm	1.50E-06 m
10	84 m	163.2 mm	1.50E-06 m
11	100 m	163.2 mm	1.50E-06 m
12	61 m	163.2 mm	1.50E-06 m
13	82 m	163.2 mm	1.50E-06 m
14	70 m	163.2 mm	1.50E-06 m
15	77 m	163.2 mm	1.50E-06 m
16	37 m	163.2 mm	1.50E-06 m
17	100 m	163.2 mm	1.50E-06 m
18	120 m	163.2 mm	1.50E-06 m
19	109 m	163.2 mm	1.50E-06 m
20	111 m	163.2 mm	1.50E-06 m

Cijevi se definiraju tako da se vrijednosti koje smo proizvoljno uzeli prikazane u tablici 5.6. upišu u obojena polja u postavkama cijevi. Postavke se otvaraju dvostrukim klikom miša na novo ucrtanu cijev.

Pipe Properties

Number: Upstream Junction:

Name: Downstream Junction:

Copy Data From Pipe... Copy Previous...

OK
Cancel
Jump...
Help

Pipe Model | Fittings & Losses | Insulation | Design Alerts | Optional | Notes | Status

Size

Pipe Material:

Pipe Geometry:

Size:

Type:

Inner Diameter:

Outer Pipe ID:

Inner Pipe OD:

ID Reduction (Scaling): % (optional)

Length

Friction Model

Data Set

User Specified

Absolute Roughness:

Load Default

Slika 5.9. Prikaz unošenja podataka za novi cjevovod

Osim cijevi potrebno definirati čvorove, na način da uđemo u postavke čvora kojega želimo odrediti te upišemo pripadnu vrijednost za njegovu apsolutnu visinu odnosno elevaciju kao što je prikazano na slici 5.10.

Branch Properties

Number: OK

Name: Cancel

Database List:

Copy Data From Jct...

Elevation:

Jump...
Help

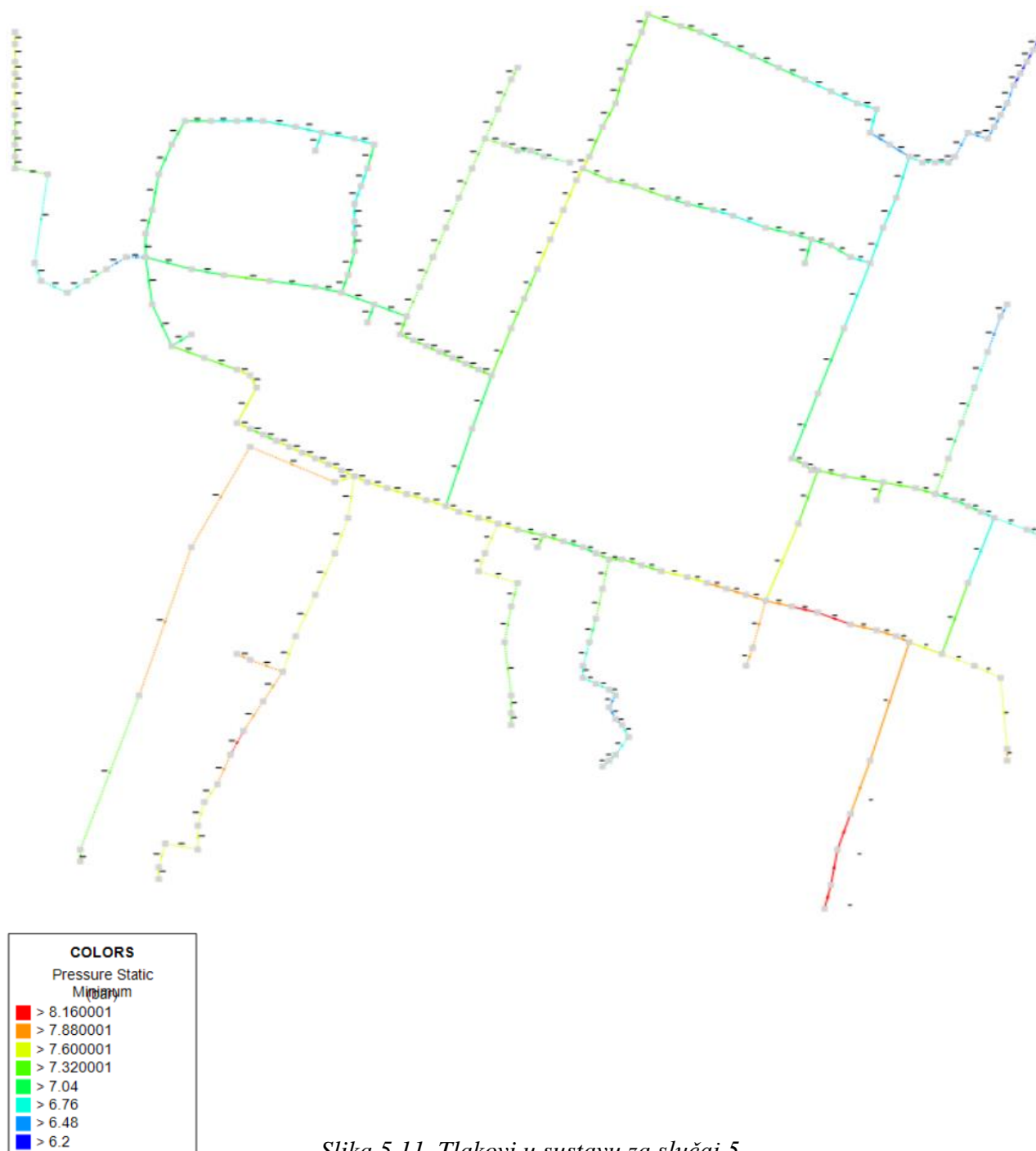
Loss Coefficients | Optional | Design Alerts | Notes | Status

Pipe	Dir.	K - Flow into pipe	K - Flow out of pipe	Distance above Elevation
251	In	0	0	0
252	Out	0	0	0

Make All Pipes Same K Factor

Slika 5.10. Unošenje elevacije za određeni čvor

Nakon definiranja cjevovoda analizirat ćemo sustav u kojemu se navodnjavanje vrši istovremeno za sve zone uključujući novo dodanu zonu D. Da bi ono bilo uspješno koriste se šest uređaja za navodnjavanje, ukupnog protoka $Q = 150$ l/s.



Slika 5.11. Tlakovi u sustavu za slučaj 5

Tlakovi u ovakvom proširenom sustavu variraju od maksimalnog tlaka u početnoj cijevi u iznosu od 8,497 bara do minimalnog tlaka u cijevi 116 u vrijednosti od 6,239 bara. Stoga sve vrijednosti tlakova zadovoljavaju potrebne uvjete za cijevi.

Tablica 5.7. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 5

Tlak na crpnoj stanici	$p_{cs} = 8,5$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J175	$p = 7,378$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J183	$p = 7,081$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J92	$p = 7,190$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J45	$p = 7,515$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J30	$p = 7,543$ bar
Tlak na aktivnom hidrantu J250	$p = 6,993$ bar

5.5.1. Računanje gubitaka za dodani cjevovod

Za razliku od idealne ili neviskozne tekućine (v je 0), kod viskozne tekućine (v nije 0) se javljaju otpori uslijed strujanja pa se mehanička energija stalno umanjuje uzduž toka, tj. disipira. Zbog toga se povećava unutrašnja energija (toplinska energija). Kako bismo odredili veličinu disipacije mehaničke energije treba proučiti prirodu otpora u strujanju. Svi otpori kod strujanja čine gubitke, a gubitke treba moći proračunati i predvidjeti.

Ukupni gubici koji nastaju o svim realnim cijevima sustava, pa tako i na ovom dobiju se zbrojem dužinskih i lokalnih gubitaka.

5.5.2. Dužinski gubici u dodanom cjevovodu

Izračunati ćemo dužinske gubitke za novo dodani cjevovod prema izvodima iz poglavlja 3.5. Kao što je već rečeno ovi gubici su nastaju kao posljedica trenja, a njihova veličina ovisi o gustoći fluida, površinskoj hrapavosti unutarnje cijevi te viskoznosti fluida. Ovi gubici ne ovise o tlaku. Cijevi imaju dimenzije prikazane na sljedećoj slici.

Slika 5.12. Dimenzija cijevi novog cjevovoda

Uz prikazane dimenzije potrebna nam je brzina strujanja, a nju dobijemo kao izlaznu varijablu nakon pokretanja simulacije te iznosi 0.581 m/s. Faktor trenja se uglavnom određuje eksperimentalno, ali ga možemo odrediti na sljedeći način:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0.581 \cdot 0.163}{1.5E-06} = 63135333.33 \quad (5.1)$$

Dobiveni Reynoldsov broj je puno veći 5000, što znači da je strujanje turbulentno te se faktor trenja onda može odrediti prema sljedećem izrazu.

$$\lambda = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (5.2)$$

Kao rješenje jednadžbe dobije se vrijednost $\lambda = 0.58$, te sad imamo sve vrijednosti te možemo izračunati dužinske gubitke za dodani cjevovod.

$$h_{duz} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} [m] = 0.58 \frac{1755 \cdot 0.3376}{0.163 \cdot 2 \cdot 9.81} = 107.5 \text{ m} \quad (5.3)$$

5.5.3. Lokalni gubici u dodanom cjevovodu

Ovi gubici posljedica su strujanja vode kroz koljena, suženja, različitih ulaza u cijev, a računaju se prema izrazu:

$$h_{lok} = \xi \frac{v^2}{2g} \text{ [m]} \quad (5.4)$$

gdje je ξ koeficijent lokalnog gubitka te ovisi o različitim slučajevima

Gubici nastali strujanjem vode kroz suženje

Koeficijent lokalnog gubitka se određuje prema tablici 5.8. , a ovisi o promjerima cijevi.

Tablica 5.8. Koeficijenti lokalnog gubitka kod suženje

A_2/A_1	0.01	0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
ξ	0.50	0.45	0.40	0.40	0.20	0.10	0.00

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{D_2^2 \pi}{D_1^2 \pi} = \frac{0.163^2}{0.198^2} = 0.70$$

Za koeficijent možemo uzeti vrijednost od 0,15 te onda izračunavamo lokalne gubitke:

$$h_{lok} = \xi \frac{v_2^2}{2g} = 0.15 \frac{0.59^2}{2g} = 2.67 * 10^{-5} \text{ m}$$

Gubici nastali strujanjem vode kroz koljena

Koeficijent gubitaka za koljena se najbolje može odrediti u programu gdje je potrebno upisati tip koljena, elevaciju te odnos središnjeg radijusa cijevi i promjera koljena. U ovom slučaju gubici su nastali radi promjene smjera strujanja kod kuta od 90°. Osim u programu koeficijent se može odrediti iz tablica ili manje precizno uz pomoć slike 3.6. sa koje je uzet koeficijent gubitaka za koljeno u iznosu od 1,4.

$$h_{lok} = \xi \frac{v_2^2}{2g} = 1.4 \frac{0.59^2}{2g} = 0.025 \text{ m}$$

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je sustav navodnjavanja Valtura te su provedene simulacije i analize rada sustava u različitim slučajevima pomoću komercijalnog softvera AFT Fathoma. Program radi na temelju općih zakonitosti strujanja fluida u cijevima koji su također opisani u prvom djelu ovog rada. Trenutačni sustav navodnjavanja podijeljen je u tri zone koje se ne mogu navodnjavati istovremeno jer se koriste samo dva rolomata.

Zahvaljujući programu AFT Fathom provedene su simulacije rada sustava u nekoliko slučajeva. Oni uključuju analizu sustava kada se navodnjavaju samo pojedine zone, cijeli sustav ili prošireni sustav. Svi slučajevi su provedeni sa tlakom na crpnoj stanici od 8,5 bara kako bi se mogli usporediti izlazni tlakovi na hidrantima i cijevima. Iz analize tlakova zaključuje se da sustav može pravilno funkcionirati ne samo kada se navodnjava jedna zona, nego i u slučaju kada bi se navodnjavao cijeli sustav s pomoću pet rolomata. Štoviše, čak i prošireni sustav sa još jednim dodatnim rolomatom može optimalno raditi. U svim slučajevima su zadovoljeni uvjeti da se na hidrantu postiže minimalan tlak od 6 bara. To je ključno da bi raspršivači mogli optimalno prekriti sa vodom određenu površinu. Nadalje, pošto su cijevi izgrađene od materijala koji ne podnosi tlakove veće od 10 bara, nigdje u sustavu se ne smije pojavljivati tolika vrijednost jer bi se riskiralo moguće oštećenje sustava i nepravilan rad. Iz analize se može zaključiti da povećanje broja aktivnih hidranata ima za posljedicu smanjenje tlaka u sustavu te potrebu za većim ulaznim tlakom. Također je vidljivo da što su hidranti udaljeniji od crpne stanice u pravilu imaju niže tlakove te zahtijevaju veći ulazni tlak.

7. LITERATURA

- [1] Idel'chik, I. E.: „Handbook of Hydraulic resistance“, Hemisphere Publishing, 1986
- [2] Balent, N.: „Usporedni konstrukcijski proračun linijske i kružne vodene instalacije obiteljske kuće“, s Interneta, <https://repozitorij.mev.hr/islandora/object/mev%3A168/datastream/PDF/view>, 26.rujna 2015.
- [3] Madjar, S.; Šoštarić, J.: „Navodnjavanje poljoprivrednih kultura“, Kromopak d.o.o., Osijek, 2009.
- [4] Kranjčević, L.: „Mehanika fluida“, skripta za studente Tehničkog fakulteta u Rijeci, Rijeka, 2013.
- [5] „Applied Flow Technology“, s Interneta, <http://www.aft.com/products/fathom>
- [6] „Viskoznost“, s Interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Viskoznost>

8. DODACI

8.1. Popis slika

Slika 2.1. Shema sustava za navodnjavanje Valtura	2
Slika 2.2. Akumulacijsko jezero Bakranjuša prilikom izgradnje	3
Slika 2.3. Današnji prikaz akumulacijskog jezera... ..	4
Slika 2.4. Sabirni cjevovod	5
Slika 2.5. Četiri visokotlačne centrifugalne pumpe	5
Slika 2.6. Osnovne informacije o korištenoj pumpi.....	6
Slika 2.7. Prikaz nacрта pumpe	7
Slika 2.8. Dovodne cijevi u tunelu	8
Slika 2.9. Usisna košara.....	9
Slika 2.10. Revizijsko okno	9
Slika 2.11. Cijevi na ulazu u crpnu stanicu.....	10
Slika 2.12. Prikaz akumulacije i ostatka sustava.....	10
Slika 2.13. Rolomat OCMIS 110... ..	11
Slika 3.1. Prikaz strujanja fluida kroz dvije ploče	12
Slika 3.2. Viskoznost.....	13
Slika 3.3. Prikaz strujanja kod suženja cijevi.	14
Slika 3.4. Prikaz cijevi u presjeku.	16
Slika 3.5. Koeficijent K za naglo proširenje.	20
Slika 3.6. Koeficijent K kod koljena.	20
Slika 3.7. Koeficijent K kod ulaza u cijevi.....	21
Slika 4.1. Prikaz radnog prostora programa.....	22
Slika 4.2. Prikaz izlaznih podataka.	23
Slika 4.3. Definiranje cijevi distribucijskog sustava.....	24
Slika 4.4. Izlazni podaci za distribucijske cijevi u sustavu.....	25
Slika 5.1. Podjela sustava navodnjavanja po zonama.....	26
Slika 5.2. Tlakovi u sustavu za slučaj 1	27
Slika 5.3. Tlakovi u sustavu za slučaj 2.....	28
Slika 5.4. Tlakovi u sustavu za slučaj 3	29
Slika 5.5. Položaj aktivnih hidranata u sustavu.....	30
Slika 5.6. Tlakovi u sustavu za slučaj 4.....	31

Slika 5.7. Položaj aktivnih hidranata u sustavu.....	32
Slika 5.8. Prošireni sustav sa zonom D	33
Slika 5.9. Prikaz unošenja podataka za novi cjevovod.....	35
Slika 5.10. Unošenje elevacije za određeni čvor.....	35
Slika 5.11. Tlakovi u sustavu za slučaj 5.....	36
Slika 5.12. Dimenzija cijevi novog cjevovoda.....	38

9.2. Popis tablica

Tablica 5.1. Analiza sustava za različite slučajeve ...	26
Tablica 5.2. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 1	28
Tablica 5.3. Tlak na hidrantu kod slučaja 2... ..	29
Tablica 5.4. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 3.....	30
Tablica 5.5. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 4.....	32
Tablica 5.6. Prikaz dimenzija novog cjevovoda ...	34
Tablica 5.7. Tlakovi na hidrantima kod slučaja 5.....	37
Tablica 5.8. Koeficijenti lokalnog gubitka kod suženja ...	39

SAŽETAK

U ovom radu najprije se daju osnovne informacije o sustavu navodnjavanja Valtura. Pojedinačno su opisani glavni dijelovi sustava te je objašnjeno na koji način sustav funkcionira. Zatim su teoretski obrađene opće zakonitosti koje se javljaju prilikom strujanja fluida u cijevima kako bi se bolje percipirala problematika zadatka. U daljnjem djelu rada opisan je način rada u programu AFT Fathom, s pomoću kojega je provedena hidraulička analiza sustava navodnjavanja. Nadalje, u njemu se napravljene simulacije za različite slučajeve navodnjavanja te su dobiveni rezultati prikazani tablično i vizualno. Na temelju dobivenih rezultata može se utvrditi da će sustav pravilno funkcionirati kod svih slučajeva jer su dobivene vrijednosti tlakova u cijevima i u hidrantima unutar propisanih granica.

Ključne riječi: sustav navodnjavanja Valtura, AFT Fathom, hidraulička analiza, tlak

ABSTRACT

This paper first provides with basic information on the Valtura irrigation system. The main parts of the system are described individually and explanation on how the system works is also given. Then, the general regularities that occur during fluid flow in pipes are theoretically addressed in order to better perceive the problem of the task.. The next part of the paper describes how to work in the AFT Fathom software, which is used to perform a hydraulic analysis of the irrigation system. Furthermore, simulations for different irrigation cases are made with this software and the results obtained are presented in tables and visually. Based on the obtained results, it can be determined that the system will function properly in all cases because the values of the pressure in the pipes and in the hydrants are within the prescribed limits.

Key words: Valtura irrigation system, AFT Fathom, hydraulic analysis, pressure