

# ANALIZA STRUJANJA U PODMORSKOM ISPUSTU

---

**Abramović, Dino**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:190:740822>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-01**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA U PODMORSKOM ISPUSTU**

Mentor: Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, rujan 2023.

Dino Abramović

0069086701

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo  
Predmet: Mehanika fluida  
Grana: 2.15.04 mehanika fluida

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: Dino Abramović (0069086701)  
Studij: Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Zadatak: Analiza strujanja u podmorskom ispustu / Submarine Outlets Fluid Flow Analysis

### Opis zadatka:

Provesti hidrauličku analizu zadanog ispustva. Upotrebom komercijalnog softvera ili open-source softvera numerički simulirati strujanje. Prikupiti potrebne podatke morfologije dna obalnog područja od interesa. Opisati moguće polutante i načine unosa polutanata u obalno more.

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

*Dino Abramović*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

*Lado Kranjčević*

Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

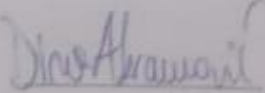
*Kristian Lenić*

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

Sukladno članku 7. iz pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku prijediplomskog sveučilišnog studija, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad „ANALIZA STRUJANJA U PODMORSKOM ISPUSTU / SUBMARINE OUTLETS FLUID FLOW ANALYSIS“ koji mi je dodijeljen 16. Ožujka 2022.

Rijeka, Rujan 2023.

  
Dino Abramović

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	O STRUJANJIMA FLUIDA.....	2
2.1.	Mehanika fluida.....	2
2.2.	Tipovi strujanja fluida.....	3
2.2.1	Laminarno strujanje.....	3
2.2.2	Turbulentno strujanje .....	3
2.2.3	Prijelazno strujanje.....	4
2.3.	Podmorski ispušt.....	4
2.4.	Hidrauličko dimenzioniranje .....	6
3.	HIDRAULIČKA ANALIZA CJEVOVODA .....	9
3.1.	Proračun difuzora.....	9
3.2.	Proračun otvora difuzora .....	13
4.	ANALIZA POMOĆU SOFTVERA AFT FATHOM 9 .....	16
4.1.	Analiza problematike.....	16
4.2.	Postavljanje geometrije.....	18
5.	ANALIZA SOFTVERSKI DOBIVENIH PODATAKA .....	27
5.1.	Analiza dobivenih vrijednosti za cijevi do difuzora .....	27

5.2. Analiza dobivenih vrijednosti za difuzorsku jedinicu .....	29
6. ZAKLJUČAK .....	37
7. LITERATURA .....	38
SAŽETAK.....	40
SUMMARY .....	41

# 1. UVOD

Podvodni morski ispusti integralni su dio kompleksne mreže tehničkih disciplina koje su sakupljene kod izrade sistema za odvod otpadnih voda. Sami ispusti stoje kao žarište koje mora biti kritički i tehnički razmotreno. Ovi ispusti koji obavljaju funkciju kontroliranog otpuštanja tretiranog ili netretiranog efluenta u područja morskih voda imaju višestranu važnost koja seže i u hidrodinamiku, okolišnu čistoću, javno zdravstvo te ekološki balans.

Hidrodinamika podvodnih kanalizacijskih ispusta širi se dalje od same disperzije, morske struje i načini miješanja u velikoj mjeri utječu na transport ispuštenih supstanci. Razumijevanje same povezanosti između ispusne brzine, kompozicije efluenta, okolnih morskih struja vitalno je za izradu, a prvenstveno i razumijevanje potencijalnih disperzijskih modela i lokalnih koncentracijskih gradijenata. Takva saznanja u mehanici fluida su fundamentalna kako bi se s razumijevanjem moglo modelirati i projektirati jedan podvodni ispust, s naglaskom na ekološki utjecaj ispusta.

Osim u znanstvenom smislu, podvodni kanalizacijski ispusti isprepliću se usko s higijensko-zdravstvenim potrebama. Potencijal za razvoj patogenih mikroorganizama u neadekvatno tretiranim efluentima mogu biti rizični za kvalitetu obalne vode. Tu se također nalazi razlog zašto je potrebna napredna analiza, modeli predviđanja i metodologija procjene rizika kao alati koji mogu s velikom sigurnošću omogućiti donošenje pravih odluka kako iz sigurnosnih tako i zdravstvenih aspekata.

Pri usponu svijesti o problemima s okolišem, važnost podvodnih ispusta postaje nepokolebljivo istaknuta. Navigacija ovim kompleksnim terenom zahtjeva multidisciplinarnan pristup, prihvaćanje inženjerskih inovacija, znanstvene oštine i regulatorne pronicljivosti. Cilj stvaranja održivih rješenja nije više samo znanstveni pothvat, već i društvena odgovornost očuvanja delikatna ekvilibrijuma naših oceana za sadašnje i buduće generacije.

Tema je ovog završnog rada hidraulička analiza jednog podvodnog ispusta pomoću softverskih rješenja. Zadatak je izvršiti što precizniju analizu jednog podmorskog ispusta na lokaciji grada Rijeke, analiza se vrši putem softvera *AFT Fathom 9*. Putem analize trebali bi dobiti saznanja kako će se ponašati fluid u cjevovodu, te se može aproksimirati kakva bi nam pumpna stanica bila potrebna kako bi se napajao jedan takav sistem.

## 2. O STRUJANJIMA FLUIDA

### 2.1. Mehanika fluida

Sve što nas okružuje, poput zraka, vode, tla, predmeta i živih bića, sastoji se od materije. Materija je skup čestica i sve je ono šta ima masu i zauzima prostor. Materija se dijeli na čvrstu materiju i tekućinu. [1]

U čvrstom stanju materije, molekule su posložene u kristalnu rešetku s malim stupnjem slobode gibanja, što im daje svojstvo čvrstoće, tvrdoće i sl. Ovisno o tipu kristalne rešetke u koju se molekule „poslože“ ta svojstva variraju u intenzitetu, tip kristalne rešetke je određen građevnim materijalom rešetke (broj molekula unutar rešetke, raspored tih molekula, i tip veze među molekulama).

Mehanika fluida bavi se drugim stanjem materije, fluidima. Fluid (lat. *fluidum*: tekućina) je kapljevina ili plin, tekuća ili plinovita kemijska tvar kojoj molekule lako mijenjaju svoj relativan položaj (voda, zrak, alkoholi i drugo) [2]. Mehanika fluida dijeli se na dvije grane: statiku i dinamiku fluida.

Statika fluida bavi se proučavanjem pojava i sila na fluid u stanju mirovanja; takav je fluid onaj kojemu se svaka čestica ne giba, tj. brzina čestice fluida u svakoj točki proizvoljnog koordinatnog sustava jednaka je nuli [3]. Statika fluida koristi se kod proračunavanja i projektiranja brodskih plovila, primjerice kod izračuna uzgona plovila uzrokovano njegovom težinom (deplasmana).

Dinamika fluida bavi se protokom fluida. Sadrži nekolicinu poddisciplina, od kojih su poznatija polje aerodinamike (znanost gibanja zraka i ostalih plinova) i hidrodinamike (znanost gibanja tekućina). Dinamika fluida koristi se također kod projektiranja brodskih plovila, specifično kod izrade i optimizacija primjerice: kormilarskih strojeva i brodskih vijaka, gdje je smanjenje otpora pri gibanju i osiguranje gibanja bez pojave kavitacije od velike važnosti za trajnost i kvalitetu izlaznog proizvoda.



## 2.2. Tipovi strujanja fluida

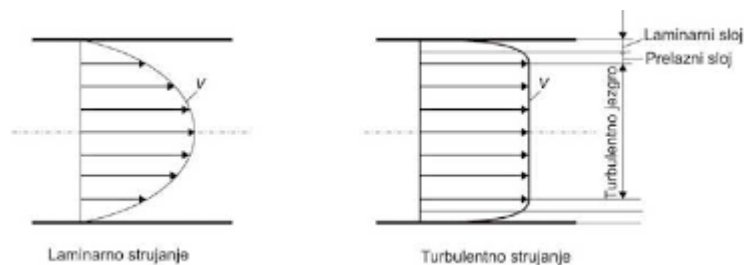
Pojava gibanja fluida, bilo to kroz neku cijev, ili drugi profil, naziva se protjecanjem ili strujanjem fluida. Način na koji se fluid pokreće može biti ili silom težom (gdje fluid zbog visinske razlike između dva položaja dobiva energiju za strujanje) ili razlikom tlakova između dva položaja strujanja (najčešće uzrokovano nekom pumpom – imamo tlačnu i usisnu stranu). Primjerice priroda je riješila navodnjavanje krških polja silom težom, gdje se zbog velike količine oborina voda probija i kemijski reagira s vapnencem i dolomitom te tvori agrikulturno iskoristivo tlo, također dolazi do pojava rijeka ponornica. Strujanje fluida sveprisutno je i koristimo ga svakodnevno, makar za higijenske svrhe. Postoji više vrsta strujanja fluida, ali osnovne su laminarno i turbulentno strujanje (Slika 2.1). Na prijelazu iz laminarnog u turbulentno strujanje također se javlja i prijelazno strujanje.

### 2.2.1 Laminarno strujanje

*Laminarno strujanje* je mirno strujanje, gdje fluid struji u paralelnim slojevima s minimalnim miješanjem struja [4], a sila koja djeluje na objekt koji se giba kroz plin ili tekućinu djeluje sila kojoj je smjer djelovanja suprotan smjeru gibanja fluida. Laminarno se strujanje pojavljuje kod malih brzina, tj. kod malih vrijednosti Reynoldsovog broja ( $Re < 2300$ ). Krv koja struji kroz kapilare zapravo struji laminarno.

### 2.2.2 Turbulentno strujanje

*Turbulentno strujanje* je kaotičan tip strujanja i javlja se pri  $Re > 4000$  i uzrokovano je kaotičnim razlikama tlaka i brzina između slojeva fluida te se zbog toga miješaju slojevi fluida. Turbulentno strujanje puno je češća pojava od laminarnog strujanja.



Slika 2.1 - prikaz laminarnog i turbulentnog strujanja

### 2.2.3 Prijelazno strujanje

*Prijelazno strujanje* mješavina je laminarnog i turbulentnog strujanja, s turbulentnim koje okupira sredinu elementa, dok se oko stijenke stvaraju laminarni slojevi. Ako zamislimo mirujući fluid s Reynoldsovim brojem u iznosu 0, te taj fluid lagano pokrenemo dok ne postignemo  $Re = 2300$  (laminarno strujanje) taj fluid struji laminarno sve dok inercijske sile ne nadvladaju viskozne sile, tj. dolazi do pojave turbulencijskih naleta. Što dalje povećavamo brzinu strujanja, to će strujanje biti sve turbulentnije dok  $Re$  ne pređe granicu od 4000 i strujanje postane potpuno turbulentno. Primjer ove pojave je kada bi balon napunili vodom i objesili ga naopako, prvih par centimetara bi protok bio laminaran, dok sila teža koja djeluje na vodu ne ubrza fluid do razine pojava turbulencija, u idealnom bi slučaju taj prijelaz mogli zamijetiti kao glatku površinu na rubu profila koji struji, dok je u sredini jako turbulentan, širi se posvuda.

### 2.3. Podmorski ispust

Ispusti su zadnji objekt kanalizacijskog sustava. Ispustom smatramo onaj objekt koji povezuje izvor vode i sustav kanalizacije. Oni su dakle u direktnom kontaktu, gdje taj kontakt određuje mogućnosti rješenja ispusta. Kanalizacija je u ovom slučaju uzročnik zagađenja, a voda resurs kojega treba zaštititi, upravo je rješenje ispusta usko povezano sa zaštitom samih vodnih resursa. Ispusti su u većem dijelu podvodni objekti koji se izvode na poseban i složeniji način nego ostali objekti kanalizacijskog sustava. Oni su manjim ili većim dijelom stalno ispod razine vode što otežava njihovu kontrolu i rad [5].

Svrha samog kanaliziranja naselja je skupiti sve vode i sigurno ih ispustiti u vodne resurse. U kanalizacijskom sustavu razlikujemo:

- Ispuste oborinskih voda;
- Ispuste preljevnih voda;
- Ispuste pročišćenih voda;
- Ispuste djelomično pročišćenih voda.

Osim toga razlikujemo:

- Površinske (obalne) ispuste (iznad površine prijamnika);
- Podvodne ispuste (ispod razine vode prijamnika, udaljene od obale). [6]

Točna pozicija podvodnog ispusta koji je opisan u ovom radu (Slika 2.2), podvodni ispust nalazi se u gradu Rijeci.



*Slika 2.2 – Prikaz podmorskog ispusta*

## 2.4. Hidrauličko dimenzioniranje

Kada se radi o hidrauličkim sustavima, prvenstveno njihovom dimenzioniranju, treba osigurati dvije važne fizikalne veličine :

- Protok fluida ; izražen u [m<sup>3</sup>/h]
- Visinski položaj ispusta ; izražen u [m]

Protok fluida ovisan je o poprečnom presjeku cijevi (2.4.1) kroz koju fluid protječe, te o brzini kojom se sam fluid giba; zakonitost proizlazi iz zakona o očuvanju kinetičke energije; a glasi:

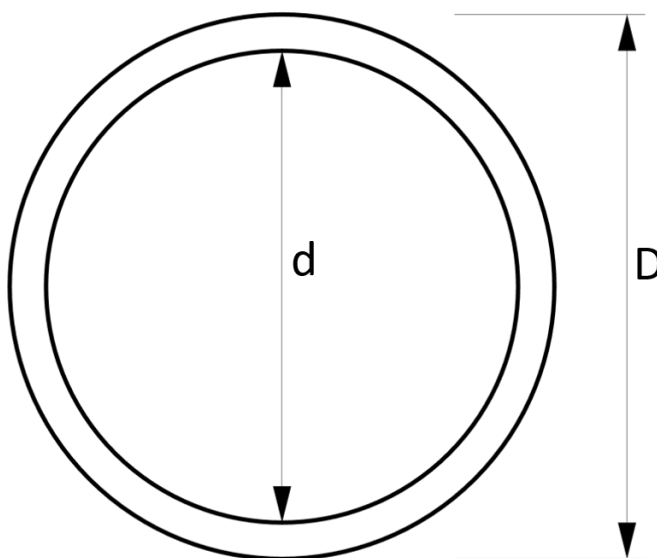
$$Q = A * v \quad (2.4.1)$$

$Q$  = Protok fluida, [m<sup>3</sup> / h]

$A$  = površina poprečnog presjeka kroz koju fluid protječe(Slika 2.3), [m<sup>2</sup>]

$$A = A_{presjeka} - A_{stijenke} \quad (2.4.2)$$

$v$  = brzina gibanja fluida, [m / s]



Slika 2.3 - Poprečni presjek cijevi

Visinski položaj ispusta fizikalna je veličina koja je u slučaju podvodnog ispusta strogo određena reljefom, a visina samog ispusta određuje kolike gubitke može ispust „pretrpjeti“ kako bi sustav neprekidno radio bez povrata, tj. uspora. Ispuniti ove zahtjeve nije lagan zadatak, pa se u slučaju nemogućnosti koristi crpna stanica za ispuštanje voda. U slučajevima u kojima postoji izvjesna vjerojatnost utjecaja prijamnika na rad ispusta provodi se statistička analiza slučajnosti pojavljivanja vodostaja na ispustu i u prijamniku. U svakom slučaju je proračun potrebno napraviti za sljedeće režime tečenja u ispustu i ekstremna stanja prijamnika, a to su:

- Minimalni protok → minimalni vodostaj;
- Minimalni protok → maksimalni vodostaj;
- Maksimalni protok → minimalni vodostaj;
- Maksimalni protok → maksimalni vodostaj;
- Srednji protok → srednji vodostaj.

U skladu s karakteristikama vodostaja(razina – trajanje) i protoka u kolektoru(protok – trajanje), donosi se odluka o optimalnim dimenzijama i visinskom položaju ispusta. Kod ispuštanja u morsku vodu ne smije se zanemariti razlika u gustoći morske i otpadne vode i to uzeti u obzir kod hidrauličkog proračuna. Također ne treba zaboraviti i na utjecaj valova od vjetera ili od plovila. [7] Sam se proračun provodi primjenom uobičajenih hidrauličkih postupaka. U slučaju podvodnih(podmorskih) ispusta, potrebno je zadovoljiti i tražene izlazne brzine koje zahtijevaju i određeni tlak na ispustu. Poseban je zadatak dimenzioniranja difuzora koji se postavlja na kraju ispusta radi što intenzivnije miješanja kanalizacijske vode s vodom prijamnika.

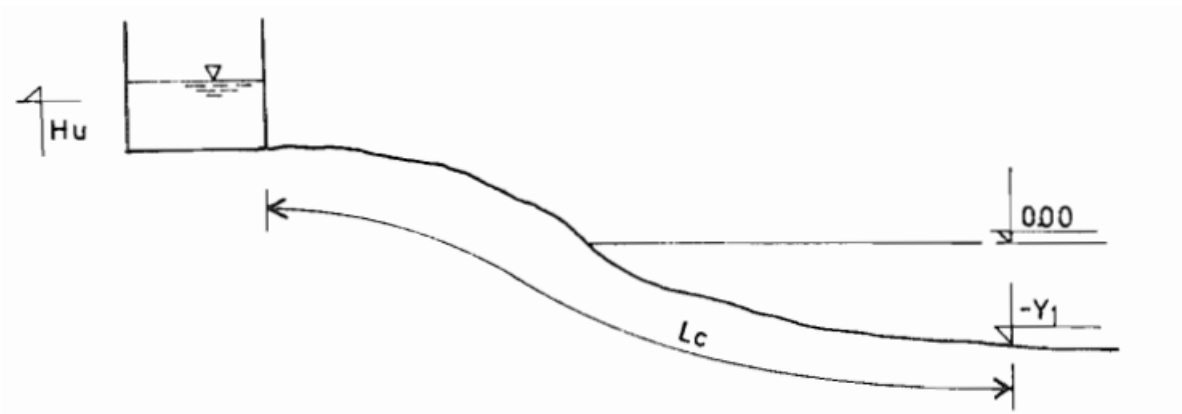
Difuzorski element podmorskog ispusta može se smatrati kao posljednji funkcionalni element svakog kanalizacijskog sistema, koji je dizajniran sa svrhom ispuštanja sakupljene materije u neki vodotok bio on more ili rijeka. Kao što je prije navedeno, čistoća ispusne vode mora biti osiguran s određenim standardom kakvoće vode, tj. potrebno je smanjiti štetne učinke ispusnog medija na okoliš postizanjem adekvatnog procesa miješanja materije i vodotoka, a to se postiže maksimiziranjem početnog razrjeđenja u *bliskom polju*. Laboratorijska i terenska mjerenja su pokazala da se početno razrjeđenje uglavnom može definirati mehanikom turbulentnih mlazova formiranih na izlazima iz sapnica. Tako se pokazalo da na miješanje sudjelujućih fluida značajno utječu posmična naprezanja na granicama mlaza fekalnih voda i vodotoka.

Veličina posmičnog naprezanja je proporcionalna viskoznosti sudjelujućih tekućina i lokalnom gradijentu brzine. Iz toga slijedi kako veće razrjeđenje zahtjeva i veću izlaznu brzinu na sapnici. Osim potrebe za minimalnom izlaznom brzinom, da bi difuzorska sekcija bila učinkovita, potrebno je osigurati i jednoliku raspodjelu protoka po sapnicama. Ukoliko se minimalna izlazna brzina i jednolika raspodjela protoka koriste kao kriteriji optimizacije, utoliko je optimalni difuzor definiran istodobnim ispunjenjem ovih uvjeta. Dimenzioniranje difuzora započinje definiranjem stupnja početnog razrjeđenja koji se želi postići na izlazu iz sapnica, odnosno u *bliskom polju*, te se u tu svrhu mogu koristiti različiti empirijski modeli koji dovode u vezu stupanj razrjeđenja i izlaznu brzinu. Na taj je način moguće definirati minimalnu izlaznu brzinu iz difuzora. Naredni korak u procesu dimenzioniranja difuzora podrazumijeva definiranje geometrije koja će osigurati da izlazna brzina na svim sapnicama bude veća od spomenute, ali isto tako i osigurati da se izlazni protok jednoliko rasporedi po sapnicama.

### 3. HIDRAULIČKA ANALIZA CJEVOVODA

#### 3.1. Proračun difuzora

S proračunom podmorskih ispusta uvijek se započinje s proračunom difuzora; valja napomenuti kako se proračun provodi za najnepovoljnije uvjete (uvjeti najviše plime), gdje je maksimalna visina plime od geodetske nule  $-Y_1$ , a dužina podmorskog ispusta od uređaja za pročišćavanje do difuzora je  $L_c$ , kao što je naznačeno na Slika 3.1

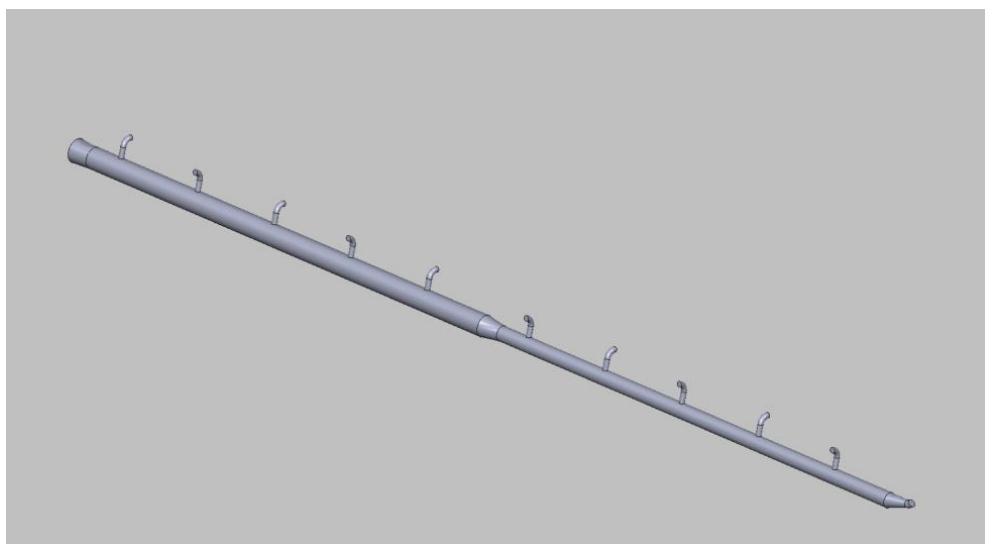


Slika 3.1 - Hidraulička dispozicija podmorskog ispusta

Razmak otvora je  $l_d$  (3.1.1.):

$$l_d \leq \frac{y_1}{3}, \quad (3.1.1)$$

gdje je  $y_1$  dubina mora na mjestu kraja difuzora. Ovo vidimo na modelu difuzora na sljedećoj slici (Slika 3.2). Ukupna dužina difuzora kao i broj otvora, u funkciji je potrebnog razrjeđenja koje je potrebno odrediti prema ekološkim zahtjevima i čistoći (filtraciji) pri dimenzioniranju ispusta. Veličinu otvora difuzora, bilo kakve promjene otvora na difuzoru (redukcije, ekspanzije), koljena, t-spojeve treba odrediti proračunom. Redoslijed provođenja proračuna kreće od nizvodnog kraja ka uzvodnom. Primjerice na slici (Slika 3.2) proračun se započinje od zadnjeg otvora desno, pa prema sve većim unutarnjim promjerima koji slijede prema lijevo.



Slika 3.2 - 3D model difuzora, moguće je opaziti 10 otvora i krajnji 11. otvor (desno)

Sam proračun prati sljedeću logiku: Difuzor ima  $n$  otvora. U presjeku nakon  $n$ , tj.  $n+1$  gdje se cijev ispusta spaja s cijevi difuzora, nema otvora. Prema zakonu očuvanja kinetičke energije na svakom otvoru mora istjecati ista količina efluenta; nazovimo ga  $dQ$ . Prvi profil u difuzoru (na prikazanom primjeru prvi s desne strane) služi kao trostruki izlaz zbog potrebe osiguranja konstantnog ispiranja difuzora.

Prema tome vrijedi zakonitost (3.1.2):

$$dQ = \frac{Q * d}{n+2} \quad (3.1.2)$$

Difuzor se u praksi postavlja pri blagom nagibu ( $I_d$ ) između 1 i 2%.

Kota dna cijevi u profilu  $i$  (3.1.3):

$$Y_i = - (Y_1 - (i - 1) * l_d * I_d) \quad (3.1.3)$$

Pritom uzimajući u obzir gustoću morske vode i čiste vode, kao i veličinu plime, tlak u moru na mjestu ispusta (3.1.4) je:

$$P_{mi} = (-Y_i + Y_{plime}) * \frac{\rho_m}{\rho_v} \quad (3.1.4)$$



ovo je izvedenica formule statičkog tlaka u vodi koji glasi riječima:

tlak na nekoj dubini fluida = gustoća fluida u kojem se predmet nalazi \* ubrzanje sile teže \* dubina na kojoj je objekt uronjen (ako su u pitanju cijevi ta dubina je mjerena do središnje linije cijevi); u gornjoj formuli može se primijetiti kako nije korišteno ubrzanje sile teže; ovo je zanimljiv koncept koji se koristi kod otvorenih cjevovoda.

Naime ubrzanje sile teže ne utječe na hidrostatički tlak zato što tlak cijevi u cjevovodu nije određen silom težom koja utječe na fluid, već samim geometrijskim oblikom kanala. Oblik kanala kroz koji fluid prolazi diktira na kojoj dubini će se nalaziti ispusna cijev, a ta dubina dalje diktira hidrostatski tlak. Što znači da će kanal bilo kojeg oblika proizvoditi uvijek jednaki hidrostatski tlak, neovisno o ubrzanju sile teže. Ubrzanje sile teže ne smijemo zanemariti kod kalkulacije hidrostatskog tlaka fluida unutar samog cjevovoda, također uzima se u obzir brzina fluida, geometrija cjevovoda, gustoća fluida unutar cjevovoda. Kada fluid struji otvorenim kanalom, giba se uniformno jednom putanjom, znači da je pritisak fluida također jednak u svim direkcijama, stoga sila teža nema utjecaja. Jedina sila koja utječe na tlak fluida u otvorenom cjevovodu je inercija fluida koja jedino ovisi o brzini gibanja fluida i njegova gustoća.

Razlika tlaka u moru i cijevi uzrokuje istjecanje kroz otvor. Mora postojati nad tlak u ispustu kako bi se "pobijedio" hidrostatički tlak koji je prisutan na dubini ispusta. Ako se pretpostavi promjer otvora  $d_{pret}$ , tada se brzina istjecanja fluida računa po formuli(3.1.5):

$$v_i = C_i * \sqrt{(2g * E_i)} \quad (3.1.5)$$

gdje je:

$C_i$  - koeficijent istjecanja izračunat po formuli (3.1.6):

$$C_i = C_o \left[ 1 - \frac{v_i^2 * g}{E_i} \right]^{0.375} \quad (3.1.6)$$

$C_o$  - koeficijent koji ovisi o tipu otvora:

$$C_o = 0.630 \text{ za oštrobriđni otvor}$$

$C_o = 0.975$  za zaobljeni otvor

Utjecaj tipa otvora na brzinu je sljedeći: ako je otvor oštrobriđan onda je brzina istjecanja manja od one brzine koja se postiže glatkim otvorom. Postići brzinu određenu standardom (u slućaju podmorskih ispusta ona mora iznositi 0.8 [m/s]) jedan je najskupljih zahtjeva, uvijek je povoljnije birati zaobljene otvore iz stanja ekonomije. Naime, ako je otvor oštrobriđan onda će izabrana pripremna jedinica morati biti snažnija, ili će potrošnja materijala početne pripreme jedinice biti veća, zbog odnosa krivulje pumpe i karakteristika cjevovoda. Ovo je za manje ispuste poput ovog prikazanog u ovom radu više manje neprimjetno, ali kada bi se skaliralo na veće gradove ovi gubici, bili oni ekonomski (prvenstveno snaga pripreme jedinice i potrošnja materijala) ili tehnićki (radna toćka pumpe, efikasnost rotora) biti će eksponencijalno veći.

$v_i$  - brzina u difuzoru ispred presjeka  $i$ .

$$E_i = P_i - P_{mi} + \frac{v_i^2}{2g}, \quad (3.1.7)$$

### 3.2. Proračun otvora difuzora

Prvi se otvor u difuzoru uzima kao trostruki (3.2.1), protok u difuzoru ispred pozicije 1 jest:

$$Q_1 = 3 * dQ \quad (3.2.1)$$

Promjer difuzora  $D_{pretp}$  se mora pretpostaviti te se putem njega računa brzina u difuzoru (3.2.2) na sljedeći način:

$$v_1 = \frac{Q_1}{D_{pretp}^2 * \frac{\pi}{4}} \quad (3.2.2)$$

Brzina mora iznositi više od 0.8 [m/s]. Kroz ove jednadžbe dalje iterativnim postupkom dolazi se do odgovarajućeg promjera. Za odabrani profil dalje se određuje veličina otvora i tlak cijevi u poziciji 1. Postavlja se uvjet da Froudeov broj ulaza ne bude manji od vrijednosti 4(3.2.3):

$$Fr_1 = \frac{U_1}{d_1 * \sqrt{\frac{\rho m - \rho v}{\rho v} * g}} \geq 4 \quad (3.2.3)$$

Iterativnim postupkom dalje se kroz nekolicinu koraka dolazi do traženih veličina: tlaka u poziciji 1 i promjera ispusta cijevi na poziciji 1. Froudeov broj u mehanici fluida opisuje pojavu nastanka hidrauličkog skoka. Hidraulički skok nastaje kada Froudeov broj iznosi približno 1, a javlja se pri prijelazu nadkritičnog u podkritično strujanje. Može se opisati kao pojava naglog pada tlaka koji se manifestira kao energija koja se predaje fluidu za stvaranje turbulencije. Što je veći Froudeov broj, time je veći otpor kretanja plovila kroz fluid. Froudeov broj jedan je od bitnih faktora kod optimizacije trupa broda, kako bi se stvorilo što manje valova, koji su pojava disipacije energije kod kretanja broda; tj. predana neiskorištena kinetička energija pogonskih motora. Hidraulički skok se u inženjerstvu primjenjuje za rasipanje energije u kanalima, preljevima brana i sličnim strukturama, kako bi se spriječilo uništavanje građevinskih struktura zbog velike kinetičke energije fluida.

Protok u ostalim otvorima difuzora (3.2.4) računa se temeljem sljedeće formule:

$$Q_i = Q_{i-1} + dQ \quad (3.2.4)$$

Profil difuzora  $D_i$  bira se na isti način kao  $D_{i-1}$ . Tlak se u cijevi  $p_i$  dobije dodavanjem gubitaka uzrokovanih trenjem između promatranih presjeka  $i-1$  i  $i$  na tlak u prethodnom presjeku  $p_{i-1}$  te se na njega još pribroje lokalni gubici promjene profila difuzora, postojećih koljena i sličnih karakterističnih geometrija.

Tlak na  $i$ -tom presjeku (3.2.5) određuje se prema sljedećoj formuli:

$$p_i = p_{i-1} + \Delta h_i^{(1)} + \Delta h_i^{(2)} \quad (3.2.5)$$

Gdje je  $\Delta h_i^{(1)}$  (3.2.6) :

$$\Delta h_i^{(1)} = \lambda_i * \frac{l}{D_{i-1}} * \frac{v_{i-1}^2}{2g} \quad (3.2.6)$$

Gornja je formula poznata iz mehanike fluida kao formula dužinskih gubitaka u cjevovodu (3.2.7); gdje je  $\lambda_i$  po Colebrooke-Whiteovoj formuli:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \log \left( \frac{\varepsilon}{3,71 D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.2.7)$$

$\varepsilon$  - hrapavost cijevi (= 0.0015 mm za stakloplastiku)

$Re$  – Reynoldsov broj ( omjer inercijalnih i viskoznih sila [3.2.8]):

$$\text{Re} = \frac{v * D}{\nu} \quad (3.2.8)$$

$\nu$  – viskoznost tekućine ( $1,31 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ )

$$h_i^{(2)} = \zeta * \frac{v_i^2}{2g}, \quad (3.2.9)$$

$\zeta$  – koeficijent lokalnog gubitka pri sužavanju cijevi u smjeru toka ( $\zeta_{max} = 0,5$ )

Colebrooke-Whiteova formula empirijska je formula dobivena eksperimentalno i mnogi inženjeri danas je koriste kako bi odredili Darcyjev koeficijent trenja; korišten u Darcy-Weisbachovoj jednadžbi hidrauličkih gubitaka koja se smatra teorijski točnijom aproksimacijom pada tlaka u cjevovodima. Darcy-Weisbach formula temelji se na ravnoteži sila između pogonskih sila tlaka i sile teže, „spriječenu“ padom tlaka i odgovarajuća je za svaki Newtonski fluid. Darcy-Weisbachova zakonitost ustanovljena je oko 1850. godine, no istraživačima su trebala desetljeća dok otkriju kako odrediti  $\lambda$ . Kako  $\lambda$  nije „lijepa“ konstanta već varira u ovisnosti s hrapavosti cijevi, brzinom gibanja fluida, gustoćom fluida i viskoznosti, trebalo je doći do pojednostavljenog načina za dolazak do  $\lambda$ . Tu dolaze Colebrook i White. Temeljem istraživanja Ludwiga Prandtla i Johana Nikuradse-a, koji otkrivaju da se  $\lambda$  korelira s Reynoldsovim brojem (omjer inercijalnih i viskoznih sila) i relativnoj hrapavosti površine cijevi, Colebrook i White deriviraju poznatu zakonitost koja se nalazi gore (3.2.7).

Zakonitost se ne može riješiti da se dobije eksplicitno rješenje za  $\lambda$ ,  $\lambda$  je na obje strane jednadžbe. Što znači da se mora educirano pogodati, i iterirati dok rješenja ne krenu konvergirati u  $\lambda$ .

Dalje se računa brzina istjecanja  $v$ , a iz nje se određuje veličina otvora (3.2.10):

$$d_i = \sqrt{\frac{Q_i^{*4}}{\pi^{*} v_i}}, \quad (3.2.10)$$

Kod izbora veličine otvora difuzora treba voditi računa i o tehničkim ograničenjima, iz kojih proizlazi da veličina otvora treba biti jednaka ili veća od 60 [mm]. Pri tome brzina vode na otvoru treba biti 2-3 [m/s]. Poželjno je da se otvori postave veći, jer se time smanjuje mogućnost začepjenja, i da su veće izlazne brzine što stvara veći podtlak na izlazu koji stvara turbulenciju ispuštenih voda i bolje miješanje s vodom prijammika.

## 4. ANALIZA POMOĆU SOFTVERA AFT FATHOM 9

### 4.1. Analiza problematike

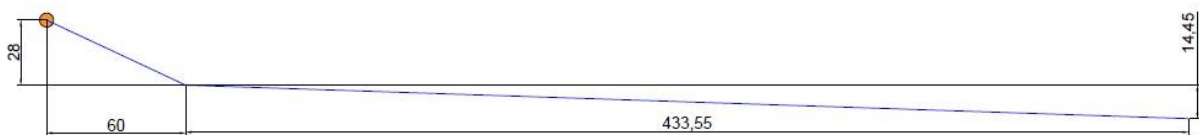
Model ispusta sastoji se od 2 dijela. Dionica cijevi od 500 [m] promjera 1100 [mm], postavljena je kao što je prikazano na slici, otklonjeno pod kutom u odnosu na teren. Narančasta točka predstavlja ulaz (koji se nalazi u razini mora).

Nakon toga je postavljen difuzor u dužini 48 [m](Slika 3.2). Difuzorski dio također je nagnut pod  $2^\circ$  u odnosu na horizontalnu površinu zbog nagiba dna mora.

Zadani podaci za podmorski ispust:

- Gustoća ( $\rho$ ): 998 [kg/m<sup>3</sup>].
- Protok ( $Q$ ): 500 [l/s].
- Cjevovod je izrađen od stakloplastike.

Zadatak je napraviti analizu za različite raspone hrapavosti i različite koeficijente lokalnih gubitaka na izlaznim presjecima.



Slika 4.1 - Na slici je prikazan dvodimenzionalni model ispusta prije difuzora, gdje narančasta točka prikazuje ulaz na razini mora.

Prema Slika 4.1. lako je uočljivo kako je početni dio ispusta pod većim nagibom u odnosu na horizontalnu površinu te nakon 60 metara te dionice nastavlja se dalje 433,55 metara duga dionica pod nagibom od  $2^\circ$  u odnosu na horizontalnu površinu.

Nagib u odnosu na horizontalnu površinu izračuna se putem funkcije tangensa(4.1.1); na sljedeći način:

$$\arctan\theta = \frac{14,45}{433,55} \quad (4.1.1)$$

Iz kojeg dalje slijedi:

$$\theta = 1,9089^\circ \rightarrow \theta \approx 2^\circ$$

Također je za potrebe točnog određivanja pada tlaka u cjevovodu prve dionice potrebno proračunati nagib u odnosu na horizontalno dno(4.1.2), putem istih zakonitosti:

$$\arctan\varphi = \frac{28}{60} \quad (4.1.2)$$

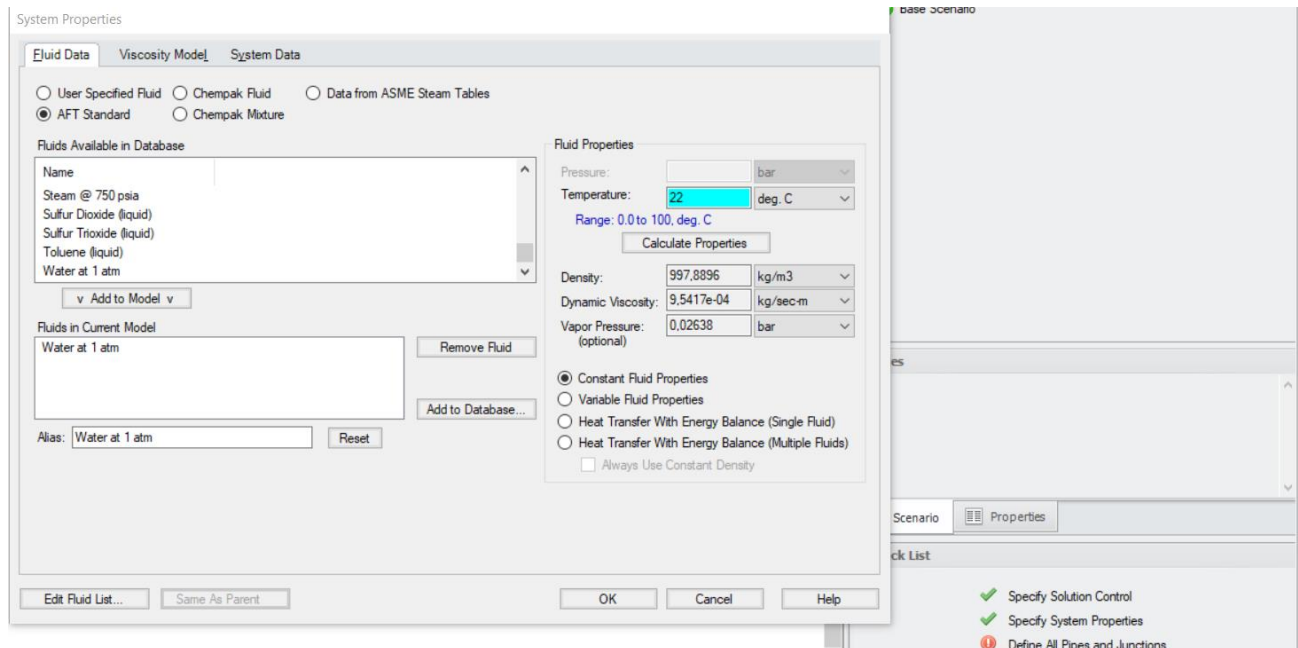
Iz kojeg dalje slijedi:

$$\varphi = 25.017^\circ \rightarrow \varphi \approx 25^\circ$$

Temeljem ovih podataka možemo započeti analizu cjevovoda u programu u AFT Fathom 9. Softverom ćemo riješiti ovu problematiku na vizualno predočiv i jednostavan način definiranjem svake pojedine grane u sustavu. Tvrtka AFT stvorila je ovaj softver koji se danas koristi u mnogim branšama koje se bave dinamikom fluida; gdje je AFT Fathom softver koji se koristi kako bi se odredili padovi tlaka i podjela protoka tekućina i plinova niskih vrijednosti brzina u cijevima i kanalima.

## 4.2. Postavljanje geometrije

Za početak se mora postaviti program kako bi davao adekvatne podatke za analizu, to radimo klikom na crveni gumb u donjem desnom kutu gdje postavljamo te uvjete(Slika 4.2)

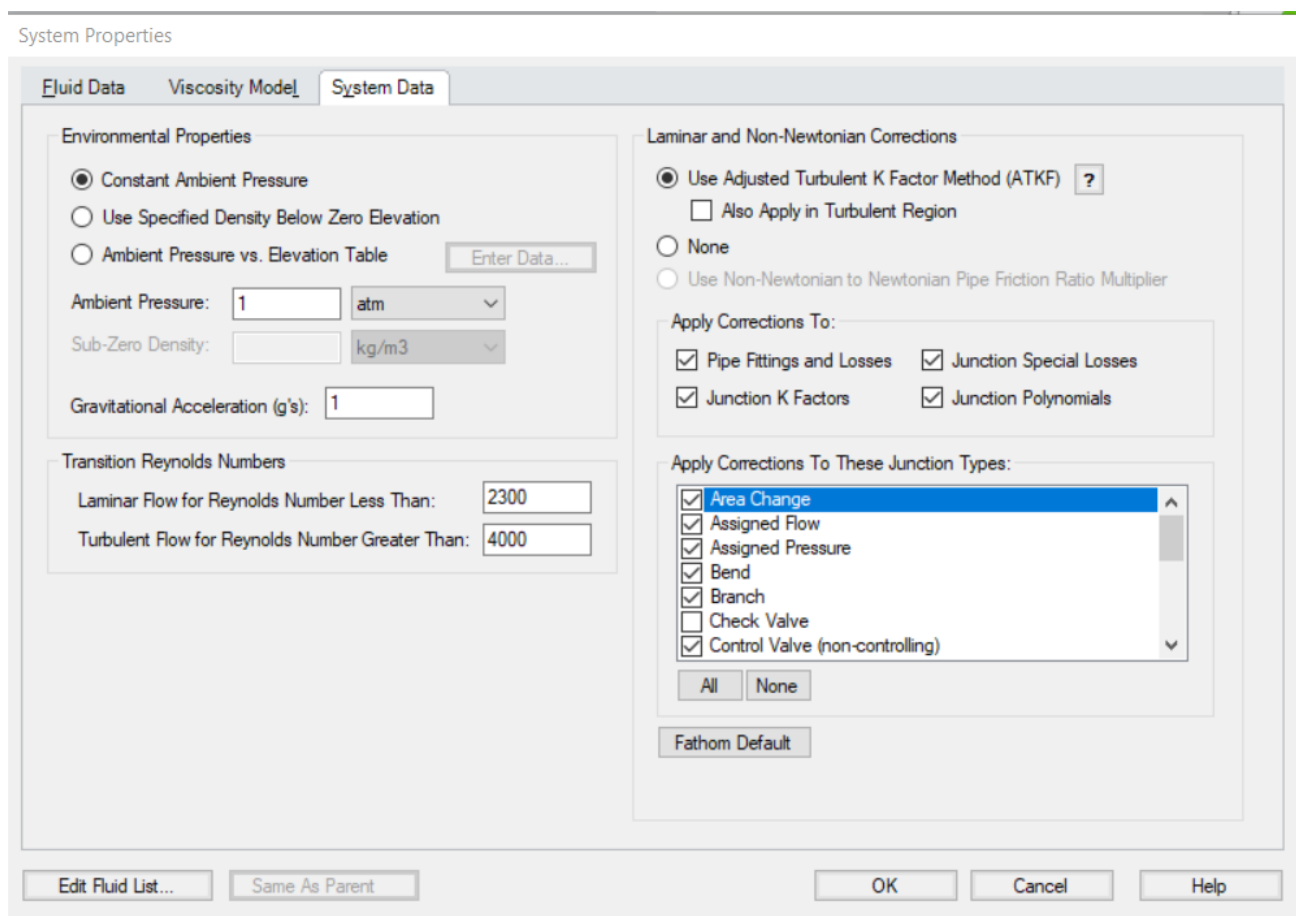


Slika 4.2 - Postavljanje postavki fluida u programu AFT Fathom 9

Kao što je uočljivo u donjem desnom kutu postoji „check list“ koji je potrebno zadovoljiti kako bi program mogao izvršiti analizu, klikom na „Specify System Properties“ postavljaju se uvjeti u kojima se fluid nalazi. Prema srednjoj temperaturi od 22[°C] program je kalkulirao gustoću fluida koji se nalazi u cjevovodu i tako smo dobili brojku vrlo blisku onoj zadanoj, dinamička viskoznost se također tu nalazi kao jedan od bitnih faktora kod računanja Reynoldsovog broja koji nam prikazuje prirodu strujanja fluida u cjevovodu.

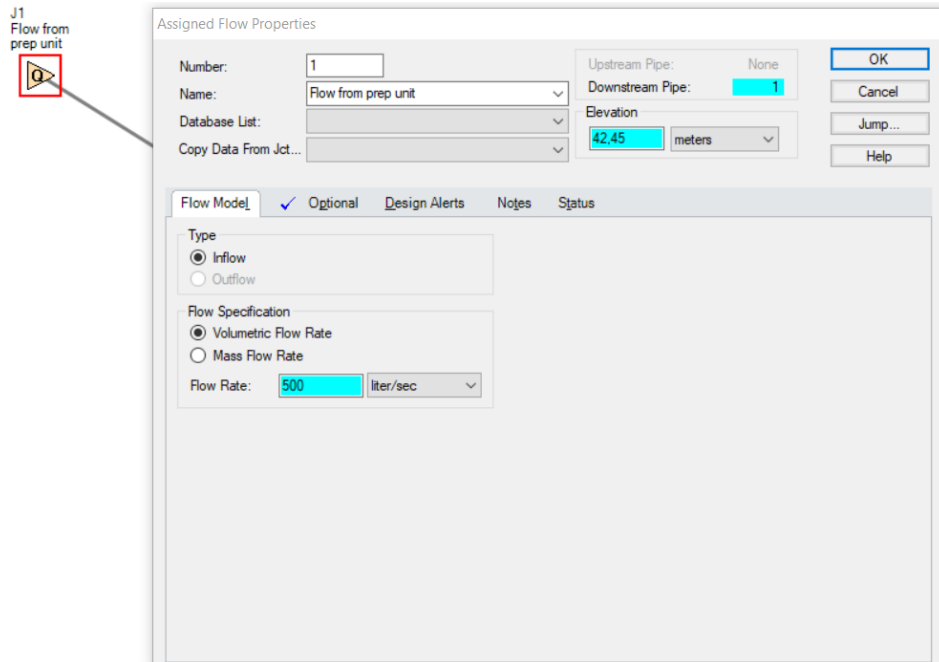
Nadalje treba se u alatnoj traci provjeriti kakvi su podaci sistema, te podatke moguće je provjeriti klikom na „System Data“. Klikom na tu karticu pojavljuje nam se iskočni prozor(Slika 4.3). Sa slike je uočljivo kako je moguće postaviti i adekvatno je postavljen podatak o polju laminarnog i polju turbulentnog strujanja kao i korekcije faktora gubitaka pri laminarnom strujanju fluida na karakterističnim pozicijama(koljenima, t-spojevima, grananjima...)





Slika 4.3 - Podaci o sistemu

Kada je sve adekvatno postavljeno moguće je dalje krenuti s osnivanjem geometrije cjevovoda klikom na ikonu koja se nalazi na lijevoj strani sučelja; prvo se započinje u slučaju ove analize s postavljanjem početnog protoka u cjevovodu; taj protok je 500[l/s] (Slika 4.4). Elevaciju je potrebno postaviti na visinu od 42,45[m] zato što se kao i za difuzor mjeri od geodetske nule, tj. na dnu morskog ispusta.



Slika 4.4 - Postavljanje protoka iz pripreme jedinice

Kada je protok postavljen u softveru, moguće je povući prvu liniju cjevovoda koja ide pod nagibom od  $\varphi = 25^\circ$  te se njoj daje ime cijevi i njen pripadni broj, u ovom slučaju to je cijev broj 1 i ona je nizvodna cijev. Cijev je potrebno što bolje definirati kako bi podaci analize bili što točniji, kada se definira cijev potrebno je prvenstveno odrediti njen materijal, duljinu i hrapavost površine. Hrapavost površine u ovome programu najlakše je odrediti pomoću Hazen – Williamsovog faktora. Sve ovo prikazano je na slici, no, lako je uočljivo kako je duljina cijevi u ovome specificirana sa 66,21[m] gdje je ona na slici skroz gore prikazana kao 60[m], ovu brojku dobije se iz Pitagorinog poučka (4.2.1):

$$L = \sqrt{28^2 + 60^2} = 66,21 \text{ [m]} \quad (4.2.1)$$

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  
 Standard

Hazen-Williams Factor

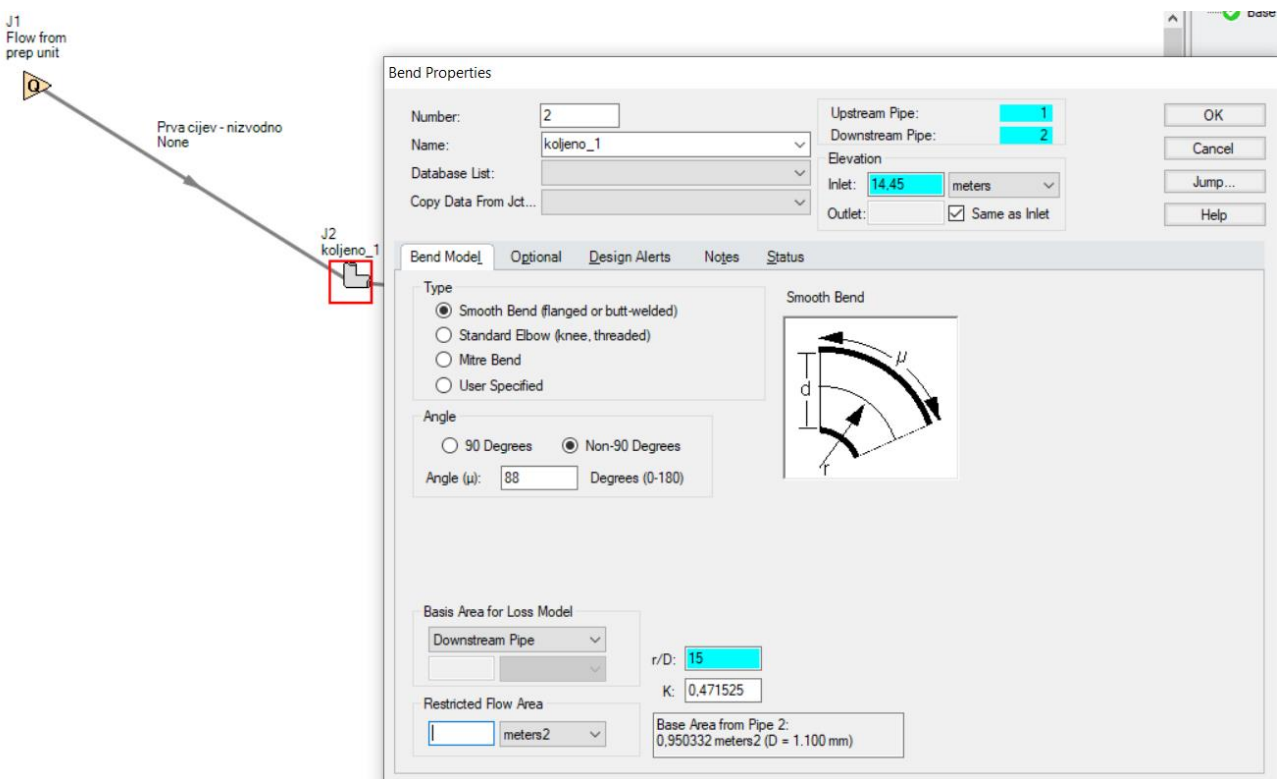
Slika 4.5 - Određivanje prve cijevi u analizi cjevovoda

Hazen – Williams jednadžba koristi se kako bi se proračunao pad tlaka vode pri njenom strujanju kroz ravnu cijev (Slika 4.5). Međutim u nju se ne pouzdajemo kada se radi o slučajevima pada tlaka na karakterističnim pozicijama kao primjerice : koljena, promjene visina, promjene smjera i slično. Zakonitost 4.2.2 ovisi o unutarnjem promjeru cijevi, brzini fluida koji se giba cijevima i već spomenutom Hazen – Williams koeficijentu, koji opisuje hrapavost površine unutrašnje površine cijevi.

$$P = \frac{Q^{1.85}}{0.094 * C^{1.85} d^{4.87}} \quad (4.2.2)$$

Gdje rezultat jednadžbe daje pad tlaka po duljini cijevi, nadalje bi bilo potrebno  $P$  pomnožiti s duljinom dionice cjevovoda kako bi se dobio ukupni pad tlaka u cijevi na toj dionici.

Postavljenom cjevovodu potrebno je dalje promijeniti nagib relativno s horizontalnom površinom dna, to se čini postavljanjem koljena od  $88^\circ$ . Koljeno je potrebno posebno izraditi jer nije standardno, već zahtjeva dodatnu obradu kako bi se ostvario konačni nagib od  $2^\circ$  s obzirom na površinu dna. Softverski koljeno se postavlja na način prikazan na Slika 4.6, dakle prvo se mora definirati tip koljena, u našem slučaju zbog velikog promjera cjevovodu najviše smisla ima staviti ili prirubnički spoj ili zavariti cijevi. To je specificirano u prvoj točki; nadalje je potrebno definirati i kut koji koljeno zatvara, kao što je već spomenuto on će iznositi  $88^\circ$ . Bitan omjer kod definiranja koljena, tj. njegovog koeficijenta hidrauličkih gubitaka je omjer  $r/D$  koji u našem slučaju iznosi 15; tj. radijus savijanja 15 puta je veći od unutarnjeg promjera cijevi.



Slika 4.6 - Postavljanje koljena u softveru

Koljeno je sada u potpunosti definirano, sada je potrebno dovesti cijev koja vodi do difuzora, ona je dugačka 433,5[m]. Definira se na isti način kao što smo definirali i prvu cijev. Treba napomenuti kako je cjevovod izrađen od stakloplastike(eng. *Fiberglass*), a softver u sebi ne sadrži taj materijal u svojoj arhivi, no njegove bitne karakteristike za otpor pri strujanju su definirane samo putem promjera cjevovoda i Hazen – Williamsovog faktora, te duljinom samog dijela cjevovoda.

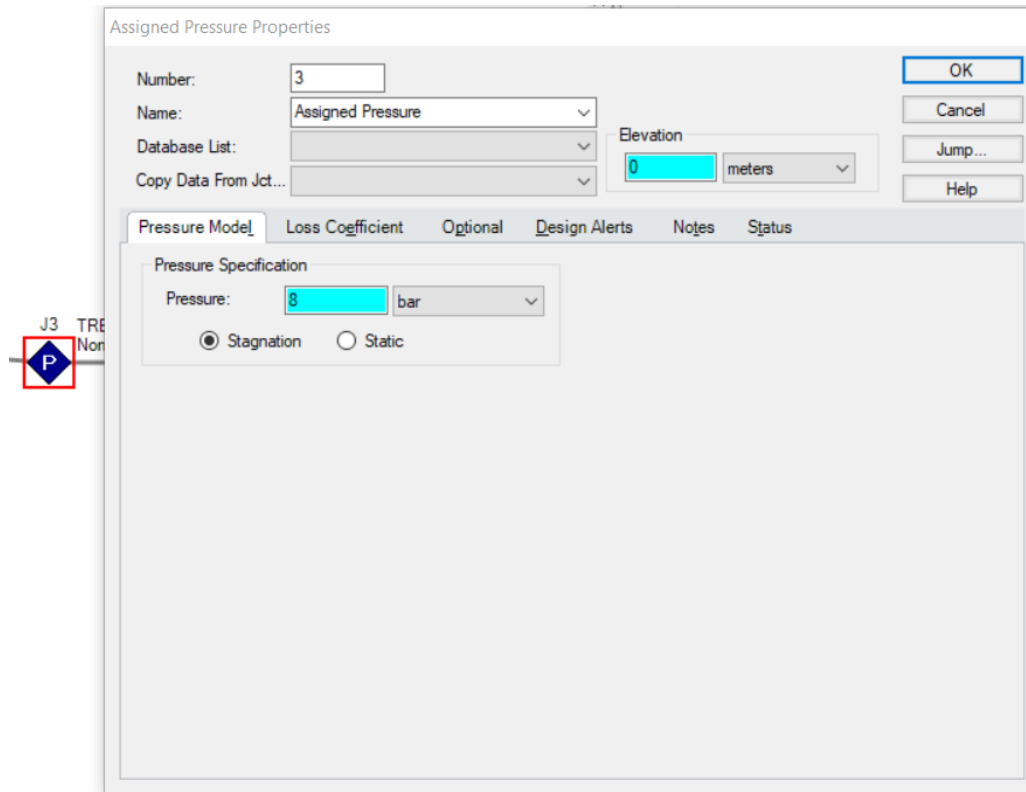
Pri spajanju cijevi numerirane s brojem 2, prije ulaska u sam difuzor softverski je potrebno definirati tlak s kojim fluid ulazi u difuzor. Pošto se ispusti difuzora svi nalaze na istoj izobari u moru, tj. na istoj su dubini u odnosu na površinu mora nadtlak u cjevovodu pretpostavit će se na sljedeći način(4.2.3):

$$p_{hidrostaticki} = \rho * g * \Delta h = 1025 * 9.81 * 40 = 402210 [Pa] = 4.0221 [\text{bar}] \quad (4.2.3)$$

Na hidrostaticki tlak se naravno još mora nadodati tlak kojim atmosferski zrak pritišće površinu mora; on iznosi 1[atm] ili 1.0125[bar]. Taj podatak dodan je u formuli 4.2.4:

$$p_{ukupni} = p_{hidrostaticki} + p_{atm} = 5.0346 [\text{bar}] \quad (4.2.4)$$

U pravilu to znači da tlak koji se ostvaruje u cjevovodu kanalizacije ovoga projekta mora iznositi više od 5.04[bar] kako bi se moglo ispustiti sa sigurnošću sadržaje van kroz difuzor; no ovdje linijski gubici i gubici na koljenima nisu uzeti u obzir; koji u slučaju dugačkih cjevovoda i zahtjeva za brzinom mogu bitno pomaknuti tu granicu. Aproximirati će se za potrebe proračuna tlak od 8[bar] što ga stvara pripremna jedinica(Slika 4.7).



Slika 4.7 - postavljanje postavki za tlak

Nadalje za potrebe prikaza ovog problema, difuzor će se podijeliti na dio prije prigušivanja te dio nakon prigušivanja. Dio prije prigušivanja definiran je sljedećom geometrijom vidljivom na Slika 4.8. Kako bi se postiglo adekvatno miješanje dva fluida i izbacivanje štetnih voda potrebno je fluid pri protoku od 500[l/s]. Ispusti su sačinjeni od T-spoja i ispusta pod kutom od 90° vertikalno praćenih s koljenom koje mijenja smjer za 90°. Svaki taj karakteristični spoj cijevi zahtjeva definiciju faktora gubitaka, srećom oni su dobiveni eksperimentalno, i podaci o njima vrlo su lako dostupni. Faktor gubitaka kod koljena od 90° iznosi  $\xi = 0,5$ ; gdje je to kod T-spoja  $\xi = 1$ . Svaki taj komad od velike je važnosti pri računanju linijskih gubitaka.

Slika 4.8 - definiranje T-spoja

Kada se za svaku granu dijela prije difuzora definiraju svi potrebni podaci, može se pristupiti drugom dijelu difuzora; onom poslije prigušivanja. Prigušivanje je potrebno kako bi se povećala brzina pri ispustu nakon početnih ispusta; s povećanjem brzine potrebno je napomenuti kako tlak fluida u cjevovodu pada. Tu pojavu otkrio je Daniel Bernoulli (Slika 4.9), švicarski znanstvenik, ali je jednadžbu postavio Leonhard Euler tek 14 godina nakon šta je pojava otkrivena. Bernoullijev princip (4.2.5) se i dan danas koristi, a derivira se direktno iz drugog Newtonovog zakona.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = const. \quad (4.2.5)$$

Gdje je:

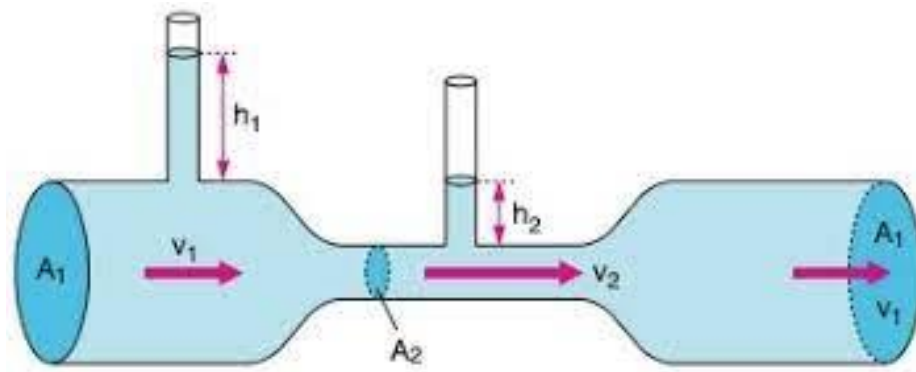
$p$  – tlak koji djeluje na fluid (uzrokovan primjerice pumpnom jedinicom) [Pa]

$\rho$  – gustoća fluida [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  – ubrzanje sile teže [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$v$  – brzina kojom fluid protječe [m/s]

$h$  – geodetska visina [m]



Slika 4.9 - prikaz Bernoullijevog zakona

Prigušivanje, pomoću promjene poprečnog presjeka cjevovoda upravo je iskorišteno u ovom difuzoru, gdje se cijev sa promjera 1100[mm] reducira na 700[mm] (Slika 4.10). Za određivanje faktora gubitaka  $\xi$  potrebno je znati kut pod kojim se sužava poprečni presjek, tj. kut tranzicije među poprečnim presjecima; on iznosi  $\xi = 0.182$  za prisutnu promjenu.

Area Change Properties

Number: 19  
 Name: Area Change  
 Database List:  
 Copy Data From Jct...:

Upstream Pipe: 18  
 Downstream Pipe: 19  
 Elevation  
 Inlet: 0 meters  
 Outlet:  Same as Inlet

OK  
 Cancel  
 Jump...  
 Help

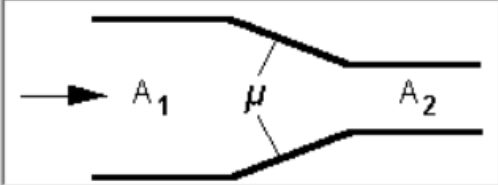
Area Change Model Optional Design Alerts Notes Status

Type  
 Conical Transition  
 Abrupt Transition (Cylindrical)  
 User Specified

K: 0.18212

Angle ( $\mu$ )  
 45. Degrees (0-180)  
 Area ratio (A2/A1): 0.405

Basis Area for Loss Model  
 Downstream Pipe  
 Base Area from Pipe 19:  
 0.384845 meters<sup>2</sup> (D = 70 cm)

Contraction  


Slika 4.10 - postavljanje tranzicije poprečnog presjeka

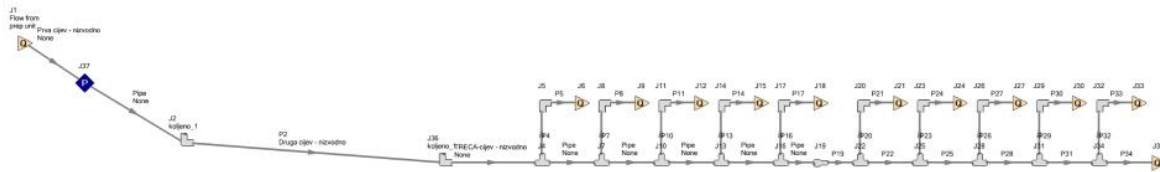
Sada je sve u potpunosti definirano; moguće je obaviti adekvatnu analizu i dobiti prvu iteraciju podataka. Podatke treba pomno proučiti i vidjeti gdje su padovi tlaka najveći, brzine prevelike ili protoci premali kako bi bilo lakše intervenirati u optimizaciji cjevovoda.



## 5. ANALIZA SOFTVERSKI DOBIVENIH PODATAKA

### 5.1. Analiza dobivenih vrijednosti za cijevi do difuzora

Nakon definicije geometrije cjevovoda, difuzora, karakterističnih površina i lokalnih izmjena poprečnih presjeka softver je spreman za obaviti analizu. Rezultati analize su niz tablica koje korisnik smatra važnima (to korisnik sam definira) i ona je za ovaj problem specifično: pad tlaka. Analiza se temelji na sljedećoj geometriji (Slika 5.1).



Slika 5.1 - Softverski definirana geometrija ispusta

Adekvatna definicija same geometrije u softveru veoma je važna zbog modela gubitaka koje onda softver koristi. Ovdje je odlučeno da se ide na najjednostavniju varijantu definicije softvera radi lake spoznaje rezultata i jednostavnosti postupka definicije geometrije. U postupku analize softver je tada morao obaviti samo dvije iteracije kako bi došao do samog rezultata. Rezultati će zbog lakše čitljivosti biti podijeljeni kao jedinice između karakterističnih točaka; primjerice analiza dijela cjevovoda na početku gdje je definiran tlak i protok do prvog koljena, zatim od prvog koljena do drugog koljena i slično; svaki ispušni difuzor imat će svoju zasebnu tablicu. Tablica 5.1 pokazuje podatke za dio cjevovoda do prvog koljena:

Tablica 5.1 - Padovi tlaka u prvom dijelu cjevovoda

BROJ CIJEVI	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
P1	0.0001	0.001053
P2	0.103	1.031366

Geodetska razlika (razlika u visini između pripremljene jedinice [na ovoj slici označenu s protokom J1] i koljena 1) iznosi 28 metara, a ukupna duljina ovog dijela cjevovoda je 66.21[m]. Ukupni ostvareni pad tlaka na ovoj dionici iznosi (5.1.1):

$$\Delta p = 0.0001 + 0.103 = 0.1031 \text{ [bar]} = 1.031 \text{ [m]}, \quad (5.1.1)$$

Sada ulazimo u drugi dio cjevovoda koji sadrži dva koljena, zbog kojih bi dobiveni gubici trebali biti veći, također zbog većih brzina dobivenih zbog nagiba cjevovoda u odnosu na dno i ubrzanja sile teže. Podaci za drugi dio cjevovoda dani su u Tablica 5.2.

Tablica 5.2 - Padovi tlaka u cjevovodu

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
P3	0.647	6.473
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0827	0.827
K2 ( $\xi = 0.5$ )	0.0827	0.827

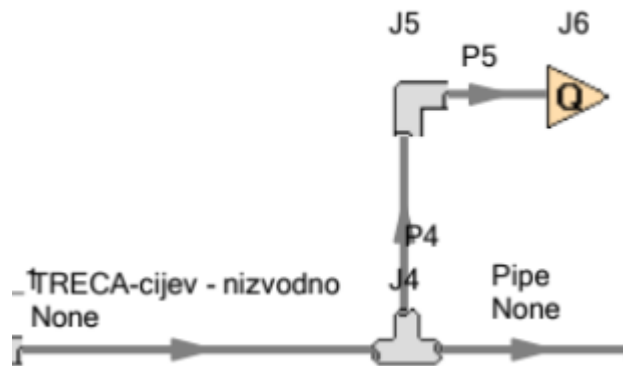
Duljina ovog cjevovoda nešto je veća što je i očito iz rezultata, ona iznosi 433.55[m] i najdulja je dionica u analizi ovog problema. Ukupni ostvareni pad tlaka na ovoj dionici iznosi (5.1.2):

$$\Delta p = 0.647 + 2 * 0.0827 = 0.8124 \text{ [bar]} = 8.124 \text{ [m]} , \quad (5.1.2)$$

Zadnji dio cjevovoda zapravo je difuzorska jedinica kojoj ukupna duljina iznosi 48[m] i ima 11 ispusnih krakova, kao što je rečeno svaki otvor biti će opisan zasebno. Prvi, posljednji i otvor prije reduciranja sadržavat će više podataka zbog adekvatnije analize.

## 5.2. Analiza dobivenih vrijednosti za difuzorsku jedinicu

Prvi otvor difuzora (Slika 5.2) kojemu su karakteristični dijelovi označeni u tablici (Tablica 5.3) kao i njihovi padovi tlaka.



Slika 5.2 - Prvi otvor difuzora

Vidljivo je sa slike da postoji T-spoj cijevi te jedno koljeno od 90°. Podaci dobiveni iz analize su sljedeći:

Tablica 5.3 - Padovi tlaka u prvom kraku difuzora

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
P3	0.0144	0.144
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P4	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P5	0.059	0.59

Pošto je program imao problem s računanjem pada tlaka u T-spoju, odlučio sam to odraditi ručno, na sljedeći način (5.2.1):

Uz pretpostavku da je  $\lambda = 0.02$  (uzima se eksperimentalno kod turbulentnog strujanja):

$$\Delta p_{t_{con}} = \left( \lambda * \frac{L}{D} + \xi \right) * \frac{(v)^2}{2g}$$

$$\Delta p_{t_{con}} = \left( 0.02 * \frac{4}{0.250} + 1 \right) * \frac{4}{2*9.81} = 0.27 \text{ [m]} \quad (5.2.1)$$

Na završni  $\Delta p_{t_{con}}$  potrebno je i dodati geodetsku visinu koju mora savladati fluid kako bi se „popeo“ uz stupac difuzora, geodetska razlika je za svaki krak difuzora u iznosu 2[m], taj se podatak onda dodaje na kraju u konačnom zbroju padova tlaka.

Za prvi dio difuzorskog ispusta ukupni pad tlaka iznosi (5.2.2):

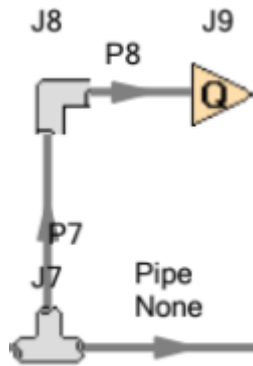
$$\Delta p_{dif1} = 0.0144 + 0.027 + 2 * 0.059 + 0.0102 = 0.17 \text{ [bar]} = 1.7 \text{ [m]} \quad (5.2.2)$$

Drugi krak difuzorskog ispusta sličan je prvom kraku, podaci dobiveni analizom vidljivi su u sljedećoj tablici (Tablica 5.4 **Pogreška! Izvor reference nije pronađen.**). Valja napomenuti kako je duljina cijevi između 2 kraka difuzora približno 4 [m] duljine; a geometrija je prikazana na slici (Slika 5.3).

Tablica 5.4 - podaci za drugi krak difuzora

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P7	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P8	0.059	0.59

Radi sličnosti ispusta i istih režima rada prisutnih na ispustima prije redukcije, podaci koje sam prijašnje proračunao za padove tlaka na koljenima i T-spojevima biti će jednaki u svim ispustima na tom dijelu.



Slika 5.3 - Drugi krak difuzora (geometrija)

Ukupni je pad tlaka na drugom kraku difuzora jednak (5.2.3):

$$\Delta p_{dif2} = 0.027 + 2 * 0.059 + 0.0102 = 0.155 \text{ [bar]} = 1.55 \text{ [m]} \quad (5.2.3)$$

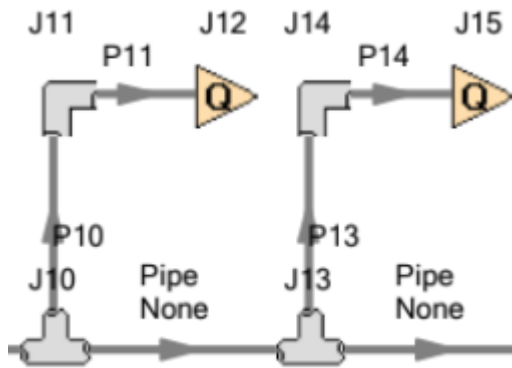
Podaci za treći i četvrti ispust vidljivih na slici (Slika 5.4), dobiveni analizom stavljeni su u sljedeće tablice respektivno (Tablica 5.5 i Tablica 5.6).

Tablica 5.5 - Podaci za treći ispust

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P10	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P11	0.059	0.59

Tablica 5.6 - Podaci četvrtog ispusta

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P13	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P14	0.059	0.59



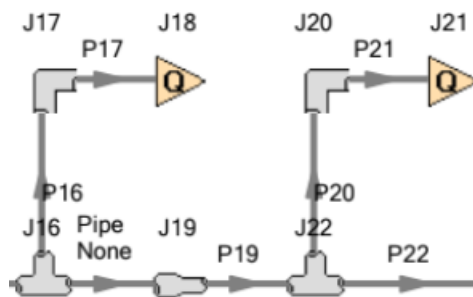
Slika 5.4 - Geometrija trećeg i četvrtog ispusta

Ukupni padovi tlaka za treći i četvrti ispuštavaoč iznose redom (5.2.4 ; 5.2.5):

$$\Delta p_{dif3} = 0.027 + 2 * 0.059 + 0.0102 = 0.155 \text{ [bar]} = 1.55 \text{ [m]} \quad (5.2.4)$$

$$\Delta p_{dif4} = 0.027 + 2 * 0.059 + 0.0102 = 0.155 \text{ [bar]} = 1.55 \text{ [m]} \quad (5.2.5)$$

Sljedeći predmet analize je dio difuzora koji sadržava redukciju (suženje poprečnog presjeka), pošto se prema Bernoullijevom principu povećanjem brzine strujanja fluida ujedno tlak smanjuje, ovdje je važno obratiti pažnju na pad tlaka kako ne bi došlo do komplikacija u radu difuzora. Promatrani dio prikazan je na slici (Slika 5.5), a tablica (Tablica 5.7) prikazuje gubitke.



Slika 5.5 - Geometrija ispusta prije i poslije redukcije

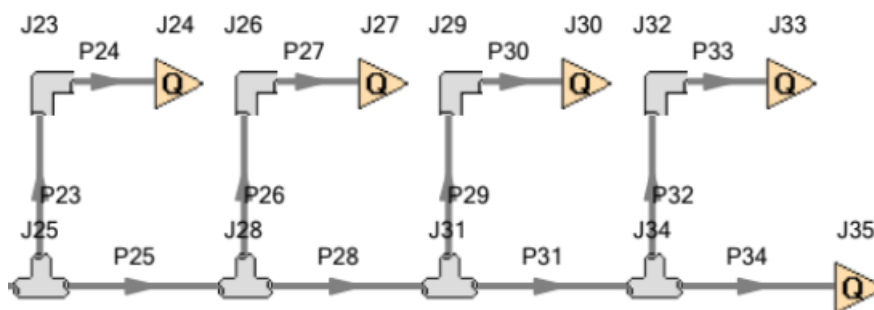
Tablica 5.7 - Padovi tlaka za dio difuzora prije i poslije redukcije

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
P15	0.059	0.59
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P16	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P17	0.059	0.59
P18	0.0035	0.035
A1 ( $\xi = 0.182$ )	0.08	0.8
P19	0.0173	0.173
T2 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P20	0.059	0.59
K2 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P21	0.059	0.59
P22	0.0124	0.124

Ukupni padovi tlaka na odabranom dijelu iznose (5.2.6):

$$\Delta p_{dif5} = 2 * 0.027 + 5 * 0.059 + 2 * 0.0102 + 0.08 + 0.0035 + 0.0124 + 0.0173 = 0.483 \text{ [bar]} = 4.83 \text{ [m]} \quad (5.2.6)$$

Konačni dio ispusta sličan je onom prije redukcije, analizom dobiveni podaci biti će prikazani u tablicama prema njihovom geometrijskom poretku; dok će geometrija biti prikazana na slici (Slika 5.6).



Slika 5.6 - Geometrija krajnjeg dijela difuzora

Tablica 5.8 - - Podaci za sedmi ispust (prvi sa slike 5.6 gledano s lijeva)

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P23	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P24	0.059	0.59

Tablica 5.9 - Podaci za osmi ispust

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
P25	0.0082	0.082
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P26	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P27	0.059	0.59

Tablica 5.10 - Podaci za deveti ispust

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
P28	0.005	0.05
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P29	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P30	0.059	0.59



Tablica 5.11 - Podaci za posljednja dva ispusta

BROJ CIJEVI ILI KOLJENA	PAD TLAKA (bar)	PAD TLAKA (m)
P31	0.0022	0.02
T1 ( $\xi = 1$ )	0.027	0.27
P32	0.059	0.59
K1 ( $\xi = 0.5$ )	0.0102	0.102
P33	0.059	0.59
P34	$\approx 0$	$\approx 0$

Ukupni padovi tlakova na posljednja 4 ispusta iznose (5.2.7):

$$\Delta p_{dif7,8,9,10,11} = 5.73 \text{ [m]} = 0.573 \text{ [bar]} \quad (5.2.7)$$

Ukupni padovi tlaka na kraju analize (5.2.8) tada iznose za kompletni cjevovod (također treba ukomponirati onih 2 metra visine ispusta difuzora):

$$\Delta p_{ukupno} = 1.031 + 8.124 + 1.7 + 1.55 + 1.55 + 1.55 + 4.83 + 5.73 + 2 \text{ [m]} = 27.535 \text{ [m]} \quad (5.2.8)$$

$$\Delta p_{ukupno} = 27.535 \text{ [m]} = 2.7535 \text{ [bar]}$$

Ako su ukupni gubici od  $\Delta p_{ukupno} = 3.0735 \text{ [bar]}$  znači da pumpna jedinica koju koristi ovaj kanalizacijski ispust mora uspjeti „pobijediti“ hidrostatski tlak mora i ukupne gubitke cjevovoda, hidrostatski tlak smo približno izračunali kao  $p_{ukupni} = p_{hidrostatski} + p_{atm} = 5.0346 \text{ [bar]}$  te moramo još dodati gubitke cjevovoda koji iznose  $\Delta p_{ukupno} = 27.535 \text{ [m]} = 2.7535 \text{ [bar]}$ .

Konačni tlak s kojim možemo ostvariti adekvatan rad ovog postrojenja je sljedeći (5.2.9):

$$p_{radni} > 2.7535 + 5.0346 \text{ [bar]} \rightarrow p_{radni} > 7.7881 \text{ [bar]}, \quad (5.2.9)$$

Radna stanica mora biti sposobna dakle proizvesti režim rada od približno 8 [bar] pri protoku od 500 [l/s]. Takva radna stanica je red veličine jednog postrojenja kojemu treba snaga od 600 [kW] kako bi moglo proizvesti ovakav režim rada, iako su te pumpe s visokom korisnosti (preko 70%). Takvo jedno postrojenje je jednako pumpi za gorivo na velikim tankerima gdje je pumpa pogonjena

vlastitom parnom turbinom u većini slučajeva. Moguće je također pogoniti generatorom, pošto se nalazimo na kopnu, a onda bi to bio generator od 6.6 [kV].

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada bio je opisati strujanje fluida u cjevovodu i prikazati hidrauličke gubitke pri strujanju fluida kroz cjevovod kanalizacije i jedinice difuzora. Također je cilj ovog završnog rada bio prikazati kako promjene u geometriji cjevovoda utječu na protok fluida, njegove režime strujanja i tip strujanja fluida. Softver u kojem se istraživanje i analiza provela veoma je jednostavan za korištenje, a može se koristiti i kod puno kompleksnijih problema.

Treba uzeti u obzir kako je pouzdanost dostupnih podataka o materijalu cjevovoda, tipovima koljena, T-spojeva nedovoljna da se može zaključiti kakvo je stvarno ponašanje fluida u cjevovodima, kakvi su stvarni padovi tlaka, te kakva je sama morfologija tla na kojem cjevovod leži. Softverom se ponekad ne dobiju pouzdani rezultati, tako da su neki od njih morali biti aproksimirani empirijskim formulama.

Za pouzdanije podatke trebalo bi dobiti puno više podataka o točnim protocima na pojedinim dijelovima, tipu cijevi i hrapavosti površine cijevi, također mjerenjima utvrditi točne protoke na pojedinim dijelovima, krivulje pumpnih jedinica i slično. Sve u svemu ovim radom možemo dobiti grubu pretpostavku kakvo je ponašanje fluida u Uređaju Delta.

## 7. LITERATURA

- [1] Kranjčević, L. : *Mehanika fluida – skripta za studente Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*; Rijeka, 2020.
- [2] "Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža 2021.", s interneta, [https://enciklopedija.cc/index.php?title=Mehanika\\_fluida](https://enciklopedija.cc/index.php?title=Mehanika_fluida). pristupljeno 22.8.2023.
- [3] Kranjčević, L. : *Mehanika fluida – skripta za studente Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*; Rijeka, 2020.
- [4] "Wikipedia, Laminarno strujanje", s interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Laminarno\\_strujanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laminarno_strujanje). pristupljeno 22.8.2023.
- [5] Margeta, J.; *Kanalizacija naselja*, Poglavlje VII. – *Ispusti*; Split, 1998.
- [6] Margeta, J.; *Kanalizacija naselja*, Poglavlje VII. – *Ispusti*; Split, 1998.
- [7] Margeta, J.; *Kanalizacija naselja*, Poglavlje VII. – *Hidrauličko dimenzioniranje*; Split, 1998.

## 8. PRILOZI (POPIS SLIKA I TABLICA)

Slika 2.1 - prikaz laminarnog i turbulentnog strujanja

[Microsoft PowerPoint - 4 - Hidrodinamika \(mojweb.ba\)](#), 29.8.2023.

Slika 4.9 - prikaz Bernoullijevog zakona

[Bernoullis Principle Bernoullis Equation Fluid Flow Stock Vector \(Royalty Free\) 2295929243 | Shutterstock](#)

Tablica 5.1 - Padovi tlaka u prvom dijelu cjevovoda.....	27
Tablica 5.2 - Padovi tlaka u cjevovodu .....	28
Tablica 5.3 - Padovi tlaka u prvom kraku difuzora.....	29
Tablica 5.4 - podaci za drugi krak difuzora.....	30
Tablica 5.5 - Podaci za treći ispust.....	31
Tablica 5.6 - Podaci četvrtog ispusta.....	31
Tablica 5.7 - Padovi tlaka za dio difuzora prije i poslije redukcije.....	33
Tablica 5.8 - - Podaci za sedmi ispust (prvi sa slike 5.6 gledano s lijeva) .....	34
Tablica 5.9 - Podaci za osmi ispust .....	34
Tablica 5.10 - Podaci za deveti ispust .....	34
Tablica 5.11 - Podaci za posljednja dva ispusta.....	35

## SAŽETAK

Cilj završnog rada bio je provjeriti i napraviti adekvatnu simulaciju pada tlaka u podvodnom ispustu Delta, te što preciznije prikazati strujanje fluida kroz odabrani cjevovod. Pomoću softvera AFT Fathom 9 provedena je takva analiza. Poprečni presjeci cijevi u cjevovodu dani su 3D modelom difuzorske jedinice. Pojedini elementi cjevovoda računali su se na temelju teorijskih vrijednosti i empirijskih podataka. Poznavanjem same teorije moguće je u potpunosti analizirati ovaj problem, ali to zahtjeva puno više vremena i mjerenja. Padovi tlaka su proračunati temeljem ulaznih podataka i zadane geometrije.

Ključne riječi: pad tlaka, cjevovod, softver AFT Fathom, poprečni presjek, strujanje fluida, ispust Delta, difuzor.

## **SUMMARY**

The purpose of this final's thesis was to make an adequate hydraulic analysis and measure the pressure drop in the underwater discharge Delta. This was to be done as precisely as could be done using AFT Fathom 9 software. The software was to provide a precise measurement of fluid flow, and also provide the pressure drop analysis. Different cross-sections of pipes in the pipeline were provided using the 3D model of a difuser unit. Specific elements were calculated using theoretical rules and empirical data. With adequate theoretical knowledge it is possible to completely analyze this problem, but it would require a lot of time, effort and on-site measurements. The pressure drop in the pipeline was calculated using the given geometry and input data.

Key words: pressure drop, pipeline, AFT Fathom software, cross-section, fluid flow, underwater discharge Delta, difuser unit.