

Modeliranje usisnog sustava desalinizacijskog postrojenja

Ruskaj, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:190:352574>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**MODELIRANJE USISNOG SUSTAVA DESALINIZACIJSKOG
POSTROJENJA**

Rijeka, srpanj 2024.

Marko Ruskaj

0069087179

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**MODELIRANJE USISNOG SUSTAVA DESALINIZACIJSKOG
POSTROJENJA**

Mentor: prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Komentor: dr. sc. Marta Alvir

Rijeka, srpanj 2024.

Marko Ruskaj

0069087179

Rijeka, 20. ožujka 2024.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo**
Predmet: **Dinamika fluida**
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Marko Ruskaj (0069087179)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva
Modul: Računarska mehanika i inženjerstvo

Zadatak: **Modeliranje usisnog sustava desalinizacijskog postrojenja**

Opis zadatka:

Modelirati usisni sustav desalinizacijskog postrojenja koristeći softver OpenFOAM. Provesti simulaciju usisa vode uz variranje više parametara, uključujući turbulentne modele i različite opcije geometrije usisnog sustava. Analizirajte kako promjene u parametrima i geometriji utječu na efikasnost usisnog sustava. Predložiti dizajn usisnog sustava koji optimira protok i smanjuje moguće turbulencije koje mogu utjecati na učinkovitost desalinizacijskog postrojenja. Opisati metodologiju, simulacijske postavke, rezultate i zaključak o najučinkovitijem dizajnu.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2024.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

prof. dr. sc. Lado Kranjčević

izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

dr. sc. Marta Alvir (komentor)

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom „Modeliranje usisa desalinizacijskog postrojenja“ izradio samostalno. Rad je napravljen prema zadatku Povjerenstva za diplomske ispite diplomskog sveučilišnog studija strojarstva i Uputama za pisanje diplomskih radova, pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Lade Kranjčevića i komentorice dr sc. Marte Alvir.

Zadatak je zadan 20. ožujka 2024.

MARKO RUSKAJ

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ladi Kranjčeviću i asist. dr. sc. Marti Alvir na pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se kolegama i prijateljima s kojima sam proveo pet lijepih godina studiranja.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima na velikoj podršci.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. DESALINIZACIJA	2
2.1. DESALINIZACIJA KROZ POVIJEST	2
2.2. DESALINIZACIJA U REPUBLICI HRVATSKOJ	4
2.3. PROBLEM PITKE VODE	5
2.4. METODE DESALINIZACIJE	7
3. USIS DESALINIZACIJSKOG POSTROJENJA	9
3.1. GRANIČNIK VERTIKALNE BRZINE	11
3.2. PODRUČJE PROMATRANJA	12
4. OSNOVNI POJMOVI O FLUIDIMA	13
4.1. FLUIDI	13
4.2. MEHANIKA I DINAMIKA FLUIDA.....	14
4.3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA	15
4.4. MODELIRANJE TURBULENCIJA.....	17
4.4.1. <i>k – ε model</i>	18
4.4.2. <i>k – ω model</i>	19
4.4.3. <i>k – ω SST model</i>	20
4.5. NAVIER – STOKESOVE JEDNADŽBE.....	21
5. MODELIRANJE USISA DESALINIZACIJSKOG POSTROJENJA	24
5.1. IZRADA GEOMETRIJE	24
5.2. AUTOMATIZACIJA GEOMETRIJE	25
5.3. NUMERIČKA MREŽA	28
6. POKRETANJE SIMULACIJA	33
6.1. OPENFOAM DATOTEKE.....	34
6.2. RJEŠAVAČ (SIMPLEFOAM).....	35
6.2.1. <i>Metoda konačnih volumena</i>	36
6.3. POSTAVLJANJE PARAMETARA.....	37
6.4. POSTAVLJANJE SLUČAJA NA SUPERRAČUNALO BURA	41
7. REZULTATI	43

7.1.	BRZINA V_0	44
7.2.	OMJERA BRZINE USISA V_R	46
7.3.	PARAMETRI USISNOG POSTROJENJA.....	47
7.4.	USPOREDBA DJELOVANJA PLIME I OSEKE NA USISNO POSTROJENJE	47
7.4.1.	<i>Poplavna struja</i>	48
7.4.2.	<i>Mrtva oseka</i>	50
7.5.	SIMULACIJA PROVEDENA BEZ GRANIČNIKA VERTIKALNE BRZINE	53
7.6.	UTJECAJ NA USISNO POSTROJENJE KADA JE BRZINA STRUJANJA MORA PRIBLIŽNO 0m/s .	57
7.7.	USPOREDBA UTJECAJA 12 VERTIKALNIH PREGRADA	58
7.8.	USPOREDBA UTJECAJA 24 VERTIKALNE PREGRADE	62
7.8.1.	<i>Povećanje dužine vertikalnih pregrada</i>	66
7.9.	USPOREDBA UTJECAJA POSTOLJA VERTIKALNIH STUPOVA.....	67
8.	ZAKLJUČAK	70
9.	LITERATURA	71
	SAŽETAK	73
	SUMMARY	74
	POPIS SLIKA	75
	POPIS TABLICA	77

1. UVOD

Slatka voda je sve veći problem današnjice, mnoge tvrtke i inženjeri su se okrenuli istraživanju alternativnih načina dobivanja slatke vode, bilo da je riječ o vodi za piće ili u novije vrijeme za proizvodnju vodika. Iz slane vode moguće je dobiti slatku vodu nekim od procesa desalinizacije. Trenutno je glavno pitanje na koji način je moguće transportirati slanu vodu do postrojenja za desalinizaciju na siguran i ekološki prihvatljiv način.

Ovaj rad će opisati prvu stanicu u procesu desalinizacije. Modelirati će se usis desalinizacijskog postrojenja sa ciljem zadovoljavanja nekoliko bitnih parametara. Usisno postrojenje je armirano betonsko zdanje od nekoliko metara visine u kojem se nalaze crpke koje usisavaju i transportiraju morsku vodu cjevovodom dalje do postrojenja za desalinizaciju. Prilikom izrade ovog rada bilo je potrebno ponajviše paziti na brzine strujanja oko samog usisnog postrojenja. Povećanje brzine strujanja iznad dozvoljene granice negativno utječe na morski život oko usisnog postrojenja.

U uvodnom dijelu osvrnuti će se na važnost desalinizacije kroz povijest, kao i postojanje desalinizacije u Republici Hrvatskoj. Potrebno je naglasiti i važnost pitke vode. Ukratko će se navesti i objasniti osnovni tipovi desalinizacije. Potom će biti objašnjena teoretska pozadina usisa desalinizacijskog postrojenja sa svim važnim detaljima vezanim uz brzine strujanja i utjecaj na morski život. Naglasiti će se važnost postavljanja graničnika vertikalne brzine. Objasniti će se osnovni pojmovi o mehanici fluida, dinamici fluida i računarskoj dinamici fluida.

U središnjem dijelu kreće se sa izradom geometrije u programu FreeCAD. Kako je ovaj rad baziran na pronalaženju idealnih uvjeta strujanja na ulazu u usisno postrojenje, testirati će se više geometrija. U svrhu skraćivanja vremena izrade geometrije automatizirati će se dijelovi koji mogu najviše utjecati na dobivanje zadovoljavajućih rezultata. Automatizacija će se izvesti pomoću programa Python. Nakon kreiranja numeričke mreže u programu Ansys, potrebno je geometriju učitati u program OpenFOAM. Sve provedene simulacije biti će pokrenute na superračunalu Bura u cilju skraćivanja vremena izvođenja simulacija. Rezultati će biti obrađeni programom Paraview i Excel.

Simulacije i dobiveni rezultati će se obraditi i nastojati detaljno objasniti. Dati će se osnovna problematika svakog dijela promatranja uz moguća poboljšanja u narednim simulacijama.

2. DESALINIZACIJA

Desalinizacija se, kao i sve druge tehnologije, nije razvijala linearno tijekom vremena. Bilo je razdoblja brzog rasta, ali bilo je i razdoblja neaktivnosti. Ne može se sa sigurnošću reći kada je čovječanstvo prvi put postalo frustrirano zbog nemogućnosti pijenja slane vode i počelo razmatrati pitanje pročišćavanja slane vode. Međutim, neki od najranijih spisa sugeriraju da je čak i u najranijim vremenima to bilo pitanje nekog interesa. Ukratko, desalinizacija je proces u kojem se uklanjaju otopljeni mineralni soli iz vode. Trenutno je ovo proces koji se primjenjuje na morsku vodu i jedan je od najčešće korištenih za dobivanje slatke vode za ljudsku potrošnju ili poljoprivredne svrhe u novije vrijeme i za proizvodnju vodika.

2.1. Desalinizacija kroz povijest

U Kini, prema knjigama „Huai Nan Wan Bi Shn“ (oko 200. prije Krista) i „Qi Min Shn“ autora Jia Si-Xie (oko 540. godine), ljudi bi koncentrirali vino uranjanjem listova trave Guan-Pu u njega. Listovi su bili propusniji i adsorptivniji za vodu nego za alkohol, pa je vino bilo ojačano (S. Wang, osobna komunikacija).

Aristotel je također bio među prvima koji su izvijestili da: „Ako netko uroni nepropusnu posudu od voska u ocean, nakon 24 sata će sadržavati određenu količinu vode koja je filtrirana kroz zidove od voska, i ta će voda biti pitka, jer su zemljane i slane komponente bile prosijane“. Iako to može sugerirati mehanizam s reverznom osmozom, vjerojatnije je samo privlačan mit. Prvo, da bi se prevladao prirodni osmotski tlak morske vode, takva „voštana posuda“ morala bi izdržati velike tlakove. Ni voštana posuda ni neobrađena zemljana posuda, možda premazana voskom, vjerojatno ne bi to mogli učiniti. Drugo, takva posuda morala bi pouzdano biti spuštена na dubinu od približno 500 metara i pouzdano podignuta. Sumnjivo je da je u to vrijeme postojala tehnologija za takav poduhvat.

Aleksandar Afrodizijski komentirao je oko 200. godine da: „mornari na moru prokuhavaju morsku vodu i objese velike spužve s usta brončane posude kako bi upili ono što isparava. Kad iscijede spužvu, otkrivaju da je to slatka voda“ (Forbes 1948.).

Međutim, moguće je da su prva velika kopnena postrojenja za desalinizaciju mogla biti instalirana pod izvanrednim uvjetima na otoku uz obalu Tunisa 1560. godine. Vjeruje se da je

garnizon od 700 španjolskih vojnika bio opsjednut od strane velikog broja Turaka i da je, tijekom opsade, zapovjednik u izradi konstruirao destilator sposoban proizvoditi 40 bačvi svježe vode dnevno, iako detalji uređaja nisu prijavljeni.

Prije industrijske revolucije, desalinizacija je bila primarno od interesa za brodove koji su plovili oceanima, a koji su inače trebali na brodu zalihe svježe vode. Sir Richard Hawkins (1562.-1622.), koji je obavio obimna putovanja po Južnim morima, izvijestio je po povratku da je svoje ljude mogao opskrbiti svježom vodom putem destilacije na brodu. Prva dva patenta koji se odnose na desalinizaciju vode datiraju iz 1675. i 1683. godine (patenti br. 184 i br. 226, objavljeni od strane gospodina Williama Walcota i gospodina Roberta Fitzgeralda (i drugih), redom). Ipak, nijedno od ta dva izuma nije stvarno stavljeno u uporabu zbog tehničkih problema koji su proizašli iz poteškoća u povećanju razmjera. Značajna poboljšanja osnovnog procesa destilacije morske vode nisu postignuta neko vrijeme tijekom 150 godina od sredine 17. stoljeća do 1800. godine. Kada je fregata Protector prodana Danskoj 1780-ih (kao brod Hussaren), postrojenje za desalinizaciju proučavano je i zabilježeno u velikim detaljima. U novostvorenim Sjedinjenim Američkim Državama, Thomas Jefferson katalogizirao je metode temeljene na toplini koje sežu u 1500-e, i formulirao praktične savjete koji su bili objavljeni svim američkim brodovima na poledinama dozvola za plovidbu.

Počevši otprilike od 1800. godine, stvari su se vrlo brzo mijenjale kao posljedica pojave parnog stroja i takozvanog doba pare. Razvoj znanja o termodinamici procesa pare i potreba za čistim izvorom vode za njegovu upotrebu u kotlovima generirali su pozitivan učinak u vezi s sustavima destilacije. Kopneni uređaji za desalinizaciju značajno nisu počeli pojavljivati sve do druge polovice 19. stoljeća. U 1860-ima, američka vojska kupila je tri Normandy evaporatora, svaki s kapacitetom od 7000 galona/dan i instalirala ih na otocima Key West i Dry Tortugas. Još jedno važno postrojenje za destilaciju vode na kopnu instalirano je u Suakinu tijekom 1880-ih koje je moglo opskrbiti britanske trupe svježom vodom. Sastojalo se od destilacijskih uređaja sa šest efekata kapaciteta od 350 tona/dan. S razvojem kemijskog inženjerstva kao discipline krajem 19. stoljeća, moglo se primijeniti znanstvene, a ne empirijske metode. Značajna istraživanja poboljšanja metoda desalinizacije dogodila su se u Sjedinjenim Američkim Državama nakon Drugog svjetskog rata. Ured za slanu vodu osnovan je u Ministarstvu unutarnjih poslova Sjedinjenih Američkih Država 1955. godine u skladu sa Zakonom o pretvaranju slane vode u 1952. godini. Taj je zakon bio potaknut nedostatkom vode u Kaliforniji i unutrašnjem zapadnom dijelu Sjedinjenih Američkih Država. Ured za slanu vodu konačno je spojen s Uredom za istraživanje vodnih resursa 1974. godine.

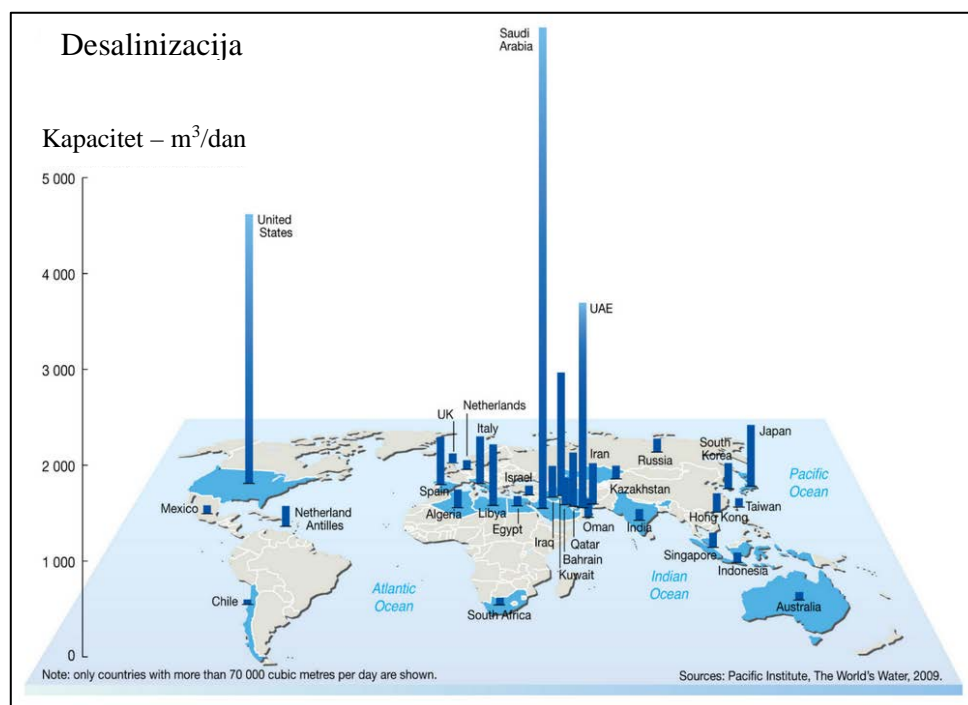
Prvo industrijsko postrojenje za desalinizaciju u Sjedinjenim Američkim Državama otvoreno je u Freeportu, Teksasu, 1961. godine s nadom da će donijeti sigurnost vode u regiju nakon desetljeća suše. Prvo komercijalno postrojenje za reverznu osmozu, postrojenje za desalinizaciju Coalinga, inaugurirano je u Kaliforniji 1965. godine za slanu vodu. Dr. Sidney Loeb, zajedno sa osobljem na UCLA, dizajnirao je veliko pilotsko postrojenje za reverznu osmozu. Cilj ovog postrojenja bio je prikupiti podatke o procesu reverzne osmoze, ali bio je dovoljno uspješan da osigura svježiu vodu stanovnicima Coalinge. To je bio prekretnica u tehnologiji desalinizacije, jer je dokazao izvedivost reverzne osmoze i njegove prednosti u odnosu na postojeće tehnologije (niska potrošnja energije, nepotreban fazni prelaz, rad na sobnoj temperaturi, skalabilnost i jednostavnost standardizacije). Nekoliko godina kasnije, 1975. godine, prvo postrojenje za reverznu osmozu morske vode počelo je s radom [1].

2.2. Desalinizacija u Republici Hrvatskoj

Prema podacima UNESCO-a iz 2014. godine, Hrvatska se prema bogatstvu vodnih izvora smjestila na 5. mjesto u Europi, dok je na 42. mjestu u svijetu. U svijetu zagađenu vodu pije oko 1,8 milijardi stanovnika i taj broj raste iz dana u dan. Uz zagađenost tu se još nalazi i nedostatak vode što će biti ukratko opisano u slijedećem poglavlju. Uz najpoznatije izvore slatke vode kao što je Janino vrelo poznato još od 1770. te izvor Kala kod Apatovca od 1842. Hrvatska se okreće i desalinizaciji mora zbog velike količine mora koje je dostupno. Proteklih nekoliko godina posebice u ljetnim mjesecima dolazi do nestašica vode u primorskim krajevima. Svakako je najveći razlog promjena klime koja je vidljiva iz godine i godinu, ali i povećan broj turista koji borave na odmoru u Hrvatskoj. Većina gradova uz more i na otocima je manjeg obima do nekoliko tisuća ljudi tijekom zimskih mjeseci. U ljetnim mjesecima u tim gradovima boravi i poduplan broj stanovnika te infrastruktura ne može podnijeti toliki nagli pritisak na opskrbu pitkom vodom. Ponajviše zbog ta dva razloga krenulo se u proces desalinizacije morske vode. Vodoopskrba otoka koji su blizu kopna odvija se putem cjevovoda koji su položeni po morskom dnu. Među prvim postrojenjima za preradu morske vode izrađeno je 2010. godine na otoku Krku, u mjestu Stara Baška. Kasnije su se postrojenja izgradila diljem cijele Jadranske obale [4].

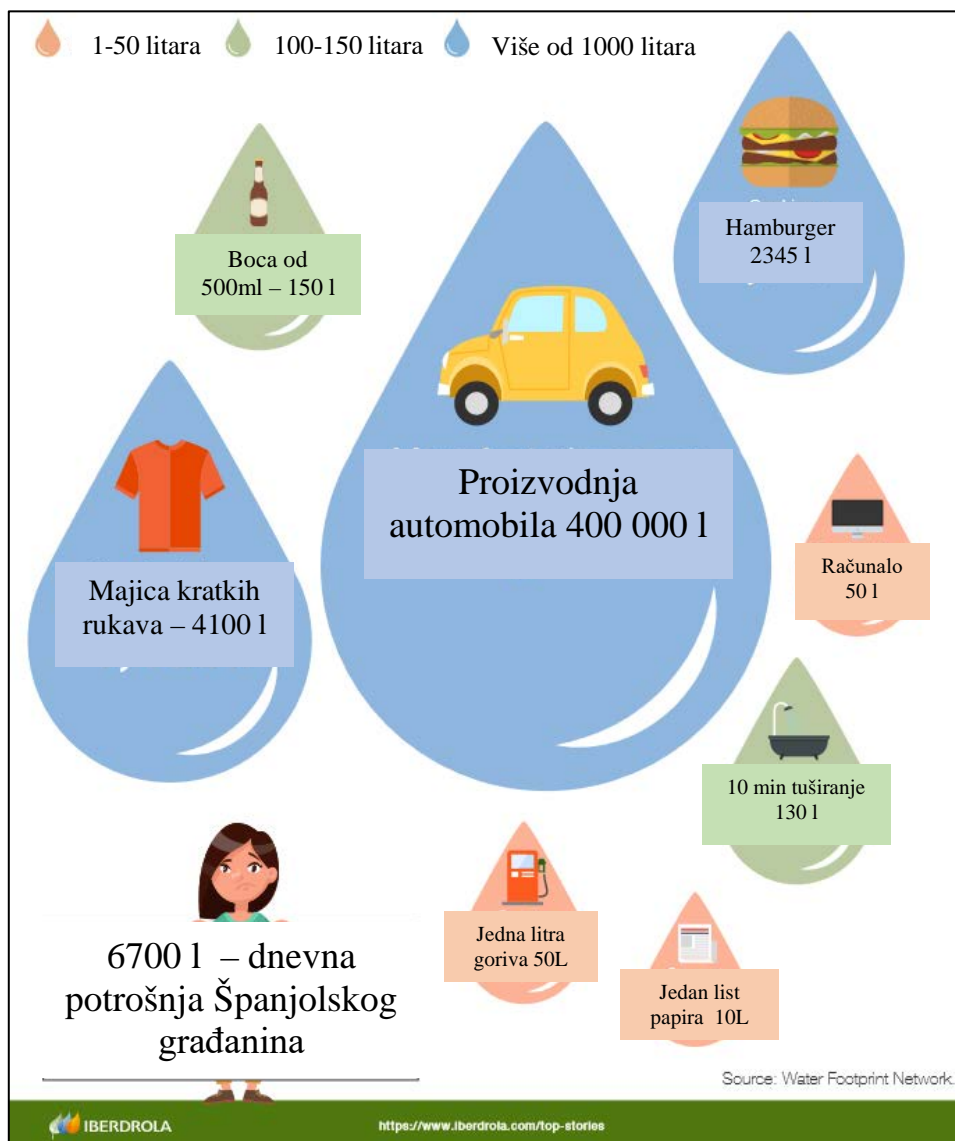
2.3. Problem pitke vode

Voda je zaista ključni resurs opstanka čovječanstva, a njezina oskudica pogađa značajan dio globalne populacije. Godine 2015., Ujedinjeni narodi (UN) upozorili su da će Zemlja do 2030. godine imati deficit vode od 40% ako ne uspije li promijeniti svoje trenutačne potrošačke navike. Globalno, prema istraživanju provedenom od strane istraživača Instituta za vodu, okoliš i zdravlje pri Ujedinjenim narodima (UNU-INWE) 2019. godine, postoji otprilike 16 000 desalinizacijskih postrojenja u operaciji raspoređenih u 177 zemalja koja zajedno proizvode oko 95 milijuna m³/dan svježje vode. Prva zemlja koja je masovno usvojila ovaj proces bila je Australija, vrlo aridna zemlja gdje je takozvana Milenijska suša, između 1997. i 2009. godine, prouzročila velike probleme. Ona ima postrojenja u glavnim gradovima koja rade putem obrnute osmoze. Saudijska Arabija je vodeća zemlja u desalinizaciji po volumenu, slijede je Ujedinjeni Arapski Emirati, obje su pustinjske zemlje i visoko ovise o ovom procesu. Ostale zemlje na Bliskom istoku, poput Kuvajta i Katara, također su se odlučile za ovu tehniku. U Sjedinjenim Američkim Državama, trećoj u ovom posebnom rangiranju, postoje mikro-postrojenja za desalinizaciju blizu gotovo svih postrojenja za prirodni plin kako bi se iskoristila preostala toplina. Španjolska je četvrta, zahvaljujući doprinosu Kanarskih otoka i obale Alicantea i Murcije, gdje se stara termoelektrana zamjenjuju postrojenjima za desalinizaciju, Slika 2.1 [5].



Slika 2.1 Kapacitet desalinizacije po dan za 2009. godinu [3]

Slika 2.2 prikazuje prosječnu dnevnu potrošnju po glavi stanovnika Španjolske. Voda se ne smatra samo ona za piće, već i ona koja je potrebna pri proizvodnji hrane, higijenskih potrepština za industriju i dr. Vidljivo je kako je za proizvodnju jednog automobila potrebno utrošiti oko 400 000 litara slatke vode. Za proizvodnju jedne majice kratkih rukava potrebno je izdvojiti oko 4100 litara slatke vode. Također, zanimljiva činjenica je ta da za jedan list papira treba potrošiti oko 10 litara vode. Zaključuje se da će se za ovaj diplomski rada potrošiti oko 80 litara vode [6].



Slika 2.2 Prosječna dnevna potrošnja vode po glavi španjolskog građanina 6700 litara [6]

2.4. Metode desalinizacije

Postoje tri glavna tipa tehnologija za desalinizaciju morske vode: membranske (RO) i termalne (MED, MSF). Desalinizacija obrnute osmoze (RO – eng. *Reverse osmosis*) koristi princip osmoze za uklanjanje soli i drugih nečistoća putem transfera vode kroz seriju polupropusnih membrana. Termalna desalinizacija koristi toplinu, iz elektrana ili rafinerija, za isparavanje i kondenzaciju vode radi pročišćavanja. Tablica 2.1 pokazuje da je MSF (eng. *multi-stage flash*) tehnologija vrlo robusna tehnologija s početnim zahtjevima u pogledu veličine čestica koje smiju ući u postrojenje. MSF je proces desalinizacije vode koji destilira morsku vodu isparavanjem dijela vode u paru u više faza onoga što su u biti protustrujni izmjenjivači topline. Mogu imati i do 30 stupnjeva. Više stupanjska postrojenja za brzu desalinizaciju proizvode oko 26% sve desalinizirane vode u svijetu. MED (eng. *multiple-effect distillation*) postrojenje zahtijeva grubu filtraciju čestica za vodu koja ulazi u kondenzatorske cijevi i dodatnu finu filtraciju za morsku vodu koja prolazi kroz raspršivač. RO postrojenja trebaju tako izvrsnu kvalitetu morske vode da se ne može mjeriti u veličini čestica. To je bio razlog zašto se moraju održavati dodatni parametri poput SDI (eng. *Silt density index*) vrijednosti za morsku vodu koja ulazi u RO membrane. SDI procjenjuje količinu suspendiranih čestica i koloida u vodi. Pruža informacije o potencijalu prljanja opreme za obradu vode, uključujući sustave membranske filtracije, i stoga se često koristi u njihovom dizajnu i odabiru [6, 7].

Tablica 2.1 Zadovoljavajuća veličina čestica za različite tehnologije desalinizacije

Tehnologija desalinizacije	Maksimalna veličina čestice
MSF	1/3 veličine unutarnjeg promjera = 5 mm za 15 mm cijevi – 15 mm za 45 mm cijevi
MED	1/3 unutarnjeg promjera od kondenzacijske cijevi = 4 mm za 12 mm cijev – 8 mm za 24 mm cijevi + 0,5 mm za mlaznicu
RO	5-20 mikrometara + SDI vrijednost <3,5

„With all the talk of desalinization of ocean water for drinking, what do we know about the impacts this might have on climate, ocean salinity and other natural processes?“

„Sa svim pričama o desalinizaciji oceanske ili morske vode za piće, što znamo o utjecajima koji mogu imati posljedice na klimu, slanost oceana i druge prirodne procese?„

Fred Kuepper [2]

3. USIS DESALINIZACIJSKOG POSTROJENJA

Brzim gospodarskim razvojem obalnih područja i sve većom potražnjom za slatkom vodom, planira se izgraditi sve veći broj postrojenja za desalinizaciju. Postrojenja za desalinizaciju uglavnom koristi obalnu morsku vodu kao izvor i primanje vode. Tijekom proizvodnje visokokvalitetne slatke vode, desalinizacijska tehnologija može proizvesti i slanu vodu veće slanosti od obične morske vode. Područja na koja se smještaju postrojenja za desalinizaciju vode obično imaju nestabilno stanje protoka zbog obalnih otoka, složenog terena, utjecaja plime i oseke. Zbog toga navedenog postrojenje je osjetljivo na pijesak i prljavštinu koja dovodi do začepjenja cjevovoda, što zatim smanjuje učinkovitost preusmjeravanja vode i kvalitetu same vode.

Većina postrojenja snabdijeva se površinskom morskom vodom na dubini od jednog do šest metara. Voda na toj dubini sastoji se od velike količine pijeska, riba, algi, meduza i mikroorganizama. Morska voda koja je pogodnija za korištenje nalazi se na dubini od oko 35 metara. Opterećenje onečišćenjima u takvim dubinama je 20 puta manje nego u površinskim vodama, te se takvo okruženje smatra čistom morskom vodom. Osim toga, voda na većim dubinama je mnogo hladnija što povećava učinkovitost svih procesa toplinske desalinizacije. Ukoliko se voda crpi sa duboke lokacije tada je optimalni zahtjev promatranja na 35 metara dubine i da se može dosegnuti unutar 50 metara od linije obale. Potrebe za dodatnim pred tretmanom takve vode su niska. Kako je ranije navedeno, većina postrojenja je površinskog tipa tj. plitka područja gdje se dubina vode od 35 metara može dosegnuti samo na udaljenosti većoj od 500 metara od obale. Troškovi cjevovoda na ili ispod morskog dna su izuzetno visoki, pa projektanti razmatraju duljinu off – shore cjevovoda veću od 500 metara samo ako proces zahtijeva izuzetno hladnu morsku vodu koja se ne može izvući s površine. Postrojenja usisa na takvim lokacijama moraju osigurati da, bez obzira na stvarno stanje morske vode koje varira tijekom godine, dovod u postrojenje za desalinizaciju uvijek bude unutar zadanih granica. Zatvaranje postrojenja za desalinizaciju zbog ulaska meduze, alge ili ribe apsolutno je nedopustivo.

Isto tako, ispuštanje slane vode u more može oštetiti i utjecati na rast i razmnožavanje morskog života uz uzrokovanje drugih ekoloških problema. Odabir razumnog rasporeda dovoda i odvoda vode ima važno praktično značenje za siguran i ekonomičan rad desalinizacijskog postrojenja. Znanstvenici u svijetu su proveli mnoga istraživanja utjecaja na morski život oko desalinizacijskog postrojenja. Zaključili su da visoki salinitet utječe negativno na morsku

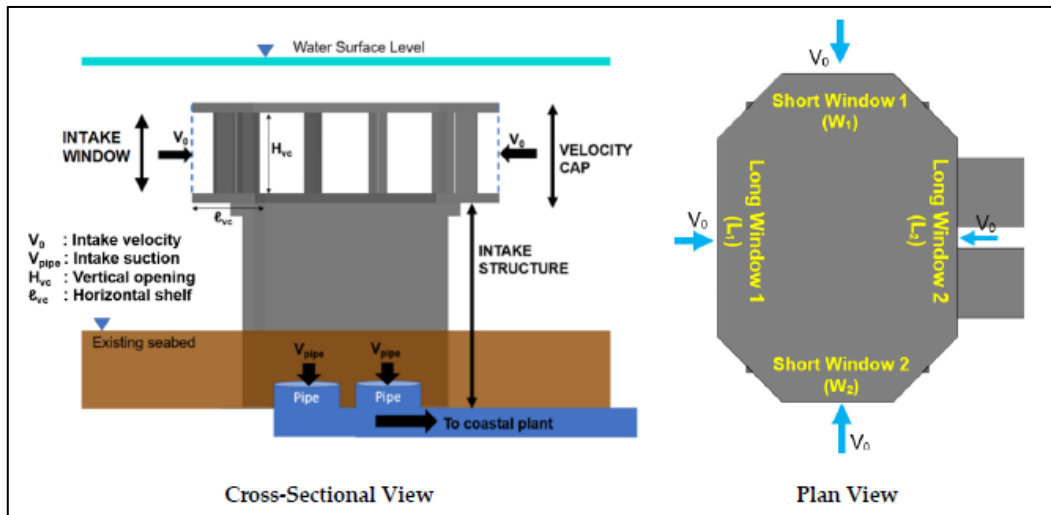
zajednicu. Potrebno je voditi brigu o smještaju samog postrojenja kod samog planiranja. Provedena su istraživanja i izradile su se numeričke simulacije koje govore o čimbenicima ispuštanja slane vode, kao i o optimalnom rasporedu ulaza i izlaza vode.

Postrojenja za usis morske vode koriste se diljem obala. Sama struktura obično je izrađena od armiranog betona koja podupire cijev za usis. Većina postrojenja je kružnog oblika s promjerom u rasponu od 4,7 do 5,3 metra. Visina dovodnog tornja kreće se u rasponu od pet do sedam metara s dovodom između jedan i sedam metra kubnih u sekundi. Međutim, ovisno o raznim drugim parametrima dimenzije i oblici mogu varirati. Slika 3.1 prikazuje usisno postrojenje spremno za spuštanje i pozicioniranje u more.



Slika 3.1 Usisno postrojenje (Alžir) [8]

Osnovne funkcije i dijelovi usisnog postrojenja koji će se modelirati u ovom radu prikazani su na Slici 3.2. Dan je prikaz bočnog pogleda (lijevo) i pogled odozgo (desno). Važne dimenzije promatranja su brzina strujanja fluida u okolici usisnog postrojenja (*eng. Intake velocity*), usisna brzina crpki (*eng. Intake suction*), vertikalni otvor (*eng. Vertical opening*), horizontalno postolje (*eng. Horizontal shelf*). Kada se gleda pogled odozgo, usisno postrojenje je pravokutnog oblika sa dugim i kratkim prozorom u koje ulazi morska voda (*eng. Short window, Long window*). Uglavnom se usisna postrojenja zabijaju u morsko dno do određene dubine kako bi bila stabilna uslijed djelovanja morskih struja [8].



Slika 3.2 Shematski prikaz usisnog postrojenja [8]

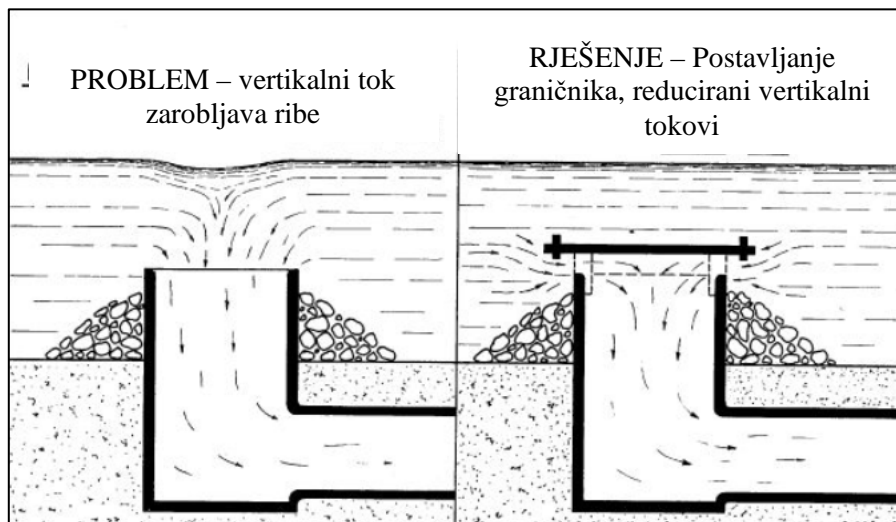
3.1. Graničnik vertikalne brzine

Graničnik vertikalne brzine (eng. *Velocity cap*) je konfiguracija otvorenog usisnog sustava koja je dizajnirana da promijeni glavni smjer crpljenja vode iz vertikalnog u horizontalni. Ova konfiguracija je korisna iz dva glavna razloga:

1. eliminira vertikalne vrtloge i izbjegava crpljenje iz produktivnijeg vodenog staništa koje je obično bliže površini vodenog tijela
2. stvara horizontalni uzorak brzine koji pruža mladim i odraslim ribama indicaciju opasnosti - većina riba ima receptore duž duljine svojih tijela koji osjećaju horizontalno kretanje jer je u prirodi takvo kretanje povezano s neobičnim uvjetima. Ova prirodna indicacija, zajedno s održavanjem niske brzine kroz rešetku (0,2 m/s ili manje), pruža ribama u području usisa dovoljno upozorenja i prilike da se udalje od usisa.

Konfiguracija usisa s brzinskim poklopcem ima dugu povijest i široko se koristi diljem svijeta. To je izvorna konfiguracija mnogih usisnih sustava termoelektrana na jugu Kalifornije i svih novih velikih postrojenja za desalinizaciju morske vode u Australiji, Španjolskoj i Izraelu izgrađenih u posljednjih nekoliko godina. Prema procjeni učinkovitosti tehnologije EPA-e SAD-a, brzinski poklopci mogu pružiti više od 50% smanjenja zagušenja i minimizirati usisavanje i zadržavanje morskih vrsta između strukture usisa i finih filtriranih rešetki postrojenja.

Tijekom istraživanja utjecaja na morski život mnogi znanstvenici su predlagali različite ideje otvaranja graničnika vertikalne brzine. Dovodi se pitanje jesu li ta istraživanja prikladna za korištenje za različite strukturne konfiguracije. Vertikalni otvori i poklopac važni su čimbenici koji doprinose utjecaju na unos brzina. Zaključeno je da ne postoji izvor informacija ili točan dokument u kojem se nalaze standardi ograničenja brzine. Graničnik vertikalne brzine prema donjoj Slici 3.3 vidljivo smanjuje djelovanje vertikalne brzine što pogoduje očuvanju morske flore i faune [8].



Slika 3.3 Prikaz usisnog postrojenja sa i bez graničnika vertikalne brzine [8]

3.2. Područje promatranja

Pretpostavka je da će usisno postrojenje jednog dana biti smješteno negdje na Sjevernom Jadranu. Prosječna dubina Kvarnerskog zaljeva je 60 metara. Za potrebe smještaja usisnog postrojenja biti će potrebno poznavati dinamiku gibanja mora. U Kvarnerskom zaljevu postoje dva perioda godine u kojima je izražena razlika u smjeru i intenzitetu morskih struja (ciklonalan i anticiklonalan).

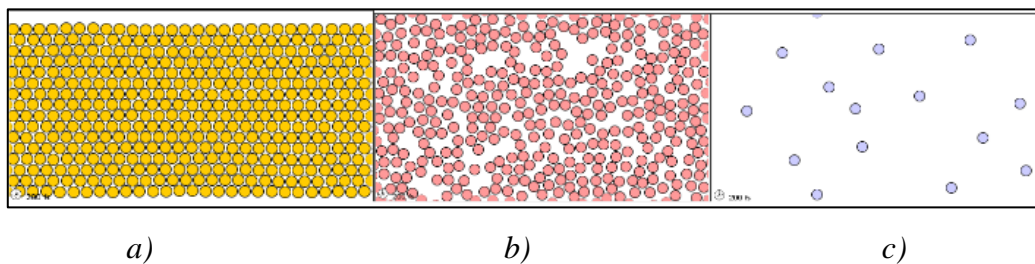
Prosječne brzine strujanja Jadranskog mora iznose između 0,15 i 0,2 m/s. Uslijed djelovanja kratkotrajnih vjetrovih struja (bura, jugo), brzine strujanja mora mogu narasti i do 0,5 m/s. Također postoji i gibanje mora zbog morskih mijena, to su uglavnom mala strujanja koja iznose oko 0,1 m/s. Sjeverni se Jadran smatra jednim od najproduktivnijih područja Sredozemnog mora vezano za floru i faunu. Do sada je u Jadranskom moru nađeno između 6000 i 7000 biljnih i životinjskih vrsta [22].

4. OSNOVNI POJMOVI O FLUIDIMA

Ovo poglavlje bazira se na objašnjenju osnovnih pojmova o fluidima, mehanici fluida, dinamici fluida i računalnoj dinamici fluida potrebnih za jasnije praćenje i razumijevanje ovog rada. Objasniti će se modeli turbulencije i navesti će se model koji je bio korišten tijekom izrade rada. Na kraju poglavlja objasniti će se Navier – Stokesove jednačbe i njihov način rješavanja.

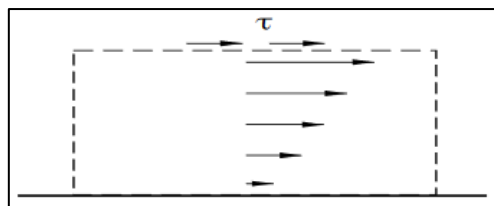
4.1. Fluidi

Materija je skup čestica koja ima masu i zauzima prostor. Podjela materije se vrši na čvrstu materiju i tekućine. Fluid je tekućina ili plin, tekuća ili plinovita tvar. U čvrstom stanju materije, molekule su povezane jakim međumolekulskim silama, što znači da imaju mali stupanj slobode gibanja. Kapljevine imaju veću slobodu gibanja molekula, mogu zauzeti slobodan oblik uz zadržavanje istog volumena. Kod plinovitog stanja molekule imaju slabije privlačne sile te lako mijenjaju svoj položaj, Slika 4.1. Idealni fluid je fluid kojemu su viskoznost, površinska napetost, kapilarnost i ostale posljedice međumolekulskih sila zanemarive [9].



Slika 4.1 Podjela materije – a)čvrsto stanje, b)tekuće stanje, c)plinovito stanje [9]

Fluid je vrsta materije koja se može deformirati pri jako malenom tangencijalnom naprežanju, Slika 4.2 [9].



$$\tau > 0 \rightarrow \vec{v}(\vec{x}, t) > 0$$

Slika 4.2 Fluid [9]

4.2. Mehanika i dinamika fluida

Mehanika fluida je područje fizike koja se bavi ponašanjem tekućina i plinova. Obuhvaća principe koji opisuju kretanje fluida, interakcije s okolinom i unutarnje sile. Osnovna područja interesa u mehanici fluida uključuju aerodinamiku i hidrodinamiku. Pristupi uključuju eksperimentalne, teorijske i računalne metode. Uz to, mehanika fluida bavi se i statikom fluida, proučavanjem fluida u mirovanju ili ravnoteži. Ovaj dio je važan za određivanje tlaka u tekućinama i plinovima. Kinematika fluida proučava gibanje fluida neovisno o silama na fluid, bitan je položaj i brzina čestice fluida [10].

Dinamika fluida se fokusira na proučavanju kretanja fluida i interakciju između fluida i okoline. Istražuje složne dijelove kretanja tekućina i plinova kroz prostor, uključujući njihovu brzinu, smjer, tlak i gustoću. Jedan od ključnih koncepata u dinamici fluida su Navier-Stokesove jednačbe, koje su osnovne jednačbe koje opisuju kretanje fluida. Ove jednačbe matematički opisuju kako se brzina fluida mijenja s vremenom i prostorom te su temelj za razumijevanje složenih fluidnih tokova. Također, dinamika fluida proučava i pojave poput turbulencije koja je kaotično kretanje fluida koje nastaje zbog visoke brzine ili složenih geometrijskih oblika. Koristi se u raznim područjima, kao što su inženjerstvo, geofizika, meteorologija, oceanografija i biologija [10].

Zakon očuvanja mase:

$$\frac{d}{dt}(\rho\delta V) = 0 \quad (4.1)$$

Zakon ravnoteže količine gibanja:

$$\frac{d}{dt}(\rho\vec{v}\delta V) = \delta\vec{F} \quad (4.2)$$

Zakon ravnoteže momenta količine gibanja:

$$\frac{d}{dt}(\vec{r} \times \rho \vec{v} \delta V) = \vec{r} \times \delta \vec{F} \quad (4.3)$$

Zakon ravnoteže energije (prvi zakon termodinamike):

$$\frac{d}{dt}(\rho e \delta V) = \delta W + \delta Q \quad (4.4)$$

gdje su:

e – totalna energija po jedinici mase,

δW – rad obavljen na granici materijalne čestice,

δQ – toplina dovedena granici materijalne čestice.

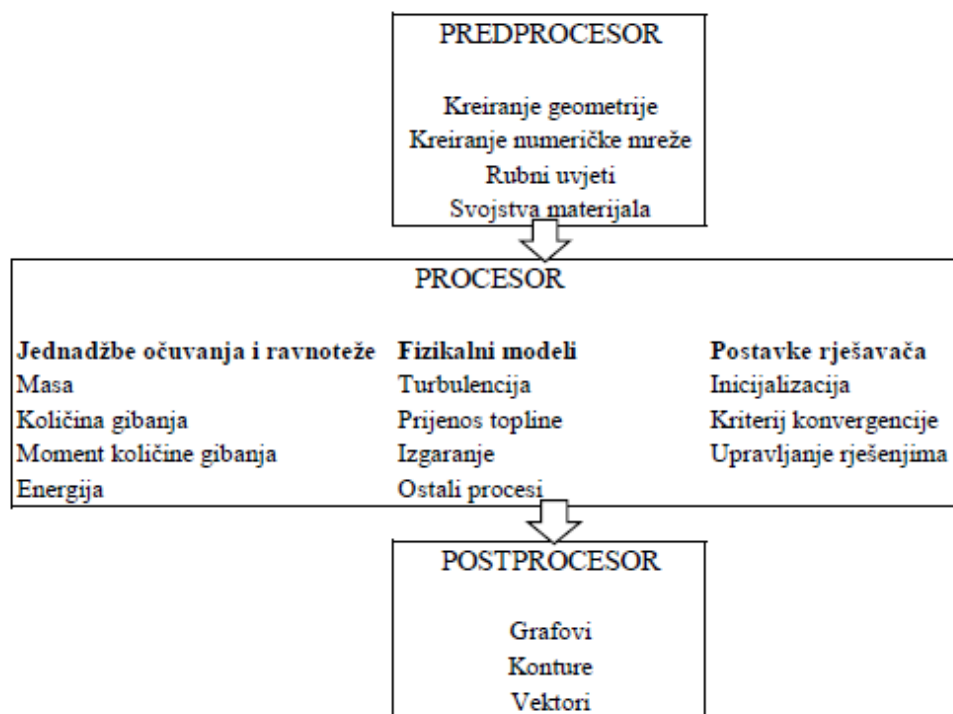
4.3. Računalna dinamika fluida

Računalna dinamika fluida, RDF (*eng. Computational Fluid Dynamics*), proučava ponašanje tekućina i plinova korištenjem numeričkih simulacija. Koristi se u različitim područjima poput inženjerstva, geofizike, meteorologije i biologije. Primjenjuje matematičke modele i računalne algoritme kako bi analizirala fluidne tokove, turbulencije, toplinske i masene prijenose. Omogućuje inženjerima optimizaciju različitih sustava. Simulacije RDF-a obuhvaćaju veliki raspon procesa kao što su laminarni i turbulentni tok, konvekcija topline, difuzija tvari te međusobne interakcije fluida s čvrstim tijelom. Za simuliranje navedenih procesa koriste se različite numeričke metode poput konačnih volumena, konačnih elemenata... Izazovi koji se mogu pronaći u RDF-a uključuju preciznu diskretizaciju kontinuiranih fluidnih domena, upravljanje numeričkom stabilnošću... Postojanjem tih izazova računalna dinamika fluida ostaje ključan alat za inženjere i znanstvenike u razumijevanju i optimizaciji složenih fluidnih sustava.

Svakim danom tehnologija sve više napreduje te računalni programi postaju sve brži i precizniji u rješavanju numeričkih problema. Zaključuje se da je svrha RDF-a neizostavna u simuliranju preciznih simulacija strujanja fluida i optimizacije raznih procesa koji se temelje na mehanici i dinamici fluida. Potrebno je dobro znanje inženjera u odabiru domene, izradi numeričke mreže, zadavanju rubnih uvjeta i pripremi numeričke simulacije. Ukoliko jedan od navedenih dijelova ne zadovoljava uvjete, fizikalno značenje rezultata simulacije postaje neispravno i nemjerljivo.

Trenutno možda i najvažnija svrha RDF-a je detaljno prognoziranje meteoroloških pojava. Uz sve veće korištenje strojnog učenja (*eng. Machine Learning*), došlo se do toga da je moguće, sa velikom točnošću, predvidjeti razne scenarije poput tsunamija, poplava i sl. te pripremiti stanovništvo na takve situacije.

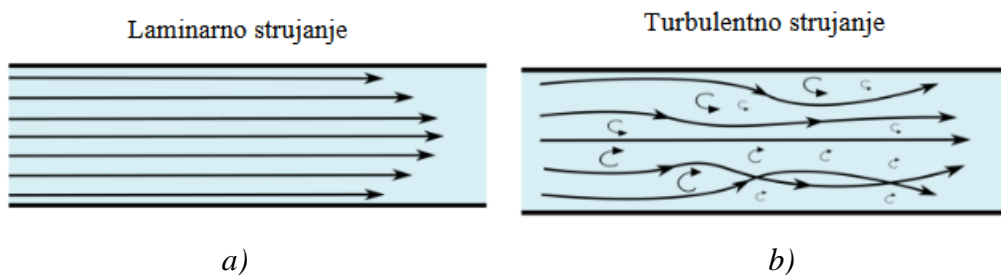
Osnovni dijelovi računarske analize strujanja fluida postavljaju se u tri grupe: predprocesor, procesor i postprocesor, Slika 4.3 [11].



Slika 4.3 Osnovni dijelovi RDF analize

4.4. Modeliranje turbulencija

Jedan od osnovnih koncepata u mehanici fluida je laminarno i turbulentno strujanje. Laminarno strujanje karakterizira fluid koji teče u slojevima bez previše miješanja, dok je turbulentno strujanje dinamičnije i kaotičnije. Reynoldsov broj određuje je li strujanje laminarno ili turbulentno, Slika 4.4. Turbulencija je stanje strujanja fluida u kojem se fluid kreće nepravilno. Navier Stokes jednadžbe koje opisuju gibanje fluida predstavljaju zatvoreni sustav jednadžbi, a izravna numerička simulacija zahtijeva ogromne računalne resurse i teško ju je primijeniti u praksi.



Slika 4.4 a) Laminarno strujanje, b) Turbulentno strujanje [19]

Postoje različite razine rješavanja turbulencija, kao što su: DNS, RANS i LES modeli. Ukratko, DNS (*eng. Direct Numerical Simulation*) je trodimenzionalno i o vremenu ovisno rješavanje Navier Stokesovih jednadžbi. Direktno rješavanje zahtijeva fine, trodimenzionalne mreže te je proračunski jako zahtjevno i trenutno neupotrebljivo za inženjerske probleme. LES (*eng. Large Eddy Simulation*) princip modeliranja velikih vrtloza. Veliki se vrtlozi računaju numerički, a mali vrtlozi se modeliraju matematički. Pretpostavka je da su manji vrtlozi izotropni, što znači da su neovisni o orijentaciji koordinatnog sustava i uvijek se ponašaju predvidljivo. Veliki vrtlozi preuzimaju većinu Reynoldsovih naprezanja. Zaključuje se da je LES pristup manje zahtjevan i uzima manje računalnih resursa od DNS [9].

Reynoldsova usrednjena (*eng. Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS*) metoda široko se koristi za prosjek vremenskog člana fluktuacije turbulencije. Međutim, istovremeno se dodaje nova nepoznata veličina koja nema upravljачku jednadžbu, što dovodi do toga da Navier Stokes jednadžbe više nisu zatvorene. Potrebno je odabrati odgovarajući model turbulencije kako bi se zatvorile jednadžbe koje opisuju turbulenciju. Primarni izazov numeričke simulacije je odabir odgovarajućeg modela za opisivanje turbulencije. Za većinu primjena numeričkih simulacija, Spalart–Allmaras, $k - \epsilon$ i SST $k - \omega$ modeli su široko prihvaćeni, zajedno s relativno točnim

RANS modelima turbulencije. Spalart–Allmaras model je eksplicitno dizajniran za zrakoplovne i svemirske primjene koje uključuju strujanja uz površine i pokazao je dobre rezultate za granične slojeve izložene nepovoljnim gradijentima tlaka [21].

4.4.1. $k - \varepsilon$ model

$k - \varepsilon$ modeli su povijesno najviše korišteni modeli turbulencije u industrijskom CFD-u. Nedostatak $k - \varepsilon$ modela je njihova neosjetljivost na nepovoljne gradijente tlaka i odvajanje graničnog sloja, što tipično predviđa odgođeno i smanjeno odvajanje u odnosu na opažanja. Stoga se $k - \varepsilon$ model ne koristi često u vanjskoj aerodinamici. Turbulenciju opisuju dvije transportne jednadžbe (turbulentna kinetička energija i disipacija turbulentne kinetičke energije) [15, 21].

Turbulentna kinetička energija:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + G_k - \frac{2}{3} \rho (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \varepsilon + S_k \quad (4.5)$$

Disipacija turbulentne kinetičke energije:

$$\frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\varepsilon \nabla \varepsilon) + \frac{C_1 G_k \varepsilon}{k} - \left(\frac{2}{3} C_1 - C_{3,RDT} \right) \rho (\nabla \cdot \mathbf{U}) \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.6)$$

gdje su:

ρ – gustoća fluida,

$C_1, C_2, C_{3,RDT}$ – koeficijenti,

k – turbulentna kinetička energija,

ε – disipacija turbulentne kinetičke energije,

G_k – generacija turbulentne kinetičke energije,

S_ε, S_k – izvorni pojmovi/vrijednosti.

4.4.2. $k - \omega$ model

$k - \omega$ modeli su učinkoviti za strujanja s niskim Reynoldsovim brojevima, blizu zidova, gdje su granični slojevi važni. Modeli su robusniji i daju bolje rezultate u složenim geometrijama i uvjetima gdje su prisutni strmi gradijenti brzina i turbulencija [15, 21].

Turbulentna kinetička energija:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \beta^* \omega k + S_k \quad (4.7)$$

Disipacija turbulentne kinetičke energije:

$$\frac{D}{Dt}(\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho D_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho G \gamma}{\nu} - \frac{2}{3} \rho \beta \omega^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \beta^* \omega k - \rho (F_1 - 1) C D_{k\omega} + S_\omega \quad (4.8)$$

gdje su:

k – turbulentna kinetička energija,

ω – specifična disipacija turbulentne kinetičke energije,

ρ – gustoća,

$\alpha, \beta, \gamma, a, b, c$ – koeficijenti,

S_k, S_ω – izvorni pojmovi.

Turbulentni viskozitet:

$$v_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.9)$$

gdje su:

ω – specifična disipacija turbulentne kinetičke energije,

v – turbulentni viskozitet.

4.4.3. $k - \omega$ SST model

Tijekom izvođenja ovog rada koristiti će se $k - \omega$ SST model viskoznosti vrtloga koji je postao vrlo popularan. Pojam SST u prijevodu znači „prijenos smičnog naprezanja“, (*eng. Shear Stress Transport*) te rješava ω jednadžbu za specifičnu brzinu disipacije turbulentne energije blizu zida i ε jednadžbu za ostalo područje strujanja fluida. Model se dobro ponaša pri nepovoljnim gradijentima tlaka i razdvajanja struje fluida. On uzima najbolje karakteristike od dva osnovna modela i spaja ih u jedno. $k - \varepsilon$ modeli točniji su za područja koja su udaljenija od stijenke, a $k - \omega$ modeli su bolji za područja koja se nalaze u blizini stijenke. Iako je model vrlo učinkovit, može proizvoditi previsoke razine turbulencije u područjima s jakim ubrzanjem ili velikim normalnim naprezanjima, kao što su područja stagnacije. Međutim, ova tendencija je manje izražena u odnosu na standardni $k - \varepsilon$ model.

4.5. Navier – Stokesove jednađbe

Računarska dinamika fluida koristi matematičke modele i metode za rješavanje diferencijalnih jednađbi gibanja fluida. Skoro svaki model računarske dinamike fluida svodi se na rješavanje Navier – Stokesovih jednađbi. Navier – Stokesove jednađbe su temeljne parcijalne diferencijalne jednađbe koje opisuju kretanje tekućina i plinova. Imenovane su po francuskom znanstveniku Claudeu-Louisu Navieru i engleskom matematičaru i fiziku Georgu Gabrielu Stokesu. Za potpuni matematički model strujanja nestlačivih fluida čine Navier – Stokesove jednađbe zajedno sa zakonom očuvanja mase. Takve jednađbe su nelinearne parcijalne i rijetko i je moguće riješiti analitički. Navier – Stokesove jednađbe opisuju gibanje newtonskih fluida. Jednađba statike fluida daje ravnotežu tlaka pod utjecajem masenih sila. Kada su masene i kontaktne sile u ravnoteži tada fluid ostaje u stanju mirovanja [9,10]:

$$\overrightarrow{\text{grad}} p = \rho \cdot \vec{f} \quad (4.10)$$

gdje su:

grad – vektor brzine promjene skalarnog polja,

p – tlak,

ρ – gustoća,

f – gustoća masene sile.

Iz zakona ravnoteže količine gibanja proizlazi Eulerova jednađba gibanja fluida koja vrijedi za idealni fluid. Također, može se primijetiti da se ova jednađba može prikazati kao oblik drugog Newtonovog zakona gibanja, koji govori da je promjena momenta posljedica djelovanja sila, tj. da masene i kontaktne sile uzrokuju gibanje fluida:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{f} - \overrightarrow{\text{grad}} p \quad (4.11)$$

gdje je:

$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt}$ – sila inercije,

$\mu\Delta\vec{v}$ – *grad p* – smične i normalne kontaktne sile,

$\rho\vec{f}$ – masena sila.

Za Newtonovski fluid, smična naprezanja su proporcionalna brzini smične deformacije. Pomoću gradijenta brzine i svojstava fluida moguće je izraziti smična naprezanja. Kada se takva naprezanja uvrste u diferencijalnu jednažbu gibanja fluida (4.12), dobije se Navier Stokesova jednažba gibanja (4.13) ako je nestlačivo strujanje:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho\vec{f} + \operatorname{div}\vec{T}_\sigma \quad (4.12)$$

gdje je:

div – divergencija (jakost izvora vektorskog polja u prostoru),

T_σ – tenzor naprezanja.

$$\vec{\rho} \frac{D\vec{v}}{Dt} = \mu\Delta\vec{v} - \operatorname{grad} p + \rho\vec{f} \quad (4.13)$$

gdje je:

μ – dinamički viskozitet,

Δ - Laplaceov operator.

Zapis u Kartezijevim koordinatama:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \quad (4.14)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \quad (4.15)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (4.16)$$

gdje je:

ρ – gustoća fluida,

u, v, w – komponente brzine gibanja fluida,

μ – dinamička viskoznost,

p – tlak,

g – komponente vektora ubrzanja sile teže.

Lijeva strana se odnosi na sile inercije. Na desnoj strani prvi i drugi član predstavljaju kontaktne sile (tlak). Zadnji član na desnoj strani je masena sila. Sustav Navier – Stokesovih jednadžbi ima četiri nepoznanice. Gdje su tri komponente tlak i brzina, a postoje samo tri jednadžbe. Kako je ranije navedeno, sustav je nerješiv pa je potrebno uvesti jednadžbu očuvanja mase za stacionarno nestlačivo strujanje kako bi se sustav zatvorio:

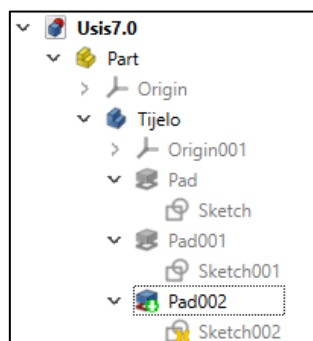
$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (4.17)$$

Zaključak pregleda Navier – Stokesovih jednadžbi glasi kako su te jednadžbe jedne od temeljnih jednadžbi mehanike fluida. Veoma su složene te ih je vrlo teško analitički riješiti. Uz niz pojednostavljenja i pretpostavki moguće ih je riješiti.

5. MODELIRANJE USISA DESALINIZACIJSKOG POSTROJENJA

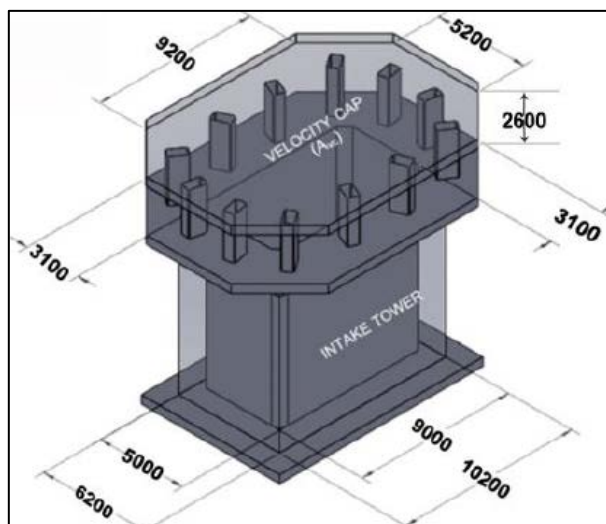
5.1. Izrada geometrije

Geometrija koja će se promatrati u ovom radu izrađena je pomoću programa FreeCAD. FreeCAD je otvoreni izvorni CAD (računalno potpomognuto dizajniranje) softver koji omogućuje korisnicima stvaranje 2D i 3D modela. Jedna od najvažnijih značajki FreeCAD-a je skriptiranje okruženja. Iz integrirane Python konzole ili vanjske Python skripte moguće je dobiti pristup gotovo bilo kojem dijelu FreeCAD-a. S obzirom na to da je besplatan i dostupan na različitim operativnim sustavima, poput Windowsa, Maca i Linuxa, FreeCAD je popularan izbor među inženjerima, dizajnerima i hobistima koji se bave CAD-om. Prikaz stabla FreeCAD nacrtane geometrije dan je na Slici 5.1 [12].



Slika 5.1 Stablo geometrije

Početna geometrija je izrađena prema slijedećim dostupnim dimenzija, Slika 5.2:



Slika 5.2 Dimenzije usisnog postrojenja [2]

5.2. Automatizacija geometrije

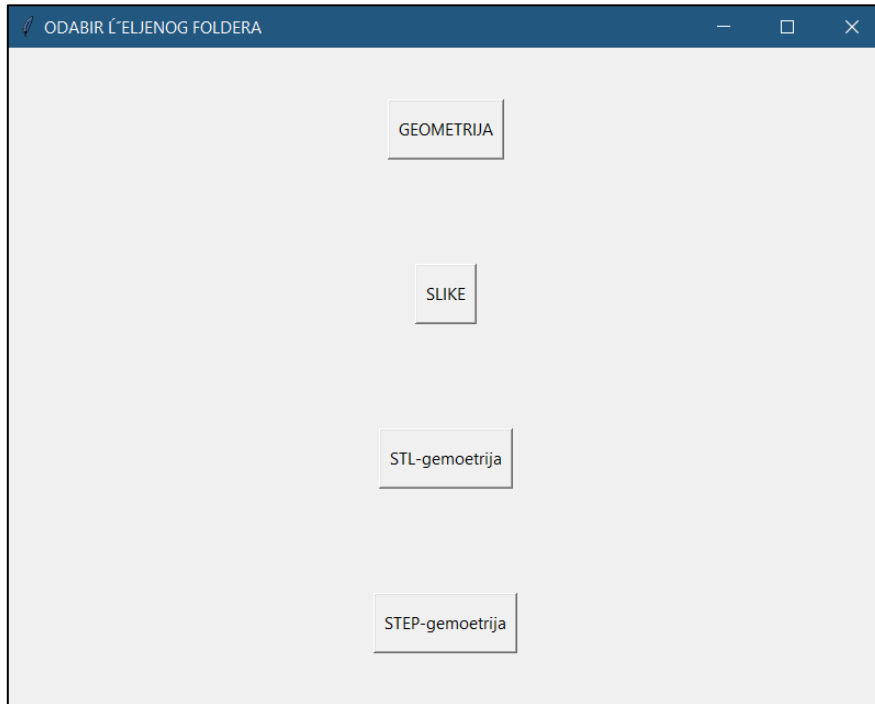
Ukoliko se geometrija izrađivala pomoću macro-a, tada je moguće otvoriti spremljene korake izrade geometrije u programu Python. Python je visoka razina, interpretirani programski jezik općenite namjene. Razvijen je s naglaskom na jednostavnosti i čitljivosti koda, što ga čini popularnim izborom za različite vrste programiranja, uključujući web razvoj, znanstveno računanje, analizu podataka, umjetnu inteligenciju i automatizaciju zadatka.

Kako je prethodno navedeno, usisna postrojenja nisu detaljno istražena, te ne postoje točna rješenja kojih se svaki inženjer može držati i po njima izraditi geometriju koja će mu zadovoljavati sve uvjete. Postoje istraživanja koja se razmatraju i unapređuju kako bi se došlo do zadovoljavajućih parametara. Upravo zbog tog razloga ova geometrija ima mogućnost i potrebu automatizacije pomoću programa Python. Najveći problem koji se javlja inženjerima je određivanje optimalnog broja i dimenzija vertikalnih pregrada. Za dobivanje optimalnih uvjeta strujanja mora između stupova prethodno mora biti zadovoljen niz uvjeta. Potrebno je odrediti na kojoj dubini će biti postavljen kompleks, kakve su morske struje, temperatura, količina života na tom dijelu, gustoća mora i mnogi drugi parametri. Vertikalne pregrade imaju glavnu svrhu da usmjeravaju more prema usisu pumpi na što ravnomjerniji način tj. da se čim više smanje utjecaji turbulencije.

Automatizacija se provela pomoću „for“ petlje koja napravi deset iteracija na vertikalnim pregradama. Zadalo se deset mogućih dimenzija pregrada (dužina, širina, visina), a broj je varirao od četiri do 24 ravnomjerno raspoređene pregrade po zadanoj krivulji. Postoji opcija da korisnik sam unese tražene dimenzije i broj pregrada i na taj način dobije jednu geometriju koja mu je potrebna za daljnju analizu. Za izradu ovog rada u većini slučajeva koristile su se nepromijenjen dimenzije pregrada (visina, širina) dok se najviše razmatrao utjecaj visine vertikalne pregrade.

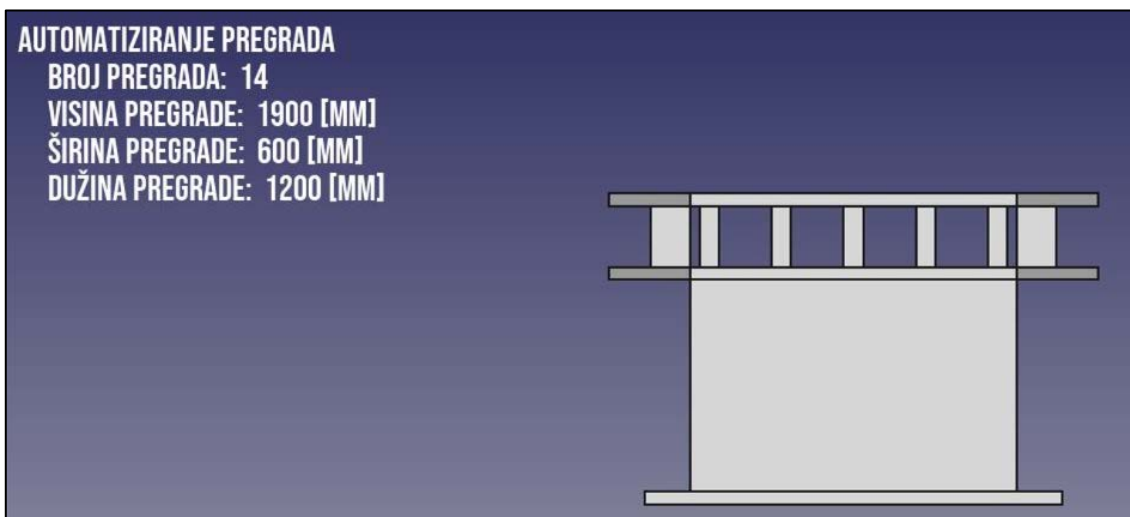
Mnogo krajnjih korisnika se ne mora znati napredno služiti programom Python tako da je zbog tog razmišljanja napravljeno i pokretanje za korisnike koji znaju samo osnovne naredbe u Python-u. Svakako ovaj način još i skraćuje vrijeme samog procesa izrade geometrije i automatizacije, jer nije potrebno otvarati program FreeCAD i kopirati izmijenjenu geometriju u konzolu, već se jednim klikom dobivaju konačni rezultati koji su se prethodno zadali. Uz to smanjuje se mogućnost slučajne pogreške jer se otvara dodatna skripta za pokretanje u kojoj se ne nalazi cjelokupni zapis geometrije. Pokretanjem određene Python skripte otvara se

jednostavno grafičko sučelje, Slika 5.3, pomoću kojeg je moguće izabrati željeni prikaz obavljenog rada.



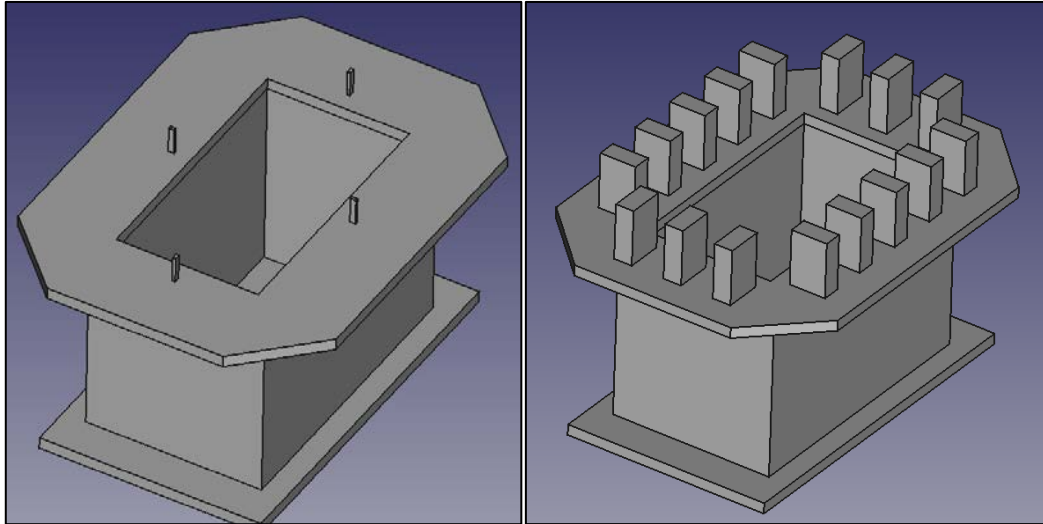
Slika 5.3 Prozor za izbor željenog prikaza

Uz automatiziranje geometrija pomoću Python-a, još se za svaku iteraciju napravila slika geometrije sa korištenim dimenzijama i brojem pregrada, Slika 5.4. Ovaj način omogućuje lakše snalaženje i odabir potrebne geometrije jer svaki naslov slike prati i određenu dimenziju geometrije kao i .step i .stl datoteku. Na kraju se svaka geometrija spremila u .step i .stl oblik. Važno je spremiti u .step oblik jer je on najpraktičniji za daljnji tijek izvođenja rada.



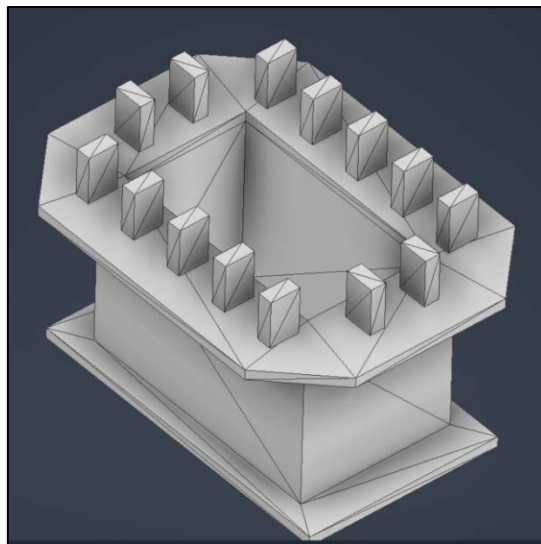
Slika 5.4 Automatizacija slike

Za usporedbu na Slici 5.5 prikazane su dvije automatizirane geometrije sa drugačijim brojem vertikalnih pregrada te različitim dimenzijama istih. Postrojenje sa četiri pregrade dano je samo kao primjer fleksibilnosti automatizacije te se ono nije koristilo u daljnjim simulacijama. Graničnik vertikalne brzine (betonski poklopac postrojenja) je maknut sa postojeće slike kako bi automatizacija vertikalnih pregrada došla do izražaja.



Slika 5.5 Automatizirane vertikalne pregrade (4 i 16 pregrada)

Kontrola ispravnosti izrađene geometrije i spremanje iste u .step datoteku izvedena je na način da se .step datoteka učitala u jedan od programa za 3D modeliranje. U ovom slučaju na Slici 5.6 .step datoteka učitana je u program Inventor. Može se zaključiti da je geometrija i način spremanja zadovoljavajući. Također je skinut graničnik vertikalne brzine za bolju vizualizaciju pregrada.

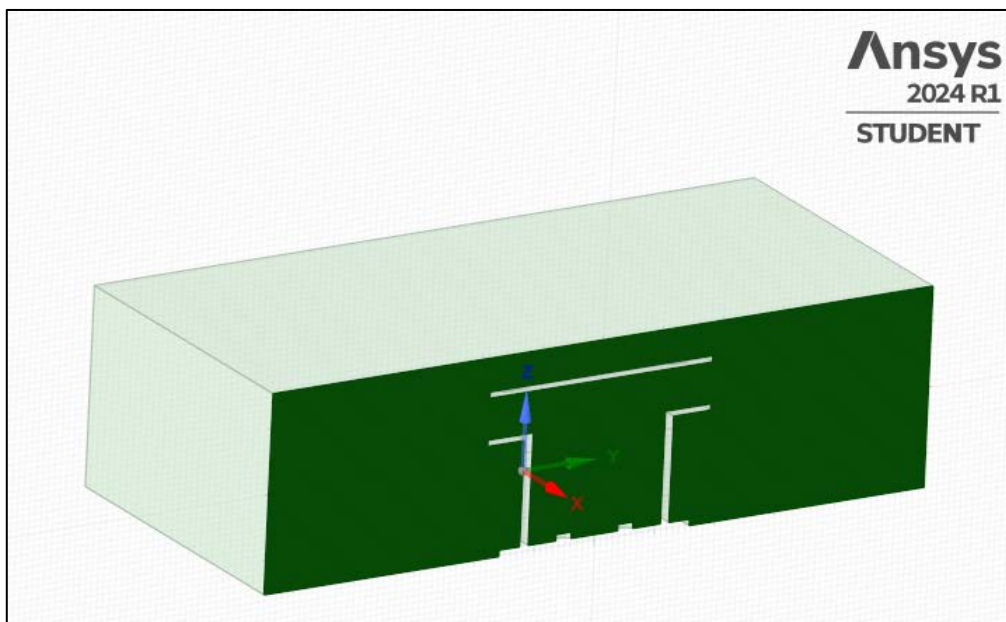


Slika 5.6 Učitana .step datoteka u program Inventor

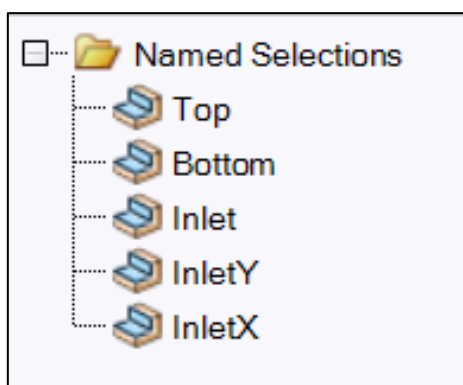
5.3. Numerička mreža

Umrežavanje modela ključan je korak u samoj točnosti i preciznosti simulacije. Pomoću programa Ansys 2024 R1 izvelo se umrežavanje geometrije. Kod simulacija strujanja fluida radi se obrnutim principom krutog tijela i fluida. U ovom slučaju dio koji predstavlja fluid (more) biti će prikazan kao kruto tijelo (*eng. solid*), dok će samo usisno postrojenje biti prikazano kao prazan prostor tj. izbaciti će se iz domene. Domena oko samog usisa biti će veličine 45x41 metara, a visina će varirati ovisno o visini vertikalne pregrade. Izvezenu .step datoteku bilo je potrebno učitati u Ansys Workbench. Fluent Meshing predstavlja odličan izbor za automatsko umrežavanje geometrije. Modul za brži i jednostavniji način umrežavanja koji je pogodan za kasnije prebacivanje na OpenFOAM rješavanje.

Prethodno je ukratko objašnjena izrada geometrije u programu FreeCAD i način njezine automatizacije. U modulu Ansys-a koji se zove SpaceClaim bilo je potrebno izraditi domenu promatranja oko samog usisnog postrojenja, te se model usisnog postrojenja trebao izrezati iz domene. Na Slici 5.7 moguće je vidjeti kako izgleda usisno postrojenje u domeni prije izrade numeričke mreže. Također, prije pokretanja Fluent-a potrebno je zadati pripremu rubnih uvjeta (*eng. Named Selection*). U ovom slučaju vanjske plohe domene raspoređene su na način da su plohe u smjeru osi y označene sa *InletY*, dok su plohe u smjeru osi x označene kao *InletX*, Na vrh domene je zadan uvjet *Top*, a na dno uvjet *Bottom*. Potrebno je dodati rubni uvjet i na dio koji predstavlja crpke kao *Inlet*, Slika 5.8.



Slika 5.7 Izrezano usisno postrojenje iz domene



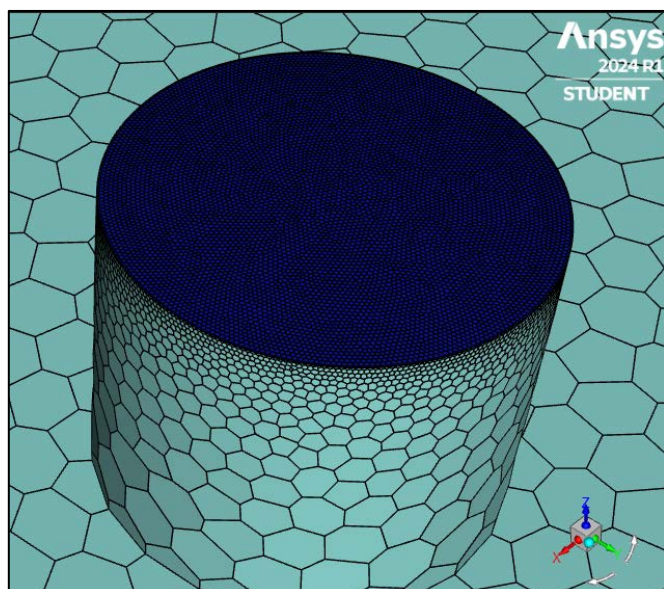
Slika 5.8 Rubni uvjeti u programu Ansys (eng. *Named Selections*)

Da bi se krenulo u izradu numeričke mreže potrebno je iz stabla u Ansys Workbench-u izabrati modul Fluent (with Fluent Meshing). Općenito, Fluent je modul za numeričko rješavanje problema strujanja fluida te topline. Koristi se za simuliranje različitih strujnih procesa kao što su strujanja tekućina, plinova i topline kroz različite geometrije i uvjete. Ukoliko se sljedeći dio, izrada numeričke mreže obavi veoma dobro velika je vjerojatnost da će kasnije rezultati simulacije biti bliže ispravnim vrijednostima.

Izrada numeričke mreže sastoji se od nekoliko dijelova:

- Uvezivanje geometrije (eng. *Import geometry*)
- Dodavanje lokalnih ugušćenja (eng. *Local sizing*)
- Izrada detaljnijeg lokalnog dijela mreže (eng. *Local refinement regions*)
- Generiranje plošne mreže (eng. *Generate surface mesh*)
- Opisivanje geometrije (eng. *Describe geometry*)
- Zadavanje regija i granica (eng. *Update boundaries and regions*)
- Dodavanje graničnog sloja (eng. *Add boundary layers*)
- Generiranje volumne mreže (eng. *Generate volume mesh*)

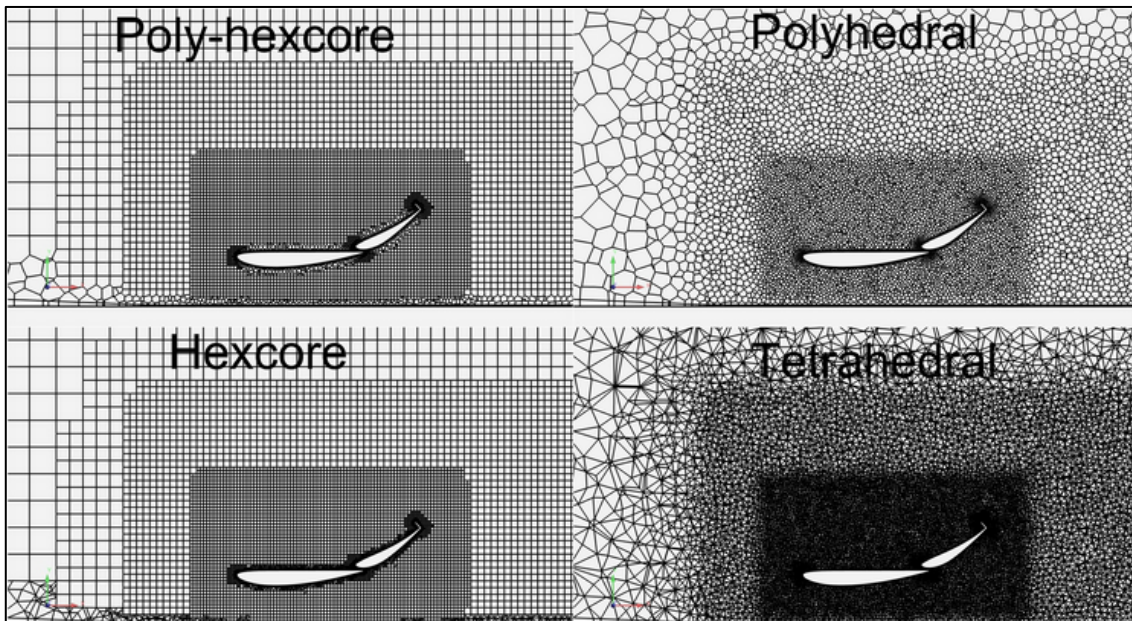
Lokalno površinsko ugušćenje dijelova domene koje predstavljaju usisne crpke dano je na Slici 5.9. Površina koja će predstavljati usis veoma je ugušćena zbog toga da se na čim ravnomjerniji i kasnije vizualno bolji način rasporedi djelovanje usisa.



Slika 5.9 Lokalno površinsko ugušćenje oko usisa crpki

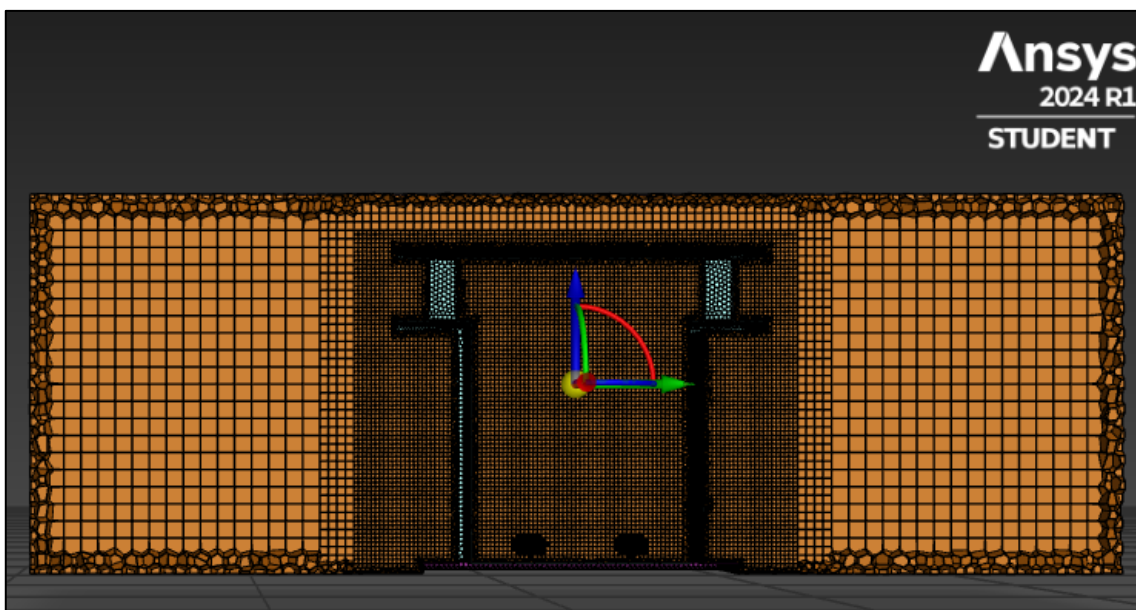
Studentska verzija, Ansys 2024 R1 ima na raspolaganju, za korištenje numeričkih simulacija koje se baziraju na Fluent-u, koristiti 1048576 elemenata. Potrebno je naglasiti kako je taj broj elemenata na studentskoj verziji dostupan tek od najnovije verzije Ansys-a 2024 R1. Iako se simulacija neće dalje provoditi u Ansys Fluent-u isto tako nije moguće izvesti numeričku mrežu kao .msh format sa više elemenata nego što je dozvoljeno.

Najviše se koriste tetraedarski i poliedarski elementi jer mogu stvoriti visokokvalitetne površinske mreže za potrebe konvergencije. *Hexacore* i *poly-hexacore* izrađuju se tehnologijom umrežavanja primjenom heksaedarskog elementa na volumen. Heksaedarski elementi su računalno učinkoviti u usporedbi s tetraedarskim/poliedarskim smanjuju računalne resurse bez ugrožavanja točnosti. Prema istraživanjima, rezultati pokazuju da je za određenu mrežu napravljenu *poly-hexacore* principom potrebno najmanje vremena za pokretanje po iteraciji. Još je važno napomenuti kako tetraedri zauzimaju najmanju količinu RAM-a, međutim *poly-hexacore* ima najmanji broj elemenata, a koristio je i najmanje RAM-a, Slika 5.10 [13].



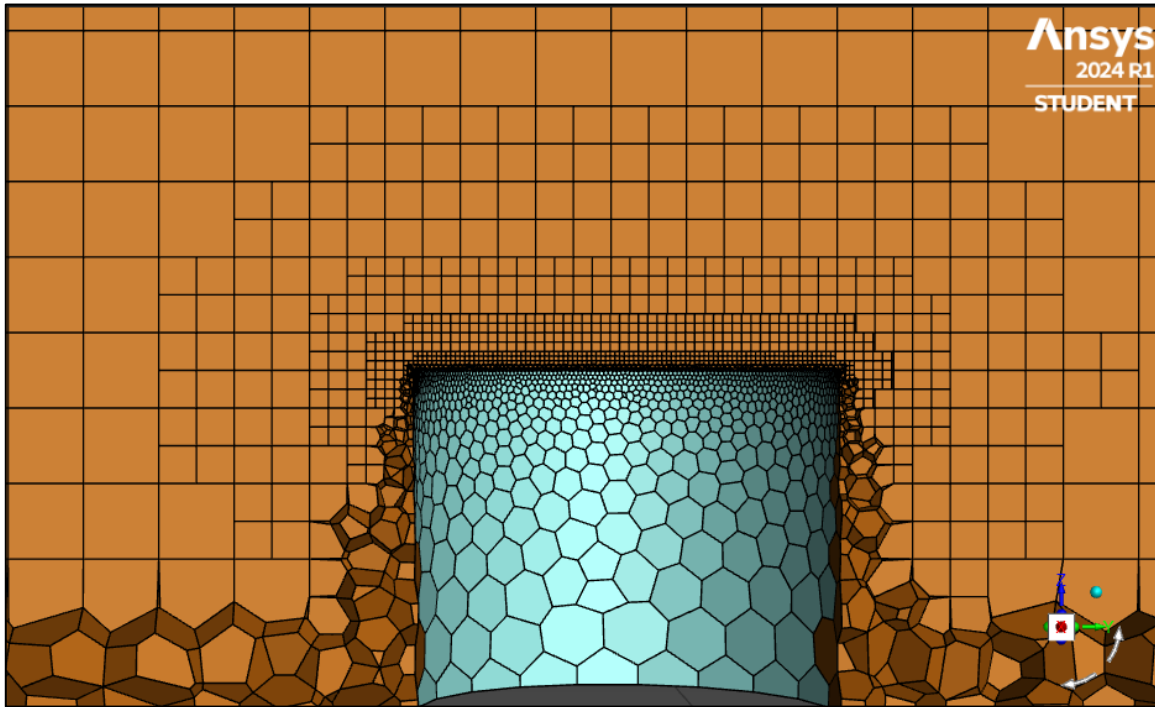
Slika 5.10 Različiti tipovi numeričke mreže [13]

Slike 5.11 i 5.12 prikazuju volumnu mrežu izrađenu pomoću Ansys modula Fluent with meshing. Vidljiv je prijelaz sa ugušćenog područja koje će biti promatrano tijekom izvođenja simulacije u OpenFoam-u na dijelove domene koje nisu od pretjeranog interesa, ali su važne zbog razvijanja pravovremenog strujanja.



Slika 5.11 Volumna numerička mreža

Detalj volumne mreže na usisu crpke. Zbog nedostatka rubnih slojeva (eng. *Inflation*) na dnu je vidljiv nagli prijelaz sa ruba domene na unutarnji dio domene. Zbog tog razloga u ovom slučaju se ne može promatrati strujanje u blizini stijenke.



Slika 5.12 Detalj volumne mreže oko usisa crpki

6. POKRETANJE SIMULACIJA

Geometrija se izvezla kao .msh format koji je pogodan za rješavanje OpenFOAM programom. Format .msh je standardni format datoteke koji se koristi za spremanje mrežnih podataka ili mreža u računarstvu, posebno za numeričke simulacije i RDF. Služi za prijenos geometrijskih informacija o mrežama. MSH datoteke obično sadrže informacije o čvorovima mreže (koordinate točaka u prostoru) i elementima mreže (npr. trokuti ili četverokuti). Osim toga, mogu sadržavati dodatne informacije poput podataka o rubnim uvjetima, materijalima ili svojstvima koji su povezani s elementima mreže [14].

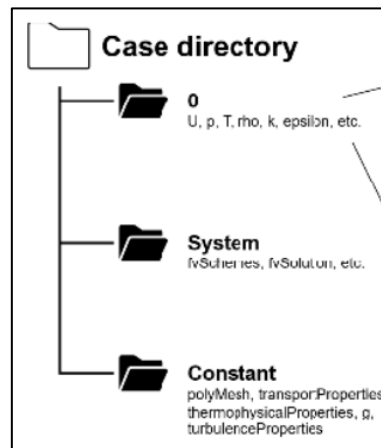
OpenFOAM je skraćena od Open Field Operation And Manipulation, što bi u prijevodu bilo otvoreno upravljanje i manipulacija poljima. Programski paket je besplatan i „open source“. Veoma moćan alat koji se koristi za simulacije i analizu složenih fluidnih tokova u različitim inženjerskim i znanstvenim područjima. Program se sastoji od različitih modula ili paketa koji se nazivaju rješavačima (*eng. solver*), koji implementiraju različite numeričke metode za rješavanje različitih problema u dinamici fluida. Program se može koristiti za izradu geometrije, postavljanje graničnih uvjeta, pokretanje simulacije i analizu rezultata [15].

Prije samog pokretanja simulacije potrebno je pripremiti OpenFOAM datoteke. Da bi se slučaj ispravno postavio potrebno je poznavati pozadinu rada programa tj. potrebno je dobro vladati teorijskim dijelovima mehanike fluida. Na početku, za samo strujanje potrebno je znati odabrati ispravan turbulentni model strujanja. Potom je potrebno postaviti datoteke samog OpenFOAM programa. U njima, ovisno o problemu, se upisuju tj. mijenjaju podaci brzine, tlaka, rubnih uvjeta i mnogih drugih parametara. Svakako je vrlo važno odrediti rješavač problema. Hoće li se promatrati SIMPLE algoritam, PIMPLE algoritam ili neki drugi. Nakon ispravno postavljenog problema, slučaj je spreman za prebacivanje na superračunalo Bura koji će izrazito ubrzati računanje simulacije.

6.1. OpenFoam datoteke

Direktorij OpenFoam simulacije sadrži tri osnovne kategorije mapa prikazane na Slici 6.1:

- *0*
- *System*
- *Constant*.



Slika 6.1 Struktura direktorija modela [20]

Datoteka *system* sastoji se od datoteka u kojoj se zadaju parametri rješavača, te se sastoji od tri datoteke:

- *controlDict* – parametri za izvođenje simulacije
- *fvSchemes* – odabir diskretizacijske sheme
- *fvSolution* – postavljanje rješavača jednadžbi

U datoteci *constant* nalaze se informacije o kompletnoj numeričkoj mreži u direktoriju *polyMesh* uz ostale datoteke vezane za svojstva modela.

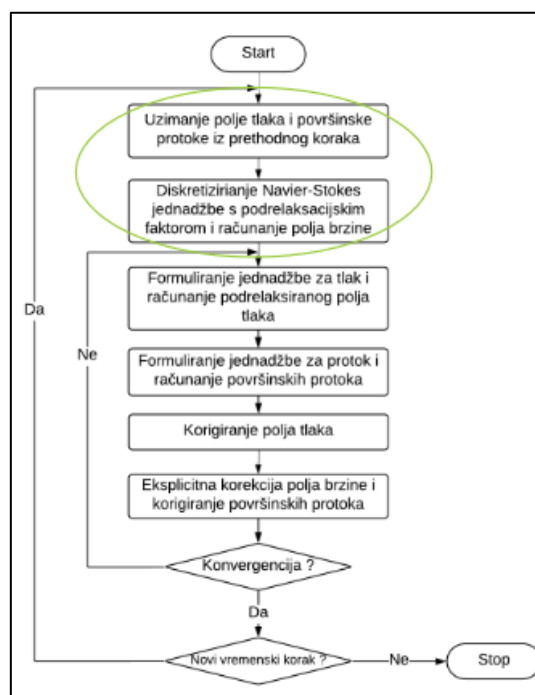
U mapi *0* pohranjeni su podaci za pojedina polja u početnom vremenskom trenutku $t = 0$:

- polje brzina (U)
- polje tlaka (p)
- turbulentna kinetička energija (k)
- disipacija turbulentne kinetičke energije – epsilon (ϵ)
- specifična disipacija turbulentne kinetičke energije – omega (ω)

6.2. Rješavač (SimpleFoam)

Postavljanje rješavača (*eng. Solver*) važan je prvi korak prije pokretanja simulacije. Za potrebe ovog rada korišten je rješavač SimpleFoam (*eng. Semi – Implicit Method for Pressure Linked Equations algorithm*). To je stacionarna metoda namijenjena za korištenje kod velikih vremenskih koraka. Osnovna ideja algoritma je rastaviti problem rješavanja Navier-Stokesovih jednačbi u dva koraka: prvo se rješava brzina, a zatim se rješava tlak. Ovakav pristup omogućuje iterativno rješavanje sustava jednačbi u svakom koraku. Kako nema vremensku derivaciju u jednačbi zbog velikog vremenskog koraka potrebno je uvesti podrelaksaciju traženih polja kako bi postigli stabilnost i konvergenciju. Algoritam preuzima polja tlaka i površinskih protoka iz prethodnog koraka. Jednačba tlaka provodi se na način da se izolira brzina iz momentne jednačbe te uvodi supstitucija u jednačbu kontinuiteta

U prvom koraku rješavaju se Navier – Stokesove jednačbe bez tlaka kako bi se procijenile brzine fluida na sljedećem vremenskom koraku. Ovaj korak obično uključuje rješavanje diskretiziranih Navier – Stokesovih jednačbi za brzinu korištenjem odgovarajućeg numeričkog rješavača. Nakon što su se procijenile brzine slijedi korak u kojem se tlak prilagođava kako bi se zadovoljili uvjeti očuvanja mase na diskretnoj razini. U ovom koraku, tlak se korigira na temelju razlika između procijenjenih brzina i stvarnih brzina fluida, uzimajući u obzir gradijente brzina i gustoća fluida, Slika 6.2 [16,23].



Slika 6.2 Simple algoritam [23]

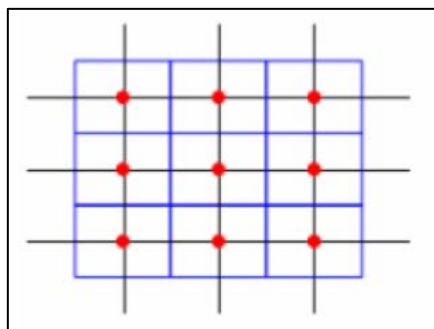
6.2.1. Metoda konačnih volumena

Metode konačnih volumena (MKV) su jedna od najčešćih korištenih numeričkih tehnika u računalnoj dinamici fluida, a koriste se i u OpenFOAM-u. Ova tehnika temelji se na diskretizaciji domene fluida na skup manjih volumena ili ćelija, unutar kojih se rješavaju osnovne jednačbe dinamike fluida. Svaka ćelija u mreži konačnih volumena predstavlja određeni dio prostora, Slika 6.3, a na nju se primjenjuju osnovni zakoni očuvanja, poput zakona očuvanja mase, kretanja i energije. Promjene u varijablama poput brzine, tlaka i gustoće procjenjuju se na granicama između ćelija, koristeći interpolacijske tehnike. Jedna od ključnih prednosti metode konačnih volumena je njezina konzervativnost. Ova tehnika osigurava očuvanje mase, energije drugih bitnih veličina unutar sustava s visokom točnošću. Osim toga, metoda konačnih volumena dobro se prilagođava različitim geometrijama i složenim rubnim uvjetima. Integral transportne jednačbe konačnog volumena:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \phi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} \left(\rho v_j \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\phi dV \quad (6.1)$$

gdje je prvi član brzina promjene sadržaja ϕ fizikalnog svojstva u volumenu ΔV , dok je drugi član konveksijski i difuzijski protok ϕ kroz granice, i na kraju zadnji član je izvor ϕ .

U kontekstu OpenFOAM-a, korisnici mogu odabrati različite rješavače i alate koji koriste metodu konačnih volumena za rješavanje specifičnih problema u dinamici fluida. Primjeri uključuju rješavače poput simpleFoam za laminarne struje, pisoFoam za turbulente tokove te interFoam za simulacije višefaznih strujanja. Unutar OpenFOAM-a korisnici također imaju fleksibilnost prilagoditi postavke diskretizacije poput veličine ćelije, tipova interpolacije i nemričkih shema za rješavanje graničnih problema. To omogućuje prilagodbu simulacije specifičnim zahtjevima problema i osigurava optimalnu točnost i stabilnost simulacije.[17, 24]

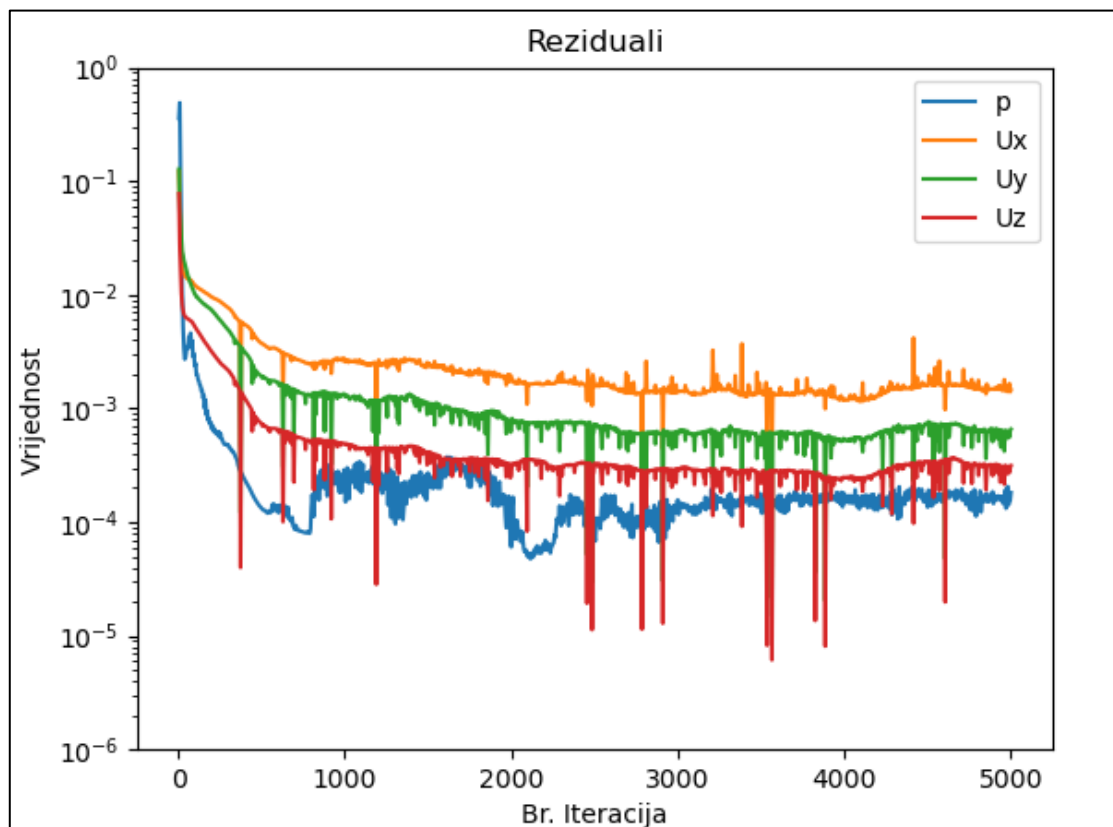


Slika 6.3 Diskretizirana domena MKV sa čvorovima u središtu ćelija [24]

6.3. Postavljanje parametara

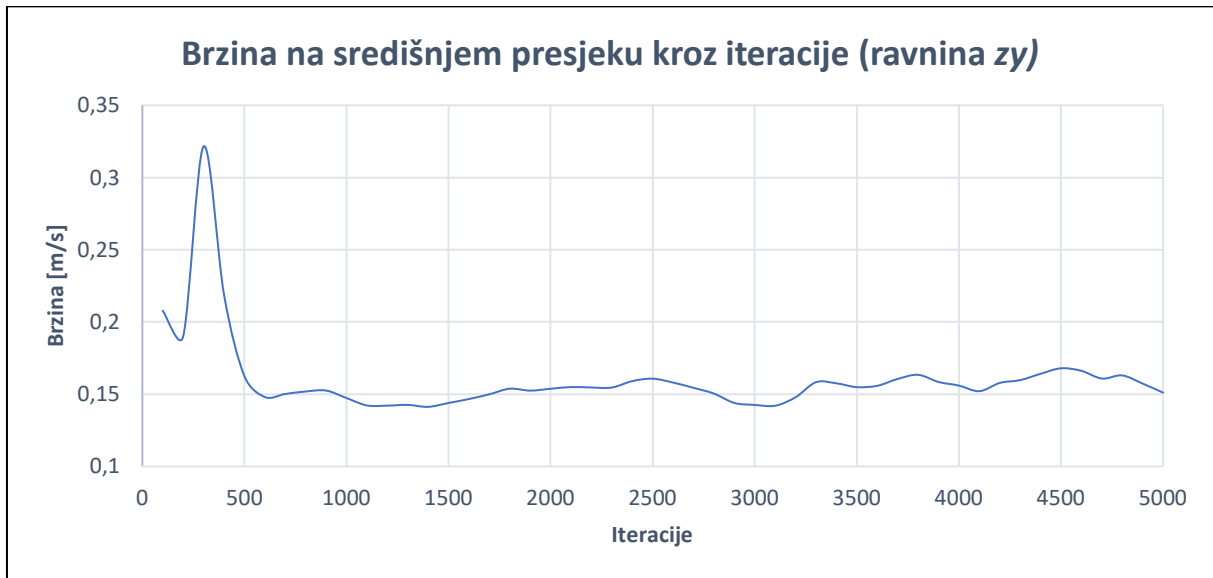
Datoteka *controlDict*, koja se nalazi unutar datoteke *system*, sadrži osnovne postavke koje su potrebne za pokretanje simulacije. Prvu informaciju koju je potrebno izabrati je rješavač, zatim *startTime* i *endTime* (početno i krajnje vrijeme simulacije).

Kraj simulacije se postavio na 5000 iteracija. Taj broj je odabran kao zadovoljavajuće krajnje vrijeme nakon kojega simulacija više ne postiže značajnija poboljšanja. Poboljšanja ili greške u simulacijama je moguće pratiti putem reziduala (*eng. Residuals*) koji ukazuju na točnost i preciznost same simulacije. U znanstvenim istraživanjima reziduali se ne bi smjeli namjestiti da budu veći od vrijednosti 10^{-4} . Vrijednost koja je na primjer 10^{-3} neće zadovoljiti znanstvene uvjete simulacija. Prilikom izrade ovog rada korištene su vrijednosti od 10^{-6} . Prikaz reziduala za početnu simulaciju dan je na Slici 6.4. Za očitavanje reziduala u datoteku *controlDict* bilo je potrebno dodati odgovarajući dio koda. Reziduali su učitani i prikazani pomoću programa Python.



Slika 6.4 Reziduali

Uspoređivanjem postignutih reziduala može se zaključiti kako se nisu postigli traženi uvjeti. More kao cjelina se ne može ograničiti u jednu kocku sa fiksnim rubnim uvjetima, ono uvijek ima ulaze i izlaze (*eng. Inlet/Outlet*). To se može prokomentirati tako da se u ovom slučaju promatra domena kojoj rubni uvjeti nisu konstantni tj. postoji ulaz i izlaz fluida u/iz promatrane domene. Promatranjem brzine kroz iteracije na središnjem presjeku usisnog postrojenja u određenom slučaju, vidljivo je na Slici 6.5. kako se već nakon 500 iteracija brzina strujanja fluida koncentrirala oko vrijednosti od 0,15 m/s.



Slika 6.5 Brzina strujanja mora na središnjem presjeku kroz iteracije

Nadalje, *writeInterval* daje informaciju koliko često će se zapisivati izračunati podaci. Potrebno je voditi brigu o dostupnosti memorije i uskladiti zapisivanje podataka za ukupnim brojem iteracija. Na kraju su informacije o preciznosti zapisivanju. Slika 6.6 prikazuje datoteku *controlDict*.

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       controlDict;
}
// * * * * *

application     simpleFoam;

startFrom       startTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         5000;

deltaT          1;

writeControl    timeStep;

writeInterval   100;

purgeWrite      0;

writeFormat     ascii;

writePrecision  6;

writeCompression off;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable true;

```

Slika 6.6 Datoteka *controlDict*

Slijedeća važna datoteka je *decomposeParDict* kada se cjelokupni slučaj želi pokrenuti na paralelan način. Slijedeća Slika 6.7 daje uvid u način podjele mreže na 20 poddomena. Korišten je jedan čvor i 20 procesora jednog čvora. Na superračunalu Bura moguće na jednom čvoru koristiti 24 procesora. Iskorištavanjem čvorova do krajnjih granica nije idealna opcija zbog toga što se određeni dio zadatka izvodi sekvencijalno. Takvi dijelovi, povećanjem broja procesora ograničavaju ubrzanje. Uz to postoji i nekoliko različitih metoda raspodjele mreže. U ovom slučaju koristi se metoda *scotch*.

```

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       decomposeParDict;
}
// *****

numberOfSubdomains 20;
method scotch;

// *****

```

Slika 6.7 decomposeParDict datoteka

U datoteci θ potrebno je namjestiti vrijednosti i rubne uvjete za svaku plohu domene. Sve vrijednosti se odnose na početni vremenski trenutak. Datoteka U koja se odnosi na brzine strujanja fluida, zadana je tako da su bočne stranice domene postavljene kao *inletOutlet* rubni uvjet. Takav rubni uvjet se postavlja zbog toga što more može ulaziti i izlaziti iz domene ovisno o raznim uvjetima strujanja. Usis crpki postavljen je na *inlet*, donja ploha koja predstavlja morsko dno postavljena je na *noSlip* uvjet jer je brzina fluida na površini sa dnom jednaka nuli. Vrh domene postavljen je kao *slip* uvjet je postoji interakcija između mora i atmosfere. Prikaz datoteke U dan je slijedećom Slikom 6.8.

```

dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
internalField   uniform (0.2 0 0);
boundaryField
{
  inletx
  {
    type          inletOutlet;
    value         $internalField;
    inletValue    uniform (0.2 0 0);
  }
  inley
  {
    type          inletOutlet;
    value         $internalField;
    inletValue    uniform (0 0.2 0);
  }
  inlet
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 -15);
  }
  bottom
  {
    type          noSlip;
  }
  top
  {
    type          slip;
    value         uniform (0.2 0 0);
  }
  component1-solid4:1
  {
    type          noSlip;
  }
}

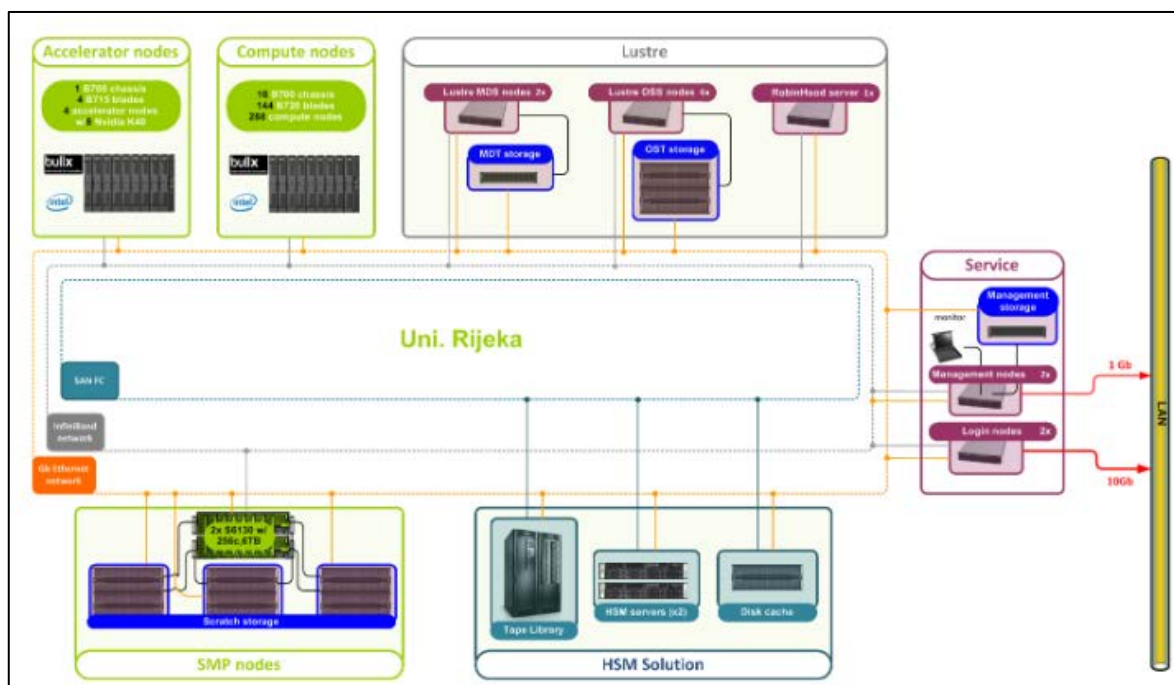
```

Slika 6.8 Datoteka U

6.4. Postavljanje slučaja na Superračunalo Bura

Zbog zahtjeva za velikim računarskim resursima navedeni problem prebaciti će se na računanje na HPC Bura. (HPC – *High-Performance Computing*) skraćena za računalo visokih performansi. Bura se sastoji od višeračunalnih, heterogenih i višeprocorskih sustava. Temeljena je na hibridnoj računalnoj arhitekturi. Proizvođač je tvrtka Bull Sastoji se od tri dijela: Cluster, GPGPU i SMP. Nakon prebacivanja datoteka *0, constant* i *system* potrebno je urediti SLURM skriptu Slika 6.10. SLURM (*eng. Simple Linux Utility for Resource Management*) otvoreni sustav za upravljanje resursima i za podjelu poslova koji se koriste u okruženjima visokih performansi za učinkovitu alokaciju i upravljanje računalnim resursima kao što su čvorovi, procesori, memorija i pohrana u klasteru ili distribuiranoj računalnoj sekciji. Superračunalo Bura pripada Sveučilištu u Rijeci te je najsnaznije superračunalo u Hrvatskoj, 2015. uvršteno je u TOP500 najbržih računala na 441. mjestu, za znanstvena istraživanja smjestila se na 32. mjesto. Shematski prikaz superračunala Bura prikazan je na Slici 6.9.

Za potrebe ovog rada korišten je jedan čvor, odnosno 20 procesora [18].



Slika 6.9 Shematski prikaz superračunala Bura

```

#!/bin/bash
#SBATCH --job-name=simple
#SBATCH --time=30-00:00:00
#SBATCH --nodes=1
#SBATCH --ntasks-per-node=20
#SBATCH --mem-per-cpu=2048MB
#SBATCH --output=pimple-%j.out
#SBATCH --partition=computes_thin
#SBATCH --exclusive

solver=simpleFoam

sed -i "s/numberOfSubdomains.*[0-9][0-9]*/numberOfSubdomains $SLURM_NTASKS;/g" system/decomposeParDict
decomposePar -fileHandler collated > log.decomposePar

mpirun -np $SLURM_NTASKS $solver -parallel -fileHandler collated > log.pimple 2>&1

reconstructPar

```

Slika 6.10 SLURM skripta

Gdje su:

- *Job-name* (ime zadatka)
- *Time* (maksimalno vrijeme trajanja zadatka, postaviti veće od predviđenog)
- *Nodes* (broj čvorova)
- *Ntasks per node* (broj korištenih procesora po svakom čvoru)
- *Mem per cpu* (memorija korištena po svakom procesoru)
- *Partition* (particija u kojoj se provodi računanje)
- *Output* (izlazna datoteka u kojoj se prikupljaju podaci o simulaciji)

Slijedeće je prikazan *solver* (rješavač) i jednak je *simpleFoam-u*.

Zatim je prikazana podjela domene na *subdomene*, tako da svaki procesor dobije dio problema za rješavanje.

Mpirun je naredba koja pokreće rješavanje simulacije.

ReconstructPar je naredba koja skuplja dijelove domene od svakog procesora i zapisuje simulaciju u vremenskom koraku koji je moguće vizualizirati.

SLURM skripta pokreće se naredbom *sbatch* i imenom SLURM skripte.

7. REZULTATI

Slijedeće poglavlje prikazuje i objašnjava dobivene rezultate u više promatranih slučajeva. Svi rezultati će biti prikazani pomoću programa Paraview koji služi za vizualizaciju rezultata OpenFOAM-a. Analitički rezultati će se također izvaditi iz programa Paraview, te će biti obrađeni programom Excel. Rezultati i slike nastojati će se usporediti sa člankom [8] prema kojem je izrađivana geometrija i domena. Za svaku sliku i rezultat dati će se pojašnjenje istog. Razlike koje se javljaju između članka i rada su slijedeće.

Potrebno je naglasiti kako su rezultati iz navedenog članka dobiveni temeljem neobjavljenih izvještaja tvrtke Aqvaspace Sd.

Domena iz članka smještena je u „realno“ okruženje na koje djeluje neravno morsko dno koje predstavlja područje buduće ugradnje. U radu nije korišteno realno morsko dno, već je zamišljeno kao ravna površina.

Promatrajući samu mrežu, tijekom izvođenja ovog rada korištena je gušća mreža te su time vizualni i analitički rezultati zamjetno drugačiji. Potrebno je pronaći optimalnu gustoću mreže kako bi zadovoljavala znanstvene rezultate i rezultate industrije (cijena utrošenih sati za postizanje zadovoljavajućih uvjeta).

Brzina strujanja mora u simulacijama je postavljena na 0,2 m/s. U rezultatima iz članka brzina strujanja bila je zanemariva jer se koristio trenutak kada se događao prijelaz sa plime na oseku i obratno. U tom trenutku postoji najveći gradijent brzine unutar samog usisnog postrojenja. Samo za potvrdu te činjenice biti će prikazana simulacija sa zanemarivom brzinom strujanja mora kako bi se potvrdio najveći gradijent promjene brzine unutar usisnog postrojenja.

7.1. Brzina V_0

Izračun brzine V_0 (brzina usisavanja na ulazu u postrojenje) temelji se na izračunu prosječne brzine na četiri glavna ulaza u usisno postrojenje prikazana na Slici 3.2. Postojeća brzina V_0 se izračunava na početnom primjeru domene i geometrije, koji su objašnjeni na prethodnim stranicama za svaki izračunati slučaj simulacije. Najprije je cjelokupnu domenu potrebno izrezati na dvije površine (*eng. Slice*). Prvi slučaj promatra presjek domene u yz ravnini, dok drugi slučaj promatra domenu u xz ravnini. Postoje dva velika prozora i dva mala prozora (*eng. Long and short window*) na kojima će se uzeti prosječna brzina svakog prozora. Na slijedećim Slikama 7.1 – 7.4 prikazane su točke (roza boja) u kojima su se očitale brzine. Točke su uzete približno na pola visine prozora ($L/2$) prema uputama na Slici 3.2. Fluid koji struji nije idealno usmjeren te zbog toga nije nužno uzeti točno polovicu. Izračun brzine V_0 potrebno je izračunati za svaki slučaj na način koji je prikazan niže.

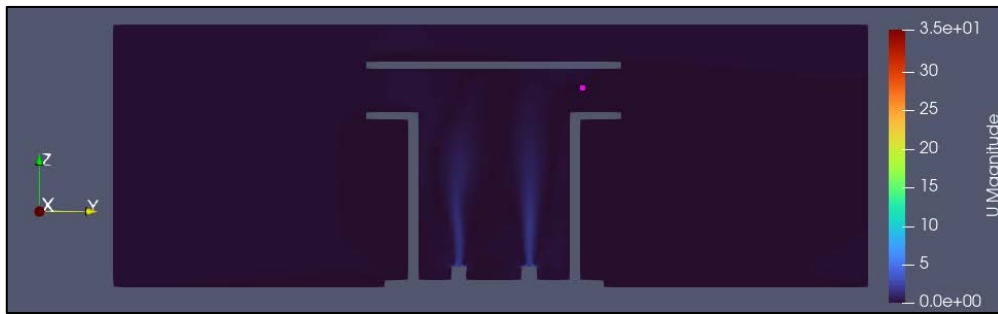
Slijedom navedenog izračunavamo jednu od usisnih brzina postrojenja (V_0) na ulazu u postrojenje uz konstantni usisni protok od $30 \text{ m}^3/\text{s}$ na kraju simulacije (5000 iteracija):

- Točka 1 – $T_1 = 0,198756 \text{ m/s}$
- Točka 2 – $T_2 = 0,329857 \text{ m/s}$
- Točka 3 – $T_3 = 0,256342 \text{ m/s}$
- Točka 4 – $T_4 = 0,206615 \text{ m/s}$

$$V_0 = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

$$V_0 = \frac{0,198756 + 0,329857 + 0,256342 + 0,206615}{4}$$

$$V_0 = 0,2479 \text{ m/s}$$



Slika 7.1 Veliki prozor (Točka 1)



Slika 7.2 Veliki prozor (Točka 2)



Slika 7.3 Mali prozor (Točka 3)



Slika 7.4 Mali prozor (Točka 4)

7.2. Omjera brzine usisa V_r

Izraz omjer brzine usisa V_r koristi se u ovom radu kako bi predstavio bezdimenzijsku brzinu koja uzima u obzir omjer brzine usisa V_0 i prosječne brzine usisavanja u cijevi crpke v_{cijev} . v_{cijev} se određuje prema jednadžbi 7.1, dok je površina usisne cijevi određena jednadžbom 7.2.

$$v_{cijev} = \frac{Q}{A_{cijev}} \quad (7.1)$$

$$A_{cijev} = \frac{\pi D_{cijev}^2}{4} \quad (7.2)$$

Površina poprečnog presjeka jedne crpke, promjer crpke je:

$$D = 1\text{ m}$$

$$A_{cijev} = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 0,785 \text{ m}^2. \quad (7.3)$$

Uisno postrojenje ima dvije crpke, potrebno je površinu pomnožiti sa dva:

$$A_{cijev} = 0,785 \cdot 2 = 1,57 \text{ m}^2, \quad (7.4)$$

gdje je:

Q – protok [m^3/s]

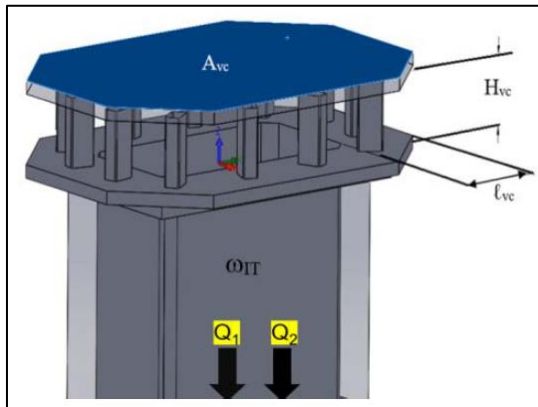
D_{cijev} - promjer cijevi [m].

$$V_r = \frac{V_0}{v_{cijev}} \quad (7.5)$$

Parametar V_r se može koristiti za procjenu strukturalne izvedbe usisnog postrojenja. Niži V_r ukazuje na bolju strukturalnu izvedbu uz smanjenje brzine usisa, i obrnuto.

7.3. Parametri usisnog postrojenja

Na dizajn graničnika vertikalne brzine utječu parametri prikazani na Slici 7.5. Terminologija koja će se koristiti tijekom prikazivanja rezultata dana je niže.



Gdje je:

A_{vc} – Površina graničnika vertikalne brzine [m²]

H_{vc} – Vertikalni otvor [m]

l_{vc} – Horizontalno postolje [m]

$\omega_{vc} = A_{vc} \times H_{vc}$ – Volumen graničnika vertikalne brzine [m³]

ω_{IT} – Volumen usisnog postrojenja [m³]

$Q = Q_1 + Q_2$ – Ukupni protok kroz usisne cijevi [m³/s]

Slika 7.5 Parametri koji utječu na dizajn graničnika vertikalne brzine [8]

Volumen usisnog postrojenja iznosi:

$$\omega_{IT} = \text{širina} \cdot \text{dužina} \cdot \text{visina} = 450 \text{ m}^3. \quad (7.6)$$

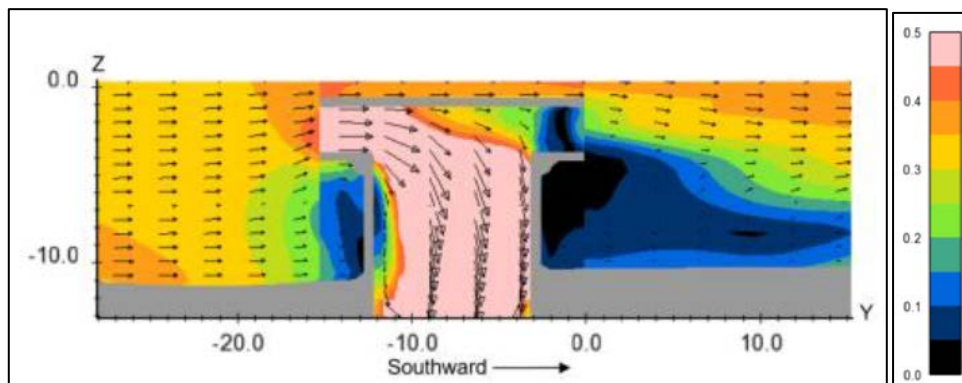
7.4. Usporedba djelovanja plime i oseke na usisno postrojenje

Naredni dio predstavlja usporedbu rezultata uzetih iz članka [8], te rezultate provedenih simulacija u OpenFOAM-u. Navedeni članak je za dobivanje rezultata koristio program FLOW3D. Uspoređivati će se rezultati djelovanja plime (poplavne struje) i oseke (mrtva oseka) na usisno postrojenje. Kroz slike će biti vidljive razlike između načina rada dva programa (FLOW3D i OpenFOAM). Postavke i način rada programa FLOW3D nisu objašnjene te se usporedba tih rezultata temelji na vlastitim zapažanjima iz prikazanih slika i navedenog članka. Promatrane su dvije karakteristične pojave. Usisno postrojenje biti će prikazano u smjeru yz te u smjeru xz. Od četiri uspoređene slike, jedna slika ne prati vrijednosti iz članka iako su svi ostali parametri namješteni kao u članku.

7.4.1. Poplavna struja

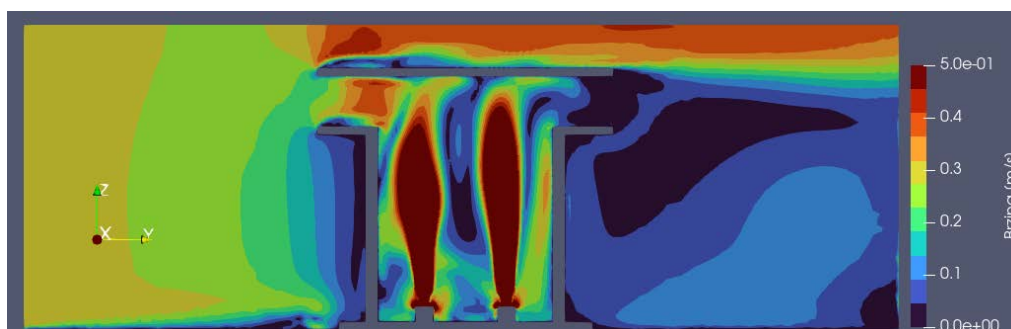
Slijedeća usporedba se odnosi na djelovanje poplavne struje (*eng. Flood Current*). Poplavna struja odnosi se na struju vode koja teče prema unutrašnjosti kopna. Također, na brzinu plimne struje utječu faktori kao što su topografija morskog dna, Mjesečeve faze, vremenski uvjeti...

Na Slici 7.6 iz članka vide se nagli „lomovi“ strujanja na ulazu u postrojenje što ukazuje na nedovoljnu gustoću mreže ili greške prilikom izvođenja simulacija. Uz to, u usisnom postrojenju je konstantna brzina od 0,5 m/s na većini prikazane površine (osim lijevog unutarnjeg ruba) što je također znak nedovoljno guste mreže. Ako postoje dvije usisne grane pri dnu geometrije nije moguće da je na cjelokupnom unutarnjem presjeku konstantna brzina strujanja od 0,5 m/s.



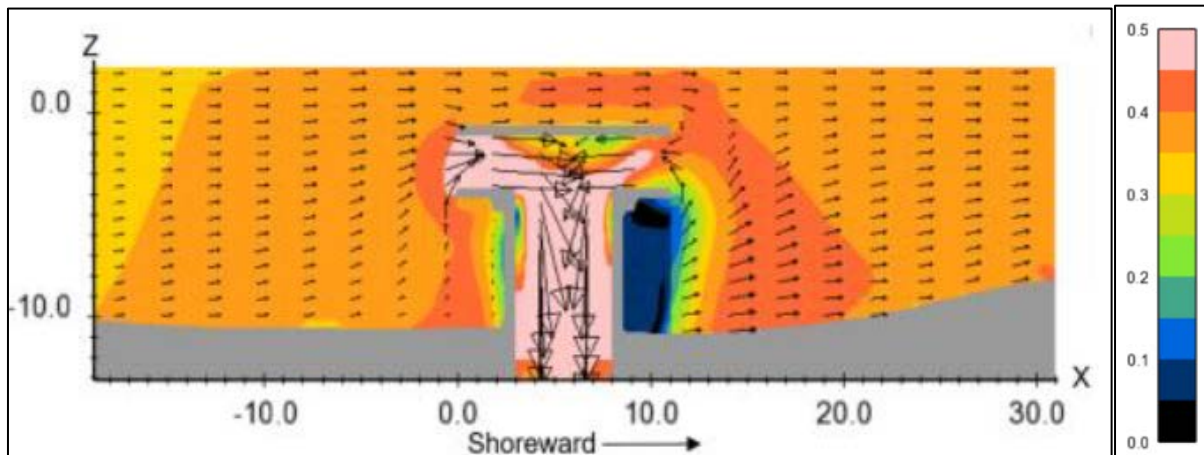
Slika 7.6 Djelovanje poplavne struje yz ravnina FLOW3D [8]

Puno bolje raspoređivanje kontura brzina prikazalo se na Slici 7.7. Greška koja se javlja u ovom slučaju je ta što nisu postavljeni rubni uvjeti inflacije na zidove usisnog postrojenja te na morsko dno. Zbog nedostatka inflacije kod većih brzina strujanja javlja se loše strujanje uz samu stijenku zida tj. nagli prijelaz sa dijela u kojem je brzina strujanja 0 m/s (zidovi) na ostatak domene.



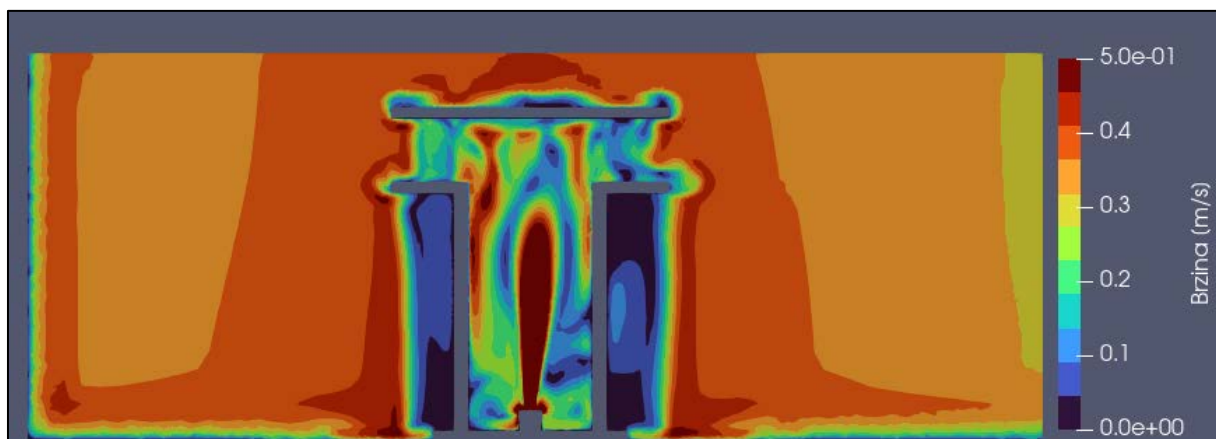
Slika 7.7 Djelovanje poplavne struje yz ravnina OpenFOAM

U promatranom slučaju djelovanje poplavne struje kreće se brzinom od oko 0,35 m/s u smjeru osi X. Promatranjem Slike 7.8 sa druge strane usisnog postrojenja javlja se recirkulacijska zona (plava boja). Također, to je i zona sa jako malom brzinom strujanja gotovo zanemarivom.



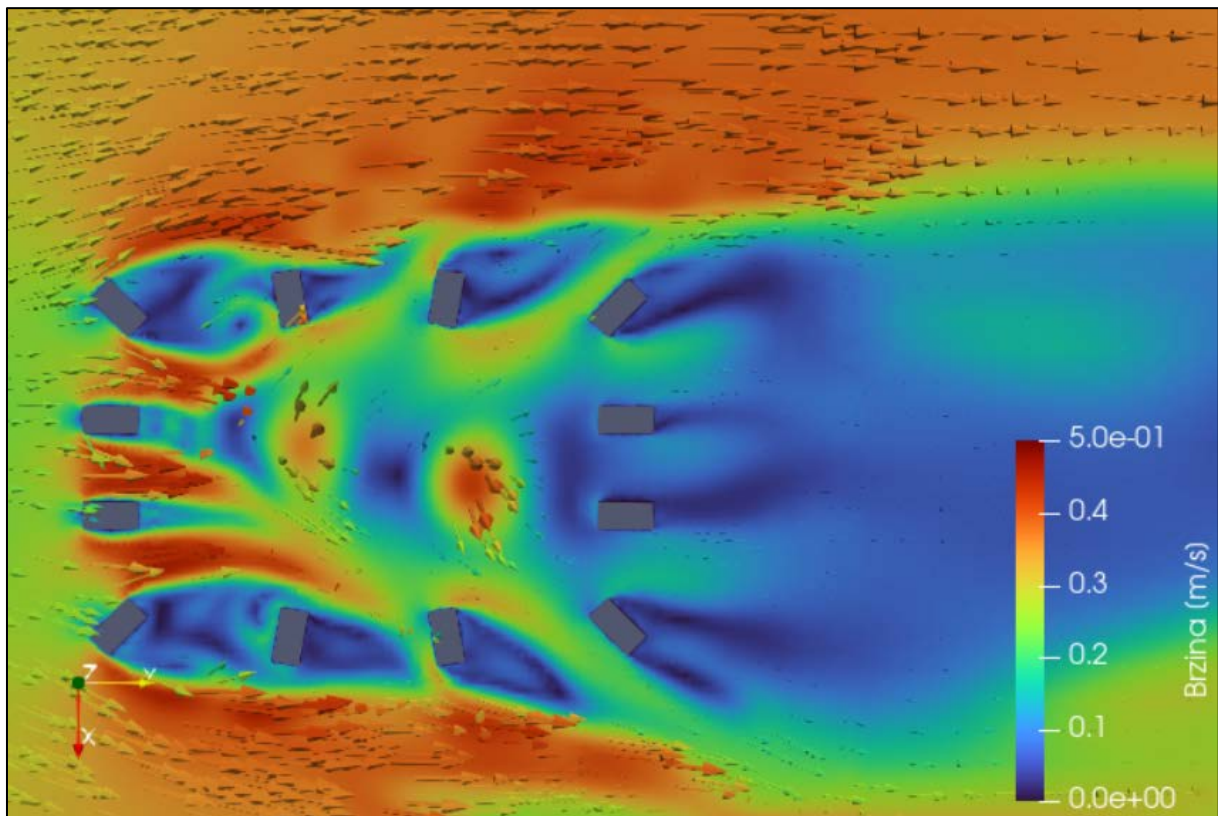
Slika 7.8 Djelovanje poplavne struje xz ravnina FLOW3D [8]

Postavke simulacije u FLOW3D-u nisu poznate osim onih činjenica navedenih u članku, postoji mogućnost da će se javiti odstupanja između dva programa. Namještanjem identičnih postavki za poplavnu struju u xz smjeru događaju se velika odstupanja kod OpenFOAM programa, Slika 7.9. Javlja se postojanje zida na lijevom rubu domene, što je karakterizirano pojavom brzine 0 m/s. Postoji mogućnost da su se u članku dogodile još neke izmjene koje nisu objašnjene te rezultati odstupaju.



Slika 7.9 Djelovanje poplavne struje xz ravnina OpenFOAM

Slijedeća Slika 7.10 se odnosi na pogled odozgo na sredini visine vertikalnih pregrada. Slika je uzeta iz zadnje iteracije simulacije. Kod lijevih vertikalnih pregrada javlja se zona vrtloženja nakon njih tj. u samom usisnom postrojenju. Kako je prethodno rečeno, nakon usisnog postrojenja u pozitivnom smjeru osi y pojavljuje se zona sa jako malim brzinama strujanja koje pogoduju biljnom i životinjskom svijetu. Nastaju idealni uvjeti za stvaranje staništa za ribe i druge životinje.

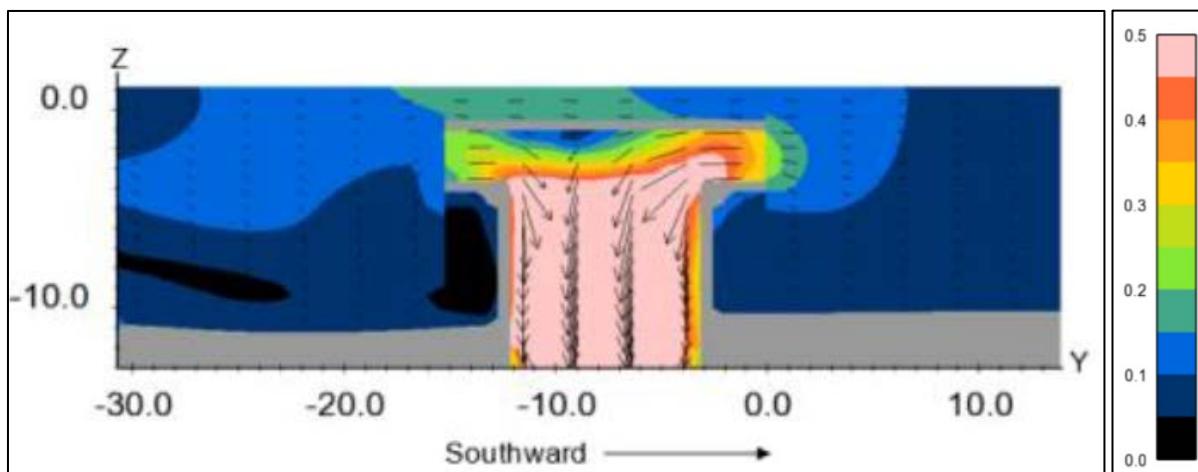


Slika 7.10 Poplavna struja, pogled odozgo

7.4.2. Mrtva oseka

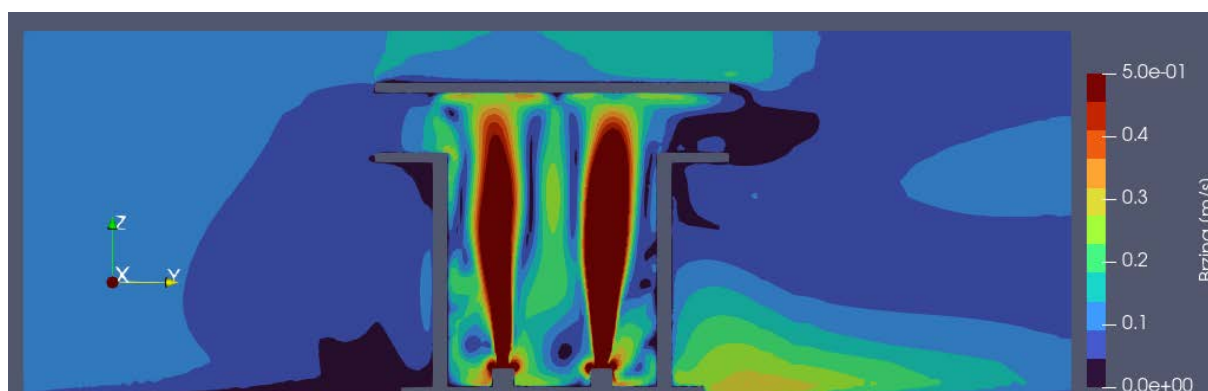
Pojam mrtve oseke (*eng. Slack Ebbing Current*) odnosi se na kratko razdoblje tijekom oseke kada nema značajnijeg kretanja fluida. Stanje kada se iz plimne struje mijenja u stanje oseke. Brzina struje opada na gotovo nulu. Takvo stanje traje svega nekoliko minuta, ali je važno za pomorce (idealni uvjeti za manevriranje).

Kao i do sada i u ovom slučaju, Slika 7.11, dolazi do naglog „loma“ slike na ulazu u usisno postrojenje. Nije se ulazilo u dubinu u svladavanju programa FLOW3D, te se ne može sa sigurnošću zaključiti iz kojeg razloga se događaju navedene smetnje.



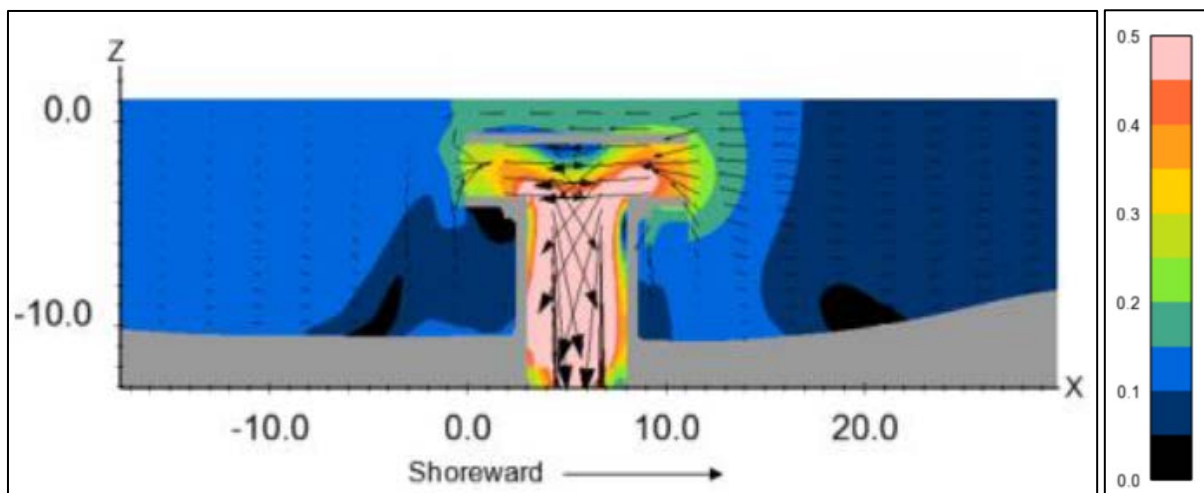
Slika 7.11 Djelovanje mrtve oseke yz ravnina FLOW3D [8]

Zbog nedostatka podloge (morsko dno) koja je neravna javlja se anomalija strujanja u usporedbi sa gornjom slikom izvađenom iz članka. Iako je u većini domene OpenFOAM zadovoljio uvjete strujanja koje je dobio program FLOW3D, Slika 7.12.



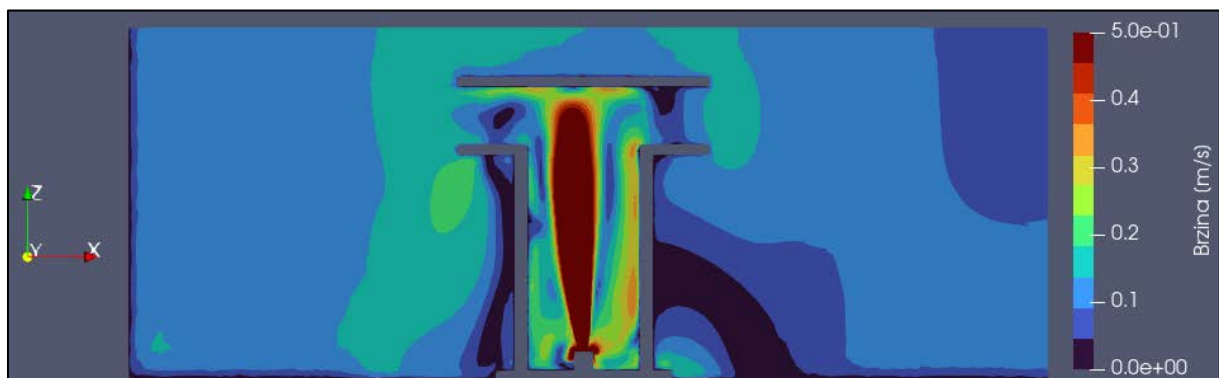
Slika 7.12 Djelovanje mrtve oseke yz ravnina OpenFOAM

Kada se promatra slučaj mrtve oseke, tada su brzine strujanja na ulazu u domenu jako male. Zbog toga je veoma izražena promjena brzine strujanja u okolici usisnog postrojenja. U ovom slučaju, Slika 7.13, FLOW3D nije pokazao nagle lomove tijekom izvođenja simulacije.



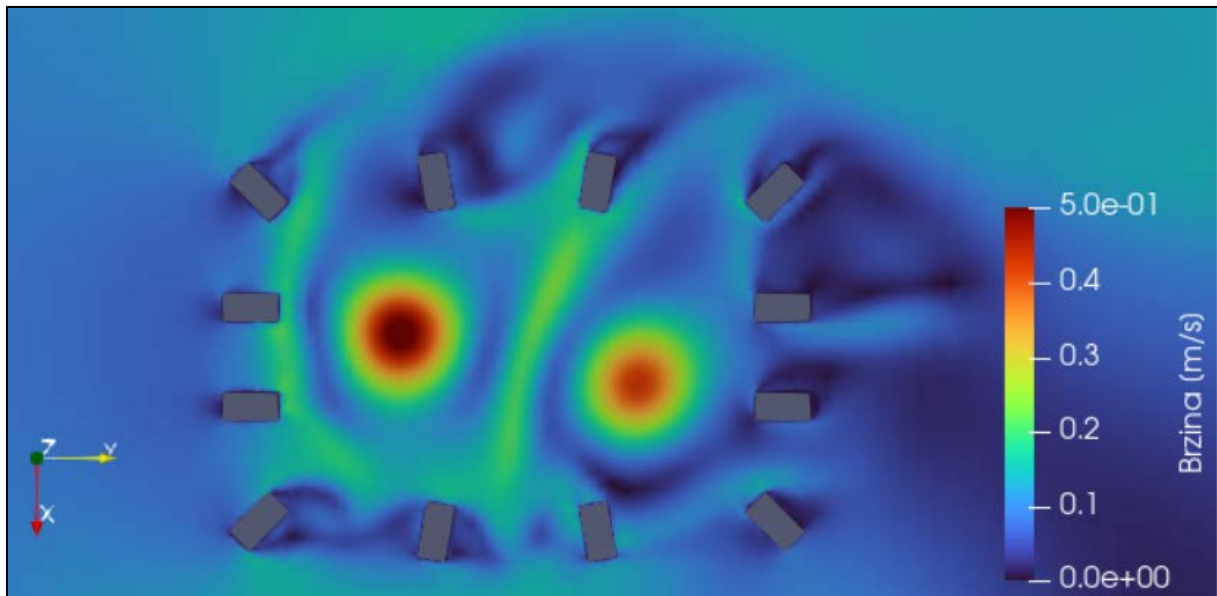
Slika 7.13 Djelovanje mrtve oseke xz ravnina FLOW3D [8]

U provedenoj simulaciji kod jako malih brzina strujanja dolazi se do zaključka kako je najveće odstupanje od članka u području morskog dna, Slika 7.14. Također, i kod rubnih uvjeta Inlet/Outlet javlja se odstupanje.



Slika 7.14 Djelovanje mrtve oseke xz ravnina OpenFOAM

Ukoliko se postavi pogled odozgo i kod ovog slučaja Mrtve oseke, najizraženija su strujanja unutar samog usisnog postrojenja zbog djelovanja usisnih crpki. U ostatku domene brzina strujanja se kreće između 0 – 0,1 m/s. Sve je to prikazano na slici 7.15.



Slika 7.15 Mrtva oseka, pogled odozgo

7.5. Simulacija provedena bez graničnika vertikalne brzine

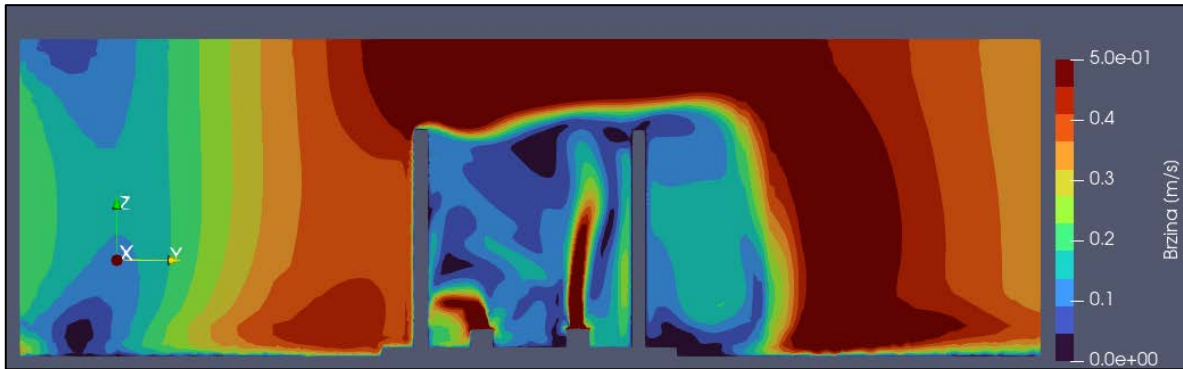
Simulacija koja će biti prikazana u ovom odlomku predstavlja prikaz djelovanja usisnog postrojenja bez graničnika vertikalne brzine. Rezultati koji će biti prikazani ukazuju na potrebu postavljanja graničnika vertikalne brzine zbog utjecaja na morski život. Kako je već navedeno ribe su otporne na horizontalne morske struje koje se javljaju kod usisnih postrojenja sa graničnikom vertikalne brzine. Prilikom izvođenja simulacije bez graničnika vertikalne brzine za veće protoke javlja se utjecaj vertikalnih sila koje „usisavaju“ ribe koje se jednostavno ne mogu nositi sa takvim silama. Pojavljuju se velike brzine na prostoru iznad djelovanja dviju usisnih pumpi. Kako je i kroz cijeli dosadašnji rad navedeno, javlja se potreba za postavljanjem graničnika vertikalne brzine i vertikalnih stupova. Rezultati koji će se prikazati provedeni su za protoke od:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

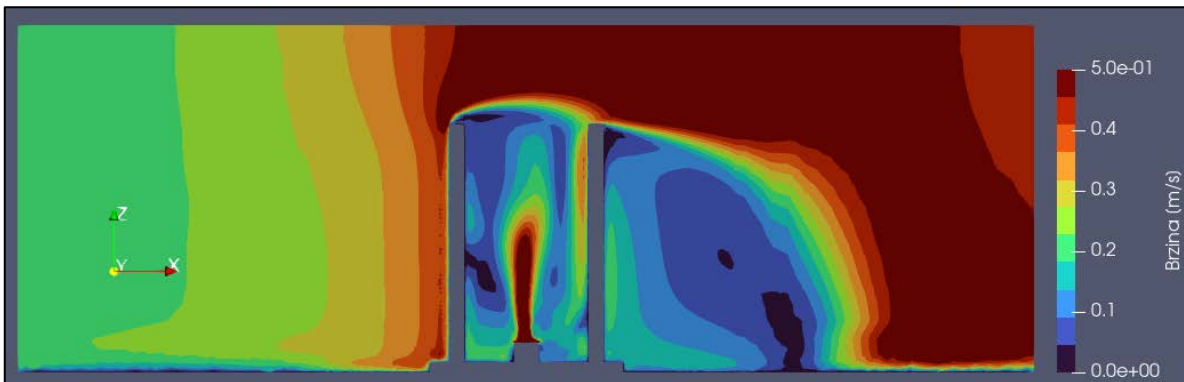
$$Q = Q_1 + Q_2 = 25,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}.$$

Na slijedećim slikama prikazane su po dvije slike brzina strujanja za najmanji, najveći i protok koji se koristi u članku [8]. Slike 7.16, 7.18, 7.20 odnose se na ravninu yz, dok se Slike 7.17, 7.19, 7.21 odnose na ravninu xz. Za ukupni protok od $6 \text{ m}^3/\text{s}$ se ne može razviti ravnomjerno usisavanje u usisno postrojenje. Takvo strujanje se javlja zbog velike visine postrojenja. Potrebno je spustiti visinu postrojenja, ali se tom promjenom utječe na prosječnu brzinu strujanja na razini ulaza u postrojenje.

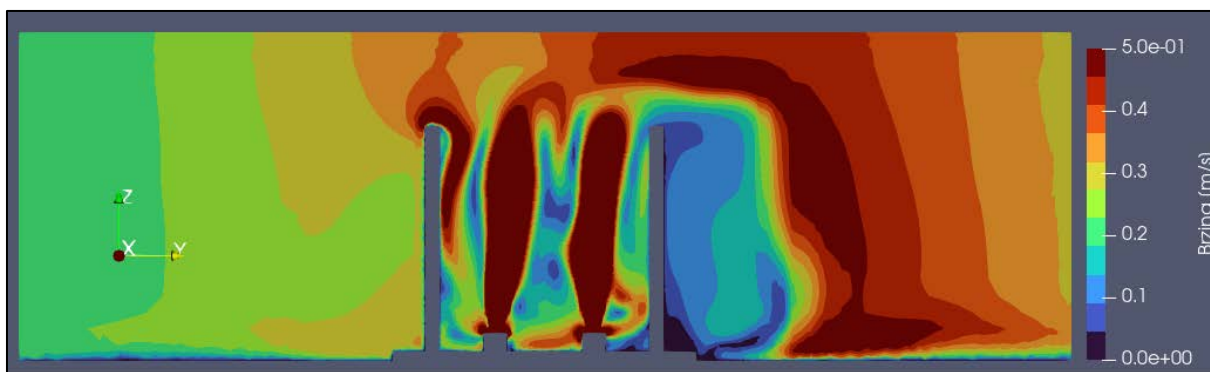


Slika 7.16 Brzina strujanja za $6 \text{ m}^3/\text{s}$, yz ravnina

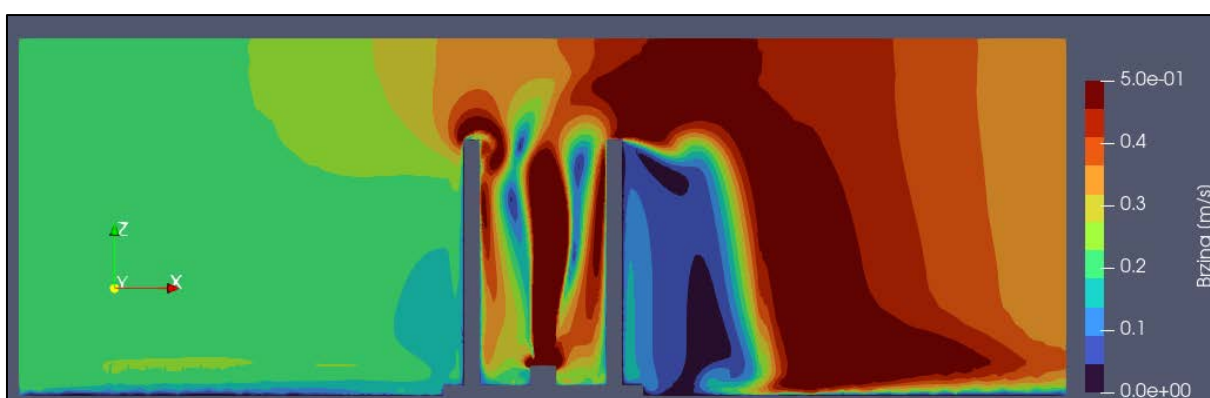


Slika 7.17 Brzina strujanja za $6 \text{ m}^3/\text{s}$, xz ravnina

Za slijedeći slučaj protoka od $25,43 \text{ m}^3/\text{s}$ koji se koristi u članku vidljivo je razvijeno usisavanje u samo postrojenje. Samim time značajno se povećava i brzina na ulaznom presjeku što bitno utječe na sigurnosne propise o morskom životu.

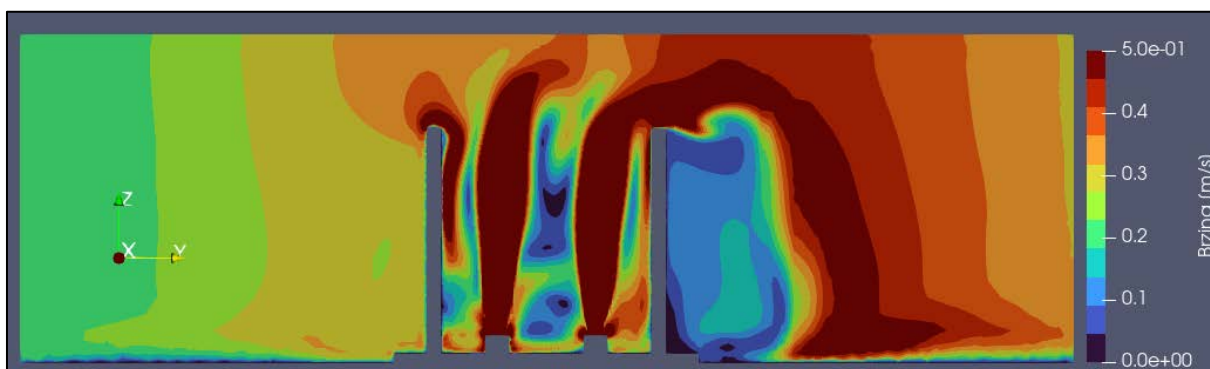


Slika 7.18 Brzina strujanja za 25,43 m³/s, yz ravnina

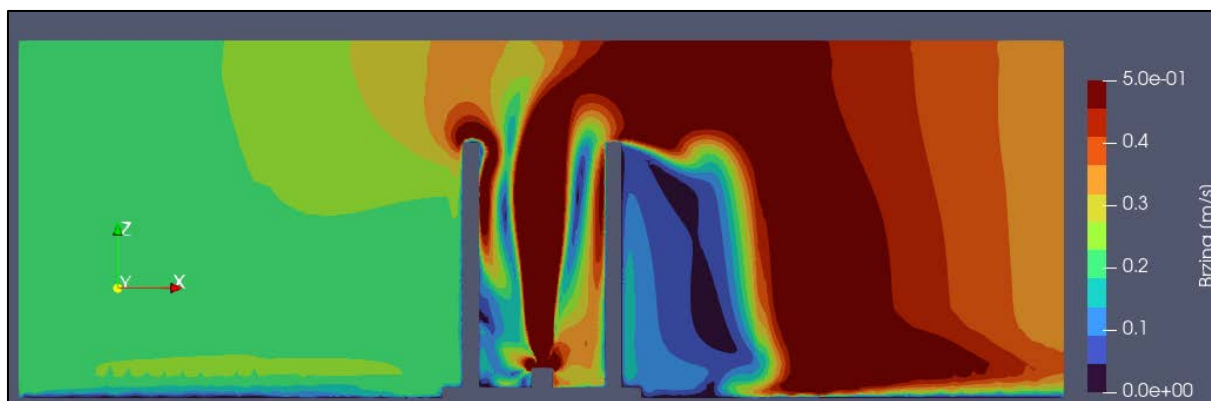


Slika 7.19 Brzina strujanja za 25,43 m³/s, xz ravnina

Kod trećeg slučaja i protoka od 30 m³/s postoji izrazito strujanje u ravnini usisnog postrojenja. Svakako nije idealno za morski život. Postoji velika vjerojatnost stvaranja vrtloga na razini mora.



Slika 7.20 Brzina strujanja za 30 m³/s, yz ravnina



Slika 7.21 Brzina strujanja za $30 \text{ m}^3/\text{s}$, xz ravnina

Provedena je simulacija bez graničnika vertikalne brzine kako bi se pokazao utjecaj strujanja na prostor domene iznad djelovanja ravnine usisnog postrojenja. Temeljem promatranja Tablice 7.1 zaključilo se da kod jako malog protoka usisavanja pumpi nije postignuto razvijeno strujanje unutar samo usisnog postrojenja. Razlog zbog kojeg se to događa je prevelika visina usisnog postrojenja i mala brzina usisavanja. Za protok od $25,43 \text{ m}^3/\text{s}$ javlja se strujanje od $0,31 \text{ m/s}$. Kod protoka od $30 \text{ m}^3/\text{s}$ djeluje najveće strujanje koje je i za očekivati zbog velikog protoka.

Ako se zna da je brzina strujanja mora usmjerena u smjeru osi y , tada se nakon usisnog postrojenja javlja zona zavjetrine tj. zona niske brzine strujanja što ribama i drugim morskim organizmima predstavlja jednu vrstu utočišta.

Prosjek brzina u razini ulaza u usisno postrojenje iznosi:

Tablica 7.1 Brzine bez graničnika vertikalne brzine

	$Q = 6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$Q = 25,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$Q = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$v = 0,21$	$v = 0,31$	$v = 0,44$

7.6. Utjecaj na usisno postrojenje kada je brzina strujanja mora približno 0m/s

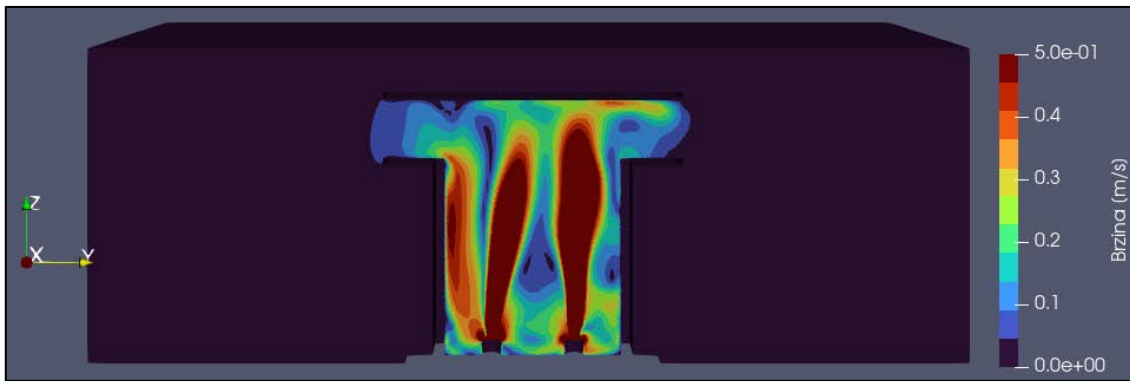
Prilikom određenih situacija javlja se strujanje mora sa brzinom približno jednakom 0 m/s. Taj period se javlja između prelaska sa plime na oseku i obratno. Traje kratak period vremena, ali ga je potrebno promatrati jer se tada javljaju najveći gradijenti promjene brzine u samom usisnom postrojenju. Izvan postrojenja se ne javljaju nikakve zamjetne brzine. Slijedeće slike će prikazivati dva slučaja kada je brzina strujanja mora postavljena približno na 0 m/s.

Promatra se usisno postrojenje sa visinom 12 vertikalnih pregrada od tri metra visine. Također, biti će dana tablica brzina za promjenu visine vertikalnih pregrada. Iz Tablice 7.2 se vidi kako je brzina na ulazu u postrojenje jako mala, a u samom postrojenju jako velika što je i za očekivati. Promatranjem ovog slučaja brzine na ulazu su manje od $V_0 = 0,15 \text{ m/s}$ što je idealno za morski život. Problem je što ovakvo stanje u moru traje nekoliko trenutaka, te onda kreće ponovno strujanje i brzina strujanja se povećava u moru pa tako i na ulazu u postrojenje.

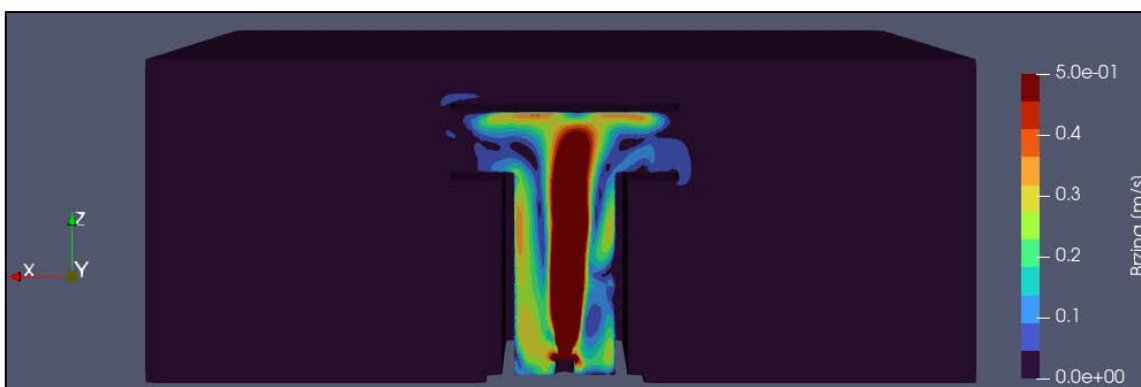
Tablica 7.2 Brzina V_0 , prilikom brzine strujanja mora od 0 m/s

$Q = 25,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	
Hvc = 1 m	0,10
Hvc = 2 m	0,04
Hvc = 3 m	0,05
Hvc = 4 m	0,05
Hvc = 5 m	0,04
Hvc = 6 m	0,03

Promatrajući slike strujanja unutar usisnog postrojenja može se zaključiti kako je strujanje razvijeno. Postoji nekoliko zona sa manjom brzinom te bi se u tim područjima moglo javiti vrtloženje. Daljnjim proučavanjem usisnog postrojenja može se detaljnije prikazati područje unutar samog usisa, kao i područje usisnih crpki. Dane su slike 7.22 i 7.23, samo jednog slučaja visine vertikalnih pregrada zbog toga što se za sve slučajeve javlja približno jednako strujanje.



Slika 7.22 Brzine strujanja u usisnom postrojenju, $v=0$ m/s, yz ravnina

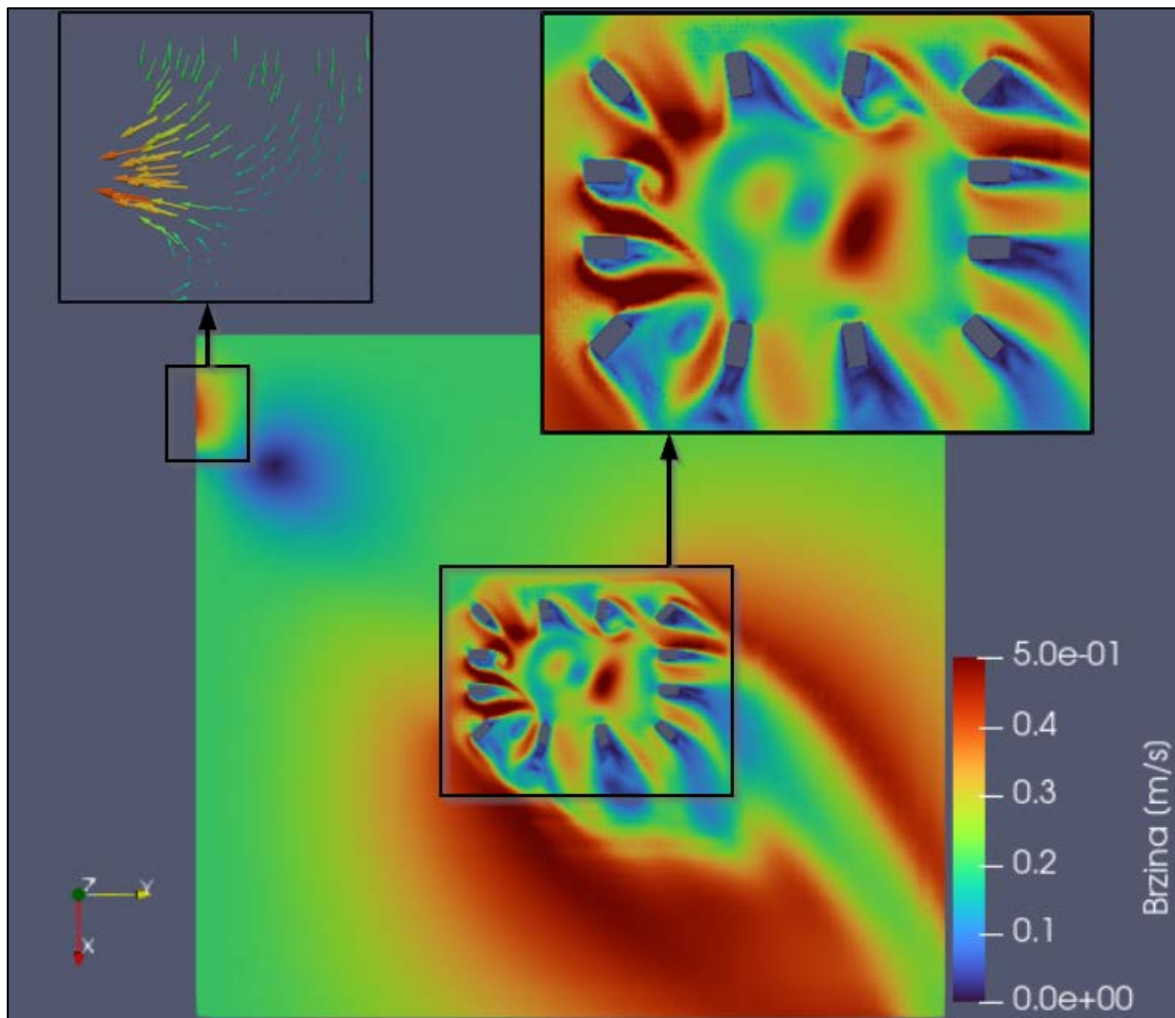


Slika 7.23 Brzine strujanja u usisnom postrojenju, $v=0$ m/s, xz ravnina

7.7. Usporedba utjecaja 12 vertikalnih pregrada

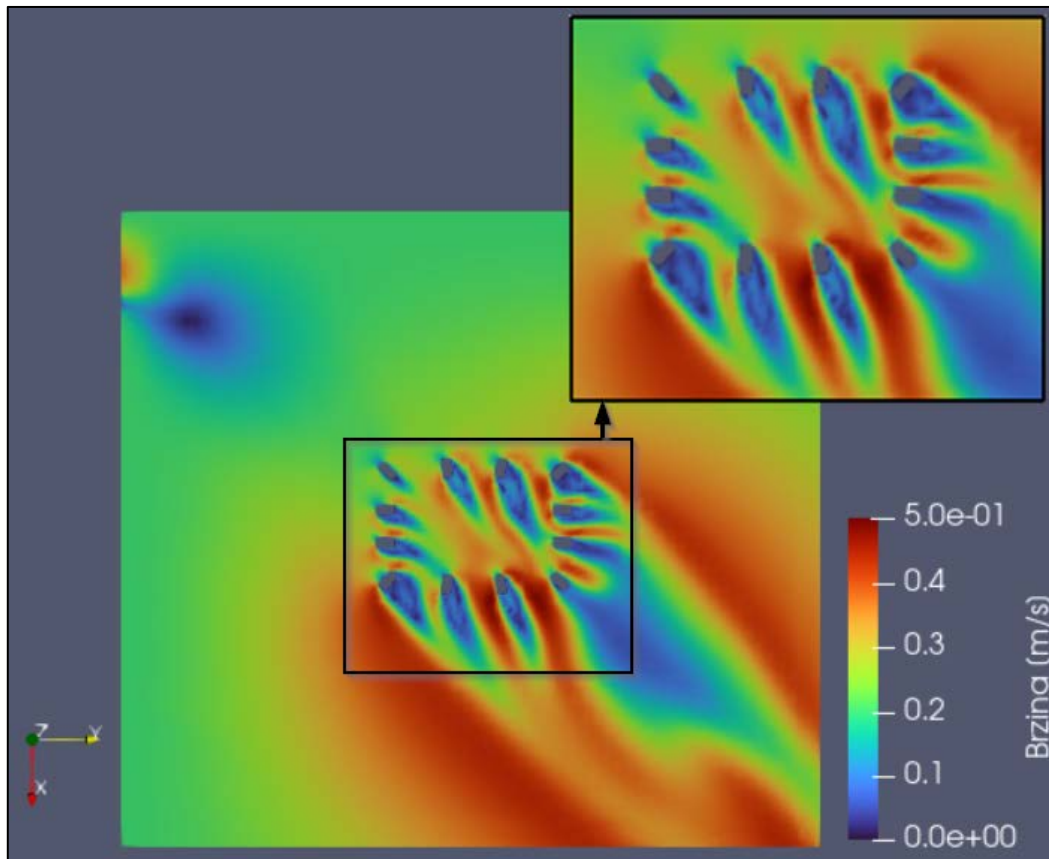
Ukoliko se zadrže osnovne dimenzije geometrije ranije navedene, te se promatra promjena visina vertikalnih pregrada (H_{vc}) dobivaju se vrijednosti prikazane u Tablicama 7.3 i 7.4. Promatra se slučaj sa 12 vertikalnih pregrada. Prilikom malih visina vertikalnih pregrada javlja se velika brzina strujanja na ulazima u usisno postrojenje. Velika brzina se javlja zbog toga što se kod malih otvora između dva zida javljaju povećane brzine strujanja uz smanjenje tlaka. Povećavanjem visine vertikalne pregrade brzine strujanja se smanjuju. Ukoliko pri velikoj visini vertikalne pregrade ostao protok u usisne pumpe mali tada se brzina strujanja sporije smanjuje jer je teže razviti usisavanje u usisno postrojenje. Prilikom protoka od $Q = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ i visini vertikalne pregrade $H_{vc} = 6$ m, brzina strujanja je približno jednaka $V_0 = 0,17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Takva brzina u velikoj mjeri može zadovoljiti stroge zahtjeve koji utječu na morski život oko usisnog postrojenja. Sa druge strane potrebna količina materijala za postrojenje drastično se povećava.

Slika 7.24 prikazuje konture brzina na sredini visine vertikalnih pregrada, promatrani slučaj je za visinu $H_{vc} = 1$ m, te su vertikalne pregrade zarotirane za određeni kut i usis crpki od $Q = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. Na lijevom rubu događa se ulaz/izlaz fluida iz domene tj. rubni uvjet Inlet/Outlet koji je karakterističan za slučajeve koji promatraju velike vodene mase te ih je nemoguće odrediti sa fiksnim rubnim uvjetom. Brzine su postavljene na način da je brzina strujanja $0,2$ m/s usmjerena u pozitivnim smjerovima osi. Drugi detalj prikazuje konture brzina oko vertikalnih pregrada. Jasno se vide zone vrtloženja fluida nakon vertikalne pregrade.



Slika 7.24 Konture brzina, visina vertikalnih pregrada jedan metar

Kada se visina vertikalnih pregrada, u slijedećem slučaju, povisi na $H_{vc} = 6$ m dolazi do manjih zona vrtloženja te je strujanje ravnomjernije i brzine su manje. Zbog povećanja visine vertikalnih pregrada povećala se i domena promatranja te se samim time povećao i potreban broj elemenata za numeričku mrežu. Zbog ograničenja elemenata studentske licence, Slika 7.25 je znatija u odnosu kada je visina vertikalnih pregrada niža.



Slika 7.25 Konture brzina, visina vertikalnih pregrada šest metara

Tablica 7.3 sa prosječnom brzinom strujanja na ulazu u usisno postrojenje mjerene na četiri prozora postrojenja za različite visine vertikalnih pregrada i tri različita protoka.

Tablica 7.3 Brzina V_0 prilikom promjene visine, 12 vertikalnih pregrada

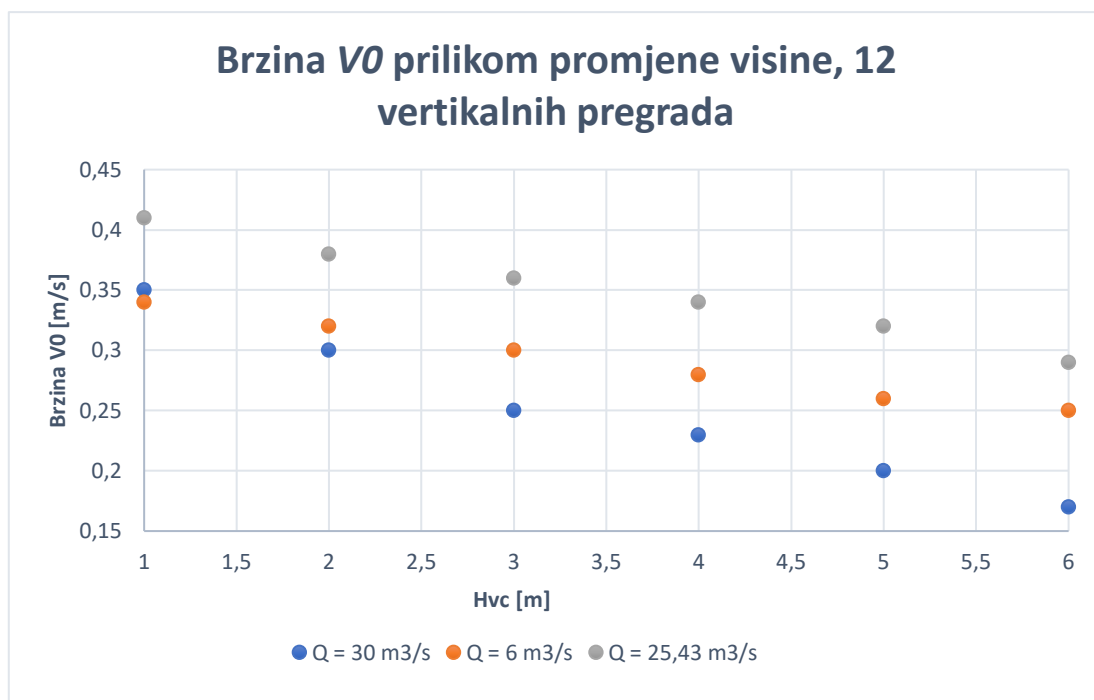
	$Q = 6 \frac{m^3}{s}$	$Q = 25,43 \frac{m^3}{s}$	$Q = 30 \frac{m^3}{s}$
Hvc = 1 m	0,34	0,41	0,35
Hvc = 2 m	0,32	0,38	0,3
Hvc = 3 m	0,3	0,36	0,25
Hvc = 4 m	0,28	0,34	0,23
Hvc = 5 m	0,26	0,32	0,2
Hvc = 6 m	0,25	0,29	0,17

Tablica 7.4 daje omjer brzine usisa prilikom promjene visine vertikalnih pregrada i različitih protoka usisavanja crpki.

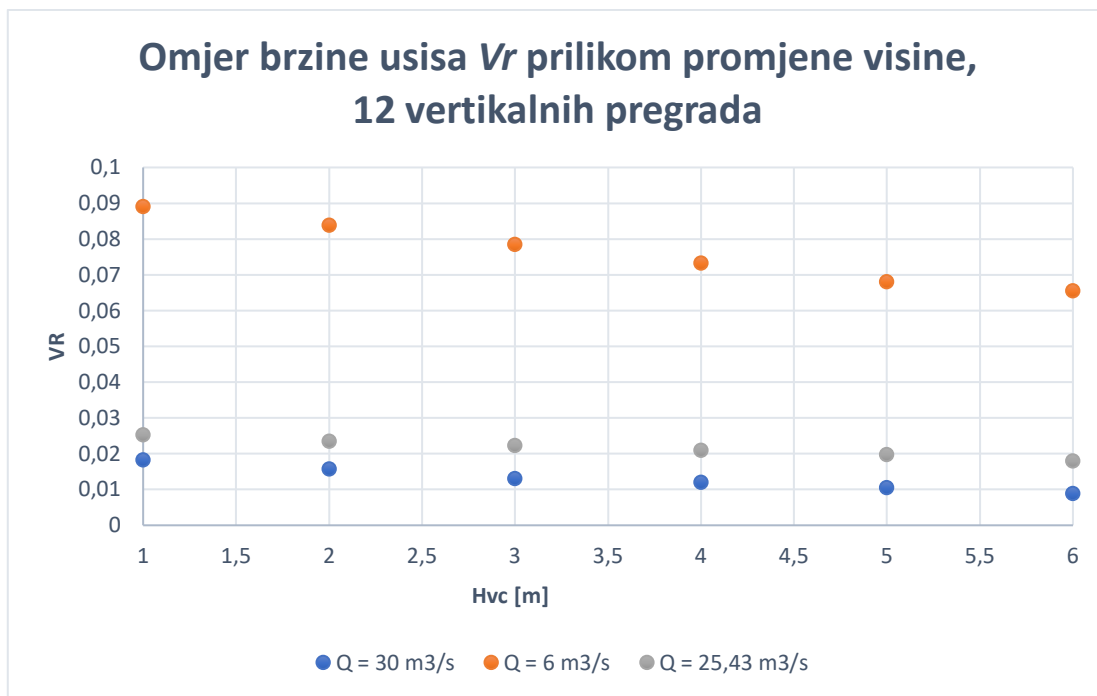
Tablica 7.4 Omjer brzine usisa V_r prilikom promjene visine, 12 vertikalnih pregrada

	$Q = 6 \frac{m^3}{s}$	$Q = 25,43 \frac{m^3}{s}$	$Q = 30 \frac{m^3}{s}$
Hvc = 1 m	0,089	0,025	0,018
Hvc = 2 m	0,084	0,023	0,016
Hvc = 3 m	0,079	0,022	0,013
Hvc = 4 m	0,073	0,021	0,012
Hvc = 5 m	0,068	0,019	0,01
Hvc = 6 m	0,065	0,018	0,009

Slijedeće dvije Slike 7.26, 7.27 prikazuju vizualno rezultate iz Tablica 7.2 i 7.3. Povećavanjem visine vertikalnih pregrada brzina se smanjuje, što pozitivno utječe na omjer brzine usisa V_r .



Slika 7.26 Brzina V_0 prilikom promjene visine 12 pregrada

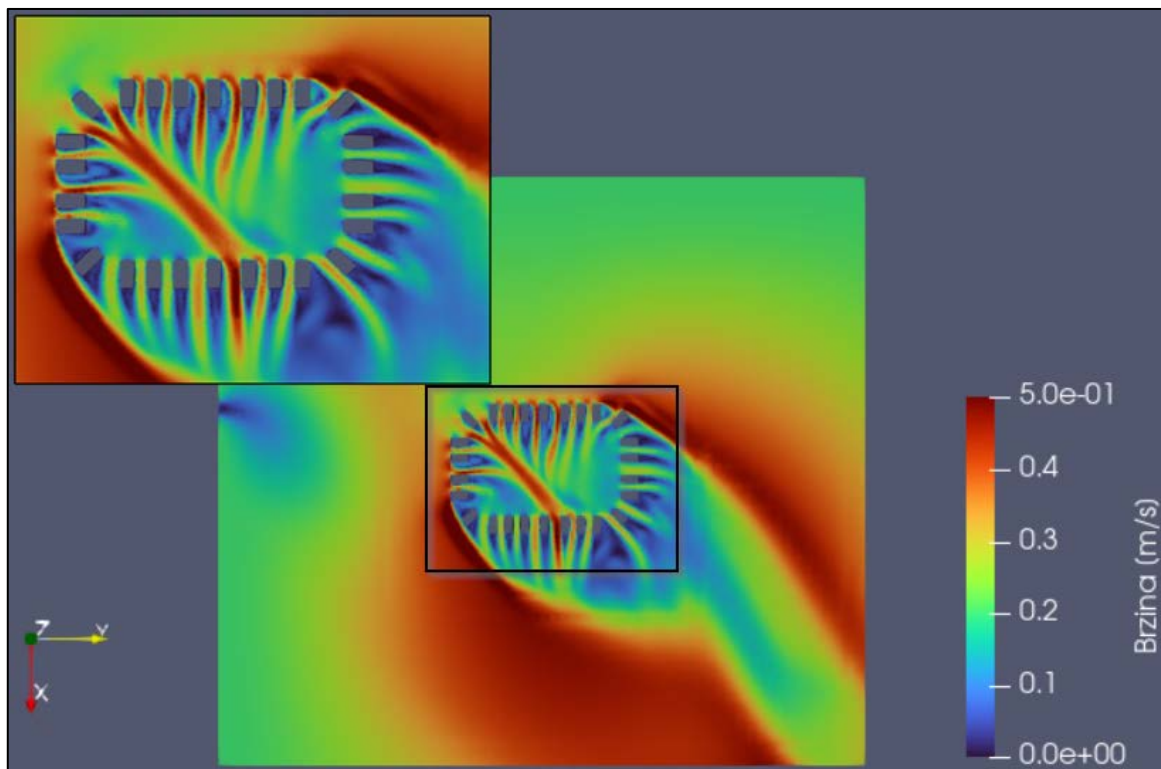


Slika 7.27 Omjer brzine Vr prilikom promjene visine 12 pregrada

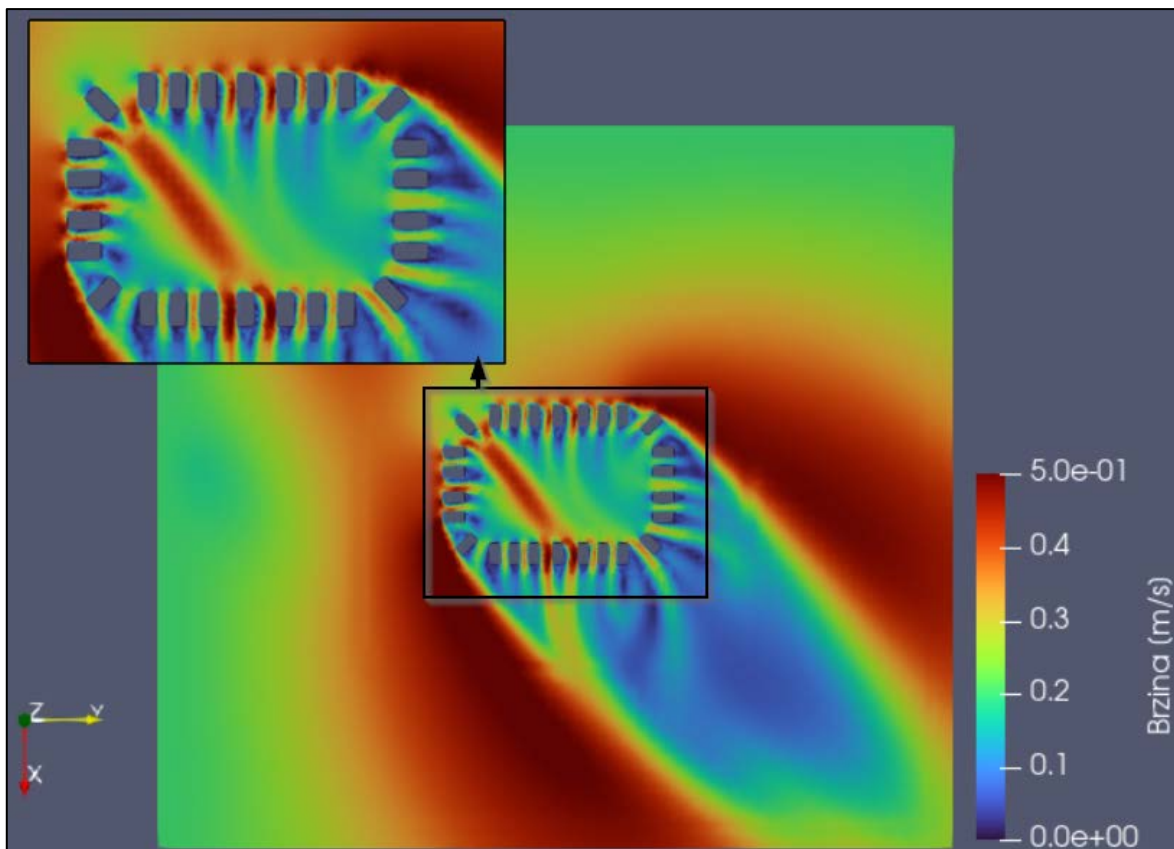
7.8. Usporedba utjecaja 24 vertikalne pregrade

Usporedbom 12 vertikalnih pregrada dobivaju se vrijednosti koje su poprilično velike u odnosu na dozvoljene vrijednosti čak i kod manjih protoka. U svrhu postizanja manjih brzina strujanja, a samim time i manje vrijednosti omjera brzine usisa provedena je analiza na 24 vertikalne pregrade istih dimenzija kao i u prethodnom slučaju. Iz rezultata je vidljivo kako se brzina značajnije spustila kod svih visina vertikalnih pregrada i svih uvjeta usisavanja. Većina rezultata se ustalila oko vrijednosti od 0,2 m/s što je i sama brzina strujanja mora postavljena u parametrima OpenFOAM datoteka. Zaključuje se da je postavljanjem većeg broja vertikalnih pregrada oko usisnog dijela strujanje na ulazu u usisno postrojenje postalo ujednačeno, samim time postoji i manja vjerojatnost turbulentnog strujanja i stvaranja vrtloga. Veliki broj vertikalnih pregrada ravnomjernije usmjerava more u unutarnji prostor usisnog postrojenja do usisnih pumpi. Promjene su prikazane na Tablicama 7.5 i 7.6.

Usporedbom rezultata brzina strujanja u krajnjoj iteraciji, vidi se da se za visinu vertikalnih pregrada od jednog metra javljaju veće brzine strujanja između pregrada, Slika 7.28. Ukoliko se visina vertikalnih pregrada poveća, u ovom slučaju na pet metara, brzine strujanja se smanjuju, Slika 7.29.



Slika 7.28 Konture brzina, 24 pregrade sa visinom od jednog metra



Slika 7.29 Konture brzina, 24 pregrade sa visinom od pet metara.

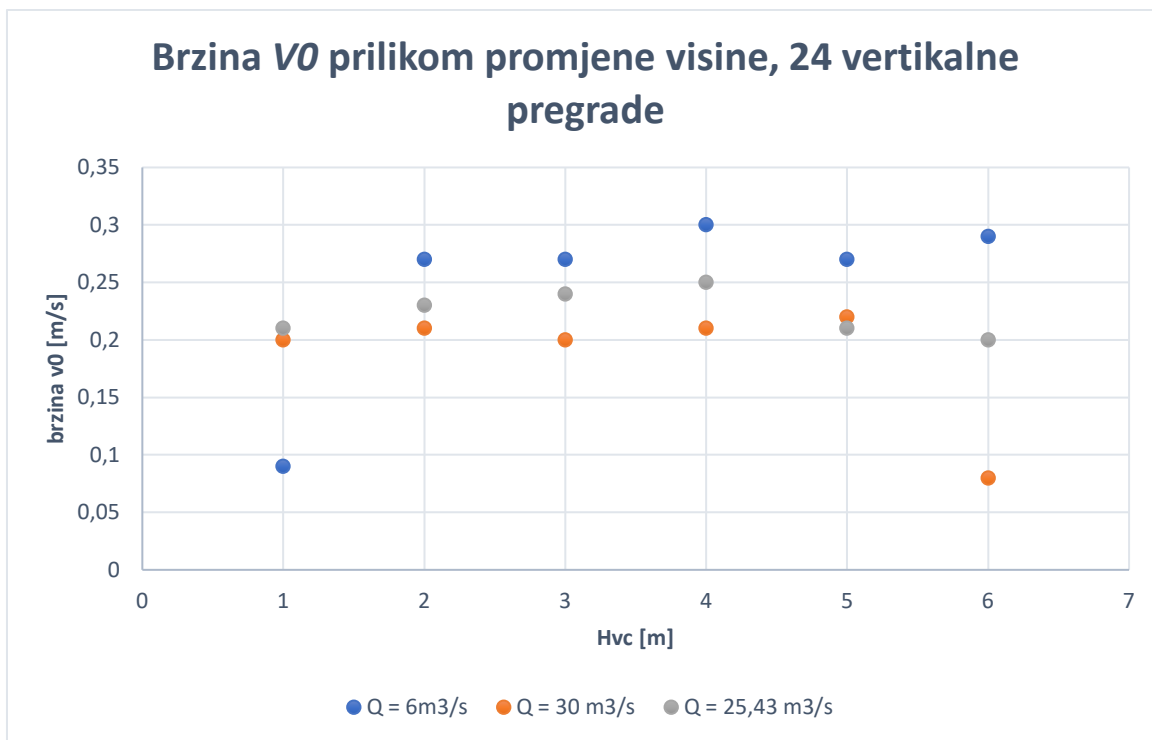
Tablica 7.5 Brzina V_0 prilikom promjene visine, 24 vertikalne pregrade

	$Q = 6 \frac{m^3}{s}$	$Q = 25,43 \frac{m^3}{s}$	$Q = 30 \frac{m^3}{s}$
Hvc = 1 m	0,09	0,21	0,2
Hvc = 2 m	0,27	0,23	0,21
Hvc = 3 m	0,27	0,24	0,2
Hvc = 4 m	0,3	0,25	0,21
Hvc = 5 m	0,27	0,21	0,22
Hvc = 6 m	0,29	0,2	0,08

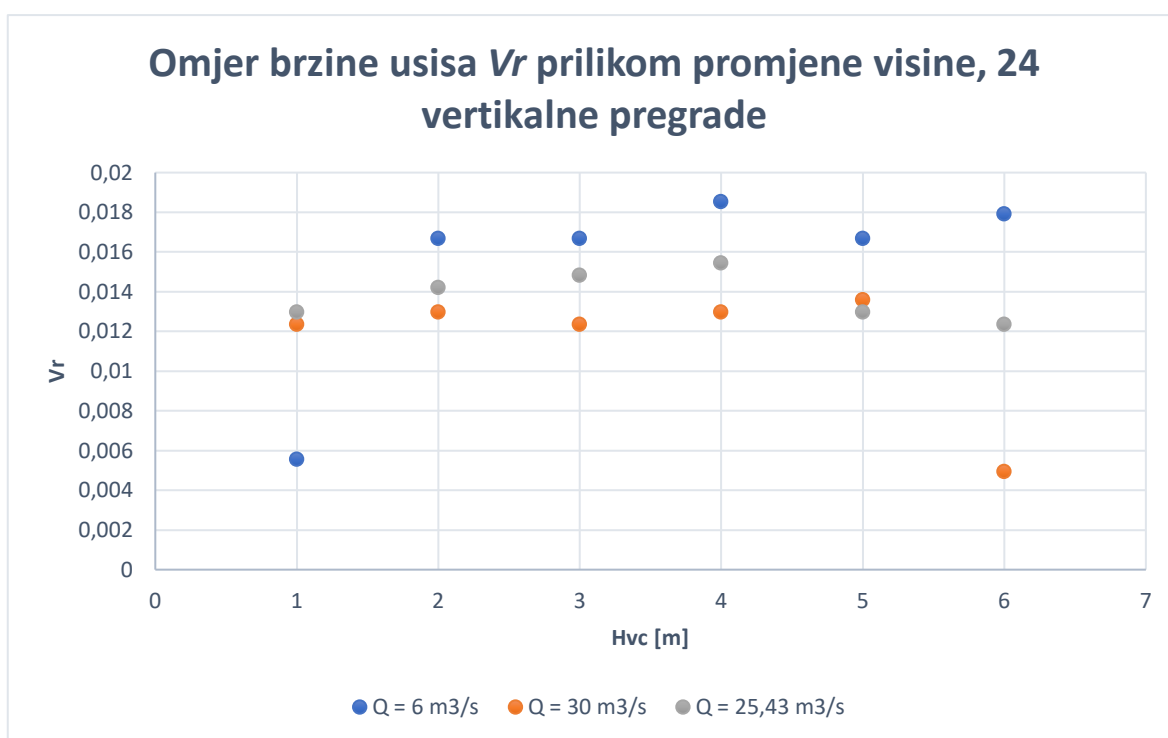
Tablica 7.6 Omjer brzine usisa V_r prilikom promjene visine, 24 vertikalne pregrade

	$Q = 6 \frac{m^3}{s}$	$Q = 25,43 \frac{m^3}{s}$	$Q = 30 \frac{m^3}{s}$
Hvc = 1 m	0,00556	0,012972	0,012354
Hvc = 2 m	0,01668	0,014207	0,012972
Hvc = 3 m	0,01668	0,014825	0,012354
Hvc = 4 m	0,01853	0,015442	0,012972
Hvc = 5 m	0,1668	0,012972	0,013589
Hvc = 6 m	0,01791	0,012354	0,004942

Moguće je primijetiti kako je prilikom malog protoka i male visine vertikalne pregrade došlo do nekih odstupanja. Isto je do odstupanja došlo i kod velikom protoka i velike visine vertikalnih pregrada, Slika 7.30 i 7.31. Ostali slučajevi su u zadovoljavajućim granicama.



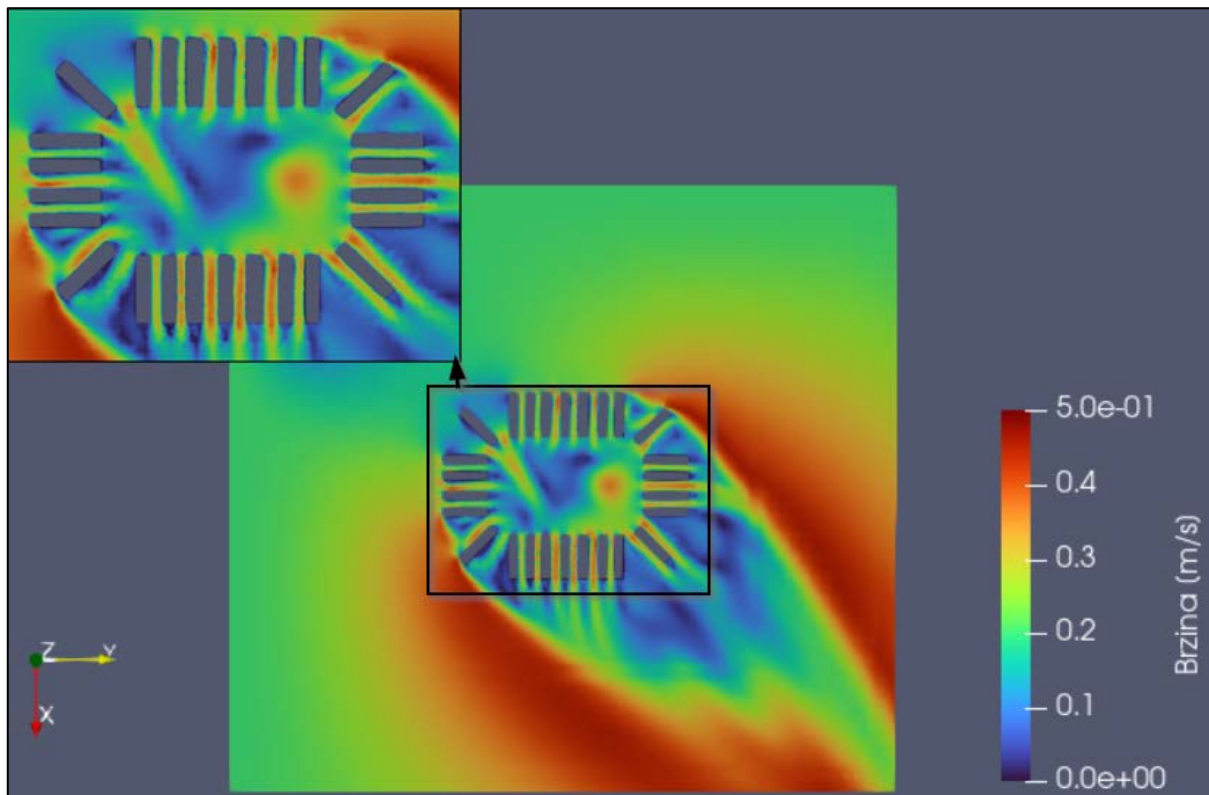
Slika 7.30 Brzina V_0 prilikom promjene visine, 24 pregrade



Slika 7.31 Omjer brzine usisa V_r prilikom promjene visine, 24 pregrade

7.8.1. Povećanje dužine vertikalnih pregrada

Ukoliko se promatra usisno postrojenje sa 24 vertikalne pregrade visine tri metra, ali se promijeni dužina vertikalne pregrade sa 1,2 metra na tri metra tada se dobivaju vrijednosti koje su prikazane slijedećom slikom. Brzina na ulazu u postrojenje se neznatno povećala $V_0 = 0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zbog toga što se smanjio razmak između vertikalnih pregrada te se opet stvara utjecaj tunela, iako se na ovakav način kada se dužina vertikalne pregrade poveća smanjuje vrtloženje unutar usisnog postrojenja, Slika 7.32.



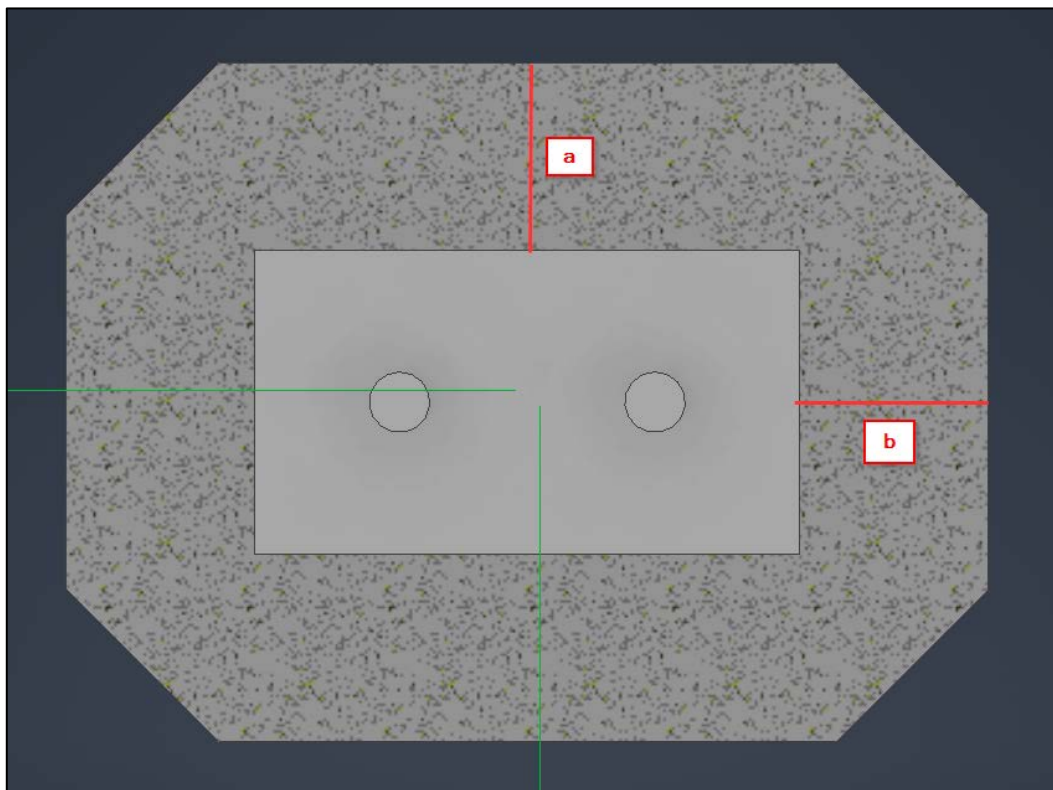
Slika 7.32 Konture brzina, povećana dužina vertikalnih pregrada

7.9. Usporedba utjecaja postolja vertikalnih stupova

Promatrala su se tri slučaja različite visine vertikalne pregrade, jedan, tri i pet metara visine. Usporedba se provodila za 12 vertikalnih stupova. Dimenzije postolja za vertikalne stupove mijenjale su se kako je navedeno u Tablici 7.7, prema Slici 7.33. Brzina strujanja mora bila je 0,2 m/s.

U promatranim slučajevima prilikom manje površine postolja dolaze bolji uvjeti strujanja i bolji uvjeti omjera brzine usisa V_r . Povećanjem postolja povećava se i graničnik vertikalne brzine te se stvara utjecaj tunela koji povećava brzinu strujanja.

Prilikom mijenjanja dimenzija postolja (l_{vc}) usisnog postrojenja dolazi se do zaključka kako se povećanjem površine postolja ne utječe na smanjenje ulazne brzine, kao ni na smanjenje omjera brzine usisa V_r , Tablica 7.8.



Slika 7.33 Dimenzije postolja

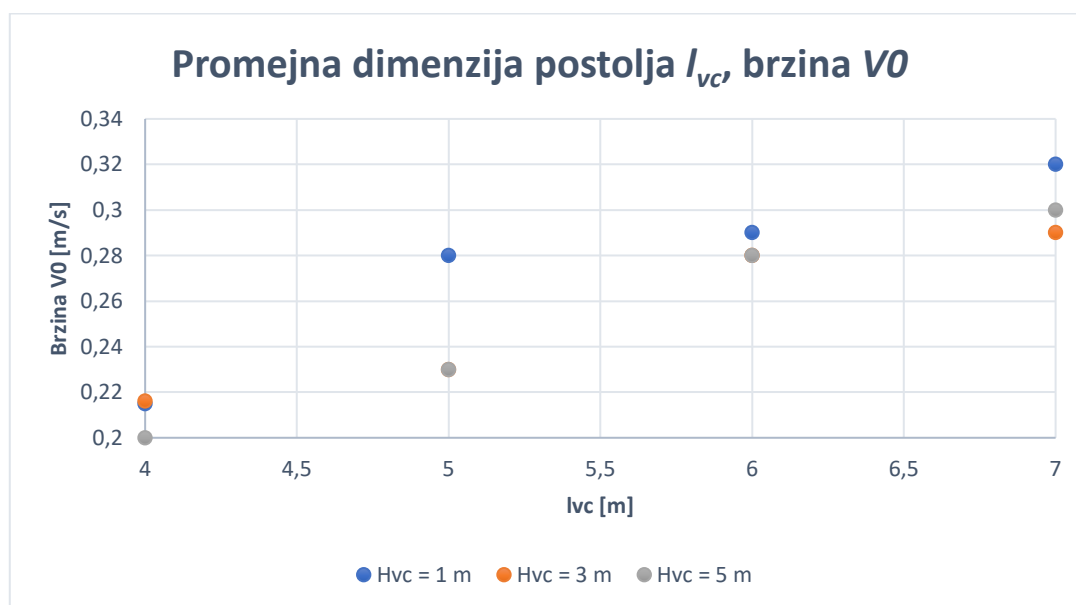
Tablica 7.7 Brzina strujanja V0 prilikom promjene lvc

$l_{vc} = a \cdot b$	$H_{vc} = 1 \text{ m}$	$H_{vc} = 3 \text{ m}$	$H_{vc} = 5 \text{ m}$
$l_{vc} = 4 \cdot 6,5$	0,21	0,21	0,2
$l_{vc} = 5 \cdot 7,5$	0,28	0,23	0,23
$l_{vc} = 6 \cdot 8,5$	0,29	0,28	0,28
$l_{vc} = 7 \cdot 9,5$	0,32	0,29	0,3

Tablica 7.8 Omjer brzine usisa Vr prilikom promjene lvc

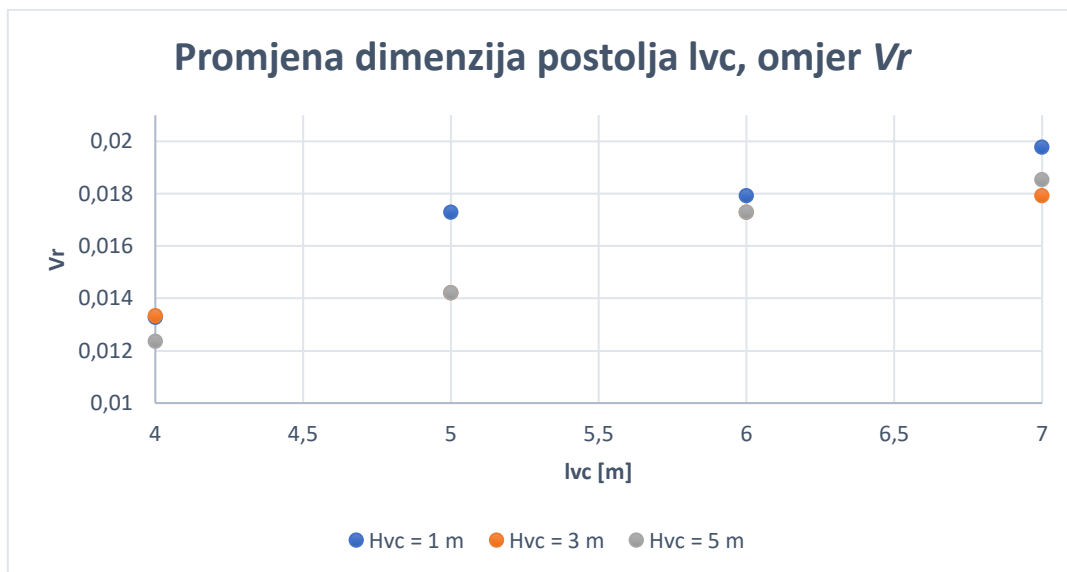
	$H_{vc} = 1 \text{ m}$	$H_{vc} = 3 \text{ m}$	$H_{vc} = 5 \text{ m}$
$l_{vc} = 4 \cdot 6,5$	0,01328	0,01334	0,01235
$l_{vc} = 5 \cdot 7,5$	0,0173	0,01421	0,01421
$l_{vc} = 6 \cdot 8,5$	0,01791	0,0173	0,0173
$l_{vc} = 7 \cdot 9,5$	0,01977	0,01791	0,01853

Ukoliko se povećava površina postolja za vertikalne pregrade dolazi do povećavanja brzine strujanja na ulazu u usisno postrojenje, Slika 7.34.



Slika 7.34 Promjena dimenzija postolja lvc - brzina V0

Promatranjem omjera brzine usisa V_r , dolazi se do zaključka kako je bolje zadržavati manju površinu postolja za vertikalne pregrade, nevezano uz visinu vertikalne pregrade. Povećavanjem površine postolja za pregrade dolazi do povećavanja omjer V_r što je potrebno izbjegavati, Slika 7.35.



Slika 7.35 Promjena dimenzija postolja l_{vc} - omjer brzine usisa V_r

8. ZAKLJUČAK

Rad je promatrao modeliranje usisa desalinizacijskog postrojenja. Motivacija je bila korištenje slatke vode koje ima sve manje u njezinom prirodnom obliku. Tijekom proteklih nekoliko desetljeća sve se više razmatrala opcija desalinizacija morske vode za zdravstvene i znanstvene potrebe. Opisana je važnost pitke vode u svijetu kao i procesi desalinizacije. Dana je i teoretska osnova za lakše praćenje rada u vidu opisivanja usisnog postrojenja. Naglašena je važnost utjecaja graničnika vertikalne brzine. Potom su se opisali osnovni pojmovi o fluidima, mehanici fluida, dinamici fluida i računarskoj dinamici fluida kao temeljnim principima za svladavanje numeričkih simulacija.

Tijekom izrade geometrije program FreeCAD ispunio je sva očekivanja što se tiče modeliranja, a kasnije i skriptiranja. Pomoću programa Python izvela se automatizacija geometrije na način da se na temelju određenih dimenzija napravilo više geometrija koje će se promatrati u kraćem vremenskom roku. Numerička mreža, koja je možda i najbitniji dio prije pokretanja simulacije, izradila se u programu Ansys. Ukoliko je numerička mreža dobre kvalitete, rezultati koji će se kasnije dobivati mogu se smatrati točnijima. Nakon izrade numeričke mreže, slučaj se prebacio na rješavanje programom OpenFOAM. Detaljnije je bio objašnjen svaki korak zadavanja uvjeta u svim datotekama OpenFOAM-a. Sve simulacije izvodile su se na superračunalu Bura.

Nakon obavljenih simulacija bilo je potrebno prikazati i obraditi rezultate pomoću programa Paraview i Excel. Kao referentna vrijednost se pokušala dobiti brzina na ulazu u usisno postrojenje koja je u idealnim slučajevima manja od 0,2 m/s, ovisno o samom strujanju mora. Promatrali su se razni slučajevi geometrije. Mijenjale su se visine vertikalnih pregrada od jednog metra do šest metara visine. Dva slučaja su također promatrana, kada je broj vertikalnih pregrada 12 i kada je broj pregrada 24. Pokušala su se usporediti strujanja dobivena korištenim člankom [8] kada su u okolini neki specifični uvjeti (plima i oseka). Također, dana je bila i usporedba različitih protoka za usisno postrojenje bez graničnika vertikalne brzine.

9. LITERATURA

- [1] S Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Desalination>, 20.04.2024.
- [2] S Interneta, <https://www.scientificamerican.com/article/the-impacts-of-relying-on-desalination/>, 20.04.2024.
- [3] S Interneta, <https://watermanaustralia.com/sea-water-desalination-with-reverse-osmosis-systems/>, 25.04.2024.
- [4] S Interneta, <https://www.kolektorwater.com/hr/primjeri-iz-prakse/primjeri-detail/desalinacija-morske-vode-za-dobivanje-pitke-vode-na-otoku-susku>, 25.04.2024.
- [5] S Interneta, <https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity>, 10.05.2024.
- [6] S Interneta, <https://www.iberdrola.com/home>, 10.05.2024.
- [7] S Interneta, <https://www.britannica.com/technology/desalination>, 15.05.2024.
- [8] Hooi Chie, L.; Khairi Abd Wahab, A.: „Derivation of Engineering Design Criteria for Flow Field Around Intake Structure: A Numerical Simulation Study“, Journal of Marine Science and Engineering, 21.10.2020.
- [9] Kranjčević, L.: „Mehanika fluida, Skripta za studente Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2020.
- [10] Petrila, T.; Trif, D.: „Basics of Fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics“, Springer, 2005.
- [11] Chung, T.J.: „Computational Fluid Dynamics“, Cambridge University Press, 2002.
- [12] S Interneta, <https://www.freecad.org/>, 25.05.2024.
- [13] S Interneta, <https://www.linkedin.com/pulse/better-meshing-using-ansys-fluent-hashan-mendis>, 01.06.2024.
- [14] S Interneta, <https://filext.com/file-extension/MSH>, 02.06.2024.
- [15] S Interneta, <https://www.openfoam.com/>, 02.06.2024.
- [16] S Interneta, <https://web.stanford.edu/class/me469b/handouts/incompressible.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fweb.stanford.edu%2Fclass%2Fme469b%2Fhandouts%2Fincompressible.pdf%0AVisible%3A%200%25%20>, 02.06.2024.
- [17] S Interneta, https://projects.iq.harvard.edu/files/ac274_2015/files/lecture9.pdf, 02.06.2024.

- [18] S Interneta, <https://cnrm.uniri.hr/hr/bura/>, 03.06.2024.
- [19] S Inteneta, <https://theconstructor.org/fluid-mechanics/laminar-turbulent-flow/559432/>, 03.06.2023.
- [20] Jeon, J.; Lee, J. i dr.: „Physics-Informed Transfer Learning Strategy to Accelerate Unsteady Fluid Flow Simulations“, KTH Royal Institute of Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 2022.
- [21] Lu, Y.; Guangming Z.: „Analysis of Influence of Different Parameters on Numerical Simulation of NACA0012 Incompressible External Flow Field under High Reynolds Numbers“, Nanjing Tech University, China, 2022.
- [22] S Interneta, <https://enciklopedija.hr/clanak/jadransko-more> ,03.06.2024.
- [23] S Interneta, <https://www.pmf.unizg.hr/download/repository/prezMarinVilovic.pdf> , 03.06.2024.
- [24] Bengt, A. i dr., “Computational Fluid Dynamics for Engineers”, Cambridge, 2012.

SAŽETAK

Usisna postrojenja morske vode u proteklom desetljeću se sve više razvijaju i unapređuju. Desalinizacija je postala ključan oblik dobivanja slatke vode iz mora.

Ukratko je dana teoretska podloga za razumijevanje praćenja rada u vidu usisnog postrojenja i njegove važnosti, kao i osnovni pojmovi o mehanici fluida, dinamici fluida i računarskoj dinamici fluida.

Provedena je analiza utjecaja djelovanja usisnog postrojenja na područje oko samog usisa. Najvažniji čimbenik koji se promatrao je bila brzina strujanja u okolini usisnog postrojenja. Potrebno je bilo zadovoljiti određene brzine koje neće negativno utjecati na morsku floru i faunu.

Proučavalo se nekoliko tipova mogućih usisnih postrojenja. Mijenjale su se visine vertikalnih pregrada, mijenjala se površina postolja za vertikalne pregrade. Također, proučavali su se i razni uvjeti strujanja kao što su plima i oseka, te su se ti podaci uspoređivali sa dostupnom literaturom. Napravile su se i simulacija bez graničnika vertikalne brzine kako bi se uvidjela njegova važnost.

Ključne riječi: desalinizacija, modeliranje usisa mora, FreeCAD, automatiziranje geometrije, OpenFOAM, SimpleFoam, Paraview

SUMMARY

Over the past decade, seawater intake systems have increasingly developed and advanced. Desalination has become a crucial method for obtaining fresh water from the sea.

A theoretical background is provided to understand the operation monitoring of intake systems and their importance, along with basic concepts of fluid mechanics, fluid dynamics, and computational fluid dynamics.

An analysis was conducted on the impact of the intake system's operation on the area around the intake itself. The most important factor observed was the flow velocity in the vicinity of the intake system. It was necessary to meet certain velocities that would not negatively affect marine flora and fauna.

Several types of potential intake systems were studied. The heights of vertical barriers were varied, and the surface area of the bases for the vertical barriers was changed. Additionally, various flow conditions such as high and low tide were examined, and these data were compared with available literature. Simulations were also performed without vertical velocity limiters to understand their importance.

Keywords: desalination, seawater intake modeling, FreeCAD, geometry automation, OpenFOAM, SimpleFoam, Paraview

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Kapacitet desalinizacije po dan za 2009. godinu [3].....	5
Slika 2.2 Prosječna dnevna potrošnja vode po glavi španjolskog građanina 6700 litara [6].....	6
Slika 3.1 Usisno postrojenje (Alžir) [8]	10
Slika 3.2 Shematski prikaz usisnog postrojenja [8]	11
Slika 3.3 Prikaz usisnog postrojenja sa i bez graničnika vertikalne brzine [8].....	12
Slika 4.1 Podjela materije – a)čvrsto stanje, b)tekuće stanje, c)plinovito stanje [9].....	13
Slika 4.2 Fluid [9].....	13
Slika 4.3 Osnovni dijelovi RDF analize.....	16
Slika 4.4 a) Laminarno strujanje, b) Turbulentno strujanje [19].....	17
Slika 5.1 Stablo geometrije	24
Slika 5.2 Dimenzije usisnog postrojenja [2]	24
Slika 5.3 Prozor za izbor željenog prikaza.....	26
Slika 5.4 Automatizacija slike.....	26
Slika 5.5 Automatizirane vertikalne pregrade (4 i 16 pregrada).....	27
Slika 5.6 Učitana .step datoteka u program Inventor	27
Slika 5.7 Izrezano usisno postrojenje iz domene	28
Slika 5.8 Rubni uvjeti u programu Ansys (eng. Named Selections).....	29
Slika 5.9 Lokalno površinsko ugušćenje oko usisa crpki.....	30
Slika 5.10 Različiti tipovi numeričke mreže [13]	31
Slika 5.11 Volumna numerička mreža	31
Slika 5.12 Detalj volumne mreže oko usisa crpki.....	32
Slika 6.1 Struktura direktorija modela [20].....	34
Slika 6.2 Simple algoritam [23]	35
Slika 6.3 Diskretizirana domena MKV sa čvorovima u središtu ćelija [24].....	36
Slika 6.4 Reziduali	37
Slika 6.5 Brzina strujanja mora na središnjem presjeku kroz iteracije	38
Slika 6.6 Datoteka controlDict	39
Slika 6.7 decomposeParDict datoteka.....	40
Slika 6.8 Datoteka U	40
Slika 6.9 Shematski prikaz superračunala Bura	41
Slika 6.10 SLURM skripta	42

Slika 7.1 Veliki prozor (Točka 1).....	45
Slika 7.2 Veliki prozor (Točka 2).....	45
Slika 7.3 Mali prozor (Točka 3).....	45
Slika 7.4 Mali prozor (Točka 4).....	45
Slika 7.5 Parametri koji utječu na dizajn graničnika vertikalne brzine [8].....	47
Slika 7.6 Djelovanje poplavne struje yz ravnina FLOW3D [8].....	48
Slika 7.7 Djelovanje poplavne struje yz ravnina OpenFOAM.....	48
Slika 7.8 Djelovanje poplavne struje xz ravnina FLOW3D [8].....	49
Slika 7.9 Djelovanje poplavne struje xz ravnina OpenFOAM.....	49
Slika 7.10 Poplavna struja, pogled odozgo.....	50
Slika 7.11 Djelovanje mrtve oseke yz ravnina FLOW3D [8].....	51
Slika 7.12 Djelovanje mrtve oseke yz ravnina OpenFOAM.....	51
Slika 7.13 Djelovanje mrtve oseke xz ravnina FLOW3D [8].....	52
Slika 7.14 Djelovanje mrtve oseke xz ravnina OpenFOAM.....	52
Slika 7.15 Mrtva oseka, pogled odozgo.....	53
Slika 7.16 Brzina strujanja za 6 m ³ /s, yz ravnina.....	54
Slika 7.17 Brzina strujanja za 6 m ³ /s, xz ravnina.....	54
Slika 7.18 Brzina strujanja za 25,43 m ³ /s, yz ravnina.....	55
Slika 7.19 Brzina strujanja za 25,43 m ³ /s, xz ravnina.....	55
Slika 7.20 Brzina strujanja za 30 m ³ /s, yz ravnina.....	55
Slika 7.21 Brzina strujanja za 30 m ³ /s, xz ravnina.....	56
Slika 7.22 Brzine strujanja u usisnom postrojenju, v=0 m/s, yz ravnina.....	58
Slika 7.23 Brzine strujanja u usisnom postrojenju, v=0 m/s, xz ravnina.....	58
Slika 7.24 Konture brzina, visina vertikalnih pregrada jedan metar.....	59
Slika 7.25 Konture brzina, visina vertikalnih pregrada šest metara.....	60
Slika 7.26 Brzina V0 prilikom promjene visine 12 pregrada.....	61
Slika 7.27 Omjer brzine Vr prilikom promjene visine 12 pregrada.....	62
Slika 7.28 Konture brzina, 24 pregrade sa visinom od jednog metra.....	63
Slika 7.29 Konture brzina, 24 pregrade sa visinom od pet metara.....	63
Slika 7.30 Brzina V0 prilikom promjene visine, 24 pregrade.....	65
Slika 7.31 Omjer brzine usisa Vr prilikom promjene visine, 24 pregrade.....	65
Slika 7.32 Konture brzina, povećana dužina vertikalnih pregrada.....	66
Slika 7.33 Dimenzije postolja.....	67
Slika 7.34 Promjena dimenzija postolja l _{vc} - brzina V0.....	68

Slika 7.35 Promjena dimenzija postolja l_{vc} - omjer brzine usisa V_r	69
--	----

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Zadovoljavajuća veličina čestica za različite tehnologije desalinizacije.....	7
Tablica 7.1 Brzine bez graničnika vertikalne brzine.....	56
Tablica 7.2 Brzina V_0 , prilikom brzine strujanja mora od 0 m/s.....	57
Tablica 7.3 Brzina V_0 prilikom promjene visine, 12 vertikalnih pregrada.....	60
Tablica 7.4 Omjer brzine usisa V_r prilikom promjene visine, 12 vertikalnih pregrada.....	61
Tablica 7.5 Brzina V_0 prilikom promjene visine, 24 vertikalne pregrade.....	64
Tablica 7.6 Omjer brzine usisa V_r prilikom promjene visine, 24 vertikalne pregrade	64
Tablica 7.7 Brzina strujanja V_0 prilikom promjene l_{vc}	68
Tablica 7.8 Omjer brzine usisa V_r prilikom promjene l_{vc}	68