

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YOĞUN JET DAVRANIŞININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ MODELLERİ İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahmut Cenk SAYIL

HAZİRAN 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YOĞUN JET DAVRANIŞININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ MODELLERİ İLE İNCELENMESİ

Mahmut Cenk SAYIL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 / 05 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 26 / 06 / 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Tuğçe ANILAN

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Yoğun Jet Davranışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modelleri ile İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Akademinin kapısından girdiğim ilk günden beri bana rehberlik eden ve bilmem gereken her şeyi bana öğreten, her yardım istediğimde sabırla ve güler yüzle bana yardımcı olan, beni yaptığı çalışmalara dahil ederek farklı süreçleri tecrübe etmemi sağlayan ve kendimi olabilecek en iyi şekilde geliştirmemde bana yardımcı olan tez danışmanım hocam sayın Doç. Dr. Tuğçe ANILAN’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, her soruma sabırla cevap veren ve hiçbir yardımı esirgemeyen, özellikle analizlerim için kullandığım yazılım konusunda bana her türlü desteği sağlayan Arş. Gör. Arife GÜNAY’a teşekkürü borç bilirim.

Beraber yayınlar da ürettiğim ve sürecin başından beri hep yanımda olup bana her türlü desteği sağlayan İnşaat Yüksek Mühendisi Selahattin BAYRAM’a ve Arş. Gör. Osman YÜKSEK’e teşekkürü borç bilirim.

Analizlerim için kullandığım yazılımla alakalı yardımlarından ve verdikleri fikirlerden ötürü Arş. Gör. Mehmet SAĞLAM’a ve Arş. Gör. Soner BİRİNCİ’ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her koşul altında arkamda duran, verdiğim her kararda beni destekleyen, bugünlere gelmem için bütün imkanlarını kullanan ve bunu mümkün kılan aileme en içten teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının literatüre katkısı olmasını temenni ederim.

Mahmut Cenk SAYIL

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yoğun Jet Davranışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modelleri ile İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Tuğçe ANILAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/06/2024

Mahmut Cenk SAYIL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	16
1.1. Giriş	16
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	19
1.3. Yayıcıcı Boru Hidroliği ve Seyrelme Hesapları	20
1.3.1. Yayıcıcı Boru Tasarım Esasları.....	20
1.3.2. Yayıcıcı Boru Boyutlandırılması İçin Hidrolik Hesaplar.....	21
1.3.3. Seyrelme Hesapları.....	23
1.4. Yoğun Jet Davranışı, Biçimi ve Modellemesi	24
1.4.1. Yoğun Jet Karakteristikleri.....	24
1.4.2. Yoğun Jet Davranışı Modellemesi.....	27
1.5. HAD Modellemesi ve Korunum Denklemleri.....	28
1.5.1. HAD Modellemesi.....	28
1.5.2. Korunum Denklemleri	31
1.6. Literatür Özeti.....	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	39
2.1. ANSYS Fluent ile HAD Modellemesi.....	39
2.2. Model Kalibrasyonu ve Kurulumu	44
2.3. Yöntem.....	52
3. BULGULAR VE İRDELEME	56
3.1. Giriş	56
3.2. Model 1'in Bulguları ve İrdelenmesi.....	59
3.3. Model 2'nin Bulguları ve İrdelenmesi.....	63
3.4. Model 3'ün Bulguları ve İrdelenmesi.....	66

3.5. Model 4'ün Bulguları ve İrdelenmesi	69
3.6. Model 5'in Bulguları ve İrdelenmesi	73
3.7. Model 6'nın Bulguları ve İrdelenmesi	77
3.8. Model 7'nin Bulguları ve İrdelenmesi	81
3.9. Model 8'in Bulguları ve İrdelenmesi	87
3.10. Model 9'un Bulguları ve İrdelenmesi	92
3.11. Model 10'un Bulguları ve İrdelenmesi	95
4. SONUÇLAR.....	100
5. ÖNERİLER	103
6. KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YOĞUN JET DAVRANIŞININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLERİ İLE İNCELENMESİ

Mahmut Cenk SAYIL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Tuğçe ANILAN
2024, 110 Sayfa

Desalinasyon işlemi sonucu ortaya atık olarak çıkan yoğun tuzlu suların deniz deşarjı sistemleri yayıcı boruları aracılığıyla deniz ve okyanus gibi alıcı ortamlara bertarafı dünyada sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Yoğun suyun deşarj edildiği alıcı ortamda ani sıcaklık, tuzluluk ve yoğunluk değişimlerine sebep olarak buradaki doğal dengeyi tehdit etmemesi için iyi bir seyrelme veriminin elde edilebilmesi gerekmektedir; bunun için ise iyi bir yayıcı tasarımı şarttır. Doğru yayıcı boru tasarımı için, atıksu jetlerinin alıcı ortamdaki davranışı ve seyrelmenin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada belirli ortam ve hidrolik tasarım koşulları altında farklı yayıcı boru tasarımlarının yoğun jetlerin davranışı ve seyrelme üzerindeki etkileri, üç boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) modelleri kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak daha önceden yapılmış bir çalışmanın deneysel verileri kullanılarak bir referans model oluşturulmuş ve doğrulanmıştır. Ardından bu model baz alınarak farklı modeller oluşturulmuş ve simüle edilmiştir. Her bir modelde bir önceki modele göre deşarj açısı, çıkış uçlarının sayısı, çıkış uçları arası mesafe, çıkış uçlarının çapları ve jet hızı parametrelerinden sadece bir tanesi değiştirilerek diğerleri aynı tutulmuş ve bu değişen parametrenin yoğun jetin karakteristik geometrik özelliklerini, alıcı ortamdaki davranışını ve yakın alan bölgesindeki seyrelme oranını nasıl etkilediği incelenmiştir. Sonuçlar özellikle deşarj açısının, çıkış uçları arası mesafenin ve jet hızının jetlerin biçimini, davranışını ve yakın alandaki seyrelme oranını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yoğun su deşarjı, Açılı yoğun jet, HAD, Karışma ve seyrelme, Deşarj açısı, Çıkış ucu aralıkları

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF BRINE JET BEHAVIOR USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELS

Mahmut Cenk SAYIL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Tuğçe ANILAN
2024, 110 Pages

Marine outfall systems are often used for the safe disposal of brine, which is the byproduct of desalination plants, and brine is discharged into ambient sea and ocean waters. It is important to ensure a sufficient dilution to avoid the negative effects that brine might cause on marine ecosystems by changing the temperature, salinity, and density of the ambient water in an abrupt manner. For this, the hydraulic design of the diffuser is the most important task for the design of the entire outfall, and a proper design is only possible through a thorough analysis of brine jet geometry, behavior, and dilution efficiency. In this study, the effects of different diffuser designs under certain ambient and hydraulic design conditions on brine jet geometry, behavior, and dilution efficiency were investigated using three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) models. For this purpose, first a reference model was created and validated using experimental data from a previous study. Then, based on this model, different models were created and simulated. In each model, only one of the parameters, discharge angle, number of ports, port spacing, port diameter, and jet velocity was changed, and the rest was kept the same as in the previous model to investigate the effects of these differing parameters on brine jet characteristics, behavior, and dilution within the near-field region. Results reveal that discharge angle, port spacing, and jet velocity affect jets' geometries, behavior, mixing and and dilution processes within the near-field significantly.

Key Words: Brine disposal, Inclined dense jet, CFD, Mixing and dilution, Discharge angle, Port spacing

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Deniz deşarjı modellemesi yaklaşımları	19
Şekil 2.	Bir açılı yoğun jetin LIF görüntüsü	24
Şekil 3.	Bir açılı yoğun jetin karakteristikleri.....	25
Şekil 4.	Deney düzeneğinin şematik çizimi.....	45
Şekil 5.	Ağ örgüsü genel görünüm	48
Şekil 6.	Ağ örgüsünün giriş ağzı çevresindeki yapısı.....	49
Şekil 7.	Hacim oranı dağılımının üstten görünümü	50
Şekil 8.	Hacim oranı dağılımının yandan görünümü	51
Şekil 9.	Yoğunluk akıntısı kalınlıklarının karşılaştırılması	51
Şekil 10.	Model 1 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	60
Şekil 11.	Model 1 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.75 m)	61
Şekil 12.	Model 1 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.75 m)	61
Şekil 13.	Model 1 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	62
Şekil 14.	Model 2 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	63
Şekil 15.	Model 2 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.75 m)	64
Şekil 16.	Model 2 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.75 m)	64
Şekil 17.	Model 2 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	65
Şekil 18.	Model 3 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	66
Şekil 19.	Model 3 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.75 m)	67
Şekil 20.	Model 3 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.75 m)	67
Şekil 21.	Model 3 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	68
Şekil 22.	Model 4 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	70
Şekil 23.	Model 4 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.625 m)	70
Şekil 24.	Model 4 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.875 m)	71
Şekil 25.	Model 4 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.625 m) ...	71
Şekil 26.	Model 4 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.875 m) ...	72
Şekil 27.	Model 4 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	72
Şekil 28.	Model 5 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	73
Şekil 29.	Model 5 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.5 m)	74
Şekil 30.	Model 5 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=1.0 m)	74

Şekil 31. Model 5 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)	75
Şekil 32. Model 5 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)	75
Şekil 33. Model 5 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	76
Şekil 34. Model 6 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	77
Şekil 35. Model 6 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.25$ m)	78
Şekil 36. Model 6 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)	78
Şekil 37. Model 6 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.25$ m)	79
Şekil 38. Model 6 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.25$ m)	79
Şekil 39. Model 6 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)	80
Şekil 40. Model 6 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.25$ m)	80
Şekil 41. Model 6 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	81
Şekil 42. Model 7 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	82
Şekil 43. Model 7 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)	83
Şekil 44. Model 7 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)	83
Şekil 45. Model 7 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)	84
Şekil 46. Model 7 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)	84
Şekil 47. Model 7 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)	85
Şekil 48. Model 7 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)	85
Şekil 49. Model 7 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	86
Şekil 50. Model 8 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	87
Şekil 51. Model 8 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)	88
Şekil 52. Model 8 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)	88
Şekil 53. Model 8 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)	89
Şekil 54. Model 8 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)	89
Şekil 55. Model 8 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)	90
Şekil 56. Model 8 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)	90
Şekil 57. Model 8 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	91
Şekil 58. Model 9 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	92
Şekil 59. Model 9 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.625$ m)	93
Şekil 60. Model 9 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.875$ m)	93
Şekil 61. Model 9 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.625$ m) ...	94
Şekil 62. Model 9 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.875$ m) ...	94
Şekil 63. Model 9 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	95

Şekil 64. Model 10 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü	96
Şekil 65. Model 10 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)	97
Şekil 66. Model 10 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)	97
Şekil 67. Model 10 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)	98
Şekil 68. Model 10 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)	98
Şekil 69. Model 10 yoğunluğun konuma bağlı değişimi	99



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Deniz deşarjı modellemesinde kullanılan farklı yaklaşımların karşılaştırılması (Saeidi Hosseini, 2024)	30
Tablo 2. Yakın zamanda batık eğimli jetlerin HAD modellemesi üzerine yapılan çalışmaların bir özeti (Moshiri-Tabrizi vd., 2023)	31
Tablo 3. Deney koşulları (Firoozabadi vd., 2009)	46
Tablo 4. Model senaryoları	55
Tablo 5. Model senaryolarında değişen bazı parametreler	58
Tablo 6. Model 1 sonuçları	63
Tablo 7. Model 2 sonuçları	65
Tablo 8. Model 3 sonuçları	68
Tablo 9. Model 4 sonuçları	72
Tablo 10. Model 5 sonuçları	76
Tablo 11. Model 6 sonuçları	81
Tablo 12. Model 7 sonuçları	86
Tablo 13. Model 8 sonuçları	91
Tablo 14. Model 9 sonuçları	95
Tablo 15. Model 10 sonuçları	99

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E_1	: Başlangıç hidrolik yükü
E	: Hidrolik yük
C_D	: Deşarj katsayısı
a_n	: Çıkış ucu kesit alanı
q	: Çıkış ucu debisi
Q	: Toplam debi
g	: Yerçekimi ivmesi
g'_0	: Değiştirilmiş yerçekimi ivmesi
V	: Boru içi akış hızı
u	: Jet hızı
h_f	: Sürekli yük kaybı
f	: Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı
l	: Çıkış uçları arası mesafe
d	: Çıkış ucu çapı
h_L	: Yersel yük kayıpları
K_L	: Yersel yük kaybı katsayısı
V_L	: Boru içi yerel akış hızı
θ	: Deşarj açısı
y_t	: Maksimum saçak yüksekliği
S_i	: Etki noktası seyrelmesi
x_i	: Etki mesafesi
x_n	: Yakın alan mesafesi
S_n	: Yakın alan seyrelmesi
Q	: Hacim akısı
M	: Momentum
B	: Yüzücülük
ρ_0	: Yoğun suyun yoğunluğu
ρ_a	: Alıcı ortam suyunun yoğunluğu
l_m	: Momentum uzunluk ölçeği

Z_m	: Maksimum çıkış yüksekliği
∇	: Iraksama terimi
S_m	: İkincil fazdan birincil faza eklenen kütle
p	: Statik basınç
$\overrightarrow{\rho g}$	: Yerçekimsel cisim kuvveti
$\vec{F}$	: Dış cisim kuvveti
$\bar{\bar{\tau}}$	: Gerilme tensörü
h_j	: j türlerinin entalpisi
J_j	: j türlerinin kütle yayılım akısı
S_h	: Isı kaynağı terimi
$C_{1\varepsilon} - C_{3\varepsilon}$	: Model sabitleri
C_μ	: Model sabiti
ε	: Türbülans yayılım oranı
k	: Türbülans kinetik enerjisi
ω	: Özgül dağılım oranı
S	: Kanal taban eğimi
R_{in}	: Giriş ağız Reynolds sayısı
Ri_{in}	: Giriş ağız Richardson sayısı
μ	: Dinamik viskozite
ν	: Kinematik viskozite
h_{in}	: Giriş ağız yüksekliği
F	: Yoğunluksal Froude sayısı
y_L	: Yayılan katmanın kalınlığı
3DLIF	: Üç Boyutlu Lazerle Uyarılmış Floresan
ADV	: Akustik Doppler Akış Hızı Ölçer
DES	: Ayrık Girdap Benzetimi
DNS	: Doğrudan Sayısal Benzetim
EVM	: Girdap Viskozite Modeli
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	: Büyük Girdap Benzetimi
LIF	: Lazerle Uyarılmış Floresan
LRR	: Launder, Reece ve Rodi Modeli

RANS : Reynolds-Ortalama Navier-Stokes Modeli
RNG : Renormalizasyon Grubu
RSM : Reynolds Gerilmesi Modeli
SIMPLEC : SIMPLE-Consistent (SIMPLE-Tutarlı)
SSG : Speziale, Sarkar ve Gatski Modeli
SST : Kayma Gerilmesi Taşınımı Modeli



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kontrolsüz nüfus artışı endüstriyel ve zirai gelişmeler, su kıtlığı konusunu küresel ısınma ve iklim değişikliğinin de etkileri ile birçok ülkede ciddi bir problem haline getirmiştir (Lykkebo Petersen vd., 2019; Baum vd., 2019). Bu durum son yıllarda farklı teknolojiler kullanan farklı tipteki desalinasyon tesislerinin kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Desalinasyon tesislerinde deniz suyundan kullanılabilir temiz su elde edilebilmektedir ve bu sürecin sonunda yan ürün olarak çok yoğun tuzlu bir atıksu ortaya çıkmaktadır (Bashitalshaaer vd., 2015; Baawain vd., 2015; Abessi ve Roberts, 2018). Bu yoğun su, tüm süreç boyunca kullanılan veya oluşan ön arıtma biyositleri, koagülanlar, antiskalantlar, köpük önleyici maddeler ve ağır metaller gibi kimyasalları da yüksek oranda içerebilmektedir (Moshiri-Tabrizi vd., 2023).

Desalinasyon işlemi sonucu ortaya atık olarak çıkan bu yoğun suyun bertarafı için kullanılan yöntemlerden birisi de deniz deşarj sistemleridir. Deniz deşarj sistemleri, evsel, zirai, endüstriyel, termal ve yoğun tuzlu suların karadaki bir tesiste belirli bir ön arıtmadan geçirilmesinin ardından deniz dibinden geçirilen bir boru hattıyla kıyıda güvenli bir mesafede, hattın en sonundaki yayıcı boru yardımıyla alıcı deniz ortamına boşaltılması ve buradaki doğal süreçlerin de etkisiyle atıksuların öngörülen miktarda seyrelmesini sağlayan sistemlerdir (Berkün, 2006; Öztürk, 2011). Bütün dünyada yaygın olarak tercih edilen denize deşarj sistemleri, sunduğu etkili ve ekonomik çözümler ile her türlü atıksu bertarafı için uygun bir yöntemdir (Nemlioğlu, 2006; Berkün, 2017).

Deniz deşarjı tesislerinin uygun şekilde tasarlanmaması durumunda alıcı ortama tahliye edilen yoğun sular, hem alıcı ortamda sebep olacakları ani yoğunluk, tuzluluk ve sıcaklık değişiklikleri; hem de içeriklerinde barındırdıkları kirletici maddeler sebebiyle alıcı ortamdaki canlı yaşamını ve halk sağlığını ciddi şekilde tehdit edebilmektedirler. Alıcı ortama deşarj edilen yoğun suyun sebep olabileceği bu istenmeyen sonuçların önüne geçilebilmesi için, tuzluluk oranının ve kirletici parametrelerin konsantrasyonlarının iyi bir seyrelme verimi ile belirli miktarda düşürülmesi gerekmektedir (Anılan, 2023). İyi bir seyrelme verimi elde edebilmek ise ancak iyi bir yayıcı boru tasarımı ile mümkündür.

Bundan ötürü, yayıcı boruların hidrolik tasarımı deniz deşarjı yapılarının en önemli konusudur (Nemlioğlu, 2003).

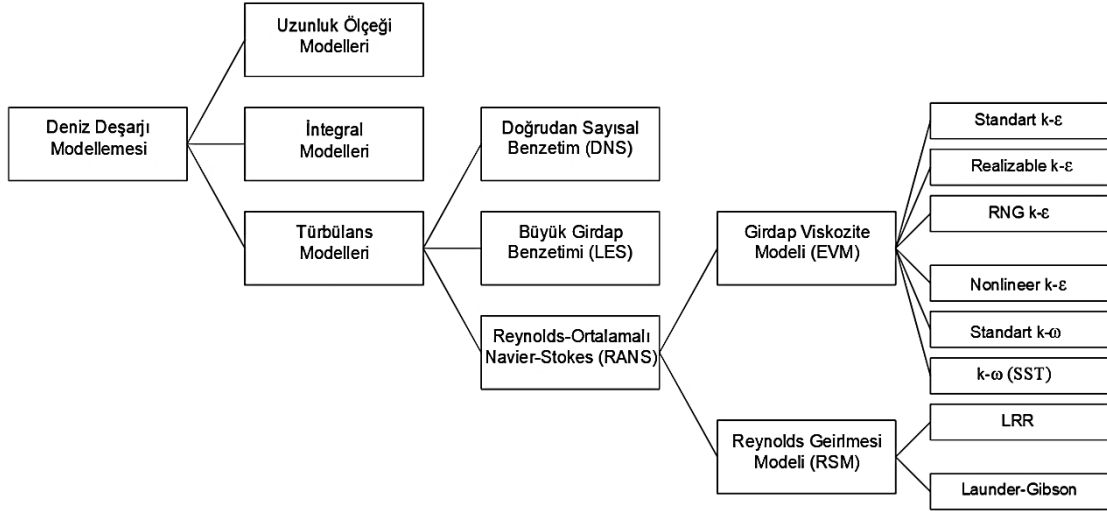
Seyrelme verimini etkileyen faktörlerin başında yayıcı borudaki çıkış uçlarının sayısı, tipi, yönleri, açıları, çıkış uçları arası mesafeler gibi geometrik özellikler; yayıcı boru iç hidrolik parametreleri, deşarj edilen atıksuyun ve alıcı ortam suyunun fiziksel ve kimyasal özellikleri, atıksuyun alıcı ortam içerisindeki davranışı bulunur (Altuncu, 2004; Yılmaz, 2015). Dolayısıyla yayıcı boru tasarımının doğru yapılması için atıksu jetlerinin alıcı ortamdaki davranışlarının, seyrelme ve karışmanın iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Yayıcıların iç hidroliği, yoğun su jetlerinin özellikleri, çoklu çıkış ucu bulunan yayıcılardan deşarj yapılması durumunda meydana gelen jet girişimi olayı, atıksu jetinin çıktığı maksimum yükseklik ve yoğun su deşarjlarının konsantrasyonu gibi konularda detaylı birçok deneysel çalışma yapılmıştır (Cipollina vd., 2005; Abou-Elhaggag vd., 2011). Ancak fiziksel modellemeler hem oldukça zaman alıcı hem de maliyetleri yüksek yöntemler olduklarından, bunların uygulanması her çalışma kapsamında her zaman uygun olmayabilmektedir.

Bu noktada, deneysel çalışmalara ve saha çalışmalarına kıyasla uygulanması daha kolay, zamandan tasarrufu mümkün kılan, maliyeti daha düşük olan sayısal modelleme yöntemlerinin benimsenmesi ve kısıtlamaları da göz önünde bulundurularak bu amaçlar doğrultusunda kullanılması önem taşımaktadır. Bundan ötürü, özellikle son zamanlarda yoğun suyun alıcı ortamdaki davranışını anlamak adına sayısal modelleme yöntemleri giderek artan bir sıklıkta kullanılmaya başlanmıştır (Oliver vd., 2008; Firoozabadi vd., 2009; Abou-Elhaggag vd., 2011; Muller vd., 2011; Kheirhah Gildeh vd., 2015; Akbari ve Ebrahimi, 2016; Robinson vd., 2016; Yan ve Mohammadian, 2017; Ünsal Karakuş, 2018; Ardalan ve Vafaei, 2019; Castro-Faccetti vd., 2019; Yan ve Mohammadian, 2019; Yan vd., 2019; Mohammadian vd., 2020; Kheirhah Gildeh vd., 2021; Saeidi Hosseini vd., 2022; Moshiri-Tabrizi vd., 2023; Saeidi Hosseini, 2024). Deniz deşarjı ile ilgili süreçlerde sayısal modeller, deşarj edilen atıksu için, fiziksel ve kimyasal mekanizmaları temsil eden taşınım ve dönüşüm denklemlerini çözerek farklı alıcı ortam koşulları altında atıksuyun davranışlarını analiz etmeye çalışırlar. Yoğun su deşarjı durumunda esas kirlilik parametresinin tuz olması dönüşüm mekanizmasının çok belirgin olmamasına sebep olmaktadır; ancak türbülanstaki dalgalanmalardan ileri gelen yayılım temel mekanizmayı oluşturur (Palomar ve Losada, 2011; Abessi, 2018).

Literatürde üç ana tip sayısal modelleme yöntemine rastlanmaktadır. Bunlardan birisi, temelini boyut analizinin oluşturduğu, yarı ampirik uzunluk ölçeği modelleridir. Örnek olarak CORMIX yazılımı verilebilir. CORMIX, tek ve çoklu jetlerin modellenmesini mümkün kılmaktadır. Bir başka sayısal modelleme yöntemi de korunum denklemlerinin integrasyonuna dayanan integral modellerdir (Moshiri-Tabrizi vd., 2023). İntegral modeller, Gauss Dağılımına uygunluk varsayımıyla hidrodinamik korunum denklemlerini çözer, ardından bunları basit adi diferansiyel denklemlere dönüştürür ve bunları iteratif bir biçimde her bir jetin iz düşümü boyunca çözerler. Bu modellerde alıcı ortamın sınırsız olduğu varsayımı yapılması gerektiğinden sınır etkileri modellenememektedir. Sınırsız olduğu varsayılan alıcı ortam suyu düzgün veya düzgün olmayan şekilde tabakalı, durgun veya akıntılı olarak modellenebilir (Jirka, 2004; Abessi, 2018). İntegral modeller oldukça karmaşık türbülanslı karışım olaylarının analitik olarak basitleştirilmesi esasına dayanırlar; dolayısıyla genelde deneylerden elde edilen katsayılarla birlikte, bir yarı ampirik sürüklenme kapatma yaklaşımı kullanırlar. Bu modeller kararlı durumdaki saçak iz düşümlerini düzenleyici karışım bölgesine, ilk karışım bölgesinin sonuna veya en yakın sınırlara kadar tahmin ederler ve karışımın davranışıyla ilgili detaylar sunamazlar (Jirka, 2006; Abessi, 2018). CORMIX yazılım grubundan olan CORJET, VISJET grubundan JETLAG veya VISUAL PLUMES'dan UM3 gibi yazılımlar bu anlamda tasarımcılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadırlar. Yarı ampirik modellerin tahminleri, bunların oluşturuldukları ortamın özellikleriyle sınırlı olmalarından ötürü ortam koşulları tarafınca sınırlandırılırlar. İntegral sürüklenme modelleri yarı ampirik modellere kıyasla açılı yoğun jetlerin davranışlarını daha doğru bir şekilde tahmin etse de doğruluk oranları özellikle dinamik alıcı ortam koşulları için hala yeterli düzeyde değildir (Moshiri-Tabrizi vd., 2023). Son olarak, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımları son dönemde artan bir sıklıkta kullanılmaktadırlar (Lee ve Cheung, 1990; Frick, 2004; Jirka, 2004; Moshiri-Tabrizi vd., 2023). Teknolojinin ve hesaplama yöntemlerinin gelişmesi ile birlikte, deniz deşarjında da HAD yazılımlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. HAD yazılımları, integral yöntemlere kıyasla daha az basitleştirme ve varsayım yaptığından daha başarılı sonuçlar verebilmektedirler (Baum ve Gibbes, 2020; Saeidi Hosseini vd., 2022). Günümüzdeki gelişmiş hesaplama tekniklerine rağmen, yakın alan seyrelmesi için yapılan analizlerde, HAD simülasyonlarının çözümü için birkaç güne varan süreler söz konusu olabilmektedir. Bu, HAD modellemeleri durumunda, daha basit yaklaşımların kullanıldığı ve genelde dakikalar içerisinde sonuç veren diğer yöntemlere kıyasla çok daha fazla

hesaplama maliyeti olduğu anlamına gelmektedir. Ancak bütün bunlara rağmen, uygun bir biçimde kalibre edilmiş ve doğrulanmış bir HAD modeli, araştırmacıları integral modellerin varsayımlarından ileri gelen kısıtlamalara bağlı kalmaktan kurtararak, jet dinamiklerinin yüksek çözünürlüklü ve üç boyutlu görsellerini sunabilmektedir (Robinson vd., 2016).



Şekil 1. Deniz deşarjı modellemesi yaklaşımları (Saeidi Hosseini, 2024)

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Son yıllarda giderek artan ve doğal kaynaklardan karşılanamamaya başlayan temiz içme ve kullanma suyu ihtiyacının karşılanabilmesi adına kullanılan ve deniz ve okyanus sularının tuzdan arındırılmasıyla kullanıma hazır hale gelmesine imkân tanıyan desalinasyon tesislerinde, bu işlem sonucu ortaya çok yoğun tuz konsantrasyonu içeren atıksular çıkmaktadır. Aynı evsel, zirai, endüstriyel atıksularda olduğu gibi bu yoğun sularda da tahliye işlemi deniz deşarjı tesisleri aracılığıyla alıcı deniz ve okyanus ortamlarına yapılmaktadır. Yoğun deşarjlarda da esas olan iyi bir seyrelme verimi elde etmek ve deşarjı yaparken yoğun suyun alıcı ortamda ani sıcaklık, tuzluluk ve yoğunluk değişimlerine sebep olmasını engellemektir; alıcı ortamdaki canlı yaşamını ve doğal dengeyi korumanın yolu budur. İyi bir seyrelme verimi elde etmek ancak en uygun yayıcı boru tasarımı ile mümkündür. Yoğun deşarjlarda kullanılacak yayıcı boruları en uygun şekilde tasarlamak için, deşarj edilen atıksuyun alıcı ortamdaki davranışı, geometrik özellikleri ve özellikle yakın alan bölgesindeki karışım ve seyrelme süreçleri oldukça iyi

analiz edilmelidir. Dolayısıyla belirli alıcı ortam ve hidrolik tasarım koşulları altında bu yoğun su jetlerinin nasıl davrandığının incelenmesi; maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi, yakın alan mesafesi, jet yörüngesi mesafesi gibi geometrik özelliklerinin belirlenmesi ve alıcı ortamdaki karışım ve seyrelme süreçlerinin irdelenmesi son derece önemlidir. Bu tez çalışmasında da belirli deşarj koşulları altında yoğun jetlerin davranışları ve yakın alan seyrelme oranları HAD modelleme yöntemleriyle incelenmiştir.

Bu çalışmada ANSYS Fluent (2024 R1 Sürümü) yazılımı kullanılarak Firoozabadi vd. (2009) çalışmasında yapılan deney sonuçları kullanılarak bir referans model oluşturulmuş ve doğrulanmıştır. Ardından bu referans model baz alınarak farklı senaryolara sahip modeller oluşturulmuş ve her bir model bir önceki modelle etkisi incelenmek istenen tek bir deşarj parametresi hariç aynı tutulmuş; değiştirilen deşarj parametresinin maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi gibi jetin geometrisine ait karakteristikleri üzerindeki, aynı zamanda jetin alıcı ortamdaki dağılışı ve yakın alan dahilindeki seyrelme oranları üzerindeki etkisi Fluent yazılımı kullanılarak simüle edilen üç boyutlu modeller yardımıyla incelenmiştir. Değiştirilen parametreler deşarj açısı, çıkış uçları sayısı, çıkış uçları arası mesafeler, çıkış uçlarının çapları ve jet hızlarıdır.

Bu tezin birinci bölümünde konuyla alakalı genel bilgiler sunulmuştur. Desalinasyon, yoğun sular, deniz deşarjı sistemleri, yayıcı boruların tasarım esasları, hidrolik hesaplar ve seyrelme hesapları, yoğun jetlerin karakteristikleri ve modellenmesi, HAD modelleri ve korunum denklemleri ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve literatür özeti sunulmuştur. İkinci bölümde Fluent yazılımı kısaca tanıtılmış, Fluent ile HAD modellemesinin nasıl yapıldığından bahsedilmiş, referans modelin kurulumu ve kalibrasyonu anlatılmış; ardından bu tez çalışmasında kullanılan yöntem açıklanmıştır. Üçüncü bölümde bulgular sunulmuş ve irdeme yapılmış, dördüncü ve beşinci bölümlerde sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

1.3. Yayıcı Boru Hidroliği ve Seyrelme Hesapları

1.3.1. Yayıcı Boru Tasarım Esasları

Denize deşarj yapılarının başarılı olmasında en büyük pay yayıcıya aittir. Yayıcı, deşarj deliği olarak adlandırılan uzatılmış özel delikler aracılığıyla deniz vb. alıcı su ortamına atıksuyun boşaltılmasını sağlamaktadır. Yayıcının tasarımı, seyrelme hesapları,

çıkış ucu ve/veya düşey kol konfigürasyonları, yayıcı borunun yerleştirilme açısı ve borunun yapısal bütünlüğüyle ilgili hidrolik hesaplardan oluşmaktadır (Roberts vd., 2010).

Yayıcı üzerinde bulunan deşarj deliklerinin yapısı ve türü seyrelme verimine en çok etki eden faktörlerdir. Yayıcı deşarj deliklerinin çapı ve deşarj deliklerinde meydana gelen hidrolik yük kayıpları atıksu jetinin hızına etki edeceğinden seyrelme verimine de etki edecektir. Delikler arası uzaklık da yayıcı boru tasarımını etkilemektedir. Mesafenin daha büyük olması, her bir delikten çıkan jetin tekil haldeki seyrelme değerlerine daha yakın bir seyrelme değeri elde edilmesini sağlar. Fakat delikler arası uzaklığın geniş olması, yayıcının uzun ve maliyetinin yüksek olmasına neden olur. Delikler genellikle hep birlikte sadece yasal kriterleri sağlayacak kadar birbirlerine olabildiğince yakın yerleştirilirler.

Yayıcı tasarımının ana hedefleri enerji kaybını en aza indirmek, istenilen seyrelme verimini elde edebilmek için bütün çıkış uçlarından mümkün olduğunca eşit bir debi çıkışını, bir başka deyişle homojen bir debi dağılımı sağlamak; bütün bunları yaparken alıcı ortam suyunun ve alıcı ortamdaki yayıcı boru içerisine çıkış uçlarından girebilecek her türlü yabancı maddenin girişini engellemek olarak belirtilebilir (Bleninger vd., 2002). Yayıcı borunun sonlarına doğru yaklaştıkça tahliye edilmesi gereken atıksuyun miktarı doğal olarak azalmaktadır. Bu durumda yayıcı boru içindeki akış hızının düzenlenebilmesi ve debi homojenliğinin sağlanabilmesi için yayıcı borular bazen, çapları deniz tarafına doğru gidildikçe belirli maksimum ve minimum boru içi akış hızı kriterlerini sağlayabilecekleri şekilde, giderek azalan çapta tasarlanabilmektedirler.

1.3.2. Yayıcı Boru Boyutlandırılması İçin Hidrolik Hesaplar

Yayıcı hidrolik hesaplarına, deşarj işleminin gerçekleştirilebilmesi için yenilmesi gereken toplam hidrolik yükün kümülatif olarak doğru bir biçimde bulunabilmesi için en sondaki çıkış ucundan başlanır ve akış yönünün tersine hareket edilir. Çünkü hidrolik yükün en yüksek değeri kara tarafında, boru hattının başındadır. En sondaki çıkış ucunun hidrolik yük değeri başlangıç hidrolik yüküdür; E_1 şeklinde gösterilir ve hesabı için gelgit etkisi, emniyet dalga yüksekliği gibi parametreler kullanılır. Her bir çıkış ucundan çıkan atıksuyun debisinin bulunması gereklidir ve bunun için hidrolik yüke ek olarak kullanılan bir diğer parametre deşarj katsayısıdır (C_D). Deşarj katsayısı çıkış ucunun tipine göre değişir; farklı tipte çıkış uçları için farklı başlangıç değerleri alınır. Alınan başlangıç değerleri hesap yapılan ilk çıkış ucu için geçerlidir; sonraki çıkış uçları için çıkış ucu tipine

göre hıızrlanmış diyagramlar veya kullanılan hazır ampirik formüller tercih edilerek hesap yapılır. O an hesap yapılan çıkış ucu için geçerli olan toplam debi, o ana kadarki tüm çıkış ucu debilerinin toplamıdır ve en sonda bu değer proje debisine eşit olmalıdır.

Toplam debi değeri, aynı zamanda boru içerisindeki akış hızının alt ve üst sınırlar arasında olup olmadığını görmek için de kullanılır; bunun için, tercih edilen yayıcı boru çapı değeri ile yayıcının kesit alanı hesaplanır ve toplam debiyle birlikte süreklilik denklemi kullanılarak akış hızı bulunur. Akış hızının sınırları aşması durumunda yayıcı borunun çapında gerekli değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Hesaplar her bir çıkış ucu için bu şekilde devam eder. Çıkış ucu debileri (1) yardımıyla bulunur:

$$q_n = C_D a_n \sqrt{2gE} \quad (1)$$

Burada q_n çıkış ucu debisini, C_D deşarj katsayısını, g yer çekimi ivmesini, E ise hidrolik yükü temsil eder. C_D için çan ağızlı ve keskin kenarlı çıkış uçları için başlangıç değerleri sırasıyla 0.91 ve 0.61 olarak seçilir. Brooks (1970) çalışmasında deşarj katsayısının çan ağızlı ve keskin kenarlı çıkış uçları için sırasıyla (2) ve (3) yardımıyla bulunabileceğini ortaya koymuştur (Roberts vd., 2010):

$$C_D = 0.975 \left[1 - \left(\frac{V_{n-1}^2}{2gE_n} \right) \right]^{3/8} \quad (2)$$

$$C_D = 0.63 - 0.58 \left[\frac{V_{n-1}^2}{2gE_n} \right] \quad (3)$$

Burada V_{n-1}^2 ve E_n sırasıyla bir önceki çıkış ucu için yapılan hesapta bulunan boru içi akış hızını ve mevcut çıkış için hesaplanan hidrolik yükü temsil etmektedir. Boruda sürtünme etkisinden ileri gelen yük kaybı genelde Darcy-Weisbach eşitliği ile hesaplanır (Roberts vd., 2010):

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Burada f Darcy-Weisbach sürtünme katsayısını, l çıkış uçları arasındaki mesafeyi, d boru iç çapını, g ise yer çekimi ivmesini temsil etmektedir. Boru hattı boyunca farklı parçaların, çap değişimlerinin, dönüşlerin ve benzeri etkilerin sebep oldukları yerel yük

kayıpları ise hız yüksekliğinin daha önceden belirlenmiş bir yerel yük kaybı katsayısıyla çarpılması ile bulunur (Tate vd., 2016):

$$h_L = K_L \frac{V_L^2}{2g} \quad (5)$$

Burada K_L daha önceden belirlenmiş yerel yük kaybı katsayısını, V_L söz konusu noktadaki yerel akış hızını, g ise yer çekimi ivmesini temsil etmektedir.

1.3.3. Seyrelme Hesapları

Deşarj edilen suyun alıcı ortam içerisinde zararsız olabilmesi için, korunması amaçlanan bölgeden yeterince uzakta izin verilen kirlilik parametrelerinin kirliliğin alıcı ortam suyu ile yeterince karıştırılıp seyreltilerek sağlanması gerekmektedir. Atıksu jetleri su yüzeyine yukarı doğru yükselirlerken komşuları ile birleşebilen saçaklar oluştururlar. Karışma ve seyrelme bu bölgede hızlıdır ve buna deşarj tarafından oluşturulan türbülans neden olur. Bu bölgedeki seyrelme “yakın alan seyrelmesi” veya “birinci karışma bölgesi” olarak anılır. “Birinci seyrelme” olarak da adlandırılan yakın alan seyrelmesi kısaca difüzör deliklerinden çıkan atıksu ile deniz suyunun fiziksel olarak karışması sonucu ortaya çıkan seyreilmeyi ifade etmektedir.

Alıcı ortamdaki yoğunluk tabakalaşmasına bağlı olarak, saçaklar, yükselmeyi durdurup yanal olarak yayılmaya başladıkları yer olan tutsaklanma seviyesi adlı bir nötral yüzdürme seviyesine ulaşabilirler. Bu yerleşik atık alanı, daha sonra okyanus akıntılarıyla sürüklenir ve dispersiyona bağlı olan “uzak alan seyrelmesine” uğrar. Bu seyrelme “ikinci seyrelme” olarak da adlandırılmaktadır. Yatayda ilerlemeye başlayan atıksuyun bu hareketi sırasında ortaya çıkan biyokimyasal süreçler vasıtasıyla atıksu kaynaklı bakterilerin canlılıklarını yitirmelerinden (bakteriyel inaktivasyon) ileri gelen seyrelme ise bakteriyel inaktivasyona bağlı seyrelme olan “üçüncü seyrelme” olarak tanımlanmaktadır. Seyrelme hesaplarının detayları Roberts (2018) çalışmasında bulunmaktadır.

1.4. Yoğun Jet Davranışı, Biçimi ve Modellemesi

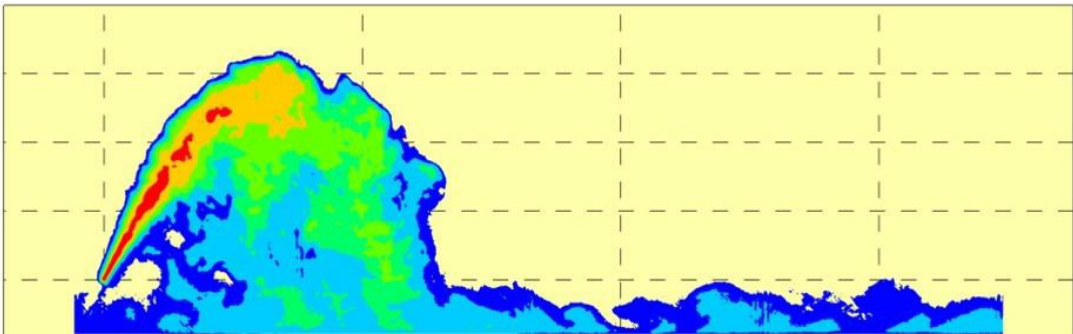
1.4.1. Yoğun Jet Karakteristikleri

Bir yayıcı borudan alıcı deniz ortamına deşarj edilen atıksuyun hareketi, çıkış ucundan çıkarken sahip olduğu jet hızına ve atıksu ile alıcı ortam suyu arasındaki yoğunluk farkına bağlıdır. Atıksuyun yoğunluğunun alıcı ortam suyu yoğunluğundan az olması durumunda pozitif yüzücülük meydana gelirken, atıksu yoğunluğunun alıcı ortam suyu yoğunluğundan fazla olması durumunda negatif yüzücülük olur.

Negatif yüzücülük durumu atıksuyun çökmesidir; yoğun su deşarjlarında atıksu çöker ve bu “yoğun deşarj” olarak adlandırılır. Deşarj işlemi yüksek bir hızla yapılmışsa bu “yoğun jet” olarak ifade edilir. Desalinasyon artığı yoğun tuzlu suların alıcı ortamda çökerek kalmaları, bunların sebep oldukları istenmeyen sonuçların önüne geçilmesini zorlaştırmaktadır. Eğer seyrelme yetersiz düzeyde kalırsa, yoğun suların içeriklerindeki kirletici parametrelerin ve tuzluluklarının yasalarca belirtilen şartları sağlayamaması durumu söz konusu olabilmektedir (Darama, 2009).

Yoğun su alıcı ortam suyundan daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve genellikle yayıcı borudan yüksek bir jet hızına sahip olarak yukarı doğru belirli bir açıyla yönlendirilmiş şekilde deşarj edilir. Yüksek jet hızı yoğun suyun sürüklenmesine yol açan kaymaya sebep olur; bunun ardından yoğun su alıcı ortam suyu ile karışır, yoğun su seyreler ve tuzluluk oranları arka plan seviyelerine yakın seviyelere kadar düşer.

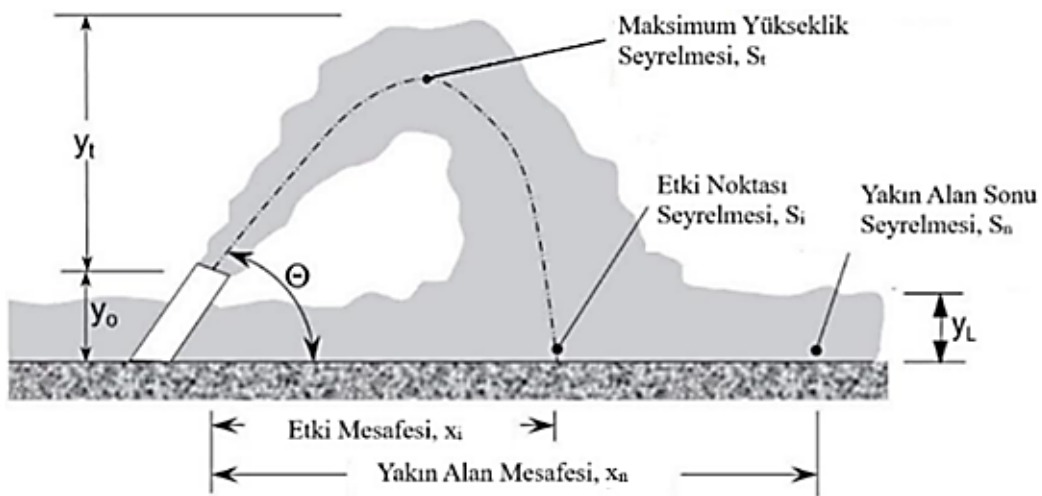
Şekil 2 bir yoğun jetin en önemli ve ayırıcı karakteristiklerini göstermektedir. Görüntü, su jetinin lazerle uyarılmış floresan (Laser-induced fluorescence-LIF) ile elde edilmiştir. Bağıl tuzluluk konsantrasyonlarının gösteriminde en yüksek seviyeden en düşük seviyeye doğru sırasıyla kırmızı, turuncu, sarı, yeşil ve mavi renkler kullanılmıştır (Roberts, 2018).



Şekil 2. Bir açılı yoğun jetin LIF görüntüsü (Roberts vd., 1997; Roberts, 2018)

Jet yükseldikçe onu seyrelten alıcı ortam suyunu sürükler. Jetin yoğunluğunun alıcı ortam suyu yoğunluğundan fazla olması, belirli bir maksimum yükseltiye çıktıktan sonra tabana doğru çökmeye başlamasına neden olur ve sürüklenme, karışım ve seyrelme bu saçağın çöküşü esnasında da devam eder. Jet tabana ulaştıktan sonra akış, hareketine yatayda hareket eden ve sürüklenip seyrelmeye devam eden bir türbülanslı yoğunluk akıntısı olarak devam eder. Yayıcı borudan belirli bir mesafe uzaklıkta, bu türbülans kendisinden kaynaklı yoğunluk tabakalaşmasının etkisi altında çöker ve aktif karışım temelde sonlanır. Jetin yükselmesi, çöküşü ve türbülansın çöküşünün gerçekleştiği noktaya kadar olan yatay hareketini kapsayan bölge “yakın alan bölgesi” olarak tanımlanır. Yakın alanın ötesinde karışım esas olarak alıcı ortamdaki türbülanslardan kaynaklanır. Bu bölge “uzak alan bölgesi” olarak adlandırılır ve burada karışım yakın alana göre çok daha yavaştır (Roberts, 2018).

Yatayla θ açısı yapacak şekilde deşarj edilen yoğun su jetlerinin bu ana özelliklerinin tanımlamaları Şekil 3’te görülmektedir. Jetin en üst noktasının bulunduğu maksimum yükseklik y_t ile gösterilmektedir. Jetin merkez çizgisinin deniz tabanı ile temas ettiği nokta “etki noktası” olarak adlandırılır, buradaki seyrelmeye “etki noktası seyrelmesi” denir ve bu değer S_i ile gösterilir. Çıkış ucuyla etki noktası arasındaki mesafe x_i , türbülans çökmesinin gerçekleştiği nokta arasındaki mesafe ise x_n ile gösterilir. Bu aynı zamanda yakın alanın uzunluğu olarak adlandırılır. Bu noktadaki seyrelme “yakın alan seyrelmesi” olarak adlandırılır ve S_n ile gösterilir. Tek bir jet için, etki noktasından yakın alanın sonuna kadar gerçekleşen seyrelme artışı yaklaşık olarak % 60’tır (Roberts vd., 1997).



Şekil 3. Bir açılı yoğun jetin karakteristikleri (Roberts vd., 1997)

Pincince ve List (1973) ve Roberts ve Toms (1987) yaptıkları çalışmalarda bu akışların analizlerini yapmak için hacmin (Q), momentumun (M) ve yüzücülüğün (B) akılarını tanımlayarak deşarjı bunlarla karakterize etmişlerdir (Darama, 2009):

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 u \quad (6)$$

$$M = uQ = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 u^2 \quad (7)$$

$$B = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 u g'_0 \quad (8)$$

Burada d çıkış ucu çapını, u jet hızını, g'_0 ise değiştirilmiş yer çekimi ivmesini temsil eder. Değiştirilmiş yer çekimi ivmesi (9) yardımıyla bulunur:

$$g'_0 = g \left(\frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (9)$$

Bu akılar yardımıyla iki uzunluk ölçeği türetilmiştir:

$$l_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (10)$$

$$l_Q = \frac{Q}{M^{1/2}} \quad (11)$$

Aralarında Wright (1984) çalışmasının da bulunduğu birçok çalışmada bu ölçekler tartışılmıştır. Pozitif yüzücü bir jet için l_m yüzücülükten ileri gelen momentumun başlangıç momentumuna eşit olduğu noktanın uzaklığı temsil etmek için kullanılır ve pozitif yüzücü jetler için çıkış ucundan olan uzaklık bu değerden önemli bir miktar fazla olduğunda başlangıç momentumu ihmal edilebilir düzeyde kabul edilir. Ancak negatif yüzücü jetlerin akıntılı halleri için momentumun ve yüzücülüğün düşey bileşenleri aynı doğrultuda değildirler; dolayısıyla momentum akısı her zaman önemli bir parametredir ve ihmal edilemez (Roberts vd., 1997; Darama, 2009).

1.4.2. Yoğun Jet Davranışı Modellemesi

Genel olarak, yoğunluğu alıcı ortam yoğunluğundan belirgin bir biçimde fazla olan yoğun suyun deşarj edildikten sonra doğrudan kendi üzerine çökme eğiliminde olmasından ötürü, deşarj işleminin yatayla belirli bir açı yapacak şekilde yüksek bir hız ile alıcı ortama verilmesi tercih edilmektedir. Burada amaç, alıcı ortam suyununkinden daha yüksek yoğunluk değerine sahip olan yoğun suların bu özelliklerinden ötürü hemen tabana çökmelerini bu açılı yönlendirme ile engelleyerek deşarj edilen atıksuyun jet iz düşümünün uzatılması ve daha iyi bir seyrelme veriminin elde edilmesidir (Darama, 2009).

Yoğun suyun yatayla daha dik bir açı yapacak şekilde tahliyesinin, akışkanın daha uzağa gidebilmesini ve daha iyi bir seyrelme verimi elde edilebilmesini mümkün kıldığı literatürde belirtilmiştir (Abessi ve Roberts, 2015; Abessi ve Roberts, 2016; Abessi ve Roberts, 2018; Amiri vd., 2024). Yatayla θ açısı yapan çıkış ucundan deşarj edilen yoğun su jeti, yüksek jet hızından ve başlangıç momentumundan ileri gelen etkiyle, maksimum çıkış yüksekliği (Z_m) olarak adlandırılan bir denge noktasına kadar yükselir. Jetle alıcı ortam arasında önemli miktarda basınç farkı vardır. Bu basınç farkı ve türbülanslı hız kayması sebebiyle, yoğun su jeti alıcı ortam suyunu yutar ve bu da oldukça türbülanslı bir karışım bölgesi oluşmasına sebep olur. Bunun sonucunda yoğun su jeti alıcı ortamda daha iyi bir seyrelmeye uğrar, tuzluluk oranı ve kirletici parametre konsantrasyonu güvenli seviyelere iner (Abessi ve Roberts, 2017; Moshiri-Tabrizi vd., 2023).

Literatürde optimum deşarj açısını belirlemek için yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Zeitoun vd. (1972) çalışmalarında 60° deşarj açısının yoğun su deşarjları için en uzun jet iz düşümünü ve en iyi seyrelme verimini sağladığını saptamışlar; daha sonra bu süreç boyunca kabul görmüş bu yaklaşımı Abessi ve Roberts (2016) çalışmalarında Üç Boyutlu Lazerle Uyarılmış Floresan (Three-Dimensional Laser Induced Fluorescence-3DLIF) yöntemini kullanarak desteklemişlerdir.

Ancak yoğun su deşarjlarında belirli şartlar altında en iyi seyrelmeyi sağlayan deşarj açıları, bazı diğer şartlar altında iyi seyrelme verimi sağlayamayabilir. Özellikle yoğun suyun su yüzeyiyle etkileşiminin olası olduğu sığ sulara yapılan deşarj durumunda 60° deşarj açısı atıksuyun serbest su yüzeyine ulaşmasına sebep olabilir ve bu da seyrelme verimini düşürebilir. Dolayısıyla deşarj açısının belirlenmesi, alıcı ortamın sığ su kategorisine alınıp alınamayacağını bilmek için de önem taşımaktadır.

Yoğun jetlerin alıcı ortam içerisindeki davranışlarının modellenmesi için yarı ampirik uzunluk ölçeği modelleri, integral modelleri ve HAD modelleri kullanılmaktadır. Daha az sayıda varsayımın yapıldığı bilinen ve genel olarak daha doğru sonuçlar verdiği düşünülen HAD modelleri, deniz deşarjı tesislerinin tasarımları için giderek artan bir sıklıkta kullanılmaktadırlar (Oliver vd., 2008; Abou-Elhaggag vd., 2011; Muller vd., 2011; Akbari ve Ebrahimi, 2016; Robinson vd., 2016; Yan ve Mohammadian, 2017; Ünsal Karakuş, 2018; Yan vd., 2020; Saeidi Hosseini vd., 2022; Moshiri-Tabrizi vd., 2023; Amiri vd., 2024).

Yoğun jet deşarjında akış türbülanslıdır, dolayısıyla türbülansın doğru bir biçimde modellenmesi yakın alandaki sürüklenme ve karışımın simülasyonu için büyük öneme sahiptir. Bu tarz karmaşık süreçlerin modellenmesinde ampirik yöntemler de sıkça kullanılırlar da türbülans modelleme teorilerine dayalı olarak geliştirilmiş daha ileri düzey modeller de vardır ve çoklukla daha iyi sonuç verebilmektedirler. Palomar vd. (2012) açılı yoğun jetlerin modellemelerini yapmış ve farklı çözümleme yöntemlerinin performanslarını kıyaslamışlardır. Sonuçların arasında, özellikle maksimum jet yüksekliğinde, önemli farklar olduğunu ve seyrelme değerlerinin %50'ye varan oranda, gerçekte olduklarından daha az tahmin edildiklerini belirtmişler; bu farklılıkların integral modellerde kütle ve momentum denklemlerinin basitleştirilmiş olmasından kaynaklanabileceğini öne sürmüşlerdir (Saeidi Hosseini vd., 2022).

Yoğun su deşarjının sayısal modellenmesi dağılım, yayılım, konveksiyon ve yüzücülük gibi deşarj esnasında meydana gelen fiziksel olaylara bağlıdır. Bu fiziksel olayların dahil olma seviyelerine göre tüm süreç boyunca bölge yakın alan ve uzak alan bölgelerine ayrılarak değerlendirme yapılır (Al-Sanea vd., 2015; Abualtayef vd., 2016).

1.5. HAD Modellemesi ve Korunum Denklemleri

1.5.1. HAD Modellemesi

HAD simülasyonları temelde kütle, momentum ve enerjinin korunumu ilkelerine dayanmaktadır. Bu korunum denklemleri, adımlar halinde çözülebilecek cebirsel denklemlere ayrıştırılır ve kendi içinde çözülür. HAD simülasyonları aracılığıyla akışkanların hızları, hacim oranları, basınçları, sıcaklıkları gibi en temel ve önemli parametreleri hakkında bilgi edinmek ve bunları optimum tasarımları yapmak amacıyla

kullanmak mümkündür. Ancak sadece sayısal olduklarından, sonuçlarını deneysel verilerle kıyaslayarak kalibre etmek ve doğruluklarından emin olmak önemlidir.

HAD modellerinin fiziksel modellere göre büyük avantajları vardır. Bunlar bilim insanları ve mühendislere, irdelenen problem üzerine fiziksel model kurmadan çalışma ve analiz yapma imkânı sağlarlar; zamandan ve paradan tasarruf etmeyi mümkün kılarlar. Aynı zamanda daha önceden bahsedilen integral modeller benzeri diğer sayısal modelleme yöntemlerine göre daha az basitleştirme ve varsayım yaptıklarından, daha iyi sonuçlar elde etmeyi mümkün kılarlar.

HAD kapsamında sonlu hacimler, sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri gibi metotlar kullanılarak Navier-Stokes denklemleri olarak da bilinen akışkan akışının kısmi diferansiyel denklemleriyle birlikte türbülanslı dağılım ve kimyasal reaksiyonlar gibi süreçleri tanımlayan denklemler çözülür (ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, 2013; Abessi, 2018). Bu metotlar kullanılarak kararlı ve kararsız akışları hem türbülanslı hem laminar akış koşulları altında çözümlemeyi başaran gelişmiş yazılımlar üretilmiştir. Desalinasyon artığı yoğun tuzlu suyun deşarjında, diğer birçok akış türünde olduğu gibi, akış türbülanslıdır. Türbülanslı akışlar gibi karmaşık süreçlerin modellenmesinde türbülans modellerinden faydalanan HAD yazılımlarının kullanımı önemlidir (Abessi, 2018).

Türbülans modellemesinde genel üç ana yaklaşım kullanılır: Doğrudan Sayısal Benzetim (Direct Numerical Solution-DNS), Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation -LES) ve Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes denklemleri (Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations-RANS). Bu türbülans modellerinin avantaj, kısıtlama ve uygulama alanları Tablo 1’de özetlenmiştir.

DNS yaklaşımında Navier-Stokes denklemleri, en büyük girdaptan viskozitenin önemli olduğu ve türbülansın ısı olarak yayıldığı en küçük Kolmogorov mikro ölçeklere kadar, türbülansın tamamını çözümleyebilecek kadar küçük bir ölçekte çözülürler; ancak bunların yüksek Reynolds sayılı akışlar için kullanımının zor olması sebebiyle kullanımları daha çok düşük Reynolds sayılı akışlarla sınırlıdır.

Bu anlamda DNS yaklaşımına kıyasla daha kolay bir kullanımı olan LES yaklaşımında Navier-Stokes denklemleri büyük girdaplar için doğrudan çözülürken küçük girdaplar da bir alt ızgara ile modellenir; ancak LES yaklaşımı da yüksek Reynolds sayısı olan akışlarda kullanım için yeterince pratik değildir. Bu anlamda en yaygın olarak kullanılan RANS yaklaşımında akış miktarları zaman ortalama ve dalgalanan bileşenlere ayrılır ve Navier-Stokes denklemleri çözülür.

Tablo 1. Deniz deşarjı modellemesinde kullanılan farklı yaklaşımların karşılaştırılması
(Saeidi Hosseini, 2024)

Türbülans Modeli	Avantajlar	Kısıtlamalar	Uygulamalar
DNS	Navier-Stokes denklemlerini tahmin yapmadan çözer. Bütün zamansal ve mekansal türbülans ölçeklerini çözer.	Hesaplama maliyeti çok yüksek Bütün mekansal ölçekleri yakalamak için çok detaylı ağ örgüsü gerekli	Basit akış ya da düşük Reynolds sayılı akış/Mühendislik problemlerine daha az uygulanabilirlik
RANS	Hesaplama maliyeti en düşük olan ve uygulaması kolay	Tüm akış alanında doğruluk sağlanamıyor	En çok kararlı akımlar için uygun
LES	Büyük ölçekli girdapları doğrudan hesapladığı için yüksek doğruluk Sadece küçük ölçekler modellendiği için DNS'e göre hesaplama maliyeti düşük	Yüksek hesaplama maliyeti Küçük ölçekli türbülans Karmaşık geometriler için teorelin geliştirilmeye ihtiyacı var	Girdap ve sirkülasyonlu kararsız akımlar
DES	RANS ve LES modellerinin iyi yanlarını bir araya getirir	RANS-LES arayüzünü birleştirmek zordur Büyük hesaplama alanları için uygun değil	Önemli derecede ayrılmış akımlar

Bütün türbülans uzunluk ölçeklerini çözmek için kullanılan birçok farklı tip RANS modelinin arasından, girdap viskozite $k-\epsilon$ modelleri en yaygın olarak kullanılanlardır; bu modeller makul miktarda hesaplama maliyeti karşılığında oldukça doğru sonuçlar vermektedirler. Bu modellerde türbülansın yerel ortalama durumu türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yayılım oranı (ϵ) yardımı ile karakterize edilir (Versteeg ve Malalasekera, 2007; Roberts vd., 2010).

Günümüzde türbülans modellemesi ile deniz deşarjı tesislerinin optimum tasarımı konusunda en sık kullanılan yazılımların başında ANSYS Fluent, ANSYS-CFX ve OpenFOAM gelmektedir. Bu yazılımlarla yapılan çalışmalardan bazıları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Yakın zamanda batık eğimli jetlerin HAD modellemesi üzerine yapılan çalışmaların bir özeti (Moshiri-Tabrizi vd., 2023)

Araç	Açı (°)	Türbülans Modeli	Öne Çıkanlar	Referans
ANSYS CFX	45 60 70 80 90	SST* $k-\omega$	İlk HAD uygulaması y _t düşük bulunmuştur x _i düşük bulunmuştur	(Vafeiadou vd., 2005)
	60	Standard $k-\epsilon$	Merkez çizgisi konsantrasyonu yüksek bulunmuştur	(Oliver vd., 2008)
Fluidity	60	Standard $k-\epsilon$, Smagorinsky LES	Seyrelme örüntüsü düşük bulunmuştur Standard $k-\epsilon$ ile düşük sonuçlar	(Robinson vd., 2016)
	30 45	Beş Model*	Modellerin doğruluğu kıyaslanmıştır	(Kheirkah Gildeh vd., 2015)
	45 60		Etki seyrelmesi düşük bulunmuştur Yetersiz ızgara çözünürlüğü	(Zhang vd., 2017)
		LES		
Open FOAM®	45		Deneysel verilerden sapmalar Düşük ağ örgüsü kalitesi	(Jiang vd., 2019)
	45	Realizable $k-\epsilon$	Termal-tuzlu negative yüzücü jetler Saçak-benzeri bölge verisi için sapmalar	(Ardalan ve Vafaei, 2019)
	60	Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$	Orta mesafeli çıkış uçlu yayıcı Standard $k-\epsilon$ ile önemli hatalar	(Yan ve Mohammadian, 2019)
		SST $k-\omega$		(Baum ve Gibbes, 2020)
* Kayma Gerilmesi Taşınımı (Shear Stress Transport-SST)				
**1-RNG $k-\epsilon$, 2-realizable $k-\epsilon$, 3-nonlinear $k-\epsilon$, 4-Launder Reece Rodi (LRR),5- Launder–Gibson				

1.5.2. Korunum Denklemleri

Bu çalışmada ANSYS Fluent (2024 R1 Sürümü) yazılımı kullanılmıştır. Fluent yazılımı, sonlu hacimler metodunu kullanarak sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz, laminar ve türbülanslı akışkan akışlarını hem durgun hem dinamik ortamlar için çözebilmektedir (ANSYS Fluent Theory Guide, 2011; Ünsal Karakuş, 2018).

ANSYS Fluent yardımıyla her türlü akışın korunum denklemleri çözülebilir, aynı zamanda farklı türden akışkanların karışımının simüle edilmesi gerektiği durumlarda tür denklemleri de dahil edilerek çözümleme yapılabilir. Eğer akış türbülanslıysa, ilave taşınım denklemleri de çözülebilir. Hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamaz akışkanlar için, kütle korunumu, ya da süreklilik denklemi en genel haliyle aşağıdaki gibidir (ANSYS Fluent Theory Guide, 2011):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (12)$$

Burada S_m dağılmış ikinci fazdan birinci sürekli faza eklenen kütleyi temsil etmektedir. Bir eylemsiz referans sisteminde momentumun korunumu aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (13)$$

Burada p statik basıncı, $\bar{\tau}$ gerilme tensörünü, $\vec{g}$ ve $\vec{F}$ sırasıyla yerçekimsel cisim kuvvetlerini ve dış cisim kuvvetlerini temsil etmektedir. Enerji korunumu denklemi ise aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (14)$$

1.6. Literatür Özeti

Oliver vd. (2008) çalışmalarında, ANSYS CFX yazılımını kullanarak iki farklı yaklaşımla eğimli negatif yüzücü jetlerin davranışlarını incelemiş ve sonuçları deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Yaklaşımın birinde CFX dahilinde bulunan standart $k - \varepsilon$ türbülans modelini kullanmış; ikinci yaklaşımda ise türbülans Schmidt sayısını düşey pozitif yüzücü jetlerin uygun bir şekilde tahmin edilmesini mümkün kılacak şekilde ayarlayıp bu modeli eğimli negatif yüzücü jetlerin analizi için kullanmışlardır. Kalibre edilmiş modelin özellikle yayılım ve seyrelme konularında tahminleri geliştirdiğini ancak genel toplamda aradaki farkın kayda değer olmadığını; deneysel verilerle kıyaslama yapıldığında iki modelin de jet izdüşümünü iyi tahmin ettiğini ancak ortalama-bütünleşik konantrasyonların gerçekte olduğundan fazla tahmin edildiğini gözlemlemişlerdir.

Firoozabadi vd. (2009) çalışmalarında, üniform bir hız ve konsantrasyona sahip kararlı bir yoğunluk akıntısının dar bir savaktan daha az yoğun bir alıcı ortam suyunun bulunduğu geniş bir kanala verildiği bir durumu hem fiziksel hem de sayısal modelleme yöntemleriyle incelemişlerdir. Sayısal modelleme için bir düşük Reynolds sayısı $k - \varepsilon$ türbülans modeli (Launder ve Sharma, 1974) ve standart k-ε model, kullanmışlar, ağ

örgüsü yapısı için 200x60x73 değerlerini seçmişlerdir. Standart modelin Launder-Sharma modeline göre daha düşük bir maksimum hız hesapladığını, bunun modelin serbest kayma tabakasındaki türbülans kinetik enerjisi değerini olduğundan fazla tahmin etmesi ve bunun sürüklenme ve yükseklik değerlerini yükseltmesi sebebiyle olduğunu ifade etmişlerdir. Düşük Reynolds sayısı $k - \varepsilon$ modelinin standart modele göre üç boyutlu yoğunluk akıntıları için daha kabul edilebilir sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmişlerdir.

Abou-Elhaggag vd. (2011) çalışmalarında kısıtlı tahliye alanları bulunan ortamlara yapılan yoğun su deşarjları için deneysel ve sayısal model çalışmaları yürütmüşlerdir. Uzunluğu 12 m, genişliği ve su derinliği 6 m olan bir prototipi 1:10 ölçeğinde modelleyerek farklı çıkış ucu çapları, yoğunluklar ve yoğunluksal Froude sayıları için 9 deney yapmışlardır. Yoğunluksal Froude sayısı ile penetrasyon derinliği (maksimum saçak yüksekliği) arasında, lineere yakın bir ilişki bulmuşlardır. Ardından deney sonuçlarını literatürdeki mevcut deneysel, matematiksel ve sahada yapılan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Bir sonraki adımda ANSYS Fluent yazılımını kullanarak; her biri için üçer farklı hız değerinin kullanıldığı iki farklı yoğunluk değeri kullanarak ve çapı sabit tutarak toplamda altı farklı simülasyon yapmışlardır. Sayısal modeli kullanarak penetrasyon derinliğini ve çıkış ucunun üstündeki farklı konumlardaki yoğun su atılım eğrilerinin zamana bağlı değişimlerini belirlemişler; çıkış ucundan en uzak ve serbest su yüzeyine en yakın noktalar için çok tepeli atılım eğrilerinin bulunduğunu saptamışlardır.

Muller vd. (2011) çalışmalarında Avustralya’da farklı desalinasyon tesislerinde yoğun suyun dağılımını ve davranışını incelemek için kullanılan üç farklı yöntemin verdiği sonuçları irdelemişlerdir. İncelenen ilk yöntem, Gold Coast ve Sydney desalinasyon tesisleri için yapılması planlanan deşarj tesislerinin tasarımında kullanılan, Roberts vd. (1997) tarafından geliştirilen ampirik modeldir. İncelenen diğer bir yöntem, Adelaide ve Melbourne desalinasyon tesislerinin tasarımında kullanılan ANSYS Fluent isimli hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. Deneysel verilere göre kabul edilebilir sonuçlar veren yazılımın yakın alan karışımını gerçek değerlerden az tahmin ettiği ve yakın alanın ötesinde kaydedilen türbülanslı karışım değerlerini yansıtamadığı ifade edilmiş; ancak yazılımın daha önceden karışmış yoğun tuzlu suyun yeniden sürüklenmesiyle oluşan tuzluluğu modelleyebilmesi ve saçaklar arasındaki etkileşimleri görselleştirebilmesi sebebiyle, bahsedilen kısıtlamaların da göz önünde bulundurularak çoklu saçakların dinamikleri ve hem durgun hem de akıntıların etkisi altındaki alıcı ortamlarda gerçekleşen etkileşimlerin incelenmesi için kullanılmasının uygun olduğu ifade edilmiştir. İncelenen

üçüncü yöntem olan GCOM3D yazılımının da akıntı ve gelgit hareketlerini iyi tahmin edebildiği ve karışan yoğun suyun hareketinin modellenmesi için güvenle kullanılabileceği belirtilmiştir.

Kheirkah Gildeh vd. (2015) çalışmalarında 30° ve 45° açıyla yapılan yoğun su deşarjlarının karışım davranışlarını OpenFOAM yazılımını kullanarak sayısal modelleme yöntemiyle incelemiş, türbülans modeli olarak RNG, realizable ve lineer olmayan $k - \varepsilon$, LRR ve Launder-Gibson modellerini kullanmışlardır. Yoğun jetlerin maksimum yükseklikleri, merkez çizgisi pikinin konumu ve dönüş noktası gibi geometrik özelliklerini, aynı zamanda karışma ve seyrelme durumlarını da analiz etmişler ve sonuçları başka deneysel ve analitik araştırmaların sonuçlarıyla kıyaslamışlar; LRR ve realizable $k - \varepsilon$ modellerinin incelenen durumlar için daha başarılı tahmin yaptıklarını gözlemlemişlerdir.

Akbari ve Ebrahimi (2016) çalışmalarında ANSYS Fluent yazılımını kullanarak, sıg sulara yapılan yoğun deşarjların davranışlarını, hem jet ile aynı yönde hem de jete zıt yönde alıcı ortam akıntıları bulunan durumlar için incelemişlerdir. Akıntıların jet ile aynı yönde olması durumunda durgun alıcı ortam durumuna göre jetin daha uzağa gittiği ve maksimum yüksekliğinin azaldığını, akıntının zıt yönde olması durumunda ise durumun tam tersi olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda basınç kaybını simüle etmenin tasarım aşaması için önemli olduğu sonucuna da varmışlardır.

Crowe vd. (2016) yaptıkları deneysel çalışmada başlangıç açıları 15° - 75° arasında değişen negatif yüzen jetlerin davranışlarını incelemek için bir parçacık görüntülemeli hız ölçüm sistemi kullanmışlardır. İç çapları 2.43, 4.40 ve 7.19 mm olan kaynaklardan, Froude sayısı 10.1-81.0 aralığında değişen farklı debilerdeki atıksu temsili akışkan boyutları 2.30 m uzunluk, 1.23 m derinlik ve 1.78 m genişlik değerlerine sahip bir deney tankına vermiş; farklı açı, çap, debi ve Froude sayısı değerleri için toplamda 45 deney yapmışlardır. Sonuç olarak hız profillerinin şeklinin başlangıç Froude sayısından bağımsız olduğunu, akışın dış kısmında maksimum yükseklik ve geri dönüş noktasındaki eksenel ortalama hız profillerinin Gauss formunda kaldıklarını ancak akışın iç kısmında kaynak yakınlarındaki Gauss formunun geri dönüş noktasındaki merkez çizgisinden doğrusal bozulmaya doğru geçiş yaptığını, maksimum yükseklik ve dönüş noktasındaki merkez çizgisi hızlarının başlangıç Froude sayısı ile doğrudan ilişkili olduğunu; CORJET ve VISJET araçları kullanılarak yapılan integral model tahminlerinin deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu ancak merkez çizgisi hız değerlerinin bu modeller tarafından olduklarından fazla tahmin edildiklerini saptamışlardır.

Robinson vd. (2016) çalışmalarında yüzücü ve yoğun jetlerin davranışlarını Fluidity HAD yazılımını kullanarak incelemişler; yüzücü yoğun jetlerin yakın alandaki davranışlarının simülasyonu için bir ön doğrulama yapmış ve yüzücü jetler için tatmin edici sonuçların alındığını ancak simülasyonun yoğun jet içerisine sürüklenmeyi gerçekte olduğundan az tahmin ettiğini ve dolayısıyla yakın alandaki konsantrasyonu olduğundan daha fazla gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Yan ve Mohammadian (2017), yanal sınırlamaya maruz düşey yüzücü jetlerin yakın alan akış ve karışma özelliklerini OpenFOAM yazılımını ve farklı $k - \varepsilon$ türbülans modellerini kullanarak, farklı sınırlama indeksleri ve jet yoğunluksal Froude sayıları gibi parametrelerin etkisi altında sayısal olarak modellemişler ve sonuçları mevcut deneysel verilerle kıyaslamışlardır. Bu tip deşarjlarda gerekli düzeltmeler yapıldığı sürece, $k - \varepsilon$ türbülans modellerinin kullanımının uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Ünsal Karakuş (2018) çalışmasında, eğimli bir yüzey üzerinde hareket eden bir yoğunluk akıntısının ortamdaki yanal akıntılarla girdiği etkileşimleri incelemek amacıyla ANSYS Fluent yazılımını kullanarak bir sayısal model oluşturmuştur. Öncelikle Firoozabadi vd. (2009) çalışmasında kurulan deney düzeneğini baz alarak bir referans model oluşturmuş, bu model üzerinde şemalar, türbülans modelleri, katsayılar gibi parametreler üzerinde değişiklikler yaparak kendi modelini oluşturmuş, ardından 0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.03 ve 0.05 m/s hızlara sahip yanal akıntılar tanımlamış ve toplam altı farklı simülasyon yaparak yoğunluk akıntısının bu farklı yanal akıntı hızları durumunda bu akıntılarla nasıl etkileşime girdiğini incelemiştir.

Ardalan ve Vafaei (2019) çalışmalarında durgun bir alıcı ortama 45° açıyla yapılan termal-tuzlu atıksu deşarjını OpenFOAM yazılımını kullanarak Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli ile modellemişler, sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sayısal ve fiziksel modellerden elde edilen sonuçların uyum içerisinde olduğunu ve kurdukları modelin termal-tuzlu jetlerin davranışlarını tahmin etme konusunda başarılı olduğunu ifade etmişlerdir.

Castro-Faccetti vd. (2019) çalışmalarında tek ve çoklu çıkış ucu bulunan yayıcı borulardan yapılan atıksu deşarjlarının yakın alan davranışları için, zamana bağlı RANS $k - \varepsilon$ ve $k - \omega$ SST türbülans modellerini kullanarak bir simülasyon gerçekleştirip bunu doğrulamış; doğruladıkları bu yöntemi Kolombiya'da bulunan Cartagena deşarj hattı için kullanmışlar, sonuç olarak RANS modellemesinin yüzücü jetlerin modellenmesi açısından kullanımının uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Yan vd. (2019) çalışmalarında bir rozet tipi çoklu çıkış uçlu yayıcıdan deşarj edilen yüzücü jetlerin sayısal modellemesini standart ve RNG $k - \varepsilon$ türbülans modelleri kullanarak yapmışlardır. Sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslayarak uyumlu olduklarını gözlemlemiş ve bu tarz modellemelerin rozet tipi grup jetlerin incelenmesi için uygun olabileceği, aynı zamanda RNG $k - \varepsilon$ modelinin standart modele kıyasla daha iyi sonuç verdiğini saptamışlardır.

Yan ve Mohammadian (2019) çalışmalarında, çıkış uçları arasındaki mesafenin ortalama olduğu çoklu çıkış uçlu yayıcı borulardan yapılan eğimli yoğun su deşarjlarını standart ve RNG $k - \varepsilon$ türbülans modellerini kullanarak, OpenFOAM yazılımı yardımıyla incelemişlerdir. Sonuçların deney sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğunu gözlemlemiş ve çoklu çıkış uçlu yayıcılardan yapılan yoğun su deşarjlarının analizi için sayısal modellemenin uygun olduğunu ifade etmişler; aynı zamanda çalışmalarında RNG $k - \varepsilon$ modelinin standart $k - \varepsilon$ modeline kıyasla, hesaplama süresini ve eforunu fazla artırmadan daha iyi sonuç verdiğini de belirtmişlerdir.

Castro-Faccetti (2020) çalışmasında, çoklu çıkış ucu bulunan deniz deşarjı yayıcı borularının yakın ve uzak alan seyrelme ve atıksu hareketini tahmin etme gücünü artırmak için, yakın alan HAD modellerinin uzak alan sirkülasyon modelleriyle nasıl birleştirilebileceğini değerlendirmeye çalışmıştır. Tek çıkış ucundan yapılan yoğun su deşarjının simülasyonu için Crowe vd. (2016) çalışmasındaki deney düzeneğini baz almış; yüzen jetin izdüşümü, hızı ve seyrelmesi parametrelerini deneysel çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslamıştır. RANS modellerinin, özellikle yüksek jet eğimi açılarında, açılı yoğun jetin iç kısımlarındaki geri çekme de dahil olmak üzere, tek çıkış uçlu yoğun su deşarjlarının dinamiklerini başarılı biçimde tahmin edebildiklerini ve bunun diğer sürüklenme modellerine kıyasla daha iyi bir jet hızı ve seyrelme tahminini mümkün kıldığını ifade etmişlerdir.

Mohammadian vd. (2020) atıksu deşarjı üzerine yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellemelerini detaylı olarak inceledikleri bir literatür derlemesi çalışması yürütmüşlerdir. Endüstrideki uygulanabilirlikleri göz önüne bulundurularak en çok eğimli yoğun deşarjların sayısal olarak incelendiğini, birçok çalışmada modellerin kalibrasyonu için laboratuvar ölçekli deneylerin kullanıldığını, jet iz düşümlerinin, hızlarının ve seyrelmelerinin daha çok incelendiğini ve bu çalışmalar için daha çok RANS ve LES türbülans modellerinin tercih edildiğini; düşey jetlerin de giderek artan bir sıklıkla sayısal modellemelere konu olduğunu ve özellikle sığ sularda yapılan ve su yüzeyiyle etkileşimin olduğu düşey deşarjların sayısal yöntemlerle incelendiğini gözlemlemişlerdir.

Yan vd. (2020) çalışmalarında durgun alıcı ortama çoklu çıkış ucu bulunan bir yayıcıdan düşey yüzücü jetlerin karışma ve seyrelme karakteristiklerini OpenFOAM yazılımını kullanarak sayısal modelleme ile incelemişlerdir. Türbülans modeli olarak standart $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$, standart $k - \omega$ ve $k - \omega$ SST modellerini kullanmışlar, simülasyon sonuçlarını mevcut deneysel verilerle kıyaslamışlardır. RNG $k - \varepsilon$ modelinin en iyi sonuçlarını verdiğini saptamış, doğrulanmış modeli değişen çıkış ucu arası mesafesinin düşey yüzücü jetleri nasıl etkilediğini incelemek için kullanmış; çıkış uçları arası mesafenin jet merkez çizgisi boyunca konsantrasyon azalmasının üzerindeki etkisini ortaya koyan yeni bir matematiksel ifade önermişler, çıkış uçları arası mesafenin daha fazla olması durumunda jetlerin birleşme noktasının daha uzakta olduğunu gözlemlemişler, çıkış uçları arasındaki mesafenin deşarj yapılan düşey doğrultuya dik bulunan yatay x doğrultusu boyunca enine konsantrasyonu dolaylı olarak etkilediğini saptamışlardır.

Danish ve Murali (2021) çalışmalarında önce durgun ve tabakasız bir alıcı ortama tek bir dairesel çıkış ucundan deşarj edilen, ardından aralarındaki mesafenin değiştirildiği çoklu çıkış ucu bulunan bir sistemden deşarj edilen atıksuların davranışlarını ve sistemlerin performanslarını incelemişlerdir. Modelleme için ANSYS Fluent yazılımını ve Realizable $k - \varepsilon$ modelini kullanmışlardır.

Kheirkah Gildeh vd. (2021) çalışmalarında, Jiang vd. (2014) çalışmasındaki deneysel sonuçları baz alarak, 30° ve 45° ’lik açılarla sığ bir alıcı ortama deşarj edilen yoğun suyun davranışının incelenmesi için sayısal modelleme çalışması yürütmüşler; Realizable $k - \varepsilon$ ve $k - \omega$ SST, $v^2 - f$, LRR ve SSG türbülans modelleri olmak üzere beş farklı RANS modeli kullanmışlardır. Baz alınan çalışmada tanımlanan tam batık, saçak temas ve merkez çizgisi çarpma rejimlerini sayısal olarak yeniden oluşturmuşlardır. Yüzey bağlanmasının çıkış ucundan itibaren dönüş noktası mesafesini artırdığını ve yüzey seyrelmesinin tam batık rejimden merkez çizgisi çarpma rejimine geçişte azaldığını; test edilen modeller arasında LRR ve SSG modellerinin deşarj edilen atıksuyun kinematik ve seyrelme özelliklerini daha iyi tahmin ettiğini gözlemlemişlerdir.

Kheirkah Gildeh vd. (2022) çalışmalarında yoğun su jetlerinin seyrelmesi ve karışması için en kötü senaryo olarak tanımladıkları, sığ sularda düşey doğrultuda yapılan ve su yüzeyini de etkileyen yoğun su deşarjı için OpenFOAM yazılımını kullanarak sayısal modelleme yapmışlardır. Türbülans modeli olarak LRR modelini, yoğun jetin geometrik ve seyrelme özelliklerini karakterize etmek için Reynolds Gerilmesi Modeli’ni (RSM) tercih etmişlerdir. Froude sayısının 9-24 aralığında değiştiği simülasyonlar yapmışlardır. Model

geometrisini 1.15 m uzunluğunda, 1.15 m genişliğinde ve değişen koşullara bağlı olarak farklı değerler alan bir derinliğe sahip bir bölge olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak, orta rejim koşulları altında düşey deşarjın maksimum yüksekliğinin daha fazla olduğunu; orta rejimde düşey jetin dönüş noktası minimum seyrelmesinin derin rejime kıyasla daha fazla olduğunu, bu değerlerin çarpışan rejimde önemli ölçüde azaldığını saptamışlardır.

Moshiri-Tabrizi vd. (2023) çalışmalarında, hesaplama için harcanan zaman ve efor açısından kullanımı üç boyutlu modellere göre daha kolay olan iki boyutlu modellerin hem durgun hem de dinamik alıcı ortam koşulları altında deniz deşarjı modellemesi için kullanılıp kullanılamayacağını saptamayı ve sonuçları integral modellerin sonuçlarıyla kıyaslamayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak, önerilen iki boyutlu modelin her iki alıcı ortam durumu için integral modellerden daha iyi performans gösterdiğini ve üç boyutlu modellere kıyasla daha hızlı sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Amiri vd. (2024) çalışmalarında yoğun su deşarjlarında düşük jet hızları için venturi nozul kullanımının sağlayacağı faydaları araştırmak amacıyla; 60° açıyla bir venturi nozul kullanılarak deşarj edilen yoğun su jetlerinin davranışlarını hem sayısal hem fiziksel modeller ile incelemiş, sonuçları bir basit jet ile kıyaslamışlardır. Sayısal modellemede OpenFOAM yazılımı ile LES modelini kullanmış, sayısal modelleme sonuçlarını doğrulamak için yaptıkları deneylerde de LIF yöntemiyle çalışmışlardır. Sonuç olarak venturi nozul için geliştirilen LES modelinin akış davranışını başarılı bir biçimde tahmin edebildiğini, ancak akışın geometrik ve karışım özelliklerini deneysel çalışmaların sonuçlarına kıyasla daha düşük değerler olarak tahmin ettiğini saptamışlardır.

Saeidi Hosseini (2024) çalışmasında OpenFOAM yazılımını kullanarak çoklu çıkış ucu bulunan ve yoğun su deşarjı yapan yayıcı boruların kullanımı durumlarında Reynolds Gerilmesi Modeli'nin (RSM) tahmin gücünü test etmek amacıyla Launder, Reece ve Rodi (LRR) türbülans modelini kullanmış, modeli doğrulamak için sonuçlarını mevcut deneysel sonuçlarla kıyaslamış, sonuç olarak modelin standart ve RNG $k - \epsilon$ modellerinden daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemiş ve LRR modelinin çoklu çukuş ucu bulunan yayıcı borulardan deşarj edilen yoğun su jetlerinin karışım davranışlarını tahmin etme konusunda güvenilir bir araç olduğunu ifade etmiştir. Ardından bu doğruladığı modeli ve lazerle uyarılmış floresan metodunu (LIF) kullanarak üniform olmayan çıkış ucu düzenlerinin karışma süreçleri üzerindeki etkilerini araştırmış, tek bir çıkış ucunun yanındaki çıkış uçlarının farklı açılarla yerleştirilmesi durumunda daha uzun bir jet izdüşümü ve daha yüksek birinci seyrelme verimi sağladığını saptamıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, yoğun su deşarjının alıcı ortamda sebep olduğu türbülanslı yoğunluk akıntılarını modellemek amacıyla HAD modellemesi yöntemi, çözümci olarak ise ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır.

Sayısal modelleme yöntemleri kullanırken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, yapılan analizlerin deneysel veya arazi çalışmalarının sonuçlarıyla kıyaslanarak doğrulanmasıdır. Dolayısıyla bir referans model oluşturmak ve bu modeli kalibre etmek gerekmektedir. Bu çalışmada öncelikle, Firoozabadi vd. (2009) tarafından yürütülen deneysel çalışmanın sonuçları modellenmiş ve mevcut çalışma ile karşılaştırılarak model kalibrasyonu sağlanmıştır. Söz konusu referans model Ünsal Karakuş (2018) çalışmasında da kalibrasyon amacı ile kullanılmıştır.

Bu bölümde öncelikle ANSYS Fluent tanıtılmış ve bu yazılımla HAD modellemesinin nasıl yapıldığına kısaca değinilmiştir. Ardından baz alınan referans model ve kalibre edilmiş model tanıtılmıştır. Son olarak da jet davranışı, karışım ve seyrelme üzerinde etkili olan bazı tasarım parametrelerinin bu çalışmada neden seçildiği açıklanmış ve bu doğrultuda oluşturulan model senaryoları özetlenmiştir.

2.1. ANSYS Fluent ile HAD Modellemesi

ANSYS Fluent kullanımı giderek yaygınlaşan bir HAD modelleme yazılımıdır. Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanarak en karmaşık geometrilerdeki akış alanı özelliklerini çözümlemeyi mümkün kılmaktadır. Hem iki hem üç boyutlu simülasyonlar sayesinde doğada yoğunluk akıntılarının meydana geldiği her alanda olayların yapısını analiz etmeyi mümkün kılan Fluent, yoğun suların alıcı deniz ve okyanus ortamlarına deşarjında yoğun suyun jet davranışını, karışımını ve seyrelmesini de incelemeye yardımcı olmaktadır (Ünsal Karakuş, 2018).

Fluent, ANSYS Inc. tarafından piyasaya sürülen Workbench arayüz programındaki birçok yazılımdan biridir. Workbench'in sol tarafta bulunan menüsünden bu yazılımların herhangi birisi seçilebilmektedir. Fluent açıldığı zaman Proje Şematiği adı verilen çalışma alanına yazılım bünyesinde bulunan araçların olduğu bir kutucuk gelir. Bu araçlar sırasıyla

“Geometry” (geometri), “Mesh” (ağ örgüsü), “Setup” (kurulum), “Solution” (çözüm) ve “Results” (sonuçlar) şeklindedir (Ünsal Karakuş, 2018).

Geometri kısmında kullanılabilecek üç araç vardır: DesignModeler, SpaceClaim ve Discovery. Arayüzleri birbirinden farklı olan ancak temelde benzer işlevler gören bu araçların herhangi birisi kullanılarak irdelenmek istenen olayın modelinin geometrisi oluşturulabileceği gibi, AutoCAD veya SolidWorks benzeri ortamlarda oluşturulan geometriler buraya aktarılabilir. Kullanıcılar geometriye sağ tıklayarak kullanmak istedikleri aracı seçebilmektedirler (Ünsal Karakuş, 2018). Bu çalışmada geometri DesignModeler aracı kullanılarak oluşturulmuştur. DesignModeler’da geometri ana hatlarıyla çizildikten sonra üç boyutlu katı cisimler oluşturulabilir, yüzeyler üzerindeki çizimlerden farklı yüzeyler oluşturulabilir ve bu yüzeyler isimlendirilebilir. Yüzeylerin doğru isimlendirilmesi, aynı isimlerin farklı yüzeyler için kullanılmaması gibi konular hem kullanıcının işini kolaylaştırmak açısından hem de bir sonraki ağ örgüsü adımında sorun yaşanmaması açısından önemlidir.

Ağ örgüsü kısmı, bir nevi oluşturulan modeli hücelere ayıracak olan çizgilerin çekilmesi işleminin gerçekleştirildiği aşamadır. Fluent yazılımında ağ örgüsü penceresinde hem üstte hem de sol tarafta bulunan menülerdeki araçlar ve komutlar kullanılarak, farklı metotlarla istenilen şekillerde ve sıklıklarda ağ örgüsü oluşturulabilmektedir. Ağ örgüsü yeterli kalitede olmazsa doğru sonuç elde edilmesi zordur. Ağ örgüsünün kalitesinin önemli bir ölçütü sıklığıdır; esasen modelin mümkün olduğunca fazla sonlu hacime bölünmesi sonucun doğruluğunu artırır, ancak bu her zaman uygun olmayabilir.

Toplam hücre sayısından ayrı olarak, doğru bölgelerde ağ örgüsünün doğru şekilde sıklaştırılması da ağ örgüsü kalitesi için belirleyicidir. Deniz deşarjı konusundan örnek vermek gerekirse; birinci faz olarak tanımlanan durgun, yani hızı olmayan, alıcı ortam suyuna ikinci faz olarak tanımlanan ve yüksek jet hızına sahip atıksuyun giriş yaptığı yüzeyde, özellikle bu iki fazı birbirinden ayıran kenar kısımlarında geçişin daha iyi olması için hücrelerin iyice detaylandırılması önemlidir. Aksi takdirde türbülans yeteri kadar iyi modellenemeyebilir. Bu tez çalışmasında referans modelin ağ örgüsü oluşturulurken hem genel ağ örgüsü özelliği hem de atıksuyun alıcı ortama giriş yapacağı dairesel yüzeyin daha iyi detaylandırılabilmesi için “Edge Sizing” adı verilen özellik kullanılmıştır. Edge Sizing ile dörtgensel giriş yüzeyinin çevresi 100’e bölünmüş, geometrinin kalan kısmı için eleman boyutu 0.03 değerine sahip olacak şekilde ağ örgüsü oluşturulmuştur.

Proje şematiği kısmından “Kurulum” aracı açılmak istendiğinde öncelikle bir iletişim penceresi aracılığıyla “Fluent Başlatıcısı” (Fluent Launcher) açılmaktadır. Burada “Giriş” sekmesinde modelin 2 veya 3 boyutlu gösterilmesi, çifte hassasiyet kullanılıp kullanılmayacağı ve çözümlemede kullanılacak işlemci çekirdeği sayısı konuları ile ilgili seçimler yapılabilmekte, aynı zamanda çalışma dizini belirlenebilmektedir. “Genel Seçenekler” sekmesinde “Ağ örgüsünü okumadan sonra göster” seçeneği varsayılan olarak işaretlidir. “Paralel Ayarları” sekmesinde çözümlemenin birden fazla işlemci çekirdeği kullanılarak yapılması durumunda yapılabilecek bazı tercihler sunulmaktadır. Fluent yazılımında paralel işlem yerine seri işlem seçeneği de tercih edilebilir (Ünsal Karakuş, 2018). Ancak bu yazılım kullanılarak irdelenecek olayların karmaşıklığından ötürü yapılacak simülasyonların da basit olmadığı gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, tek bir işlemci çekirdeği kullanarak simülasyon yapmanın hesaplama süresini çok ciddi miktarda uzatabileceği unutulmamalıdır. Bu çalışma kapsamında, ANSYS öğrenci sürümünün kısıtlamalarından ötürü, bütün modellerin çözümlemesinde dört işlemci çekirdeği kullanılmıştır. Öğrenci sürümünde daha fazla sayıda işlemci çekirdeği kullanılmasına izin verilmemektedir.

Giriş sekmesinde gerekli ayarlar yapıp onay verdikten sonra kurulum bölümünün çalışma alanına geçilebilir. Bu pencerede yine üstte bulunan menü aracılığıyla işlemler yapılabilir. Soldaki menü kurulum aşamasının üç alt grubunu ve bunlar kapsamında kullanılacak araçları göstermektedir: Kurulum, çözümleme ve sonuçlar. Aynı zamanda bu en soldaki menünün hemen sağında bulunan “Görev Sayfası” isimli pencereden yapılan işlemle ilgili detaylara karar verilebilmektedir. Ancak görev sayfasında her araç için detaylı seçenekler çıkmamakta; bunlar için çoğunlukla bir iletişim penceresi açılmaktadır. Kurulum aşamasının üç ana bileşeninden ilki olan aynı isimli kurulum bölümünün alt menüleri arasında “Genel”, “Modeller”, “Malzemeler”, “Hücre Bölgesi Koşulları”, “Sınır Koşulları”, “Ağ Örgüsü Arayüzleri”, “Yardımcı Geometri Tanımları”, “Dinamik Ağ Örgüsü”, “Referans Değerler”, “Referans Çerçeveleri”, “İsimlendirilmiş İfadeler” ve “Eğrisel Koordinat Sistemi” seçenekleri yer almaktadır. İrdelenen durum ve yapılan modelleme doğrultusunda bu seçeneklerden ihtiyaç duyulanlar kullanılarak istenilen model rahatlıkla oluşturulabilmektedir.

“Genel” seçeneğinin altında ağ örgüsünün kontrolü yapılabilir, çözüm basınca veya yoğunluğa dayalı olarak ayarlanabilir, hız formülasyonunun mutlak veya bağıl olması durumuna karar verilebilir, yerçekimi ivmesinin değeri, yönü ve farklı yönlerdeki

bileşenleri ayarlanabilir (Ünsal Karakuş, 2018). Bu çalışmada çözücü tipi basınç-bazlı, hız formülasyonu mutlak, zaman geçişli olarak ayarlanmış; yerçekimi ivmesi için sadece y bileşeni -9.81 m/s^2 olarak girilmiştir. Bunun sebebi modelin geometrisi oluşturulurken DesignModeler arayüzünde xy düzlemi üzerinde çizim yapılması ve y doğrultusunun düşey doğrultu olmasıdır.

Modeller sekmesinin altında kullanılacak türbülans modeli seçilebilir, katsayıları varsayılan değerler olarak kullanılabilir veya değiştirilebilir. “Çokfazlı” seçeneğinin seçilmesi durumunda açılan pencerede homojen ve homojen olmayan modeller arasında seçim yapılabilmekte, faz sayısı seçilebilmekte, ardından sonraki adımlarda veya daha önceden tanımlanan materyallerin bu fazlara ataması yapılabilmektedir (Ünsal Karakuş, 2018). Bu çalışmada homojen modellerden “karışım” (mixture) tercih edilmiş, faz sayısı fazlar alıcı ortam suyu ve yoğun su olduğundan iki olarak belirtilmiştir. Cisim kuvvetleri formülasyonunda yerçekimi kuvvetlerinin etkisi söz konusu olduğundan, “Örtük Cisim Kuvvetleri” seçeneği işaretlenmiştir. Model parametreleri altında “kayma hızı (slip velocity)”, hacim oranı parametreleri altında “örtük (implicit)”, ayarlar altında arayüz modellemesi tipi için “dağılmış (dispersed)” seçenekleri işaretlenmiştir.

Çok fazlı seçeneğinin ardından gelen “Enerji” seçeneğinde model gerektirirse enerji denklemleri aktif edilebilir. Ardından gelen “Viskoz” seçeneği altında türbülans modeline karar verilir; burada kullanıcıya Akışkan model, Laminar model, Spalart-Allmaras modeli, $k - \varepsilon$ modeli, $k - \omega$ modeli, Geçiş $k - kl - \omega$ modeli, Geçiş SST modeli, Reynolds Gerilmesi modeli ve bazı diğer sayısal benzetim metotları seçenekleri sunulmaktadır. Seçilen modele bağlı olarak pencerenin düzeni ve kullanıcının tercihinine sunulan ayarlar değişmektedir. Bu çalışmada RNG $k - \varepsilon$ modeli seçilmiş, yakın duvar davranışı için “Standart Duvar Fonksiyonları” seçeneği seçilmiş; model katsayıları C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ için sırasıyla 0.09, 1.44, 1.92 ve 0.2 değerleri girilmiş, Dağılım Prandtl Sayısı için ise 0.75 değeri kullanılmıştır. Modeller sekmesinin altındaki “Işınım”, “Isı değiştirgeci”, Türler”, “Ayrık Fazlar” gibi bazı diğer seçenekler de şartların gerektirmesi durumunda istenilen modellemenin yapılabilmesi için kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, modeller sekmesinde başka herhangi bir araç kullanılmamıştır.

“Malzemeler” sekmesinde akışkan ve katı malzeme tanımlamaları yapılabilir ve bunların yoğunluk ve viskozite değerleri ve kimyasal formülleri elle girilebilir; aynı zamanda malzemeler “Fluent Veritabanı”, “GRANTA MDS Veritabanı” ve “Kullanıcı-Tanımlı Veritabanı” olarak isimlendirilen üç farklı veritabanından da eklenebilir.

Malzemelerin veritabanından eklenmesi durumunda özelliklerinde elle değişiklikler yapılamamaktadır. Burada malzemeler oluşturulduktan sonra, Çokfazlı seçeneğinin altındaki “Fazlar” sekmesinde oluşturulan malzemeler ana faz olan birinci faza ve ikinci faza atanabilir. Bu çalışmada alıcı deniz ortamı suyunu temsilen oluşturulan malzeme birinci faz, deşarj edilen desalinasyon atığı yoğun tuzlu suyu temsilen oluşturulan malzeme ikinci faz olarak atanmıştır.

“Hücre Bölgesi Koşulları” sekmesi altında hücre bölge türü ayarlanabilir, bölge türleri için farklı parametreler tanımlanabilmektedir (Ünsal Karakuş, 2018).

“Sınır Koşulları” sekmesi altında yapılacak tanımlamalar ve ayarlar modelin doğruluğu açısından son derece önemlidir. Burada, sınırlardaki akış davranışları belirlenmektedir. Akış giriş ve çıkışları için Fluent yazılımında tanımlanan farklı tipler bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları eksen (axis), boşaltım fanı (exhaust-fan), hız girişi (velocity inlet), arayüzey (interface), kütle akış girişi (mass-flow inlet), kütle akış çıkışı (mass-flow outlet), dışarı akış (outflow), basınç uzak alanı (pressure far-field), basınç çıkışı (pressure outlet), giriş deliği (inlet-vent), giriş fanı (intake-fan) ve çıkış deliğidir (outlet-vent). Bunlar akışın hızını, varsa farklı yönlerdeki hız bileşenlerini, akışın skaler özelliklerini, akış girişlerindeki basıncı ve diğer bazı skaler özellikleri, akış çıkışlarındaki statik basıncı ve benzeri özellikleri tanımlamak için kullanılmaktadır.

Bunlara ek olarak duvar sınır koşulları kullanılarak sıvı ve katılar bağlanabilir; simetri sınır koşulu kullanılarak kaymanın sıfır olduğu viskoz akışkanlardaki sürtünmesiz sınırlar modellenebilmektedir (Ünsal Karakuş, 2018). Bu çalışmada yoğun suyun alıcı ortama giriş yaptığı dürtgensel yüzey için hız girişi sınır koşulu, bu girişin bulunduğu yüzeyin kalan kısmı ile sağ, sol ve alt yüzeyler için duvar sınır koşulu, üst yüzey için simetri sınır koşulu, giriş yüzeyinin tam karşı tarafındaki yüzey için ise dışarı akış sınır koşulu tanımlanmıştır. Giriş yüzeyindeki sınır koşulu atanırken, yoğun suyun giriş hızı da referans model baz alınarak 0.2667 m/s olarak atanmıştır.

Kurulum aşamasının ikinci ana bileşeni olan Çözümleme kısmının ilk sekmesi olan “Yöntemler (Methods)” altında basınç-hız bağlaştırması şeması; mekânsal ayrıştırmada gradyan, basınç, momentum, hacim oranı, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı için çözüm şemaları ve bazı diğer formülasyon ayarları yapılabilmektedir. Burada yapılabilecek ayarlar, çokfazlı bölümünde karışım (mixture) veya Eulerian modelin seçilmesi durumunda farklılık göstermektedir. Bu çalışmada referans model için model karışım, çözüm şeması SIMPLE olarak seçilmiş; mekânsal ayrıklaştırmada gradyan için

“En küçük kareler bazlı”, basınç için PRESTO!, momentum, hacim oranı, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı için QUICK seçenekleri seçilmiştir. Süreksiz formülasyonu için birinci dereceden örtük seçeneği tercih edilmiştir.

Yöntemler sekmesinin ardından “Kontroller” sekmesi gelmektedir. Burada basınç, yoğunluk, cisim kuvvetleri, momentum, kayma hızı, hacim oranı, türbülans kinetik enerjisi, türbülans yayılım oranı ve türbülans viskozitesi için varsayılan olarak verilen değerler değiştirilebilir. Bu çalışmada bu parametreler için sırasıyla 0.2, 1, 1, 0.7, 0.1, 0.5, 0.7, 0.7 ve 1 değerleri kullanılmıştır.

Bir başka sekme olan “Başlatma (Initialization)” sekmesine tıklandığında açılan görev sayfasında ilk değer atamaları yapılmaktadır. Değerler atandıktan sonra “Initialize” seçeneğine tıklanılmalı ve değerler kaydedilmelidir.

Son olarak “Koşturmayı Başlat (Run Calculation)” seçeneğine tıklanır. Burada zaman adımı sayısı ve boyutu, zaman adımı başına yapılacak iterasyon sayısı, kaç iterasyonda bir raporlama yapılacağı belirlenebilir. Ardından hesaplama başlatılır.

Kurulum aşamasının ardından Çözümleme aşaması gelmektedir. Burada kurulum aşamasında sunulan bütün ayarlara erişilebilir, yapılan hesapların bitmesinin ardından ayarlar değiştirilerek yeniden hesaplama başlatılabilir, aynı zamanda görsel ve sayısal sonuçlar da alınabilir ve dışarı aktarılabilir.

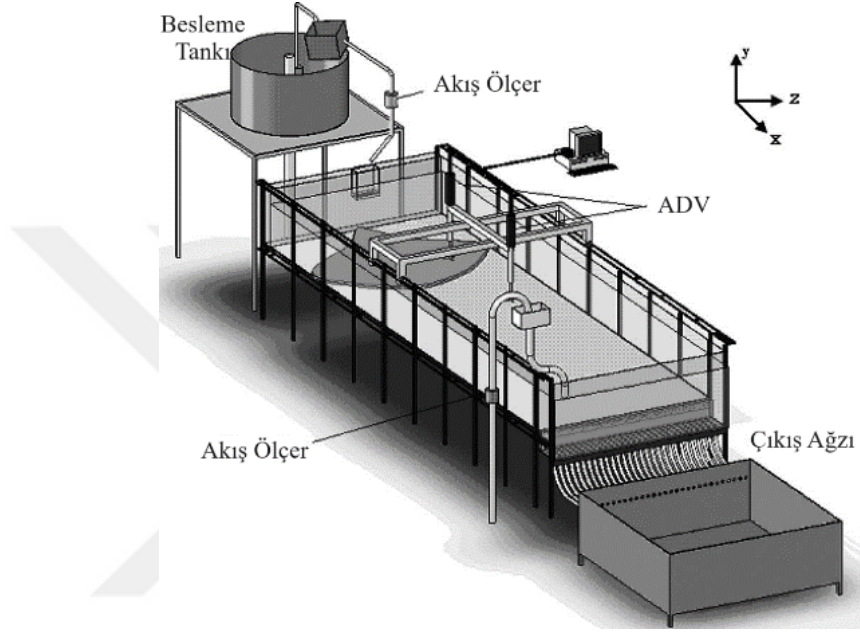
Son olarak Sonuçlar aşamasında çözülmüş modellerin sonuçları ile kontur çizgileri, grafikler, sayısal veriler elde edilebilir; bunlar kullanılmak üzere farklı yazılım ortamlarına aktarılabilir (Ünsal Karakuş, 2018).

2.2. Model Kalibrasyonu ve Kurulumu

Referans modelin oluşturulması için, Ünsal Karakuş (2018) çalışmasında da kullanılan, Firoozabadi vd. (2009) çalışmasında yürütülen deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları sonucu elde edilen veriler kullanılmıştır.

Firoozabadi vd. (2009) sabit hıza ve düzgün konsantrasyona sahip bir yoğunluk akıntısının düşük yüzey alanına sahip bir giriş ağzından, daha büyük hacimde ve daha az yoğunlukta alıcı ortam suyunun bulunduğu bir alana girdikten sonraki davranışını önce fiziksel modelleme ile incelemiş, ardından sayısal modelleme yaparak sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmalarındaki deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 4’te görülmektedir. Kanalin uzunluğu 12 m, genişliği 1.5 m ve yüksekliği 0.6 m’dir. Yoğun

suyu temsilen oluşturulan çözelti yerden 2 m yükseklikte bulunan 2 m³ hacimli besleme tankına konulmuştur. Giriş ağzı 10 cm genişliğe ve 1.25 cm yüksekliğe sahip dörtgensel bir alandır. %1, %2 ve %3 olmak üzere üç farklı taban eğimi ile 10, 15 ve 20 L/dk debiler için farklı deneyler yapılmıştır. Deneylerin ortalama sürelerinin 80 dakika olduğu belirtilmiştir (Ünsal Karakuş, 2018).



Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik çizimi (Firoozabadi vd., 2009)

Tablo 3 deney koşullarını göstermektedir. Tabloda S taban eğimini, Q debiyi, R_{in} giriş ağzındaki Reynolds sayısını, Ri_{in} giriş ağzı Richardson sayısını, h_{in} giriş ağzının yüksekliğini, u yoğun suyun hızını, C_{in} ise giriş hacimsel konsantrasyonunu temsil etmektedir (Ünsal Karakuş, 2018):

$$R_{in} = \frac{uh_{in}}{\nu} \quad (15)$$

$$Ri_{in} = \frac{g'_0 h_{in} \cos \theta}{u^2} \quad (16)$$

Genel olarak, Richardson sayısının 0.25'ten büyük olması türbülanslı akımın tabakalaşma boyunca baskılandığı, bu değerin 0.25'ten küçük olması ise kararsızlık

durumunun söz konusu olduğu; fazlar arasında karışımın devam ettiği ve türbülansın etkili olduğu anlamına gelmektedir (Ünsal Karakuş, 2018).

Tablo 3. Deney koşulları (Firoozabadi vd., 2009)

Deney	Taban Eğimi (%)	C_{in} (%)	Q_{in} (L/dk)	R_{in}	Ri_{in}	T (°C)
1	1	1.5	10	1559.25	0.06539	18
2	1	1.5	15	2242.64	0.02906	16
3	1	1.5	20	3027.43	0.01635	16.5
4	2	1.5	20	3027.43	0.01634	16.5
5	3	1.5	20	3027.43	0.01634	16.5
6	1	0.5	20	2878.55	0.00545	14.5
7	3	0.5	10	1532.33	0.02179	17

Fiziksel deneylerin ardından yaptıkları sayısal modelleme çalışmalarında düşük Reynolds sayısı $k - \varepsilon$ türbülans modelini (Launder ve Sharma, 1974) kullanmışlar, model katsayıları C_1 , C_2 ve C_μ için sırasıyla 1.44, 1.92 ve 0.09 değerlerini kullanmışlardır. Çözüm şeması olarak SIMPLEC yöntemini; momentum, türbülans ve yayılım denklemleri için QUICK şemasını tercih etmişler, iterasyon katsayılarını ise basınç için 0.2, hız için 0.8 ve k ve ε için 0.7 almışlardır (Ünsal Karakuş, 2018).

Bu çalışma kapsamında, Ünsal Karakuş (2018) çalışmasını da desteklemek amacıyla, bu çalışmada da referans modelin oluşturulması için kullanılan senaryo tercih edilmiştir. Bu senaryo, taban eğiminin %1, debinin 20 L/dk, giriş hızının 0.2667 m/s, alıcı ortam yoğunluğunun 998.83 kg/m³, yoğun su yoğunluğunun ise 1008.301 kg/m³ olduğu üç numaralı deneydir. Yoğunluk değerleri Tablo 3'te belirtilen sıcaklık değerlerine dayandırılarak bulunmuştur (Ünsal Karakuş, 2018). Bu çalışmada Ünsal Karakuş (2018) çalışmasında oluşturulan referans modelden farklı olarak, hesaplama maliyetini düşürmek için Eulerian model ile bu senaryo için ihmal edilebilecek kadar az farklı sonuçlar veren karışım (mixture) modeli tercih edilmiş; ağ örgüsü ise Ünsal Karakuş (2018) çalışmasındaki yapılı ağ örgüsü yerine yapısız olarak ve daha detaylı biçimde oluşturulmuş, özellikle giriş ağzının çevresinin modelin kalan kısmına kıyasla daha iyi detaylandırılmasına özen gösterilmiştir. Sonuç olarak, alınan sonuçlar Firoozabadi vd. (2009) çalışmasında elde edilen deneysel verilere yakın çıkmıştır.

İlk olarak geometri DesignModeler aracı kullanılarak oluşturulmuştur. Uzunluğu 6 m, genişliği ise 1.5 m olan modelin çıkış yüzeyinin yüksekliğinin 0.66 m ve taban eğiminin

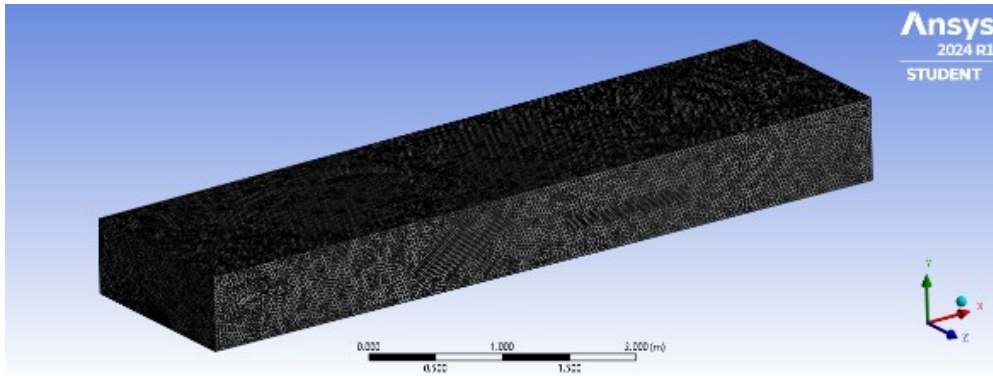
ise %1 olması sebebiyle, giriş yüzeyinin yüksekliği 0.6 metre seçilmiştir. Giriş yüzeyi üzerine çizilecek olan ve yüksekliği 0.0125 m, genişliği ise 0.1 metre olan dikdörtgensel şeklindeki giriş ağzı, çevresine oluşturulacak ağ örgüsünün alt yüzeyinin etrafında da uygun şekilde oluşturulabilmesi için doğrudan taban üzerine değil, tabandan 0.001 m yüksekten başlayacak şekilde çizilmiştir. Katı modelin oluşturulması, giriş ağzı yüzeyinin çizilmesinin ardından yapılması gereken şey öncelikle bu çizimden bir yüzey oluşturmaktır; bunun amacı bu bölgenin bir yüzey olarak programa tanımlanabilmesidir. Bunun için “Çizimden yüzey oluşturma (Surface from sketches)” seçeneği kullanılır. Yüzey tanımlandıktan sonra, bu yüzeyin bulunduğu yüzün geri kalanından farklı sınır koşulu özelliğine sahip olmasından ötürü, bu yüzden ayrılması gerekmektedir. Bunun için “Yüzey ayırma (Face split)” aracı kullanılır. Eğer bu işlem yapılmazsa, kullanıcı çizimden oluşturmuş olduğu ikinci yüzleyle, bu yüzeyden farklı özellikte olan ve aynı yüz üzerinde bulunan kalan kısma farklı sınır koşulları atanamaz, çünkü Fluent bunları bir bütün olarak algılamaktadır.

Yüzeyler birbirinden ayrıldıktan sonra, hem ağ örgüsü oluşturma işleminde bir sorun yaşanmaması için, hem de ilerleyen aşamalarda sınır koşulları tanımlamaları yapılırken kafa karışıklığı olmaması için bu yüzeyler isimlendirilirler. Bunun için yüzey seçilir, sağ tıklanır ve “İsimlendirilmiş yüzey (Named selection)” seçeneği kullanılır. Her bir yüzey isimlendirildikten sonra “Oluştur (Generate)” komutu kullanılmalıdır. Yüzeyler isimlendirildikten sonra, oluşturulan geometrinin bir bütün olarak algılanması için “Katı (Solid)” ve “Yüzey Cismi (Surface Body)” aynı anda seçilir, sağ tıklanarak “Yeni kısım oluştur (Form New Part)” seçeneği kullanılır. Bunun ardından Akışkan ve Katı olarak oluşturulan iki ana bölümden akışkana gelinir, burada tipi varsayılan olan katıdan akışkana çevrilir. Bu işlemlerle birlikte geometriyi oluşturma aşaması tamamlanmıştır.

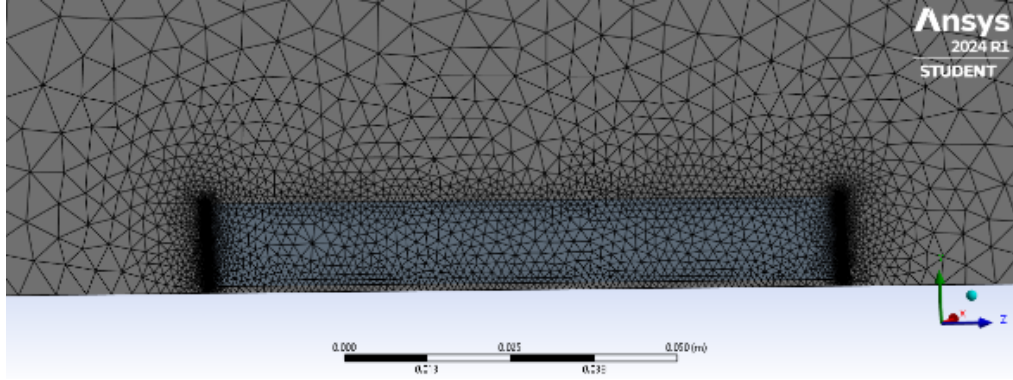
Ağ örgüsü oluşturulması konusu, daha önce de ifade edildiği gibi, modelin doğruluğunu doğrudan ve yüksek oranda etkilediğinden son derece önemlidir. İrdelenen durum gereği kurulan geometrinin gerektirdiği en uygun ağ örgüsünün oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada, bir giriş ağzından tamamen durgun, hızı sıfır olan bir alıcı ortam akışkanına belirli bir hıza sahip ikinci bir akışkan verildiğinden, giriş ağzının kenarları ile alıcı ortamın buralarda kalan kısımları arasındaki yüksek hız farkından ileri gelen bir kayma tabakası oluşur. Akışkanların buralardaki davranışları doğru biçimde irdeleyebilmek için, buraların ağ örgüsünün daha detaylı oluşturulması gerekmektedir. Bunun için modelin geri kalan kısmında oluşturulan ağ örgüsünden ayrı olarak, ilk

aşamada bu giriş ağzı etrafında ayrı bir ağ örgüsü oluşturulmuştur. Bu amaçla “Kenar boyutlandırma (Edge sizing)” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle seçilen kenarlar istenilen sayıda bölümlenebilirler ve ağ örgüsünü oluşturulan çizgiler bu bölüm sayıları ile orantılı olarak sıklaşır. Bunu için Ağ Örgüsü üzerine sağ tıklanıp “Ekle (Insert)” ve ardından “Boyutlandırma (Sizing)” seçenekleri kullanılmıştır. Ardından kenar seçimiyle giriş ağzının dört kenarı seçilmiş ve boyutlandırmanın bir kenar boyutlandırması olduğu bu şekilde yazılıma belirtilmiştir. Yazılım bunun ardından seçenekler sunmaktadır. Bu seçenekler arasında “Bölümleme sayısı (Number of divisions)” seçilmiş, sayı 100 olarak belirlenmiştir. Bu, dört kenarın toplamda yüz kez bölündüğü anlamına gelmektedir. Bu esnada en küçük yerel eleman boyutu için de varsayılan değerden farklı bir değer girilebilir.

Herhangi bir ağ örgüsü oluşturma işleminde girilen en küçük eleman boyutu değerinden daha küçük bir değer başka bir ağ örgüsü oluşturma işlemi sonucunda aynı model için girilmesinin hataya sebep olacağı unutulmamalıdır. Burada en küçük yerel eleman boyutu 0.0003 seçilmiştir. Bu işlemin ardından Ağ Örgüsü üzerine sağ tıklayıp “güncelle” seçeneği seçildiğinde ağ örgüsü oluşturulmaktadır. Giriş ağzının kenarlarının detaylandırılmasının ardından modelin kalan kısmına benzer formda ağ örgüsü oluşturulması için yapılması gereken Ağ Örgüsü seçeneğine tıklayıp altta açılan görev penceresinde eleman boyutunu girmek ve yeniden güncelleme yapmaktır. Burada eleman boyutu 0.03 olarak girilmiştir. Ağ örgüsü bu şekilde oluşturulmuş ve kurulum aşamasında kalitesi kontrol edilmiş, toplamda 825571 hücre meydana gelmiştir. Ağ örgüsünün genel görüntüsü ve giriş ağzı çevresindeki detaylandırılmış kısımlar Şekil 5-6’da görülmektedir.



Şekil 5. Ağ örgüsü genel görünüm

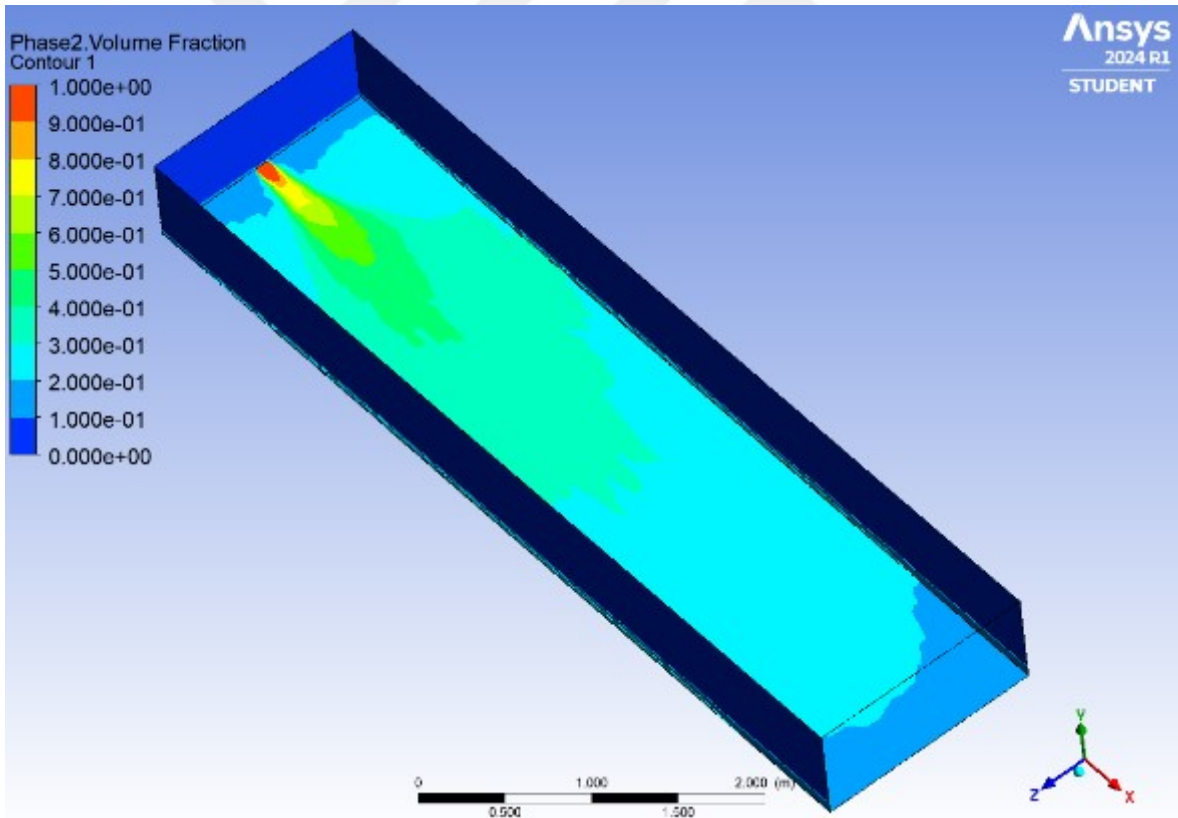


Şekil 6. Ağ örgüsünün giriş ağızı çevresindeki yapısı

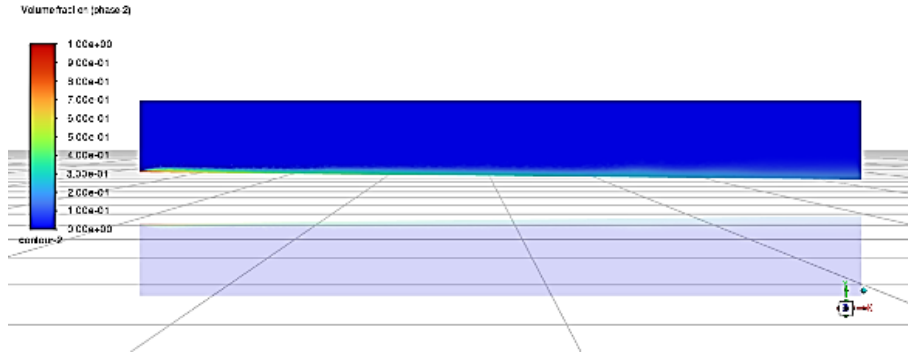
Ağ örgüsü oluşturulduktan sonra kurulum aşamasına geçilmiştir. Kurulumda farklı modeller ve katsayılar denendikten sonra en uygun sonucu veren kombinasyon belirlenmiştir. Genel kısmında geçişli seçeneği seçilmiş, yerçekimi ivmesi y bileşeni -9.81 m/s^2 değerine sahip olacak şekilde girilmiştir. Çözücü kısmında tip basınç bazlı, hız formülasyonu mutlak, zaman ise süreksiz olarak seçilmiştir. Çokfazlı menüsünde karışım modeli, örtük cisim kuvvetleri, model parametreleri için kayma hızı, hacim oranı parametresi için örtük, arayüz modellemesi için dağınık seçenekleri seçilmiş; Eulerian faz sayısı 2 olarak girilmiştir. Ardından viskoz sekmesi altında standart duvar fonksiyonlarıyla birlikte RNG $k - \varepsilon$ modeli seçilmiş; C_μ , C_1 , C_2 , C_3 katsayıları ve dispersiyon Prandtl sayısı için sırasıyla 0.09, 1.44, 1.92, 0.2 ve 0.75 değerleri girilmiştir. Ardından malzemeler sekmesi altında alıcı ortam suyu 998.83 kg/m^3 yoğunluğa ve 0.00103 kg/(m.s) viskoziteye sahip olacak, yoğun su ise 1008.301 kg/m^3 yoğunluğa ve 0.0011 kg/(m.s) viskoziteye sahip olacak şekilde tanımlanmıştır. Ardından çokfazlı menüsünde fazlar sekmesi altında alıcı ortamı suyu birincil, yoğun su ise ikincil faza atanmıştır. Sınır koşulları atamalarında yoğun suyun giriş yapacağı giriş ağızı hız girişi, bu yüzde bu yüzeyden geriye kalan kısım ve ek olarak sağ, sol duvarlar ve taban duvar, tavan simetri, çıkış yüzeyi ise dışarı akış olarak tanımlanmıştır.

Sınır koşulları altında giriş kısmında ikincil fazın hızı 0.2667 m/s olarak girilmiş, aynı penceredeki çokfazlı sekmesinin altında hacim oranı 1 olarak girilmiştir. Bu değer 1 olarak girilmesi, yazılımın yoğun suyu giriş ağızının kesitinin tamamından vereceği anlamına gelmektedir; diğer bir deyişle tam dolu akış tanımlaması yapılmaktadır. Ardından yöntemler kısmında çözüm şeması olarak SIMPLE, gradyan için en küçük kareler bazlı seçeneği, basınç için PRESTO! seçeneği; momentum, hacim oranı, türbülans kinetik

enerjisi ve türbülans yayılım oranı için QUICK seçenekleri seçilmiştir. Süreksiz formülasyonu için birinci dereceden örtük seçeneği seçilmiştir. Kontroller kısmında iterasyon katsayısı değerleri basınç, yoğunluk, cisim kuvvetleri, momentum, kayma hızı, hacim oranı, türbülans kinetik enerjisi, türbülans yayılım oranı ve türbülans viskozitesi için sırasıyla 0.2, 1, 1, 0.7, 0.1, 0.5, 0.7, 0.7 ve 1 olarak girilmiştir. Başlatma bölümünde başlatma seçeneği standart, referans çerçevesi hücre bölgesine göre şeklinde seçilmiş, “Şuradan başlat” seçeneğinde herhangi bir seçim yapılmamıştır. İlk atama değerlerinin tamamı 0 olarak girilmiştir. Ardından başlatma tıklanmıştır. Bunun ardından hesaplama kısmında zaman ilerlemesi için tip sabit, yöntem kullanıcı tanımlı olarak belirlenmiş; model 3000 zaman adımı için, zaman adımı boyutu 0.25 olacak ve bir zaman adımında en fazla 20 iterasyon olacak şekilde çalıştırılmıştır. Sonuç olarak Şekil 7-8’de görülen şekilde, hacim oranı kontürleri için sırasıyla üstten ve yandan görülen yayılım elde edilmiştir.

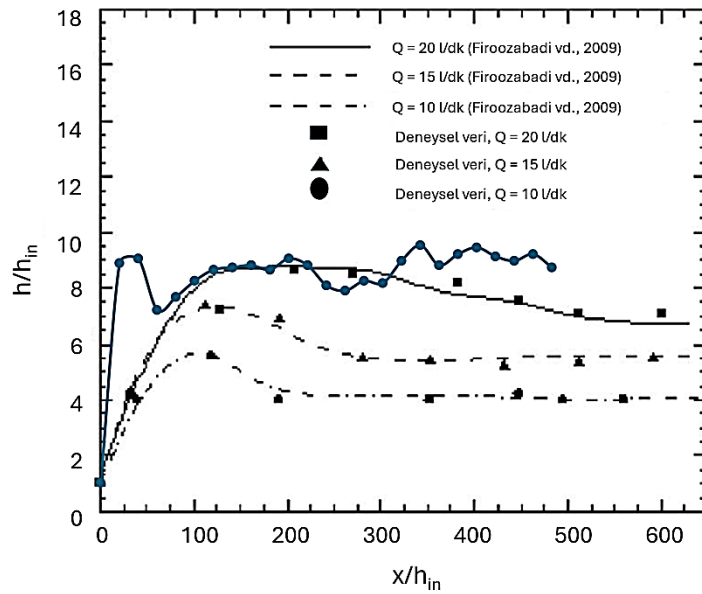


Şekil 7. Hacim oranı dağılımının üstten görünümü



Şekil 8. Hacim oranı dağılımının yandan görünümü

Bu sonuçların deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılabilmesi için, x yönündeki mesafe değerleri ve düşey doğrultudaki yoğunluk akıntısı kalınlığı değerleri, giriş ağzının yüksekliği olan h_{in} ile boyutsuzlaştırılmış; bunlar sırasıyla x ve y eksenleri boyunca çizilmiş ve grafik deneysel çalışmalar sonucu elde edilen grafiğin üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Yoğunluk akıntısı kalınlıklarının karşılaştırılması

Burada genel eğilimin referans alınan üçüncü deney sonuçlarıyla uyduğu görülmektedir. Aradaki farklar genel olarak kullanılan çözüm şemalarında yapılan bazı

farklı tercihlerden, bazı katsayıların değiştirilmesinden ve farklı ağ örgüsü yapısından kaynaklanmaktadır.

2.3. Yöntem

Yoğun su deşarjlarında oluşan negatif yüzücü jetlerin etki mesafesi (x_i), yakın alan mesafesi (x_n) ve maksimum saçak yüksekliği (y_t) gibi geometrik özellikleri, jet davranışı ve seyrelme verimleriyle yakından ilişkilidir. Bundan ötürü, literatürde bu geometrik parametreler yaygın olarak incelenmektedir. (Oliver vd., 2008; Kheirkah Gildeh vd., 2015; Roberts, 2018; Ardalán ve Vafaei, 2019; Yan ve Mohammadian, 2019; Castro-Faccetti, 2020; Mohammadian vd., 2020; Moshiri-Tabrizi vd., 2023; Saeidi Hosseini, 2024). Bu geometrik özellikleri etkileyen parametrelerin iyi belirlenmesi ve bunları nasıl etkilediklerinin tespiti, bu parametrelerin seyrelme verimini de nasıl etkilediklerini anlamayı mümkün kılmaktadır.

Dolayısıyla bu çalışmada, bu geometrik özellikler ve seyrelme verimini etkilediği literatürde belirtilmiş olan bazı parametreler için farklı model senaryoları oluşturulmuştur. Bu kapsamda, parametrelerin etki noktası mesafesi, yakın alan mesafesi, jetin çıktığı maksimum yükseklik gibi değerleri ve seyrelme verimini nasıl etkiledikleri irdelenmiştir.

Deşarj açısı, yoğun su jetinin izlediği yolun uzunluğunu doğrudan etkilediğinden seyrelme verimini de etkilemektedir. Bu sebeple literatürde farklı deşarj parametreleri ve alıcı ortam koşulları altında en uygun deşarj açısının belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır (Zeitoun vd., 1972; Cipollina vd., 2005; Abessi ve Roberts, 2015; Ardalán ve Vafaei, 2019). Literatürde deşarj açısı üzerine yapılan ilk çalışma olarak belirtilen çalışmada Zeitoun vd. (1972) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, yukarı doğru farklı açılarla yönlendirilmiş jetlerin davranışlarını incelemişler; sonuç olarak 60° deşarj açısının en uzun yörüngeyi, dolayısıyla en iyi seyrelme verimini sağladığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmanın ardından bu tasarım, resmi olmayan ancak birçok bilim insanı ve mühendisin benimsediği bir standart haline gelmiştir (Darama, 2009). Daha sonra bu öneri jet yörüngelerinin ve karışımların hem durgun hem de dinamik alıcı ortam koşulları altında incelendiği Pincince ve List (1973), Roberts ve Toms (1987) ve Roberts vd. (1997) çalışmalarında da benimsenmiş; sonuçlara dayanarak uygulamada bir standart olarak kabul edilmiştir (Roberts vd., 1997; Jirka, 2008).

Ancak bu kabul tüm koşullar altında geçerli olmayabilmektedir. Sığ sularda yapılan yoğun deşarjlarda, seyrelme verimi için gerekli olan yüksek jet hızı, dik açılarla yapılan deşarjlarda deşarj edilen yoğun su jetinin su yüzeyiyle etkileşime girmesine sebep olabilmekte; bu da seyrellebilecek yoğun su miktarını azaltabilmekte ve akış dinamiklerini değiştirebilmektedir. Yoğun su jetinin su yüzeyiyle etkileşimi sonucu akış koşullarının değişmesi, karışım ve seyrelmenin de bundan etkilenmesi durumunda oluşan koşul “sığ su koşulu” olarak adlandırılmaktadır (Abessi ve Roberts, 2016). Jirka (2008) daha yakın zamanda elde edilen laboratuvar sonuçlarından faydalandığı ve CorJet integral model yöntemini kullandığı çalışmasında en uzun etki noktası mesafesinin 30° - 45° aralığında elde edildiğini, maksimum saçak yüksekliği noktasındaki seyrelme değerleri açısından CorJet’in 45° deşarj açısını optimum olarak gösterdiğini ancak bu değer 30° - 60° aralığında olabileceğin ve taban eğimi arttıkça optimum açı değerlerinin düştüğünü gözlemlemiştir. Genel olarak kıyıya yakın yerlerde yapılan eğimli negatif yüzücü jet deşarjlarında 30° - 45° deşarj açısı aralığının; maksimum saçak yüksekliğinde en yüksek seyrelmeyi sağlaması, etki noktasında yüksek seyrelme değerleri elde etmeyi mümkün kılması, etki mesafesini artırması ve deniz tarafında momentumu artırması ve önemli ölçüde daha düz jet yörüngeleri sağlaması sebeplerinden ötürü en uygun aralık olduğu sonucuna varmıştır. Abessi ve Roberts (2016) çalışmaları sonucunda derin sularda 60° ’nin etki noktası ve yakın alan seyrelmesi için iyi sonuçlar verdiğini, ancak su derinliği azaldıkça 30° deşarj açısının daha iyi seyrelme verimi sağladığını, jetin yüzeyle etkileşimini azaltması sebebiyle 30° deşarj açısının sığ sularda tercih edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada, bütün bunlar göz önünde bulundurularak, deşarj açısının jetin geometrik özellikleri ve seyrelme verimi üzerine etkileri incelenmek istenmiştir. Bu doğrultuda farklı deşarj açılarının kullanıldığı ve diğer parametrelerin sabit tutulduğu model senaryoları oluşturulmuştur.

Deşarj edilen yoğun suyun karışımını ve seyrelmesini ve jetin geometrisini etkileme potansiyeli bulunan bir başka durum ise, çıkış uçları arasındaki mesafenin jetlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini etkilemesi sebebiyle, çoklu çıkış ucu bulunan yayıcıların tasarlanması ve yoğun su deşarjında kullanılmasıdır. Bu sebeple çoklu çıkış ucu bulunan yayıcıların kullanılması durumunda jet davranışı ve bu davranışın farklı sayısal modelleme yöntemleri kullanılarak uygun bir biçimde tahmin edilip edilemeyeceği literatürde üzerinde durulan bir başka konudur (Muller vd., 2011; Castro-Faccetti vd., 2019; Yan vd., 2019;

Yan ve Mohammadian, 2019; Castro-Faccetti, 2020; Yan vd., 2020; Danish ve Murali, 2021; Saeidi Hosseini, 2024).

Birden fazla jetin söz konusu olduğu deşarjlarda jetler bir noktada birleşmekte ve bir bütün halinde hareket etmeye başlamaktadır. Bu davranış karışım ve birleşme süreçlerini olumsuz etkileyebilmektedir. Jetlerin birleşmeden önce izledikleri yörüngenin uzunluğu seyrelmeyi etkileyen bir faktördür ve bu jetlerin ve yüzücülük kaynaklarının arasındaki mesafeye bağlıdır (Castro-Faccetti vd., 2019). Dolayısıyla çıkış uçları arasındaki mesafeler, karışım ve seyrelme süreçleri açısından son derece önemlidir ve bunların çeşitli tasarımlarda jet davranışını nasıl etkilediği, üzerinde durulması gereken bir konudur.

Yan ve Mohammadian (2019) çıkış uçları arası mesafe arttıkça maksimum saçak yüksekliğinin de arttığını gözlemlemiş; bunun çoklu jetlere alıcı ortam suyu girişinin daha az kısıtlandığı bir durum olarak tanımlanabilen Coanda etkisinin bir sonucu olduğu ve bu durumda seyrelme veriminin daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Yan vd. (2020) düşey çoklu jetler üzerinde yaptıkları çalışmaları sonucunda çıkış uçları arası mesafe arttıkça merkez çizgisi seyrelmesinin düştüğünü ve mesafenin daha az olduğu durumlarda seyrelmedeki azalmanın daha hızlı gerçekleştiğini, enine doğrultudaki yayılmanın çıkış uçları arasındaki mesafeden dolayı olarak etkilendiğini ve jetler arası mesafenin daha fazla olması durumunda seyrelmenin daha hızlı olmasından ötürü enine doğrultudaki yayılmanın da daha fazla olduğunu, genel olarak çıkış uçları arası mesafenin artırılmasının jetlerin birleştiği noktayı çıkış uçlarından daha uzak bir konuma çektiğini gözlemlemişlerdir.

Bundan ötürü, bu çalışmada hem çıkış ucu sayısındaki hem de çıkış uçları arası mesafelerdeki değişimlerin jet davranışı, geometrik özellikleri, karışım ve seyrelme süreçleri üzerindeki etkileri incelenmek istenmiştir. Bu doğrultuda, çıkış uçlarının sayılarının ve aralarındaki mesafelerin değiştirildiği ve diğer parametrelerin sabit tutulduğu model senaryoları oluşturulmuştur.

Bu çalışmada kurulan referans model baz alınarak önce bir tekil jet için belirli koşullar altında modelleme yapılmış, ardından literatürde seyrelme verimini en çok etkileyen faktör olarak belirtilen deşarj açısı değiştirilip diğer tüm parametreler sabit tutularak deşarj açısının seyrelme verimi üzerine etkileri irdelenmiş; ardından bu açılardan bir tanesi seçilerek çıkış ucu sayısı, çıkış uçları arası mesafe ve çıkış ucu çapı gibi bazı parametreler sırasıyla diğer parametreler sabit tutularak değiştirilmiş ve bunların seyrelme verimini nasıl etkiledikleri incelenmiştir. Sonuç olarak modelde geçerli alıcı ortam

koşulları ve diğer bazı deşarj parametreleri için en iyi seyrelme verimini sağlayan yayıcı boru tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Tablo 4 model senaryolarını özetlemektedir.

Tablo 4. Model senaryoları

Model No	Çap (m)	Açı (°)	Çıkış Ucu Sayısı	Çıkış Uçları Arası Mesafe (m)
1	0.04	30	1	-
2	0.04	45	1	-
3	0.04	60	1	-
4	0.04	60	2	0.25
5	0.04	60	2	0.50
6	0.04	60	3	0.50
7	0.04	60	3	0.25
8	0.02	60	3	0.25
9	0.02	60	2	0.25
10	0.02	60	2	0.50

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Giriş

Bu çalışma kapsamında, oluşturulan referans model üzerinde bazı değişiklikler yapılarak on farklı model oluşturulmuş ve bunlar analiz edilmiştir.

Geometri genel olarak aynı tutulmuştur; giriş ve çıkış yüzeylerinin yükseklikleri, modellenen alıcı ortamın uzunluğu, genişliği ve taban eğimi ve sınır koşulları referans modelle aynıdır. Sadece burada savak benzeri bir giriş ağzı yerine, deniz deşarjı tesisi yayıcı borusu üzerindeki bir çıkış ucunu temsil edecek şekilde giriş ağzı kısmı dairesel olarak tasarlanmıştır. Referans modeldeki giriş ağzının kesit alanını verecek çapta bir dairesel delik tasarlanmış, bunun için gerekli çap değerinin 0.03989 m olarak hesaplanması üzerine uygulamada tercih edilen çıkış ucu çapları da düşünülerek çap ilk modellerde 0.04 m olarak belirlenmiştir. Son üç modelde, jet hızının da jet davranışı ve seyrelme üzerindeki etkilerini görebilmek için debi sabit tutularak 0.02 m çıkış ucu çapı değeri de kullanılmıştır. Tüm modellerde, birden fazla çıkış ucu olması durumunda toplam debi çıkış ucu sayısına bölünmüş ve jet hızı da buna göre ayarlanmıştır.

Ağ örgüsünün oluşturulması sırasında referans modeldeki yaklaşımın aynısı buradaki her bir modelde uygulanmıştır: Kenar boyutlandırma yöntemi ile giriş ağzı çevresi 100 parçaya bölünmüş, en küçük yerel eleman boyutu 0.03 seçilmiş ve buradaki ağ örgüsü bu şekilde oluşturulmuş; geometrinin geri kalanında da eleman boyutu 0.03 seçilerek klasik yöntemle bir ağ örgüsü oluşturulmuştur. Birden fazla çıkış ucunun bulunduğu modellerde, her bir çıkış ucu aynı şekilde kendi içinde kenar boyutlandırma yöntemiyle çevresi 100 parçaya ayrılarak detaylandırılmıştır.

Kurulum aşamasında, her bir modelde Çokfazlı modeli olarak Karışım seçilmiş, viskoz model ise Standart $k - \varepsilon$ olarak belirlenmiştir. Model katsayıları C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ için sırasıyla 0.09, 1.44, 1.92 ve 0.2; Dağılım Prandtl Sayısı için ise 0.75 değeri kullanılmıştır. Birincil faz olarak tanımlanan alıcı ortam suyunun yoğunluğu $\rho_a=998.83$ kg/m³, ikincil faz olarak tanımlanan yoğun suyun yoğunluğu ise $\rho_a=1008.301$ kg/m³ olarak kullanılmıştır. Alıcı ortam suyu ve yoğun suyun viskozite değerleri sırasıyla 0.00103 ve 0.0011 kg.m⁻¹.s⁻¹ olarak girilmiştir. Çözüm şeması olarak SIMPLE tercih edilmiş; mekânsal ayrıklaştırma bölümünde gradyan için “En küçük kareler bazlı”, basınç için

PRESTO!, momentum, hacim oranı, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı için QUICK seçenekleri seçilmiştir. Süreksiz formülasyonu için birinci dereceden örtük seçeneği seçilmiştir. Kontroller kısmında basınç, yoğunluk, cisim kuvvetleri, momentum, kayma hızı, hacim oranı, türbülans kinetik enerjisi, türbülans yayılım oranı ve türbülans viskozitesi için sırasıyla 0.2, 1, 1, 0.7, 0.1, 0.5, 0.7, 0.7 ve 1 değerleri girilmiştir. Başlatma kısmında ilk değerler için sadece türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı 1 olarak alınmış, diğer değerler 0 olarak bırakılmıştır. Modellerin her biri 0.25 büyüklük değerine sahip 240 zaman adımı boyunca çalıştırılmıştır.

Her bir model için hacim oranı konturlarının hem üstten görüntüleri hem de z koordinatı her bir çıkış ucunun tam ortasından geçecek şekilde ayarlanmış xy düzlemleri üzerindeki yandan görüntüleri ve bu düzlemler üzerindeki hız büyüklükleri konturları alınmıştır. Hacim oranı konturları kullanılarak saçığın çıktığı maksimum yükseklik (y_t), etki mesafesi (x_i) ve yakın alan mesafesi (x_n) gibi geometrik özelliklerine ait değerler belirlenmiştir. Aynı zamanda, yine xy düzlemleri üzerinde fazların karışımının yoğunluk dağılımı kullanılarak jetlerin merkez çizgileri boyunca yoğunluk değerleri de belirli aralıklarda elde edilmiştir. Bu sayısal değerlerin ve tam olarak bulundukları yerin x, y ve z koordinatlarının bulunabilmesi için; sonuçlar kısmında ekrandaki üst menüde bulunan “Sonda (Probe)” seçeneği kullanılmıştır. Aynı işleve düzlem üzerinde sağ tıklanarak açılan menüde “Probe Variable” seçeneği seçilerek de ulaşılabilir. Bu aktif edildikten sonra, istenilen noktaya tıklanarak ekranın alt kısmında bu noktanın koordinatları ve o anda hangi değişkenin konturu gösteriliyorsa o değişkenin değeri okunabilir. Okunan maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi gibi değerler yoğun su jetinin biçimi ve davranışını göstermekte, aynı zamanda seyrelme ile ilgili ipuçları da vermektedirler.

Akış doğrultusu boyunca, yatayda her 0.1 m’de bir, jetin merkez çizgisi üzerinde okunan yoğunluk değerleri ordinata; bu yataydaki konumların çıkış ucu çapı ve yoğunluksal Froude sayısının çarpımı ile boyutsuzlaştırıldığı x/DF değerlerinin ise apsise yerleştirildiği, modellere ait Yoğunluk-Konum Dağılımı grafikleri de sunulmuştur. Bu dağılımlar ve farklı noktalardaki karışım yoğunluk değerleri seyrelme verimini ortaya koymaktadır. Tablo 5, oluşturulan modellere ait, her modelde sabit olmayan bazı parametreleri değerlerini göstermektedir:

Tablo 5. Model senaryolarında değişen bazı parametreler

Model	Çıkış Ucu sayısı	Çıkış Ucu Çapı (m)	Çıkış Uçları Arası Mesafe (m)	Jet Hızı (m/s)	Froude Sayısı	Deşarj Açısı (°)
1	1	0.04	-	0.2667	4.39	30
2	1	0.04	-	0.2667	4.39	45
3	1	0.04	-	0.2667	4.39	60
4	2	0.04	0.25	0.1334	2.2	60
5	2	0.04	0.50	0.1334	2.2	60
6	3	0.04	0.50	0.0889	1.46	60
7	3	0.04	0.25	0.0889	1.46	60
8	3	0.02	0.25	0.3554	8.28	60
9	2	0.02	0.25	0.5332	12.42	60
10	2	0.02	0.50	0.5332	12.42	60

İlk önce aralarında sadece deşarj açısının farklı olduğu üç farklı model (Model 1, Model 2, Model 3, Model 4) kurulmuştur. Bu kapsamda, literatürde üzerinde en çok durulan konulardan biri olan deşarj açısının jetin geometrisi ve davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Model 4'te, bu deşarj açılarından en yüksek seyrelme verimini veren açı seçilerek, çıkış uçlarının yan yana dizildiği z doğrultusunda ikinci bir çıkış ucu diğer çıkış ucuyla arasında belirli bir mesafe olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu şekilde jet girişiminin oluşup oluşmayacağı, oluşursa bu durumun jetin biçimine ve seyrelmeye nasıl yansıtacağı; aynı zamanda artan çıkış ucu sayısı sebebiyle debinin bölünmesinin ve çıkış ucu çaplarının sabit tutulmasından kaynaklı jet hızının düşmesinin de yine jetin biçimi, seyrelme ve karışma üzerindeki etkileri gibi durumların incelenmesi amaçlanmıştır.

Model 5'te sadece dördüncü modeldeki çıkış ucu arası mesafe değeri iki katına çıkarılmış ve bunun etkileri incelenmiştir.

Model 6'da bir önceki modeldeki çıkış uçları arası mesafe değeri sabit tutulup bir çıkış ucu daha eklenmiştir. Çıkış uçlarının sayısının artırılması veya azaltılması durumlarında, modelin ana geometrisinin değiştirilmemesi ve z doğrultusundaki boyut olan 1.5 m'nin de sabit tutulması sebebiyle, temsil edilen yayıcı boru uzunluğu değişmektedir. Dolayısıyla beşinci modelden altıncı modele geçişte hem çıkış ucu sayısı arttığından ve debi sabit tutulduğundan ötürü jet hızları düşmüş, hem de birim uzunluk başına düşen çıkış ucu sayısı da artmıştır. Bu modelde bu durumların jet geometrisi, seyrelme ve karışma süreçleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Model 7’de sadece bir önceki modelde kullanılan çıkış uçları arası mesafe değeri yarıya indirilmiş ve çıkış uçlarının birbirlerine yaklaştırılmasının etkileri incelenmiştir.

Model 8’de, bir önceki modele göre yapılan tek değişiklik, çıkış ucu çapının yarıya düşürülmesi olmuştur. Debi sabit olması jet hızının dört katına çıkmasına sebep olmuştur ve bu durum jet hızının bu denli artışının da jet geometrisi, seyrelme ve karışma süreçleri üzerindeki etkisinin incelenmesine olanak tanımıştır.

Model 9’da sadece çıkış ucu sayısı bir adet azaltılmıştır.

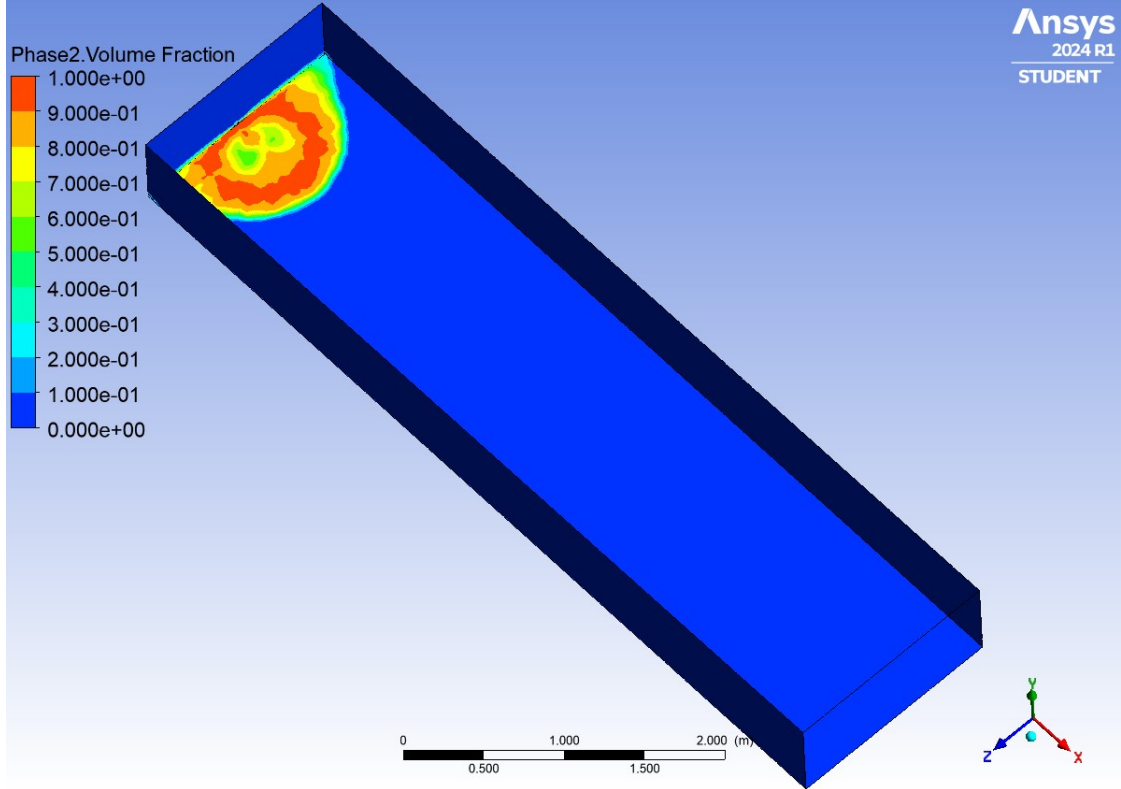
Model 10’da ise çıkış uçları arası mesafe, bir önceki modeldeki değerin iki katına çıkarılmış ve başka bir değişiklik yapılmamıştır.

Kısaca özetlemek gerekirse, bu model senaryolarının kurulması ile her bir yeni modelde bir önceki modele göre sadece bir parametrenin değiştirilmesi ve bu değişen parametrenin maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi, yakın alan mesafesi gibi jet geometrisini belirleyen mesafeleri ve seyrelme verimini nasıl etkilediği incelenmiştir. Aynı zamanda bu parametrelerle oluşturulan farklı kombinasyonların arasında bu deşarj şartları için en uygun olanının belirlenmesi amaçlanmıştır.

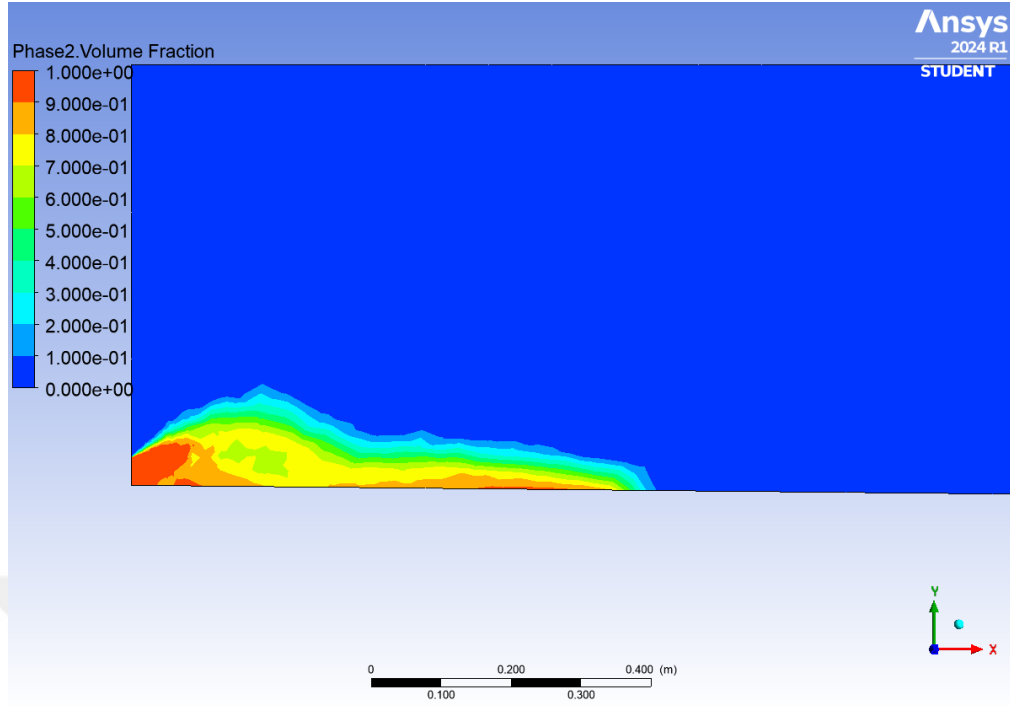
3.2. Model 1’in Bulguları ve İrdelenmesi

Bu modelde 20.1 L/dk debideki yoğun suyun, çapı 0.04 m olan tek bir dairesel çıkış ucu aracılığıyla alıcı ortama deşarj edildiği durum 240 zaman adımı, yani 60 saniye için simüle edilmiştir. Jet hızı 0.2667 m/s, deşarj açısı 30°, alıcı ortam ve yoğun su yoğunlukları sırasıyla 998.83 kg/m³ ve 1008.301 kg/m³; bunların viskoziteleri ise sırasıyla 0.00103 kg.m⁻¹.s⁻¹ ve 0.0011 kg.m⁻¹.s⁻¹ olarak girilmiştir. Çokfazlı modeli olarak Karışım, viskoz modeli olarak Standart $k - \varepsilon$ kullanılmış; viskoz modelin katsayıları olan C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ için sırasıyla 0.09, 1.44, 1.92 ve 0.2 değerleri, Dağılım Prandtl Sayısı için ise 0.75 değeri girilmiştir. Çözüm şeması olarak SIMPLE, mekansal ayrıklaştırmada gradyan için En Küçük Kareler Bazlı, basınç için PRESTO!, kalanlar için ise QUICK seçenekleri seçilmiştir. İterasyon katsayıları basınç, yoğunluk, cisim kuvvetleri, momentum, kayma hızı, hacim oranı, türbülans kinetik enerjisi, türbülans yayılım oranı ve türbülans viskozitesi için sırasıyla 0.2, 1, 1, 0.7, 0.1, 0.5, 0.7, 0.7 ve 1 olarak belirlenmiştir. Ağ örgüsünde çıkış ucu yüzeyi için kenar boyutlandırma yöntemi ile çevre 100 parçaya bölünerek ve en küçük yerel eleman boyutu 0.03 olacak şekilde ayarlanarak detaylandırma yapılmış, geometrinin geri kalanı için eleman boyutu 0.03 olacak şekilde ağ örgüsü

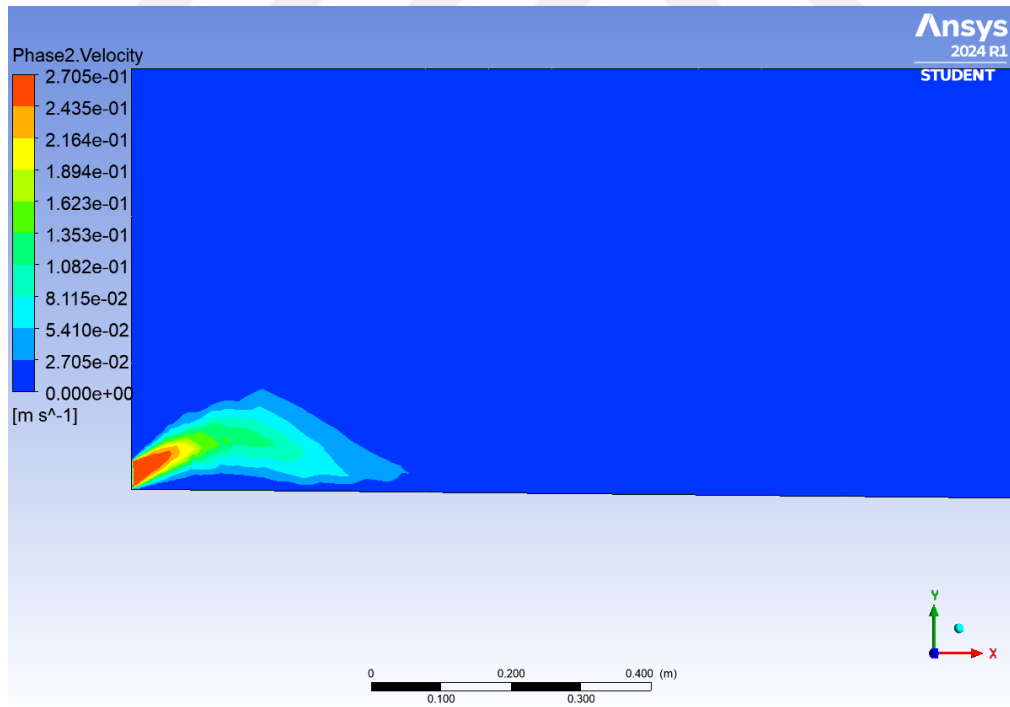
oluşturulmuş ve sonuç olarak toplamda 723378 hücre elde edilmiştir. Ağ örgüsü yapısız olarak oluşturulmuştur. Hacim oranı konturlarının üstten ve xy düzlemi üzerindeki görüntüleri, ikinci fazın hız büyüklüğünün xy düzlemi üzerindeki görüntüsü ve birinci model için karışımın yoğunluğunun konuma bağlı değişimini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 10-13'te görülmektedir.



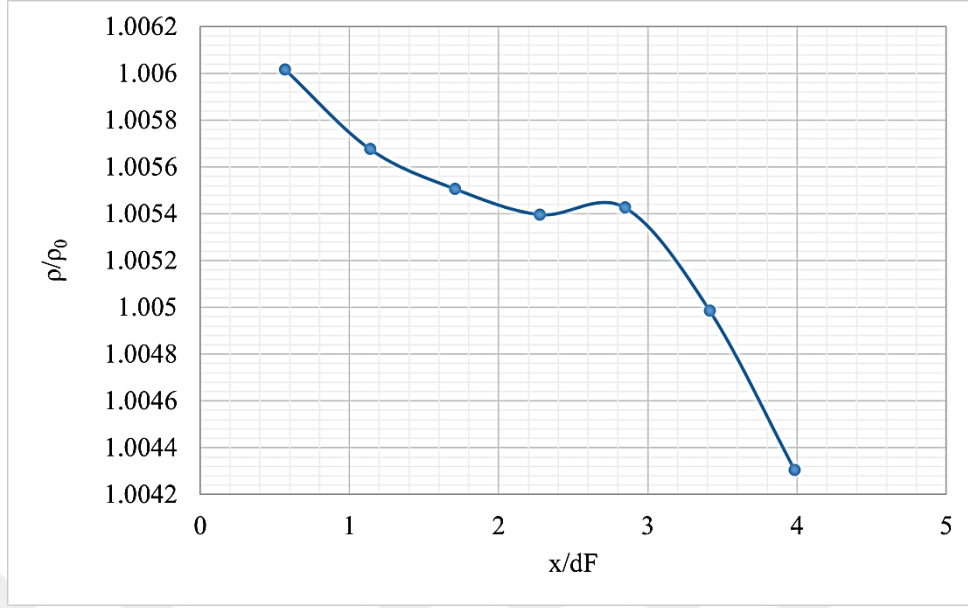
Şekil 10. Model 1 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



Şekil 11. Model 1 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 12. Model 1 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 13. Model 1 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Sonuçlar alınmadan önce xy düzlemine, z doğrultusundaki koordinatı +0.75 olan, yani mevcut tek çıkış ucunun tam merkezinden geçen bir düzlem tanımlanmış ve konturların kesit görüntüleri bu düzlem üzerinde alınmıştır. Hacim oranı konturu kullanılarak yapılan mesafe ölçümlerinde maksimum saçak yüksekliğinin 0.2523 m, etki mesafesinin 0.3274 m, yakın alan mesafesinin ise 0.7899 m olduğu görülmüştür.

Alıcı ortam suyuyla yoğun suyun karışması sonucu oluşan yeni akışkanın yoğunluğunun konuma bağlı olarak, yakın alan mesafesi boyunca nasıl değiştiğini görmek için, akış doğrultusu olan x doğrultusu boyunca, yakın alan mesafesinin sonlarına kadar her 0.1 m’de bir, jetin merkez çizgisi boyunca yoğunluk değerleri okunmuştur. Ardından bu değerler y eksenine, x mesafesi değerlerinin çıkış ucu çapı ve yoğunluksal Froude sayısının çarpımına bölünerek boyutsuzlaştırılmış halleri x eksenine yerleştirilmiştir ve Şekil 13’teki grafik elde edilmiştir. Buna göre, karışımın $x=0.1$ m ve $x=0.7$ m noktalarındaki yoğunluk değerleri sırasıyla 1004.84 kg/m^3 ve 1003.13 kg/m^3 şeklindedir.

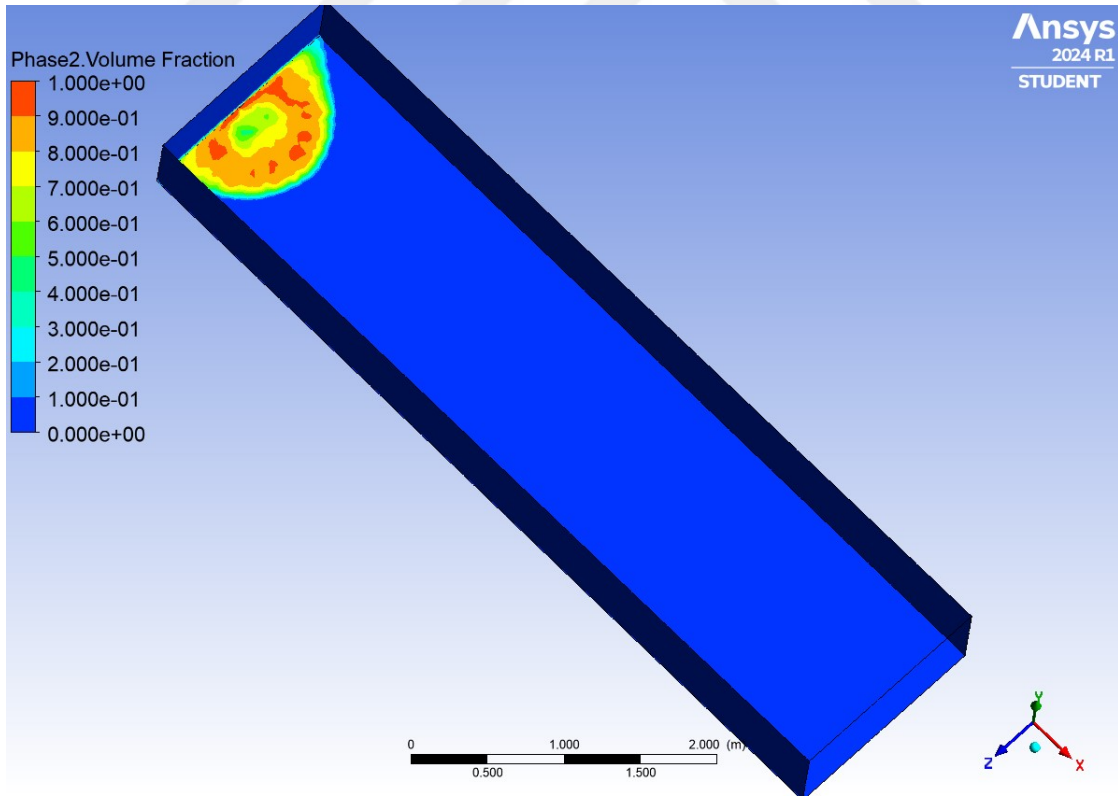
Karışımın yoğunluğunun alıcı ortam yoğunluğuna eşit olması durumunun, seyrelmenin %100 oranında gerçekleşmesi anlamına geldiği düşünülerek; bu noktadaki seyrelme yüzdesi $((1008.301-1003.13)/(1008.301-998.83)) \times 100 = 54.6$, yani %54.6 olarak hesaplanmıştır. Aynı noktada yoğun suyun hacim oranı konturu üzerinde okunan değer yaklaşık %45.4 olması, bu düşüncüyü destekler niteliktedir. Model 1 için elde edilen sonuçlar Tablo 6’da özetlenmektedir.

Tablo 6. Model 1 sonuçları

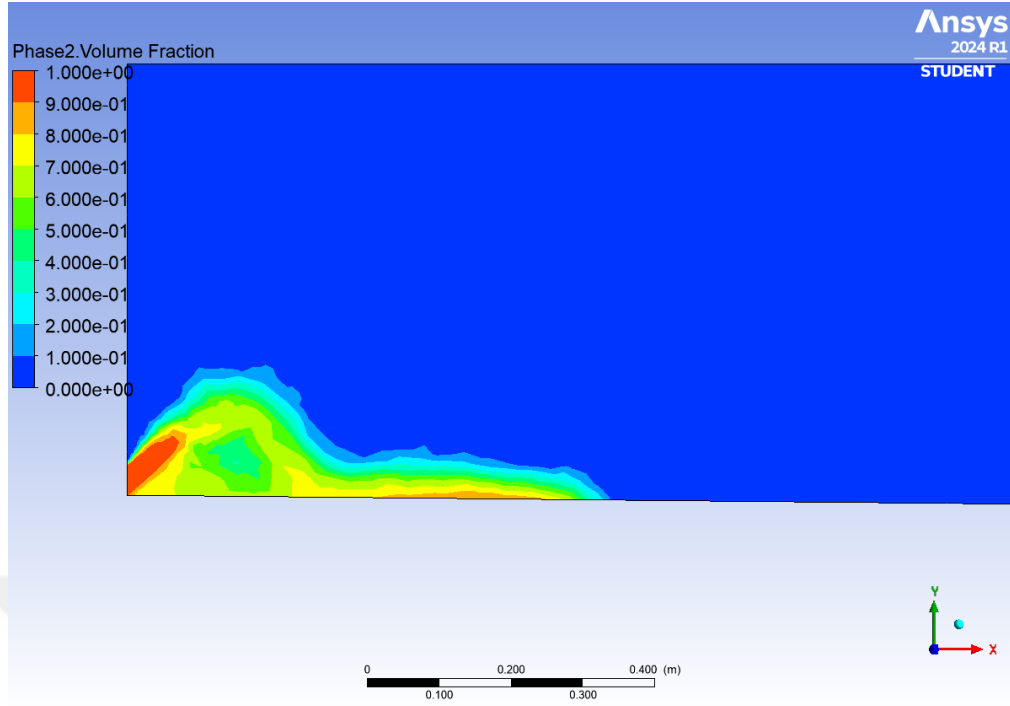
		y_t (m)	x_t (m)	x_n (m)	Seyrelme* (%)
Çıkış Ucu	(z=0.75 m)	0.2523	0.3274	0.7899	54.6
*Seyrelme hesabı değildir; yakın alanda ikinci fazın yoğunluğundaki azalmayı temsil eder.					

3.3. Model 2'nin Bulguları ve İrdelenmesi

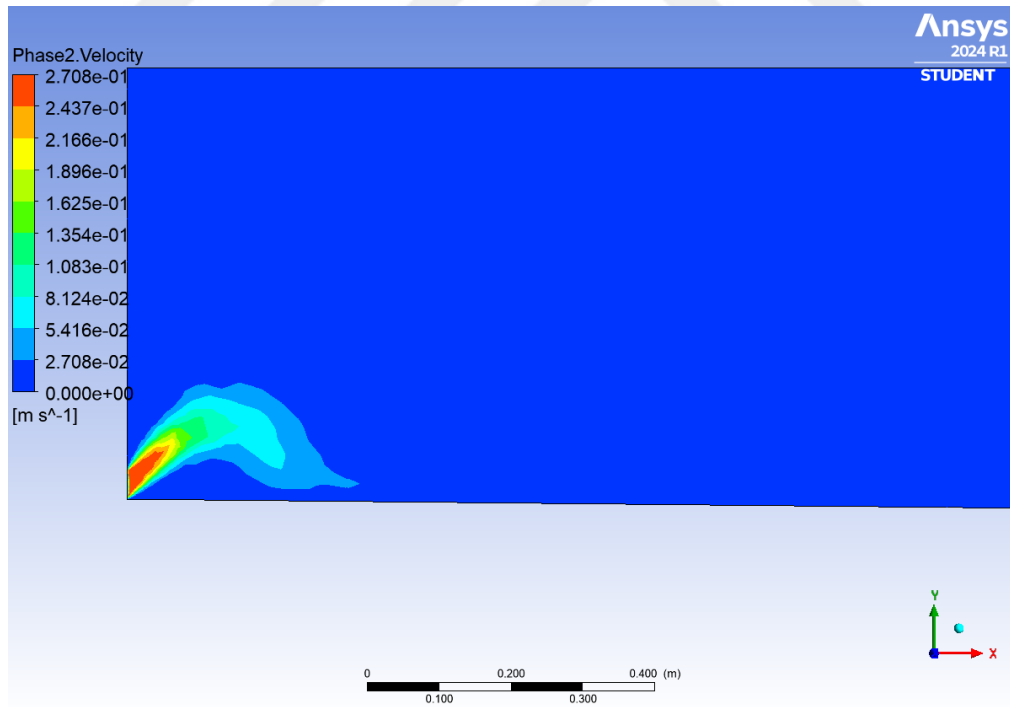
Bu modelde geometri, ağ örgüsü ve kurulum aşamasında yapılan bütün ayarlar ve girilen bütün değerler Model 1 ile tamamen aynıdır; tek fark deşarj açısının 30° yerine 45° olmasıdır. Aynı deşarj koşulları altında, deşarj açısının bir miktar artırılmasının jetin biçimi, davranışı ve seyrelme üzerine etkileri irdelenmek istenmiştir. Hacim oranı konturlarının üstten ve xy düzlemi üzerindeki görünüşleri, ikinci fazın hız büyüklüğünün xy düzlemi üzerindeki görüntüsü ve ikinci model için karışımın yoğunluğunun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 14-17'de verilmiştir:



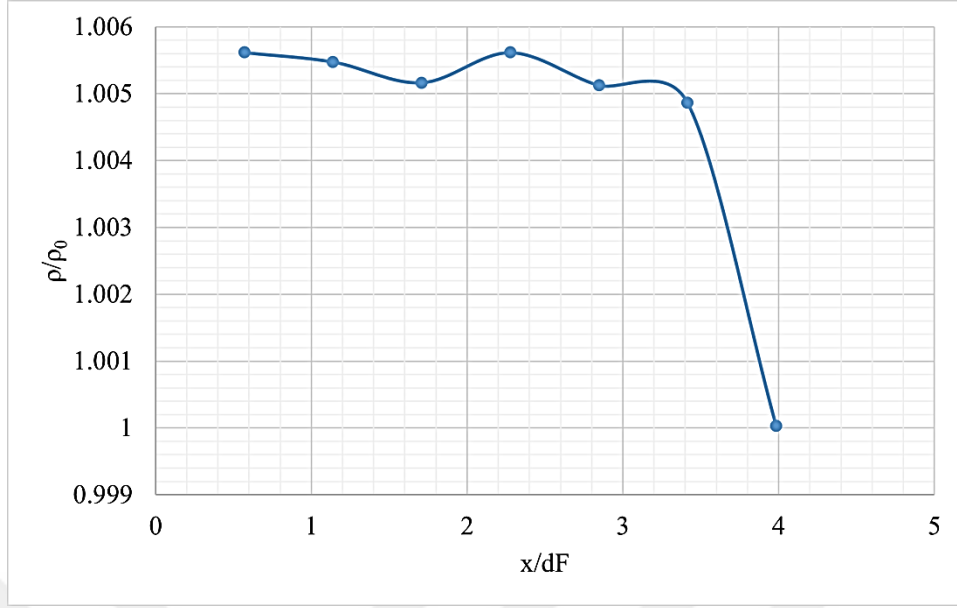
Şekil 14. Model 2 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



Şekil 15. Model 2 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 16. Model 2 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 17. Model 2 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Tablo 7 model sonuçlarını özetlemektedir. Beklenildiği gibi, deşarj açısının artırılması maksimum saçak yüksekliğini artırmış; etki mesafesi ve yakın alan mesafesini azaltmıştır. Zeitoun vd. (1972), Cipollina vd. (2005), Kheirkah Gildeh vd. (2015) ve Crowe vd. (2016), 30° ile 45° de dahil olmak üzere farklı deşarj açılarının jet geometrileri üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, 45° deşarj açısı için 30° deşarj açısına kıyasla daha yüksek maksimum saçak yüksekliği ve daha düşük dönüş noktası mesafesi değerleri gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde Jiang vd. (2014) çalışmalarında, benzer koşullar altında hem 30° hem de 45° açıyla yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, 45° deşarj açısı için yatayda daha düşük bir dönüş noktası mesafesi gözlemlemişlerdir.

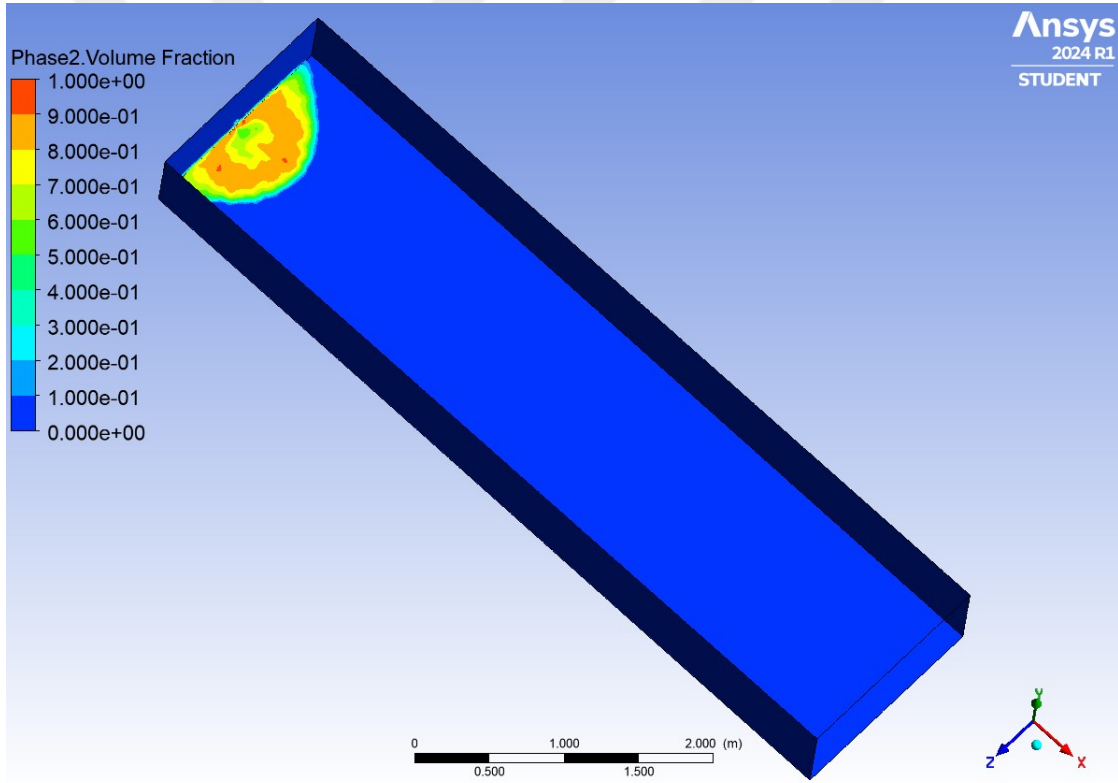
Seyrelme yüzdelere bakıldığında, Model 2’de Model 1’e kıyasla dramatik bir artış gözlemlenmiştir; bunun bir sonucu, Model 2’de son yoğunluk değerinin ölçüldüğü nokta olan $x=0.7$ m’nin, yakın alan mesafesi sonuna Model 1’de olduğundan daha yakın olması olabilir. Özet olarak, deşarj açısının artırılması sonucu Model 2’de yakın alan mesafesi de azalmış, bu bölgede gerçekleşen seyrelme daha kısa bir mesafede gerçekleşmiştir.

Tablo 7. Model 2 sonuçları

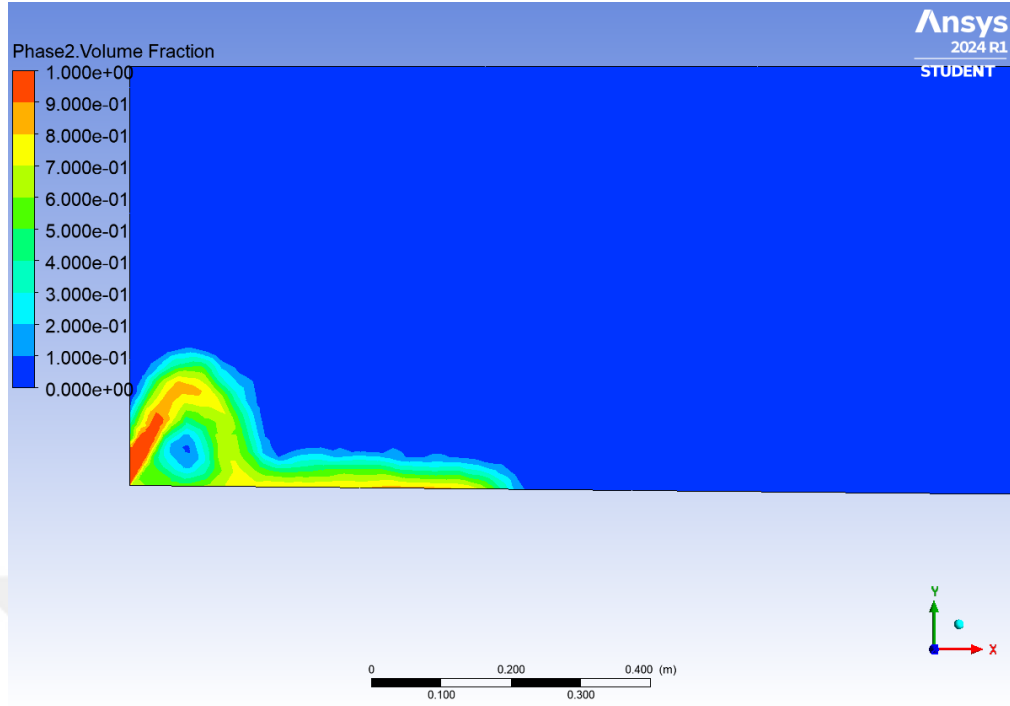
		y_t (m)	x_i (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	($z=0.75$ m)	0.2715	0.2791	0.7100	99.64

3.4. Model 3'ün Bulguları ve İrdelenmesi

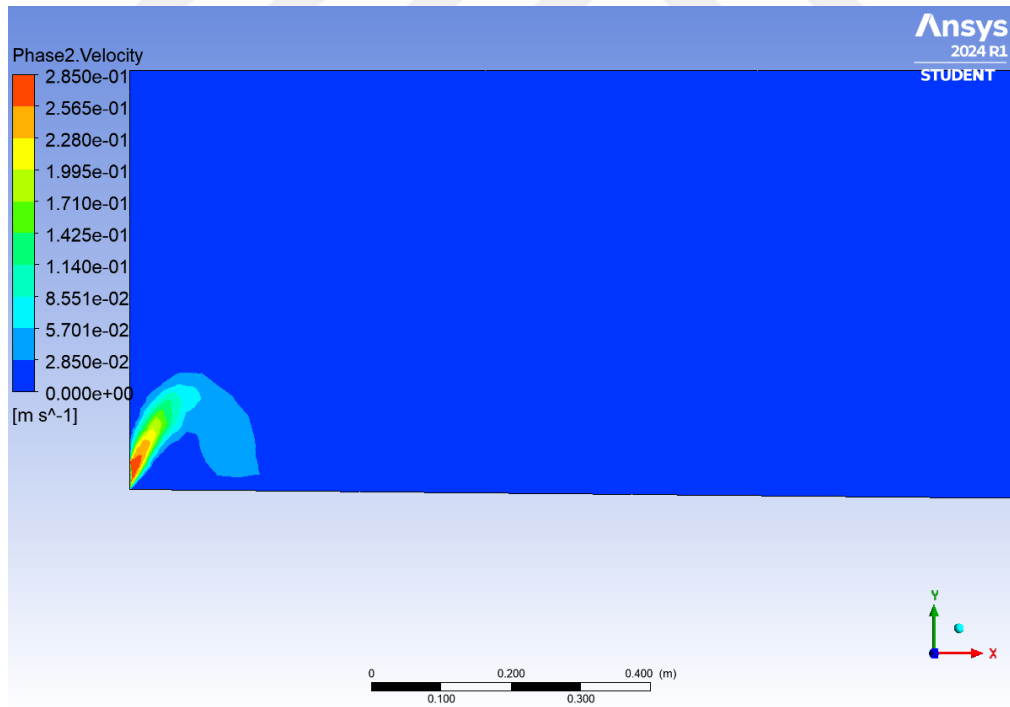
Bu modelde geometri, ağ örgüsü ve kurulum aşamasında yapılan bütün ayarlar ve girilen bütün değerler Model 2 ile tamamen aynıdır; sadece deşarj açısı 45° yerine 60° olarak belirlenmiştir. İkinci modelde olduğu gibi bu modelde de deşarj açısının bir önceki modele göre artırılmasının jet biçimi, davranışı ve seyrelme verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hacim oranı konturlarının üstten ve xy düzlemi üzerindeki görünüşleri, ikinci fazın hız büyüklüğünün xy düzlemi üzerindeki görüntüsü ve karışımın yoğunluğunun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 18-21'de verilmiştir:



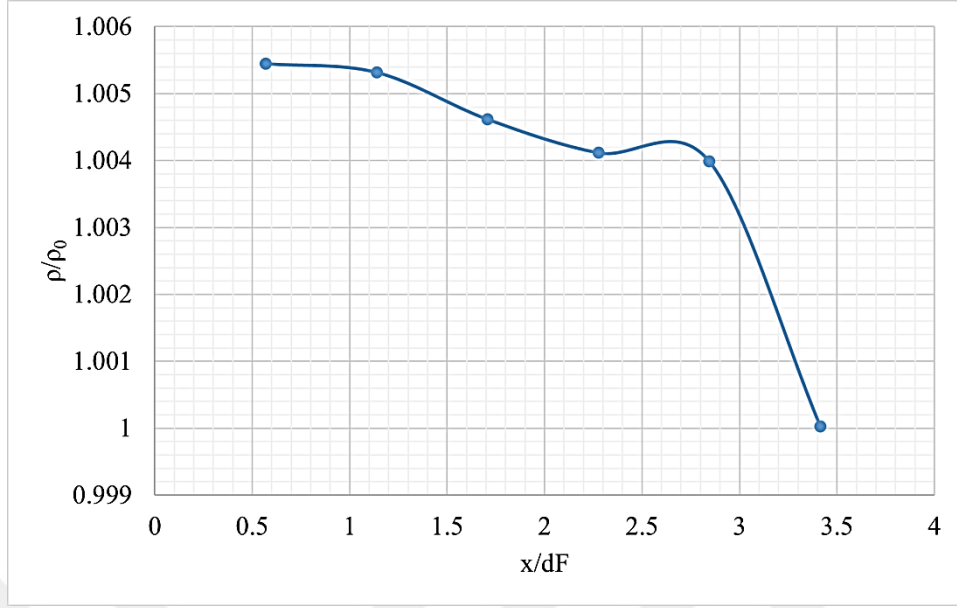
Şekil 18. Model 3 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



Şekil 19. Model 3 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 20. Model 3 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 21. Model 3 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Tablo 8 model sonuçlarını özetlemektedir. Yine beklenildiği gibi, deşarj açısının artırılması maksimum saçak yüksekliğini artırmış; etki mesafesi ve yakın alan mesafesini azaltmıştır. Bu durum literatürdeki bulgularla uyum içerisindedir (Zeitoun vd., 1972; Roberts vd., 1997; Cipollina vd., 2005; Jirka, 2008; Kheirkah Gildeh vd., 2015). Zeitoun vd. (1972), Roberts vd. (1997) ve Cipollina vd. (2005) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, dönüş noktasının yatay mesafesinin daha yüksek deşarj açılarında daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Jirka (2008) aynı sonuca yaptığı integral model yöntemiyle yaptığı çalışma sonucu varmıştır: 60° açı ile yapılan yoğun su deşarjlarında jet, 30-45° aralığında yapılan deşarjlardakine göre daha kısa etki mesafesine sahip olmuştur. Yine Zeitoun vd. (1972), Cipollina vd. (2005) ve Jirka (2008) çalışmalarında 60° açıyla yapılan deşarjlarda maksimum saçak yüksekliğinin daha düşük açılarla yapılan deşarjlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Seyrelme yüzdelerine bakıldığında, Model 3'ün az da olsa seyrelmeyi artırdığı görülmektedir. Bu da Zeitoun vd. (1972) çalışmalarında öne sürdüğü 60° deşarj açısının en uzun jet yörüngesini ve en iyi seyrelme verimini verdiği görüşüyle uyumlu bir sonuçtur.

Tablo 8. Model 3 sonuçları

		y_t (m)	x_i (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	(z=0.75 m)	0.2898	0.1866	0.6093	99.68

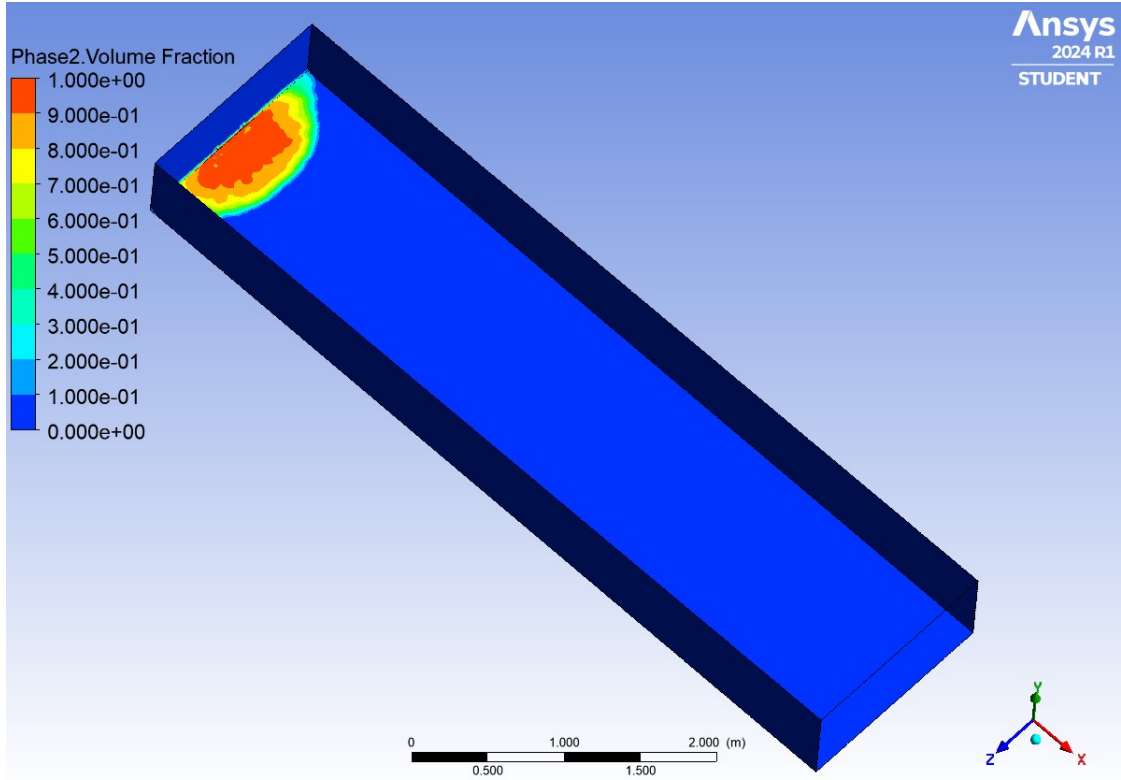
3.5. Model 4'ün Bulguları ve İrdelenmesi

Bu modelde çıkış ucu sayısı bir artırılmıştır. İki çıkış ucunun arasındaki mesafe 0.25 m olarak girilmiştir. Deşarj açısı, ilk üç modelde alınan sonuçlara bakılarak, modellemesi yapılan deşarj koşulları altında en iyi seyrelme verimini sağlayan açı olan 60° olarak seçilmiştir. Çıkış ucu sayısının artması ile birlikte daha önceden tek bir çıkış ucundan deşarjı yapılan toplam yoğun su debisi iki çıkış ucuna dağıtılmış, dolayısıyla çıkış ucu debisi düşmüştür; ancak çıkış ucu çaplarının sabit tutulması sebebiyle jet hızları ve yoğunluksal Froude sayısı düşmüştür. Dolayısıyla bu modelde hem çoklu jet olması durumunda jetler arası olması muhtemel etkileşimin hem de jet hızındaki düşüşün jetlerin biçimi, davranışı ve seyrelme üzerine etkileri incelenmiştir.

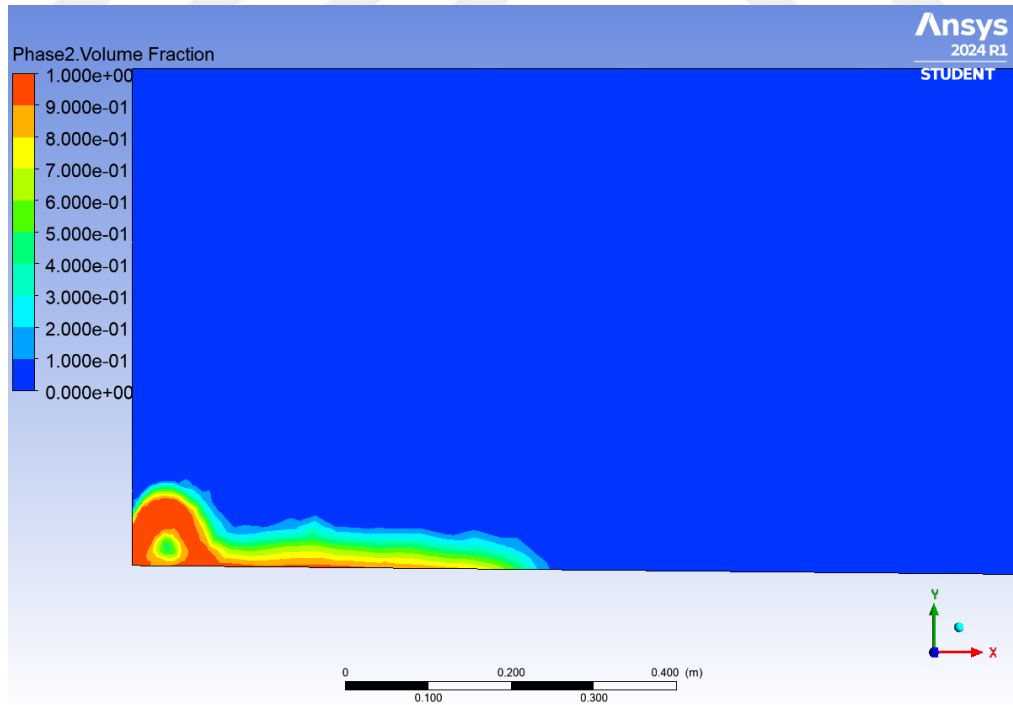
Hacim oranı ve hız büyüklüğü konturlarının kesit görüntüleri her iki çıkış ucunun da merkezinden geçen $z=0.625$ m ve $z=0.875$ m koordinatlarından başlayan xy düzlemleri üzerinde alınmıştır. Hacim oranı konturlarının üst ve profil görüntüleri, hız büyüklüğü konturlarının profil görüntüleri ve yoğunluğun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 22-27'de görülmektedir.

Tablo 9 model sonuçlarını özetlemektedir. Literatürde çıkış ucu sayısının artırılmasının gerekli jet hızını ve maksimum saçak yüksekliğini düşürdüğü belirtilmektedir (Roberts, 2018). Bunu destekler nitelikte, Model 4'ün sonuçlarına bakıldığında maksimum saçak yüksekliğinin Model 3'e göre düştüğü görülmektedir.

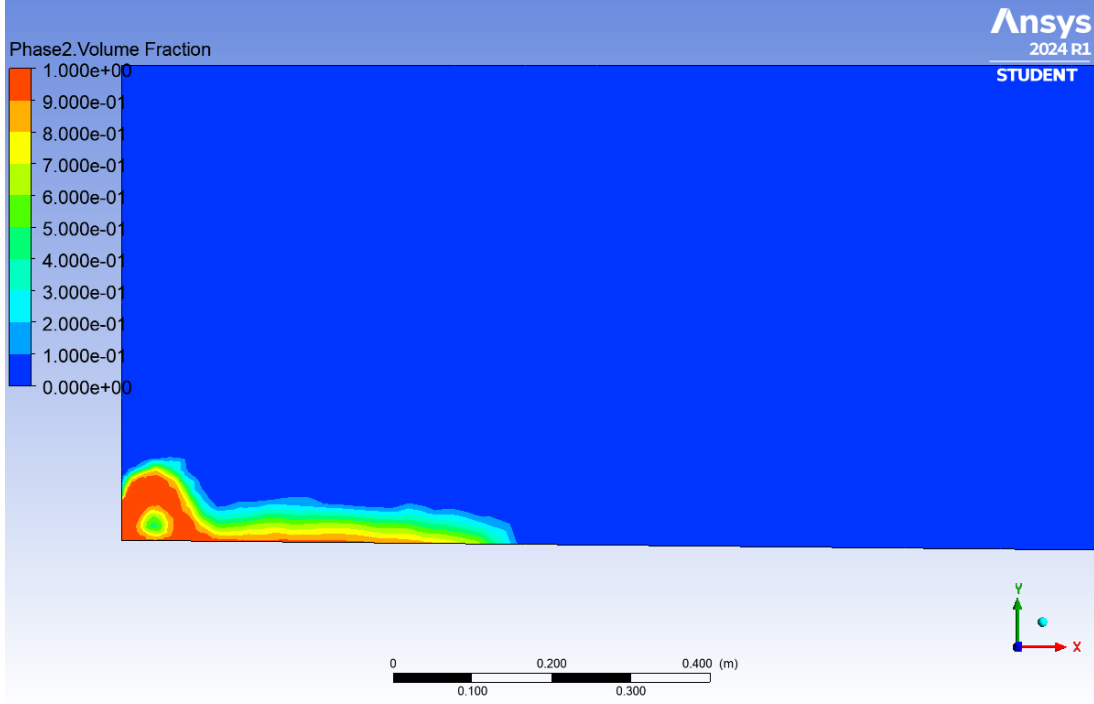
Şekil 22'de görüldüğü üzere iki jet arasında görüntüde belirgin bir ayrım yoktur; bunlar alıcı ortamda neredeyse bir bütün olarak ilerlemişlerdir. Dolayısıyla jetler arasında beklenen etkileşimin meydana geldiği, bunun alıcı ortam suyunun jetlerin içerisine sürüklenmesini önemli ölçüde engellediği ve sonuç olarak seyrelme veriminin karşılaştırma yapılan üçüncü modele göre önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmektedir. Etki mesafesi ve yakın alan uzaklıklarına bakıldığında bu mesafelerin dördüncü modelde üçüncü modele kıyasla azaldığı görülmektedir.



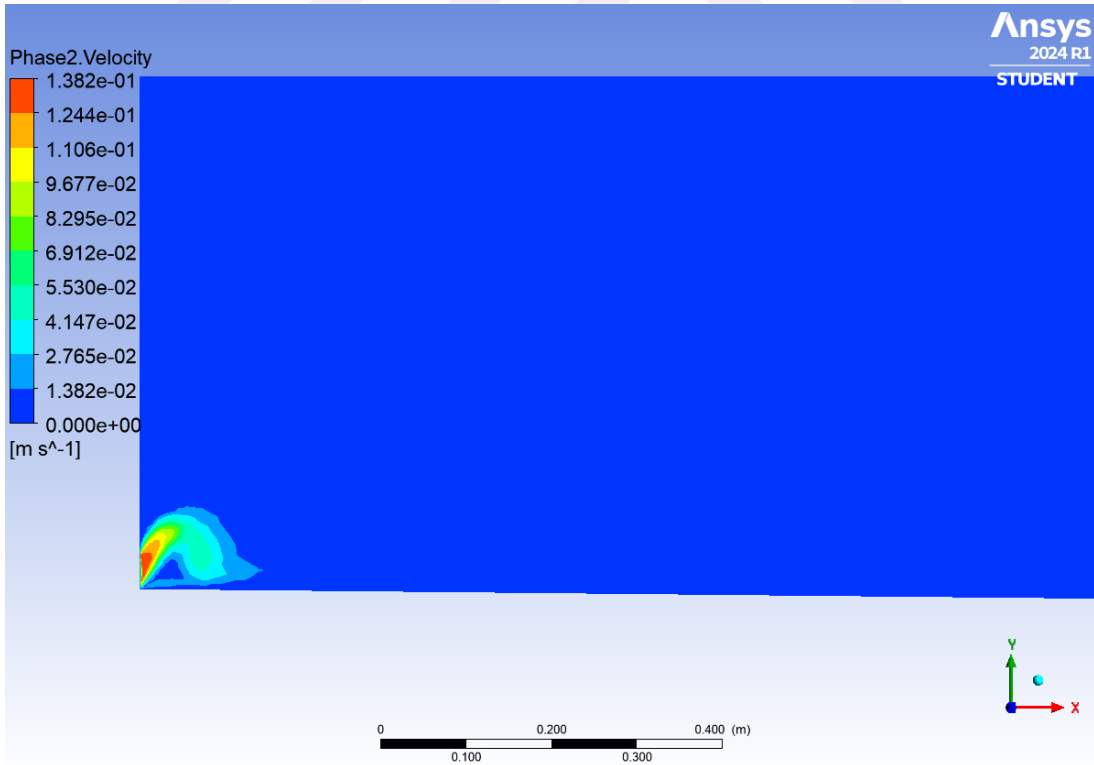
Şekil 22. Model 4 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



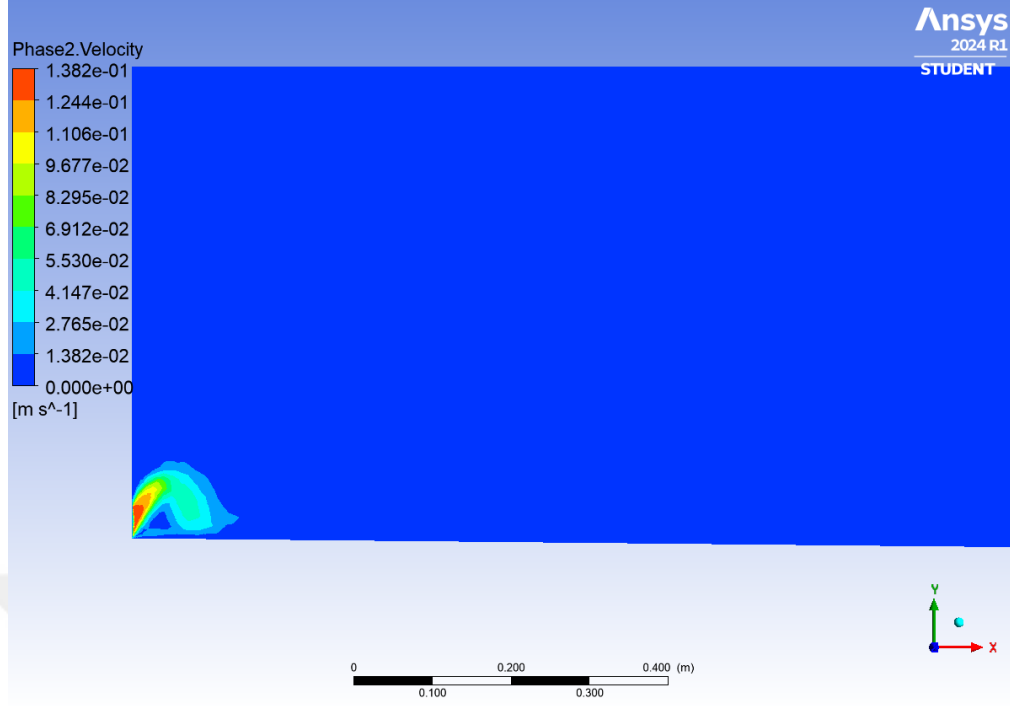
Şekil 23. Model 4 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.625$ m)



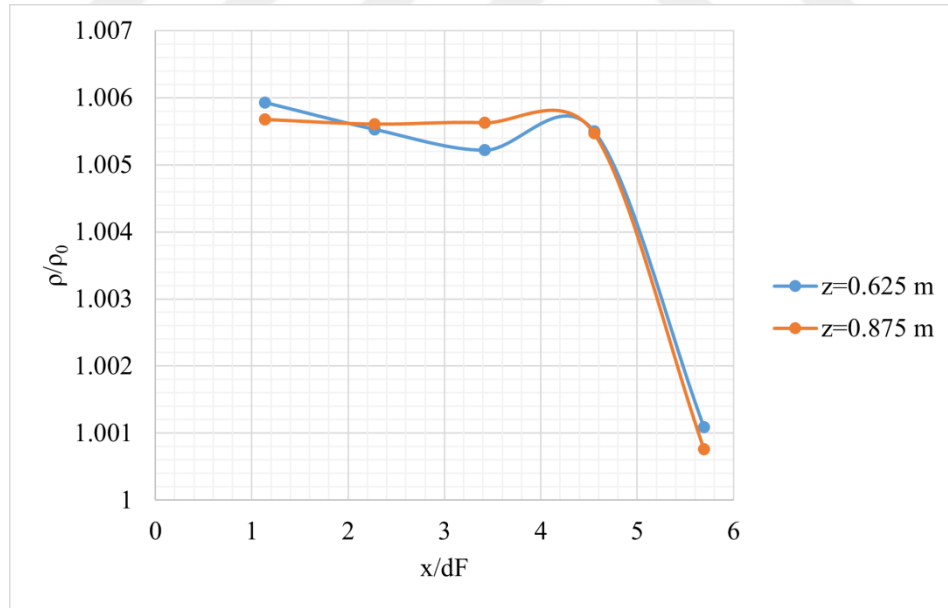
Şekil 24. Model 4 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.875$ m)



Şekil 25. Model 4 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.625$ m)



Şekil 26. Model 4 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.875$ m)



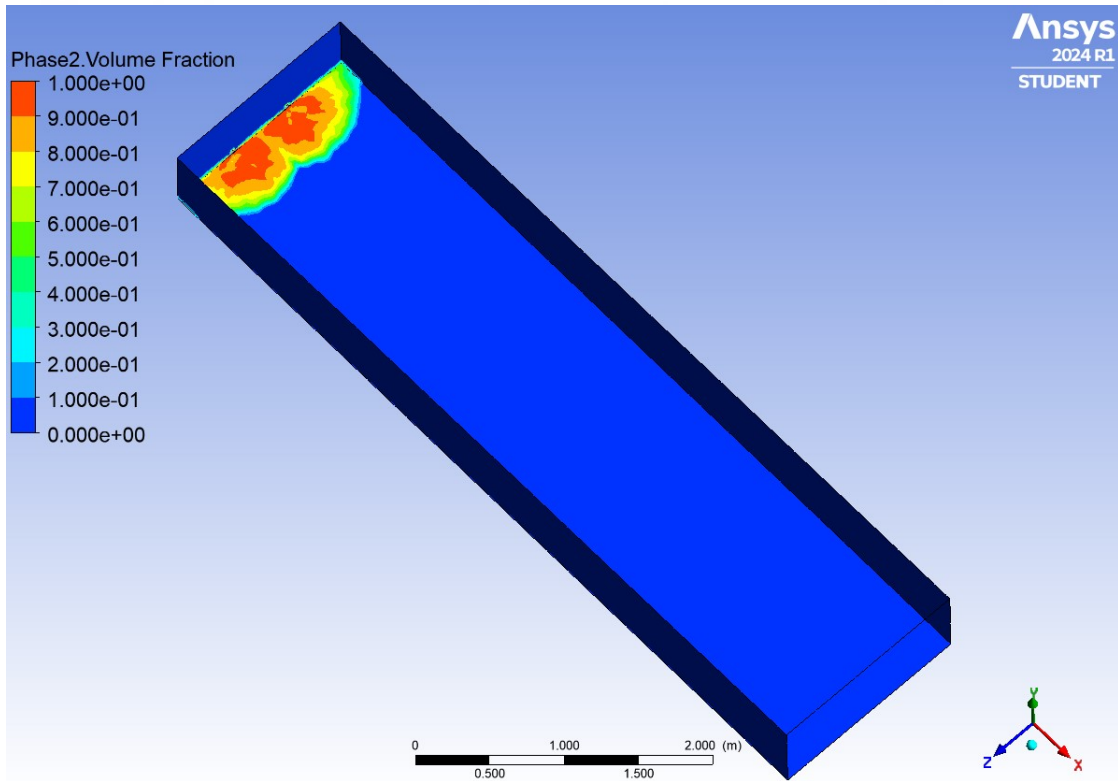
Şekil 27. Model 4 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Tablo 9. Model 4 sonuçları

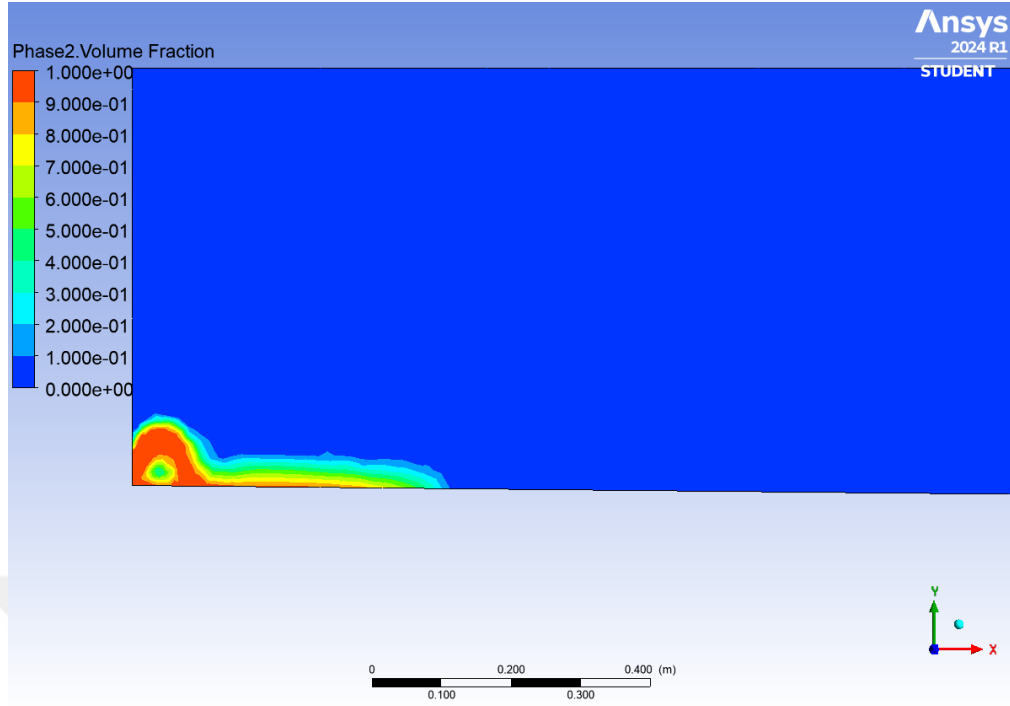
		y_t (m)	x_i (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	$z=0.625$ m	0.1832	0.1260	0.5376	88.50
	$z=0.875$ m	0.1798	0.1299	0.5312	91.95

3.6. Model 5'in Bulguları ve İrdelenmesi

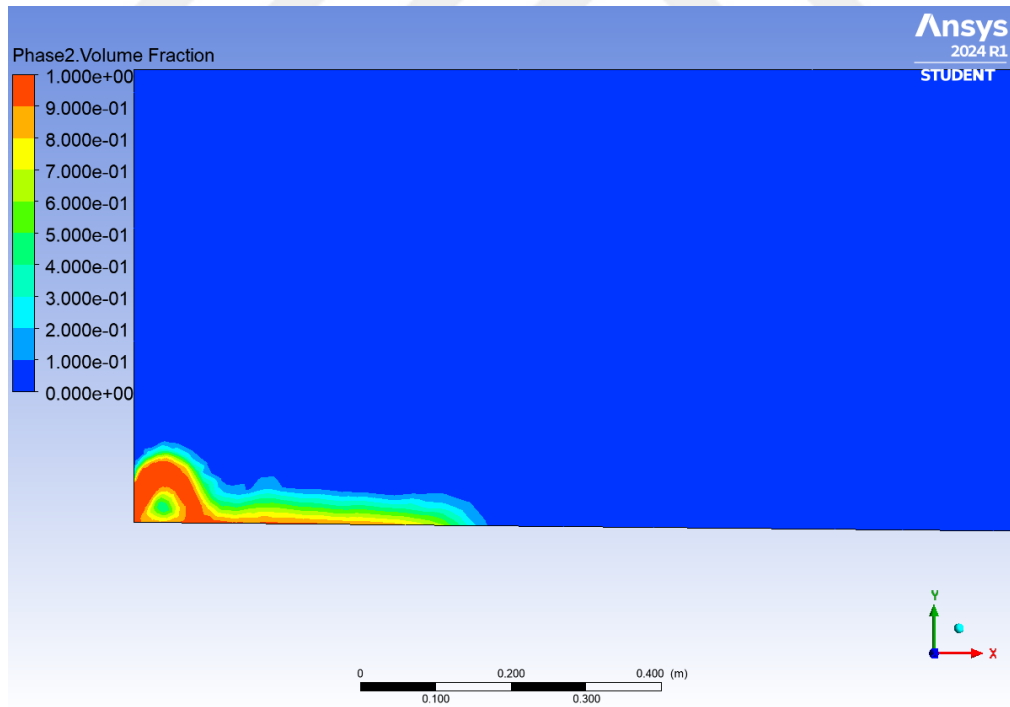
Bu modelde Model 4'ten farklı olarak çıkış uçları arası mesafe 0.5 m olacak şekilde girilmiş, yani iki katına çıkarılmıştır. Geometri, ağ örgüsü ve kurulum ile ilgili kalan her şey Model 4 ile aynıdır. Bu modelin simülasyonu ile birlikte, çıkış uçları arası mesafenin artmasının çoklu jetlerde gözlemlenen girişim davranışı, jetlerin biçimi ve seyrelme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hacim oranı konturlarının üst ve profil görüntüleri, hız büyüklüğü konturlarının profil görüntüleri ve yoğunluğun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 28-33'de görülmektedir.



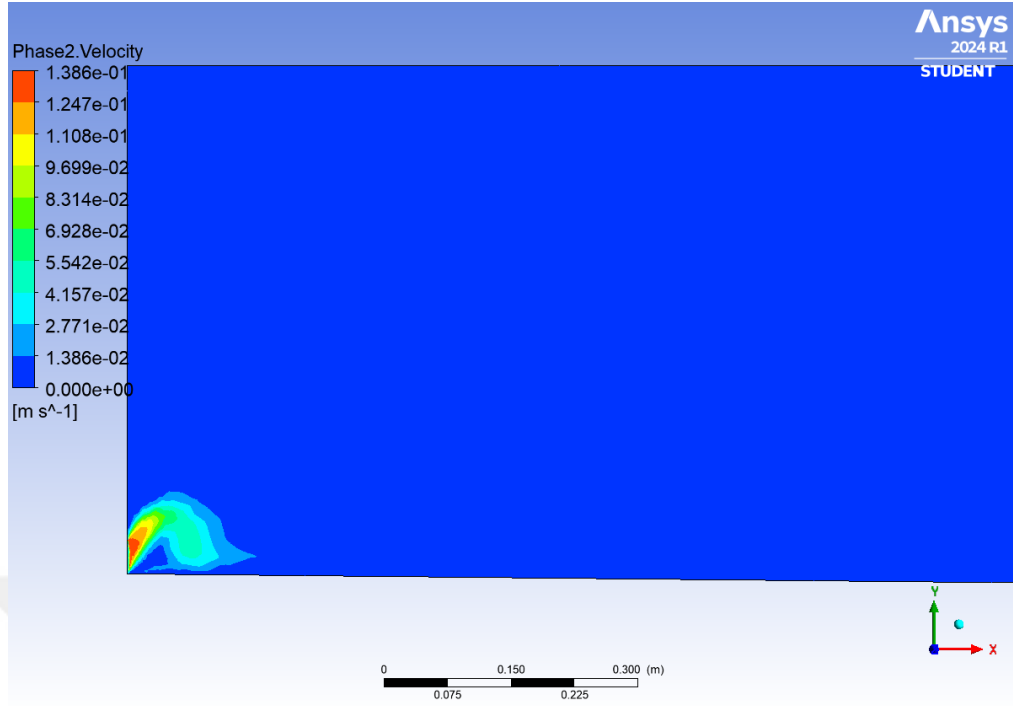
Şekil 28. Model 5 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



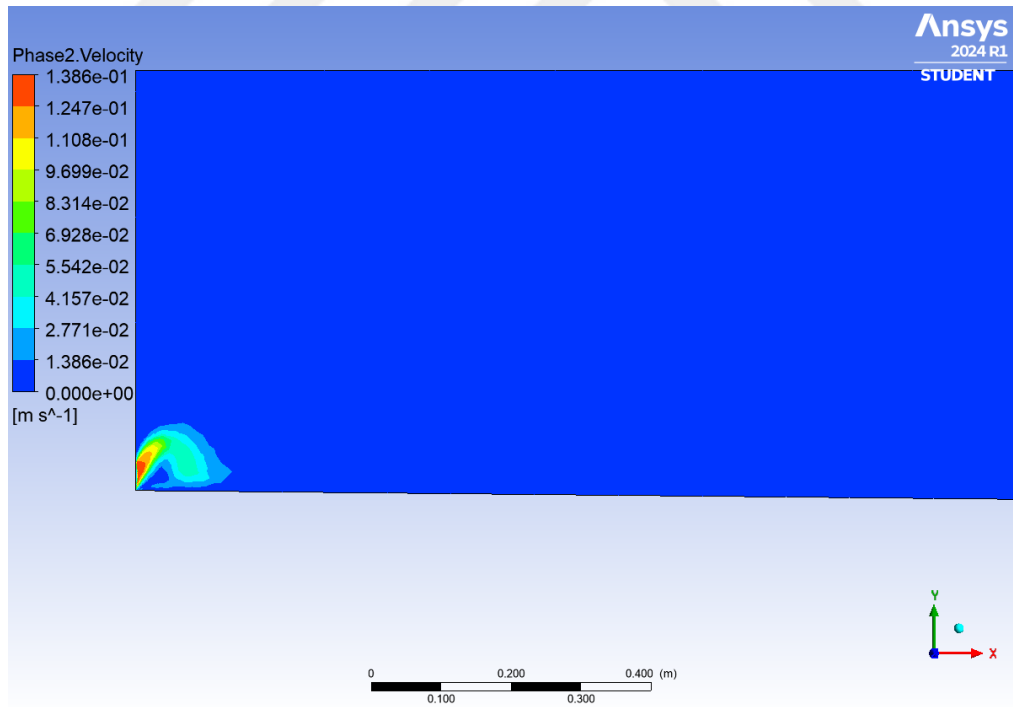
Şekil 29. Model 5 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



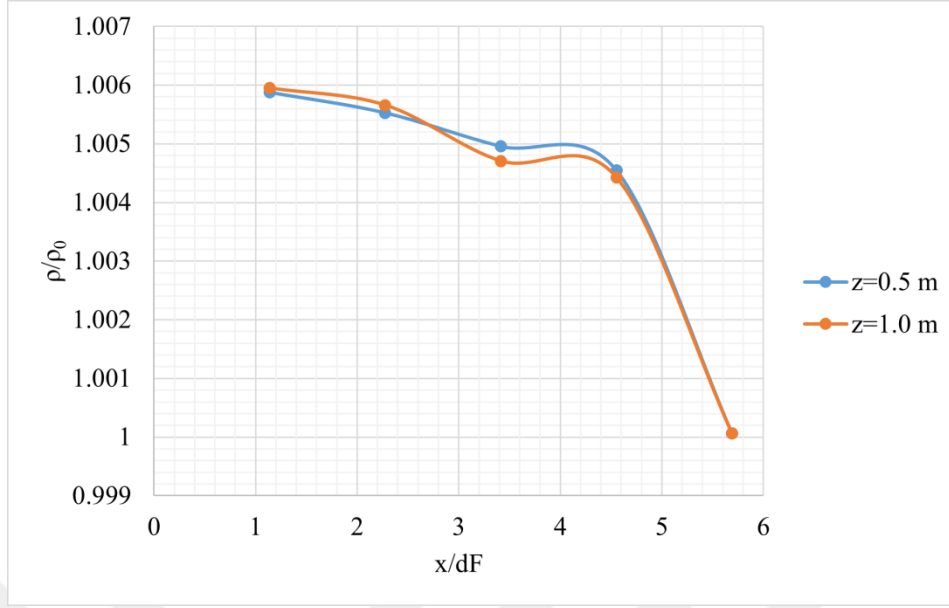
Şekil 30. Model 5 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)



Şekil 31. Model 5 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



Şekil 32. Model 5 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)



Şekil 33. Model 5 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

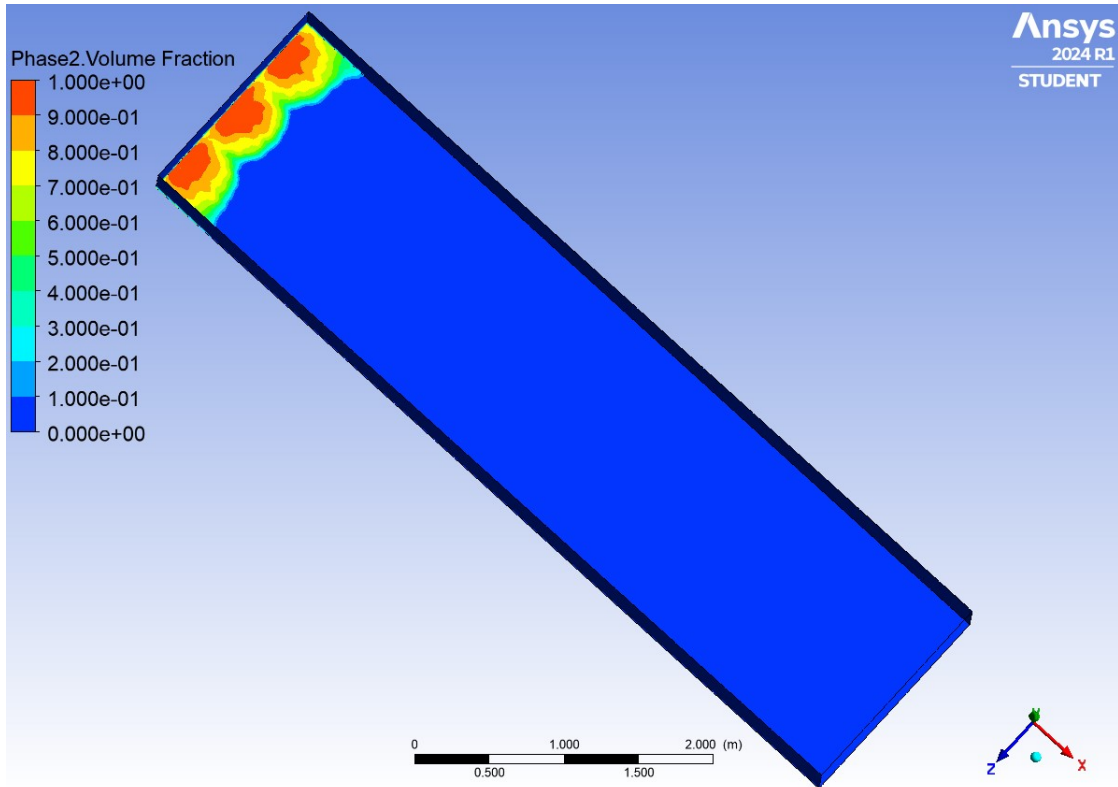
Tablo 10 model sonuçlarını özetlemektedir. Beklenildiği gibi, çıkış uçları arası mesafenin artırılması, jetin içine sürüklenabilen alıcı ortam suyu miktarını artırmış ve bu da seyrelme veriminde artışa yol açmıştır. Jetler arasında hala bir girişim vardır, ancak Şekil 28’de açıkça görülebildiği üzere bu durum bir önceki modele göre daha düşük bir şiddettedir ve jetler arasında hafif de olsa bir ayırım yapılabilmektedir. Kaye ve Linden (2004) yaptıkları deneysel çalışmalar, Castro-Faccetti vd. (2019) ise sayısal modelleme çalışmaları ile jetlerin birleşme noktasının jetler arası başlangıç mesafesine bağlı olduğunu ve bu mesafenin artmasının birleşme yüksekliğini artırdığını gözlemlemişlerdir. Maksimum saçak yüksekliği artmıştır; bu durum literatürde belirtilen sonuçlarla uyumludur (Abessi ve Roberts, 2014; Yan ve Mohammadian, 2019). Etki mesafesi ve yakın alan mesafesi ise çıkış uçları arası mesafenin artırılması sonucu azalmıştır.

Tablo 10. Model 5 sonuçları

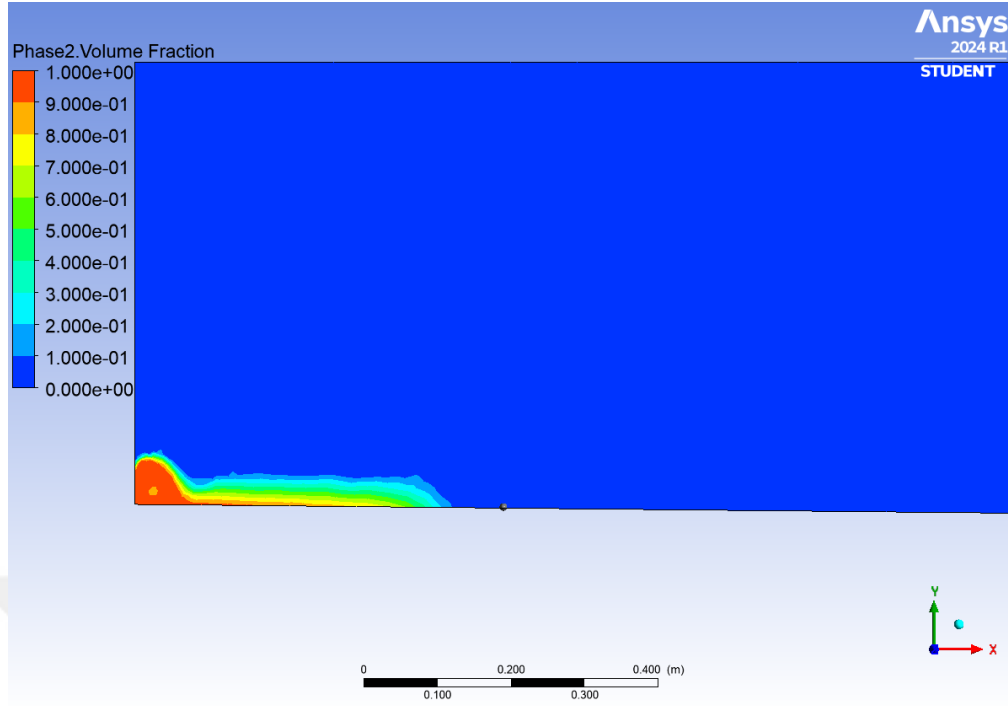
		y_t (m)	x_t (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	$z=0.5$ m	0.1876	0.1200	0.4901	99.35
	$z=1.0$ m	0.1817	0.1147	0.4973	99.32

3.7. Model 6'nın Bulguları ve İrdelenmesi

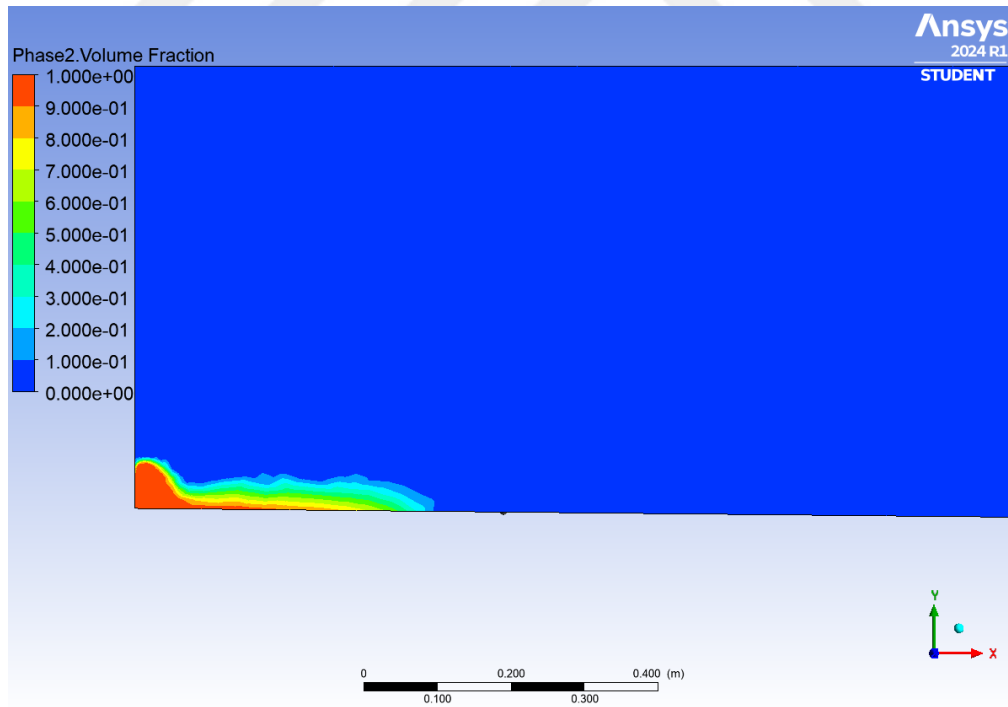
Bu modelde çıkış ucu sayısı ikiden üçe çıkarılmıştır. Modelin kalanı beşinci model ile tamamen aynıdır. Aralarında belirli bir mesafe bulunan iki çıkış ucunun aralarındaki mesafeyi, çaplarını ve yayıcı borunun uzunluğunu değiştirmeden sadece çıkış ucu sayısını artırmanın jetlerin davranışları ve seyrelme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hacim oranı konturlarının üst ve profil görüntüleri, hız büyüklüğü konturlarının profil görüntüleri ve yoğunluğun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 34-41'de görülmektedir.



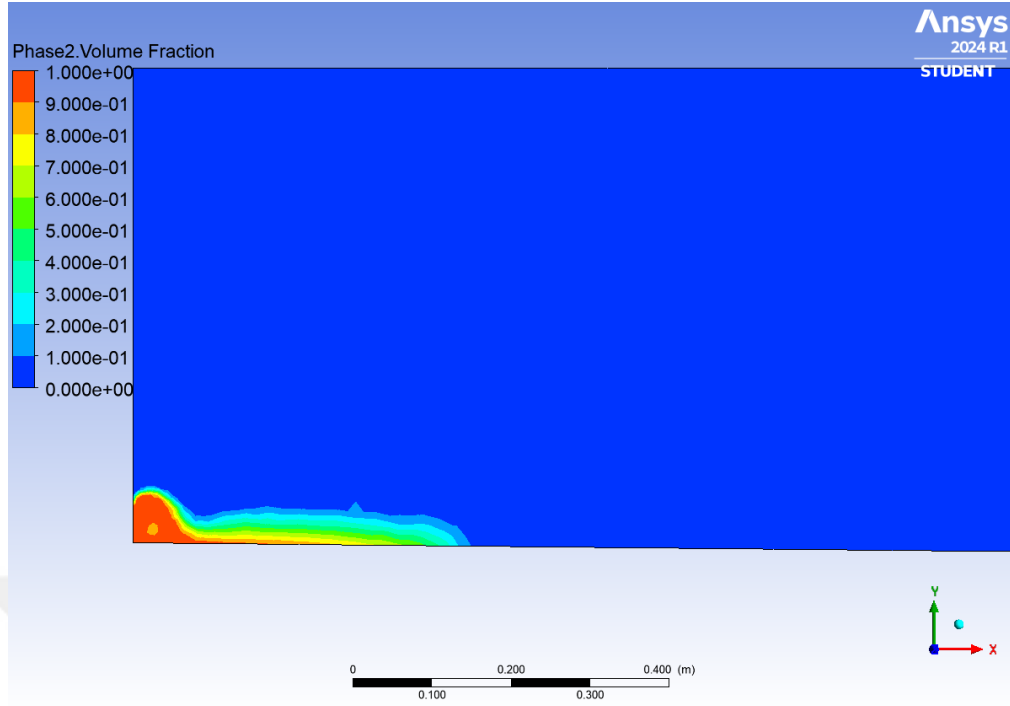
Şekil 34. Model 6 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



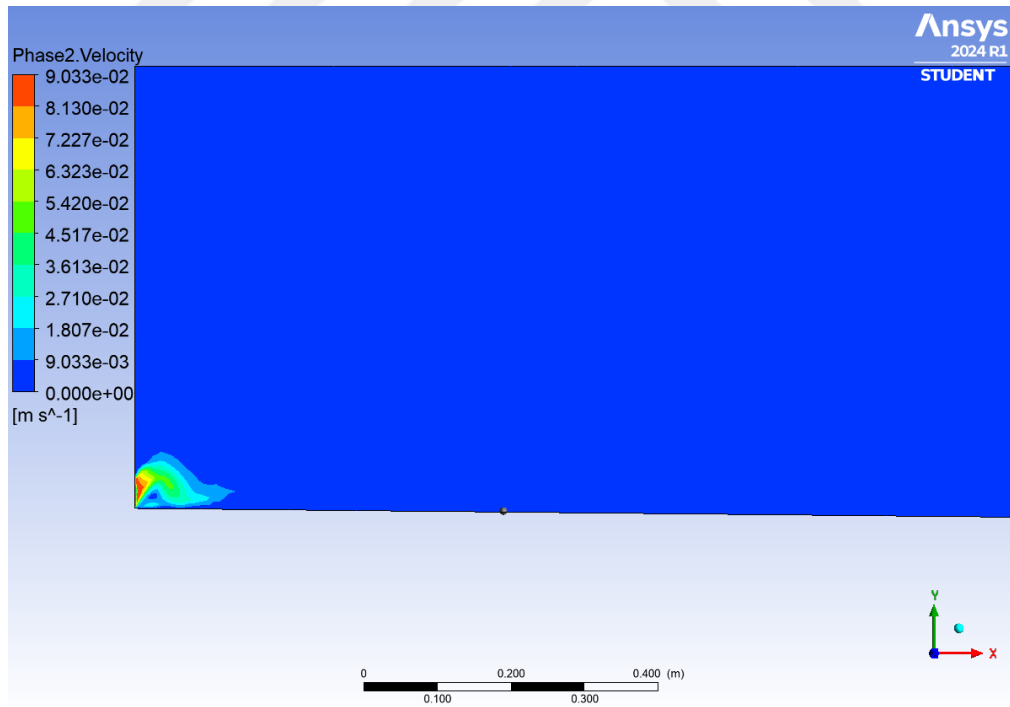
Şekil 35. Model 6 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.25$ m)



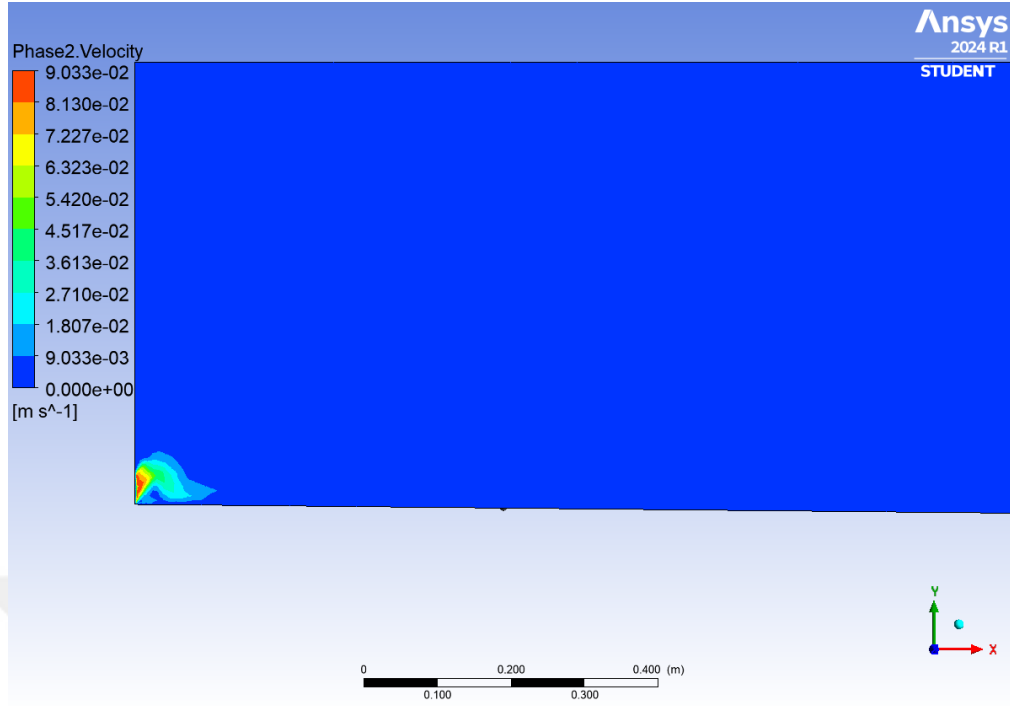
Şekil 36. Model 6 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



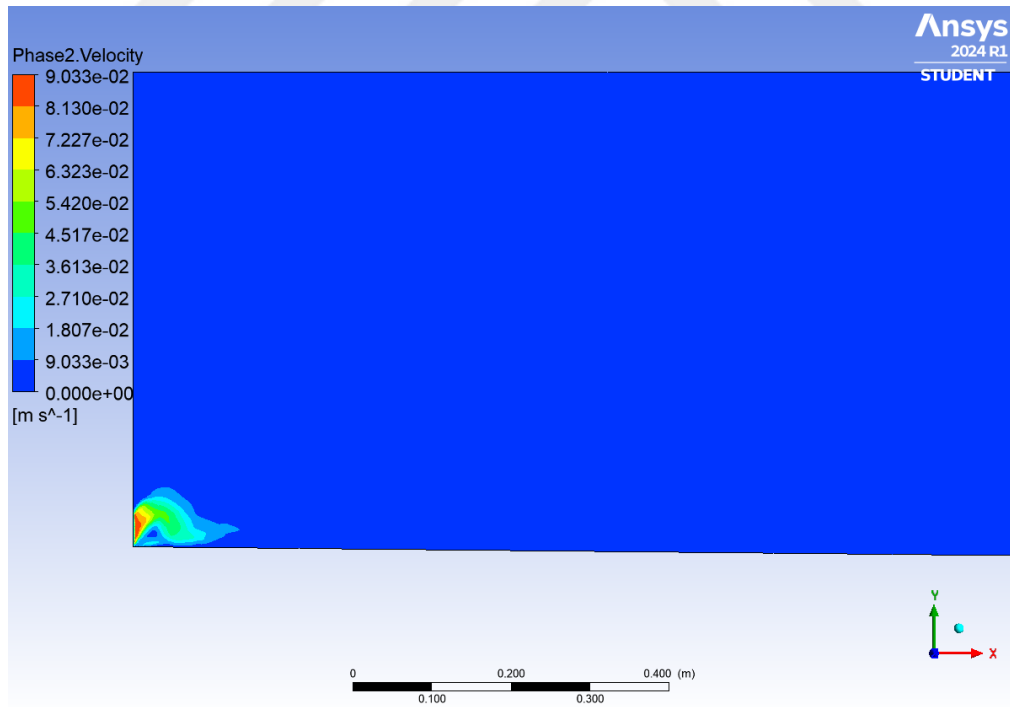
Şekil 37. Model 6 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.25$ m)



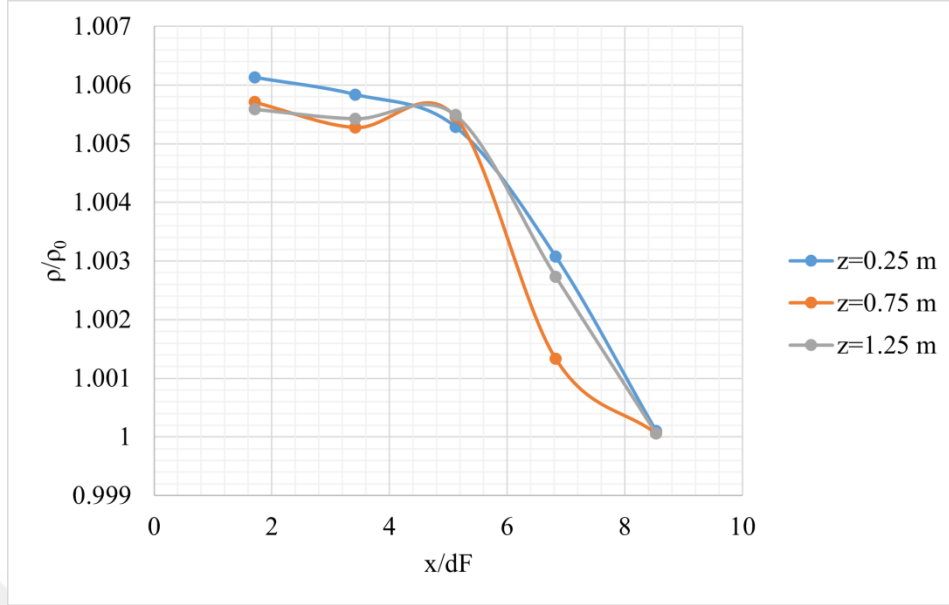
Şekil 38. Model 6 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.25$ m)



Şekil 39. Model 6 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=0.75 m)



Şekil 40. Model 6 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü (z=1.25 m)



Şekil 41. Model 6 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Tablo 11 model sonuçlarını özetlemektedir. Roberts (2018) çalışmasını destekler nitelikte, çıkış ucu sayısının artırılması maksimum saçak yüksekliğini azaltmıştır. Jetler arası girişim beklenildiği düzeyde bir miktar artmış; jet sayısının artırılması ancak yayıcı boyunun sabit tutulması ise $z=0.25$ m ve $z=1.25$ m noktalarından deşarj edilen jetlerin, duvar sınır koşulu olarak tanımlanan sol ve sağ yüzeylerle etkileşim gözle görülür hale gelmiştir. Ortalama seyrelme veriminde ise çok az bir miktarda da olsa azalış gözlemlenmiştir. Etki mesafesi ve yakın alan mesafesi önemli ölçüde azalmıştır.

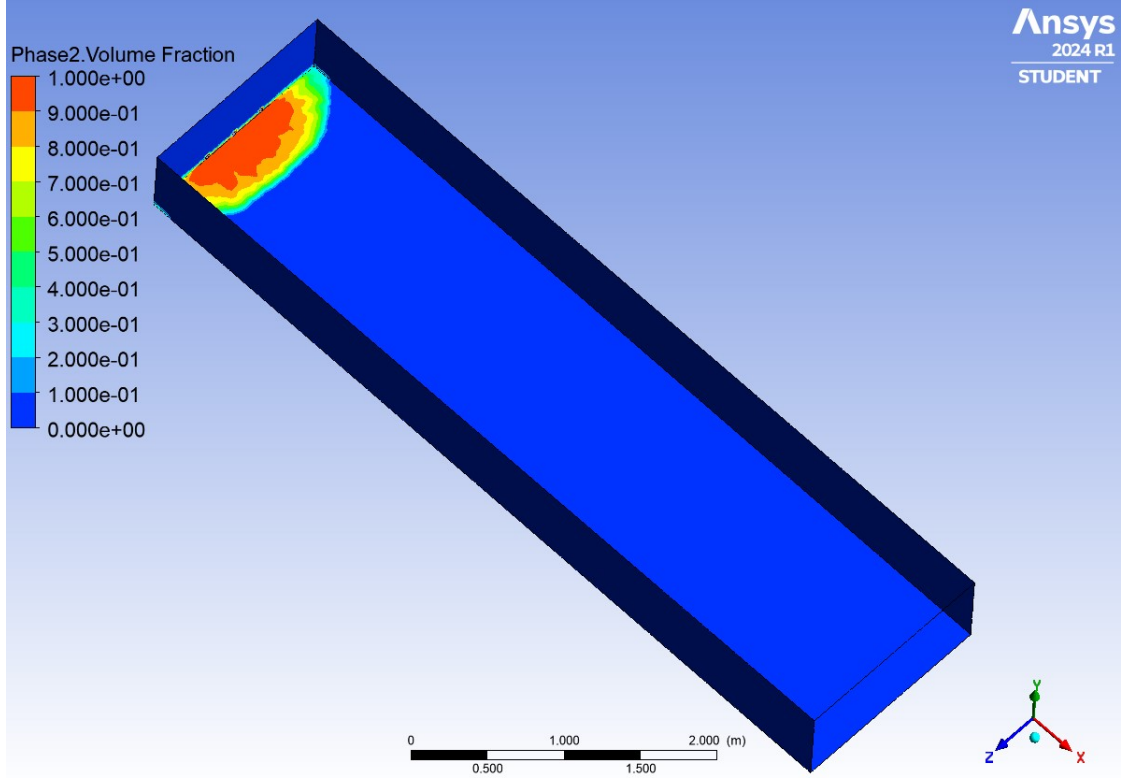
Tablo 11. Model 6 sonuçları

		y_t (m)	x_i (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	$z=0.25$ m	0.1444	0.0900	0.4557	98.94
	$z=0.75$ m	0.1423	0.0798	0.4516	99.37
	$z=1.25$ m	0.1424	0.0961	0.4597	99.37

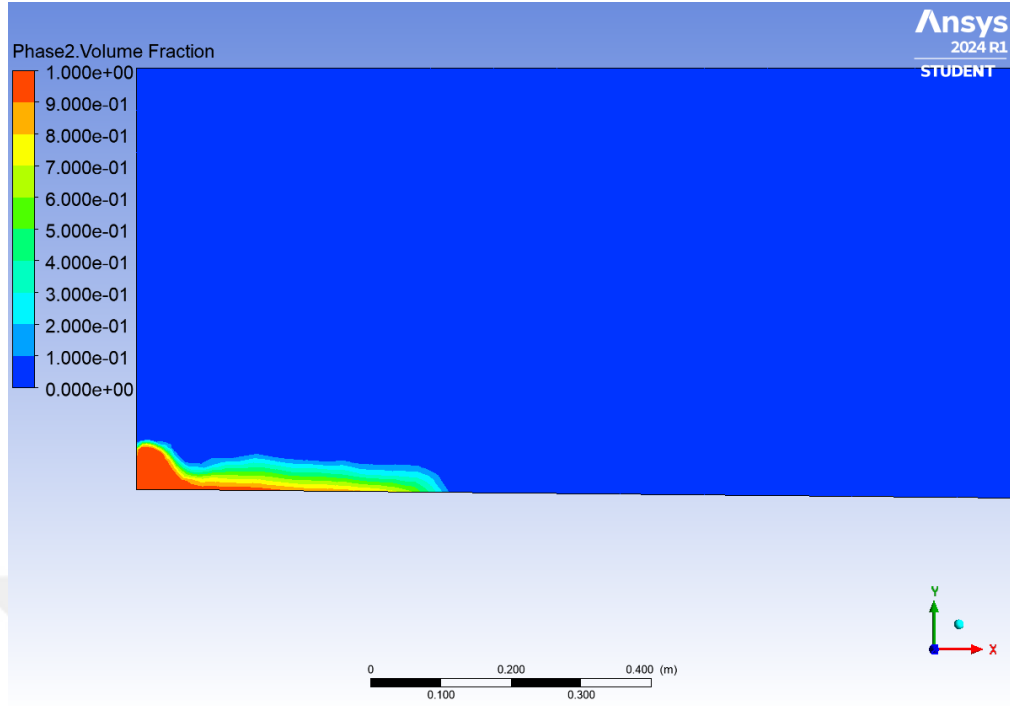
3.8. Model 7'nin Bulguları ve İrdelenmesi

Bu modelde çıkış uçları arası mesafe altıncı modele göre yarıya düşürülüp 0.25 m olarak belirlenmiştir. Geometri, ağ örgüsü ve kurulum ile ilgili kalan her şey aynıdır. Bu modelin simüle edilmesi ile birlikte üç çıkış uçlu yayıcı tasarımında yayıcı borunun

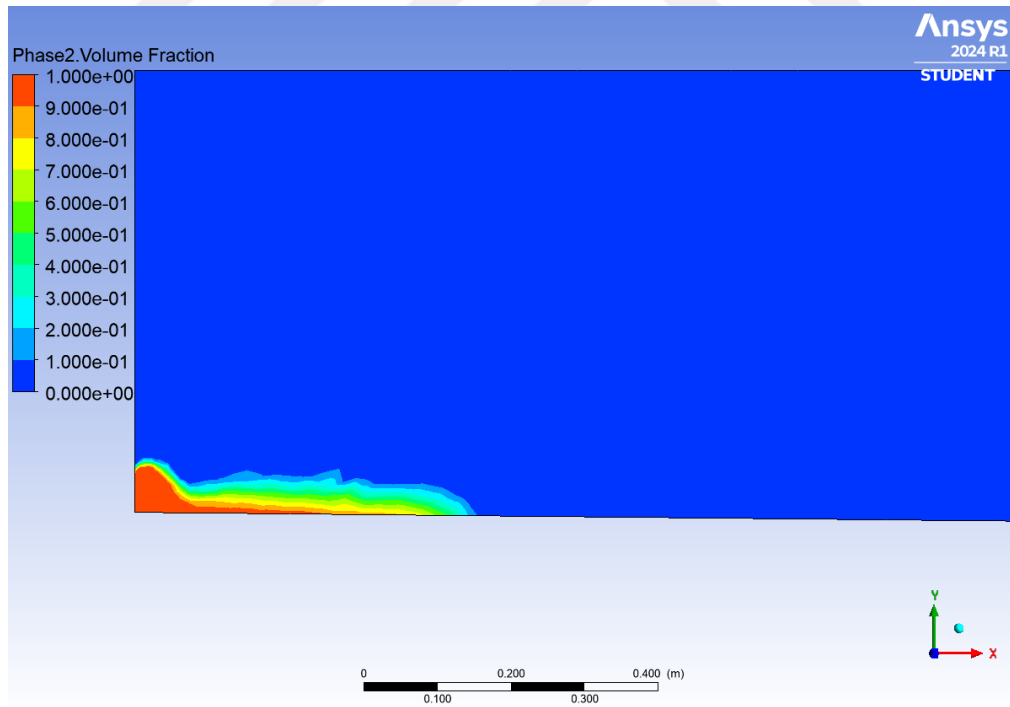
uzunluğunun ve çıkış ucu çaplarının sabit tutulması halinde çıkış uçları arasındaki mesafenin yarıya düşürülmesinin jetlerin biçimi, davranışı ve seyrelmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hacim oranı konturlarının üst ve profil görüntüleri, hız büyüklüğü konturlarının profil görüntüleri ve yoğunluğun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 42-49’da görülmektedir.



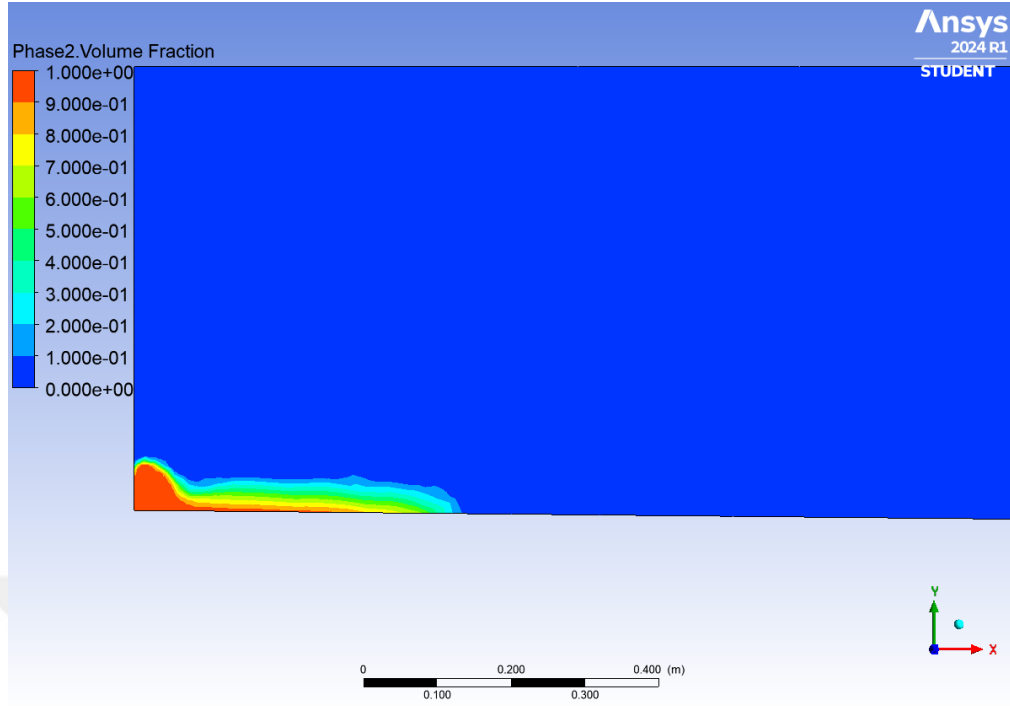
Şekil 42. Model 7 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



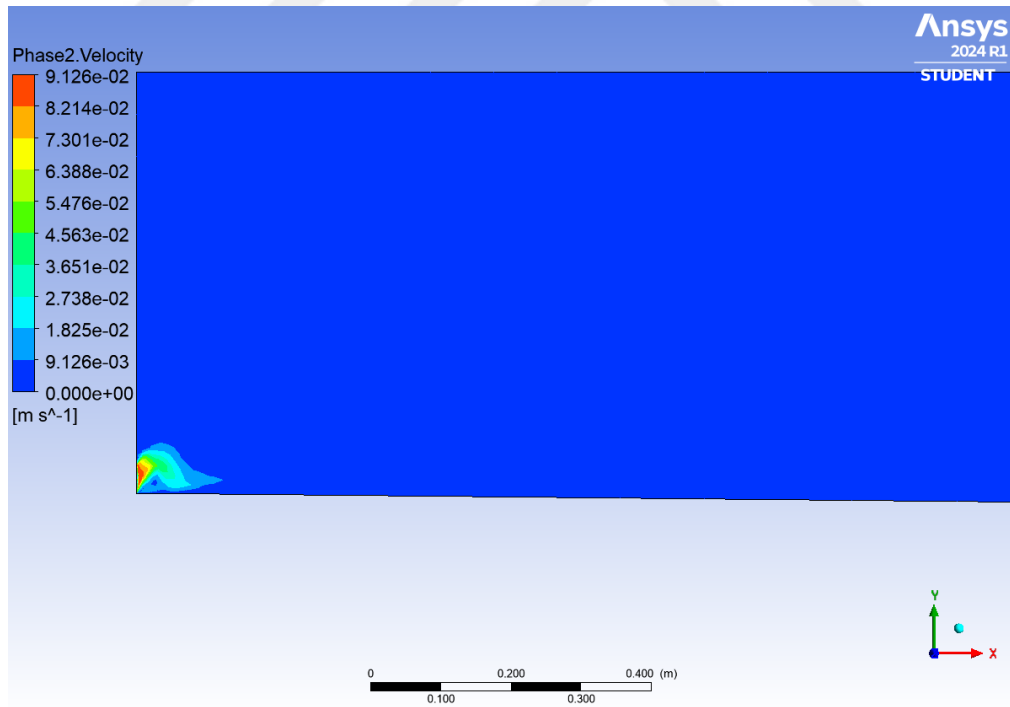
Şekil 43. Model 7 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



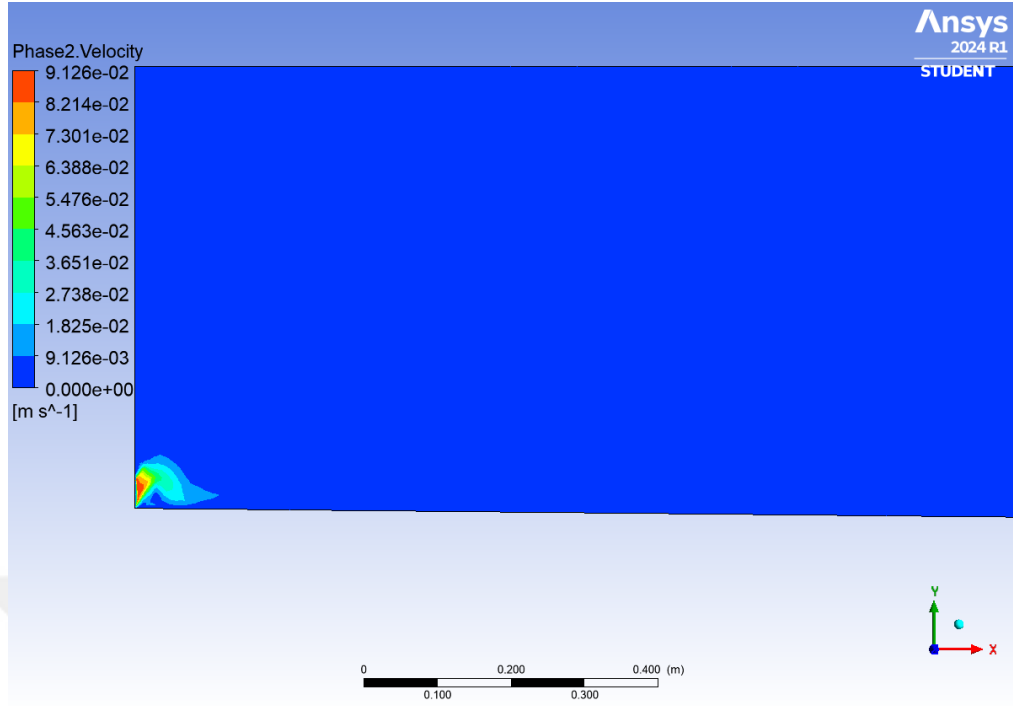
Şekil 44. Model 7 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



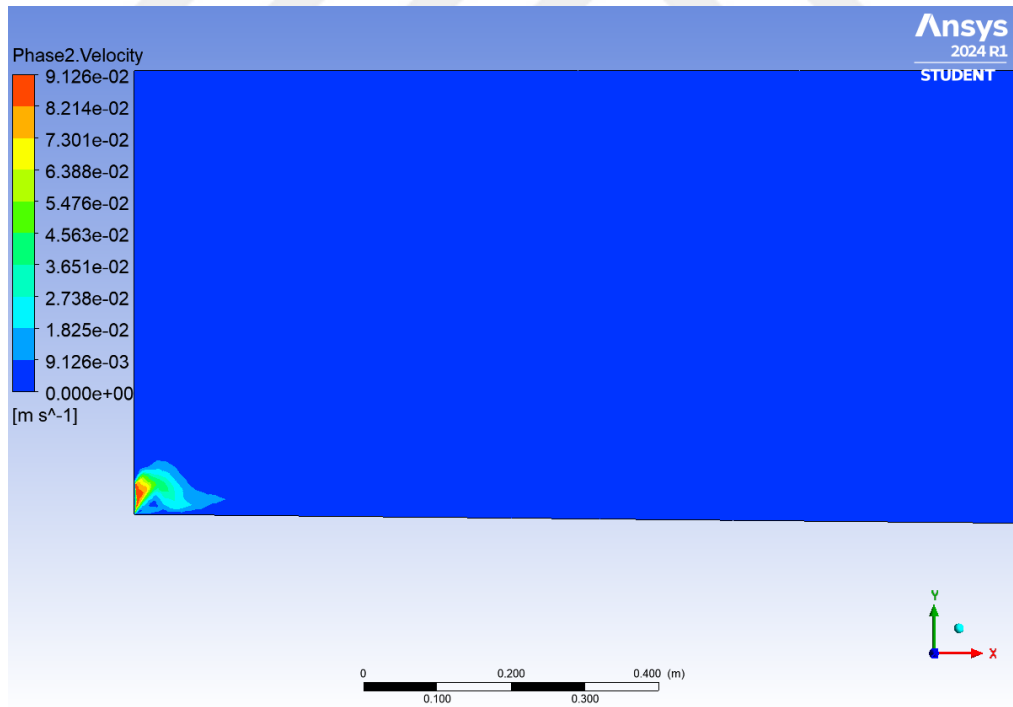
Şekil 45. Model 7 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)



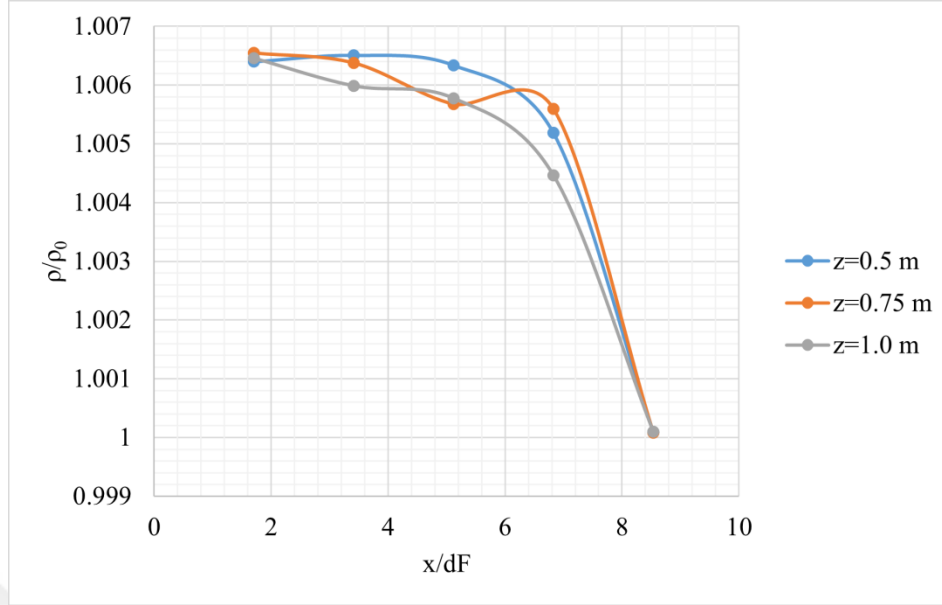
Şekil 46. Model 7 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



Şekil 47. Model 7 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 48. Model 7 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)



Şekil 49. Model 7 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

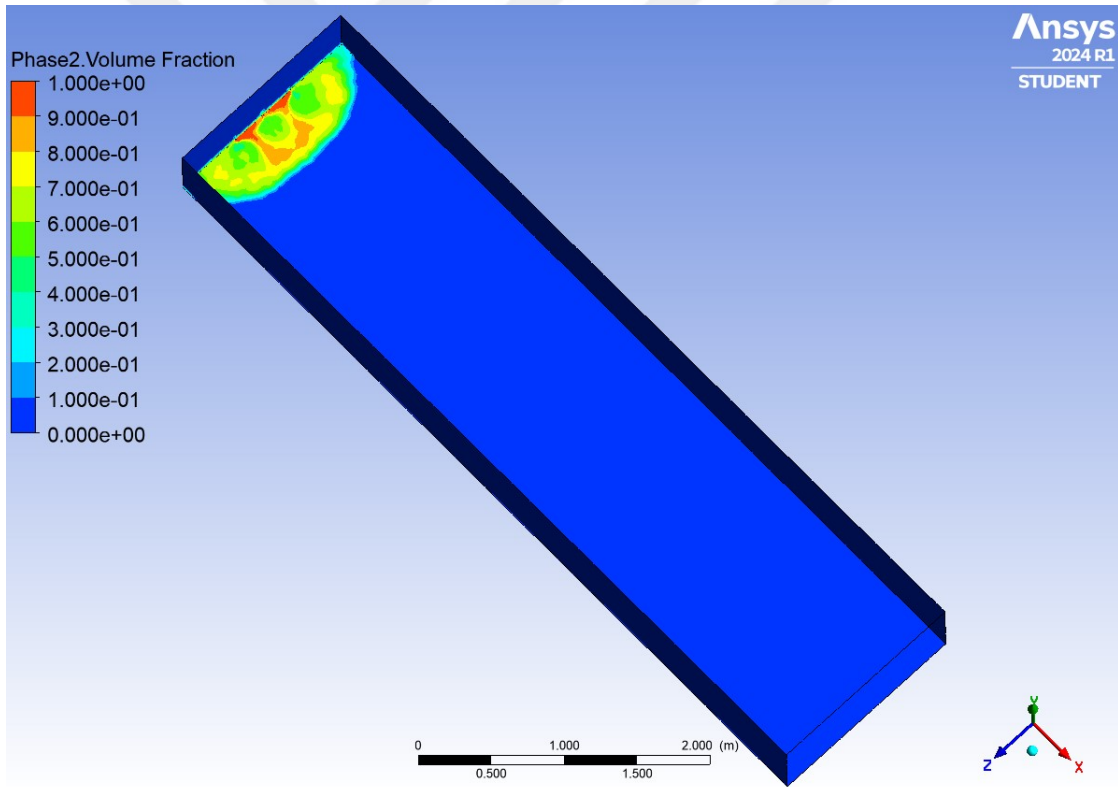
Tablo 12 model sonuçlarını özetlemektedir. Şekil 42’de açıkça görüldüğü üzere çıkış uçları arası mesafenin azaltılması jetler arası girişimi oldukça artırmış; jetler neredeyse geniş tek bir jet halinde hareket etmişlerdir. Bu sonuç literatürdeki bulgularla uyum içerisindedir (Kaye ve Linden, 2004; Castro-Faccetti vd., 2019). Bu durum jet merkez çizgilerindeki seyrelme miktarlarının ortalamasının az da olsa düşmesine sebep olmuştur. Maksimum saçak yükseklikleri bir önceki modele göre az da olsa azalmıştır. Bu da literatürdeki bulgularla uyum içerisinde bir sonuçtur (Abessi ve Roberts, 2014; Yan ve Mohammadian, 2019). Etki mesafesi değerleri ortalama olarak tam olarak aynı kalmış (0.0886 m), yakın alan mesafesi değerleri ise az da olsa artmıştır.

Tablo 12. Model 7 sonuçları

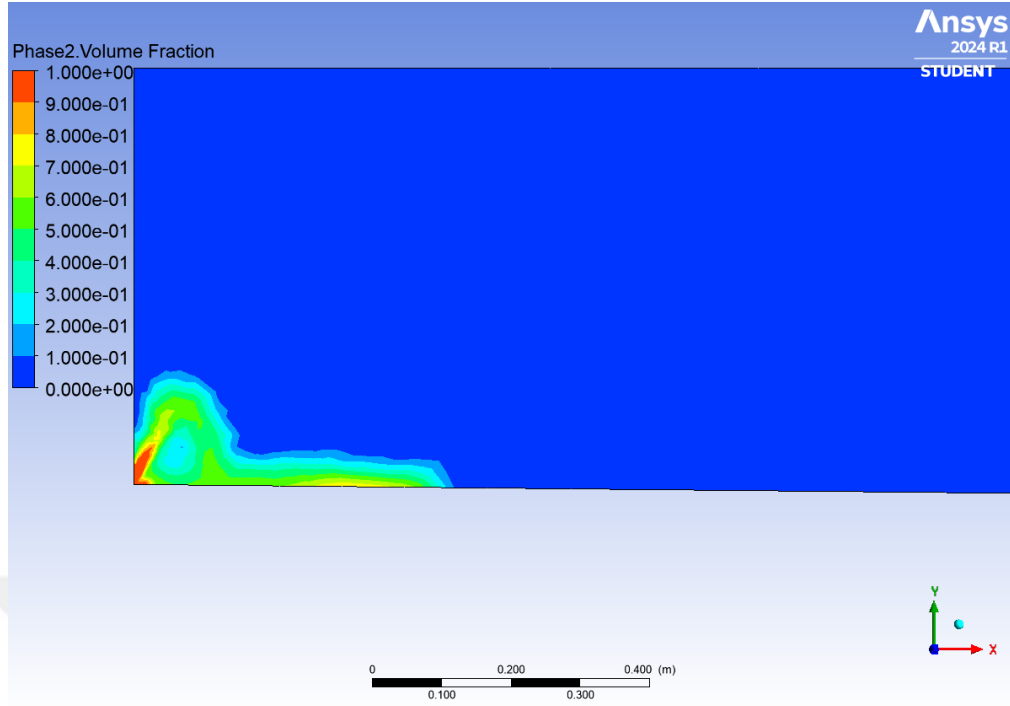
		y_t (m)	x_i (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	$z=0.50$ m	0.1398	0.0901	0.4735	99.05
	$z=0.75$ m	0.1398	0.0894	0.4750	99.16
	$z=1.00$ m	0.1388	0.0864	0.4545	98.94

3.9. Model 8'in Bulguları ve İrdelenmesi

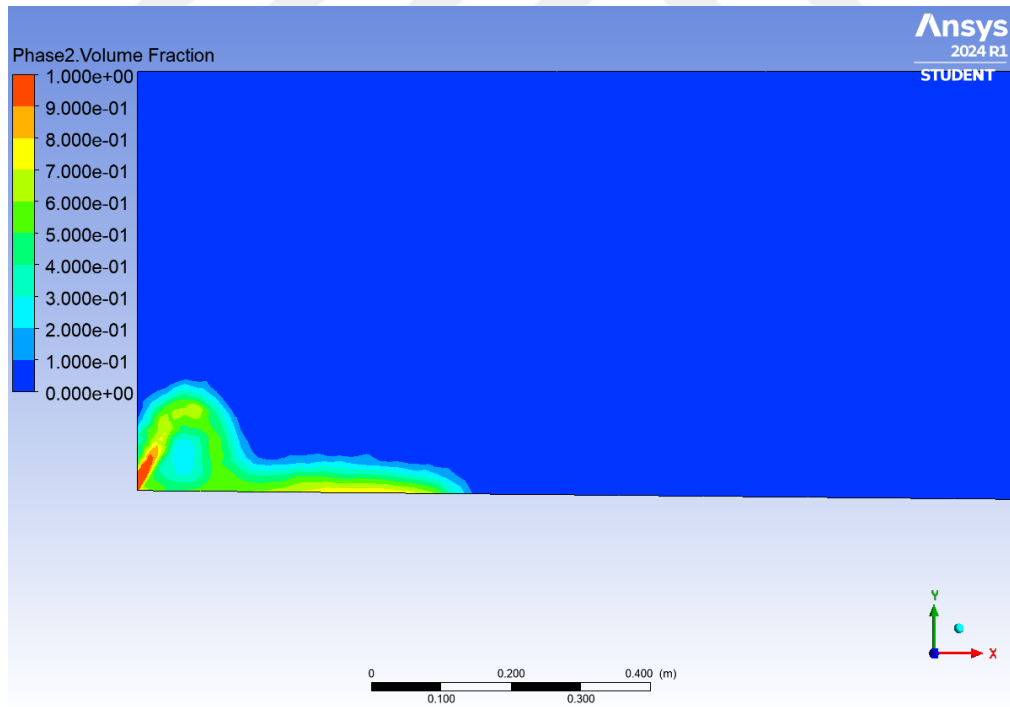
Bu modelde sadece çıkış uçlarının çapları değiştirilerek 0.02 m'ye düşürülmüş; geometri, ağ örgüsü ve kurulum ile ilgili diğer her şey aynı tutulmuştur. Çıkış ucu çaplarının yarıya düşürülmesi her bir çıkış ucundan deşarj edilen yoğun su jetlerinin bir önceki modele göre 4 katına çıkmasına sebep olmuş, bu da yoğunluksal Froude sayısının önemli ölçüde artmasına yol açmıştır. Bu modelin simülasyonu ile jet hızının, dolayısıyla yoğunluksal Froude sayısının artmasının jetlerin davranışları ve seyrilme verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hacim oranı konturlarının üst ve profil görüntüleri, hız büyüklüğü konturlarının profil görüntüleri ve yoğunluğun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 50-57'de görülmektedir.



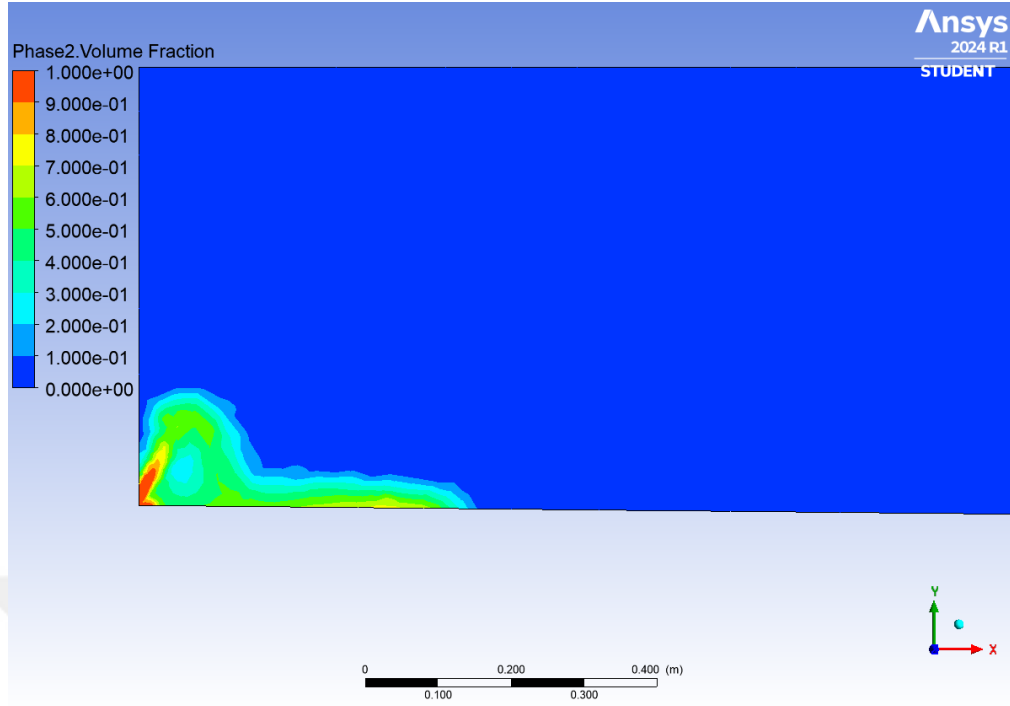
Şekil 50. Model 8 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



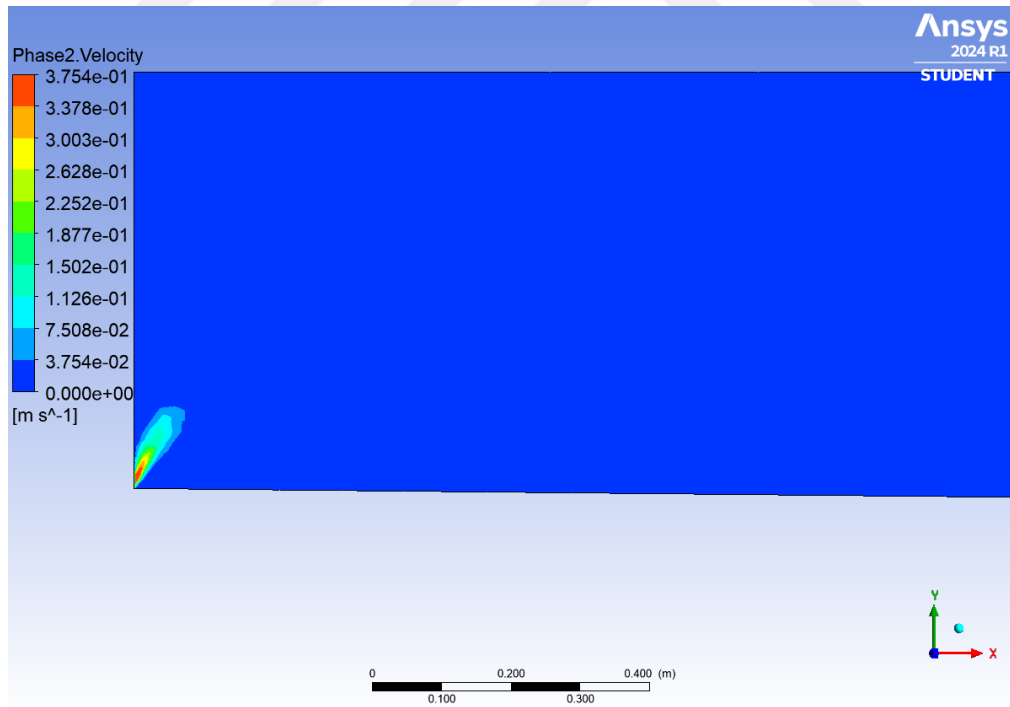
Şekil 51. Model 8 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



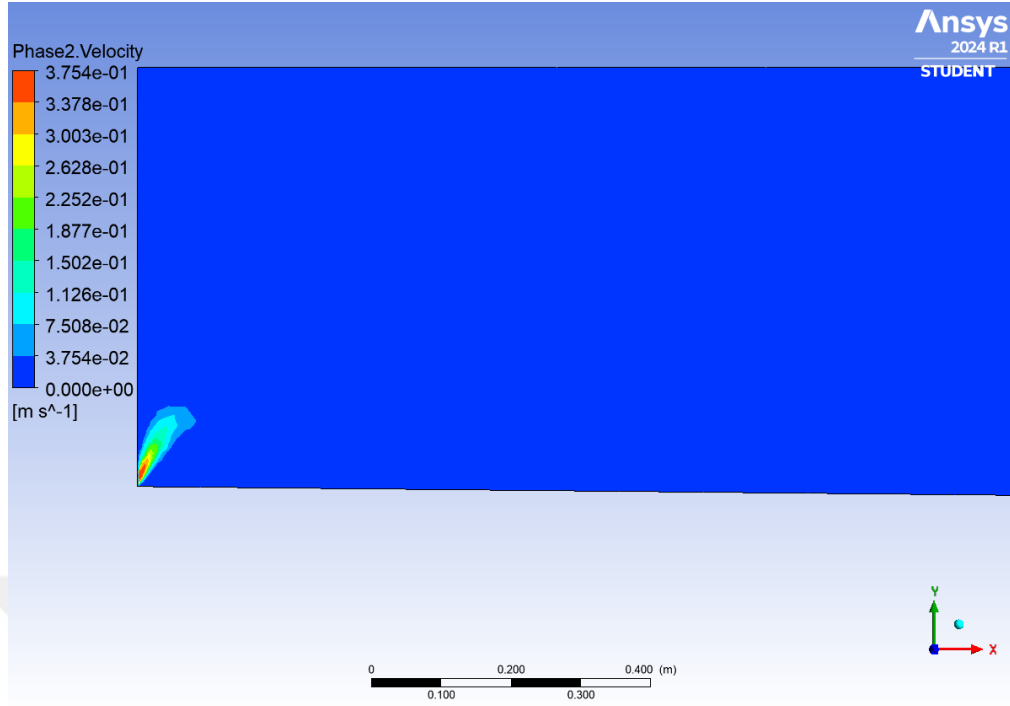
Şekil 52. Model 8 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



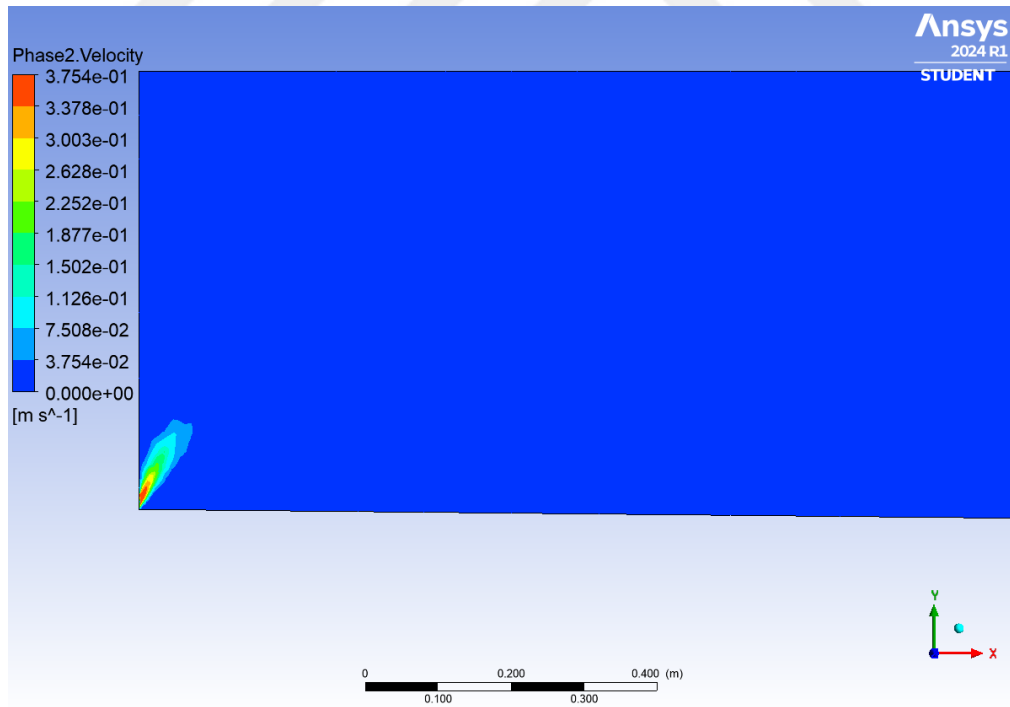
Şekil 53. Model 8 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)



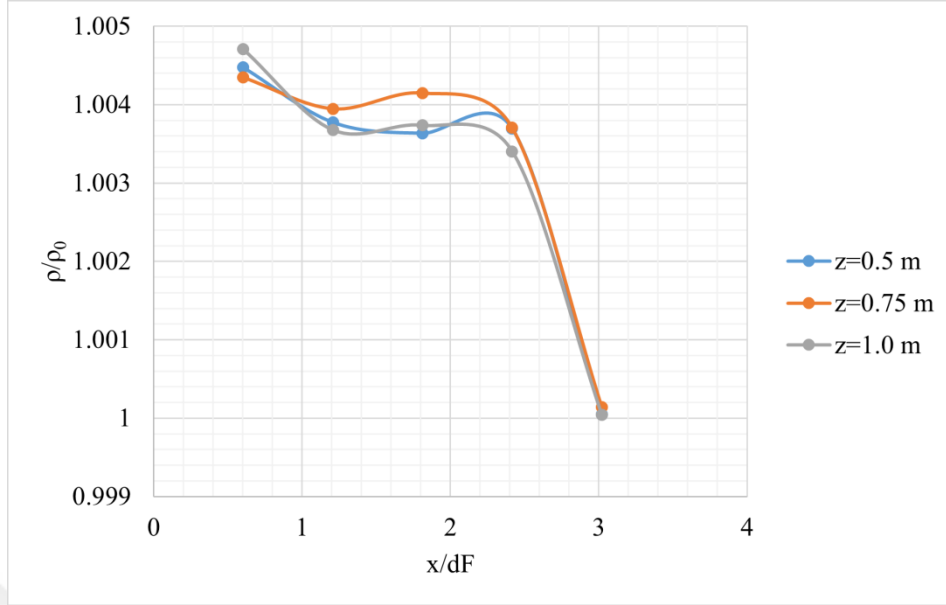
Şekil 54. Model 8 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



Şekil 55. Model 8 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 56. Model 8 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.75$ m)



Şekil 57. Model 8 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Tablo 13 model sonuçlarını özetlemektedir. Batık jetlerin deşarjında hedef alıcı ortam suyunun türbülanslı difüzyon aracılığıyla jet merkezine doğru sürüklenmesi ve yoğun suyla karışması olduğundan, bu sürüklenmenin ve dolayısıyla seyrelmenin jetlerin daha yüksek türbülans yoğunluğuna sahip olması durumunda artması beklenmektedir (Ungate vd., 1975). Literatürde Froude sayısının artmasıyla birlikte jetin türbülanslı rejime doğru geçiş yaptığı ve bunun da seyrelme verimini artırdığı belirtilmektedir.

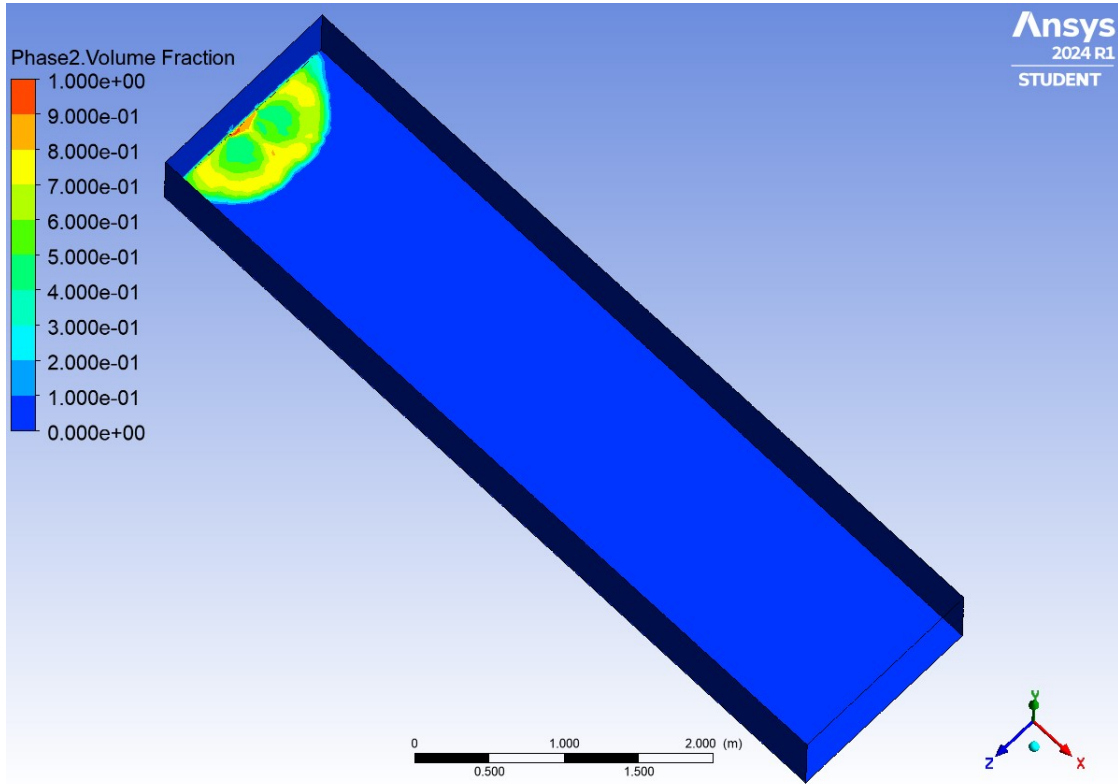
Şekil 50’de kırmızı renk yoğun su jetinin hacimsel olarak en yoğun oranda bulunduğu bölgeleri, koyu mavi renk ise bu oranın en düşük olduğu bölgeleri göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere, yoğunluksak Froude sayısının yedinci modele göre yaklaşık olarak 5.67 katına çıktığı sekizinci modelde yoğun jetlerin hacim oranları bir önceki senaryoya göre oldukça düşmüştür. Bu durum da seyrelme veriminin artmasını sağlamıştır. Maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi değerleri de artış göstermiştir.

Tablo 13. Model 8 sonuçları

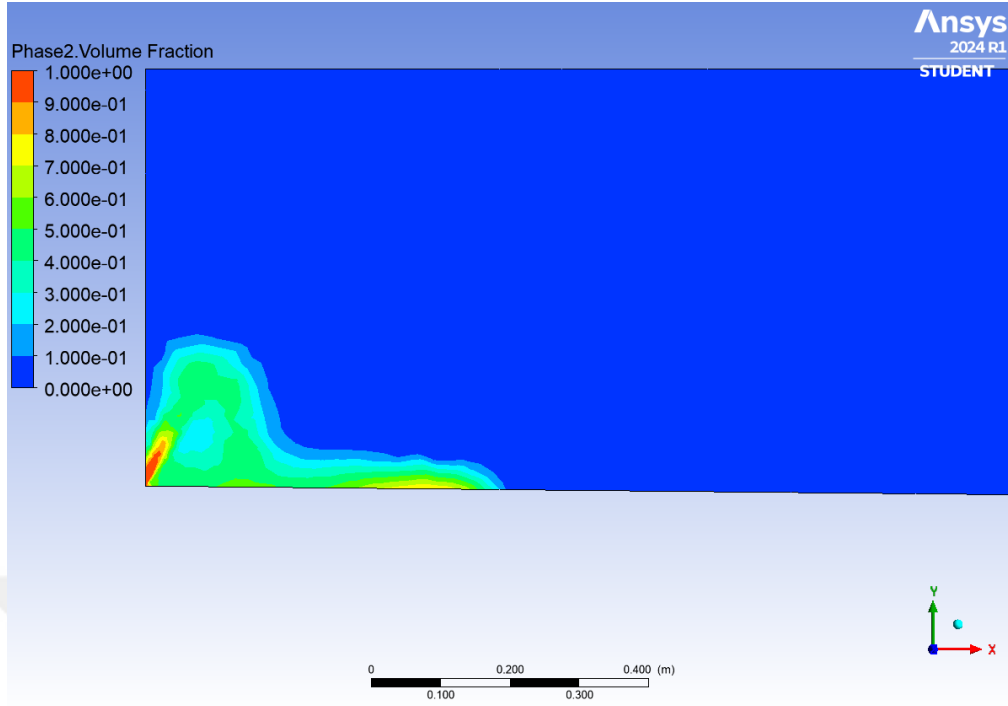
		y_t (m)	x_t (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	$z=0.50$ m	0.2436	0.1562	0.4995	99.47
	$z=0.75$ m	0.2420	0.1604	0.5098	98.52
	$z=1.00$ m	0.2450	0.1533	0.4941	99.58

3.10. Model 9'un Bulguları ve İrdelenmesi

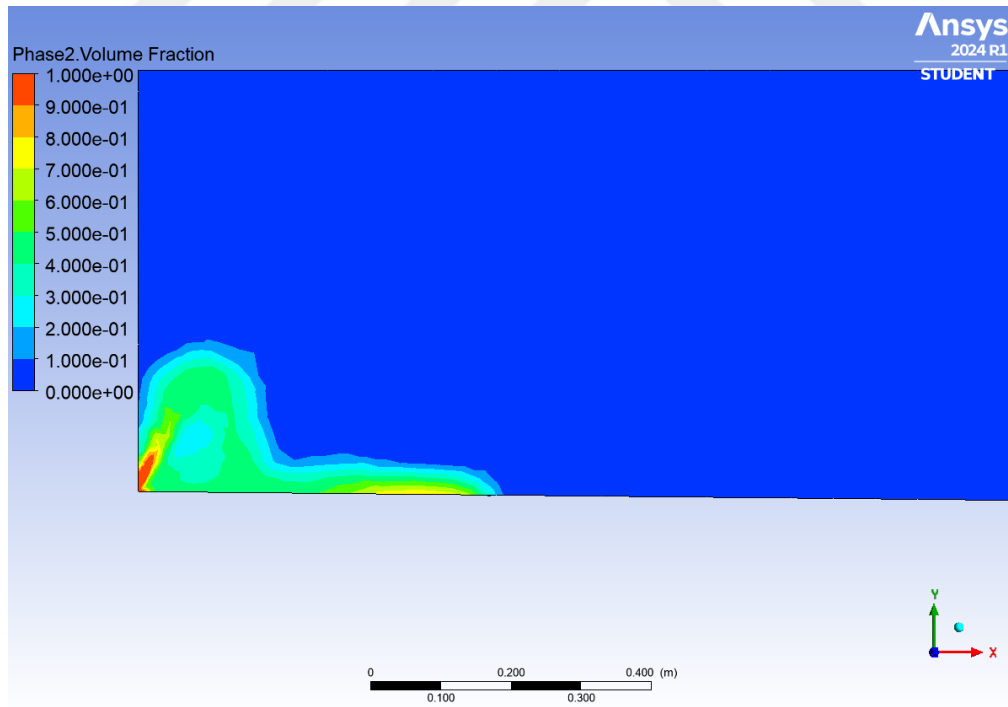
Bu modelde çıkış ucu sayısı üçten ikiye düşürülmüştür. Geometri, ağ örgüsü ve kurulum ile ilgili kalan her şey sekizinci model ile aynıdır. Hacim oranı konturlarının üst ve profil görüntüleri, hız büyüklüğü konturlarının profil görüntüleri ve yoğunluğun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 58-63'de görülmektedir.



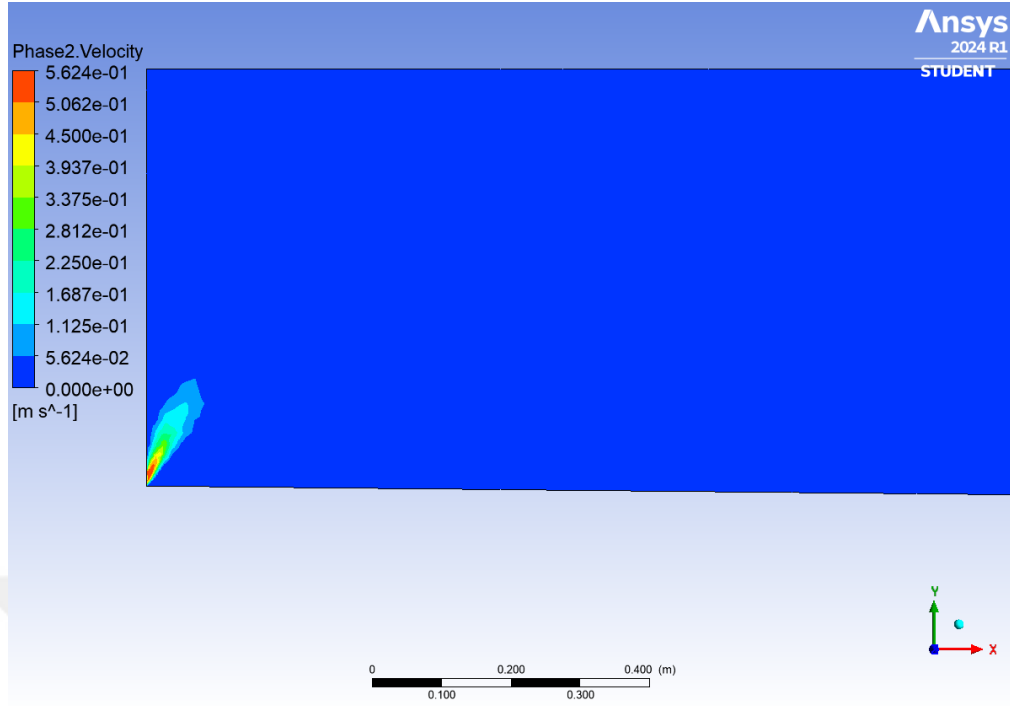
Şekil 58. Model 9 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



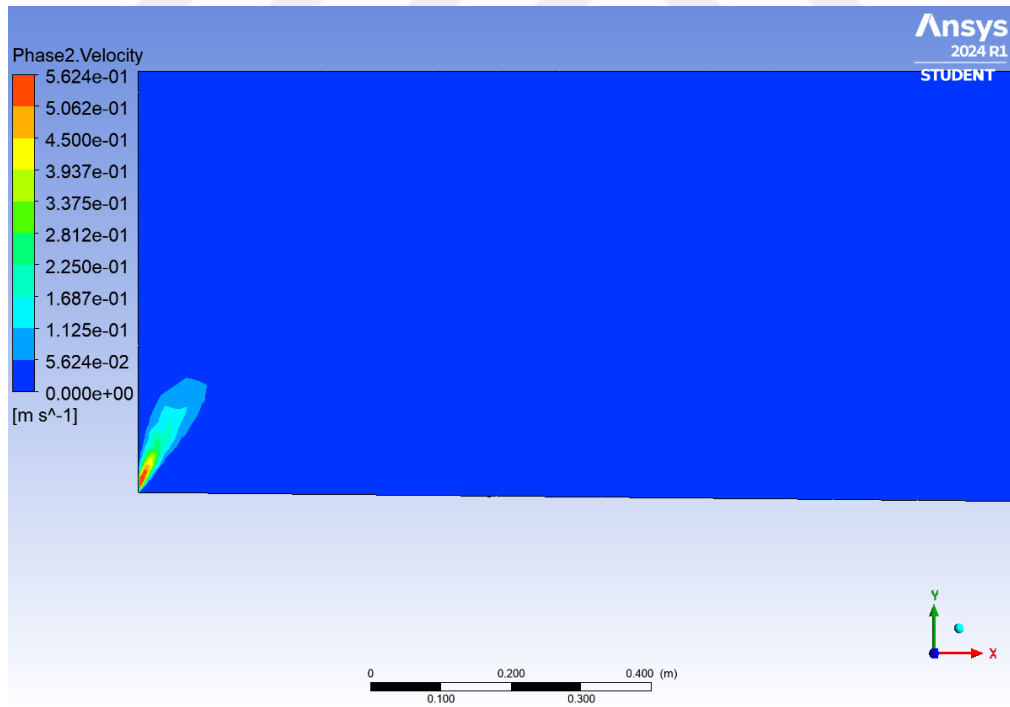
Şekil 59. Model 9 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.625$ m)



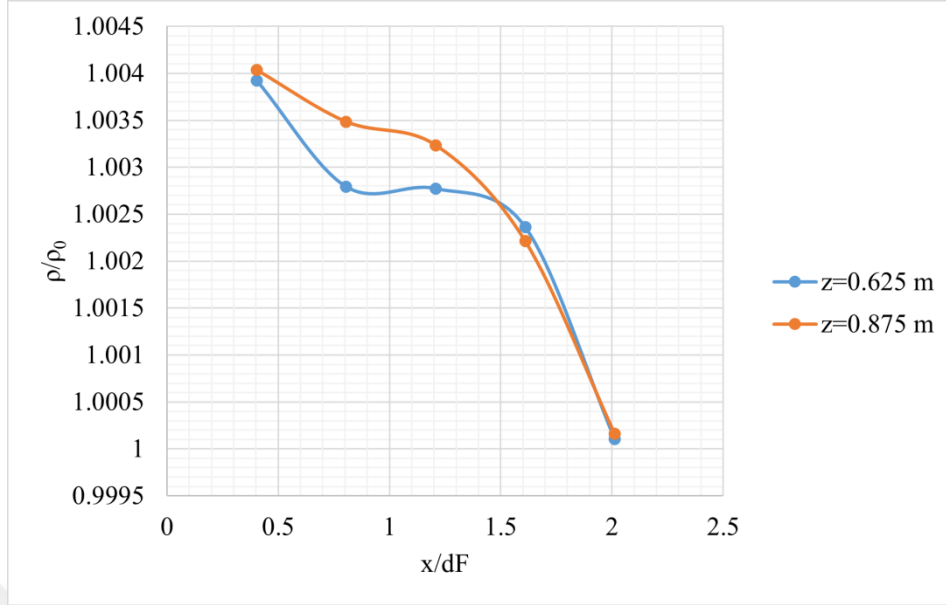
Şekil 60. Model 9 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.875$ m)



Şekil 61. Model 9 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.625$ m)



Şekil 62. Model 9 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.875$ m)



Şekil 63. Model 9 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Tablo 14 modelin sonuçlarını göstermektedir. Hacim oranı konturlarının üstten görünüşüne bakıldığında, özellikle jetlerin merkez çizgisi boyunca seyrelmenin bir önceki modele göre arttığı görülmektedir. Ancak bu fark seyrelme verimi için yapılan tahminlere ters şekilde yansımış, ortalama seyrelme verimi değeri çok az bir miktar da olsa düşmüştür. Bunun sebebi, Fluent yazılımının sonuçlar kısmında sayısal değer okuma yapılırken kullanılan “probe variable” yöntemi esnasında çok hassas okuma yapılamamasından kaynaklanmaktadır. Maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi değerleri artış göstermiştir.

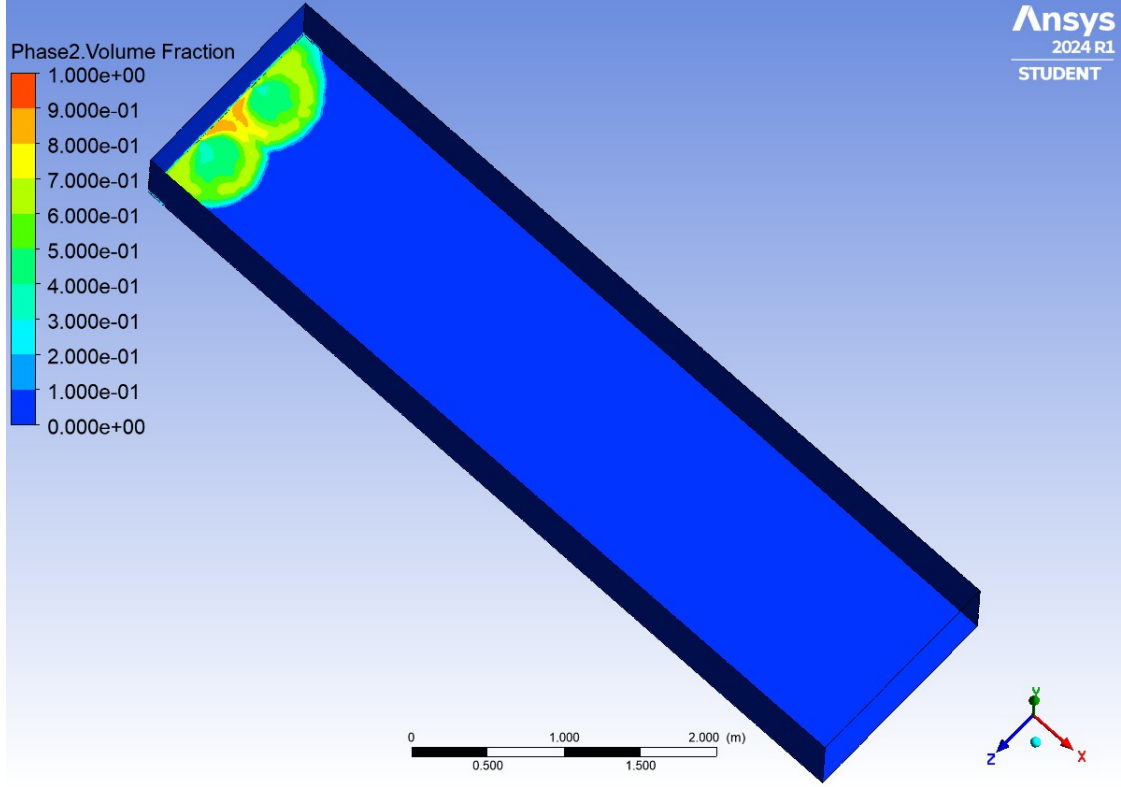
Tablo 14. Model 9 sonuçları

		y_t (m)	x_i (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	$z=0.625$ m	0.2963	0.1814	0.5530	98.91
	$z=0.875$ m	0.2922	0.1859	0.5508	98.31

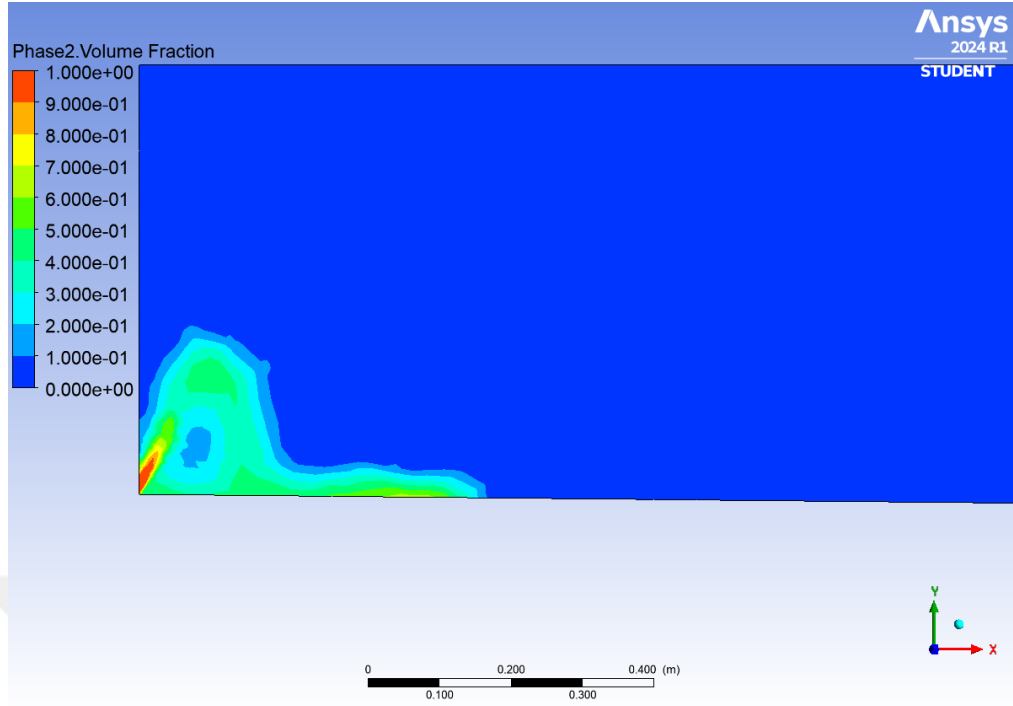
3.11. Model 10'un Bulguları ve İrdelenmesi

Bu modelde çıkış uçları arasındaki mesafe iki katına çıkarılmıştır; geometri, ağ örgüsü ve kurulum ile ilgili diğer her şey aynıdır. Hacim oranı konturlarının üst ve profil

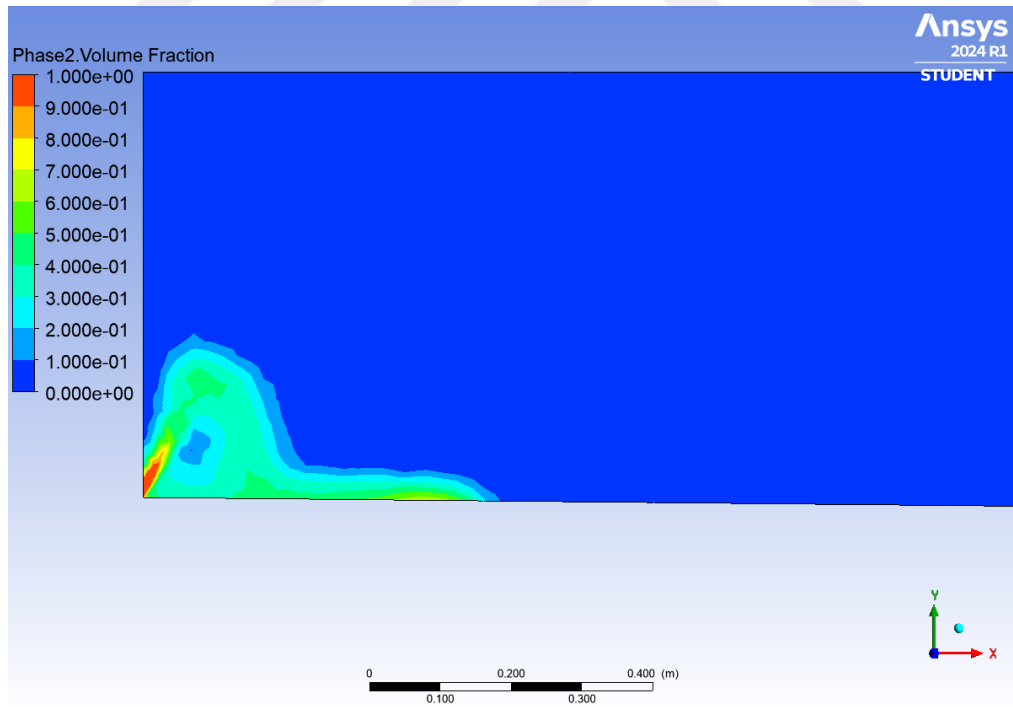
görüntüleri, hız büyüklüğü konturlarının profil görüntüleri ve yoğunluğun konuma bağlı değişimini gösteren grafik sırasıyla Şekil 64-69’da görülmektedir.



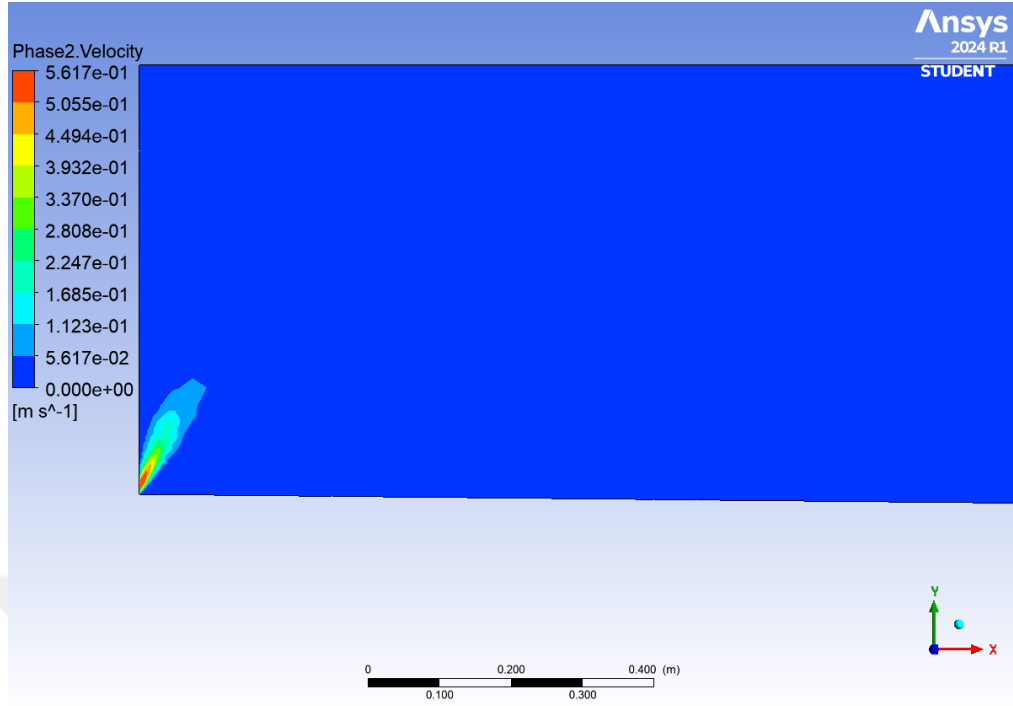
Şekil 64. Model 10 hacim oranı konturlarının üstten görünüşü



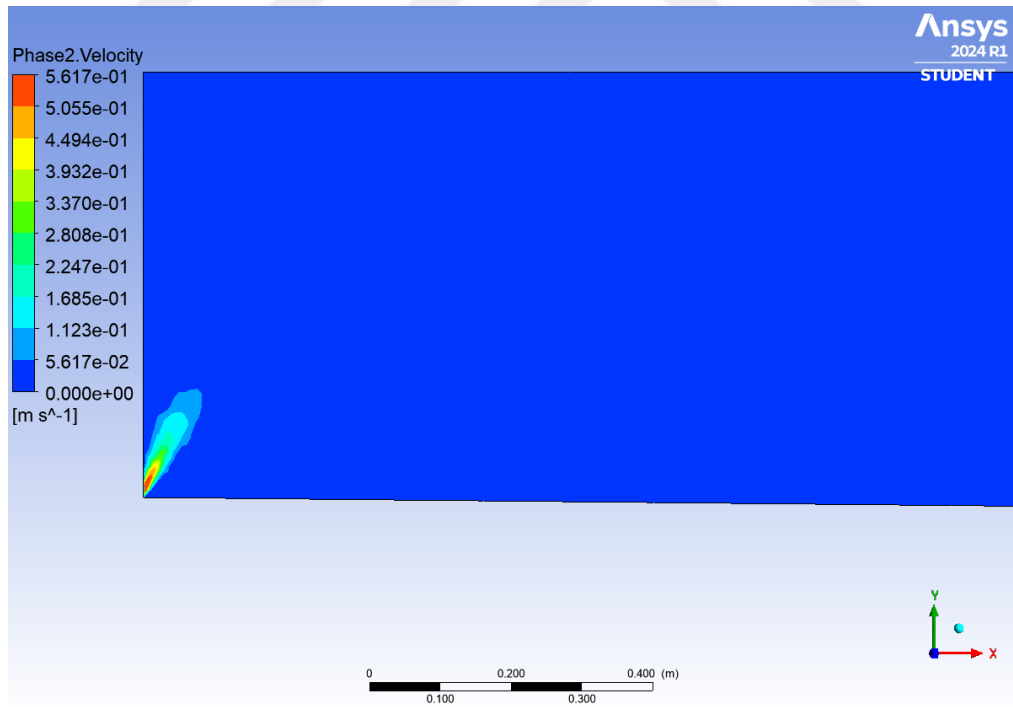
Şekil 65. Model 10 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



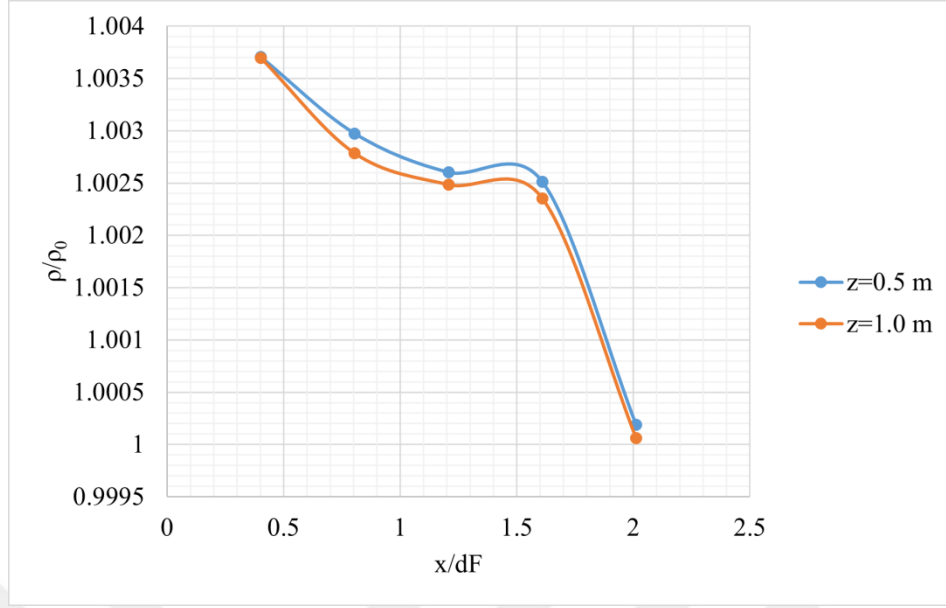
Şekil 66. Model 10 hacim oranı konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)



Şekil 67. Model 10 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=0.5$ m)



Şekil 68. Model 10 hız büyüklüğü konturlarının xy düzleminde görünüşü ($z=1.0$ m)



Şekil 69. Model 10 yoğunluğun konuma bağlı değişimi

Tablo 15 modelin sonuçlarını özetlemektedir. Hacim konturlarının üstten görüntüsüne bakıldığında jetlerin bir önceki modele göre daha bağımsız davrandığı, girişimin daha az olduğu görülmektedir. Bu durum seyrelme veriminde çok az da olsa bir artışa yol açmıştır. Maksimum saçak yüksekliği artmış, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi değerleri ise azalmıştır.

Tablo 15. Model 10 sonuçları

		y_t (m)	x_i (m)	x_n (m)	Seyrelme (%)
Çıkış Ucu	$z=0.50$ m	0.3176	0.1813	0.5223	97.99
	$z=1.00$ m	0.3124	0.1835	0.5227	99.37

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yoğun tuzlu suların deniz deşarjında, belirli alıcı ortam koşulları altında kullanılan farklı deşarj parametreleri ve oluşturulan yayıcı boru tasarımlarının jetlerin biçimleri, davranışları, seyrelme ve karışma süreçleri üzerindeki etkileri HAD modellemesi yöntemiyle incelenmiştir. Fiziksel modelleme yöntemlerine kıyasla zamandan, fiziksel efordan ve paradan tasarruf etmeyi ve deneyler sırasında meydana gelebilecek her türlü kaza riskini ortadan kaldırmayı mümkün kılan sayısal modelleme yöntemleri arasında ön plana çıkan HAD modelleri, uygun biçimde kalibre edilmiş modeller kullanılması durumunda kısa zaman içerisinde güvenilir sonuçlar sunabilmektedir.

Bu tez çalışmasında öncelikle daha önce Ünsal Karakuş (2018) çalışmasında da kullanılan, Firoozabadi vd. (2009) çalışmasında elde edilen deneysel veriler kullanılarak bir referans model oluşturulmuş ve bu model kalibre edilmiştir. Referans model, bir yüzeyinde bir giriş ağzı bulunan ve alıcı ortama verilen yoğun suyun bu yüzeyin karşısındaki yüzeyden çıkarak ortamı terk ettiği; 6 m uzunluk, 0.6 m giriş yüzeyi yüksekliği, 0.66 m çıkış yüzeyi yüksekliği ve 1.5 m genişliğe sahip bir geometriden oluşmaktadır. Kalibrasyon, oluşturulan referans modeldeki yoğunluk akıntısı kalınlık değerlerinin konuma bağlı değişiminin grafiği elde edilerek bu grafiğin baz alınan çalışmada yürütülen deneyler sonucu elde edilen grafiklerle kıyaslaması yapılarak tamamlanmıştır. Ardından farklı model senaryoları oluşturularak her bir senaryoda bir önceki modele göre sadece bir deşarj parametresi değiştirilerek ve diğer değerler sabit tutularak HAD analizleri yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Analizler için ANSYS Fluent (2024 R1 Sürümü) yazılımı kullanılmıştır. Fluent, sonlu hacimler yöntemi kullanarak akışkan akışlarındaki kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerini çözen ve son zamanlarda özellikle yoğun su deşarjlarının modellenmesinde sıklıkla kullanılmaya başlanan bir yazılımdır.

Kurulan referans modelde yoğun su alıcı deniz ortamına dikdörtgen şeklinde bir giriş ağzından verilmektedir; ancak bu çalışmada yoğun su deşarjı modellemesi yapılmak istendiğinden ötürü, oluşturulan modellerde referans modelin geometrisi değiştirilerek bu giriş ağzının yerine deşarj hatlarının yayıcı borularında kullanılan bir çıkış ucu tipi olan dairesel delik modellenmiştir. Çıkış ucunun çapı, kesit alanı referans modeldeki dikdörtgen

şeklindeki giriş ağzının alanıyla aynı olacak şekilde seçilmiştir. Bunun ardından literatürde yoğun jetlerin karakteristiklerini en çok etkilediği belirtilen deşarj açısı, çıkış ucu sayısı, çıkış uçları arası mesafeler ve çıkış uçlarının çapları gibi parametreler değiştirilerek farklı tasarımlar yapılmıştır.

İlk üç model arasında yapılan tek değişiklik deşarj açısıdır; bunlar için sırasıyla 30°, 45° ve 60° deşarj açıları kullanılmıştır. Model 4'te bunlar arasında en iyi seyrelme verimini sağlayan açı olan 60° deşarj açısı tercih edilmiş, bütün parametreler üçüncü model ile aynı tutularak sadece çıkış ucu sayısı bir artırılarak iki yapılmıştır. Model 5'te çıkış uçları arası mesafe Model 4'e göre iki katına çıkarılmıştır. Model 6'da çıkış ucu sayısı bir artırılarak üç yapılmıştır, kalan her şey Model 5 ile aynıdır. Model 7'de çıkış uçları arası mesafeler yarıya indirilmiştir. Model 8'de çıkış uçlarının çapı yarıya indirilmiş ve diğer her şey Model 7 ile aynı tutulmuştur. Bu, debinin de sabit olması sebebiyle jet hızlarının ve Froude sayısının artmasına sebep olmuştur ve bu modelin simülasyonu ile de bunun etkileri incelenmiştir. Model 9'da çıkış ucu sayısı bir azaltılmıştır. Model 10'da ise çıkış uçları arası mesafe yarıya indirilmiştir.

Oluşturulan tüm bu modellerin analizlerinin sonuçlarının alınması ve irdelenmesi sonucunda değiştirilen bu farklı deşarj parametrelerinin yoğun jetlerin maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi gibi geometrik özellikleri, jetlerin davranışları ve yakın alan dahilindeki seyrelme miktarları üzerindeki etkileri ve genel olarak türbülans modelleriyle ilgili yapılan gözlemler ve varılan sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Deşarj açısının artırılması, literatürü destekler nitelikte, maksimum saçak yüksekliğinin artmasına, etki mesafesi ve yakın alan mesafesinin azalmasına ve yakın alan bölgesinde seyrelme oranının artmasına sebep olmuştur.
- Çıkış ucu sayısının artırılması, literatürü destekler nitelikte, maksimum saçak yüksekliğinin azalmasına; jetler arası oluşan girişim nedeniyle jetin içerisine sürüklenen alıcı ortam suyu miktarının azalmasına ve bundan ötürü seyrelme oranının azalmasına yol açmıştır. Etki mesafesi ve yakın alan mesafesi azalmıştır.
- Çıkış uçları arasındaki mesafenin artırılması, literatürü destekler nitelikte, jetlerin içine sürüklenebilen alıcı ortam suyunun miktarını artırarak seyrelme oranını yakın alan bölgesi içerisinde artırmıştır. Jetler arası girişimin miktarı azalmıştır. Maksimum saçak yüksekliği artmış, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi ise azalmıştır.

- Çıkış uçları arasındaki mesafenin azaltılması, literatürü destekler nitelikte, jetler arası girişimin boyutunu artırmış ve seyrelme oranının düşmesine yol açmıştır. Maksimum saçak yüksekliği azalmış, etki mesafesi çok fazla değişmemiş ve yakın alan mesafesi artmıştır.
- Jet hızı ve Froude sayısının artması, jetlerin türbülans yoğunluklarını artırarak jet içerisine sürüklenen alıcı ortam suyunun miktarını artırmış ve seyrelme oranının yakın alan bölgesi içerisinde artmasına yol açmıştır. Bu durum literatürü destekler niteliktedir. Jet hızının artması maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi değerlerinin de artmasına yol açmıştır.
- Çıkış ucu sayısının azaltılması jetler arasındaki girişimin boyutunu azaltmıştır. Maksimum saçak yüksekliği, etki mesafesi ve yakın alan mesafesi değerleri de artış göstermiştir.
- Yakın alan bölgesinde meydana gelen seyrelme oranları göz önüne alındığında, en iyi sonucu veren modelin 60° açıyla tek bir çıkış ucundan yapılan deşarjın söz konusu olduğu Model 3 olduğu görülmüştür.
- HAD modellemesi yapılırken oluşturulan ağ örgüsünün kalitesi modelin doğruluğunu çok yüksek oranda etkileyebilmektedir. Modelin geometrisi ve modellemesi yapılan akışkan hareketinin karakteristikleri göz önüne alınarak en uygun ağ örgüsünün oluşturulması, ağ örgüsünün gerekli yerlerde sıklaştırılması ve eleman sayısının yeterli olması son derece büyük öneme sahiptir. Öte yandan, ağ örgüsünde özellikle eleman sayısının artması hesaplama süresini duruma göre oldukça artırabilmektedir.
- Modellemesi yapılan akışkan akışının gerektirdiği en uygun Çokfazlı ve viskoz modellerin kullanılması, modelin doğruluğu açısından son derece önemlidir. Daha karmaşık hesaplar yapan modeller her koşul altında en uygun model olmayabilmektedir.
- Daha karmaşık hesaplamalar yapan Çokfazlı ve viskoz modellerin kullanımı, hesaplama süresini dikkate değer oranda artırabilmektedir.
- Bir sayısal modelleme çalışması yapılırken, mevcut deneysel veriler veya saha çalışmalarına ait veriler kullanılarak oluşturulan modelin doğrulanması son derece önemlidir ve esastır.

5. ÖNERİLER

Deniz deşarjı tesisleri ile yoğun su veya evsel, zirai, endüstriyel atıksuların alıcı ortamlara deşarj edilmesi konusunda, atıksu jetlerinin biçimleri, davranışları, karışım ve seyrelme süreçlerinin analizleri için sayısal modelleme yöntemleri, özellikle HAD modellemesi yöntemi giderek artan bir sıklıkla kullanılmaya başlansa da ANSYS Fluent yazılımı ancak geçtiğimiz yıllarda tercih edilmeye başlanmıştır. ANSYS Fluent kullanılarak kod yazmadan, hazır olarak sunulan modeller ve çözüm şemaları ile analiz yapılabilmektedir. Gelecek yıllarda HAD modellemesi için kullanılan diğer araçların ve ANSYS Fluent yazılımının doğruluklarının tespiti ve geliştirilmesi için daha farklı alıcı ortam koşulları ve deşarj parametreleri kullanılarak daha fazla modelleme yapılması uygun olacaktır.

Bu tez çalışmasında ANSYS Fluent yazılımının öğrenci sürümü kullanılmıştır. Yazılımın öğrenci sürümünün bazı sınırlamalara sahip olması sebebiyle üzerinde çalışılacak referans modelin oluşturulması için verileri kullanılacak çalışma seçilirken belirli sınırlar içerisinde hareket edilmiştir. Nispeten küçük sayılabilecek bir alıcı ortam içerisine çok fazla sayıda olmayan jetler aracılığıyla yapılan yoğun su deşarjları incelenmiş ve literatürde jet davranışını ve seyrelmeyi en çok etkileyen parametreler değiştirilerek farklı modeller kurulmuştur ancak bu parametreler her zaman daha geniş bir aralıkta değiştirilerek daha detaylı araştırmalar yapılabilir. Daha geniş aralıkta seçilen deşarj açıları, çıkış ucu sayısı, jet Froude sayısı, çıkış ucu çapı değerleri ile yapılacak daha fazla sayıda farklı tasarım literatürün gelişmesine ve uygulamada çalışan mühendisler ve bilim insanlarına katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında hesap yükünü ve hesaplama süresini azaltmak adına simülasyonlar 240 zaman adımı boyunca çalıştırılmıştır. Zaman adımı sayısı ve büyüklüğünün artırılması, gerçek hayatta daha uzun sürelerde meydana gelecek akışkan akışlarının simülasyonunu mümkün kılacağından faydalı olacaktır. Aynı zamanda ağ örgüsünün sıklaştırılması, daha karmaşık modellerin modellemesi yapılan akış şartlarına uygun çözümler sunabilmeleri şartı altında kullanılması da hesapların doğruluğunu artırmaya yardımcı olacaktır.

Sayısal modelleme yapılırken kullanılan modellerin mevcut deneysel veriler veya saha çalışmaları verileri kullanılarak doğrulanması esastır. Bunun yanı sıra, aynı çalışma

kapsamında hem fiziksel modelleme hem de sayısal modelleme yapılması çalışmanın kapsamını genişletecek, yapılan sayısal modellemenin doğruluk derecesini artıracak ve üzerinde çalışılan problemin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Bu tez çalışması kapsamında deney yapılamamış, literatürde mevcut bulunan deneysel verilerle kullanılarak bir referans model oluşturulmuştur. Yapılan deneyin tamamen aynı şekilde modellenmesi ve sayısal modelleme sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması, modellerin performansının daha doğru biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyacak ve sayısal modellerinin geliştirilmesi gereken yönlerinin tespitinin daha rahat yapılmasına yardımcı olacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Abessi, O. (2018). Brine disposal and management—planning, design, and implementation. G. Gude (Dü.) içinde, *Sustainable Desalination Handbook* (s. 259-303). Elsevier.
- Abessi, O., & Roberts, P. J. (2014). Multiport diffusers for dense discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 04014032.
- Abessi, O., & Roberts, P. J. (2015). Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(8), 06015009.
- Abessi, O., & Roberts, P. J. (2016). Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015033.
- Abessi, O., & Roberts, P. J. (2017). Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(6), 04017003.
- Abessi, O., & Roberts, P. J. (2018). Rosette diffusers for dense effluents in flowing currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(1), 06017024.
- Abou-Elhaggag, M. E., El-Gamal, M. H., & Farouk, M. I. (2011). Experimental and numerical investigation of desalination plant outfalls in limited disposal areas. *Journal of Environmental Protection*, 2(6), 828-839.
- Abualtayef, M., Al-Najjar, H., Mogheir, Y., & Seif, A. K. (2016). Numerical modeling of brine disposal from Gaza central seawater. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-18.
- Akbari, H., & Ebrahimi, M. H. (2016). Near field mixing of multi-diffuser dense jets in shallow water condition and ambient currents. *15th national hydraulic conference, Iran*. Qazvin.
- Al-Sanea, S., Orfi, J., & Najib, A. (2015). Numerical study of flow, temperature, and salinity distributions of a brine discharge problem. *Desalination and Water Treatment*, 55(12), 3218-3230.
- Altuncu, F. F. (2004). Tasarım Aşamasında Uygun Olmayan Deşarj Katsayısı Kullanımının Deniz Deşarj Tesisi Yayıcı İç Hidroliği Üzerindeki Etkileri. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- Amiri, N. S., Abessi, O., & Roberts, P. J. (2024). Venturi nozzles for desalination brine discharges. *Desalination*, 573, 117193.
- Anılan, T. (2023). Deniz Deşarjı Hidroliği Lisansüstü Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. (2013). ANSYS, Inc.

ANSYS Fluent Theory Guide. (2011). ANSYS, Inc.

- Ardalan, H., & Vafaei, F. (2019). CFD and experimental study of 45° inclined thermal-saline reversible buoyant jets in stationary ambient. *Environmental Processes*, 6(1), 219-239.
- Baawain, M., Choudri, B., Ahmed, M., & Purnama, A. (2015). *Recent progress in desalination, environmental and marine outfall systems*. Basel: Springer.
- Bashithalshaaer, R., Persson, K. M., & Larson, M. (2015). New criteria for brine discharge outfalls from desalination plants. *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities: Innovations and Environmental Impacts* (s. 451-467). içinde Springer.
- Baum, M. J., & Gibbes, B. (2020). Field-scale numerical modeling of a dense multiport diffuser outfall in crossflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(1), 05019006.
- Baum, M. J., Albert, S., Grinham, A., & Gibbes, B. (2019). Spatiotemporal influences of open-coastal forcing dynamics on a dense multiport diffuser outfall. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(10), 05019004.
- Berkün, M. (2006). *Atık Su Arıtma ve Deniz Deşarjı Yapıları*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Berkün, M. (2017). *Atıksu Mühendisliği: Toplama, Arıtma, Uzaklaştırma ve Denize Deşarj Yapıları*. Literatür Yayıncılık.
- Bleninger, T., Lipari, G., & Jirka, G. H. (2002). Design and Optimization Program for Internal Diffuser Hydraulics. *2nd International Conference on Marine Waste Water Discharges, MWWD 2002*. İstanbul.
- Brooks, N. H. (1970). Notes prepared for the Water Resources Engineering Educational Series Program 7, "Pollution of Coastal and Estuarine Waters" University Extension and the College of Engineering, University of California, Berkeley.
- Castro-Faccetti, C. (2020). Modelling dilution and transport processes from marine outfall discharges. *The University of Leeds, School of Civil Engineering, PhD Thesis, Leeds*.
- Castro-Faccetti, C., Borman, D., Sleight, A., Khan, A., & Eljaiek-Urzola, M. (2019). Three-Dimensional CFD Modelling of Mixing and Dispersion from Marine Outfall Discharges. In *Proceedings of the 38th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) World Congress*. IAHR.
- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F., & Nicosia, S. (2005). Bench-scale investigation of inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11), 1017-1022.
- Crowe, A., Davidson, M., & Nokes, R. (2016). Velocity measurements in inclined negatively buoyant jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 16(3), 503-520.

- Danish, D., & Murali, K. (2021). Performance of the single round nozzle of the marine outfall system for buoyant fluid at stable water in the unstratified water depth. *Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019)* (s. 157-170). Springer Singapore.
- Darama, S. (2009). Yoğun Atıksu Deşarjının Birinci Seyrelmesinde Görünür Saçak Modelinin Uygulanması. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- Firoozabadi, B., Afshin, H., & Aram, E. (2009). Three-dimensional modeling of density current in a straight channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), 393-402.
- Frick, W. E. (2004). Visual Plumes mixing zone modeling software. *Environmental Modelling & Software*, 19(7-8), 645-654.
- Jiang, B., Law, A. W.-K., & Lee, J. H.-W. (2014). Mixing of 30 and 45 inclined dense jets in shallow coastal waters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(3), 241-253.
- Jiang, M., Law, A. W.-K., & Lai, A. C. (2019). Turbulence characteristics of 45 inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(1), 27-54.
- Jirka, G. H. (2004). Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single round jet. *Environmental Fluid Mechanics*, 4(1), 1-56.
- Jirka, G. H. (2006). Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows Part 2: Plane jet dynamics resulting from multiport diffuser jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 6, 43-100.
- Jirka, G. H. (2008). Improved discharge configurations for brine effluents from desalination plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 116-120.
- Kaye, N., & Linden, P. (2004). Coalescing axisymmetric turbulent plumes. *Journal of Fluid Mechanics*, 502, 41-63.
- Kheirkhah Gildeh, H., Mohammadian, A., & Nistor, I. (2021). Inclined dense effluent discharge modelling in shallow waters. *Environmental Fluid Mechanics*, 21, 955-987.
- Kheirkhah Gildeh, H., Mohammadian, A., & Nistor, I. (2022). Vertical Dense Effluent Discharge Modelling in Shallow Waters. *Water*, 14(15), 2312.
- Kheirkhah Gildeh, H., Mohammadian, A., Nistor, I., & Qiblawey, H. (2015). Numerical modeling of 30° and 45° inclined dense turbulent jets in stationary ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, 15, 537-562.
- Launder, B. E., & Sharma, B. I. (1974). Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1(2), 131-137.
- Lee, J. H., & Cheung, V. (1990). Generalized Lagrangian model for buoyant jets in current. *Journal of Environmental Engineering*, 116(6), 1085-1106.

- Lykkebo Petersen, K., Heck, N., G. Reguero, B., Potts, D., Hovagimian, A., & Paytan, A. (2019). Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad Desalination plant and implications for future desalination plant constructions. *Water*, 11(2), 208.
- Mohammadian, A., Kheirkhah Gildeh, H., & Nistor, I. (2020). CFD modeling of effluent discharges: A review of past numerical studies. *Water*, 12(3), 856.
- Moshiri-Tabrizi, I., Sarrafzadeh, M.-H., & Sotudeh-Gharebagh, R. (2023). 2D-CFD Analysis of Diffusers used to Discharge Brine into Water Bodies. *Journal of Chemical & Petroleum Engineering*, 57(2).
- Muller, J., Seil, G., & Hubbert, G. (2011). Three modelling techniques used in Australia to model desalination plant brine dispersal in both the near-field and far-field. *International Symposium on Marine Outfall Systems*, (s. 15-29).
- Nemlioğlu, S. (2003). Soğuk Deşarjda Birinci Seyrelmenin İncelenmesi. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul*.
- Nemlioğlu, S. (2006). *Yayıcılardan Deşarj Edilen Yoğun Atıksuların Hidrodinamiğinin ve Karışmasının Deneyisel Olarak İncelenmesi*. TÜBİTAK Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı Proje Sonuç Raporu, Proje No: 647-1793.
- Oliver, C., Davidson, M., & Nokes, R. (2008). k- ϵ Predictions of the initial mixing of desalination discharges. *Environmental Fluid Mechanics*, 8, 617-625.
- Öztürk, İ. (2011). *Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı*. İstanbul: Su Vakfı Yayınları.
- Palomar, P., & Losada, I. J. (2011). Impacts of brine discharge on the marine environment. Modelling as a predictive tool. *Desalination, trends and technologies*. Intech.
- Palomar, P., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2012). Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, 290, 28-42.
- Pincince, A. B., & List, E. J. (1973). Disposal of brine into an estuary. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 45(11), 2335-2344.
- Roberts, P. J. (2018). *Modeling brine disposal from the West Basin Ocean Water Desalination Project*.
- Roberts, P. J., & Toms, G. (1987). Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), 323-340.
- Roberts, P. J., Ferrier, A., & Daviero, G. (1997). Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), 693-699.
- Roberts, P. J., Salas, H. J., Reiff, F. M., Libhaber, M., Labbe, A., & Thomson, J. C. (2010). *Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*. Londra: IWA Publishing.

- Robinson, D., Wood, M., Piggott, M., & Gorman, G. (2016). CFD modelling of marine discharge mixing and dispersion. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 4(2), 152-162.
- Saeidi Hosseini, S. A. (2024). Numerical and Experimental Study of Multiport Diffusers with Non-Uniform Port Orientation. *University of Ottawa, Faculty of Engineering, Doctoral Dissertation, Ottawa*.
- Saeidi Hosseini, S. A., Mohammadian, A., Roberts, P. J., & Abessi, O. (2022). Numerical study on the effect of port orientation on multiple Inclined dense jets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 590.
- Tate, P., Scaturro, S., & Cathers, B. (2016). Marine Outfalls. M. Dhanak, & N. Xiros (Dü) içinde, *Springer Handbook of Ocean Engineering*. Springer Handbooks. Springer, Cham.
- Ungate, C. D., Harleman, D. R., & Jirka, G. H. (1975). *Stability and mixing of submerged turbulent jets at low Reynolds numbers*. Energy Laboratory Report MIT-EL 75-014.
- Ünsal Karakuş, E. (2018). Yoğun Su Deniz Deşarjlarının Yanal Akımlarla Etkileşimlerinin Sayısal Modelleme İle İncelenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- Vafeiadou, P., Papakonstantis, I., & Christodoulou, G. (2005). Numerical simulation of inclined negatively buoyant jets. *The 9th international conference on environmental science and technology, September*, (s. 1-3).
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method* (2 b.). Harlow, Essex: Pearson Education Limited.
- Wright, S. J. (1984). Buoyant jets in density-stratified crossflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 643-656.
- Yan, X., & Mohammadian, A. (2017). Numerical modeling of vertical buoyant jets subjected to lateral confinement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7), 04017016.
- Yan, X., & Mohammadian, A. (2019). Numerical modeling of multiple inclined dense jets discharged from moderately spaced ports. *Water*, 11(10), 2077.
- Yan, X., Ghodoosipour, B., & Mohammadian, A. (2020). Three-dimensional numerical study of multiple vertical buoyant jets in stationary ambient water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(7), 04020049.
- Yan, X., Mohammadian, A., & Chen, X. (2019). Three-dimensional numerical simulations of buoyant jets discharged from a rosette-type multiport diffuser. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11), 409.

- Yılmaz, S. (2015). Evsel Atıksu Derin Deniz Deşarjlarında Ördek Gaga Çek Valf Kullanımının Birinci Seyrelme Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.*
- Zeitoun, M. A., Reid, R. O., McHilheny, W. F., & Mitchell, T. M. (1972). *Model studies of outfall systems for desalination plants, Part III: Numerical simulations and design considerations*. Research and Development Progress Rep. 804, Office of Saline Water, U.S Washington, DC: Dept. of Interior, Washington, D.C.
- Zhang, S., Law, A. W.-K., & Jiang, M. (2017). Large eddy simulations of 45 and 60 inclined dense jets with bottom impact. *Journal of Hydro-Environment Research*, 15, 54-66.

ÖZGEÇMİŞ

Mahmut Cenk SAYIL, ilköğrenimini Cudibey İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise eğitimini 2015 yılında Affan Kitapçıoğlu Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2017 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü lisans eğitimini 2021 yılında tamamladı. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2024 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atanmıştır. Görevine burada devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

SCI expanded İndeksli Yayınlanmış Çalışmalar:

Anılan, T., Bayram, S., Sayıl, M. C. ve Yüksek, O. (2024). Statistical analysis of flood risk perception: a case study for Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Natural Hazards*, 1-18.

TR Dizin İndeksli Yayınlanmış Çalışmalar:

Anılan, T., Sayıl, M. C., Yüksek, O. ve Bayram, S. (2024). Taşkın Risk Yönetiminde Sosyal Faktörlerin Değerlendirilmesi ve Doğu Karadeniz Havzası için Risk Algısı Yönetim Önerisi. *Afet ve Risk Dergisi*, 7(1), 172-194.

Sempozyum Bildirileri:

Anılan, T., Sayıl, M.C., ve Bayram, S., (2023). Taşkın Risk Yönetiminde Sosyal Faktörlerin Değerlendirilmesi ve Trabzon için Risk Algısı Yönetim Önerisi. Trabzon Kent Sempozyumu, Trabzon, Turkey.