

T.C.
AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
2021-YL-052

**DÜŞÜRME ŞAFT YAPILARININ FLUENT İLE
MODELLENMESİ**

Faruk ÇAKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMANI
Doç. Dr. Ayşe YÜKSEL OZAN

AYDIN – 2021

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim boyunca yardımını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle bu tez çalışmasının şekillenip ortaya çıkmasına vesile olan değerli hocam Doç. Dr. Ayşe YÜKSEL OZAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgi tecrübesiyle desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Halil KIRNAK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca maddi manevi destekleri esirgemeyen başta annem ve babama, tecrübe ve birikimleriyle desteklerini daim eden ağabeylerim Fatih ÇAKAN ve Dr. Fahri ÇAKAN' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-----|
| KABUL VE ONAY | i |
| TEŞEKKÜR | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vi |
| TABLolar DİZİNİ..... | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | x |
| ÖZET | xi |
| ABSTRACT | xii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ | 2 |
| 2.1. Düşü Yapısı Temel Fonksiyonları Ve Türleri | 2 |
| 2.1.1. Düşü Yapısının Temel Bileşenleri..... | 2 |
| 2.1.2. Düşü Yapısı Tipleri | 5 |
| 2.1.2.1. Girdap Düşü Yapısı | 5 |
| 2.1.2.2. Helisel Rampalı Düşü Yapısı | 6 |
| 2.1.2.3. Bölmeli Düşü Yapısı | 7 |
| 2.1.2.4. Dalma Tipi Düşü Yapısı | 8 |
| 2.1.3. Giriş Türleri | 9 |
| 2.1.4. Enerji Dağıtımı | 11 |
| 2.1.5. Düşü Yapısının Konumu | 11 |
| 2.1.6. Hava Girişi ve Havalandırma | 12 |
| 2.1.7. Literatür Taraması | 12 |
| 3. SAYISAL MODELLEME | 16 |
| 3.1. ANSYS FLUENT Yazılımı..... | 16 |

| | |
|--|----|
| 3.1.1. Çözüm Ağı Oluşturma..... | 17 |
| 3.2. Sayısal Algoritma | 18 |
| 3.3. Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid - VOF) | 19 |
| 3.4. Türbülans Modeli | 20 |
| 3.4.1. $k - \epsilon$ Türbülans Modeli | 20 |
| 3.4.2. $k - \epsilon$ Türbülans Modelinin Performansı..... | 21 |
| 3.4.3. RNG $k - \epsilon$ Türbülans Modeli | 22 |
| 3.5. Sonlu Hacimler Metodu | 24 |
| 4. BULGULAR | 26 |
| 4.1. Model Doğrulama..... | 26 |
| 4.2. Sınır Koşulları | 33 |
| 4.3. Su – Hava Dağılımı | 44 |
| 4.4. Hız Dağılımı | 50 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 56 |
| KAYNAKLAR..... | 58 |
| EKLER | 61 |
| EK 1. BTÇ1 (2,50 m/s)' in iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 61 |
| EK 2. BTÇ2 (2,56 m/s)' nin iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 62 |
| EK 3. BTÇ3 (2,68 m/s)' ün iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 63 |
| EK 4. BTÇ4 (2,86 m/s)' ün iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 64 |
| EK 5. BTÇ5 (3,45 m/s)' in iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 65 |
| EK 6. BTÇ6 (2,50 m/s)' nin iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 66 |

| | |
|--|----|
| EK 7. BTÇ2 (2,56 m/s)' nin üç boyutlu (3D1) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 67 |
| EK 8. BTÇ4 (2,86 m/s)' in üç boyutlu (3D1) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 68 |
| EK 9. BTÇ6 (3,49 m/s)' nin üç boyutlu (3D1) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 69 |
| EK 10. BTÇ4 (2,86 m/s)' ün üç boyutlu (3D2) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği | 70 |
| BİLİMSEL ETİK BEYANI | 71 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 72 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Düşü yapısının temel bileşenleri (Williamson, 2001)..... | 4 |
| Şekil 2.2. Girdap düşü yapısı (Margevicius, 2018)..... | 5 |
| Şekil 2.3. Helisel rampalı düşü yapısı (Margevicius, 2018) | 7 |
| Şekil 2.4. Bölmeli düşü yapısı (Margevicius, 2018)..... | 8 |
| Şekil 2.5. Dalma tipi düşü yapısının genel görünümü (Margevicius, 2018)..... | 9 |
| Şekil 2.6. Giriş şemaları (a) Dairesel, (b) Kaydırma, (c) Teğet ve (d) Spiral | 10 |
| Şekil 2.7. Drioli (1947)' nin spiral girişli girdap düşü yapısının plan ve uç görünümü şeması | 10 |
| Şekil 4.1. Havalandırma delikleri olmadan oluşturulmuş deney sistemi; (a) Sarmal bölge ve düşey şaftın görünümü, (b) Çıkış tünelinin görünümü..... | 26 |
| Şekil 4.2. Düşü yapısı profili; (a) Yandan görünüş, (b) Üst kesit (Zhang vd., 2018) | 27 |
| Şekil 4.3. ANSYS FLUENT' te oluşturulan iki boyutlu (2D) model | 28 |
| Şekil 4.4. İki boyutlu (2D) modelde oluşturulan çıkış tüneli bölgesindeki yüzeysel çözüm ağı | 28 |
| Şekil 4.5. İki boyutlu (2D) modelde oluşturulan sarmal bölgedeki yüzeysel çözüm ağı..... | 29 |
| Şekil 4.6. ANSYS FLUENT' te oluşturulan üç boyutlu (3D) model..... | 29 |
| Şekil 4.7. Üç boyutlu (3D1) modellemede sarmal bölgedeki hücresel çözüm ağı | 30 |
| Şekil 4.8. Üç boyutlu (3D1) modellemede çıkış tüneli bölgesindeki hücresel çözüm ağı..... | 30 |
| Şekil 4.9. Üç boyutlu (3D2) modellemede giriş tüneli ve sarmal bölgede çözüm ağı..... | 31 |
| Şekil 4.10. Üç boyutlu (3D2) modellemede çıkış tüneli bölgesindeki çözüm ağı | 31 |
| Şekil 4.11. Sınır Şartları | 32 |
| Şekil 4.12. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) hızları için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U0) | 34 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.13. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U0)..... | 35 |
| Şekil 4.14. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U0)..... | 36 |
| Şekil 4.15. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U0)..... | 37 |
| Şekil 4.16. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U0)..... | 38 |
| Şekil 4.17. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U0)..... | 39 |
| Şekil 4.18. BTÇ4 (2,86 m/s) 'ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U0)..... | 40 |
| Şekil 4.19. BTÇ4 (2,86 m/s)'ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U0)..... | 41 |
| Şekil 4.20. BTÇ4 (2,86 m/s)'ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/ U0)..... | 42 |
| Şekil 4.21. BTÇ4 (2,86 m/s)'ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/ U0)..... | 43 |
| Şekil 4.22. BTÇ6 (3,49 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm..... | 44 |
| Şekil 4.23. BTÇ6 (3,49 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 44 |
| Şekil 4.24. BTÇ5 (3,45 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm..... | 45 |
| Şekil 4.25. BTÇ5 (3,45 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 45 |
| Şekil 4.26. BTÇ4 (2,86 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm..... | 46 |
| Şekil 4.27. BTÇ4 (2,86 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 46 |
| Şekil 4.28. BTÇ3 (2,68 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm..... | 47 |
| Şekil 4.29. BTÇ3 (2,68 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünü..... | 47 |
| Şekil 4.30. BTÇ2 (2,56 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm..... | 48 |
| Şekil 4.31. BTÇ2 (2,56 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.32. BTÇ1 (2,50 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm | 49 |
| Şekil 4.33. BTÇ1 (2,50 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 49 |
| Şekil 4.34. BTÇ1 (2,50 m/s) için hız dağılımı genel görünüm | 50 |
| Şekil 4.35. BTÇ1 (2,50 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 50 |
| Şekil 4.36. BTÇ2 (2,56 m/s) için hız dağılımı genel görünüm | 51 |
| Şekil 4.37. BTÇ2 (2,56 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 51 |
| Şekil 4.38. BTÇ3 (2,68 m/s) için hız dağılımı genel görünüm | 52 |
| Şekil 4.39. BTÇ3 (2,68 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 52 |
| Şekil 4.40. BTÇ4 (2,86 m/s) için hız dağılımı genel görünüm | 53 |
| Şekil 4.41. BTÇ4 (2,86 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 53 |
| Şekil 4.42. BTÇ5 (3,45 m/s) için hız dağılımı genel görünüm | 54 |
| Şekil 4.43. BTÇ5 (3,45 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 54 |
| Şekil 4.44. BTÇ6 (3,49 m/s) için hız dağılımı genel görünüm | 55 |
| Şekil 4.45. BTÇ6 (3,49 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm..... | 55 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 4.1. ANSYS FLUENT' te oluşturulan modellerde kullanılan çözüm ağırları..... | 27 |
| Tablo 4.2. Farklı çözüm ağırları ve hız koşulları için yapılan iterasyon sayıları ve analiz süreleri..... | 32 |
| Tablo 4.3. Zhang vd. (2018)'nin deney ve sayısal modellemede kullanmış oldukları hız değerleri..... | 33 |
| Tablo 4.4. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba) | 35 |
| Tablo 4.5. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)..... | 35 |
| Tablo 4.6. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba) | 36 |
| Tablo 4.7. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)..... | 37 |
| Tablo 4.8. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba) | 38 |
| Tablo 4.9. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)..... | 39 |
| Tablo 4.10. BTÇ4 (2,86 m/s)'ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba) | 40 |
| Tablo 4.11. BTÇ4 (2,86 m/s)'ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)..... | 41 |
| Tablo 4.12. BTÇ4 (2,86 m/s)'ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba) | 42 |
| Tablo 4.13. BTÇ4 (2,86 m/s)'ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)..... | 43 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- α_a : Hava Hacim Oranı
- α_w : Su Hacim Oranı
- Fr** : Froude Sayısı
- g** : Yerçekimi İvmesi
- G_k** : Ortalama Hız Gradyanının Neden Olduğu Türbülans Enerjisinin Üretimi
- h** : Derinlik
- k** : Türbülans Kinetik Enerji
- PISO** : Operatörlerin Bölünmesiyle Örtülü Basınç (Pressure Implicit With Operators Splitting)
- RNG** : Renormalizasyon Grubu
- S_φ** : Kütleli Kuvvetler
- t** : Zaman
- u_i** : Hız Bileşeni
- VOF** : Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume Of Fluid)
- ρ** : Akışkanın Özgül Kütlesi
- v_{in}** : Akım Hızı
- x_i** : Hız Koordinatı
- ρ_w** : Suyun Yoğunluğu
- ρ_a** : Havanın Yoğunluğu
- μ_w** : Suyun Moleküler Viskozitesi
- μ_a** : Havanın Moleküler Viskozitesi
- μ** : Dinamik Viskozite
- μ_t** : Türbülans Viskozitesi
- Γ** : Difüzyon Katsayısı

ÖZET

DÜŞÜRME ŞAFT YAPILARININ FLUENT İLE MODELLENMESİ

Çakan F. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Tezi, Aydın, 2021.

Amaç: Bu tez çalışmasında havalandırma delikleri olmayan düşü şaftının sayısal modellenmesi yapılarak hız değerleri incelenmiş ve Zhang vd. (2018) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem: ANSYS FLUENT yazılımı kullanılarak iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) sayısal modellemeler yapılmıştır. RNG $k - \epsilon$ türbülans modeliyle benzeştirmeler yapılmıştır. Hava - su iki fazlı akım koşulu olduğundan Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid - VOF) türbülans modeli kullanılmıştır.

Bulgular: Yapılan sayısal çalışma ile kararlı akım koşullarında iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) çözüm ağı için sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, RNG $k - \epsilon$ türbülans modelinin ve VOF modelinin düşürme şaft yapılarında oluşan akım koşullarının benzeştirilmesinde başarılı yöntemler olduğu görülmüştür. Yapılan benzeşimler sonucunda elde edilen hız değerlerinin literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırması yapılmıştır. Buna bağlı olarak, 3D çözüm ağının akım alanını daha doğru bir şekilde benzeştirdiği belirlenmiştir.

Sonuç: Bu çalışmada RNG $k - \epsilon$ türbülans modeliyle yapılan analizlerde düşü yapısının akım özelliklerini yeterli bir şekilde benzeştirdiği görülmüştür. Hava - su akış ara yüzünü izlemek için yaygın olarak kullanılan Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid - VOF) türbülans modelinin yeterli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Düşü yapısı, FLUENT, $k - \epsilon$ türbülans modeli, VOF

ABSTRACT

MODELLING OF VERTICAL DROP SHAFT WITH FLUENT

Çakan F. Aydın Adnan Menderes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Civil Engineer Program, Master Thesis, Aydın, 2021.

Objective: In this study, numerical modelling of the drop shaft without ventilation holes was considered and velocity values were examined comparing with Zhang et al. (2018)'s results.

Material and Methods: Two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) numerical models were made using ANSYS FLUENT software. Comparisons are made with the RNG $k - \epsilon$ turbulence model. Volume of Fluid (VOF) turbulence model was considered because of air - water two-phase flow condition.

Results: In this study, two dimensional (2D) and three dimensional (3D) steady simulations were performed. According to the obtained results, it is found that the RNG $k - \epsilon$ turbulence model and VOF model are applicable in simulating of flow in drop shaft structures. The obtained velocity results were compared with the experimental results taken by literature. As a result, it is obtained that 3D mesh is more successful to be able to simulate the flow structure.

Conclusion: In this study, it was obtained that the RNG $k - \epsilon$ turbulence model was successful to simulate the flow in drop shaft structures. Moreover, the VOF model was chosen in the analysis of the flow in drop shafts. According to the results, Volume of Fluid (VOF) turbulence model was achieved to model the flow area in drop shaft structures.

Keywords: Dropshaft, FLUENT, $k - \epsilon$ turbulence model, VOF

1. GİRİŞ

Kanalizasyon sistemlerinin doğru çalışması, nüfus yoğunluğunun fazla olduğu kentsel bölgelerde selden korunmada önemli bir faktördür. Kentsel büyüme, geçirimsiz yüzeylerin sürekli artması, yapısal yaşlanma ve kanalizasyon sistemlerinin yanlış ve eksik tasarımı gibi faktörler verimliliği doğrudan etkilemektedir. (Del Giudice & Gisonni, 2011)

Düşü yapıları, hidrolik dengesizlikleri ve oluşacak hasarları önlemek için akımları kontrollü bir şekilde daha yüksek seviyeden daha düşük seviyeye aktarmak için kullanılan bir toplama sistemidir. Bu seviyeler genel olarak 15 m ile 60 m arasında değişmektedir. 3000 yıldan uzun bir süredir düşürme yapıları kullanılmaktadır. (Chanson, 1999)

Yapılan bir çalışmada düşü yapılarının 75 yıllık zamanda inşa edilen yapı tipleri, uygulamalar, laboratuvar modelleme teknikleri, oluşturulan fiziksel modellemeler ve oluşturulan çok fazlı sayısal modellemedeki gelişmeleri incelemiştir. (Mulligan vd., 2019)

Geleneksel enerji dağıtıcılarla karşılaştırıldığında düşü yapıları, akım rejimini hızla değiştirebilir ve enerjiyi dağıtmak için türbülans alanları veya girdaplar oluşturabilir. Bu durumda taşkın deşarj kontrolü, enerji dağıtımı ve drenaj yapısı koruması gibi çeşitli etkenler sağlar. (Zhang vd., 2018)

Düşü yapıları üç ana unsurdan oluşur. Bunlar giriş yapısı, düşey shaft ve çıkış yapısıdır. Genel olarak kullanılan giriş konfigürasyonları spiral giriş, teğetsel giriş, vorteks girişidir. (Zhao vd., 2006)

Bu tez çalışmasında havalandırma delikleri olmayan bir düşme shaftının modellemesi ANSYS FLUENT (2020R2) programında yapılmıştır (ANSYS, 2020). Yapılan bu çalışmada farklı hız parametreleri sayısal modellemede uygulanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen hız parametrelerinin sonuçları arasındaki fark belirlenmiştir. Hava – su akım ara yüzünü izlemek için yaygın olarak kullanılan VOF türbülans modeli ve RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Sonuçlar, Zhang vd. (2018) yapmış oldukları çalışmayla karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Düşü Yapısı Temel Fonksiyonları Ve Türleri

Kentsel dokunun evrimi, kentsel büyümeyle birlikte genellikle kanalizasyon sistemleri gibi mevcut altyapıların iyileştirilmesine ve yükseltilmesine yol açar. Özellikle, kentsel havza alanlarının geçirimsiz yüzdesindeki artış, yüzey akımında bir artış anlamına gelir ve bu da bodrum veya sokak su baskını, rögar kapağı patlaması gibi kentsel drenaj sistemlerinde yapısal sorunlara neden olabilir. Bu olumsuzluklar insanlara veya mülke büyük zararlar verebilir. Düşü yapıları, genellikle engebeli bölgelerde bulunan kanalizasyon sistemlerinde yağmur suyunu veya kanalizasyon suyunu büyük yükseklik farklılıklarında taşımak için kullanılır. (Padulano vd., 2013)

Geçtiğimiz 30 yıl boyunca, dünya çapında kentsel alanlardaki birleşik kanalizasyonlardan gelen fırtına hava taşmalarını kontrol etmeye yardımcı olmak için derin tünel taşıma ve depolama sistemlerinin inşaları yapılmıştır (Schultz vd., 2004). Bu tür sistemlerin en büyük zorluklarından biri, mevcut atık su şebekelerinden akımların 150 ila 200 m'ye kadar büyük olabilen kapsamlı yükseklik farkları yoluyla daha düşük tünel seviyelerine güvenli ve verimli bir şekilde taşınmasıdır. (Jain & Kennedy, 1983; Plant & Crawford, 2016; Tai vd., 2009)

Su kalitesi standartlarının yürürlüğe girmesiyle sel baskınları ve yağmur suyu bertarafı için iyileştirilme çalışmalarının geliştirilmesine başlanmıştır. Yeraltı depolama tünelleri, sorunu çözmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yüzeye yakın fırtına-kanalizasyon sistemlerinden gelen yağmur suyu veya birleşik kanalizasyon taşması, tüneller boyunca bir dizi düşü yapısı yoluyla yeraltı tünellerine yönlendirilmiştir. (Jain, 2000)

2.1.1. Düşü Yapısının Temel Bileşenleri

Düşü yapısındaki hidrolik koşullar, giriş tasarımı tarafından yönetilir ve çıkış koşullarından etkilenir. Düşü yapısının birincil rolü, üst kanalizasyon sistemi gibi daha yüksek bir kottan gelen akımları yerçekimi ile derin tünellere yönlendirmektir. Dalma - giriş

ve girdap - giriş düşü yapıları, yağmur suyu toplama sistemlerinde kullanılan iki yaygın düşü yapısı türüdür. Dalma-giriş yapıları, suyu üst kanalizasyon sisteminden şafttan aşağı düşmek üzere yönlendirir. Vorteks – giriş yapılarında, düşme yüksekliği sürtünme nedeniyle teğetsel hızı azaltacak şekildeyse, suyun cidardan ayrılana ve düşey olarak düşene kadar spiral olarak aşağıya inmesine ve düşü yapısının cidarına yapışmasına izin veren özel tasarlanmış bir yola yönlendirir. (Kang, 2015)

Hâlihazırda kullanımda olan düşü yapılarının tasarımlarında çok sayıda varyasyon olmasına rağmen, atık su ve yağmur suyu için kullanılan düşü yapıları, giriş özelliklerine göre sınıflandırılmıştır.

Şekil 2.1’ de düşü yapılarının temel bileşenleri gösterilmiştir. Düşü yapılarının temel bileşenleri şunlardır: (Williamson, 2001)

- **Yönlendirme Odası:** Yönlendirme odası, yüzey kanalizasyonundan giriş yapısına akımı yönlendirir. Giriş yapısına düzgün giriş için akımı sabitlemek gerektiğinde, genellikle yönlendirme odası ile giriş yapısı arasında bir "yaklaşma kanalı" sağlanır.

- **Giriş Yapısı:** Giriş yapısı yönlendirme odasından akımı alır ve düşey şaftın tepesinde bulunur. Giriş yapısının tasarımı, düşey şaft boyunca tutulan hava miktarını etkiler. Girişler, akımın düşme şaftından aşağı dalmasına izin verecek şekilde tasarlanabilir veya girdap hareketi oluşturacak şekilde tasarlanabilir.

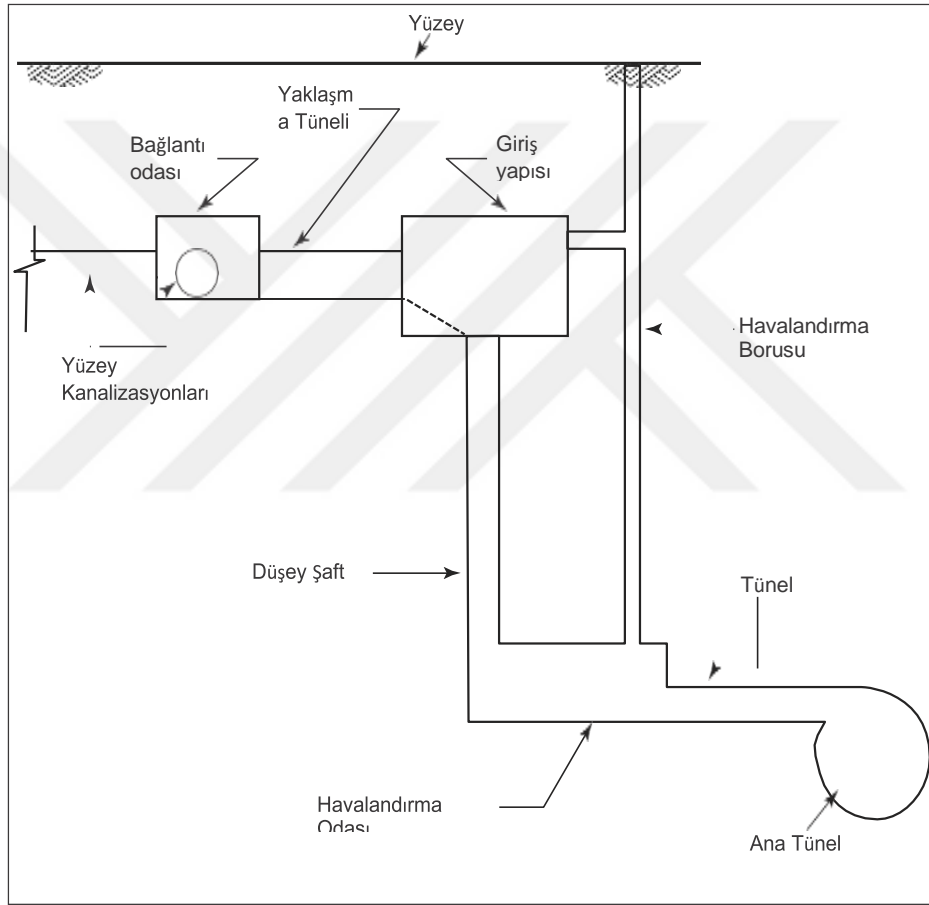
- **Düşey Şaft:** Akımı giriş yapısından kanalizasyon tüneline ileten düşey şaft veya borudur ve genellikle sabit çaptadır.

- **Hava Tahliye Odası:** Düşen akım düşey şafttan çıkar ve düşey şaftın tabanında yatay bir konektöre veya hava tahliye odasına girer. Hava tahliye odasının işlevi, sürüklenen havanın ana tünele taşınmasını önlemektir. Hava tahliye odası, sürüklenen havanın çözültiden çıkması ve ardından düşü yapısından çıkması veya yeniden dolaştırılması için alan sağlar.

- **Havalandırma Borusu:** Düşü yapısı içinde tutulan havanın çıkışına ve devridaimine, basınçlar çok artarsa yakalanan havanın çıkışına izin vermek için hava tahliye odasına bir havalandırma borusu bağlanır. Boru, yüzeye veya koku kontrol tesislerine ek bir bağlantıyla, yeniden dolaşıma izin vermek için genellikle giriş yapısına bağlanır. Havalandırma borusu, su ve hava taşıyan yolları ayırmak için düşey bir cidar kullanılarak doğrudan düşey şaftın içine dahil edilebilir.

• **Tünel:** "Bağlantı tüneli" olarak da anılan kanal, hava tahliye odasının aşağısında yer alır ve ana tünele bağlanır.

• **Yardımcı Yapılar:** Erişim ve havalandırma yapıları gibi araçlar, sistem bakımını ve işletimini geliştirmek için dahil edilebilir. Sürekli akım sistemlerinde, tünel erişimi sağlamak için ayrı yapılara ihtiyaç vardır. Dalgalanmalara karşı koruma sağlamak ve sistemdeki atmosferik koşulların korunmasına yardımcı olmak için büyük havalandırma yapılarına ihtiyaç duyulabilir.



Şekil 2.1. Düşü yapısının temel bileşenleri (Williamson, 2001)

Giriş yapısının işlevi, yatay akımdan düşey düşü kanalına yumuşak bir geçiş sağlamaktır. Düşey düşü kanalı daha sonra suyu alt kotlara taşır ve bu süreçte mümkün olduğu kadar fazla enerjiyi dağıtır. Düşürme şaftının dibinde, çarpma kuvvetlerine dayanacak, sürüklenen havayı uzaklaştıracak ve suyu tünele iletecek bir yapı sağlanmalıdır. Geleneksel düşü yapıları, akımları taşımak, bakım ve erişim için hava borusu veya

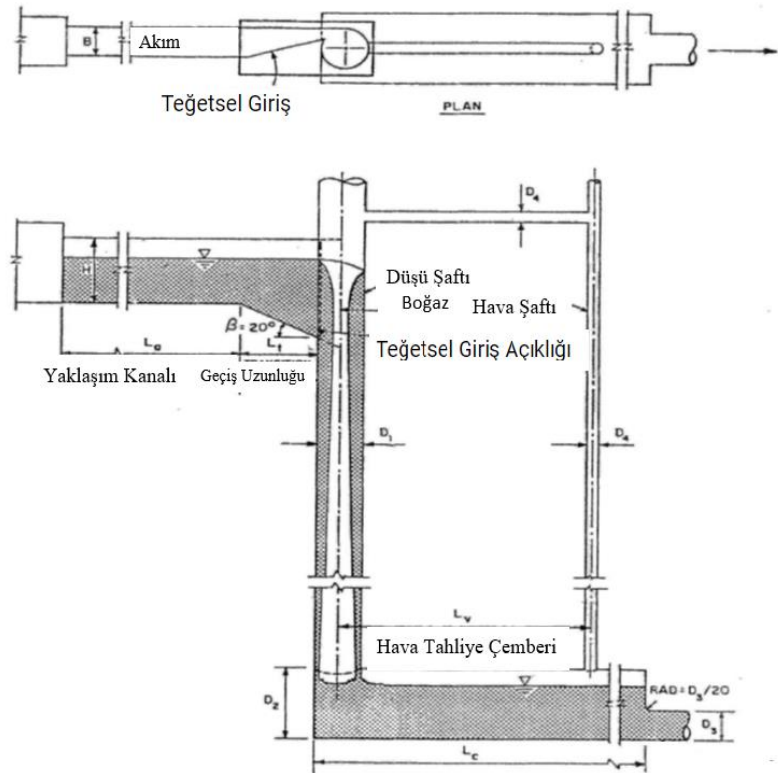
havalandırma olmak üzere birden çok düşey kanala sahip olma eğilimindedir. Yapısal hasara yol açabilecek yüksek basınçlı hava oluşumlarının, kavitasyon etkilerinin, hidrolik şokların veya diğer hidrolik olayların oluşumunu önlemek önemlidir. (Andoh vd., 2008)

2.1.2. Düşü Yapısı Tipleri

2.1.2.1. Girdap Düşü Yapısı

Girdap tipi düşü yapıları, akımın aşağıya doğru dönmesine ve düşey şaftın cidarlarına yapışmasına neden olur. Girdap düşü yapısının tasarımının amacı, düşey şaftın tepesinde girdap veya spiral akış oluşturmaktır. Girdap hareketi, sisteme çekilen hava miktarını azaltır ve akım şaftın tabanına ulaşmadan önce enerjinin dağılmasına izin verir. (Williamson, 2001)

Girdap düşü yapısının temel bileşenleri Şekil 2.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Girdap düşü yapısı (Margevicius, 2018)

Düşen menholler genellikle dik topografyaların drenaj sistemlerinde kullanılır. Enerjiyi dağıtmak ve drenaj sistemlerinde yeterli akım koşulları oluşturmak için oldukça farklı yüksekliklerde toplayıcıları bağlayarak deşarjları iletirler. Düşü yüksekliği sonuçları 5 m'den büyükse, girdap düşü yapıları uygulanır. (Corrado & Hager, 2013)

Girdap düşü yapıları, girişteki Froude sayısı koşuluna bağlıdır.

$$Fr_i = V_{in} / \sqrt{gh}$$

Burada V_{in} girişteki akım hızı, h derinlik, g yerçekimi ivmesidir. $Fr_i < 1$ durumunda akım nehir rejimidir. $Fr_i > 1$ durumunda akım sel rejimidir.

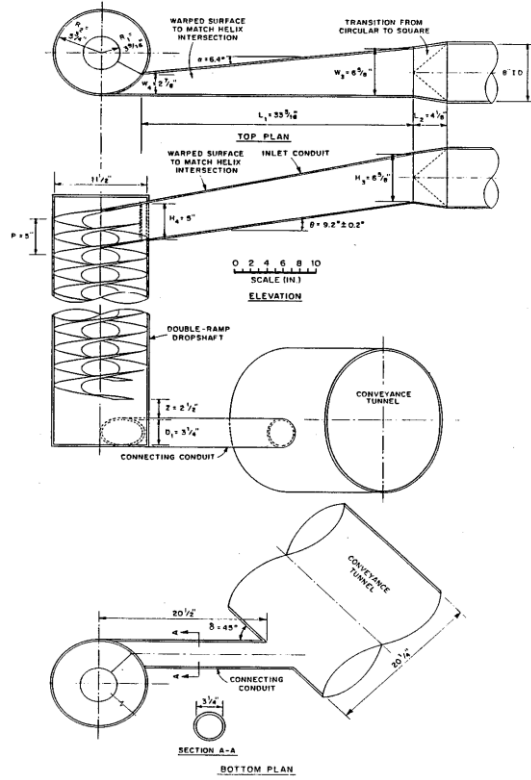
Girdap düşü yapıları, 1940'lı yıllarda hidroelektrik enerji dağılımındaki ilk uygulamalarından günümüzün kentsel drenaj altyapı uygulamalarına kadar hidrolik mühendisliği için önemli bir rol oynamıştır. Girdap düşü yapısının en eski uygulamalarından biri Drioli (1947) tarafından yapılan hidroelektrik projesinde enerji dağıtıcısının parçası olarak tasarlanmıştır.

Jain ve Kennedy (1983), 1980'li yıllardan itibaren artan şehirleşme, nüfus artışı ve yeni tasarım gereksinimlerini tetikleyen iklim faktörlerinden dolayı kentsel kanalizasyon altyapısında girdap düşü yapısı gereksinimini arttırdığı belirtilmiştir.

2.1.2.2. Helisel Rampalı Düşü Yapısı

Hidrolik olarak girdap düşüşüne benzer konsepttedir. Sürekli rampa veya aralıklı rampa sistemleri kullanılır. Personel ve ekipman için sınırlı erişim mevcuttur. Tünel tasarımı hidrolik/hava sürüklenmesi için kritik öneme sahiptir. (Margevicius, 2018)

Helisel rampalı düşü yapısı Şekil 2.3’ de gösterilmiştir.

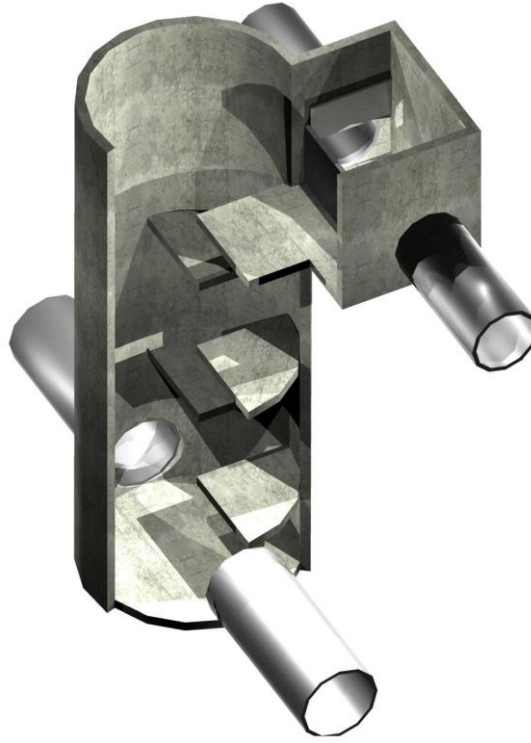


Şekil 2.3. Helisel rampalı düşü yapısı (Margevicius, 2018)

2.1.2.3. Bölmeli Düşü Yapısı

İnşasında insan ve ekipman faktörleri büyük önem arz eder. Birden fazla akım sistemde çalışabilir. Dalgalanma ve gazları durdurmak etkisi sınırlıdır. Uygun tasarımı ile iyi hava tahliyesi sağlar. Cleveland, Toronto, Londra, Yeni Zelanda, Çin’ de kullanılmıştır. (Margevicius, 2018)

Şekil 2.4' de bölmeli düşü yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Bölmeli düşü yapısı (Margevicius, 2018)

2.1.2.4. Dalma Tipi Düşü Yapısı

Kullanılan en eski düşü yapısı tipidir. Basit ve ucuzdur. Küçük akışlar ve sığ damlalar için tercih edilen bir sistemdir. Aşağıdaki sebeplerden dolayı çoğu tünel sisteminde genellikle kullanılmaz: (Margevicius, 2018)

- Akım kararsızlığı,
- Hava girişi eksikliği,
- Enerji belirsizliği,
- Koku kontrolsüzlüğü,
- Gürültülü çalışma,
- Titreşim yatkınlığı gibi etkenlerden dolayı tercih edilmemektedir.

Dalma tipi düşü yapısında, akım radyal olarak girer ve doğrudan düşey shaftta düşer. Minnesota Üniversitesi St. Anthony Falls Hidrolik Araştırma Laboratuvarı'nda, Chicago Tüneli ve Rezervuar Planı için dalma tipi düşme yapıları için çeşitli tasarımlar geliştirilmiştir.

Şekil 2.5' de dalma tipi düşü yapısına ait deneysel görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Dalma tipi düşü yapısının genel görünümü (Margevicius, 2018)

2.1.3. Giriş Türleri

a) Dairesel: Giriş cidarlarının düşü yapısı ile eşmerkezli olduğu ve zeminin yatay olduğu giriş konfigürasyonudur ($\beta = 0$). Bu nedenle, uygulamaların çoğu için nehir akım koşulları hakimdir. (Laushey, 1952; Laushey ve Mavis, 1953)

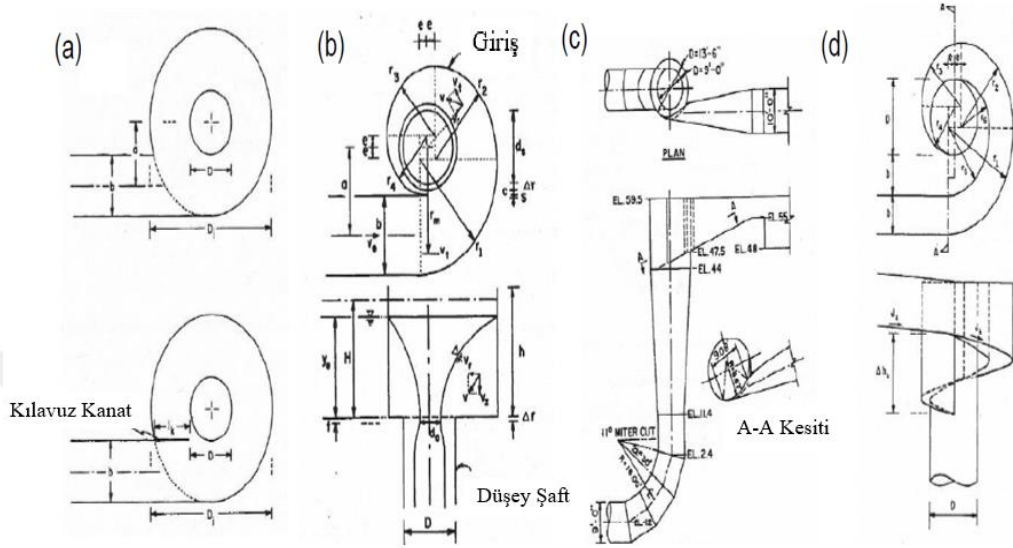
b) Kaydırma: Girişin kenarlarını düşü shaftına veya orifise doğru spiralleyerek dairesel shaftta kıyasla tahliye kapasitesini arttırır. Kaydırma girişli shaftta zemin yataydır ve uygulamaların çoğu için nehir akım koşulları hakimdir. Kaydırma tipi girdap odası üzerindeki ilk deneysel araştırmalar Drioli (1969) ve Ackers ve Crump (1960) tarafından sunulmuştur.

c) Teğetsel: Süper kritik dairesel giriş biçimidir, düşük ayak izi ve yüksek kapasitesi nedeniyle en çok tercih edilen sistemdir (Plant ve Crawford, 2016). Bu sistemde akım, daralan ve eğimli bir kanalda dairesel odaya teğet olarak taşınır.

d) Spiral: Kaydırma girişe benzer formülasyona ve eğimli bir zemine ($\beta > 0$) sahiptir

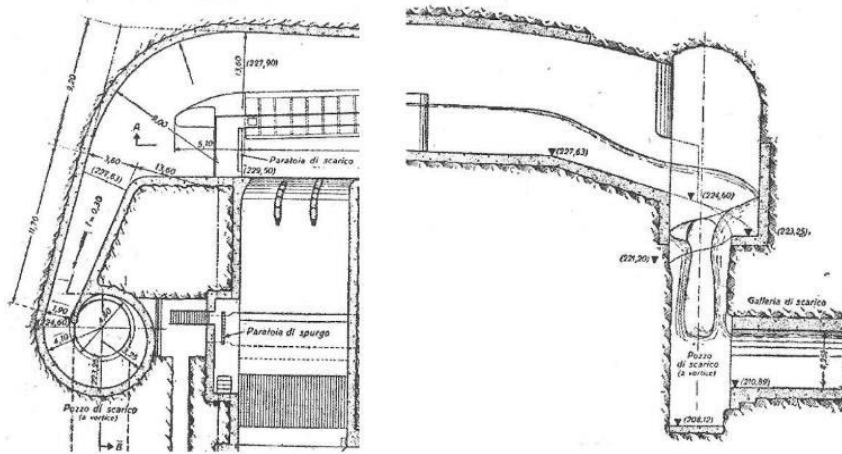
(Drioli, 1947; Kellenberger, 1988; Pfister vd, 2018). Yaklaşım akış koşulları süper kritik tiptedir.

Giriş şemaları Şekil 2.6' da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Giriş şemaları (a) Dairesel, (b) Kaydırma, (c) Teğet ve (d) Spiral (Mulligan vd., 2019)

Drioli (1947), tipik olarak spiral giriş tasarımı olan düşme şaft yapıları üzerinde deneysel analiz yapan ilk kişidir. Şekil 2.7' de Drioli' nin yapmış olduğu spiral girişli girdap düşü yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Drioli (1947)' nin spiral girişli girdap düşü yapısının plan ve uç görünümü şeması

Kellenberger (1988), yapmış olduğu çalışmada spiral girişler için fiziksel model deneyleri sonuçlarının yanı sıra tasarım prosedürlerini de tanıtmıştır. Süper kritik akışlar için, akımın cidarlara yapışmaya zorlandığı spiral giriş tipi önermiştir.

Hager (1990), çeşitli giriş geometrilerinden toplanan verilere dayanarak spiral girişi optimize etmiştir. Dış kılavuz duvar boyunca yüzey profili analiz edilmiştir. Yaklaşım akımının Froude sayısının ve dış giriş cidarının yarıçapının maksimum duran dalga yüksekliğini etkilediği bulunmuştur.

2.1.4. Enerji Dağıtımı

Düşü yapılarında enerji dağılması dört ana faktörden kaynaklanır: (Crispino vd., 2021)

- Giriş kısmında ve mevcut yapılarda meydana gelen spiraldeki süper kritik akışın karışıklığından dolayı şok dalgalarının oluşumu,
- Düşey şaft boyunca pürüzlülük etkisi,
- Düşen akımın düşey şafttan dağıtım odasının tabanına etkisi,
- Karmaşık bir iç akım modelinin oluşması ve türbülanslı kinetik enerjinin hızla dağılması nedeniyle dağıtım odasında oluşan türbülanslı akım.

2.1.5. Düşü Yapısının Konumu

Düşü yapılarının kentsel bir ortamda kurulması sırasında gerekli olan seçim kriterleri geliştirilir. Düşü yapısının konumu aşağıdaki kriterlere göre seçilir: (Williamson, 2001)

- Mevcut toplama sistemine yakınlık,
- Önerilen tünele yakınlık,
- Civardaki arazi kullanımını ve yüzey özellikleri,
- İrtifak maliyeti (yani mülk değerleri),
- Düşme derinliği,
- Akım özellikleri,

- Yeraltı koşulları,
- İnşaat, işletme ve bakım için sahaya erişim.

2.1.6. Hava Girişi ve Havalandırma

Düşü yapılarındaki hava – su etkileşiminin iyi anlaşılması, sistemin tasarımı ve çalışması için önemlidir. Su düşey shafta düştüğünde, hava çeşitli şekillerde sürüklenir veya akımla karışır. Dalma girişli düşü yapılarda, serbest düşen su havayı beraberinde taşıdığı için shafta hava sürüklenir. Akım shaftın tabanına çarptığında hava da sürüklenir. Girdaplı tiplerde hava aynı şekilde sürüklenir; bununla birlikte düşen akım, shaftın cidarlarına tutunan dairesel bir jet şeklinde olduğundan, temas halindeki yüzey havası daha küçüktür ve dalma tipi yapıya göre hız daha azdır ve daha az hava sürüklenir. (Williamson, 2001)

Girdap düşü yapılarının, dalma tipi yapılara göre önemli ölçüde daha az hava sürüklediği söylenmiştir (Jain ve Kennedy, 1983); ancak, Zhao vd. (2006), düşü yapılarının girdap veya dalma – akım tipi olup olmadığına bakılmaksızın, hava sürüklenmesinin esas olarak jet hızı tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir.

Yetersiz havalandırılmadan kaynaklanan sorunlar şunlardır: (Williamson, 2001)

- Basıncı hava kabarcıklarının ve gazların şiddetli şekilde salınmasının neden olduğu yapısal hasar,
- Hava suyun yerini aldığından tünel kapasitesi kaybı,
- Anaerobik koşullar hidrojen sülfür gazı birikmesine neden olduğundan düşü yapısının ve tünel bileşenlerinin bozulmasına katkıda bulunan aşındırıcı koşullar,
- Kokuların şiddetlenmesi ve / veya koku kontrolü ile ilgili artan maliyetlerdir.

2.1.7. Literatür Taraması

Zhang vd. (2018) yaptıkları çalışmada yetersiz havalandırma ve negatif basınç gibi etkenlerde dolayı oluşacak sorunları çözmek için havalandırma delikleri olmayan girdap düşü yapısı oluşturmuşlardır. Hız, basınç, havalandırma konsantrasyonu gibi etkenleri deneysel modelleme ve sayısal simülasyonla incelemişlerdir. RNG $k - \epsilon$ türbülans

modelinin vorteks düşü yapısının akım özelliklerini etkili bir şekilde benzeştirebileceği sonucuna varılmıştır.

Guo (2007), yapmış olduğu çalışmada girdap düşü yapısının özelliklerini araştırmıştır. Önerilen giriş ve girdap düşü yapısının akım davranışına ilişkin deneysel ve sayısal modellemeler yapılmıştır. Düşey shaftın çapına ve yayılma kuyusunun derinliğine odaklanarak; düşey shaft şeklinin optimizasyonu ile enerji dağıtma etkisinin iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Mulligan vd. (2018), yaptıkları çalışmada ANSYS CFX ve FLUENT yazılımlarını kullanarak süper kritik girdap düşü yapısı oluşturmuşlardır. Yapmış oldukları çalışmada çok fazlı sayısal modelleme hakkında kapsamlı bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Fiziksel modelleme verilerini kıyaslama olarak kullanmış oldukları çalışmada, çözümden bağımsız bir ağ belirlendikten sonra, standart türbülans modellerini ($k - \epsilon$ veya SST) çözümün aşamasında kullanarak, girdap düşü yapısının temel hidrolik özelliklerini çözebileceği sonucunu bildirmişlerdir.

Crispino vd. (2020), yapmış oldukları araştırmada shaft boyunca dönme açısını ve hız profillerini türetmek için momentum korunumuna ve fiziksel temele dayalı öneride bulunmuşlardır. Ampirik olarak modifiye edilmiş momentum yaklaşımının uygulanmasının, düşey shafttaki spiral giriş tarafından verilen dönen akımlar için benzersiz bir şekilde gerekli olduğu gösterilmiştir.

Kang (2015), yağmurun yoğun olduğu zamanda düşey bir depolama sisteminde meydana gelebilecek olası hidrolik problemler hakkında araştırma yapmıştır. İki adet düşey depolama shaftı, bir yatay tünel ve bir giriş düşü shaftından oluşan fiziksel modelleme ile deneysel çalışma yürütmüştür. Hem sistemde hapsolmuş havanın hem de kütle akım salınımının düşü shaftında hızlı bir su seviyesi yükselmesi olabileceği sonucuna varmıştır.

Jain (2000), kanalizasyon sistemlerinden yer altı depolama tünellerine yönlendirmek için kullanılan, iki rampalı düşü yapısının hidrolik özelliklerini araştırmıştır. Yapmış olduğu çalışmada tünel açma tekniği ile inşa edilebilen iki rampalı düşü yapılarının fizibilitesini ve uygulanabilirliğini göstermiştir.

Del Giudice ve Gisonni (2011), İtalya'nın Napoli kentinde fırtına akımını daha düşük kotlardaki kanalizasyon sisteminden denize doğru aktarmak ve yetersiz kanalizasyonları baypas etmek amacıyla laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada nehir rejiminde girdap girişlerinin hidrolik performansını test etmek için süper kritik

yaklaşım akım tasarımı esasını uygulamışlardır.

Wang vd. (2020), üç boyutlu sayısal bir modelle yedi farklı akış hızında ve üç farklı bölme aralığında hazırlanmış oldukları bölmeli düşü yapısının hidrolik özelliklerini incelemek için, iki fazlı bir akım alanında ANSYS FLUENT yazılımı kullanılarak benzeştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada oluşturdukları yeni saptırma plakasının kayda değer bir enerji dağıtma etkisine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Qi vd. (2018), RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli ile VOF türbülans modeli kullanılarak, farklı bir merkezi adım açısına sahip kademeli bir düşü yapısı üzerindeki akım düzeni ve maksimum bağıl su derinliğini sayısal olarak incelemişlerdir. Hesaplanan sonuçlar, kademeli düşü yapısındaki akımın oldukça türbülanslı olduğunu ve yan duvarın eğriliğinin neden olduğu jet sırasında sapma ile karakterize olduğunu göstermiştir.

Zhao vd. (2006), 3,15 m yüksekliğinde ve 0,223 m çapında düşü yapısı modelleyerek düşü yapısının performansı üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Düşey shaft boyunca çeper basıncı ve dairesel jet akımının su kalınlığının ayrıntılı ölçümleri ve hava sürüklenme hızı ölçülmüştür. Yapılan çalışmada girdap düşü yapısında enerji dağılımının yüksek verimliliğini doğrulamışlardır.

Qiang vd. (2018), havalandırılmalı ve havalandırmasız akım rejimleri altında düşü yapısındaki hava sürüklenmesini araştırmak için fiziksel model çalışması yapmışlardır. Deneylelerden gözlemlenen hava sürüklenme mekanizmaları, düşey shafttaki akım rejimlerine göre değişim göstermiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar düşey shaft içerisindeki sürüklenen hava miktarının havalandırmasız olandan daha fazla olduğunu göstermişlerdir.

Padulano vd. (2013), yaptıkları çalışmada değişken dalma oranlarına sahip düşey borudan oluşan, havalandırma sistemi hem var olan ve hem de olmayan düşü yapısının çalışma koşullarını araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler sonunda sistemin savak akımı, tam akım, geçiş akımı koşullarında çalıştığını gözlemlemişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde, havalandırılmamış düşü yapısının en büyük taşıma kapasitesine sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Laushey ve Mavis (1952), Pittsburgh'un Algheny ilçesinde fırtına-kanalizasyon akımlarını güvenli bir şekilde düşürmek için dairesel giriş konfigürasyonunu araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, deşarj özelliklerini, hava sürüklenmesini, basınçları ve enerji dağılımını belirlemek için fiziksel model çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

Jain (1984), Milwaukee Büyükşehir Kanalizasyon Bölgesi tarafından önerilen bir sıralı depolama sistemi için teğet girişli d yapılarını geliştirmek ve test etmek için laboratuvar çalışması yürütmüştür. Deneysel veriler, yazar tarafından önerilen analitik modelleri tahmin etmek için kullanılmıştır.

Yu ve Lee (2009), süper kritik d yapıları için mevcut olmayan genel ve sağlam tasarım kriterlerine doğru ilerlemek için kapsamlı deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. On be deneysel model incelenmiş ve yazarlar gözlemlerinin teorik tahminle iyi uyuytuğunu belirtmiştir.

Crispino vd. (2015), yaptıkları çalışmada İsviçre' nin Cossonay şehrinde girdap d yapısı tasarlamışlardır. Tasarlanan girdap d yapısı eski ehir Merkezindeki dört kollektörün süper kritik girişlerini toplayacak ve bunları yaklaşık 120 m yüksekliğindeki bir aftın içinden dökerek, akımı vadi tabanına geri getirecektir. Gelen akımların hidrolik özelliklerini tahmin etmek ve üst elemanların hidrolik davranışını belirlemek için FLOW-3D yazılımını kullanmışlardır. Tüm yapının tasarımını doğrulamak için ölçekli bir modelde (1: 7,82) fiziksel testler yapılmıştır. Ayrıca, fiziksel model sonuçları, girdap d yapısının boşaltma kapasitesinin tasarım değerinden daha büyük olduğunu göstermiştir.

Galler'deki Cardiff şehrinde, sel ve erken tama sorunlarının üstesinden gelmek için kanalizasyon sistemlerinin taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırılması gerektiği görülmüştür. Tasarımda çeşitli seçenekler değerlendirilip ve nihayetinde taşıma kapasitesini artırmanın en ekonomik yolunun, akımın bir kısmını yeni bir derin tünel drenaj ağına yönlendirmek olduğu belirlenmiştir. (Andoh vd., 2008)

3. SAYISAL MODELLEME

3.1. ANSYS FLUENT Yazılımı

ANSYS programı ilk defa 1971 yılında kullanılmıştır. ANSYS 100.000 satırdan fazla kod içeren ve genel amaçlı kullanımı olan kapsamlı bir yazılımdır. ANSYS ile statik, dinamik, ısı transferi, akışkanlar ve elektromanyetizma analizleri gerçekleştirilebilir. ANSYS 30 yılı aşkın süredir kullanılan bir programdır. ANSYS' in mevcut versiyonu çoğul pencereler içeren bir grafiksel kullanıcı ara yüzü, diyalog kutuları ve araç çubuğu ile tamamıyla yeni bir görünüme sahiptir. Günümüzde ANSYS' in uzay ve havacılık, otomotiv, elektronik ve nükleer dahil olmak üzere, birçok mühendislik alanında kullanıldığı bilinmektedir. ANSYS, çeşitli problemleri çözmek için kullanılabilir oldukça güçlü ve ilgi çeken bir analiz aracıdır. (Ayhan, 2015)

ANSYS FLUENT yazılımı, endüstriyel uygulamalar için akım, türbülans, ısı transferi ve reaksiyonları modellemek için gereken geniş, fiziksel modelleme yeteneklerini içerir. Bunlar, bir uçak kanadı üzerindeki hava akımından bir fırında yanmaya, kabarcık kolonlarından yağ platformlarına, kan akışından yarı iletken üretimine ve temiz oda tasarımından atık su arıtma tesislerine kadar değişir. Akıcı, silindir içi yanma, aero-akustik, turbo makine ve çok fazlı sistemleri modelleme yeteneklerine sahip özel modeller de dahil olmak üzere geniş bir yelpazeyi kapsar. Bu amaçla oluşturulmuş modeller, matematiksel dereceleri, çözüm yöntemleri ve katsayılar bulunmaktadır. Akım modellemesi zor ve yüksek teori bilgisi isteyen bir alandır. (Marsis, 2021)

ANSYS FLUENT yazılımı akım analizi yapan bir yazılımdır. ANSYS FLUENT akım analizi ile, farklı faz seviyelerinde analiz yapma yeteneği olan yazılım ile uçak kanadındaki hava akımından, endüstriyel fırınlardaki yanmaya kadar, kabarcık platformlarından yağ alanlarına kadar, kan akımından hava akışına kadar, türbülans modellemeden ısı transferine kadar, buzdolabı simülasyonundan fan analizine kadar birçok alanda başarılı olarak uygulanmış bir çözüm paketidir. (Marsis, 2021)

ANSYS FLUENT yazılımının önemli özellikleri aşağıdaki gibidir: (Marsis, 2021)

1. İki boyutlu (2D) düzlemsel, iki boyutlu (2D) eksenel simetrik, iki boyutlu (2D) döngülü eksenel simetrik ve üç boyutlu (3D) akımların modellenmesi ve simülasyonu,

2. Rejim açısından sabit ve geçici rejim,
3. Hız rejimleri (düşük subsonik, transonik, süpersonik ve hipersonik),
4. Türbülans modellemesi açısından laminer geçiş veya türbülanslı akım yeteneği,
5. Gaz – sıvı, gaz – katı ve sıvı – katı gibi akışkanlar mekaniği açısından serbest yüzey ve çok fazlı akış modelleri,
6. Farklı yanma modelleri,
7. Çeşitli malzeme modelleri veri tabanı,
8. Akıştan kaynaklanan gürültü öngörme modeli.

3.1.1. Çözüm Ağı Oluşturma

Çözüm ağı oluşturma ANSYS programının en önemli aşamalarındandır. Çözüm ağı, modelleri (alanları) boyutları belirlenmiş elementler ile çok küçük alanlara bölme işlemi olarak da tanımlanabilir. Geometride çözüm ağı oluşturulurken, geometrinin şekline ve işlevine göre element türleri belirlenir. (Ovalı & Esen, 2018)

Çözüm ağında hassasiyet arttıkça daha net sonuçlar ortaya çıkar. Bu duruma bağlı olarak çözümleme süresi de artar.

Çözüm ağında farklı element türleri vardır. Bunlar:

- Tek Boyutlu (1D) Elementler
- İki Boyutlu (2D) Elementler
- Üç Boyutlu (3D) Elementler

Çözüm ağında elementlerin en boy oranı kaliteyi doğrudan belirler. Özellikle birden fazla parçanın temas yüzeylerinde çözüm ağı uyumu bir kat daha artmaktadır. Uyumsuz bir ara yüzey gerçek olmayan yüksek gerilimlerin oluşmasına neden olur. Özellikle ara yüzeylerde düğüm noktalarının tam olarak çakışması ya da uyumlu olması ile gerilimlerin bir yüzeyden diğerine doğru olarak aktarılmasını sağlar. (Ovalı & Esen, 2018)

Çözüm ağında işlem basamakları;

- Genel çözüm ağı ayarları belirlenir.

- Bölgesel çözüm ağı yapıdır.
- Çözüm ağı oluşturulur ve ön izleme yapılır.

Çözüm ağı kalitesi değerlendirme kriterlerine göre değerlendirilir.

3.2. Sayısal Algoritma

İlk defa Issa tarafından 1986'da PISO (Pressure Implicit with Operators Splitting) algoritması şeklinde sunuldu. PISO, zaman adımının dış sorunlar tarafından kontrol edildiği ve zamansal doğruluğun önemli olduğu simülasyon türlerinde kullanışlıdır. Bu gibi durumlarda, doğrusal olmayan tutmalar üzerinde yavaş varyasyon varsayımı, momentum montajı ve çözüm maliyeti güvenli bir şekilde önlenebilir. (De Lorenzis & Düster, 2020)

Basınç ve hız düzeltmeleri arasındaki yaklaşık ilişkinin daha yüksek derecesine dayanan Operatörlerin Bölünmesi ile Basınç – Örtülü (PISO) algoritması, hız ve basıncı dolaylı olarak birleştirmek için uygulanmaktadır. Hesaplanan alan, yüksek uyarlanabilirliğe sahip karmaşık geometriye ve sınıra kendi kendini ayarlayan yapılandırılmamış ızgara tarafından ayrık kontrol hacimlerine bölünür. Serbest yüzeyin ayrıntılı konumu, FLUENT' teki genel yapılandırılmamış ağlar için doğru ve uygulanabilir olan geometrik yeniden yapılandırma şemasıyla belirlenir. Bu şema, iki akışkan arasındaki ara yüzün her hücre içinde doğrusal bir eğime sahip olduğunu varsayar ve daha sonra advectif akı hesaplaması için bu doğrusal şekli kullanır. Sonuç olarak, her hücrenin hacim oranı, önceki hesaplamaların advectif akı dengesine göre hesaplanabilir. Geo – Reconstruct formülasyonunu kullanan geçici VOF türbülans modelinin hesaplamaları için su ve hava arasındaki ara yüzdeki çözüm ağlarını iyileştirmek önemlidir. (Qi vd., 2018)

Zamana bağlı çözüm parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması, hesaplama için sağlamlık ve verimliliğin büyüklük garantisidir. VOF türbülans modelinin örtük şemasını kullanan geçici akışkan hacmi hesaplamaları için sabit zamanlı adım yöntemi seçilir. ANSYS FLUENT formülasyonu tamamen örtük olduğundan, zaman adımı boyutunun belirlenmesinde karşılanması gereken herhangi bir kararlılık kriteri mevcut değildir. Spesifik olmak gerekirse, hesaplamanın zaman adımı başına yalnızca birkaç yinelemeye ihtiyacı varsa, zaman adımı boyutu olmalıdır. (Qi vd., 2018)

3.3. Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid - VOF)

Akışkan Hacimleri Yöntemi, iki veya daha fazla karışmayan akışkan için tasarlanmıştır. Tabakalı, serbest yüzeyli veya yerçekimi akışları için uygun bir modeldir. Her faz için, hesaplama hücrelerinde fazın hacim oranı olarak bilinen bir değişken kullanılır. Her kontrol hacminde, tüm fazların hacim fraksiyonları 1'e eşittir. Tüm değişkenler ve özellikler için alanlar fazlar tarafından paylaşılır ve hacim ortalamalı değerleri temsil eder. Bu nedenle, belirli bir hücredeki değişkenler ve özellikler, hacim oranı değerlerine bağlı olarak ya fazlardan birini temsil eder ya da fazların bir karışımını temsil eder. Akış, akan sıvı ile üstündeki atmosferik hava arasında serbest bir yüzeyin varlığını içerir. Açık bir kanaldaki akış, yerçekimi ve atalet kuvvetleri tarafından yönetilir. Bu durumda, tek bir momentum denklemi seti, iki veya daha fazla karışmaz akışkan tarafından paylaşılır ve her bir hesaplama hücreindeki akışkanların her birinin hacim oranı, etki alanı boyunca izlenir.

İki veya üç fazın iç içe geçmediği gerçeğine dayanan akışkan hacmi modeli, etki alanı boyunca her bir akışkanın hacim fraksiyonunu izlemek için verimli ve ekonomik bir yol sağlar. Farklı akışkan bileşenleri tek bir momentum denklemleri seti ile çözüldüğünden, her bir hesaplama hücrelerinin serbest yüzeyini izlemek için birim fazın hacim kesri tanımlanır. Hava – su iki fazlı akış modeli için, her bir hesaplama hücrelerinde, hava ve suyun hacim kesirlerinin toplamı birdir. Spesifik olarak, su içermeyen hesaplama hücreleri sıfır değerine sahiptir. Dolu hücrelere 1 değeri atanır ve kısmen dolu hücrelere 0 ile 1 arasında bir değer verilir. Bu nedenle, havanın veya suyun hacim oranı sırasıyla α_a ve α_w olarak tanımlanır. α_a ve α_w arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilebilir: (Yongfei vd., 2018)

$$\alpha_a + \alpha_w = 1 \quad (1)$$

Değişkenler ve nitelikleri hava ve su tarafından paylaşılır ve hava ve suyun hacim oranı elde edilirse hacim ortalamalı değerleri temsil eder. Bu nedenle, herhangi bir kontrol hacminde, değişkenler ve özellikleri ya havayı ya da suyu ya da bunların bir karışımını temsil eder. Hava ve su arasındaki ara yüzün takibi, süreklilik denkleminin aşağıdaki formülle çözülmesiyle gerçekleştirilir:

$$\frac{\delta \alpha_w}{\delta t} + u_i \frac{\delta \alpha_w}{\delta x_i} = 0 \quad (2)$$

Burada α_w suyun hacim oranıdır ve u_i ve x_i sırasıyla hız bileşenleri ve koordinatlarıdır ($i = 1, 2, 3$)

Hacim oranı ortalamalı özellikler olan ve sabit olmayan yoğunluk ρ ve moleküler viskozite μ aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\rho = a_w \rho_w + (1 - a_w) \rho_a \quad (3)$$

$$\mu = a_w \mu_w + (1 - a_w) \mu_a \quad (4)$$

Burada ρ_w ve ρ_a , su ve havanın yoğunluğu ve μ_w ve μ_a , su ve havanın moleküler viskozitesidir. Suyun hacim fraksiyonunun yinelenen çözümüyle a_w , ρ ve μ hesaplanabilir. (Qi vd., 2018)

3.4. Türbülans Modeli

Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi ile sayısal yöntemler ve endüstriyel önemi olan karmaşık akışlara ilgi giderek daha fazla artmaktadır (Peng vd., 2018; Peng vd., 2011). Türbülanslı akışların modellenmesi için hem akademide hem de endüstride en yaygın olarak kullanılan yaklaşım, türbülans için ek taşıma denklemlerini çözen ve türbülansın etkisini taklit etmek için simülasyonlara türbülans girdap viskozitesini getiren Reynolds-ortalama Navier-Stokes (RANS) yöntemleridir. RANS modelleme çerçevesinde, $k - \epsilon$ ve $k - \omega$ olmak üzere iki farklı türbülans modeli kullanılmıştır. $k - \epsilon$ türbülans modelleri, daha iyi yakınsama ve daha düşük bellek nedeniyle tarihsel olarak akış simülasyonlarında kullanılmıştır (Galván vd., 2011; Morovati vd., 2016). Ters basınç gradyanlarına sahip sınır tabakaları ve akış ayrımı gibi $k - \omega$ türbülanslı modeller ile çeşitli bağlamlarda istenen sonuçlar elde edilebilir (Devolder vd., 2018; Fuhrman vd., 2010).

3.4.1. $k - \epsilon$ Türbülans Modeli

$k - \epsilon$ türbülans modeli, iki denklem modellerinden biridir. İki boyutlu ince kayma tabakalarında akım doğrultusundaki değişimler daima çok yavaştır. Böylece türbülans kendisini yerel şartlara göre yönlendirir. Türbülans özelliklerinin konveksiyon ve difüzyonu ihmal edilebilirse, türbülansın ana akım üzerindeki etkilerini karışım uzunluğu terimleri ile ifade etmek mümkündür. Ancak konveksiyon ve difüzyon ihmal edilemiyorsa, örneğin sirkülasyonlu akımlarda olduğu gibi, karışım uzunluğu için cebirsel olarak bunu tanımlamak artık yeterince geçerli olmamaktadır. Bu tip akım olaylarını karışım uzunluğu modeli tam

olarak çözümlenemez. Bunun için türbülans dinamiğini göz önüne alacak yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmuştur. $k - \varepsilon$ modeli türbülansın kinetik enerjisinin etkisini türbülans mekanizması üzerinde esas almaktadır. (Y. Yüksel, 2015)

k denklemi:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho k) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\rho k u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

ε denklemi:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \varepsilon) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \quad (8)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1+\beta\eta^3} \quad (9)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{G_k}{\rho C_{\mu\varepsilon}}} \quad (10)$$

burada ρ karşılık gelen yoğunluktur, μ dinamik viskozitedir, μ_t türbülans viskozitesidir, u_i i yönündeki hız bileşenidir, t zamandır, G_k ortalama hız gradyanının neden olduğu türbülans enerjisinin üretimidir ve C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, β ve η_0 ampirik sabitlerdir. RNG $k - \varepsilon$ modelinde ampirik sabitler $C_\mu = 0,0845$, $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0,7179$, $C_{1\varepsilon} = 1,42$, $C_{2\varepsilon} = 1,68$, $\beta = 0,012$ ve $\eta_0 = 4,38$ olarak verilmiştir. (Qi vd., 2018)

3.4.2. $k - \varepsilon$ Türbülans Modelinin Performansı

$k - \varepsilon$ türbülans modeli oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Model sabitlerin her hal için ayarlanmasının gerektirmediği ince kayma tabakalı ve sirkülasyon akımlarının hesaplanmasında oldukça başarılı bir biçimde kullanılmaktadır. Model özellikle Re kayma gerilmelerinin daha etkin olduğu sınırlanmış akışlar için iyi performans göstermektedir. Endüstrideki mühendislik uygulamaları için oldukça popüler bir modeldir. Örneğin batıklık etkisinin söz konusu olduğu atmosferde ve göllerde kirlilik dağılımının ve yangın modellerinde bu modelin çeşitli versiyonları mevcuttur. (Rodi, 1980)

Modelin avantajları:

- Modelin en önemli avantajı sabit katsayıların evrensel değerlere sahip olmasıdır.

Böylece model, birçok farklı akım şartları için kalibrasyona gerek duymadan kullanılabilir. (Olsen, 2002)

- Başlangıç ve/veya sınır şartlarının sağlandığı akımlarda en basit türbülans modelidir.
- Birçok endüstriyel akım probleminde başarıyla uygulanabilmektedir.
- Çok iyi irdelenmiş ve geniş bir geçerliliğe sahip türbülans modelidir (Y. Yüksel, 2015).

Modelin dezavantajları: (Y. Yüksel, 2015)

- Karışım uzunluğu modelinden daha zahmetlidir.
- Aşağıda belirtilen akım alanlarında daha zayıf bir yaklaşıma sahiptir;
 - (i) Bazı sınırlanmamış akımlarda
 - (ii) Eğrisel sınır tabakalı, girdap akımları gibi ilave zorlamaların bulunduğu akımlar
 - (iii) Çevrıntili akımlar
 - (iv) Dairesel olmayan akış yollarındaki tam gelişmiş akımlar

3.4.3. RNG k – ε Türbülans Modeli

k – ε türbülans modelinin altında ANSYS FLUENT üç farklı seçenek sunmaktadır.

Bunlar,

- Standart k – ε ,
- Realizable k – ε,
- RNG k – ε türbülans modelleridir.

Bu üç modelde de k ve ε' a ait taşınım denklemleri benzer formlara sahip olmakla birlikte modeller arasındaki başlıca farklar aşağıda ifade edilmiştir:

- Türbülans viskozitesinin hesaplanma metodu,
- k ve ε' a ait türbülans saçılımını yönlendiren türbülans Prandtl Sayısı,

- ϵ denklemindeki üretim ve tüketim terimleridir.

Modellere ait denklemler, kararlı, sıkışamaz ve kütleli kuvvetler söz konusu olmadığı haller için verilmiştir.

Standart $k - \epsilon$ türbülans modeli ile karşılaştırıldığında, RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli, türbülanslı viskoziteyi düzelterek ve ortalama akış rejiminde hem dönüşü hem de girdabı dikkate alarak yüksek gerinim oranlarına sahip akışları daha etkili bir şekilde işleyebilir ve eğilmeyi düzene sokabilir. (Zhang vd., 2018)

$k - \epsilon$ türbülans modelleri, ince yakınsama ve hesaplama verimliliği nedeniyle akış simülasyonlarına yaygın olarak uygulanmış olsa da, Yakhot ve Orzag tarafından önerilen RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli, türbülans viskozitesini düzelterek ek bir katsayı sağlayarak ve ortalama dönme hareketini hesaba katarak, yüksek Reynolds sayısı altında güçlü dönen akışı veya kavisli duvar jetini etkili bir şekilde işleyebilir. (Yang vd., 2021)

Çarpan jet, ayrılma akımları, girdap akımları ve ikincil akımlar gibi bir dereceye kadar karmaşık akımlarda etkilidir. İzotropik eddy viskozite kabulünden dolayı sınırlamalar mevcuttur. RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli, matematiksel (istatistiksel) bir teknik olan “renormalization group (RNG)” metodu kullanılarak anlık Navier-Stokes denklemlerinden üretilmiştir. Modellenmiş kinetik enerji ve harcanım miktarı denklemleri aşağıdaki gibidir; (Yüksel, 2007)

Kinetik enerji:

$$\rho u \frac{\delta k}{\delta x} = \mu_t S^2 + \frac{\delta}{\delta x} (\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\delta k}{\delta x}) - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\rho u \frac{\delta k}{\delta x} \quad : \text{Taşıma (convection)}$$

$$\mu_t S^2 \quad : \text{Üretim (generation)}$$

$$\frac{\delta}{\delta x} (\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\delta k}{\delta x}) \quad : \text{Yayıma (diffusion)}$$

$$\rho \epsilon \quad : \text{Tüketim (destruction)}$$

Üretim teriminde yer alan

$$S, S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \text{ ve } S_{ij}, S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right) \text{ şeklinde tanımlanmıştır.}$$

Harcanım miktarı

$$\rho u \frac{\delta \varepsilon}{\delta x} = C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k}\right) \mu_t S^2 + \frac{\delta}{\delta x} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\delta \varepsilon}{\delta x}\right) - C_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k}\right) - R \quad (12)$$

$\rho u \frac{\delta \varepsilon}{\delta x}$: Taşınım (convection)

$C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k}\right) \mu_t S^2$: Üretim (generation)

$\frac{\delta}{\delta x} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\delta \varepsilon}{\delta x}\right)$: Yayılma (diffusion)

$C_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k}\right)$: Tüketim (destruction)

R: Türbülans nicelikleri ve ortalama gerilme ile ilgili ek terim

Türbülans viskozitesi (μ_t) aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

Aşağıdaki akım durumlarının çözümünü geliştirmiştir: (Yüksel, 2007)

- Yüksek akım çizgisi eğrilikleri ve gerilme oranı
- Geçiş akımları
- Duvar ısı ve kütle transferi

3.5. Sonlu Hacimler Metodu

Mühendislikte herhangi bir fiziksel sistemin matematiksel modellenmesi sonucu elde edilen karmaşık ve tam olarak çözümlenmeyen denklemlerin yaklaşık çözümünde kullanılan sayısal yöntemler, son yıllarda bilgisayar alanındaki hızlı gelişmeye paralel olarak artmıştır. (Y. Yüksel, 2015)

Sayısal analiz alanındaki gelişmeler teorik ve deneysel çalışmalara da kolaylık getirerek bilimsel çalışmaların daha kısa zamanda daha ayrıntılı sonuçlar üretmesine sebep olmuştur. Sayısal analizde hesap yönteminin algoritmasını oluşturmak program yazmada büyük kolaylık sağlamıştır. Algoritmanın buradaki görevi, hesap yönteminde sonuca ulaşmak için izlenmesi ve yapılması gereken işlemlerin adım adım sıralanarak ortaya konulmasıdır. Sayısal analizde sayılarla işlem yapılır ve herhangi bir sayısal hesaplamada çok sayıda aritmetik işlem gerçekleşir. (Y. Yüksel, 2015)

Akışkanlarla ilgili mühendislik problemlerinin problemlerinin çözümü ile ilgili sayısal algoritmaların oluşturulması ‘Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği’ adlı bir bilim dalını ortaya çıkarmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, akışkanlarla ilgili mühendislik problemlerinin çözümleri ile ilgili farklı sayısal algoritmaların gelişmesinin, ortaya çıkmasının önünü açmıştır. (Y. Yüksel, 2015)

Mühendislik problemlerinin çözümünde üç farklı sayısal çözüm tekniği mevcuttur. Bunlar:

- Sonlu Elemanlar
- Sonlu Farklar
- Spektral metottur.

Sonlu hacimler metodu özel bir sonlu farklar formülasyonudur. Sonlu hacimler metodu, CFX/ANSYS, FLUENT, PHOENICS ve STAR – CD gibi ticari programlarla kullanılan ortak metottur. Bu programlarda kullanılan sonlu hacimler metodunda aşağıdaki sayısal algoritmadan faydalanılır. (Y. Yüksel, 2015)

1. Akışkan hareketini tanımlayan temel denklemlerin, çözüm alanında tanımlanan sonlu kontrol hacimler üzerine yapılan integrasyon,
2. İntegral denklemlerin bir sistem halinde cebirsel denklemlere dönüştürülmesi,
3. Deneme yanılma yöntemi ile cebirsel denklemlerin çözümü.

Genel denklemler:

$$\frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (14)$$

Bu denklemin sol tarafında değişik taşınım aşamaları olan değişim oranı ve konveksiyon terimlerini, sağ tarafında ise difüzyon (Γ difüzyon katsayısı) ve kütleli kuvvetleri (S_ϕ) gösterir.

Üç boyutlu bir akım için ϕ nin hız bileşenleri u , v , w olarak alınarak uygun bir difüzyon katsayısı ve kütleli kuvvetlerle birlikte bir kontrol hacim üzerine integrali alınarak genel hareket denklemlerinin özel formu olan aşağıdaki integral denklem elde edilir.

$$\int_{KH} \frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t} dV + \int_{KH} \text{div}(\rho\phi u) dV = \int_{KH} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{KH} S_\phi dV \quad (15)$$

4. BULGULAR

4.1. Model Doğrulama

Bu tez çalışmasında oluşturulan model; teğetsel giriş tüneli, kıvrımlı oda, eğim bölümü, düşey shaft, dağıtım kuyusu ve çıkış tüneline oluşmaktadır. Giriş tüneli, 0,68 m'lik uzunluktadır. Kesit boyutu 0,2 m genişliğinde 0,24 m'den yüksekliğinden, 0,176 m genişliğinden 0,33 m yüksekliğine değişmiştir. Kıvrımlı haznenin çapı 0,352 m, düşey kesitteki daralma bölgesinden sarmal haznenin tepesine kadar olan yükseklik 0,72 m'dir. Düşey shaftın çapı ve derinliği sırasıyla 0,216 m ve 1,82 m'dir. Dağıtım kuyusunun derinliği 0,28 m ve düşey kesitteki daralma bölgesinin yüksekliği 0,24 m'dir. Çıkış tüneli, sırasıyla 0,2 m genişlik, 0,24 m yükseklik ve 6,1 m uzunluktadır.

Zhang vd. (2018)' nin yaptıkları çalışmada havalandırma delikleri olmadan oluşturulmuş deney düzeneği Şekil 4.1' de gösterilmiştir.

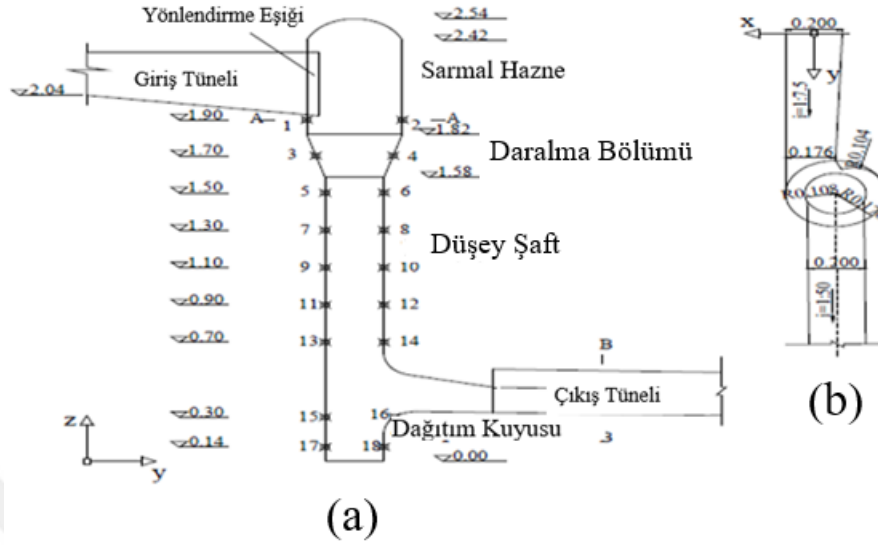


(a)

(b)

Şekil 4.1. Havalandırma delikleri olmadan oluşturulmuş deney sistemi; (a) Sarmal bölge ve düşey shaftın görünümü, (b) Çıkış tünelinin görünümü (Zhang vd., 2018)

Zhang vd. (2018)' nin yaptıkları çalışmada kullanmış oldukları düşü yapısı profili şekil 4.2' deki gibidir.



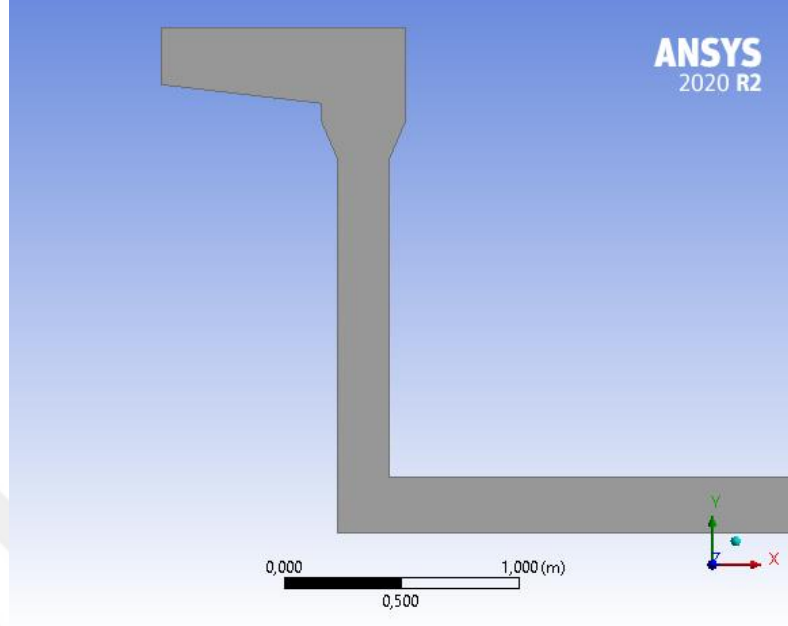
Şekil 4.2. Düşü yapısı profili; (a) Yandan görünüş, (b) Üst kesit (Zhang vd., 2018)

Bu tez çalışmasında ANSYS FLUENT' te iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) modellemeler yapılmıştır. Tablo 4.1' de oluşturulan modeller ve bu modellerde kullanılmış olan çözüm ağları verilmiştir.

Tablo 4.1. ANSYS FLUENT' te oluşturulan modellerde kullanılan çözüm ağları

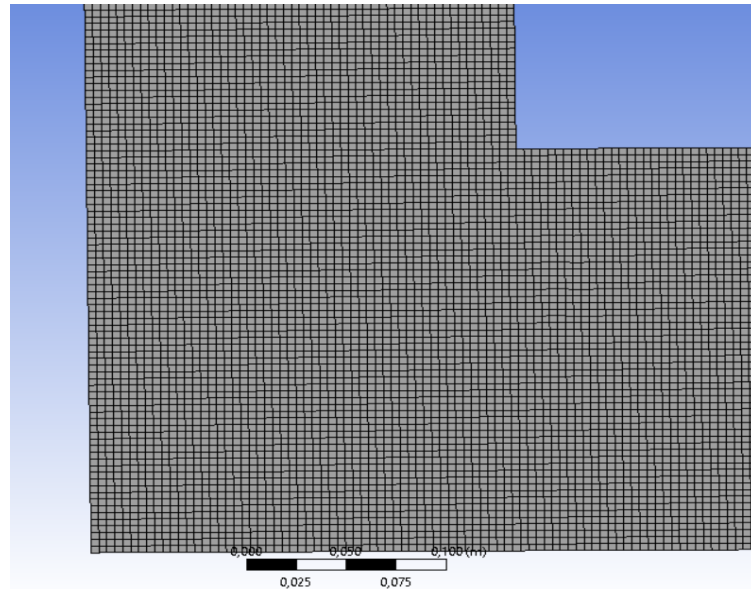
| Model | Çözüm Ağı |
|------------------|-----------|
| İki Boyutlu (2D) | 136.594 |
| Üç Boyutlu (3D1) | 257.889 |
| Üç Boyutlu (3D2) | 376.889 |

Bu tez çalışmasında ANSYS FLUENT' te oluşturulan iki boyutlu (2D) model şekil 4.3'de gösterilmiştir.

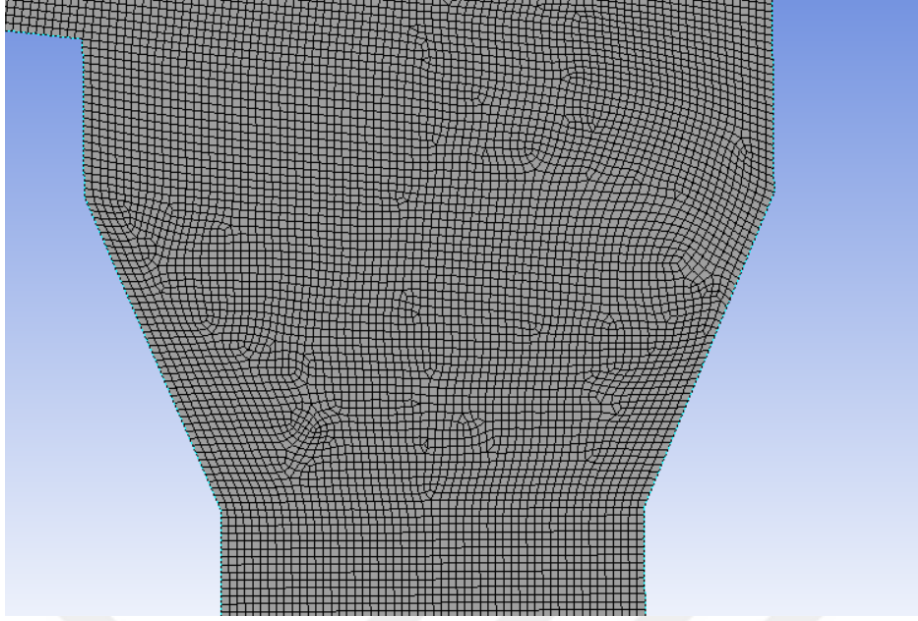


Şekil 4.3. ANSYS FLUENT' te oluşturulan iki boyutlu (2D) model

Bu tez çalışmasında iki boyutlu (2D) modellemeye oluşturulan yüzeysel çözüm ağı Şekil 4.4 ve Şekil 4.5' de gösterilmiştir.

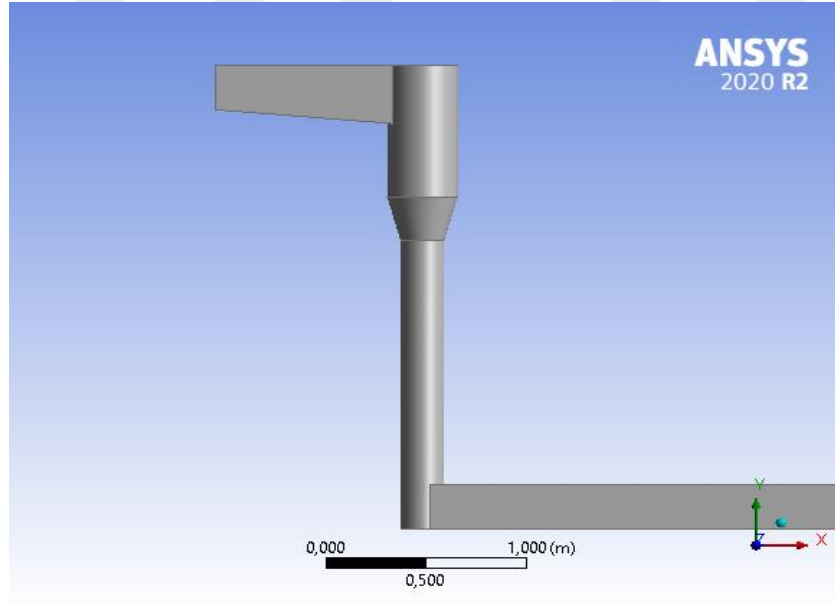


Şekil 4.4. İki boyutlu (2D) modelde oluşturulan çıkış tüneli bölgesindeki yüzeysel çözüm ağı



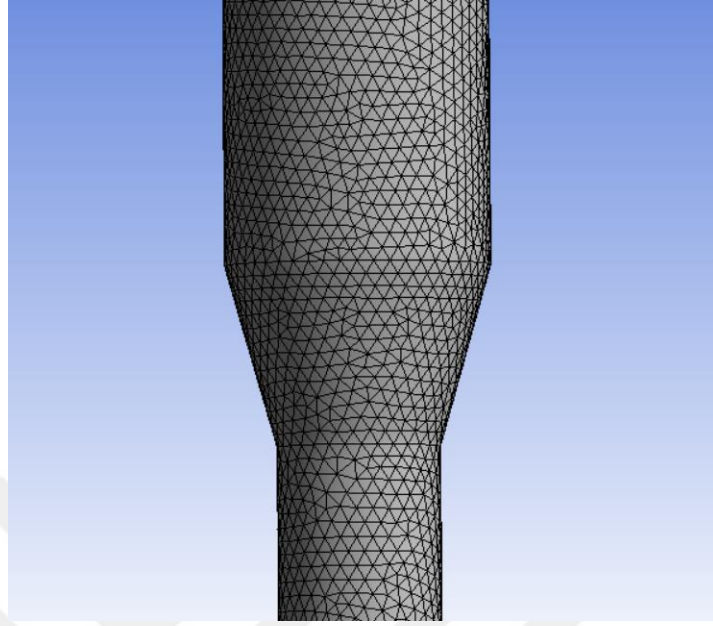
Şekil 4.5. İki boyutlu (2D) modelde oluşturulan sarmal bölgedeki yüzeysel çözüm ağı

Bu tez çalışmasında ANSYS FLUENT' te oluşturulan üç boyutlu (3D) model Şekil 4.6'da gösterilmiştir

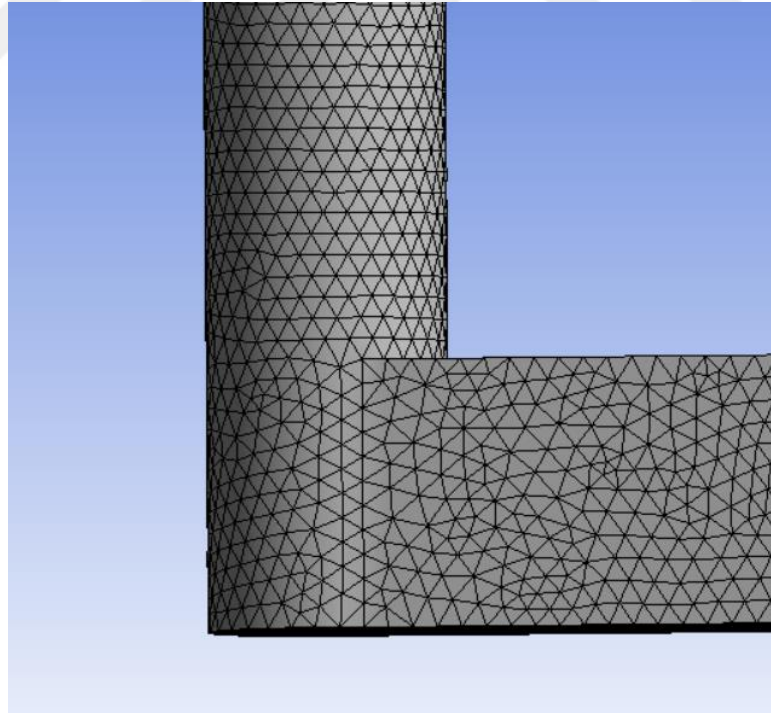


Şekil 4.6. ANSYS FLUENT' te oluşturulan üç boyutlu (3D) model

Bu tez çalışmasında üç boyutlu (3D1) modellemede oluşturulan hücresel çözüm ağı Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de gösterilmiştir.

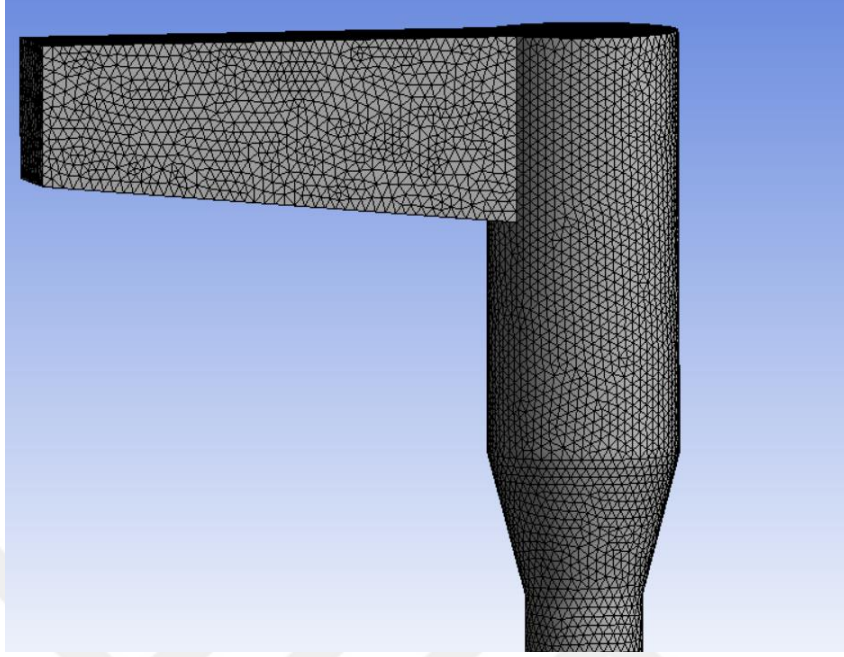


Şekil 4.7. Üç boyutlu (3D1) modellemede sarmal bölgedeki hücresel çözüm ağı

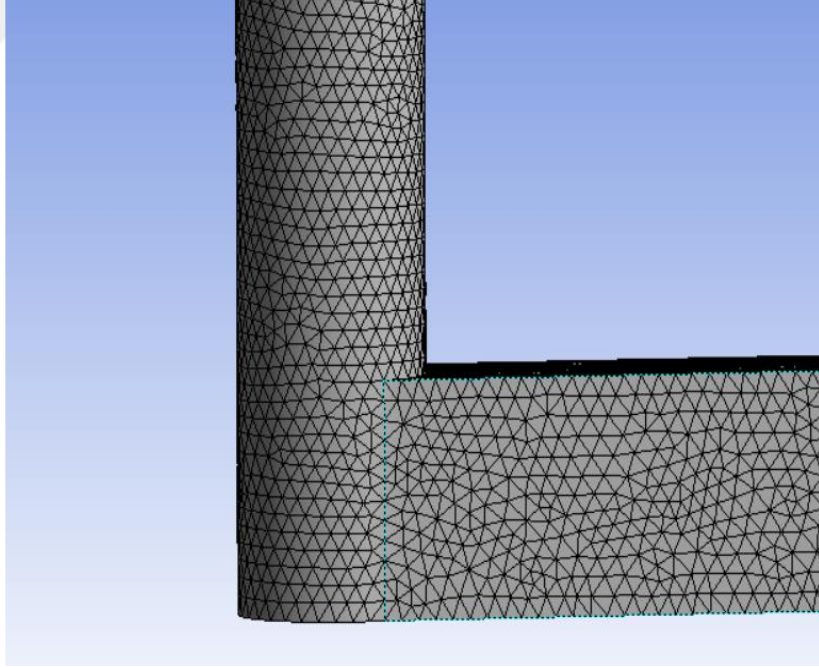


Şekil 4.8. Üç boyutlu (3D1) modellemede çıkış tüneli bölgesindeki hücresel çözüm ağı

Bu tez çalışmasında üç boyutlu (3D2) modellemede oluşturulan hücresel çözüm ağı Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Üç boyutlu (3D2) modellemede giriş tüneli ve sarmal bölgede çözüm ağı



Şekil 4.10. Üç boyutlu (3D2) modellemede çıkış tüneli bölgesindeki çözüm ağı

Sınır şartları Şekil 4.11’ de verildiği gibi girilmiştir. Akım girişi için Giriş (Inlet) sınır şartı, akım çıkışı için Çıkış (Outlet) sınır şartı ve katı cidarlar için Cidar (Wall) sınır şartı tanımlanmıştır.



Şekil 4.11. Sınır Şartları

Yapılan bu sayısal çalışmada kararlı akım çözümü gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı olarak iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D1 ve 3D2) modellemelerde yapılan iterasyonlara ait yakınsama grafikleri Ekler Bölümü’ nde verilmiştir. Girilen iterasyon sayılarına bağlı olarak yapılan analizlerin süreleri Tablo 4.2’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Farklı çözüm ağları ve hız koşulları için yapılan iterasyon sayıları ve analiz süreleri

| Boyut | Hız (m/s) | İterasyon Sayısı | Analiz Süresi (saat) |
|------------------|-------------|------------------|----------------------|
| İki Boyutlu (2D) | 2,50 (BTÇ1) | 100.000 | 12 |
| İki Boyutlu (2D) | 2,56 (BTÇ2) | 100.000 | 12 |
| İki Boyutlu (2D) | 2,68 (BTÇ3) | 61.500 | 8 |
| İki Boyutlu (2D) | 2,86 (BTÇ4) | 100.000 | 12 |
| İki Boyutlu (2D) | 3,45 (BTÇ5) | 100.000 | 12 |
| İki Boyutlu (2D) | 3,49 (BTÇ6) | 123.500 | 15 |
| Üç Boyutlu (3D1) | 2,56 (BTÇ2) | 60.000 | 12 |
| Üç Boyutlu (3D1) | 2,86 (BTÇ4) | 101.000 | 24 |
| Üç Boyutlu (3D1) | 3,49 (BTÇ6) | 101.000 | 24 |
| Üç Boyutlu (3D2) | 2,86 (BTÇ4) | 101.000 | 36 |

4.2. Sınır Koşulları

Zhang vd. (2018) nin yapmış oldukları çalışmada damla şaftı içindeki enerji dağılımı ve kavitasyon özelliklerini ortaya çıkarmak için, %5, %2 ve %0,1 taşkın frekanslarında test yapmışlardır. Yapmış oldukları deneysel uygulamalar ve sayısal modellemede kullandıkları hız parametrelerini de bu yüzdelerle göre kullanmışlardır.

Bu tez çalışmasında Zhang vd. (2018) nin deneysel ve simülasyon hızları WD1, WS1, WD2, WS2, WD3, WS3 olarak; bu çalışmada girilen hız değerleri de BTÇ (Bu Tez Çalışması) olarak adlandırılmıştır. Zhang vd. (2018) nin yapmış oldukları çalışmada deneysel ve sayısal modellemelerde kullanmış oldukları hız değerleri ve bu çalışmadaki girilen değerler Tablo 4-3' de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Zhang vd. (2018)'nin deney ve sayısal modellemede kullanmış oldukları hız değerleri

| Kullanım | Kısaltma 1 | Kısaltma 2 | Hız (m/s) |
|-----------|------------|------------|-----------|
| Deney 1 | WD1 | BTÇ1 | 2,50 |
| Sayısal 1 | WS1 | BTÇ2 | 2,56 |
| Deney 2 | WD2 | BTÇ3 | 2,68 |
| Sayısal 2 | WS2 | BTÇ4 | 2,86 |
| Deney 3 | WD3 | BTÇ5 | 3,45 |
| Sayısal 3 | WS3 | BTÇ6 | 3,49 |

WD: Zhang Deney, WS: Zhang Sayısal, BTÇ: Bu Tez Çalışması

Zhang vd. (2018)' nin yapmış oldukları çalışmaların analizlerinde VOF türbülans model ve RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli seçmişlerdir. Liu vd. (2018), yaptıkları çalışmada hem standart hem de RNG $k - \epsilon$ türbülans modellerinin girdap düşü yapısı dolusavağının taşma hareketini iyi bir şekilde benzeşebileceğini ve düşey şafttaki dönen akış boşluğunun su akış durumunu yeniden oluşturduğunu bulmuşlardır. Ancak, RNG $k - \epsilon$ türbülans modelinin, basınç ve akış hızını standart $k - \epsilon$ modeline göre daha iyi belirlediğini bildirmişlerdir.

Bu tez çalışmasında oluşturulan modellerde 2,50 m/s, 2,56m/s, 2,68 m/s, 2,86 m/s, 3,45 m/s ve 3,49 m/s hız değerleri girilmiştir. ANSYS FLUENT programında “Boundary Conditions” kısmından “Velocity Inlet” sekmesinden hız değerleri girilmiştir. Ayrıca bu

kısımda “Phase” sekmesinden “Water” seçilerek karışımdaki su oranı “Volume Fraction” kısmına 0,95 (%95) olarak girilmiştir. Hava oranı 0,05 (%5) olarak otomatik atanmıştır. Çıkış sınırı: basınç çıkışı olarak belirlendi ve tüm değişkenlerin normal gradyanı 0' a eşittir. Duvar sınırı için akışın duvara yakın bölgeleri, standart duvar fonksiyonu yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Hava-su akış için yaygın olarak kullanılan VOF türbülans modeli ve RNG k – ε türbülans modeli seçildi. Sayısal algoritma olarak PISO algoritması seçilmiştir.

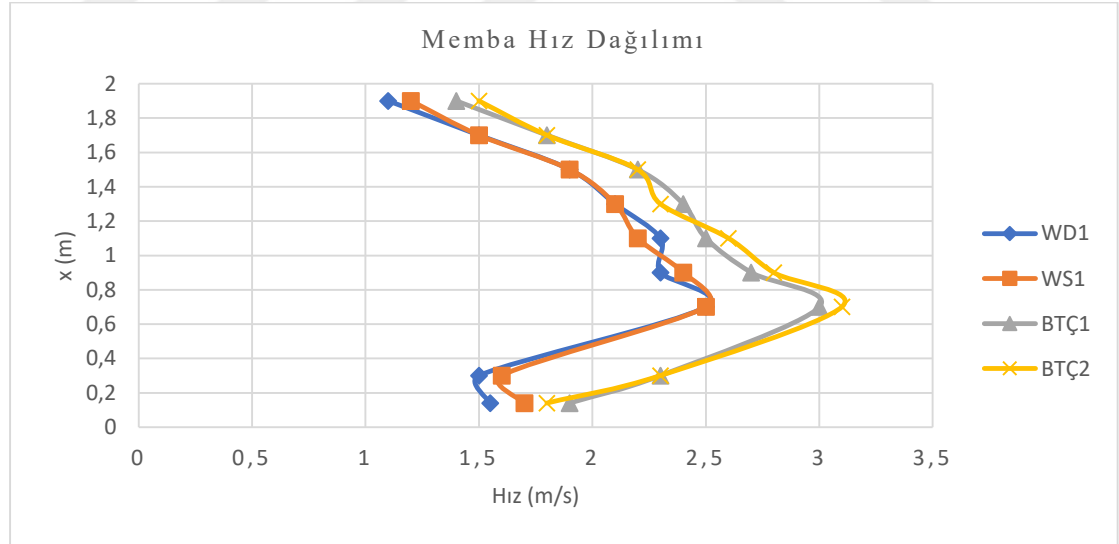
1,9 m’den 0,14 m ye kadar olan düşü yüksekliklerine ait hız değerlerinin tabloları oluşturuldu. Bu değerlere ait grafikleri hazırlandı. Hız değerleri arasındaki hesaplamalar matematiksel olarak yapıldı. Hesaplama aşağıdaki formül kullanıldı:

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1} * 100$$

U_1 = Zhang vd. (2018)’ nin deneysel hız değeri

U_2 = Bu tez çalışmasında alınan hız değeri

Şekil 4.12’ de BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) hızları için Zhang vd. (2018)’ nin çalışmaları ve bu tez çalışmasında elde edilmiş olan hız değerleri memba hız dağılımında verilmiştir



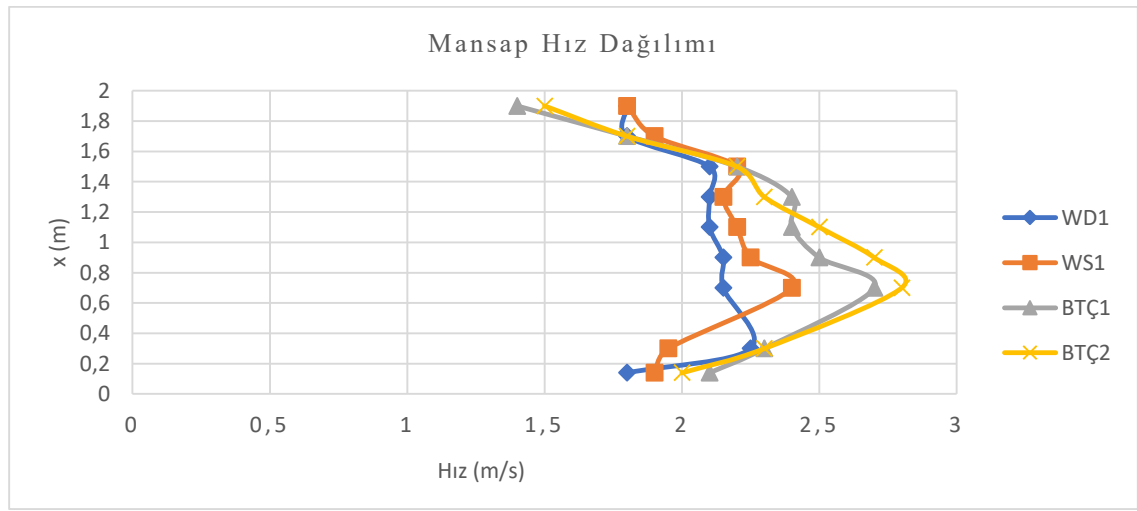
Şekil 4.12. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) hızları için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.12’ e göre en yüksek hız değerlerine 0,7 m de ulaşılmıştır. En düşük hız değerinin 1,9 m de olduğu görülmüştür. Şekil 4.12’ deki verilere göre Tablo 4.4 oluşturulmuştur.

Tablo 4.4. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Membra)

| WD1 – WS1 arasındaki fark (%) | WD1 – BTÇ1 arasındaki fark (%) | WD1 – BTÇ2 arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2,09 | 20,60 | 21,79 |

Şekil 4.13’ de BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) için Zhang vd. (2018)’ nin çalışmaları ve bu tez çalışmasında elde edilmiş olan hız değerleri mansap hız dağılımında verilmiştir.



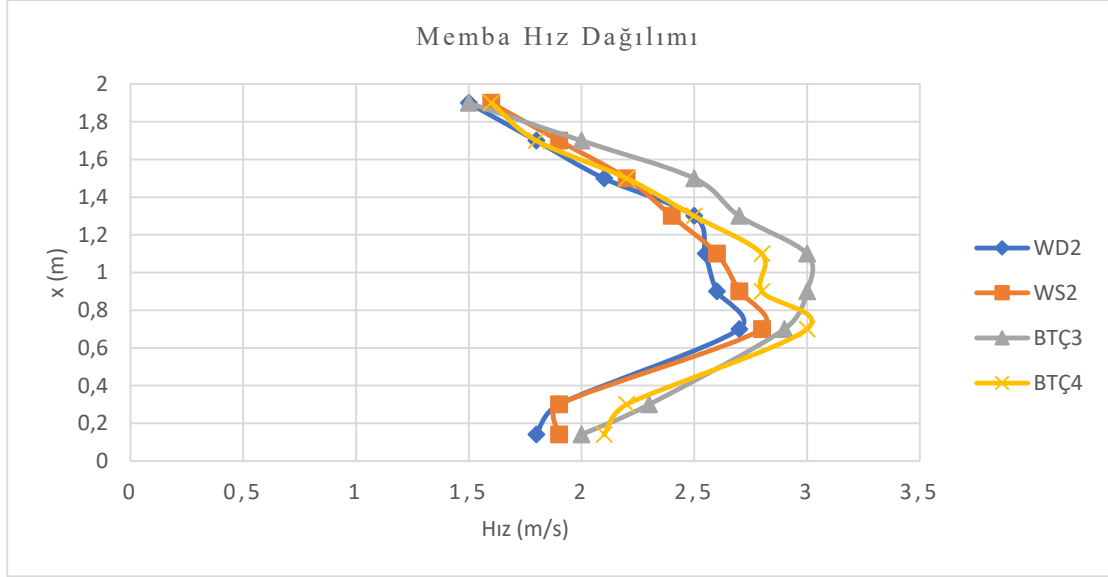
Şekil 4.13. Şekil 4.13. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.13’ ye göre WS1, BTÇ1 ve BTÇ2 en yüksek hız değerlerine 0,7 m de ulaşılmıştır. WD1 en yüksek hız değerine 0,3 m de ulaşmıştır. 1,9 m ve 0,14 m de en düşük değerler görülmüştür. Şekil 4.13’ deki verilere göre Tablo 4.5 oluşturulmuştur.

Tablo 4.5. BTÇ1 (2,50 m/s) ve BTÇ2 (2,56 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)

| WD1 – WS1 arasındaki fark (%) | WD1 – BTÇ1 arasındaki fark (%) | WD1 – BTÇ2 arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2,74 | 8,49 | 10,14 |

Şekil 4.14’ de BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için Zhang vd. (2018)’ nin çalışmaları ve bu tez çalışmasında elde edilmiş olan hız değerleri memba hız dağılımında verilmiştir.



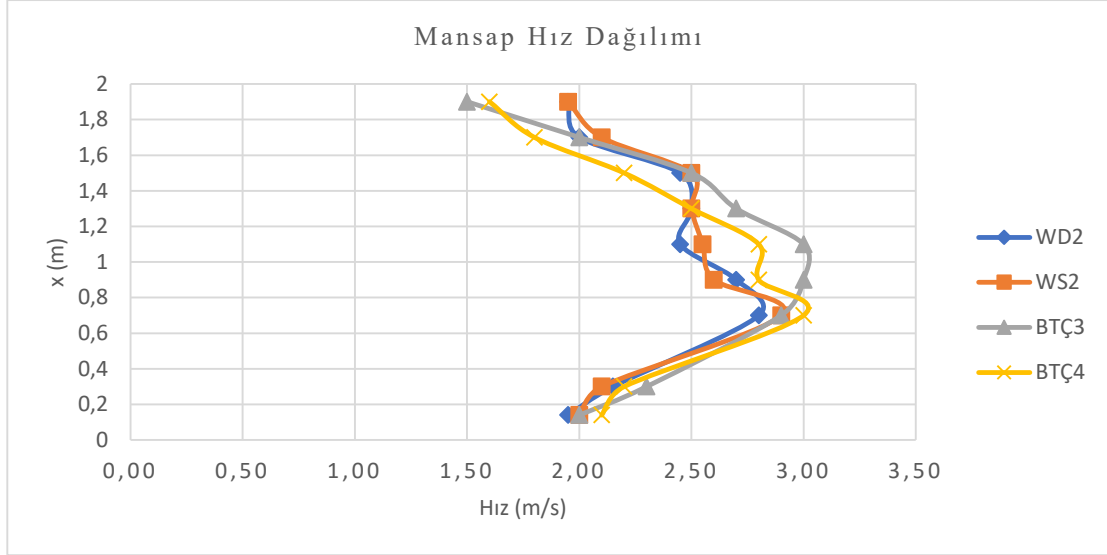
Şekil 4.14. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.14’ e göre BTÇ3 en yüksek değerleri 1,1 m ve 0,9 m lerde görülmüştür. WD2, WS2 ve BTÇ4 en yüksek hız değerini 0,7 m de görmüştür. En düşük hız değeri bütün değerler için 1,9 m de görülmüştür. Şekil 4.14’ deki verilere göre Tablo 4.4 oluşturulmuştur.

Tablo 4.6. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Membra)

| WD2 – WS2 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ3 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ4 arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2,83 | 12,60 | 7,97 |

Şekil 4.15’ de BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için Zhang vd. (2018)’ nin çalışmaları ve bu tez çalışmasında elde edilmiş olan hız değerleri mansap hız dağılımında verilmiştir.



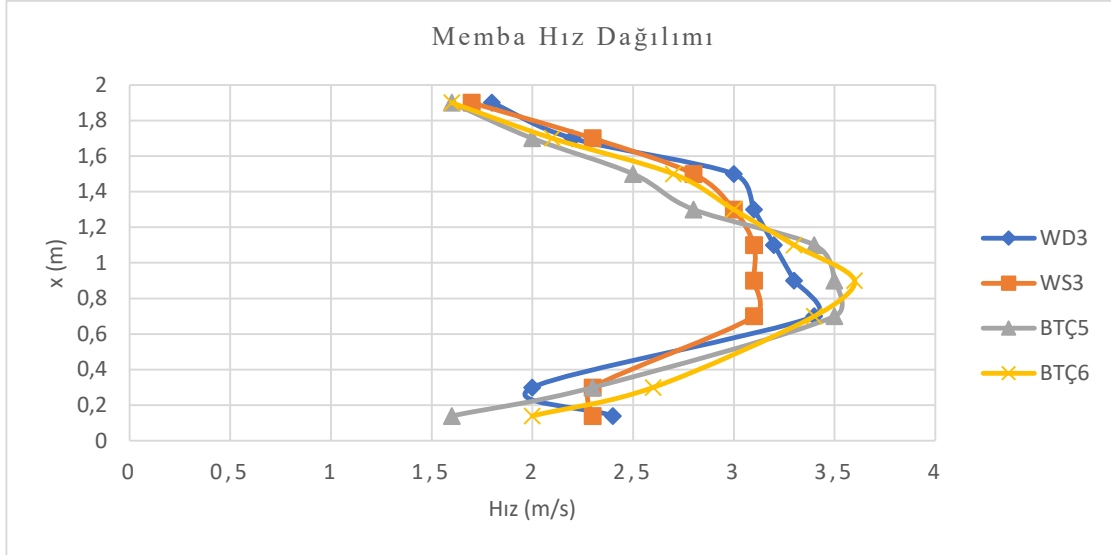
Şekil 4.15. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.15’e göre BTÇ3 en yüksek değerleri 1,1 m ve 0,9 m’ lerde görülmüştür. WD2, WS2 ve BTÇ4 en yüksek hız değerini 0,7 m’ de görmüştür. En düşük hız değeri BTÇ3 ve BTÇ4’ te 1,9 m’ de görülmüştür. WD2 ve WS2’ de en düşük değer 0,14 m’ de görülmüştür. Şekil 4.15’deki verilere göre Tablo 4.7 oluşturulmuştur.

Tablo 4.7. BTÇ3 (2,68 m/s) ve BTÇ4 (2,86 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)

| WD2 – WS2 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ3 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ4 arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1,19 | 4,53 | 0,24 |

Şekil 4.16’ de BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için Zhang vd. (2018)’ nin çalışmaları ve bu tez çalışmasında elde edilmiş olan hız değerleri memba hız dağılımında verilmiştir.



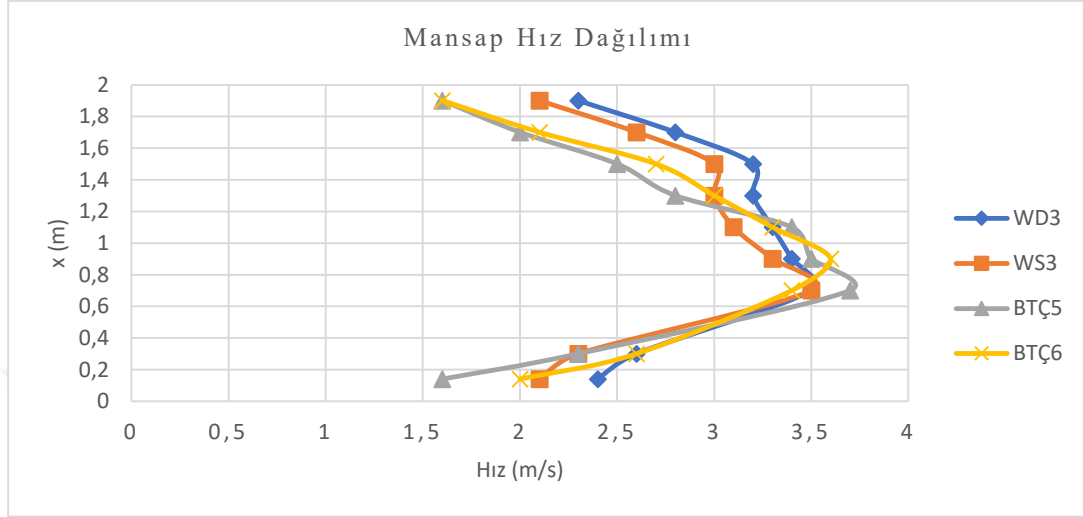
Şekil 4.16. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.16’ya göre BTÇ6 en yüksek hız değerine 0,9 m’ de ulaşmıştır. WD3, BTÇ5 en yüksek hız değerini 0,7 m’ de görmüştür. WS3 1,1 m ve 0,7 m aralığında en yüksek hız değerini görmüştür. En düşük hız değeri 1,9 m de görülmüştür. Şekil 4.16’ deki verilere göre Tablo 4.8 oluşturulmuştur.

Tablo 4.8. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba)

| WD3 – WS3 arasındaki fark (%) | WD3 – BTÇ5 arasındaki fark (%) | WD3 – BTÇ6 arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2,87 | 4,92 | 0,41 |

Şekil 4.17’ de BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) hızları için Zhang vd. (2018)’ nin çalışmaları ve bu tez çalışmasında elde edilmiş olan hız değerleri mansap hız dağılımında verilmiştir.



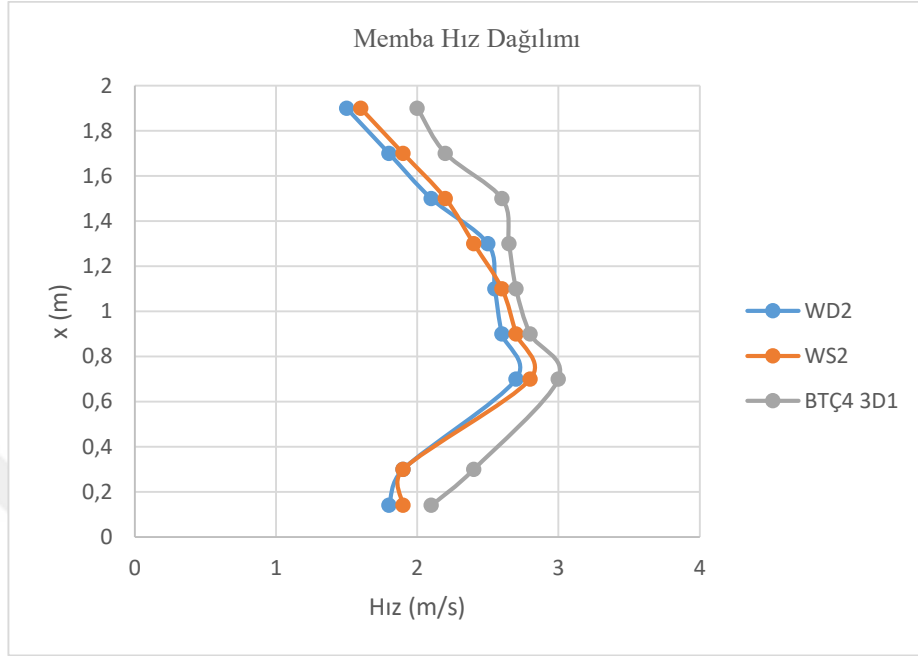
Şekil 4.17. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.17’ye göre WD3, WS3, BTÇ5 en yüksek hız değerine 0,7 m de ulaşmıştır. BTÇ5 en yüksek hız değerini 0,9 m de görmüştür. En düşük hız değeri 1,9 m de görülmüştür. Şekil 4.17’ deki verilere göre Tablo 4.9 oluşturulmuştur.

Tablo 4.9. BTÇ5 (3,45 m/s) ve BTÇ6 (3,49 m/s) için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)

| WD3 – WS3 arasındaki fark (%) | WD3 – BTÇ5 arasındaki fark (%) | WD3 – BTÇ6 arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 6,37 | 12,36 | 8,99 |

Şekil 4.18’ de BTÇ4 (2,86 m/s) hızının üç boyutlu (3D1) modelde elde edilmiş olan değerleri memba hız dağılımında verilmiştir.



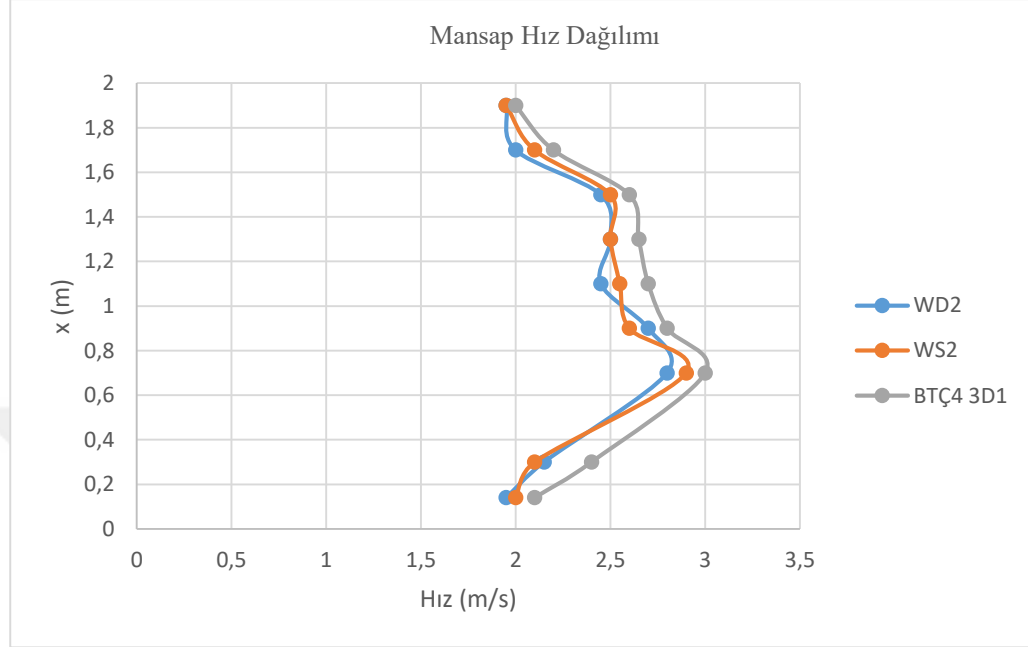
Şekil 4.18. BTÇ4 (2,86 m/s) ‘ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.18’de en yüksek hız değeri 0,7 m de görülmüştür. En düşük hız değeri ise 1,9 m de görülmüştür. Şekil 4.18’deki verilere göre Tablo 4.10 oluşturulmuştur.

Tablo 4.10. BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba)

| WD2 – WS2 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ4 (3D1) arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 2,82 | 15,42 |

Şekil 4.19’ de BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D1) modelde elde edilmiş olan değerleri mansap hız dağılımında verilmiştir.



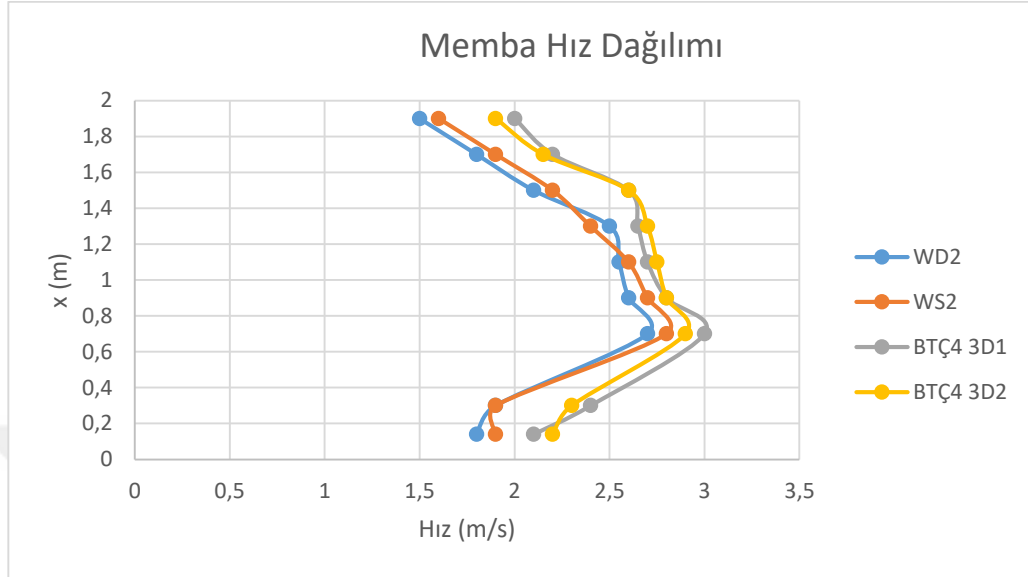
Şekil 4.19. BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/U_0)

Şekil 4.19’a göre en yüksek hız değeri 0,7 m de görülmüştür. En düşük hız değeri ise 1,9 m de görülmüştür. Şekil 4.19’daki verilere göre Tablo 4.11 elde edilmiştir.

Tablo 4.11. BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D1) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)

| WD2 – WS2 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ4 (3D1) arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1,19 | 7,16 |

Şekil 4.20’ da BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) modelde elde edilmiş olan değerleri memba hız dağılımında verilmiştir.



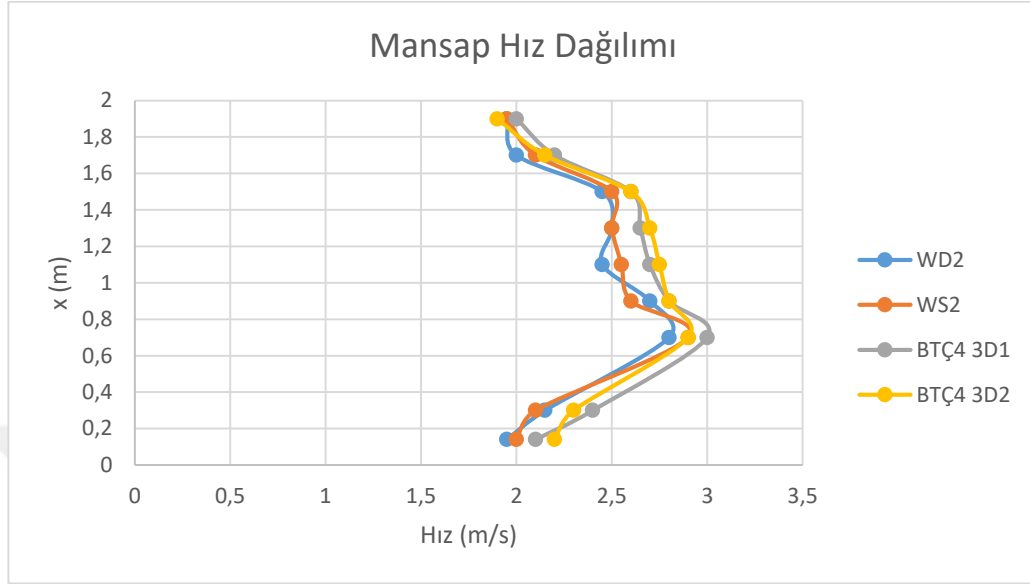
Şekil 4.20. BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan Memba Hız Dağılımı (u/ U_0)

Şekil 4.20’ de BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) modelde elde edilmiş olan değerleri memba hız dağılımında BTÇ4 3D2 olarak gösterilmiştir. En yüksek hız değeri 0,7 m de, en düşük hız değeri 1,9 m de görülmüştür. BTÇ4 3D1 modelinde elde edilmiş olan değerlerle birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.20’ deki verilere göre Tablo 4.12 elde edilmiştir.

Tablo 4.12. BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Memba)

| WD2 – WS2 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ4 (3D2) arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 2,83 | 14,65 |

Şekil 4.21’ de BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) modelde elde edilmiş olan değerleri mansap hız dağılımında verilmiştir.



Şekil 4.21. BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan Mansap Hız Dağılımı (u/ U_0)

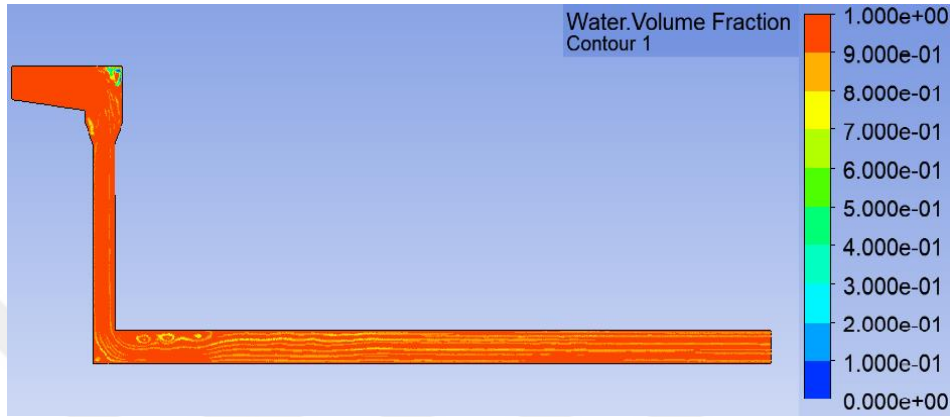
Şekil 4.21’ de BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) modelde elde edilmiş olan değerleri mansap hız dağılımında BTÇ4 3D2 olarak gösterilmiştir. BTÇ4 3D1’ de elde edilmiş olan değerlerle birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.21’ deki verilere göre Tablo 4.13 elde edilmiştir.

Tablo 4.13. BTÇ4 (2,86 m/s)’ün üç boyutlu (3D2) model durumu için oluşturulan sonuçlar arasındaki fark değerleri (Mansap)

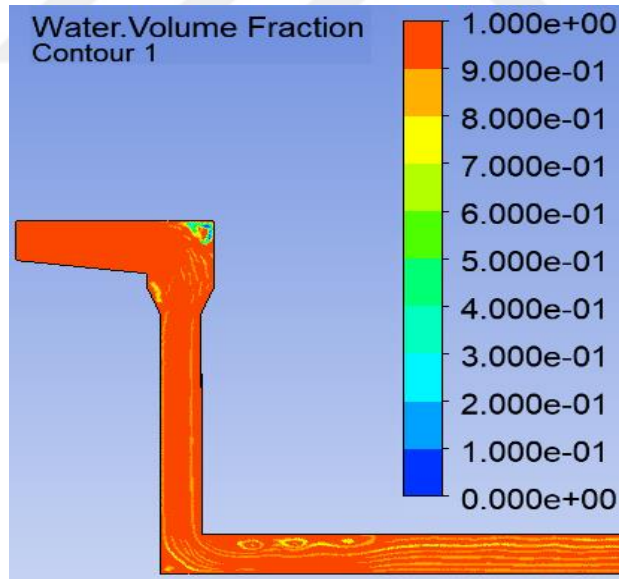
| WD2 – WS2 arasındaki fark (%) | WD2 – BTÇ4 (3D2) arasındaki fark (%) |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1,19 | 6,44 |

4.3. Su – Hava Dağılımı

Akım alanındaki su – hava karışımının dağılımını BTÇ6 (3,49 m/s) için Şekil 4.22 ve 4.23’ de verilmiştir.



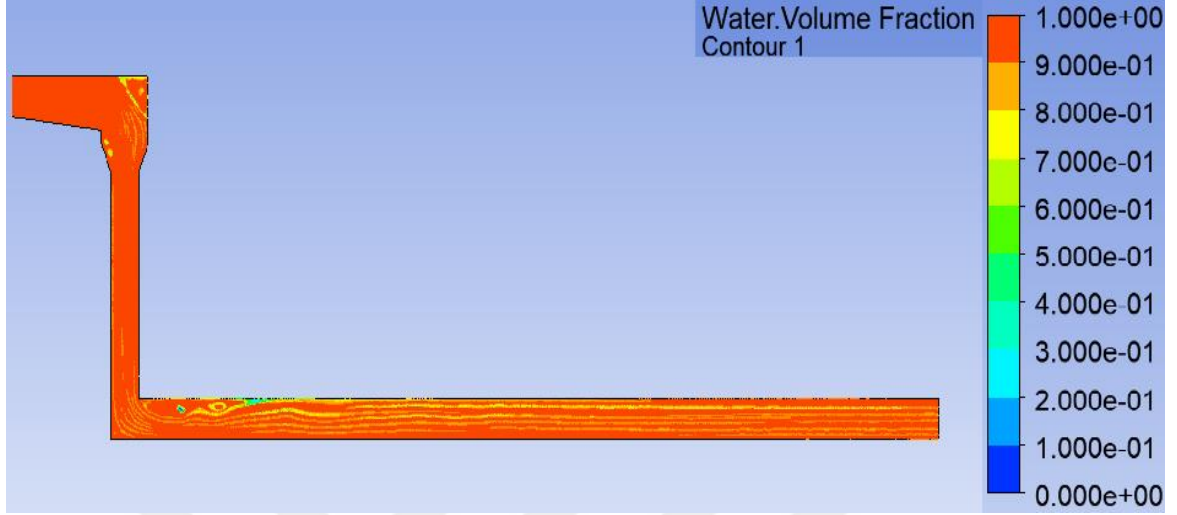
Şekil 4.22. BTÇ6 (3,49 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm



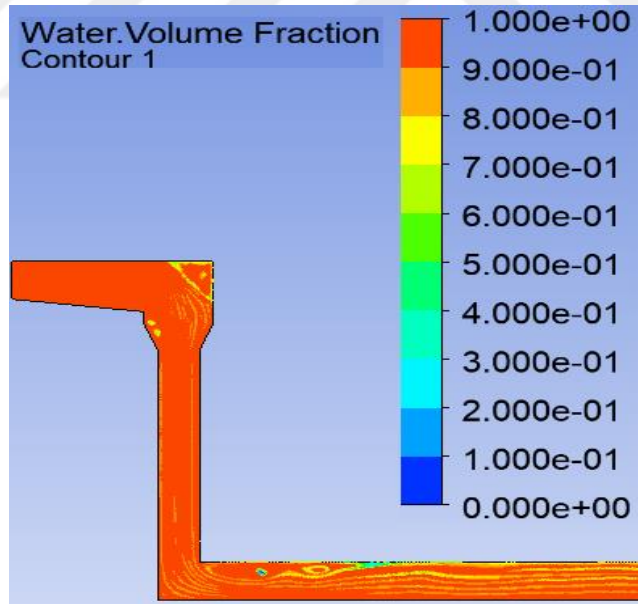
Şekil 4.23. BTÇ6 (3,49 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

Şekil 4.23’ de giriş tüneli su ile kaplanmıştır. Sarmal haznenin üst kısmında az miktarda hava olduğu görülmüştür. Düşey kesitteki daralma bölgesi ve düşey şaft bölgelerinin genel olarak su ile kaplanmıştır. Bu bölümlerde hava çok az görülmüştür. Çıkış tüneline de genel olarak su görülmüştür, ancak diğer bölgelere göre hava biraz artmıştır.

Akım alanındaki su – hava karışımının dağılımı BTÇ5 (3,45 m/s) için Şekil 4.24 ve 4.25’ de verilmiştir.



Şekil 4.24. BTÇ5 (3,45 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm

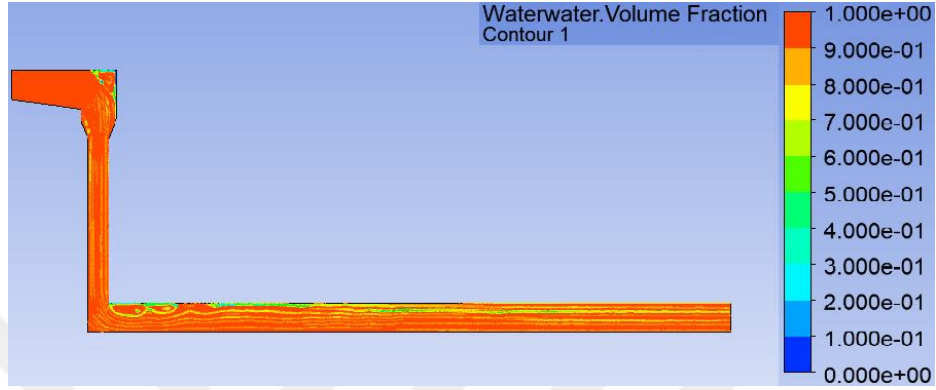


Şekil 4.25. BTÇ5 (3,45 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

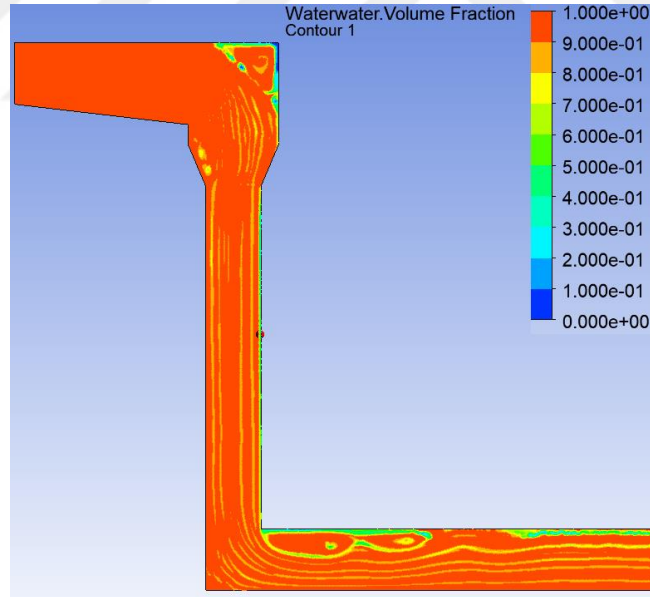
Şekil 4.25’ de giriş tüneli su ile kaplanmıştır. Sarmal haznenin üst kısmında hava miktarı azalmıştır. Düşey kesitteki daralma bölgesi ve düşey şaft bölgelerinin genel olarak su ile kaplanmıştır. Bu bölümlerde hava çok az görülmüştür. Çıkış tüneline başlangıcında

genel olarak su görülmüştür, ancak çıkış tünelinin geri kalan kısmında hava artmaya başlamıştır.

Akım alanındaki su – hava karışımının dağılımı BTÇ4 (2,86 m/s) için Şekil 4.26 ve 4.27’ de verilmiştir.



Şekil 4.26. BTÇ4 (2,86 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm

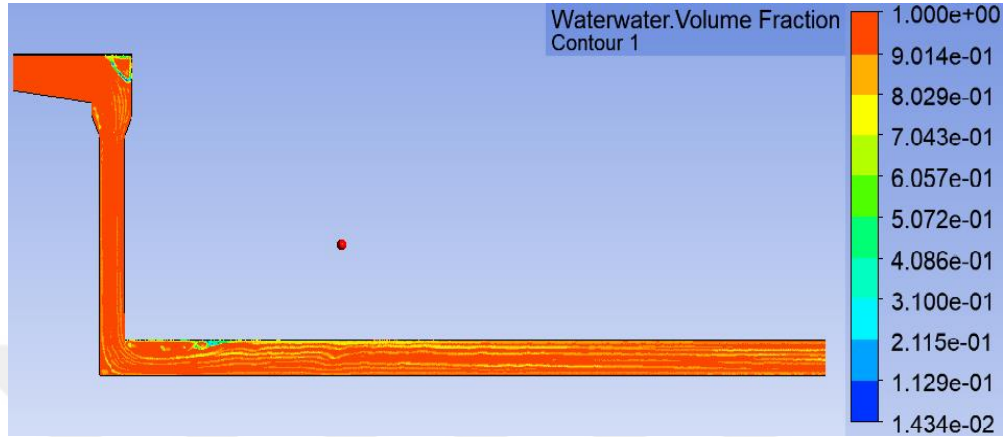


Şekil 4.27. BTÇ4 (2,86 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

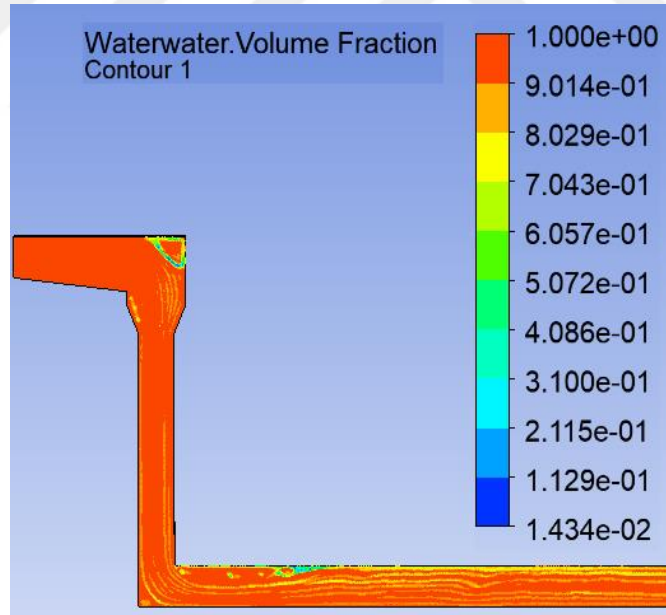
Şekil 4.27’ de giriş tüneli su ile kaplanmıştır. Sarmal haznenin üst kısmında az miktarda hava görülmüştür. Düşey şaftın büyük bir kısmının su ile kaplı olduğu görülmüştür. Düşey şaftta cidar kısmında az miktarda hava olduğu görülmüştür. Çıkış tüneli genel olarak su ile kaplı olduğu görülmüştür. Ancak çıkış tünelinin üst bölgesinde havanın

olduğu görülmüştür.

Akım alanındaki su – hava karışımının dağılımı BTÇ3 (2,68 m/s) için Şekil 4.28 ve 4.29’ de verilmiştir.



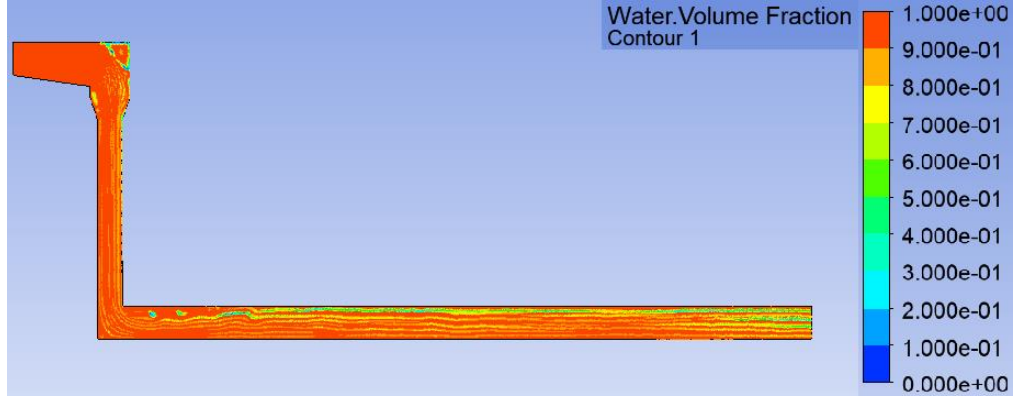
Şekil 4.28. BTÇ3 (2,68 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm



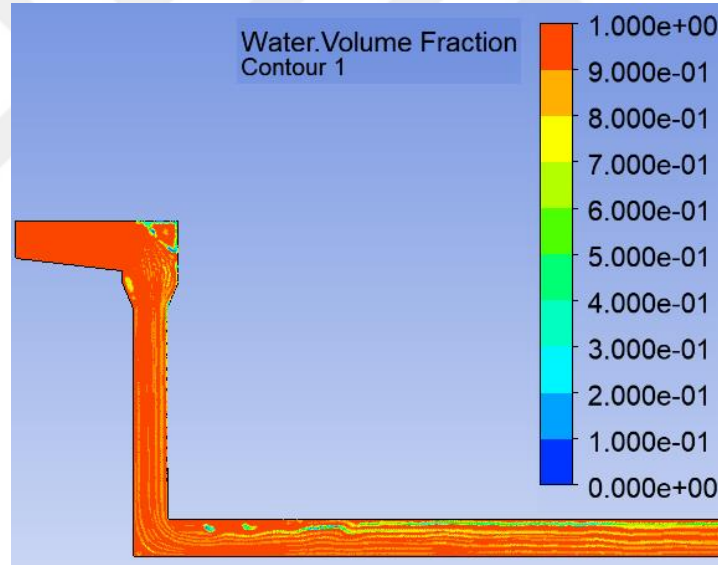
Şekil 4.29. BTÇ3 (2,68 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlştırılmış görünüm

Şekil 4.29’ da giriş tüneli su ile kaplanmıştır. Sarmal haznenin üst kısmında az miktarda hava görülmüştür. Düşey şatın su ile kaplandığı görülmüştür. Çıkış tünelinin genel olarak su ile kaplanmıştır, ancak bazı kısımlarında hava görülmüştür.

Akım alanındaki su – hava karışımının dağılımı BTÇ2 (2,56 m/s) için Şekil 4.30 ve 4.31’ da verilmiştir.



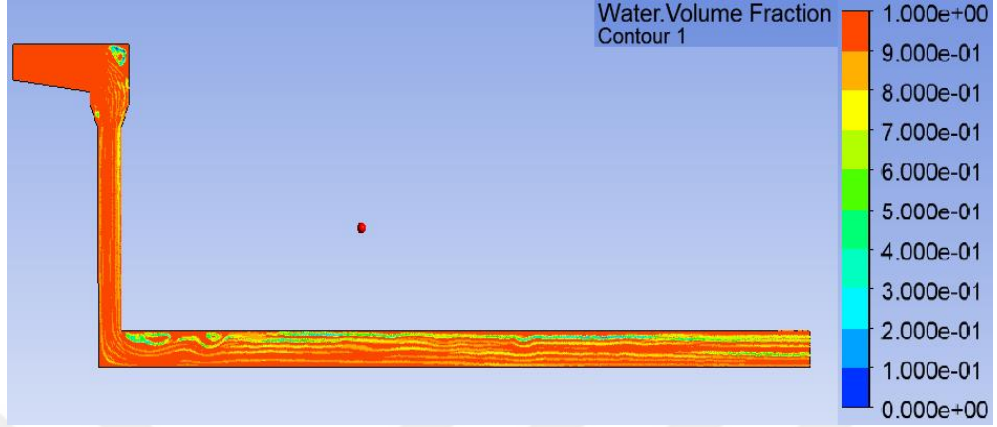
Şekil 4.30. BTÇ2 (2,56 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm



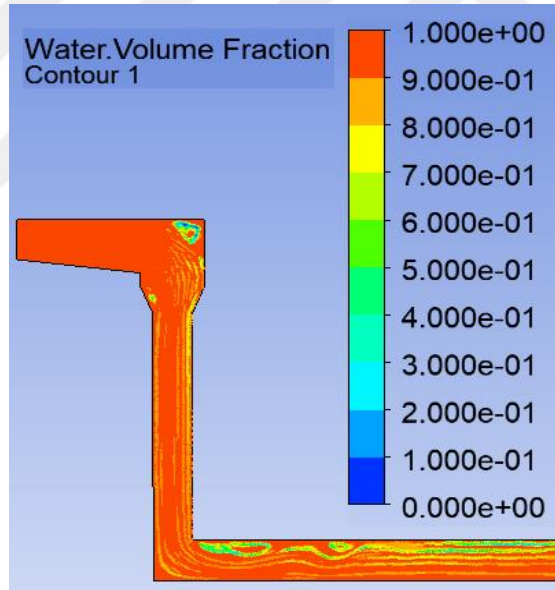
Şekil 4.31. BTÇ2 (2,56 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

Şekil 4.31’ de giriş tüneli su ile kaplanmıştır. Sarmal haznenin üst kısmında az miktarda hava görülmüştür. Düşey şaftta genel olarak su görülmüştür. Düşey şaftta çok az miktarda hava görülmüştür. Çıkış tüneline genel olarak su görülmüştür, ancak tünelin sonuna doğru hava artmıştır.

Akım alanındaki su – hava karışımının dağılımı BTÇ1 (2,50 m/s) için Şekil 4.32 ve 4.33’ de verilmiştir.



Şekil 4.32. BTÇ1 (2,50 m/s) için su – hava karışım dağılımı genel görünüm

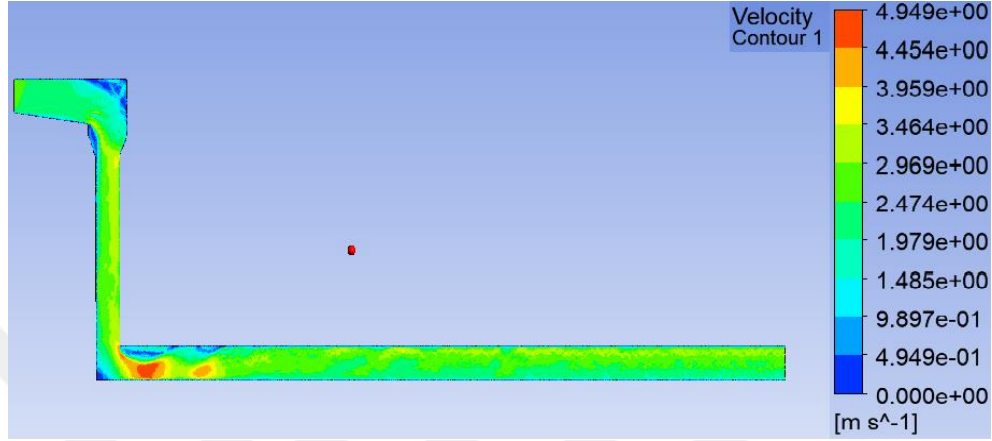


Şekil 4.33. BTÇ1 (2,50 m/s) için su – hava karışım dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

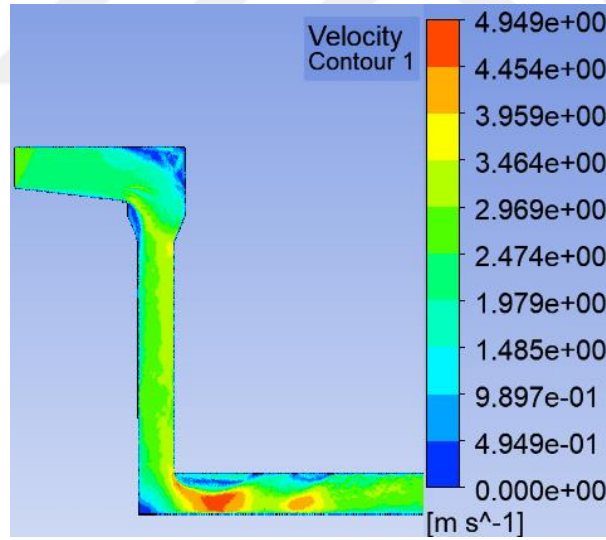
Şekil 4.33’ de giriş tüneli su ile kaplanmıştır. Sarmal haznenin üst bölgesinde hava görülmüştür. Düşey şaftta genel olarak su görülmüştür. Çıkış tüneline genel olarak su görülmüştür, tünel boyunca çıkışa doğru hava görülmüştür.

4.4. Hız Dağılımı

Akım alanındaki hız dağılımı BTÇ1 (2,50 m/s) için Şekil 4.34 ve 4.35' de verilmiştir.



Şekil 4.34. BTÇ1 (2,50 m/s) için hız dağılımı genel görünüm

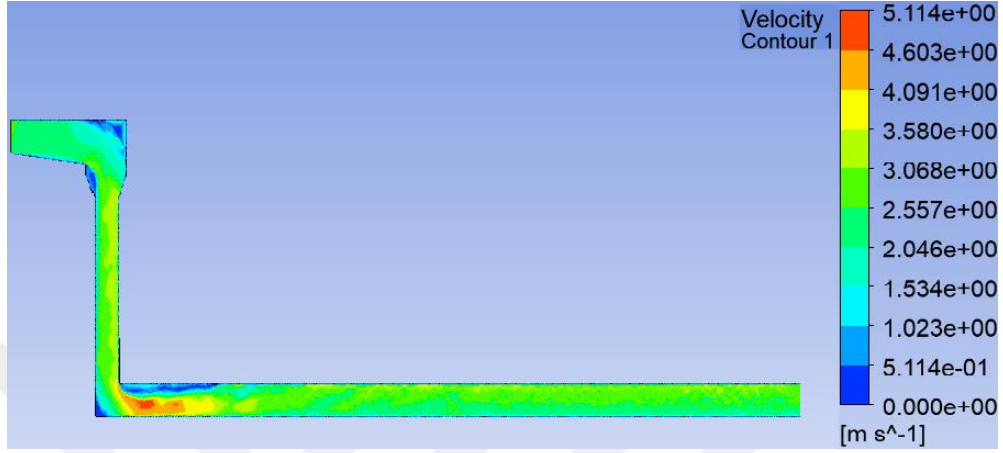


Şekil 4.35. BTÇ1 (2,50 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

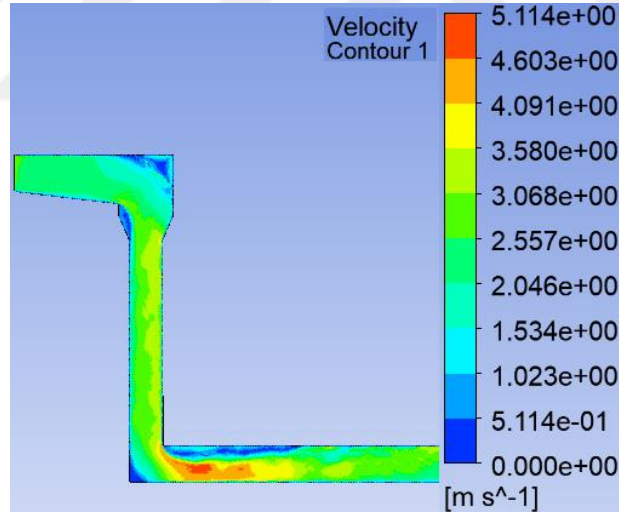
Şekil 4.35' de giriş tüneline hız değerleri 1,979 m/s ile 2,969 m/s arasında olduğu görülmüştür. Sarmal bölgenin üst kısmında ölü bölge alanının daha yüksek olduğu görülmüştür. Düşey shafttaki hızın giriş tüneline hız değeriyle benzediği görülmüştür. Düşey shaftın alt kısmında ölü bölge alanının daha yüksek olduğu görülmüştür. Çıkış

tünelinin başlangıcında hızın 3,959 m/s fazla olduğu görülmüştür. Çıkış tünelinin devamında hızın azaldığı görülmüştür.

Akım alanındaki hız dağılımı BTÇ2 (2,56 m/s) için Şekil 4.36 ve 4.37' de verilmiştir.



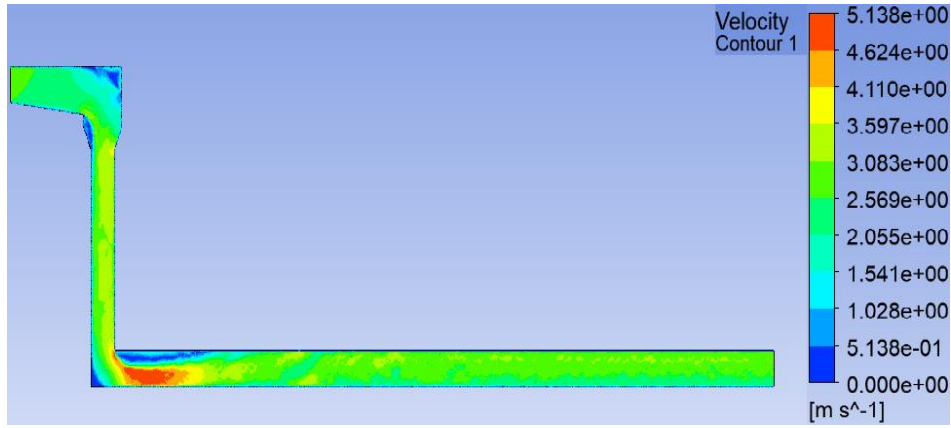
Şekil 4.36. BTÇ2 (2,56 m/s) için hız dağılımı genel görünüm



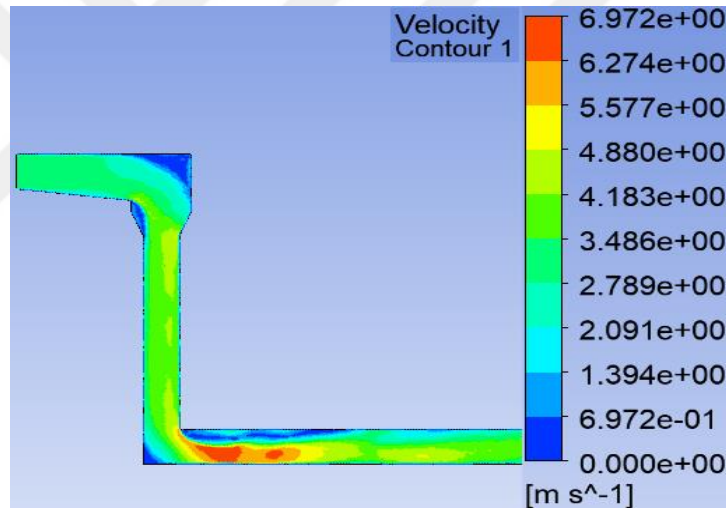
Şekil 4.37. BTÇ2 (2,56 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

Şekil 4.37' de çıkış tünelinin başlangıcındaki hız değerinin biraz daha azaldığı görülmüştür. Sarmal haznenin üst kısmı, düşey shaft tabanı ve çıkış tünelinin başlangıcının üst kısmında ölü bölge alanının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Akım alanındaki hız dağılımı BTÇ3 (2,68 m/s) için Şekil 4.38 ve 4.39' de verilmiştir.



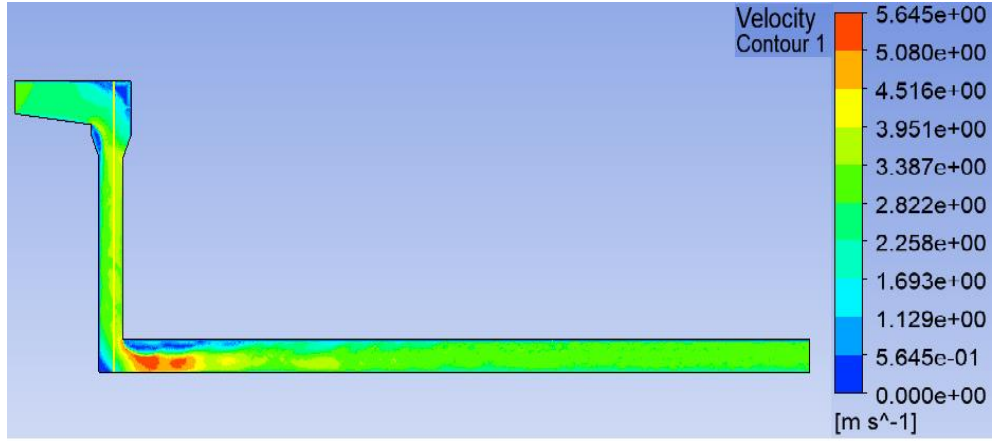
Şekil 4.38. BTÇ3 (2,68 m/s) için hız dağılımı genel görünüm



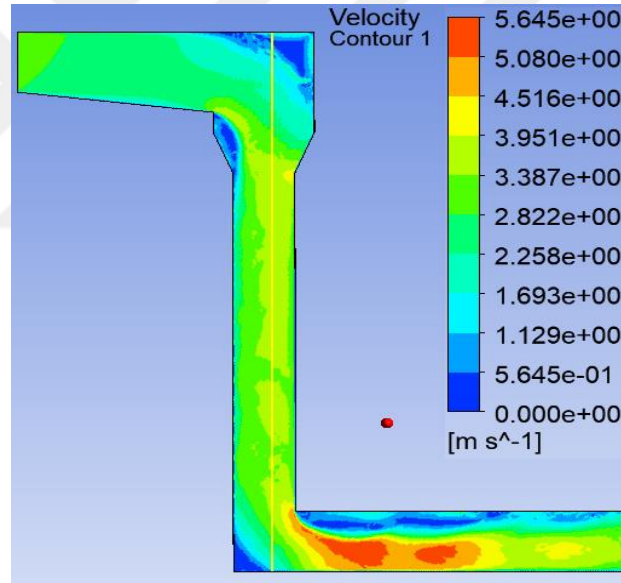
Şekil 4.39. BTÇ3 (2,68 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

Şekil 4.39' da düşey şaftta hız değeri artış eğilimi göstermiştir. Çıkış tünelinin başlangıcında hız 4,624 m/s nin üzerine çıktığı görülmüştür. Sarmal haznenin üst kısmı, düşey şaft tabanı ve çıkış tünelinin başlangıcının üst kısmında ölü bölge alanının daha yüksek olduğu olduğu görülmüştür.

Akım alanındaki hız dağılımı BTÇ4 (2,86 m/s) için Şekil 4.40 ve 4.41’ da verilmiştir.



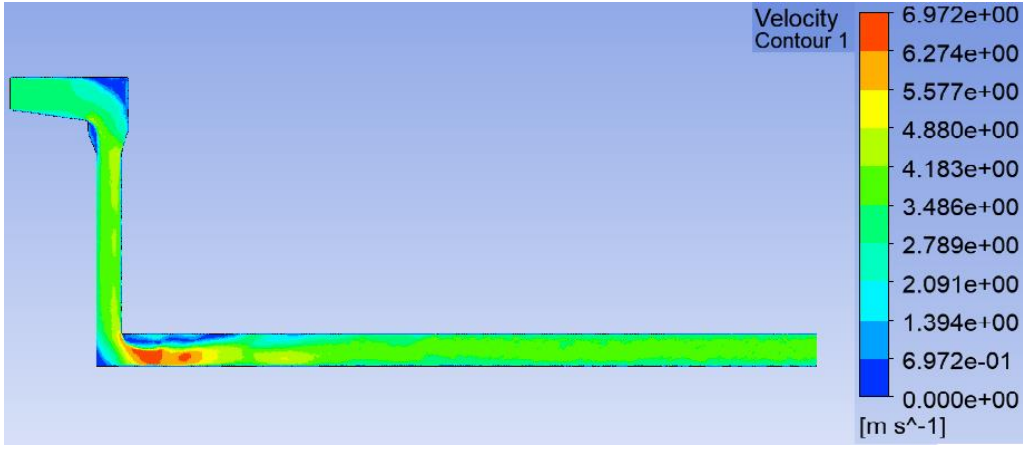
Şekil 4.40. BTÇ4 (2,86 m/s) için hız dağılımı genel görünüm



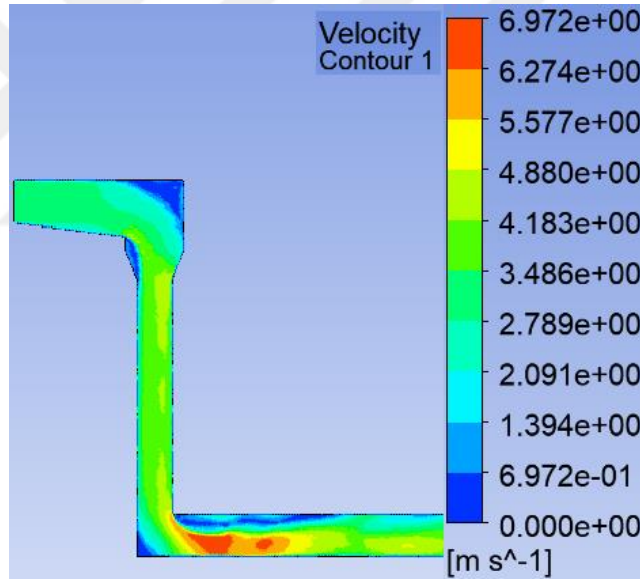
Şekil 4.41. BTÇ4 (2,86 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

Şekil 4.41’ da düşey şaftta hız değeri artış eğilimi göstermiştir. Çıkış tüneline başlangıcında hız 4,624 m/s nin üzerine çıktığı görülmüştür. Sarmal haznenin üst kısmı, düşey şaft tabanı ve çıkış tüneline başlangıcının üst kısmında ölü bölge alanının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Akım alanındaki hız dağılımı BTÇ5 (3,45 m/s) için Şekil 4.42 ve 4.43' de verilmiştir.



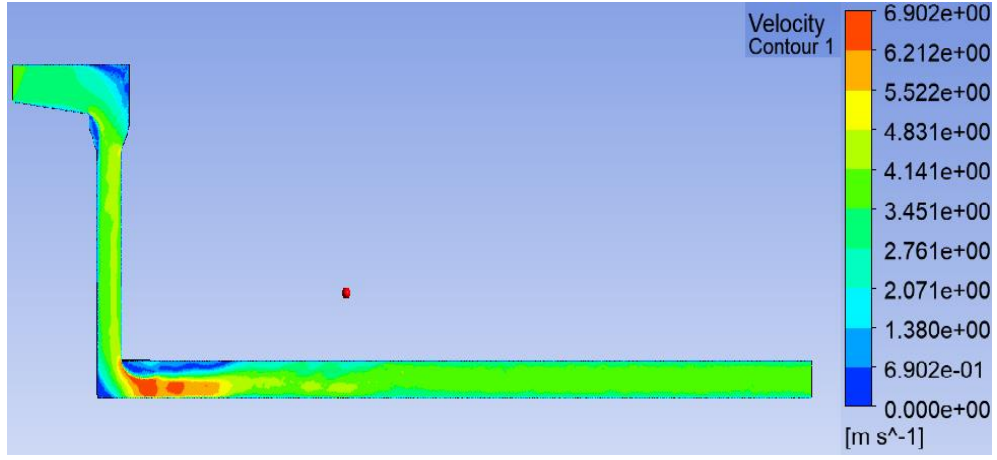
Şekil 4.42. BTÇ5 (3,45 m/s) için hız dağılımı genel görünüm



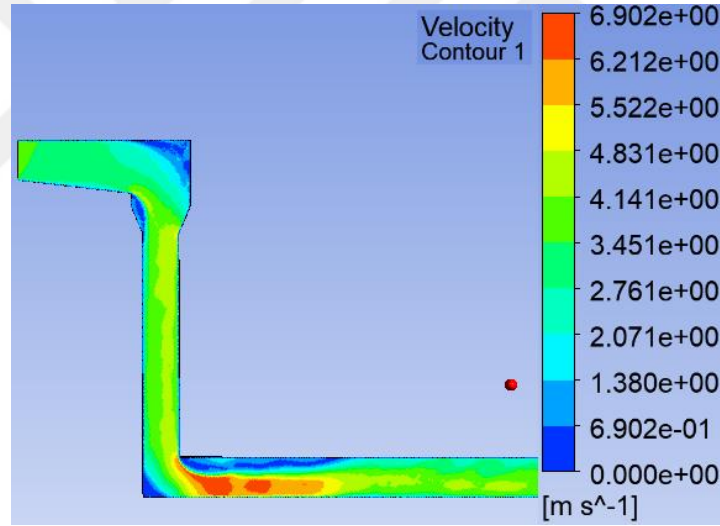
Şekil 4.43. BTÇ5 (3,45 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

Şekil 4.43' de giriş tüneline hız değerleri 1,979 m/s ile 2,969 m/s arasında olduğu görülmüştür. Sarmal bölgenin üst kısmında ölü bölge alanının daha yüksek olduğu görülmüştür. Düşey şaftta hız değeri 4,183 m/s ye çıktığı görülmüştür. Sarmal haznenin üst kısmında ölü bölge alanının arttığı görülmüştü.

Akım alanındaki hız dağılımı BTÇ6 (3,49 m/s) için Şekil 4.44 ve 4.45' de verilmiştir.



Şekil 4.44. BTÇ6 (3,49 m/s) için hız dağılımı genel görünüm



Şekil 4.45. BTÇ6 (3,49 m/s) için hız dağılımı yakınlaştırılmış görünüm

Şekil 4.45'de sarmal bölgenin üst kısmında, düşey shaftın alt bölgesinde ve çıkış tüneli başlangıcının üst kısmında ölü bölge alanının yüksek olduğu görülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Düşü yapıları, kanalizasyon sistemlerinin düzgün çalışması için çok önemli bir unsurdur. Kentsel drenaj uygulamasında, yağmur sularını ve kanalizasyonları sığ bir kanalizasyon kanalından derin bir tünele yönlendirip tahliye etmek için tasarlanırlar. Girdap düşü yapıları, önemli yükseklik farkları nedeniyle büyük miktarlarda suyu güvenli ve verimli bir şekilde düşürmenin önemli bir yoludur. Girdap düşü yapıları güvenilir, verimli yapılardır. Artan kentleşme, iklim değişiklikleri, yağış düzensizlikleri gibi etkenler şehirlerdeki altyapı tasarımlarını etkileyecektir. Yapı, doğrusal su akışlarını teğet bir girişe sahip bir girdap oluşturucu vasıtasıyla dönüştürerek çalışır ve aşağı akış akışının şaftın duvarlarına "yapışmasına" neden olarak sürtünme enerjisinin yayılmasını artırır (Mulligan vd., 2018).

Bu tez çalışmada 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellemeler oluşturulmuştur. 2,50 m/s, 2,56 m/s, 2,68 m/s, 2,89 m/s, 3,45 m/s, 3,49 m/s olmak üzere 6 farklı hız değeri girilmiştir. Yapılan modellemelerde farklı çözüm ağları girilmiştir. Hava-su iki fazlı akışta su değeri 0.95, hava değeri 0,05 girilmiştir.

Bu tez çalışmasında ANSYS FLUENT (2020R2) yazılımı kullanılarak havalandırma delikleri olmayan düşürme şaftının iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) modellemesi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında VOF türbülans modeli ve RNG $k - \epsilon$ türbülans modeli kullanılarak benzeştirmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Zhang vd., (2018) yapmış olduğu çalışmayla karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar şunlardır:

- 6 farklı hız değerinde (2,50 m/s, 2,56 m/s, 2,68 m/s, 2,86 m/s, 3,45 m/s, 3,49 m/s) yapılan analizlerde sonuçlar arasındaki fark değerleri ortalamaları %0,33 ile %23,32 arasında değişmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Zhang vd., (2018) yapmış oldukları çalışmadaki sayısal modellemelere ait hız verilerine daha yakın çıkmıştır.

- VOF türbülans modeli, serbest su yüzeyini ve boşluk uzunluğunu yeterli bir şekilde benzeştirmiştir.

- Hava-su akım ara yüzünü izlemek için yaygın olarak kullanılan VOF türbülans modelinin yeterli olduğu görülmüştür.

- Analizler 60.000 ile 123.500 iterasyon sayısı arasında yapılmıştır.

- İki boyutlu (2D) modellemede 136.594 yüzeysel çözüm ağı, üç boyutlu (3D) modellemelerde 257.889 ve 376.643 hücresel çözüm ağı kullanılmıştır.

Bu sonuçlar doğrultusunda ileride yapılacak araştırmalar için öneriler aşağıda belirtilmiştir:

- Bu tez çalışmasında RNG $k - \epsilon$ türbülans modelinde analizler yapılmıştır. $k - \epsilon$ türbülans modelinin altında ANSYS FLUENT' teki Standard $k - \epsilon$ ve Realizable $k - \epsilon$ türbülans modellerinde de analiz yapıp sonuçların karşılaştırılması faydalı olacaktır.

- Bu tez çalışmasında 2,50 m/s, 2,56 m/s, 2,68 m/s, 2,89 m/s, 3,45 m/s, 3,49 m/s hız değerleri dikkate alınmıştır. Model ölçüleri ise belirli bir ölçeğe göre oluşturulmuştur. İnşası daha önce yapılmış ve kullanımda olan gerçek boyutlarında ve ölçülen gerçek hızlarda yeni bir modelleme yapılarak analiz edilmesi faydalı olacaktır.

- Bu tez çalışmasında havalandırma delikleri olmayan iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) modellemeler yapılmıştır. Havalandırma etkisiyle oluşacak sürtünmeyi azaltmak için dikey shaft boyu uzatılmıştır. Havalandırma delikleri eklenerek yeni bir tasarım oluşturulabilir.

- Oluşturulan modellerde girilen çözüm ağları analiz süresini etkilemiştir. Ölçülerin değiştiği kademe bölgelerinde çözüm ağlarının sıklığı oluşturulup diğer sabit kısımlarda çözüm ağı sıklık ayarları değiştirilerek analiz süresi kısaltılabilir.

KAYNAKLAR

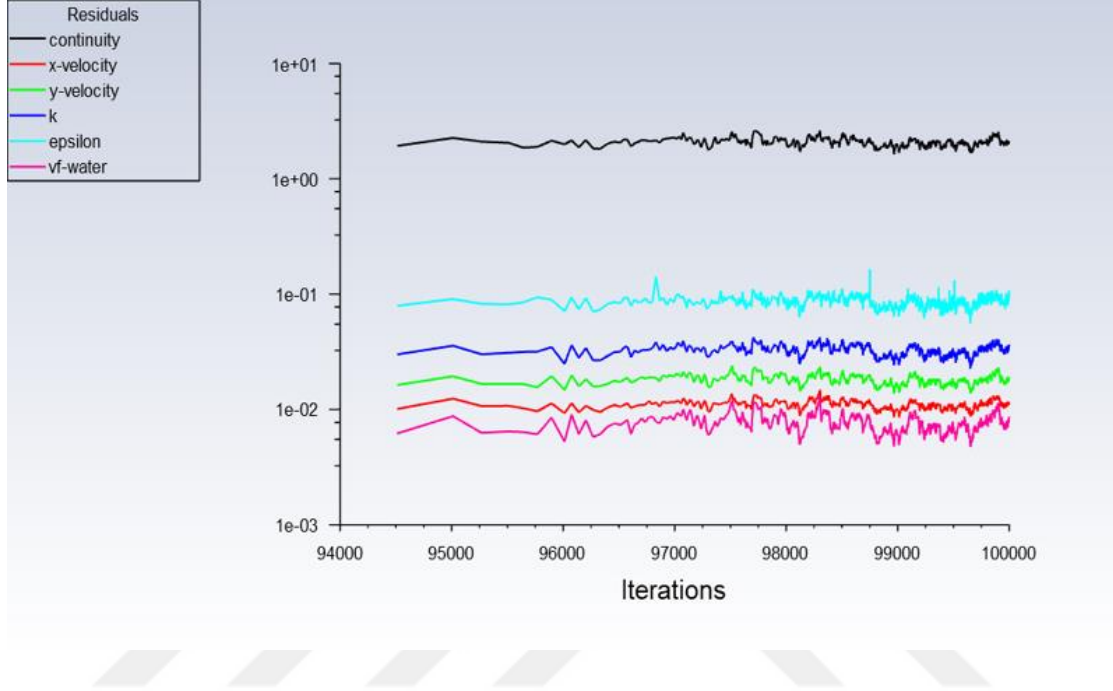
- Andoh, R., Osei, K., Fink, J., & Faram, M. (2008). Novel Drop Shaft System for Conveying and Controlling Flows from High Level Sewers into Deep Tunnels. In *World Environmental and Water Resources Congress 2008* (pp. 1-9).
- ANSYS, I. (2020). Ansys® Fluent (Version 2020 R2).
- Ayhan, O. (2015). Sonlu elemanlar analizi teorisi ve ANSYS ile uygulamalar. *Ankara: Palme Yayıncılık*.
- Chanson, H. (1999). *Energy dissipation and drop structures in ancient times: the Roman dropshafts*. Paper presented at the Proceedings of 25th Hydrology & Water Resources Symposium, 2nd International Conference on Water Resources & Environment Research.
- Corrado, G., & Hager, W. H. (2013). *Idraulica dei sistemi fognari: Dalla teoria alla pratica*: Springer Science & Business Media.
- Crispino, G., Contestabile, P., Vicinanza, D., & Gisonni, C. (2021). Energy Head Dissipation and Flow Pressures in Vortex Drop Shafts. *Water*, 13, 1-15. doi:10.3390/w13020165
- De Lorenzis, L., & Düster, A. (2020). *Modeling in Engineering Using Innovative Numerical Methods for Solids and Fluids*: Springer.
- Del Giudice, G., & Gisonni, C. (2011). Vortex dropshaft retrofitting: Case of Naples city (Italy). *Journal of Hydraulic Research*, 49, 804-808. doi:10.1080/00221686.2011.622148
- Devolder, B., Troch, P., & Rauwoens, P. (2018). Performance of a buoyancy-modified k- ω and k- ω SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®. *Coastal Engineering*, 138, 49-65.
- Fuhrman, D. R., Dixen, M., & Jacobsen, N. G. (2010). Physically-consistent wall boundary conditions for the k- ω turbulence model. *Journal of Hydraulic Research*, 48(6), 793-800.

- Galván, S., Reggio, M., & Guibault, F. (2011). Assessment study of K- ϵ turbulence models and near-wall modeling for steady state swirling flow analysis in draft tube using fluent. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(4), 459-478.
- Jain, S. (2000). Stormwater Two-Ramp Drop Structures. *Journal of Water Management Modeling*.
- Jain, S., & Kennedy, J. F. (1983). *Vortex-flow drop structures for the Milwaukee metropolitan sewerage district inline storage system*: Iowa Institute of Hydraulic Research, the University of Iowa Iowa City, IA.
- Kang, K. (2015). *Dynamic Analysis Of Vertical Stormwater Storage Systems*. (Master), Ryerson University, Toronto.
- Margevicius, A. (2018). A Comparison of Air Flow in Four Types of Sewage Drop Structures. Retrieved from <https://weatnts.files.wordpress.com/2018/03/815-am-comparison-tony-marggevicius-2.pdf>
- Marsis. (2021). Retrieved from <https://marsisinovasyon.com/en-kapsamli-cfd-yazilimi-ansys-fluent/>
- Morovati, K., Eghbalzadeh, A., & Javan, M. (2016). Numerical investigation of the configuration of the pools on the flow pattern passing over pooled stepped spillway in skimming flow regime. *Acta Mechanica*, 227(2), 353-366.
- Mulligan, S., Bonfils, T., O'Neill, C., Gonzalez, B., Carty, A., Clifford, E., & Nash, S. (2018, 2018). Multiphase numerical modelling of tangential inlet vortex drop shaft structures.
- Mulligan, S., Plant, J., Nash, S., & Clifford, E. (2019). *Vortex Drop Shaft Structures: State-of-the-Art and Future Trends*.
- Olsen, N. R. B. (2002). *Hydroinformatics, fluvial hydraulics and limnology*. Trondheim, Noruega: Norwegian University of Science Technology.
- Ovalı, İ., & Esen, C. (2018). *Ansys Workbench*: Kodlab Yayın Dağıtım Yazılım Ltd. Şti.
- Padulano, R., Del Giudice, G., & Carravetta, A. (2013). Experimental Analysis of a Vertical Drop Shaft. *Water*, 5, 1380-1392. doi:10.3390/w5031380

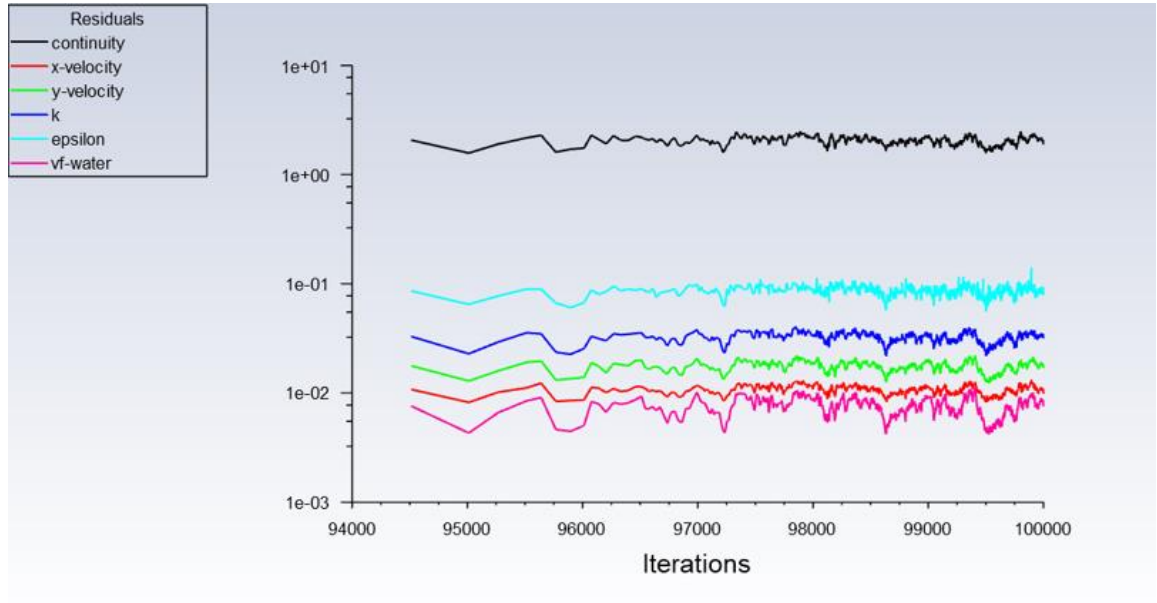
- Peng, Y., Wang, B., & Mao, Y. (2018). Study on force schemes in pseudopotential lattice Boltzmann model for two-phase flows. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.
- Peng, Y., Zhou, J. G., & Burrows, R. (2011). Modeling free-surface flow in rectangular shallow basins by using lattice boltzmann method. *Journal of hydraulic engineering*, 137(12), 1680-1685.
- Plant, J., & Crawford, D. (2016). Pushing the limits of tangential vortex intakes: is higher capacity and flow measurement possible in a smaller footprint? *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2016(12), 4108-4136.
- Qi, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2018). Three-Dimensional Turbulence Numerical Simulation of Flow in a Stepped Dropshaft. *Water*, 11(1). doi:10.3390/w11010030
- Schultz, N., Munsey, F., & Parente, M. J. P. o. t. W. E. F. (2004). Deep tunnels for sewage storage and conveyance: Lessons and opportunities. *2004*(10), 643-669.
- Tai, R., Chan, A., & Seit, R. (2009). *Planning of deep sewage tunnels in Hong Kong*. Paper presented at the ITA-AITES World Tunnel Congress Open Session, Budapest, Hungary.
- Williamson, S. (2001). *Drop structure design for wastewater and stormwater collection systems*: Parsons Brinckerhoff.
- Yang, Z., Yin, J., Lu, Y., Liu, Z., Yang, H., & Xu, G. (2021). Three-Dimensional Flow of a Vortex Drop Shaft Spillway with an Elliptical Tangential Inlet. *Water*, 13(4). doi:10.3390/w13040504
- Yüksel, A. (2007). *Batık duvar jeti etkisinde kazık ve taban etkileşiminin modellenmesi*. (PhD), Yıldız Technical University,
- Yüksel, Y. (2015). *İleri Akışkanlar Mekaniği*. İstanbul: Beta Basım Yayın Dağıtım.
- Zhang, W., Wang, J., Zhou, C., Dong, Z., & Zhou, Z. (2018). Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics in A Vortex Drop Shaft. *10*(10), 1393.
- Zhao, C.-H., David, Z., Sun, S.-K., & Liu, Z.-P. (2006). Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft. *Journal of Hydraulic Engineering-asce - J HYDRAUL ENG-ASCE*, 132. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:1(61)

EKLER

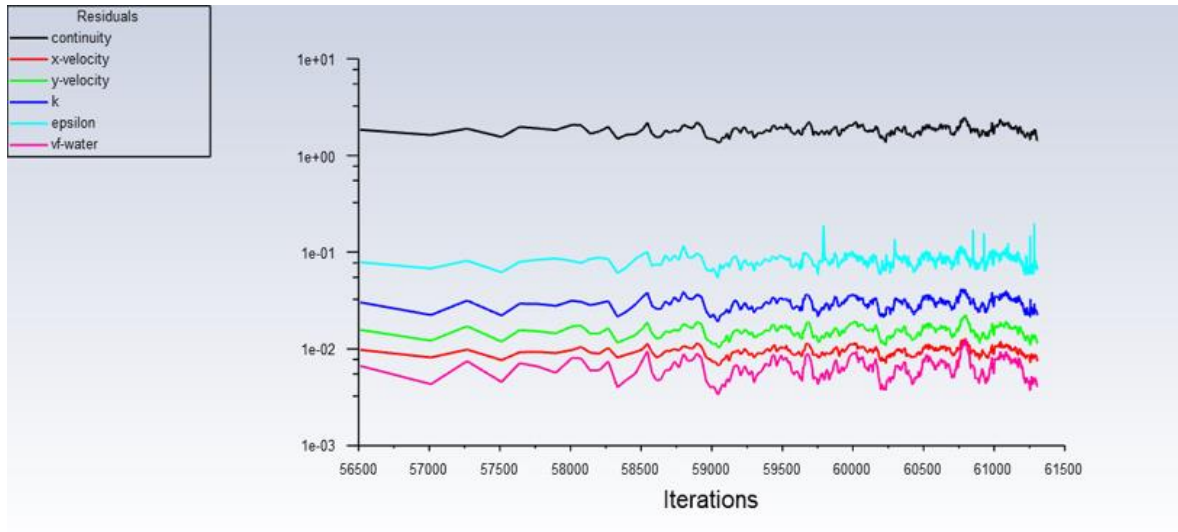
EK 1. BTÇ1 (2,50 m/s)' in iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



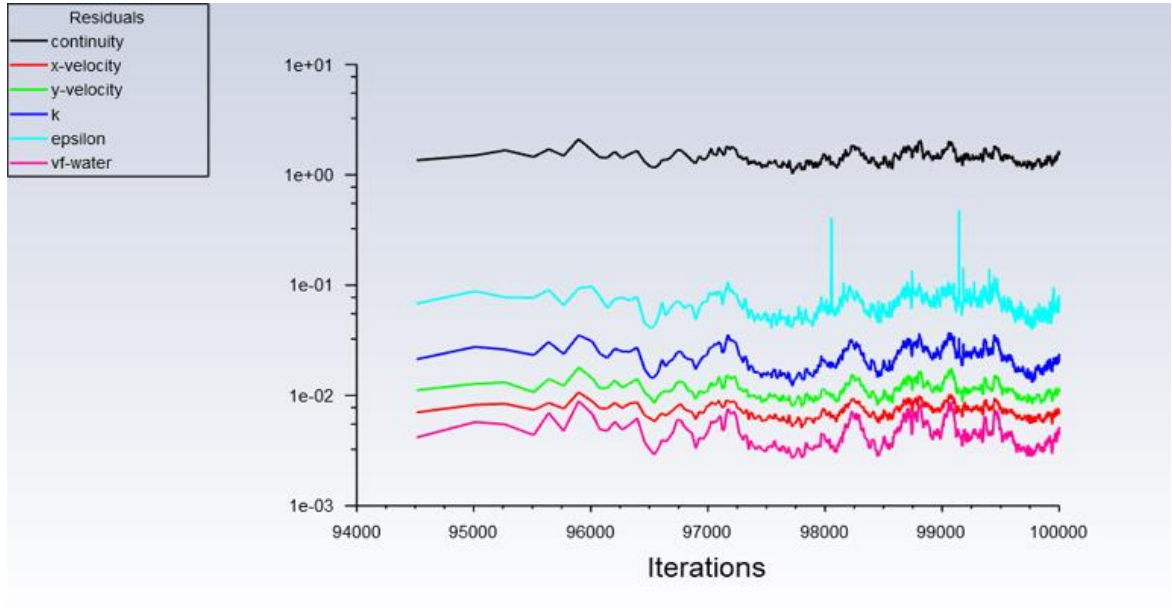
EK 2. BTÇ2 (2,56 m/s)' nin iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



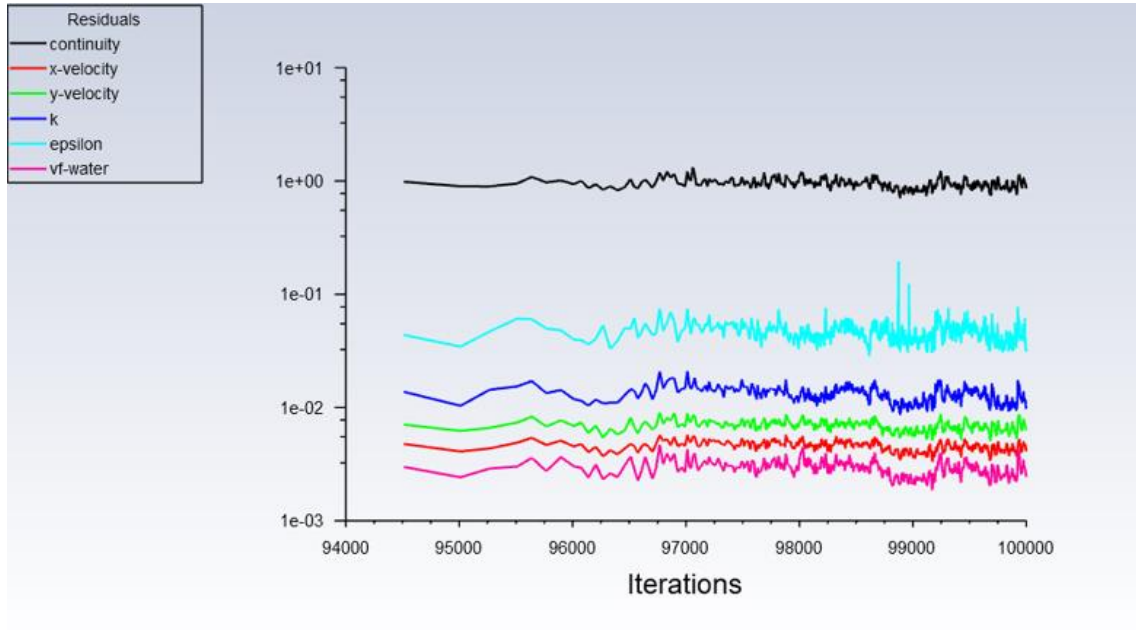
EK 3. BTÇ3 (2,68 m/s)' ün iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



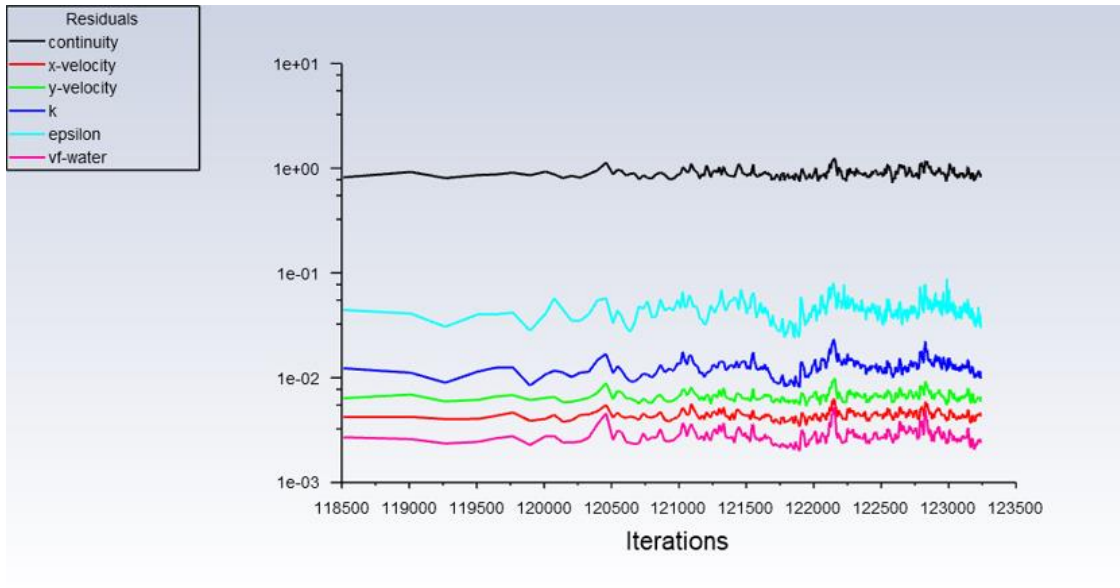
EK 4. BTÇ4 (2,86 m/s)' ün iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



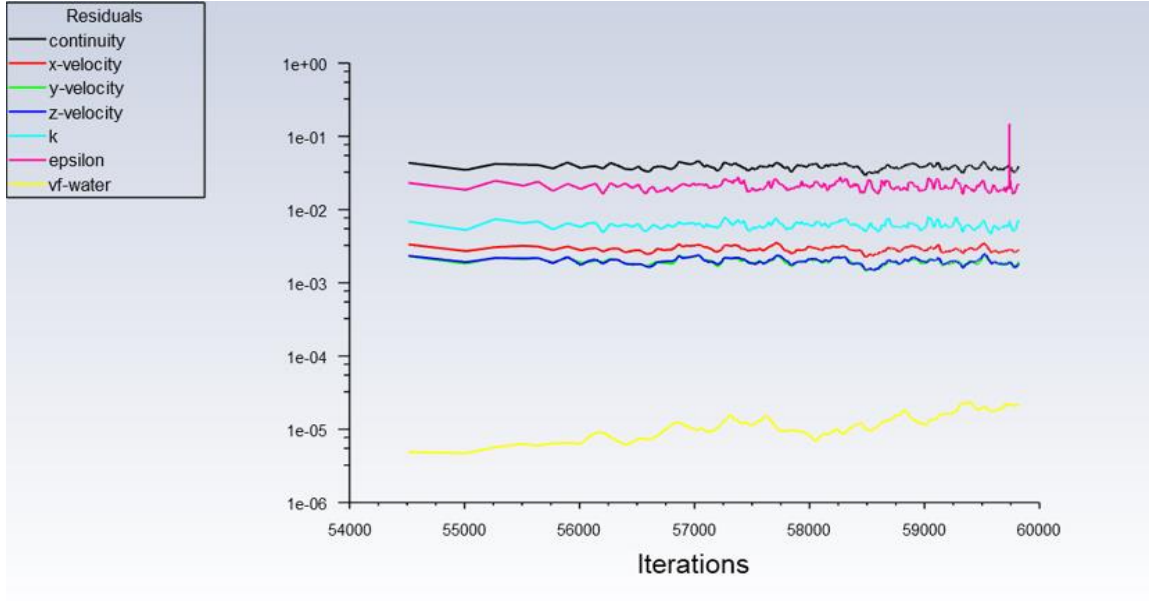
EK 5. BTÇ5 (3,45 m/s)' in iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



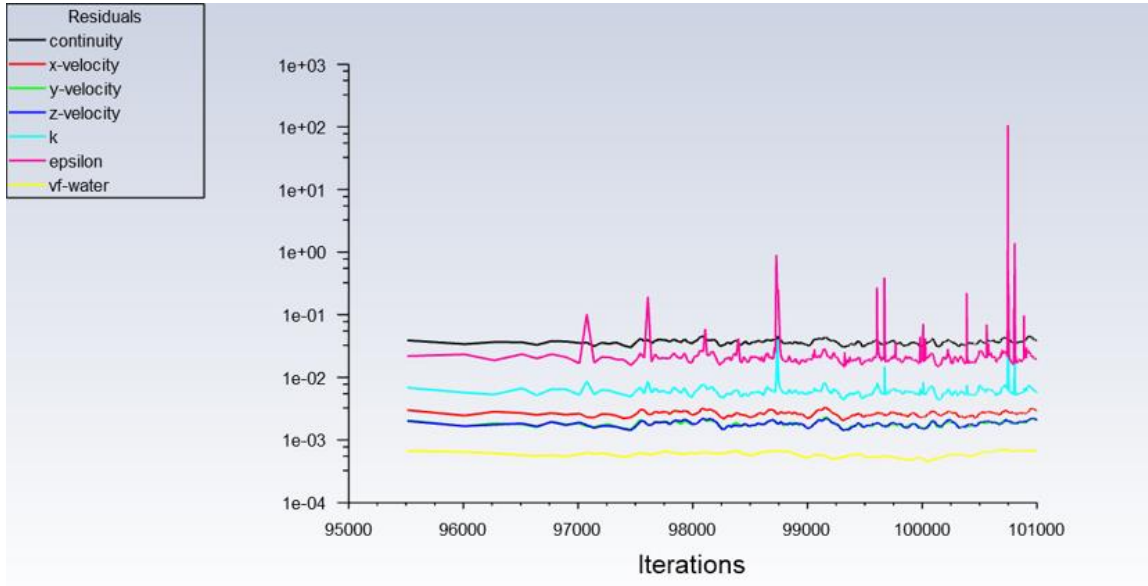
EK 6. BTÇ6 (2,50 m/s)' nın iki boyutlu (2D) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



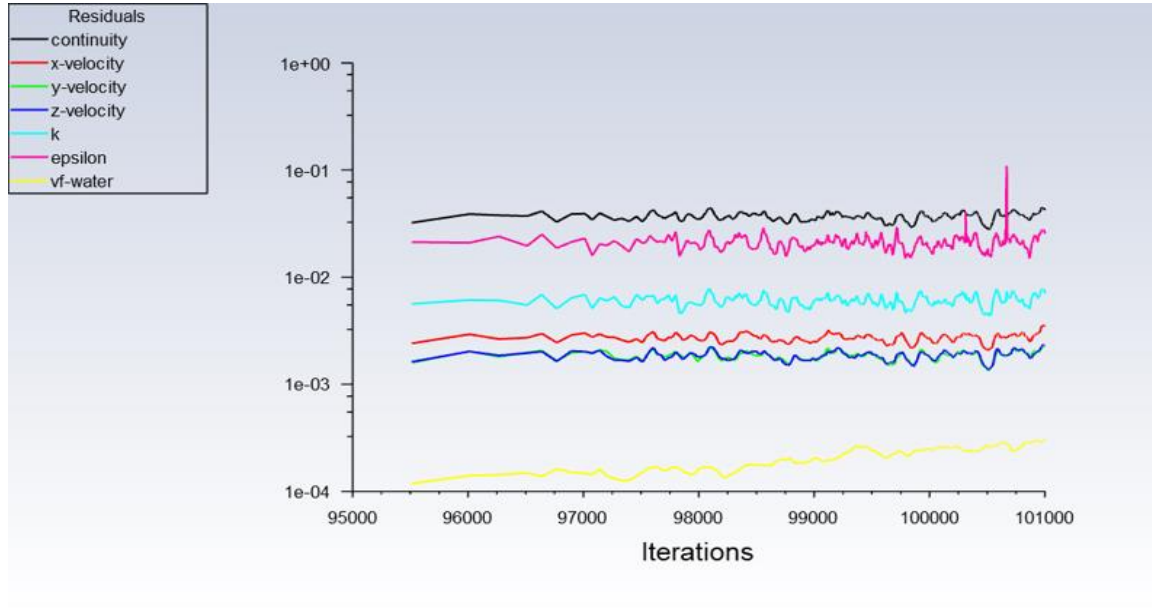
EK 7. BTÇ2 (2,56 m/s)' nin üç boyutlu (3D1) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



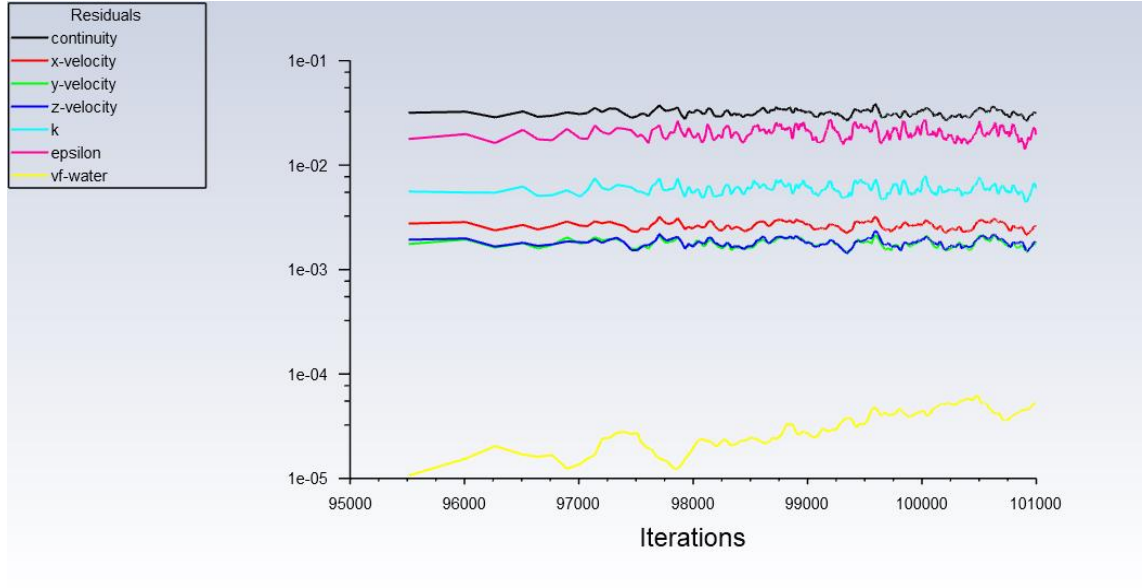
EK 8. BTÇ4 (2,86 m/s)' in üç boyutlu (3D1) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



EK 9. BTÇ6 (3,49 m/s)' nin üç boyutlu (3D1) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



EK 10. BTÇ4 (2,86 m/s)' ün üç boyutlu (3D2) modeldeki iterasyona ait yakınsama grafiği



T.C.
AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİMSEL ETİK BEYANI

“Düşürme Şaft Yapılarının Fluent İle Modellenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezindeki bütün bilgileri etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiz atıf yaptığımı bildiririm. İfade ettiklerimin aksi ortaya çıktığında ise her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Faruk ÇAKAN
... / ... / ...