



**VORTEKS TİPİ ÇÖKELTİM HAVUZLARINDAKİ AKIM
KARAKTERİSTİKLERİNİN VE SEDİMENT AYIKLAMA VERİMİNİN
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Ahmet KELLEÇİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet KELECİ

29/12/2025

VORTEKS TİPİ ÇÖKELTİM HAVUZLARINDAKİ AKIM KARAKTERİSTİKLERİNİN VE SEDİMENT AYIKLAMA VERİMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet KELLEÇİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2025

ÖZET

Akarsulardan enerji üretimi, sulama ve içme suyu temini için su alınması hidrolik mühendisliğin temel uygulama alanlarından biridir. Akarsuyun doğal bir bileşeni olan sediment, su alma yapıları ve iletim sistemleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu nedenle sedimentin yönlendirme kanalına girmeden hemen önce veya sistemin başlangıcında uzaklaştırılması hedeflenir. Bu amaç için kullanılan en etkili yapılar çökeltim havuzlarıdır. En yaygın türü olan dikdörtgen çökeltim havuzları, suyun hızının düşürülerek sediment taşıma kapasitesinin azaltıldığı ve sedimentin çöktürülerek sudan uzaklaştırıldığı yapılardır. Vorteks çökeltim havuzları sediment uzaklaştırma işlemini klasik çökeltim havuzlarından farklı bir prensiple gerçekleştirir. Bu tip çökeltim havuzlarında, merkezkaç kuvvetlerinden ve havuzdaki dönme hareketinden yararlanılarak özellikle ön yıkama esnasında yapı hacmi yönünden ekonomi sağlanır. Son yıllarda vorteks çökeltim havuzlarının verimliliğinin tahmininde kullanılan deneysel modellerin yanı sıra akışkan hareketini doğrudan çözümleyebilen yeni nesil hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımları, bu yapıların hidrolik davranışlarının daha ayrıntılı ve çabuk bir şekilde analiz edilmesini mümkün kılarak tasarım sürecini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bu tez çalışmasında, vorteks çökeltim havuzlarında sediment yıkama ve tuzaklama verimliliğini etkileyen parametreler ve akım ve sediment dağılımı karakteristikleri Flow-3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Askıdaki sediment konsantrasyonunun, havuz içerisindeki hız dağılımlarının, havuzun sediment tuzaklama (ayırma) ve yıkama verimliliklerinin; havuzun geometrik konfigürasyonu, orifis çapı, sediment çapı ve eşik yüksekliği ile olan ilişkileri araştırılmıştır. HAD ile elde edilen çıktılar literatürdeki mevcut deneysel çalışma verileriyle karşılaştırılmıştır. Sayısal modelleme sonuçları; çıkış eşik yüksekliğinin ve havuz merkezindeki orifis çapının artmasının sediment tuzaklama (veya ayıklama) verimini arttırdığını ancak yıkama verimini azalttığını göstermektedir. Havuzun plandaki görüntüsü ile ilgili farklı giriş-çıkış kanalı alternatifleri arasında, S şekline sahip giriş-çıkış kanalı yerleşiminin, sediment tuzaklama verimliliği açısından en iyi alternatif olduğu görülmüştür. Sediment çapı arttıkça tuzaklama verimliliği artarken yıkama verimliliği değişmemiştir.

Bilim Kodu : 91101

Anahtar Kelimeler : FLOW-3D, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, sediment ayıklama verimliliği, vorteks çökeltim havuzu, yıkama verimliliği

Sayfa Adedi : 189

Danışman : Prof. Dr. Kerem TAŞTAN

NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW CHARACTERISTICS AND SEDIMENT REMOVAL EFFICIENCY OF VORTEX SETTLING BASINS

(M. Sc. Thesis)

Ahmet KELLEÇİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2025

ABSTRACT

The withdrawal of water from rivers for hydropower generation, irrigation, and drinking water supply constitutes one of the primary applications of hydraulic engineering. Sediment exerts adverse effects on water intake structures and conveyance systems. Consequently, the principal objective is to remove sediment immediately prior to its entry into the diversion channel or at the initial stage of the system. Among the structures employed for this purpose, settling basins represent the most effective solution. Vortex-type settling basins accomplish sediment removal through a principle that differs fundamentally from that of conventional settling basins. In these structures, centrifugal forces and the rotational motion induced within the chamber are exploited to achieve significant volumetric economy. In recent years, in addition to empirical models, next-generation Computational Fluid Dynamics (CFD) software capable of directly resolving fluid motion has enabled more detailed and rapid analysis of the hydraulic behaviour of these structures. In the present thesis, the parameters influencing sediment flushing and trapping efficiency in vortex settling basins, as well as the characteristics of flow and sediment distribution, have been numerically investigated using the Flow-3D software. The relationships between suspended sediment concentration, velocity distributions, sediment trapping (separation) efficiency, and flushing efficiency on the one hand, and geometric configuration of the basin, orifice diameter, sediment particle size, and outlet sill height on the other, have been systematically examined. Results obtained from the CFD simulations have been compared and validated with existing experimental data. The results of the numerical modelling demonstrate that an increase in outlet sill height and central orifice diameter enhances sediment trapping efficiency while concurrently reducing flushing efficiency. Among the various inlet–outlet channel layout alternatives examined in plan view, the S-shaped inlet–outlet configuration has been identified as the most effective arrangement in terms of sediment trapping efficiency. Furthermore, trapping efficiency increases with increasing sediment particle diameter, whereas flushing efficiency remains unaffected by this parameter.

Science Code : 91101

Key Words : FLOW-3D, computational fluid dynamics, sediment
removal efficiency, vortex settling basin, flushing efficiency

Page Number : 189

Supervisor : Prof. Dr. Kerem TAŞTAN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında büyük emeği olan, çalışma süresince bana desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile akademik gelişimime büyük katkı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Kerem TAŞTAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımı sürdürebilmem için sağladığı imkanlar, gösterdiği anlayış ve sabır son derece kıymetli olmuştur. Bu süreçte en büyük destekçim, annem Şerife KELLEÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, her zaman öğrencisi olmaktan büyük onur duyduğum, Gazi Üniversitesi'ne FLOW-3D programını lisanslı bir şekilde kullanabilmemi sağladığı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu tez kapsamında geliştirilen MATLAB kodlarının yüksek hesaplama gereksinimleri doğrultusunda çalıştırılabilmesini sağlayan TÜBİTAK ULAKBİM'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	13
2.1. Vorteks Çökeltim Havuzu Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar	13
2.2. Vorteks Çökeltim Havuzu Üzerine Yapılan Sayısal Çalışmalar.....	32
2.3. Deneysel ve Sayısal Yöntemlerin Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar.....	37
2.4. Mevcut Tez Çalışmanın Önemi.....	40
3. SAYISAL MODELLEMEDE KULLANILAN FLOW-3D YAZILIMI	43
3.1. HAD Modellemesinde Çözülen Temel Denklemler	44
3.1.1. Kütle korunumu denklemi.....	44
3.1.2. Momentum korunum denklemleri (Navier-Stokes).....	44
3.1.3. Sediment taşınım denklemleri	45
3.2. Türbülans Modelleri.....	49
3.3. Flow-3D Arayüzü.....	50
3.3.1. Simülasyon yöneticisi (Simulation manager).....	50
3.3.2. Model kurulumu (Model setup).....	50
4. SAYISAL MODELİN OLUŞTURULMASI VE DOĞRULANMASI...	57
4.1. Athar (2000) Deneysel Çalışması	57
4.2. Sayısal Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması.....	63
4.2.1. Çözüm ağının oluşturulması	63

Sayfa

4.2.2. Sınır koşullarının belirlenmesi ve modelin fiziksel yapısı.....	64
4.2.3. Çözüm ağı boyutuna karar verilmesi	68
4.2.4. Simülasyon süresinin belirlenmesi	75
4.2.5. Türbülans modeli belirlenmesi	77
4.2.6. Sediment taşınım modeli belirlenmesi.....	80
4.3. Model Sonuçlarının Deney Verileri ile Karşılaştırılması.....	81
4.3.1. Hız dağılımları	82
4.3.2. Konsantrasyon Dağılımı	96
5. FARKLI AKIM VE GEOMETRİK KOŞULLAR İÇİN ÇÖKELTİM HAVUZU PERFORMANSININ İNCELENMESİ.....	113
5.1. Giriş-Çıkış Eşik Yükseklikleri Farkının Etkisi	114
5.2. Orifis Yarıçapının Etkisi	133
5.3. Geometrik Konfigürasyonun Etkisi	150
5.4. Sediment Çapının Etkisi.....	169
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	181
KAYNAKLAR	183
ÖZGEÇMİŞ	189

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. İzin verilen tanecik boyutu	1
Çizelge 1.2. İzin verilen en yüksek ortalama hız.....	5
Çizelge 1.3. Derinliğe göre ortalama hız düzeltme katsayıları.....	6
Çizelge 3.1. Schmidt sayısı ile yapılan çalışmalarda kullanılan değerler.....	47
Çizelge 4.1. Literatürden elde edilen bazı konfigürasyonlar.....	58
Çizelge 4.2. Deney parametrelerine ait değer aralıkları	62
Çizelge 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan akım ve geometri parametrelerine ait değerler.....	62
Çizelge 4.4. Tüm kanalı kapsayan genel çözüm ağı için sınır koşulları.....	66
Çizelge 4.5. Teğetsel hız için çözüm ağı kıyaslamaları	73
Çizelge 4.6. Radyal hız için çözüm ağı kıyaslamaları.....	73
Çizelge 4.7. Konsantrasyon için çözüm ağı kıyaslamaları	74
Çizelge 4.8. Genel çözüm ağı kıyaslamaları	74
Çizelge 4.9. Farklı türbülans modellerinde teğetsel hızlara ait RMS hata değerleri (m/s).....	78
Çizelge 4.10. Farklı türbülans modellerinde radyal hız RMS hata değerleri (m/s).....	79
Çizelge 4.11. Farklı türbülans modellerinde konsantrasyon RMS hata değerleri (ppm)	80
Çizelge 4.12. Athar (2000) deneysel verileri ile kalibrasyon modelinden elde edilen teğetsel hız hesaplama sonuçlarının yüzdesel hata karşılaştırması	83
Çizelge 4.13. Athar (2000) deneysel verileri ile kalibrasyon modelinden elde edilen konsantrasyon verilerinin yüzdesel hata karşılaştırması	98
Çizelge 5.1. Vorteks çökeltim havuzu sınır şartları.....	115

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Çökeltim havuzuna sistemine ait yapılar	2
Şekil 1.2. Dikdörtgen çökeltim havuzunun plan ve kesit görünümü	3
Şekil 1.3. Çökelme hızı tanecik boyutu grafiği	5
Şekil 1.4. Akış yönünde temizleme sistemi	6
Şekil 1.5. Tabana yerleştirilmiş hunilerle temizleme sistemi	7
Şekil 1.6. Akıma ters yıkama sistemi	7
Şekil 1.7. Taban yıkamalı sistem	8
Şekil 1.8. Tipik bir vorteks çökeltim havuzunun plan ve kesiti	9
Şekil 1.9. Vorteks çökeltim havuzu içerisinde sediment taneciğinin izlediği yörünge	10
Şekil 1.10. Salakhov (1975) ile Çeçen ve Beyazıt, (1975) tarafından tasarlanan çökeltim havuzları	10
Şekil 1.11. Ogihara ve Sakaguchi (1984) tarafından ve Mashauri (1986) tarafından tasarlanan çökeltim havuzları	11
Şekil 2.1. Vorteks çökeltim havuzunda ikincil akımların ve helisel yolun oluşması ..	13
Şekil 2.2. Vorteks çökeltim havuzunda hava çekirdeği oluşumu	14
Şekil 2.3. Vorteks çökeltim havuzundaki farklı akım karakteristikleri	14
Şekil 2.4. Rankine tipi vorteks modelinde hız ve basınç dağılımı	15
Şekil 2.5. Deflektör ve diyaframın havuz içerisindeki konumları	18
Şekil 2.6. Girişte deflektör bulunan, akış yönünün tersine bakan havuzun şematik diyagramı	19
Şekil 2.7. Vorteks çökeltim havuzunda sedimentin uzaklaştırma verimliliğinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği kesit görünümü	21
Şekil 2.8. Vorteks çökeltim havuzunda askıda sedimentin giderim verimliliğinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği plan görünümü	22
Şekil 2.9. Vorteks çökeltim havuzunda tuzaklama verimi ve akış yapısı üzerine yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği	23

Şekil	Sayfa
Şekil 2.10. Giriş ve taşma savağının konumunun yer aldığı hız ölçümü için veri örgüsü (Chapokpour ve ark., 2012)	24
Şekil 2.11. 90°'lik radyal kesitte plaka yerleştirme bölgeleri.....	26
Şekil 2.12. Havuz tabanında 2, 3 ve 4 numaralı plaka yerleştirme bölgeleri.....	26
Şekil 2.13. Farklı tür plaka yerleşim örnekleri	27
Şekil 2.14. Hajiahmadi ve ark., 2014 çalışmasında kullanılan deney düzeneği	28
Şekil 2.15. Vorteks çökeltim havuzunda deflektör tasarım optimizasyonu için açıklıklar (boşluklar).....	29
Şekil 2.16. Sinüzoidal hız desenleri	30
Şekil 2.17. Farklı açısall kesitlerde sediment taneciklerinin hareketi	30
Şekil 2.18. Flow-3D kullanılarak vorteks çökeltim havuzunda akış karakteristiklerinin sayısal modellemesinde kullanılan düzenek.....	33
Şekil 2.19. Vorteks çökeltim havuzunda giriş ve çıkış kanallarının farklı bağlantı durumları.....	34
Şekil 2.20. Model 1 plan görünümü.....	35
Şekil 2.21. Model 2 plan görünümü.....	35
Şekil 2.22. Model 3 plan görünümü.....	36
Şekil 2.23. Vorteks çökeltim havuzu 1 ve Vorteks çökeltim havuzu 2'ye ait görünüm	37
Şekil 2.24. Vorteks çökeltim havuzu 3'e ait görünüm.....	37
Şekil 2.25. Çökeltim havuzundaki farklı taban eğimleri	40
Şekil 3.1. Flow-3D Arayüü genel görünüm	50
Şekil 3.2. Flow-3D de global sekmesinde yer alan varsayılan değerler	51
Şekil 3.3. Yüksek konsantrasyon gradyanlarından dolayı değişken yoğunluklu akışın aktif hale gelmesi	52
Şekil 3.4. Akışkan özellikleri.....	53
Şekil 3.5. Output sekmesinde istenen çıktılarının belirlenmesi	54
Şekil 3.6. Sayısal parametreleri ayarlamak için Numerics ekranı	55
Şekil 3.7. Sayısal çıktıları alabilmek için Analiz ekranı	56
Şekil 4.1. Vorteks çökeltim havuzu plan görünümü	60
Şekil 4.2. Vorteks çökeltim havuzu boyuna kesit görünümü	60

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Vorteks çökeltim havuzundaki ölçüm bölgeleri	61
Şekil 4.4. Farklı bloklar kullanılarak oluşturulmuş vorteks çökeltim havuzundaki çözüm ağırları.....	64
Şekil 4.5. Vorteks çökeltim havuzunda tanımlanan sınır şartları	65
Şekil 4.6. Vorteks çökeltim havuzunda tanımlanan sınır şartlarına ait görüntü	65
Şekil 4.7. Giriş kanalına ait sınır koşulları.....	67
Şekil 4.8. Orifis ağ bloğunda sabit tutulan debi değeri	68
Şekil 4.9. Vorteks çökeltim havuzuna yerleştirilen problemlerin konumu.....	69
Şekil 4.10. Geometrik Tip-I vorteks çökeltim havuzuna ait kutupsal koordinatlar	69
Şekil 4.11. Kutupsal koordinat sisteminde hız bileşenleri	71
Şekil 4.12. 90 derece, 0,06 m yükseklik ve 0,3m radyal mesafede ölçülen konsantrasyon değerlerinin zamanla değişimi	76
Şekil 4.13. 90 derece, 0,06 m yükseklik ve 0,3 m radyal mesafede ölçülen teğetsel hız değerlerinin zamanla değişimi	76
Şekil 4.14. 90 derece, 0,06 m yükseklik ve 0,3m radyal mesafede ölçülen radyal hız değerlerinin zamanla değişimi	77
Şekil 4.15. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	84
Şekil 4.16. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	84
Şekil 4.17. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	85
Şekil 4.18. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı ...	85
Şekil 4.19. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı ...	86
Şekil 4.20. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı ...	86
Şekil 4.21. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı .	87
Şekil 4.22. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 135°-315° derece boyunca elde edilen teğetsel hız dağılımı	87

Şekil	Sayfa
Şekil 4.23. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 135°-315° derece boyunca elde edilen teğetsel hız dağılımı	87
Şekil 4.24. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	88
Şekil 4.25. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	89
Şekil 4.26. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	89
Şekil 4.27. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	90
Şekil 4.28. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	90
Şekil 4.29. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	90
Şekil 4.30. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı ...	91
Şekil 4.31. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı ...	91
Şekil 4.32. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı ...	92
Şekil 4.33. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	93
Şekil 4.34. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	93
Şekil 4.35. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	93
Şekil 4.36. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	94
Şekil 4.37. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	94
Şekil 4.38. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	95
Şekil 4.39. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	95

Şekil	Sayfa
Şekil 4.40. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	96
Şekil 4.41. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	96
Şekil 4.42. Athar (2000) 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon kontür dağılımı	97
Şekil 4.43. Kalibrasyon modeline ait 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon kontür dağılımı.....	97
Şekil 4.44. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	99
Şekil 4.45. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	99
Şekil 4.46. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	99
Şekil 4.47. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	100
Şekil 4.48. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	100
Şekil 4.49. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	101
Şekil 4.50. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	101
Şekil 4.51. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	101
Şekil 4.52. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	102
Şekil 4.53. Athar (2000) çalışmasında ölçüm noktası olarak seçilen konumlara kayıt probleminin yerleştirilmesi.....	102
Şekil 4.54. Askıda sediment konsantrasyonunun Y-Z ekseninden 90°-270° sırasıyla 0,01 m, 0,06 m ve 0,11 m yüksekliklerinde alınan kesit görüntüleri.....	103

Şekil	Sayfa
Şekil 4.55. Askıda sediment konsantrasyonunun X-Z ekseninden 0°-180° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,06 ve 0,11 yüksekliklerinde alınan kesit görüntüleri.....	104
Şekil 4.56. X yönündeki hız dağılımının plan görünümü	105
Şekil 4.57. Y yönündeki hız dağılımının plan görünümü.	106
Şekil 4.58. Z yönündeki hız dağılımının plan görünümü.	107
Şekil 4.59. Türbülans enerjisi dağılımının plan görünümü.....	108
Şekil 4.60. Türbülans şiddeti dağılımının plan görünümü	109
Şekil 4.61. Kararlı akım durumunda vorteks çökeltim havuzu tabanında biriken sediment miktarının dağılımı	110
Şekil 4.62. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	111
Şekil 5.1. Eşik yükseklik farkı 2 cm olan modelin görünümü	115
Şekil 5.2. Farklı eşik yüksekliklerine ait modeller için kullanılan sınır şartları	116
Şekil 5.3. Eşik yükseklik farkı 5 cm olan modelin görünümü	116
Şekil 5.4. Eşik yükseklik farkı 8 cm olan model görünümü	117
Şekil 5.5. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	118
Şekil 5.6. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	118
Şekil 5.7. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	119
Şekil 5.8. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	120
Şekil 5.9. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	121
Şekil 5.10. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	121
Şekil 5.11. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	122
Şekil 5.12. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	122
Şekil 5.13. Farklı eşik yüksekliklerine ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	123

Şekil	Sayfa
Şekil 5.14. Farklı eşik yüksekliklerine ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	124
Şekil 5.15. Farklı eşik yüksekliklerine ait modeller için havuzda biriken sedimentin dağılımı	125
Şekil 5.16. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımları.....	126
Şekil 5.17. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki türbülans şiddeti dağılımları	127
Şekil 5.18. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki x yönündeki hız dağılımları	128
Şekil 5.19. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki y yönündeki hız dağılımları	129
Şekil 5.20. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki düşey hız dağılımları.....	130
Şekil 5.21. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki konsantrasyon dağılımları.....	131
Şekil 5.22. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki Y-Z doğrultusunda konsantrasyon dağılımları	132
Şekil 5.23. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki X-Z doğrultusunda konsantrasyon dağılımları	133
Şekil 5.24. Orifis yarıçapı 3 cm olan modelinin görünümü	134
Şekil 5.25. Orifis yarıçapı 5 cm olan modelinin görünümü	134
Şekil 5.26. Orifis yarıçapı 7 cm olan modelinin görünümü	135
Şekil 5.27. Farklı orifis yarıçapları için uygulanan sınır şartları	135
Şekil 5.28. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	136
Şekil 5.29. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	137
Şekil 5.30. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	138
Şekil 5.31. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	138
Şekil 5.32. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	139

Şekil	Sayfa
Şekil 5.33. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	139
Şekil 5.34. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	140
Şekil 5.35. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	141
Şekil 5.36. Farklı orifis yarıçaplarına ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	141
Şekil 5.37. Farklı orifis yarıçaplarına ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	142
Şekil 5.38. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için havuzda biriken sedimentin dağılımı	143
Şekil 5.39. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için türbülans kinetik enerjisinin dağılımı	144
Şekil 5.40. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için türbülans şiddetinin dağılımı ...	145
Şekil 5.41. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için x yönündeki hız dağılımı	146
Şekil 5.42. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için y yönündeki hız dağılımı	146
Şekil 5.43. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için z yönündeki hız dağılımı	147
Şekil 5.44. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için konsantrasyon dağılımı	148
Şekil 5.45. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için Y-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı	149
Şekil 5.46. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için X-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı	150
Şekil 5.47. S şekilli geometrik konfigürasyona ait görünüm.....	151
Şekil 5.48. S şekilli geometrik konfigürasyona ait sınır şartları.....	152
Şekil 5.49. I şekilli geometrik konfigürasyona ait görünüm.....	152
Şekil 5.50. I şekilli geometrik konfigürasyona (kalibrasyon modeli) ait sınır şartları....	153
Şekil 5.51. U şekilli geometrik konfigürasyona ait görünüm	153
Şekil 5.52. U şekilli geometrik konfigürasyona ait sınır şartları	154
Şekil 5.53. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	155

Şekil	Sayfa
Şekil 5.54. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	155
Şekil 5.55. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı.	156
Şekil 5.56. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı ...	156
Şekil 5.57. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	157
Şekil 5.58. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	157
Şekil 5.59. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	158
Şekil 5.60. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	159
Şekil 5.61. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	159
Şekil 5.62. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	160
Şekil 5.63. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için havuzda biriken sediment dağılımı	161
Şekil 5.64. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için türbülans kinetik enerjisi dağılımı	162
Şekil 5.65. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için türbülans şiddeti dağılımı	163
Şekil 5.66. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için x yönündeki hız dağılımı	164
Şekil 5.67. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için y yönündeki hız dağılımı	165
Şekil 5.68. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için z yönündeki hız dağılımı	166
Şekil 5.69. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için konsantrasyon dağılımı	167
Şekil 5.70. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için Y-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı	168

Şekil	Sayfa
Şekil 5.71. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için X-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı	168
Şekil 5.72. Farklı sediment çapı denemeleri için kullanılan kalibrasyon modelinin sınır şartları	169
Şekil 5.73. Farklı sediment çapı denemeleri için kullanılan kalibrasyon modelinin görünümü	170
Şekil 5.74. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	171
Şekil 5.75. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı	171
Şekil 5.76. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	172
Şekil 5.77. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı	173
Şekil 5.78. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	173
Şekil 5.79. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı	173
Şekil 5.80. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	174
Şekil 5.81. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı	174
Şekil 5.82. Farklı sediment çaplarına ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	175
Şekil 5.83. Farklı sediment çaplarına ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması.....	175
Şekil 5.84. Farklı sediment çaplarına ait modeller için havuzda biriken sediment dağılımı	177
Şekil 5.85. Farklı sediment çaplarına ait modeller için konsantrasyon dağılımı	178
Şekil 5.86. Farklı sediment çaplarına ait modeller için Y-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı	180
Şekil 5.87. Farklı sediment çaplarına ait modeller için X-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı	180

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Çalışmada belirtilen hidrolik bölgeler	20
Resim 2.2 Havuz tabanında sediment birikim bölgeleri	23
Resim 2.3. Çalışmada kullanılan vorteks çökeltim havuzu	25



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_x, A_y, A_z	x, y ve z yönlerinde akışkanın akışa açık alanı
B	Dikdörtgen kanal genişliği
c	Konsantrasyon(ppm)
C_{in}	Çökeltim havuzuna giren akımdaki sediment konsantrasyonu
C_{out}	Çökeltim havuzundan çıkan akımdaki sediment konsantrasyonu
$C_{s,i}$	Askıda sedimentin konsantrasyonu
D	Yönel difüzyon katsayısı
D_t	Havuz çapı
D_T	Türbülans difüzyon katsayısı
d	Sediment tane çapı
d_o	Orifis çapı
d_b	Boru çapı
E	Entrainment (sürüklenme) oranı (boyutsuz)
f_x, f_y, f_z	x, y, z yönlerindeki viskoz ivme bileşenleri
g	Yerçekimi ivmesi
g_x, g_y, g_z	x, y, z yönlerindeki yerçekimi ivme bileşenleri
h_1	Diyafram altı giriş akımı yüksekliği
h_2	Havuz içerisindeki su yüksekliği
h_e	Giriş kanalı eşik yüksekliği
h_{in}	Giriş kanalı su yüksekliği
h_p	Havuz duvarında su yüksekliği
H_v	Vorteks çökeltim havuzunun toplam yüksekliği

Simgeler	Açıklamalar
H_{in}	Giriş borusu merkezinin tabandan yüksekliği
k	Türbülans kinetik enerjisi (TKE)
L	Havuzun derinliği
L_1	Taşma savağı uzunluğu
n	Richardson-Zaki katsayısı (üstü)
p	Basınç
P_{∞}	Vorteksten uzak bir noktadaki basınç
P_{r_0}	Belirli bir radyal mesafedeki basınç
P_o	Orifisteki merkezi basınç
Q_e	Sürüklenen (entrained) akışkan debisi
Q_{in}	Giriş debisi
Q_u	Orifisten atılan debi
Q_{out}	Çıkış kanalından atılan debi
q_b	Birim genişlikteki yatak yükü taşınım oranı
R_T	Havuz yarıçapı
Re_t	Tanecik Reynolds sayısı
s	Sediment ve akışkan yoğunluk oranı (ρ_s/ρ_f)
S_c	Havuz taban eğimi
Sc_t	Türbülanslı Schmidt sayısı
S_d	Havuz tabanında biriken sediment yüzdesi
t	Zaman(sn)
u, v, w	x, y, z yönlerindeki hız bileşenleri
u_{cr}	Sedimentin harekete geçmesi için kritik hız
u_{rms}	Tabandaki kök ortalama kare (RMS) hız bileşeni
$u_{s,i}$	Askıdaki sedimentin hız vektörü
u_t	Tek bir sediment taneciğinin çökelme (hızı
z_h	Havuz tabanı ile çıkış kanalı tabanı arasındaki yükseklik farkı
W	Sedimentin çökelme hızı(m/s)
ω_o	Açısal hız

Simgeler	Açıklamalar
V_x, V_y, V_z	x,y,z yönlerinde hız büyüklükleri
ε	Türbülans disipasyon (sönümleme) oranı
θ	Shields parametresi
θ_{cr}	Kritik Shields parametresi
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
Γ	Çevrinti katsayısı
ν	Akışkanın kinematik viskozitesi
ρ_f	Akışkan yoğunluğu
ρ_s	Sediment yoğunluğu
ω	Türbülans spesifik disipasyon oranı (k- ω modeli)
W_{orifis}	Orifisten atılan sediment ağırlığı
W_{toplam}	Havuzla giren toplam sediment ağırlığı
η_o	Sediment tuzaklama verimliliği
η_e	Sediment uzaklaştırma verimliliği
η_{flow}	Akış verimliliği
η_{in}	Giriş kanalı verimliliği
∇	Diferansiyel denklem operatörü

Kısaltmalar	Açıklamalar
ADV	Akustik Doppler Hız Ölçeri
CPU	Merkezi İşlem Birimi
GPU	Grafik İşlem Birimi
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
k-ε	Standart k-epsilon türbülans modeli
k-ω	K-omega türbülans modeli
LES	Büyük Girdap Simülasyonu
RNG	Yeniden Normalleştirme Grubu (türbülans modeli)
RANS	Reynolds-Ortalama Navier Stokes
RSOR	Sistem dışından tanımlanan kütle/momentum kaynak terimi

1. GİRİŞ

Akarsulardan enerji üretimi, sulama ve içme suyu temini için su alınması hidrolik mühendisliğinin temel uygulama alanlarındandır. Akarsuyun doğal bir bileşeni olan sediment, su alma yapıları ve iletim sistemleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Sediment taneleri türbin ve pompa gibi pahalı mekanik ekipmanlarda aşınmaya neden olarak verimi düşürmekte ve tesis ömrünü kısaltmaktadır. Ayrıca yönlendirme kanallarında, tünellerde ve cebri borularda birikim yapan sediment, kapasite kaybı ve işletme sorunlarına yol açmaktadır. Dolayısıyla sedimentin sudan uzaklaştırılmasının iki önemli nedeni vardır. İlk neden pahalı makine ve ekipmanların aşınmasını önlemek ikincisi ise sediment birikimini azaltmaktır.

Su alma yapılarına giren sedimentin miktarını azaltmak amacıyla eşik ve ızgara yapıları önlem olarak konulur. Ancak yönlendirme kanalına giren suyun sediment içeriğini sıfıra indirmek mümkün değildir. Bu nedenle sedimentin yönlendirme kanalına girmeden hemen önce veya sistemin başlangıcında uzaklaştırılması hedeflenir. Bu amaç için kullanılan en etkili yapılar çökeltim havuzlarıdır. Çökeltim havuzu suyun hızının düşürülerek sediment taşıma kapasitesinin azaltıldığı ve sedimentin çöktürülerek sudan uzaklaştırıldığı yapılardır.

Çökeltim havuzları, sudaki sediment konsantrasyonuna, sediment şekil ve boyutuna, düşüm yüksekliğine (eğer alınan su enerji üretimi için kullanılacaksa) bağlı olarak farklı boyutta tanelerin çökmesine izin verilebilecek şekilde tasarlanabilir. Bilindiği gibi keskin köşeli taneler yuvarlak tanelerden, yüksek sediment konsantrasyonu düşük sediment konsantrasyonundan ve yüksek hız ve basınca sahip taneler düşük hızlı olanlardan daha fazla aşınmaya neden olur. Çizelge 1.1’de enerji üretimi için alınan suda düşüm yüksekliğine göre izin verilebilensediment boyutları verilmektedir.

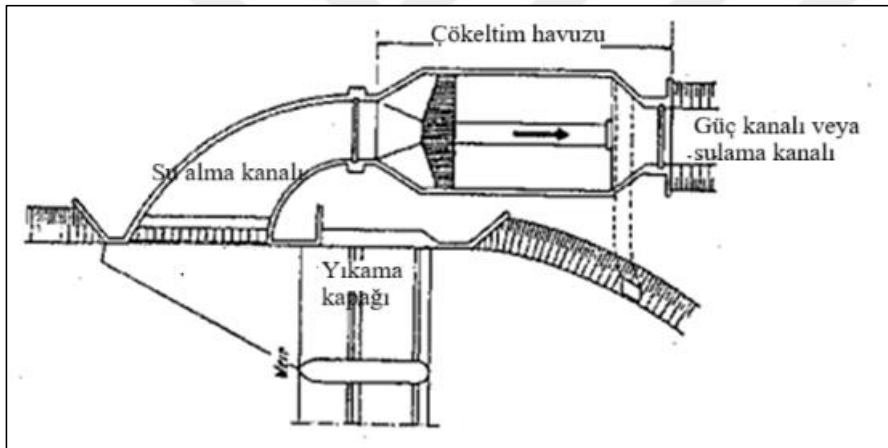
Çizelge 1.1. İzin verilen tanecik boyutu (Çeçen, 1976)

Basınç yüksekliği (m)	İzin verilen tanecik boyutu (mm)
80-100	Çökme gerekebilir
100-200	0.6
200-300	0.5
300-500	0.3
500-1000	0,1

Çökeltim havuzuna giren suyun hızı azalmakta ve izin verilen tane boyutundan büyük taneler çökmektedir. İzin verilen tane boyutu suda bulunmasına izin verilen en büyük sediment tanesidir. Örneğin sulama suyu için izin verilen tane boyutu içme suyuna kıyasla daha büyük olabilmektedir. Çökeltim havuzunda sedimentin çok büyük kısmı çökeldikten sonra kalan su iletim hattına devam etmektedir. İzin verilen tane boyutundan daha büyük taneler mutlaka çökeltilmeli ve sistemden uzaklaştırılmalıdır.

Dikdörtgen çökeltim havuzları

Çökeltim havuzları farklı tiplerde inşa edilmektedir. En yaygın kullanılan dikdörtgen tipi bir çökeltim havuzu Şekil 1.1'de gösterildiği üzere üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar; su alma bölümü, çökeltim havuzu bölümü ve çıkış bölümüdür.



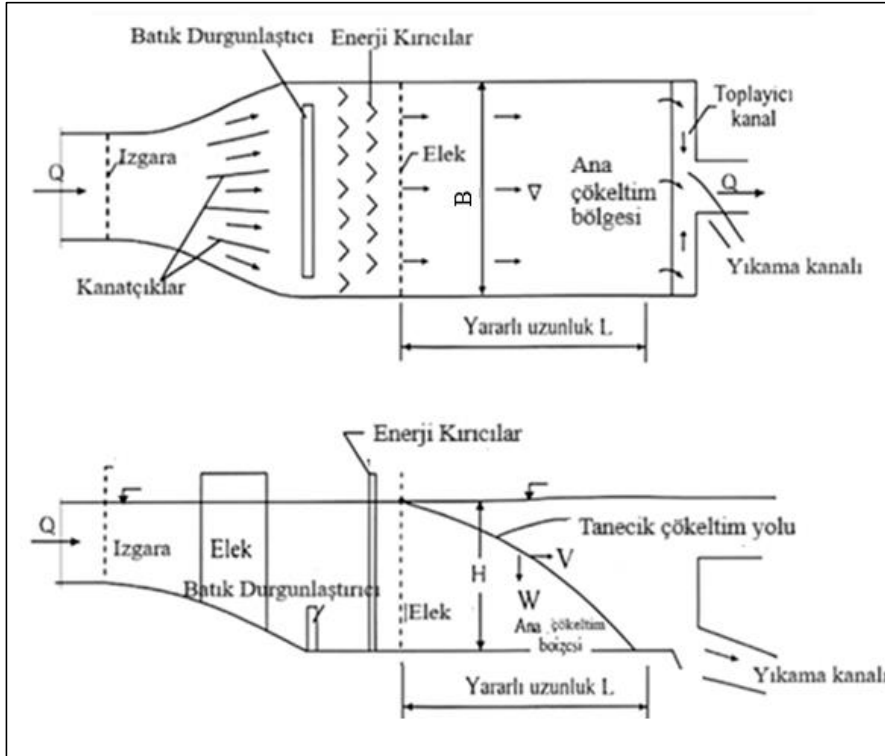
Şekil 1.1. Çökeltim havuzuna sisteminin ait yapılar (Avcı, 1995)

Dikdörtgen çökeltim havuzlarında ızgaralar, akışı yatıştıran enerji kırıcılar, ana çökeltim bölgesi ve yıkama kanalı yer almaktadır. Iızgaralar iri taneleri tutmaktadır. Enerji kırıcı çubuklar türbülansı azaltmak için yerleştirilmektedir. Çökeltimin etkili olabilmesi için tabana eğim verilmektedir. Ayrıca tabanda küçük bir kanal açılarak çökelmiş sedimentin uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Havuzun sonunda bulunan yıkama kanalı ve kapaklarla çökelmiş sediment sürekli ya da aralıklı olarak uzaklaştırılmaktadır.

Avcı (1995), çökeltim havuzlarının hidrolik tasarımında, akarsuyun taşıdığı sedimentin özelliklerinin (yoğunluk dağılımı, tane boyutu dağılımı ve askıdaki ile tabandaki sedimentin özgül ağırlığı) iyi analiz edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Tabandaki sediment iyi tasarlanmış giriş yapıları, savak ve yıkama kanalı ile uzaklaştırılmaktadır. Dikdörtgen

çökeltim havuzlarının sediment tuzaklama verimliliği (η_o) çökelmeden önce ve sonra konsantrasyonların oranı olarak aşağıdaki Eş (1.1) ile hesaplanabilmektedir. C_{in} , çökeltim havuzuna giren akımdaki sediment konsantrasyonunu, C_{out} çökeltim havuzundan çıkan akımdaki sediment konsantrasyonunu ifade etmektedir.

$$\eta_o = (C_{in}/C_{out})100 \quad (1.1)$$



Şekil 1.2. Dikdörtgen çökeltim havuzunun plan ve kesit görünümü (Yıldırım, 2007)

Şekil 1.2’de gösterildiği üzere dikdörtgen bir çökeltim havuzu için; B, havuzun toplam net genişliği; H, havuzun derinliği; L, ana çökeltim bölgesinin faydalı uzunluğu; Q, havuzdan geçen toplam debi; V, havuzdaki ortalama akış hızı; W, durgun suda izin verilen sediment tanesinin çökeltme hızı; t, süre; x, yatay eksen; ve y, düşey aşağı eksendir. Çökeltim havuzunda hız ve debi ilişkisi aşağıdaki Eş. (1.2) ile verilebilmektedir.

$$Q = VBH \quad (1.2)$$

Sediment taneciğinin yatay hızı akışın hızı ile aynı varsayılmaktadır. Tanecik kendi ağırlığı ile t süresi boyunca yatayda x mesafesini düşeyde ise y mesafesini almaktadır

Sediment taneciğinin havuz içindeki hareketi Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Zaman değişkeni bağımsız tutulduğunda x ve y arasındaki ilişki aşağıdaki Eş. (1.3) ile ifade edilmektedir.

$$x / y = V / W \quad (1.3)$$

Yatay mesafe L değerini aldığında düşey mesafe H olur. Bu durumda Eş. (1.3) ile verilen değişkenler aşağıdaki Eş. (1.4) ile ifade edilebilir.

$$L / H = V / W \quad (1.4)$$

Yukarıdaki denklemlerde sediment taneciğinin düşey hızı durgun su için W (çökme hızı) olarak kabul edilmiştir. Gerçekte ise havuz içinde bir miktar türbülans bulunmaktadır. Bu türbülans sediment taneciği üzerinde düşey yukarı yönlü hız bileşeni (W') yaratır. Bu nedenle tanecik W yerine $W-W'$ hızı ile çökmektedir. Bu durum Eş. (1.5) ile verilmektedir.

$$L \geq [V / (W - W')] \cdot H \quad (1.5)$$

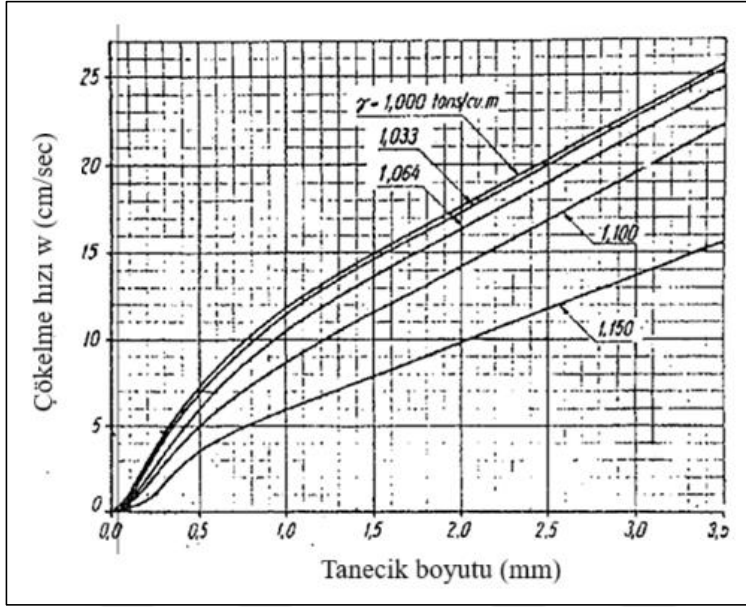
Türbülansın düşey bileşenini (W') tahmin edebilmek için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mosonyi (1965), tarafından geliştirilen denklem Eş. (1.6) ile verilmiştir. Burada H metre cinsindendir.

$$W' = (0,132V) / H^{1/2} \quad (1.6)$$

Eş. (1.5) ve Eş. (1.6) kullanılarak elde edilen Eş. (1.7) aşağıda verilmektedir.

$$L \geq (VH^{3/2}) / (WH^{1/2} - 0,132V) \quad (1.7)$$

Pratikte havuzun uzunluğu Eş. (1.7) ile bulunan L uzunluk değerinin 1.5 katı olarak alınmalıdır. Sediment taneciklerinin çökme hızı, Şekil 1.3'de verilen grafik üzerinde okunabilmektedir.



Şekil 1.3. Çökme hızı tanecik boyutu grafiği (Mosonyi, 1965'ten aktaran Avcı, 1995)

Havuzdaki uniform akış hızı, izin verilen en büyük hızdan küçük olmalıdır. Aksi halde sediment tekrar askı durumuna geçebilmektedir. Mosonyi (1965) tarafından belirlenen izin verilen en yüksek hızlar Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. İzin verilen en yüksek ortalama hız (Mosonyi, 1965'ten aktaran Avcı, 1995)

Malzeme	Tanecik çapı (mm)	İzin verilen en yüksek ortalama hız (m/s)
Çok iri çakıl	200-150	3.9-3.3
	150-100	3.3-2.7
İri çakıl	100-75	2.7-2.1
	75-50	2.4-1.9
	50-25	1.9-1.4
	25-15	1.4-1.2
	15-10	1.2-1.0
	10-5	1.0-0.8
Çakıl taşı	5-2	0.8-0.6
Kum (ince)	2-0.5	0.6-0.4
Çok ince kum	0.5-0,1	0.4-0,25
Silt	0.02-0.002	0,20-0,15

Camp (1946), d , sediment taneciği çapı ve V , izin verilen en yüksek hız arasında Eş. (1.8) ile verilen aşağıdaki eşitliği geliştirmiştir. Burada d mm cinsinden, V cm/s cinsindedir ve α katsayısı $d > 1$ mm için 36, $0,1 \text{ mm} < d < 1 \text{ mm}$ için 44 ve $d < 0,1$ mm için 51 olarak alınmaktadır.

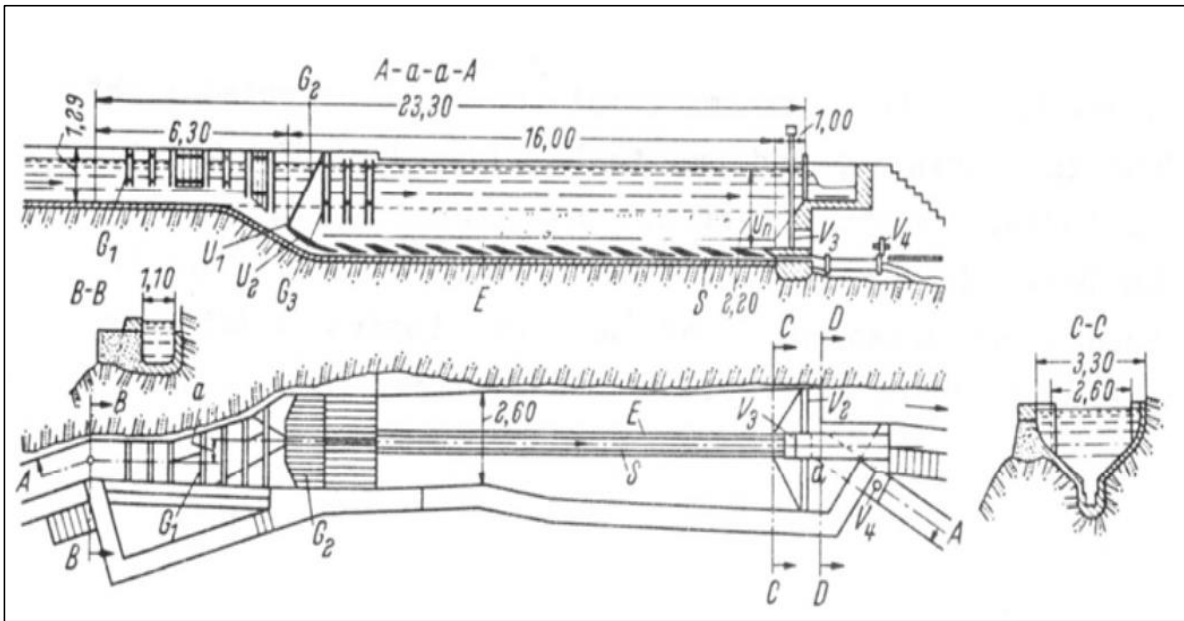
$$V = \alpha \sqrt{d} \quad (1.8)$$

Çizelge 1.3. Derinliğe göre ortalama hız düzeltme katsayıları (Mosonyi, 1965'ten aktaran Avcı, 1995)

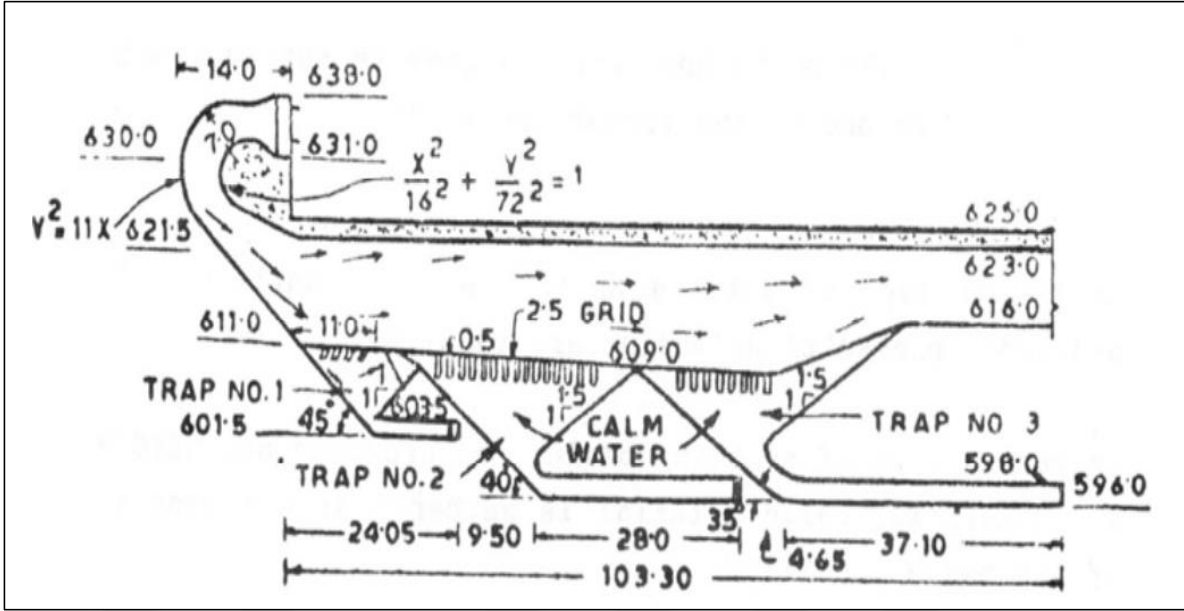
Derinlik H (m)	α katsayısı
0.3	0.80
0.6	0.90
1.0	1.00
1.5	1.10
2.0	1.15
2.5	1.20
3.0	1.25

Çökeltim havuzları ince sedimentin çökeltilmesi için de tasarlanmaktadır. İyi tasarlanmış bir havuz az miktarda su kaybıyla kısa sürede yıkama sağlamaktadır. Ancak dağ dereleri gibi eğimi yüksek akarsular iri sediment taşıyabilmektedir. Bu durum çökeltim havuzunda su kaybına neden olabilmektedir. Bu nedenle ön temizleme sistemleri kullanılmalıdır.

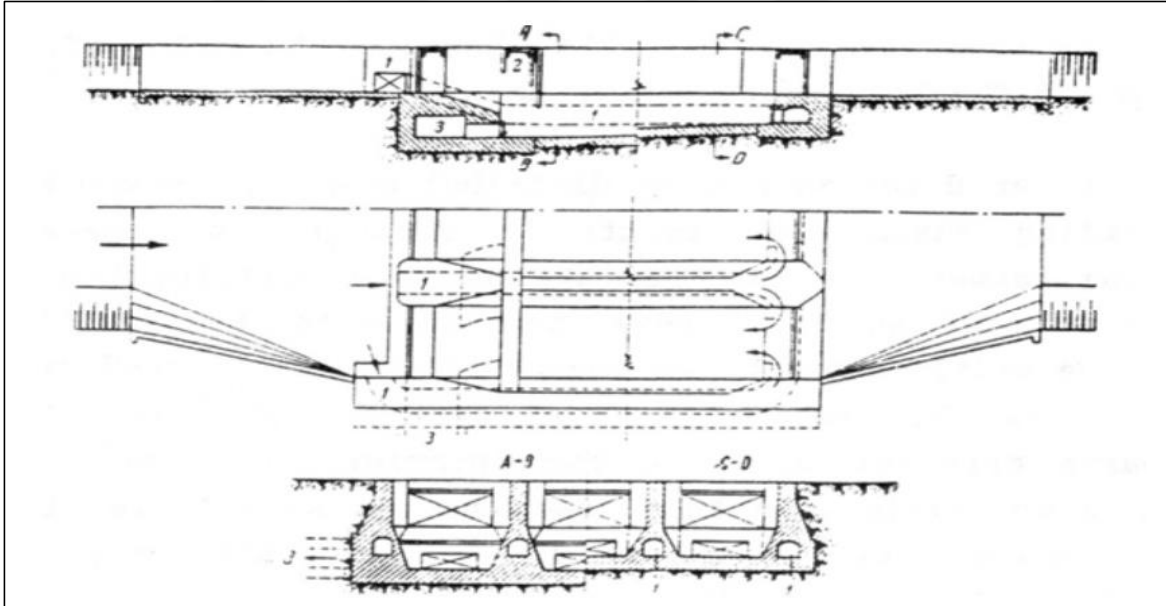
En yaygın kullanılan sistemler; Şekil 1.4'teki akış yönünde temizleme sistemi (Dufour sistemi), Şekil 1.5'teki tabana yerleştirilmiş ızgaralarla temizleme sistemi, Şekil 1.6'daki akıma ters temizleme sistemi ve Şekil 1.7'deki taban yıkamalı temizleme sistemidir.



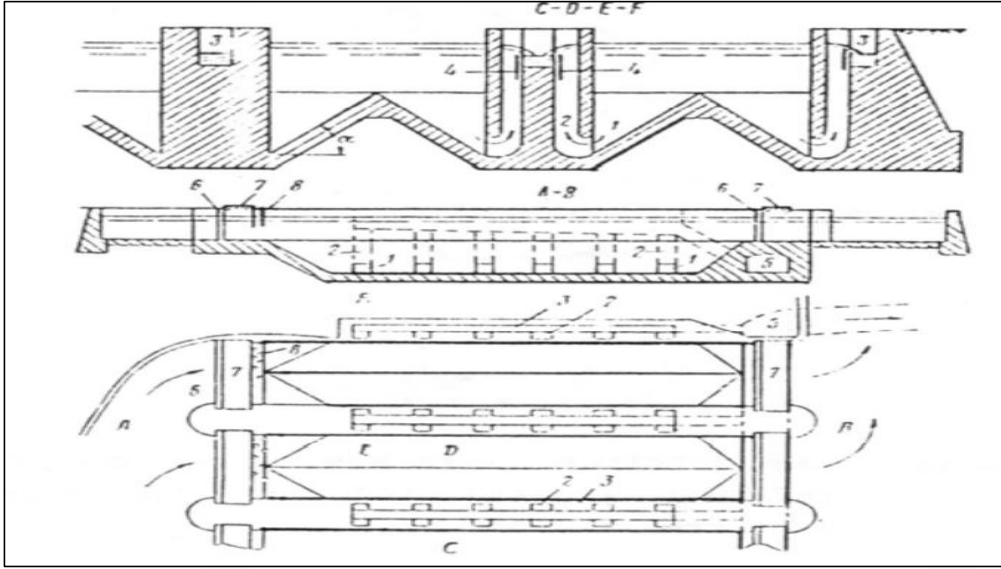
Şekil 1.4. Akış yönünde temizleme sistemi (Çeçen, 1995)



Şekil 1.5. Tabana yerleştirilmiş hunilerle temizleme sistemi (Çeçen, 1975)



Şekil 1.6. Akıma ters yıkama sistemi (Samarin ve ark., 1961)

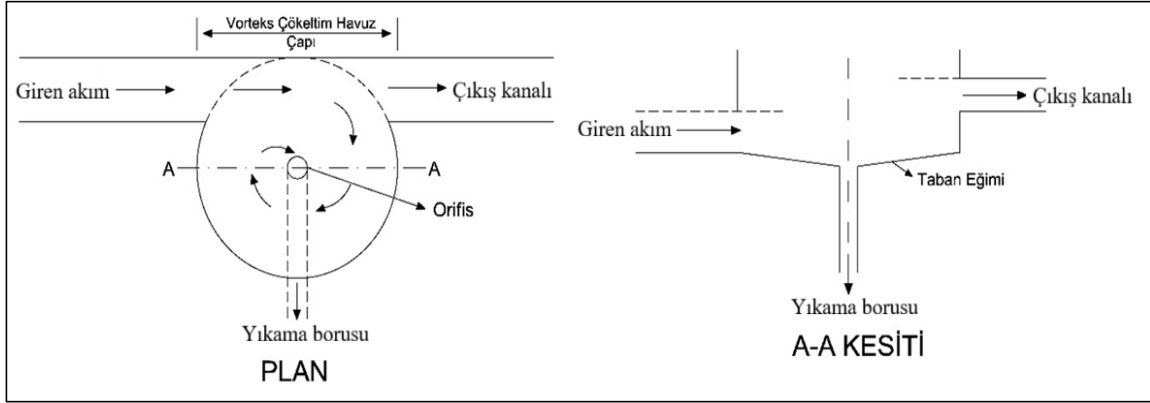


Şekil 1.7. Taban yıkamalı sistem (Samarin ve ark, 1961)

Vorteks tipi çökeltim havuzları

Bu çalışmanın da konusu olan vorteks tipi çökeltim havuzu, Çeçen (1973, 1975) tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. Akım dairesel bir havuza girdikten sonra merkezdeki açıklığa (orifise) doğru yönelmektedir.

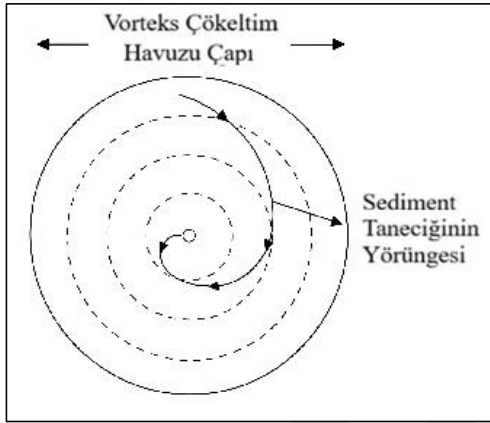
Tabandaki suyun hızı yüzeye göre daha düşük olduğundan merkezkaç kuvvetleri sayesinde iri sediment taneleri dış kenarlardan merkeze taşınmaktadır. Çeçen (1973, 1975) deneylerinde havuza giren katı tanelerin orifise doğru ilerlerken helisel bir yol izlediğini göstermiştir. Vorteks çökeltim havuzları sediment uzaklaştırma işlemini klasik çökeltim havuzlarından farklı bir prensiple gerçekleştirir. Havuz içerisinde oluşan vorteks hareketi sayesinde sediment tanecikleri tabana doğru yönelmekte ve tabanda yer alan orifisten, bir miktar suyla birlikte dışarı atılmaktadır. Paul ve ark., (1991) diğer sediment yıkama yapılarıyla kıyaslandığında, dairesel kesitli vorteks çökeltim havuzlarının daha yüksek verim, düşük inşaat maliyeti ve su tasarrufu sağladığını belirtmiştir. Şekil 1.8'de tipik bir vorteks çökeltim havuzunun plan ve kesiti verilmiştir.



Şekil 1.8. Tipik bir vorteks çökeltim havuzunun plan ve kesiti (Taştan ve Barbaros, 2020)

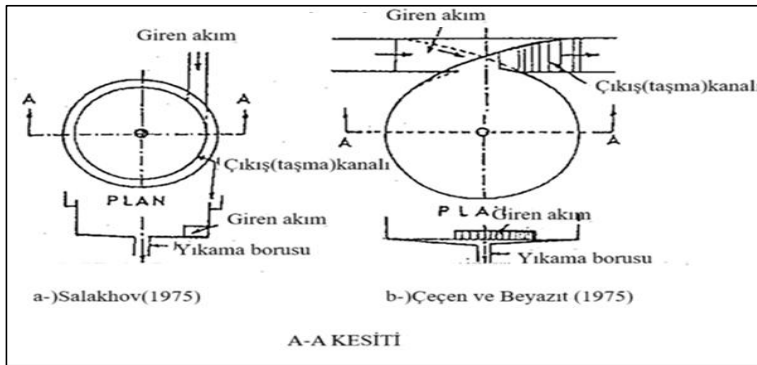
Vorteks çökeltim havuzlarında akım, merkezkaç kuvveti ve ikincil akımların etkisiyle tabandaki orifise yönlendirilir. Akımın yapısı, iç içe geçmiş dairesel akım çizgileriyle tanımlanan vorteks hareketi ile karakterize edilir. Vorteks akımı, dönümsüz yapıya sahip serbest vorteks ve dönümlü yapıya sahip zorlanmış vorteks olmak üzere iki tipte incelenmektedir. Vorteks çökeltim havuzlarında merkezkaç kuvveti ve ikincil akımlar, açık kanal akımlarındaki kurp etkisiyle benzer şekilde gelişir. Hidrolik sınır koşulları gereği, düşey doğrultuda akım hızı tabandan yüzeye doğru artmaktadır. Bu nedenle yüzeye yakın tanecikler, tabandaki taneciklere göre daha yüksek hız ve dolayısıyla daha güçlü merkezkaç kuvvetine maruz kalır. Bu durum, yüzeye yakın taneciklerin havuz kenarına doğru, tabana yakın taneciklerin ise merkeze doğru hareket etmesine yol açar. Böylece ikincil akımlar oluşur ve bu akımlar sedimentin tabandaki orifisten dışarı taşınmasını sağlar. Teğetsel hızın artmasıyla merkezkaç kuvvetinin, su yükseklik farkının artmasıyla da ikincil akımların şiddeti artmakta ve bu durum sediment tuzaklama verimini artırmaktadır. Bu nedenle, havuza gelen akımın uygun taban kotundan ve mümkün olduğunca teğetsel yönde girmesi, havuz içerisindeki dolaşımın etkinliği açısından önemlidir. Sedimenti uzaklaştırılmış temiz su tam tur attıktan sonra havuzun üst kotlarından mansap kanalına iletilir. Orifis üzerindeki su derinliği kritik seviyeye eşit veya daha düşük olduğunda, akıma yüzey çevrintileri ile hava girişi olur ve bu durum hava girişli vorteks olarak adlandırılır. Taştan ve Yıldırım, (2018) bu durumun; su alma yapılarında titreşim, debi azalması ve pompa ile türbinlerde verim kaybı gibi olumsuz sonuçlar doğurduğunu belirtmiştir. Ancak vorteks çökeltim havuzlarında hava çekirdeği oluşması istenen bir durumdur. Çünkü hava girişi, orifis üzerindeki su derinliğini azaltarak havuz kenarı ile havuz merkezi arasındaki su yükseklik farkını artırır ve böylece ikincil akımları güçlendirir. Ayrıca, hava kabarcıkları orifisten geçen akım kesitini daraltarak orifisten atılan su debisinin azalmasına neden olur ve bu da su tasarrufu sağlar.

Vorteks çökeltim havuzlarında hız profillerinin belirlenmesi, sediment konsantrasyonu dağılımının doğru bir şekilde elde edilmesi açısından önemlidir. Çeçen, (1995) havuza giren sediment taneciklerinin orifisten dışarı atılncaya kadar sarmal (helisel) bir yörünge izlediğini belirtmektedir. Bu yörünge, havuz yarıçapına kıyasla oldukça uzun olduğundan havuz içerisinde yer yer daha yüksek hızların oluştuğu belirtilmiştir. Şekil 1.9 vorteks çökeltim havuzu içerisinde sediment taneciğinin izlediği yörüngeyi göstermektedir.



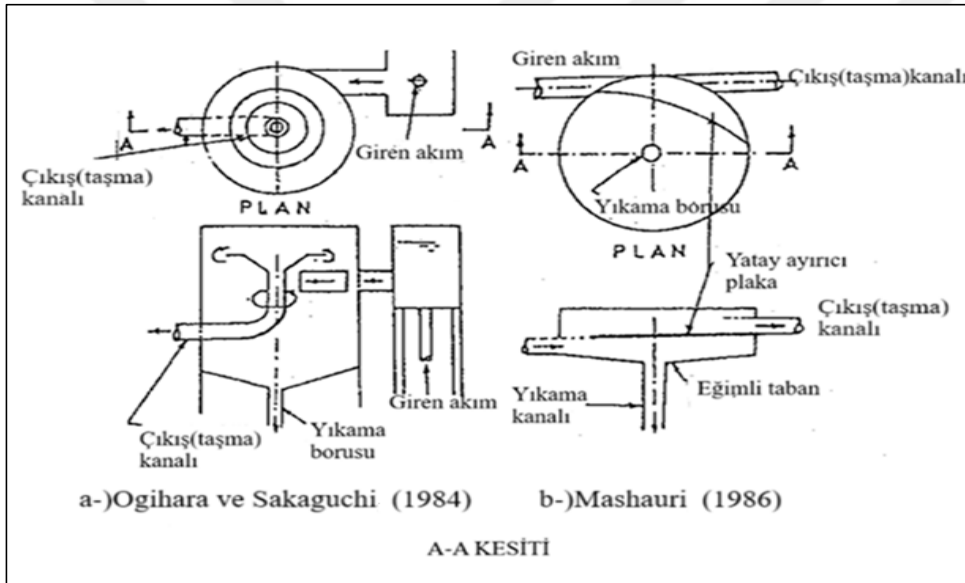
Şekil 1.9. Vorteks çökeltim havuzu içerisinde sediment taneciğinin izlediği yörünge (Taştan ve Barbaros, 2020)

Güçlü bir vorteks çekirdeği yıkama için kullanılan su miktarını azaltır. Su, akımın giriş noktasının hemen üstünde yer alan serbest yüzeyden alınır ve akım ile vorteks havuzuna giren akış arasına bazı durumlarda yerleştirilmiş yatay bir ayırıcı plakadan geçirilir. Yeterli boyutlara ve doğru konumlandırmaya sahip bu yatay ayırıcı plaka, vorteks havuzuna giren ve çıkan akımı aynı kesitte ayırır. Salakhov (1975) tarafından da benzer bir saptırma yöntemi geliştirilmiştir. Şekil 1.10 Salakhov (1975) ile Çeçen ve Beyazıt (1975) tarafından tasarlanan çökeltim havuzlarını göstermektedir.



Şekil 1.10. Salakhov (1975) ile Çeçen ve Beyazıt, (1975) tarafından tasarlanan çökeltim havuzları (Paul ve ark., 1991)

Şekil 1.10'da görüldüğü üzere havuzun etrafındaki yan duvar yüksekliği olması gereken değerden daha düşük tutulur. Böylece iri tane içermeyen üst tabaka akımı dışarı çıkar ve havuz etrafında inşa edilen dairesel açık kanalda toplanır ve ardından yönlendirilir. İri tanelerin ağırlık bileşenlerinden faydalanarak etkili bir yıkama sağlamak için havuzun tabanına merkezdeki orifis yönüne doğru bir eğim verilir. Vorteks tipi çökeltim havuzları diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında oldukça ekonomiktir ve hidroelektrik enerji üretiminde ve sulama sistemlerinde ön-yıkama tesisi olarak kullanılmaya uygundur. Özellikle iri sedimentin orifis yoluyla yıkanması için akımın sadece %3-10'u harcanmaktadır. Şekil 1.11'de görülen çeşitli prototip vorteks tipi ayırıcılar dünyanın birçok yerinde inşa edilmiş ve başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır.



Şekil 1.11. Ogihara ve Sakaguchi (1984) tarafından ve Mashauri (1986) tarafından tasarlanan çökeltim havuzları (Paul ve ark, 1991)

Ansari ve Khan (2014) ile Paul ve ark., (1991), vorteks çökeltim havuzlarının verimliliği üzerinde; havuz çapı, duvar yüksekliği, taban eğimi, orifis çapı, akım debileri ile giriş ve çıkış konumlarının önemli etkilerinin olduğu belirtilmektedir. Özellikle akımın teğetsel olarak havuza girmesi, merkezkaç kuvvetini artırarak akımın dönme hareketini güçlendirmekte ve bu sayede sediment uzaklaştırma verimini önemli ölçüde artırmaktadır.

Tez çalışmasının amacı ve kapsamı

Son yıllarda vorteks çökeltim havuzlarının verimliliğinin tahmininde kullanılan deneysel modellerin yanı sıra akışkan hareketini doğrudan çözümleyebilen yeni nesil hesaplamalı

akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımları, bu yapıların hidrodinamik davranışlarının daha ayrıntılı ve çabuk bir şekilde analiz edilmesini mümkün kılarak tasarım sürecini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, vorteks çökeltim havuzlarında sediment yıkama ve tuzaklama verimliliğini etkileyen parametreler ve akım ve sediment dağılımı karakteristikleri, Flow-3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Akıdaki sediment konsantrasyonunun, havuz içerisindeki hız dağılımlarının, havuzun sediment tuzaklama (ayırma) ve yıkama verimliliklerinin; havuzun geometrik konfigürasyonu, orifis çapı, sediment çapı ve eşik yüksekliği ile olan ilişkileri araştırılmıştır. HAD ile elde edilen çıktılar literatürdeki mevcut deneysel çalışma verileriyle karşılaştırılmıştır.

Tezin yapısı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

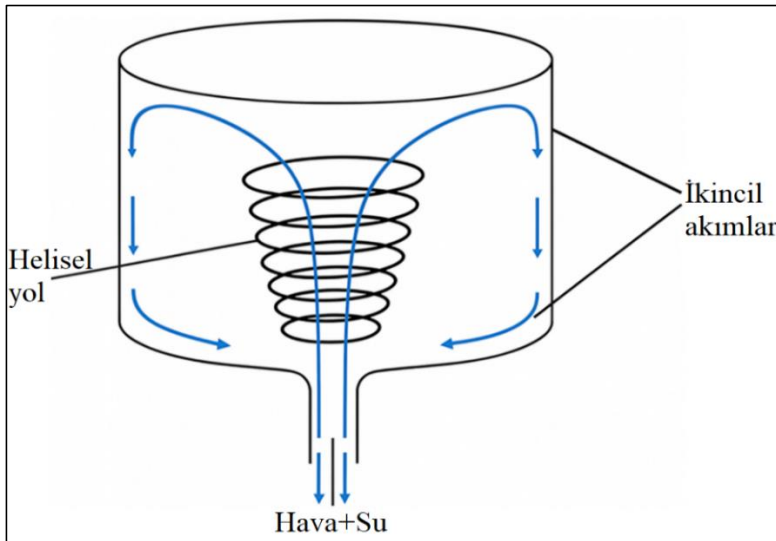
- Birinci bölümde çökeltim havuzları hakkında genel bilgilere yer verilmiş ve çalışma prensipleri özetlenmiştir.
- İkinci bölümde literatür taraması yapılmış, vorteks tipi çökeltim havuzlarıyla ilgili, deneysel, sayısal ve hem deneysel–sayısal yöntemlerin birlikte kullanıldığı çalışmalara değinilmiştir.
- Üçüncü bölümde, bu tez çalışmasında kullanılan Flow-3D-Hydro programı hakkında bilgiler verilerek vorteks çökeltim havuzlarının modellenmesinde kullanılan denklem ve parametrelere yer verilmiştir.
- Dördüncü bölümde HAD modelinin kalibrasyonu için izlenen yöntemler ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu kapsamda Athar (2000) tarafından önerilen Geometrik Tip-I deney düzeneğinin sonuçları referans alınmıştır.
- Beşinci bölümde yapılan analizlerden elde edilen sayısal sonuçlar grafik ve çizelgeler halinde sunulularak yorumlanmıştır.
- Altıncı bölümde, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

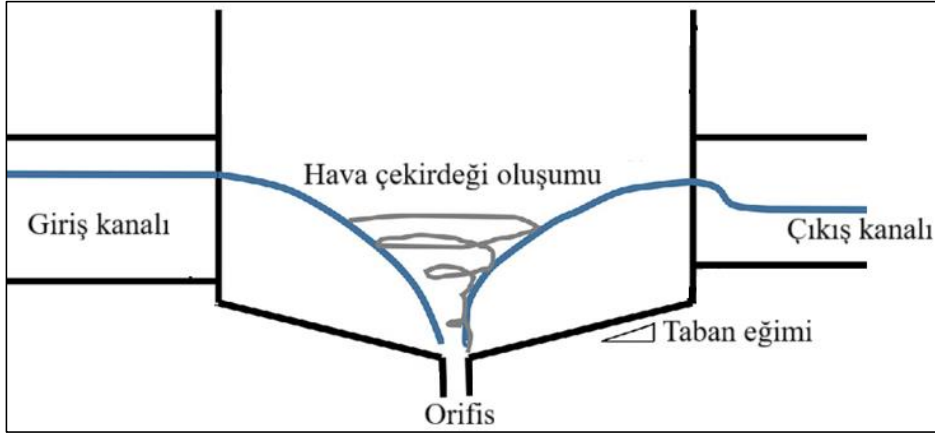
2.1. Vorteks Çökeltim Havuzu Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Vorteks çökeltim havuzu kavramı, akışkanın eğrisel bir yörünge boyunca hareket ederken sedimentin eğrinin iç tarafında çökmesi prensibine dayanmaktadır. Akım içerisindeki sediment taneleri, esas olarak akışta oluşan ikincil akımlar nedeniyle haznenin merkezine doğru hareket etmektedir.

Vorteks çökeltim havuzlarında giriş kanalı, havuza teğetsel olarak yerleştirilerek en büyük dönme uzunluğunun elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 2.1’de verilen ikincil akımlar, sediment tanelerini helisel bir yol izleyerek orifise yönlendirir. Orifisten uzaklaştırılan sediment, çıkış kanalına iletilir ve yeniden doğal akış sistemine bağlanır. Ayrıca, orifis merkezinde oluşan hava çekirdeği, orifis çapına bağlı olarak atılan su debisini azaltmakta ve havuzun hidrolik verimini artırmaktadır. Chapokpour ve ark. (2011), kanala giriş hızının artmasıyla birlikte merkezdeki hava çekirdeğinin orifise doğru hareket ettiğini belirtmektedir. Giriş hızının artışıyla Şekil 2.2’de gösterilen vorteksin daha belirgin bir şekilde oluştuğu ve bunun sonucunda vorteks çökeltim havuzunun sediment tuzaklama veriminin arttığı gözlemlenmiştir.

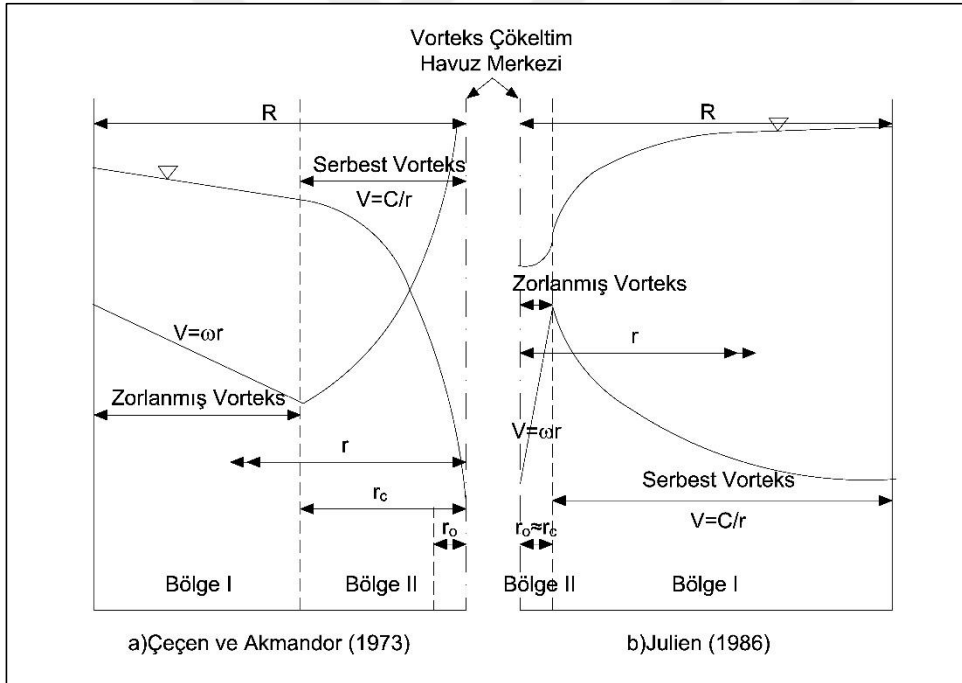


Şekil 2.1. Vorteks çökeltim havuzunda ikincil akımların ve helisel yolun oluşması (Hajiahmadi ve ark., 2016)



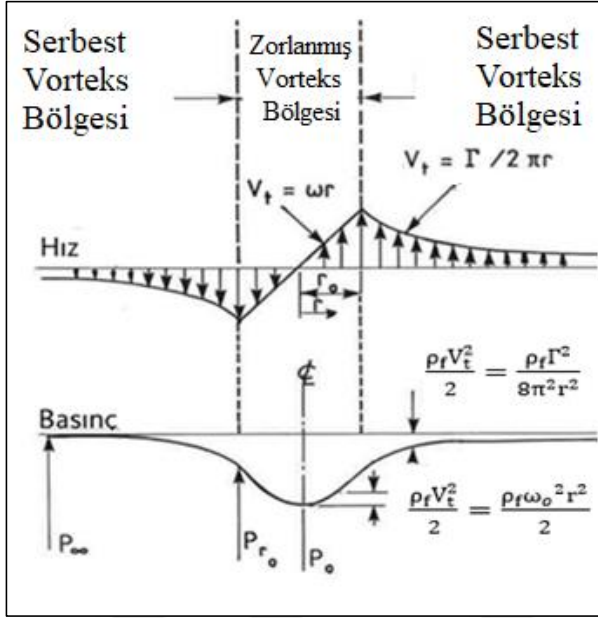
Şekil 2.2. Vorteks çökeltim havuzunda hava çekirdeği oluşumu (Nikou ve ark., 2021)

Çeçen ve Akmandor (1973) ve Julien (1986), vorteks akışının temel özelliklerini ve Rankine tipi birleşik vorteks modelini incelemiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Vorteks çökeltim havuzundaki farklı akım karakteristikleri (Paul ve ark., 1991)

Vorteks çökeltim havuzunda akış alanları incelendiğinde, Şekil 2.4'te gösterilen dönüşsüz akış bölgelerinde (serbest vorteks bölgesinde), akışkan herhangi bir dönme hareketi yapmamaktadır. Buna karşılık, dönel akış bölgelerinde akışkan açısal bir hızla dönmektedir. Özellikle zorlanmış vorteks hareketinde, tüm akışkan rijit bir cisim gibi aynı açısal hızla dönmektedir. Bu bölgelerdeki hız dağılımları ise farklı bağıntılarla ifade edilmektedir.



Şekil 2.4. Rankine tipi vorteks modelinde hız ve basınç dağılımı (Ansari, 2008)

Burada P_∞ , vorteksten uzak bir noktadaki basıncı, P_{r_o} , belirli bir radyal mesafedeki basıncı; P_o , orifiste merkezi basıncı; ρ_f , akışkan yoğunluğunu; Γ , çevrinti katsayısını; ω_o , açısal hızı; V_t , teğetsel hızı göstermektedir. Bu hız ve basınç bağıntıları vorteks çökeltim havuzundaki hareketin matematiksel olarak tanımlanmasını sağlayarak akış karakteristiklerinin anlaşılmasına temel oluşturmaktadır.

Zorlanmış vorteks bölgesinde teğetsel hız (V_t), açısal hız (ω_o) ile radyal mesafenin (r) çarpımıdır ve Eş. (2.1)'de verilmektedir.

$$V_t = \omega_o r \quad (2.1)$$

Serbest vorteks bölgesinde teğetsel hız, çevrinti (sirkülasyon) katsayısı (Γ) ve radyal mesafeye bağlı olarak değişmektedir ve Eş. (2.2)'de verilmektedir.

$$V_t = \Gamma / (2\pi r) \quad (2.2)$$

Basınç dağılımı açısından da önemli farklar bulunmaktadır. Serbest vorteks hareketinde basınç ilişkisi Eş. (2.3)'te verilmektedir.

$$(\rho_f V_t^2) / 2 = (\rho_f \Gamma^2) / (8\pi^2 r^2) \quad (2.3)$$

Zorlanmış vortekste basınç dağılımı Eş. (2.4)'te ifade edilmektedir.

$$(\rho_f V_t^2)/2 = (\rho_f \omega_0^2 r^2)/2 \quad (2.4)$$

Julien (1985) serbest ve zorlanmış vorteks akımlarında sediment konsantrasyonunu teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Julien (1985) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada dairesel bir havuzda, vorteks akımı oluşturulup sediment taşınımı ve birikimi incelenmiştir. Deneyler, laboratuvar ortamında bulunan silindirik bir havuz içerisinde yürütülmüştür. Deneyde, belirli bir giriş debisi ile havuza su verilmiş, akış kararlı hale geldikten sonra sistemden orifis yoluyla çıkış sağlanmıştır. Bu sırada, havuz tabanında biriken sediment miktarı ve akım içerisindeki sediment konsantrasyon profili ölçülmüştür. Sediment konsantrasyonu ölçümleri için akımın farklı yarıçaplarında 30 ml hacminde örnekler alınmış ve bu örnekler pipet yardımıyla toplanarak kurutulmuştur. Örnekler $\pm 0,1$ mg hassasiyetle tartılmıştır. Bu yöntemle akım içerisindeki sediment yoğunluğunun radyal dağılımı belirlenmiştir.

Svarovsky (1981) askıdaki sediment davranışını tanımlamak için en kritik parametrenin çökelme hızı olduğunu belirtmiştir. Çökelme hızını sediment hareketini tanımlamak için kullanmıştır.

Erken dönem çalışmalarda havuz çapı , giriş debisi ve ortalama sediment çapı üzerine deneyler yapılmıştır. Tuzaklama verimi; tane çapı, sediment ile akışkan arasındaki birim hacim ağırlığı oranı ve giriş debisine bağlı olarak açıklanmıştır. Tane çapının büyümesi ve sediment ile akışkan arasındaki yoğunluk farkı ilişkisi ile birlikte tuzaklama verimliliğine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca giriş debisi koşullarının tuzaklama verimine olan etkisi incelenmiştir.

Chrysostomou (1983) geometrik tasarımın tuzaklama verimliliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmada çevresel derinlik oranı (h_2/h_1) farklı değerler için incelenmiş ve bu kapsamda 0.00 , 0.60 ve 1.10 değerleri test edilmiştir (giriş kanalı veya havuz giriş bölgesindeki su derinliği h_1 , havuz içindeki su derinliği h_2 'dir). Deneysel sonuçlar en uygun çevresel derinlik oranının 0.60 olduğunu ortaya koymuştur. Daha derin ($h_2/h_1 > 0.60$) veya

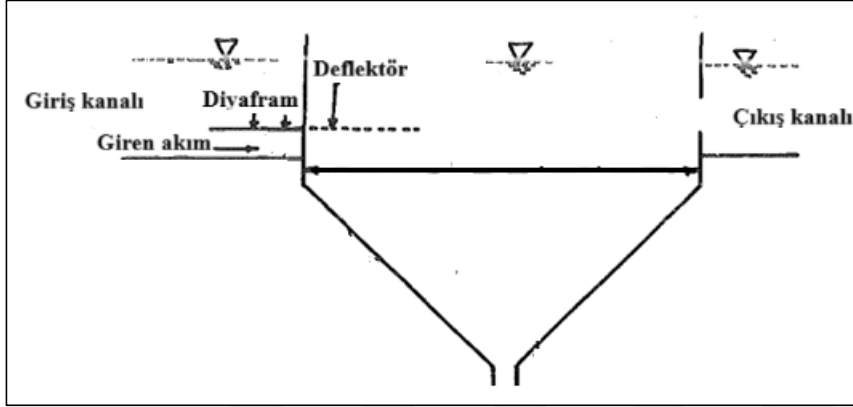
daha sığ ($h_2/h_1 < 0.60$) değerler akımın bekleme süresini düşürerek tuzaklama verimliliğini azaltmıştır. Ayrıca vorteks çökeltim havuzunda akımın bekleme süresi (residence time) ölçülmüş ve farklı çap oranlarının etkileri incelenmiştir. B, giriş kanalı taban genişliği ve D_t , havuz çapı farklı oranlarda incelenmiştir. Daha büyük çaplı ($D_t = 7.86B$) ve daha küçük çaplı ($D_t = 5B$) havuzlar arasında bekleme süresi farkının yalnızca %10 seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda havuz çapının 5B olarak seçilmesinin hem ekonomik hem de hidrolik açıdan yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Rea (1984) fotoğraflama teknikleri kullanarak vorteks yapısında ikincil akım desenlerini analiz etmiştir. Döngüsel olarak tekrarlanan ve kararsız olan bu akım yapılarının eş merkezli dönen silindirdeki akışa benzer özellikler taşıdığını göstermiştir.

Hite ve Mih (1994), sediment tanelerinin akışkan hareketine bağlı olarak helisel yörüngeler izlediğini belirtmiştir.

Paul ve ark. (1991) vorteks çökeltim havuzu tasarımını kapsamlı şekilde incelemiştir. Araştırmalar hem teorik hem de deneysel yöntemlere dayandırılmıştır. Öncelikle havuz çapının kanal taban genişliğinin beş katı ($D_t = 5B$) olarak alınmasının uygun olduğu belirlenmiştir. Bu değer Amerikan uygulamalarında önerilen 6B kriterine göre daha ekonomik olup benzer verim sağlamaktadır. Havuz taban eğiminin ise %10'dan daha dik olmaması gerektiği aksi durumda su atma oranının arttığı fakat verimliliğin artmadığı görülmüştür. Ayrıca vorteks çökeltim havuzunun giriş kanalına ve tercihen çıkış kanalına teğet olarak yerleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu durum, akışın taşma savağına ulaşmadan önce daha uzun bir yol kat etmesini sağlayarak, sediment tuzaklama verimliliğinin artmasına katkıda bulunmuştur. Yapılan değerlendirmelerde, önerilen formüller kullanılarak tuzaklama verimliliğinin güvenilir şekilde tahmin edilebileceği belirtilmiştir. Bu değer, klasik çökeltim havuzlarında gözlenen %40–60'lık kullanım oranına kıyasla oldukça yüksektir ve vorteks çökeltim havuzlarında hacmin daha verimli kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca sediment tane boyutuna göre diyafram ve deflektör kullanımına ilişkin öneriler geliştirilmiştir. Vorteks çökeltim havuzlarında diyafram ve deflektör elemanları sistemin hidrolik performansını ve sediment tuzaklama verimini artırmak amacıyla kullanılan yardımcı elemanlardır. Şekil 2.5'te görülen diyafram havuza giren akışkanın akış özelliklerini düzenlemek için kullanılır. Deflektör ise giriş kanalından gelen akımın doğrudan çıkışa yönelmesini engelleyerek akımın helisel bir yol izlemesine

imkan verir. Diyafram ve deflektörün uygun konumlandırılması vorteks çökeltim havuzu tasarımını doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur. Tane boyutunun 0.5 mm'den küçük olduğu durumlarda giriş kanalına diyafram ve havuza deflektör yerleştirilmesinin faydalı olduğu daha iri sedimentler ($d > 0.5$ mm) için ise bu araçların zorunlu olmadığı ifade edilmiştir.



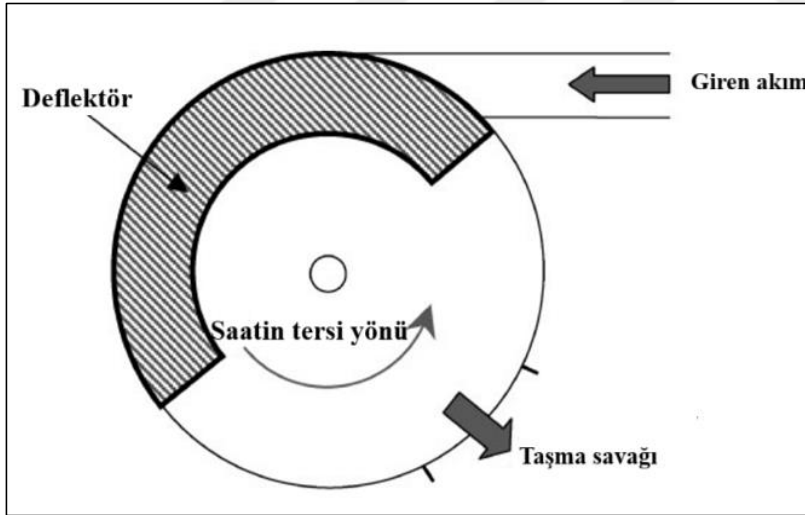
Şekil 2.5. Deflektör ve diyaframın havuz içerisindeki konumları (Paul ve ark., 1991)

Athar ve ark. (2002) akım içerisinde 0,055 mm - 0,22 mm aralığındaki ince taneli sedimentleri dahi yüksek verimle yıkayabilen geometrik konfigürasyon bulmuşlardır. Analiz amacıyla çalışmalarından elde edilen deneysel veriler daha önce farklı laboratuvarlar ve saha koşullarında çeşitli araştırmacılar tarafından toplanan verilerle birlikte değerlendirilmiştir. Mevcut bağıntıların tatmin edici sonuçlar vermediği görülmüş ve bu nedenle vorteks çökeltim havuzlarında sediment tuzaklama verimini belirlemek üzere yeni bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Curi ve ark. (1979) ve Paul ve ark. (1991) tarafından önerilen sediment tuzaklama verimliliği bağıntıları, laboratuvar ve saha verileri kullanılarak geniş bir aralıkta incelenmiştir. Yapılan analizler bu bağıntıların tüm veri setleri için gerçekçi tahminler üretmekte yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Bu nedenle mevcut veriler yeniden değerlendirilmiş ve yeni bir bağıntı geliştirilmiştir. Akım ve tuzaklama parametrelerinin verimlilik üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve sediment tuzaklama verimliliği için genel bir ilişki önerilmiştir. Mevcut bağıntılar, verilerin yalnızca %55'inden daha azı için $\pm\%40$ hata sınırları içinde sonuç verebilirken, önerilen yeni bağıntı tüm veri setleri için bu hata sınırları içerisinde kalabilmektedir. Bu durum, geliştirilen eşitliğin literatürdeki mevcut bağıntılara kıyasla daha güvenilir ve geçerli olduğunu ortaya koymaktadır.

Keshavarzi ve Gheisi (2006), tuzaklama veriminin artırılması amacıyla ince taneli sedimentler ile denemeler yapmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında sedimentlerin sabit hızda akıma verilmesini sağlamak amacıyla kum saati prensibine dayalı yeni bir sediment besleyici tasarlamıştır. Bu düzenek sayesinde, sediment akıma tamamen sabit bir hızda verilebilmiş ve besleme debisi 70.5 g/s olarak belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılan sediment boyutu 0,074 – 0.30 mm aralığında seçilmiştir. Deneylerde orifisten ve çıkış kanalından uzaklaştırılan sediment ayrı ayrı kumaş torbalarda toplanmış ve kurutulduktan sonra tartılarak ölçüm yapılmıştır. Model öncelikle saat yönünün tersine akış koşullarında test edilmiş ve kullanılan tane boyutu için vorteks çökeltim havuzunun tuzaklama verimi yaklaşık %60 olarak bulunmuştur. Ayrıca giriş debisi üzerine bir yönlendirici deflektör yerleştirilmiştir. Deflektör saat yönünün tersine konumlandırıldığında merkezi hava çekirdeğinin sapmasına neden olmuş ve tuzaklama verimi düşmüştür. Ancak deflektörün saat yönünde yerleştirildiği durumda merkezi hava çekirdeği merkez orifis üzerinde kararlı hale gelmiş ve tuzaklama verimi %68'e yükselmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Girişte deflektör bulunan, akış yönünün tersine bakan havuzun şematik diyagramı (Keshavarzi ve Gheisi, 2006)

Gheisi ve ark., (2006) vorteks çökeltim havuzunun tabana yakın türbülanslı sınır tabakasında meydana gelen ani patlama (bursting) olayları ve bunlarla ilişkili kayma gerilmelerinin, sediment tuzaklama sürecinde etkili olduğunu ifade etmiştir. Bu kapsamda vorteks çökeltim havuzunun fiziksel modelinin tabana yakın 48 farklı noktasında üç boyutlu hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tabanda oluşan sediment birikim desenleri, havuza giren akım, yıkama akımı ve çıkış akımının etkisiyle şekillenen üç ayrı bölgeyi ortaya çıkarmıştır. Bu bölgeler

Resim 2.1’de verilmiştir.

- Yıkama akımı bölgesi sediment birikiminin gerçekleşmediği alandır.
- Giriş akımı bölgesi sedimentin büyük miktarının biriktiği alandır.
- Çıkış taşma bölgesi ince bir sediment tabakasının gözlendiği alan olarak tanımlanmıştır.

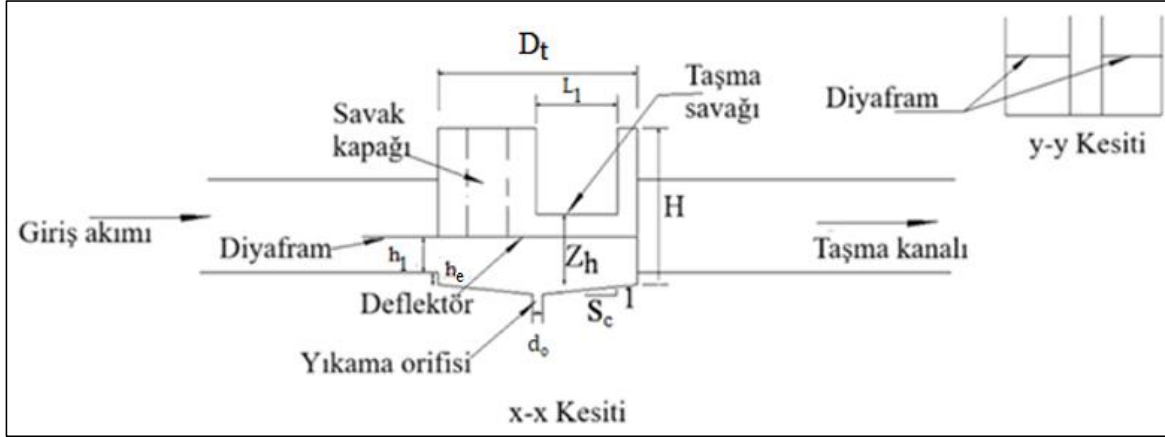
Vorteks çökeltim havuzu tabanında zamanla belirli bir sediment birikim deseni oluşmakta ve bu desen havuz tabanındaki ikincil akımların etkisiyle gelişmektedir. Vorteks çökeltim havuzu tabanı üç baskın akım etkisindedir. Bunlardan ilki yıkama akımı olup merkezi orifis çevresinde dairesel bir bölge oluşturur ve bu bölgede sediment birikimi görülmez. Bu alan yıkama akımı bölgesi olarak adlandırılır. İkincisi giriş akımı bölgesi olup havuz duvarına yakın bir bölgede oluşur. Giriş ağzından ($\theta = 0$) başlayarak yaklaşık 180° boyunca taşma savağı yönüne uzanan bölgede büyük miktarda sediment birikimi olmakta ve bu alan giriş akımı bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Üçüncü akım ise çıkış (taşma) akımıdır. Bu akım çıkış bölgesinde 180° – 270° boyunca ince bir sediment tabakası oluşturur ve çıkış akımı bölgesi olarak tanımlanır.



Resim 2.1. Çalışmada belirtilen hidrolik bölgeler (Gheisi ve ark., 2006)

Niknia ve ark. (2011), tuzaklama verimini artırmak amacıyla giriş debisi üzerine tam dairesel bir deflektör yerleştirilmesini önermiştir (Şekil 2.7). Deneysel çalışmalar kapsamında sedimentin sabit hızda akıma verilebilmesi için iki farklı besleyici tasarlanmıştır. Bunlardan ilki kum saati prensibine göre sedimentin homojen beslenmesi için diğeri ise farklı boyutlarda sediment beslemesi için geliştirilmiştir. Sediment besleme hızı sabit 100 g/s olarak seçilmiş ve sediment tane boyutu ise 0,08 – 2,0 mm aralığında belirlenmiştir.

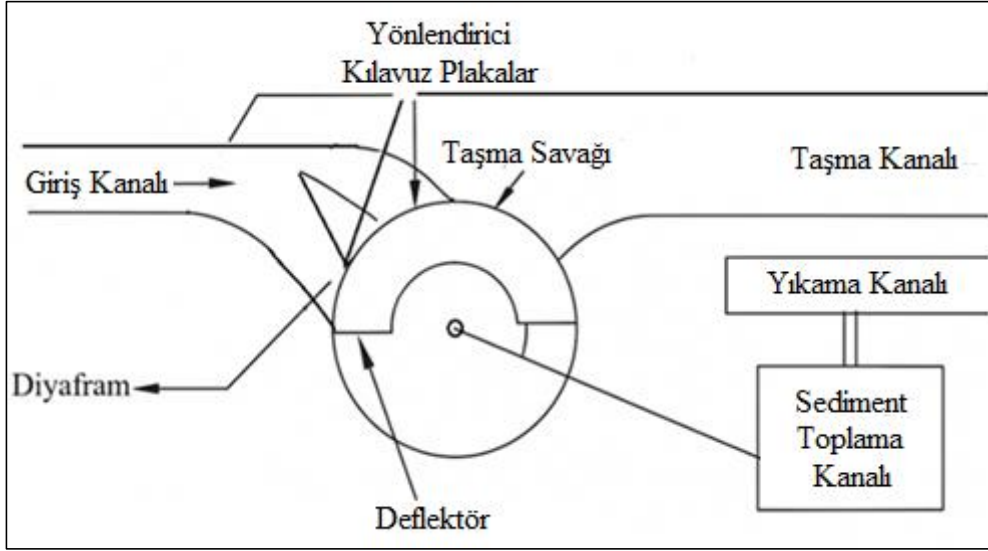
Deneylerde orifisten ve çıkış kanalından yıkanan sedimentler ayrı kumaş torbalarda toplanmış kurutulduktan sonra tartılarak ölçülmüştür. Model saat yönünün tersine olan akış koşulunda test edilmiştir.



Şekil 2.7. Vorteks çökeltim havuzunda sedimentin uzaklaştırma verimliliğinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği kesit görünümü (Niknia ve ark., 2011)

- D_t çökeltim havuzu çapıdır.
- L_1 taşma savağı uzunluğudur.
- H havuz duvarı yüksekliğidir.
- h_1 diyafram altı giriş akımı yüksekliğidir.
- h_e giriş kanalı eşik yüksekliğidir.
- Z_h havuz tabanı ile savak eşiği arasındaki yüksekliktir.
- d_o orifis çapıdır.
- S_c havuz taban eğimidir.

Yapılan deneyde ortalama tane boyutu 0.35 mm olan sediment için vorteks çökeltim havuzunun tuzaklama verimi yaklaşık %88 olarak bulunmuştur. Akış yapısını daha iyi anlamak amacıyla ise deflektör altındaki teğetsel, radyal ve eksenel hızlar kararlı durumda ölçülmüştür. Şekil 2.8’de vorteks çökeltim havuzunda askıda sedimentin tuzaklama verimliliğinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmada kullanılan düzenek verilmektedir.

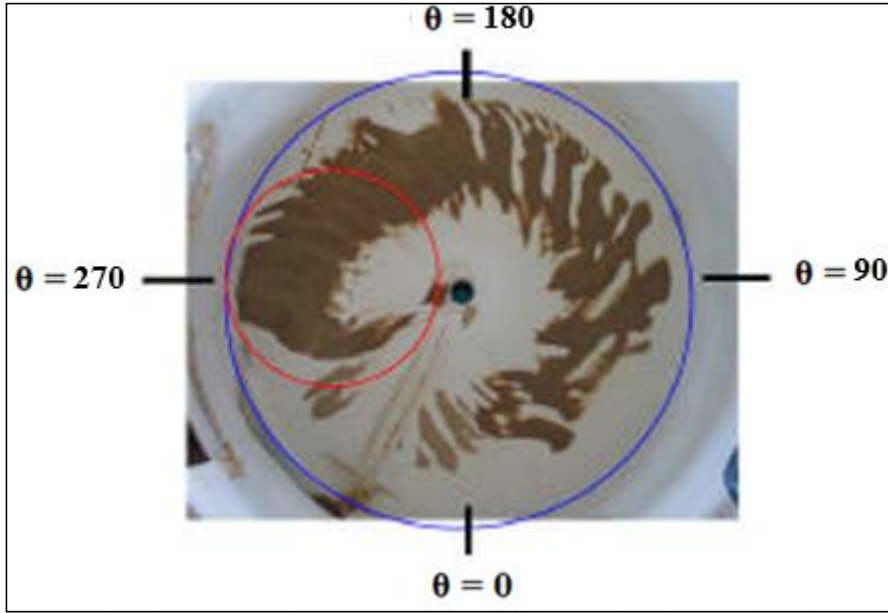


Şekil 2.8. Vorteks çökeltim havuzunda askıda sedimentin giderim verimliliğinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği plan görünümü (Niknia ve ark., 2011)

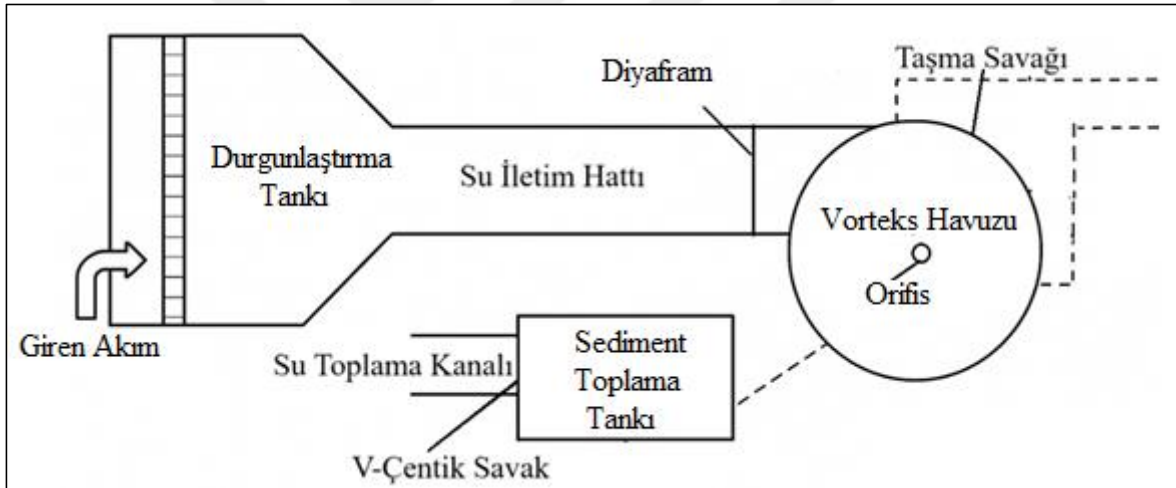
Chapokpour ve Farhodi (2011) vorteks çökeltim havuzunda akış yapısı ile sediment tuzaklama verimini incelemiştir. Deneyler sırasında farklı debilerde yüksek giriş hızları kullanılmıştır. Üç farklı boyuttaki sediment, üç ayrı besleme hızıyla sisteme verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre akım debisinin ve sediment besleme hızının artması havuzun tuzaklama verimini artırmıştır. Akış yapısını incelemek amacıyla kararlı durumda hız ölçümleri yapılmıştır. Analizler sonucunda farklı radyal kesitlerde farklı akım yapılarının olduğu ve bunun sediment tuzaklama sürecine etki edebileceği belirtilmiştir.

Teğetsel ve radyal hızlar farklı yatay kesitlerde incelendiğinde, tabanda sediment tanelerinin merkezdeki orifise doğru izlediği helisel (sarmal) yolun serbest yüzeye kıyasla daha uzun olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama tane boyutu 0.55 mm olan sediment için tuzaklama verimi %94'e ulaşmıştır. Ortalama tane boyutu 0.32 mm boyutunda %88 ve 0,27 mm boyutunda %82 tuzaklama verimi elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca 20.97 l/s debi ve 0.6 m/s giriş hızı koşullarında havuz tabanında oluşan sediment tabakasının dağılımı incelenmiştir.

Resim 2.2'de görüldüğü üzere 90° ile 135° arasındaki açısal bölgede kalın bir birikim tabakası, 225° ile 315° arasındaki açılarda ise daha ince birikim tabakası oluşmuştur. Şekil 2.9'da çalışmada kullanılan düzenek verilmektedir.



Resim 2.2 Havuz tabanında sediment birikim bölgeleri (Chapokpour ve Farhoudi, 2011)

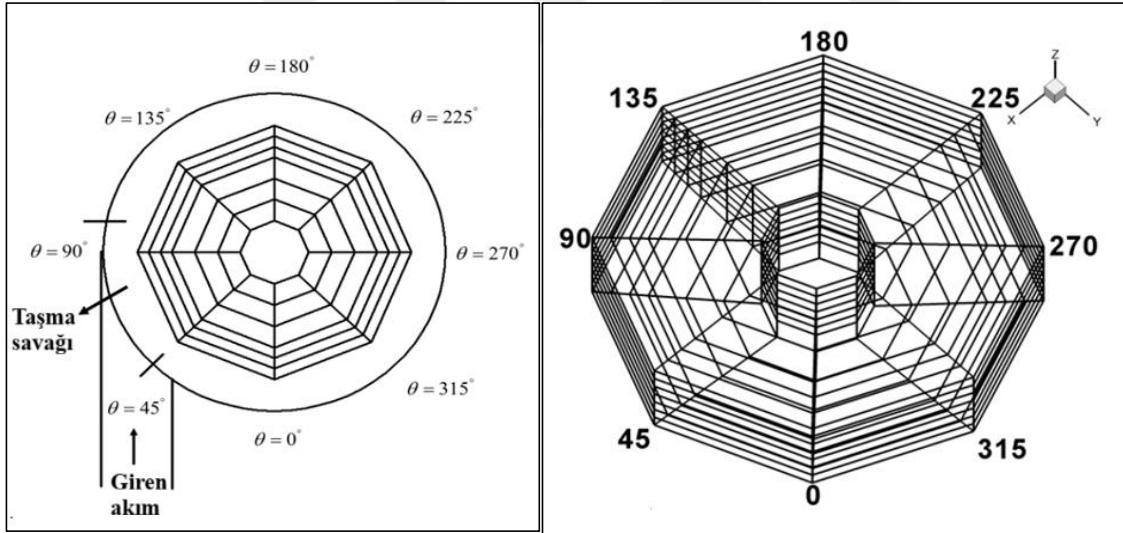


Şekil 2.9. Vorteks çökeltim havuzunda tuzaklama verimi ve akış yapısı üzerine yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği (Chapokpour ve Farhoudi, 2011)

Chapokpour ve ark. (2011) vorteks çökeltim havuzunda üç boyutlu türbülanslı akış alanını deneysel olarak incelemiştir. Havuz içerisindeki üç boyutlu hız bileşenlerini ölçmek amacıyla ADV cihazı kullanılmıştır. Deneysel ölçümler sonucunda farklı radyal kesitlerde zaman ortalamalı hız bileşenleri, türbülans şiddeti bileşenleri ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) belirlenmiştir. Teğetsel hız bileşeni radyal ve düşey hız bileşeninden daha büyük ölçülmüştür. Bu değer havuz merkezinde yüksek olup yan duvarlara doğru sabit bir değere yaklaşmaktadır.

Normalize edilmiş türbülans şiddeti bileşenleri ayrı ayrı incelenmiş, merkezi hava çekirdeği etrafında türbülans şiddetinin en yüksek seviyede olduğu ve yan duvarlara doğru azaldığı tespit edilmiştir. Bu eğilim giriş debisinin ve yan duvar taşma savağının doğrudan etkilendiği kesitlerde değişmiştir. Türbülans kinetik enerjisi dağılımı türbülans şiddetiyle benzer sonuçlar göstermiştir. Klasik çökeltim havuzlarından farklı olarak vorteks çökeltim havuzlarında daha yüksek giriş hızlarına ihtiyaç duyulduğu bu sayede hem hidrolik verimliliğin hem de sediment tuzaklama verimliliğinin arttığı belirlenmiştir. Giriş hızındaki artış güçlü bir merkezkaç kuvveti oluşturarak merkezi hava çekirdeğinin daha iyi şekillenmesine, orifis çapının küçülmesine ve dolayısıyla daha yüksek verim elde edilmesini sağlamıştır.

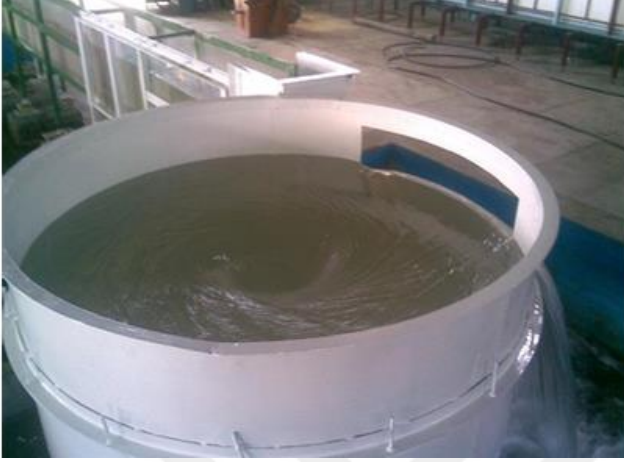
Chapokpour ve ark. (2012) vorteks çökeltim havuzunda akış yapılarının incelenmesine yönelik deneyler yapmıştır. Akımın hız özelliklerini belirlemek amacıyla Şekil 2.10'da gösterilen polar veri örgüsü tasarlanmıştır.



Şekil 2.10. Giriş ve taşma savağının konumunun yer aldığı hız ölçümü için veri örgüsü (Chapokpour ve ark., 2012)

Deneyler dört farklı debide gerçekleştirilmiş ve üç boyutlu akış hızları ölçülmüştür. Deneyler sonucunda havuzun radyal kesitlerinde iki boyutlu ve farklı türde ikincil akımlar tespit edilmiştir. Havuz içerisindeki radyal, teğetsel ve düşey hız bileşenlerinin görsel olarak ortaya konulması hedeflenmiş ve akış yapısının giriş hızına oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir. Giriş debisi arttığında hızda arttığından merkezdeki hava çekirdeği orifise doğru genişlemektedir. Bu durum, orifisten atılan debiyi kısıtlamaktadır. Giriş hızının artmasıyla birlikte vorteks güçlenmekte ve buna bağlı olarak merkezkaç kuvveti artmaktadır.

Dolayısıyla vorteks çökeltim havuzunun sediment tuzaklama verimi de artmaktadır. Radyal kesitlerde saat yönünde ve saat yönünün tersinde oluşan vortekslerin yanı sıra çeşitli noktalarda türbülansa bağlı yerel çöküntülerde gözlemlenmiştir.



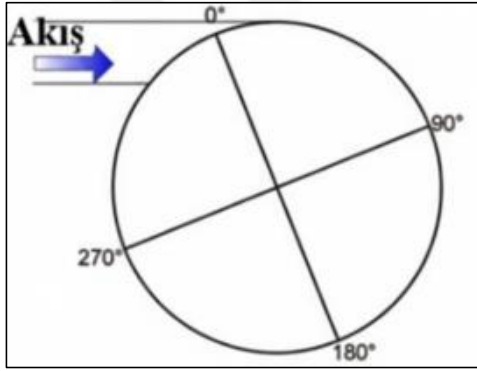
Resim 2.3. Çalışmada kullanılan vorteks çökeltim havuzu (Chapokpour ve ark.,2012)

Sediment tuzaklama sürecini anlamak amacıyla yatay düzlemde akım çizgileri ve hız vektörleri çizilmiş, sediment tanelerinin hareketleri incelenmiştir. Bu incelemelerde tanelerin helisel çökeltim yollarını takip ettiği görülmüştür. Merkezi hava çekirdeği yakınında düşey hız yukarı yönlü, havuz merkezinden daha uzak bölgelerde aşağı yönlüdür. Tabana yakın konumlarda sediment tanelerinin daha uzun helisel yollar izleyerek orifise ulaştığı ve bu nedenle orifis çevresinde daha yüksek sediment yoğunluğu olduğu belirlenmiştir.

Athar ve Ansari (2013), vorteks çökeltim havuzunun sediment tuzaklama verimi üzerinde çap ve genişlik oranının etkilerini ortaya koyan deneyler yapmıştır. Çap oranı (D_T/d_o) vorteks çökeltim havuzu çapının (D_T) alttaki çıkış orifisinin çapına (d_o) oranıdır. Bu oran büyüdükçe orifis görece küçük kalır. Bu durum suyun havuz içerisinde daha uzun süre kalmasına imkan verir. Ancak bu oran aşırı büyüdüğünde vorteksin zayıflaması da mümkün olabilmektedir. Genişlik oranı (D_T/B); havuz çapının (D_T) giriş kanalının genişliğine (B) oranıdır. Bu oranın küçük olması halinde giriş akımı güçlü olur ve kuvvetli bir vorteks oluşur. Ancak bu oran aşırı büyük olduğunda havuz çok geniş kalır ve sistem sıradan bir çökeltim havuzu gibi davranmaya başlar. Çap oranı 10–15 aralığında verimin en yüksek olduğu belirlenmiştir. Çap oranının artması durumunda vorteks kuvveti zayıflamakta dolayısıyla hızlar da azalmaktadır. Daha düşük çap oranı değerlerinde havuz merkezinde büyük bir hava çekirdeği oluşmaktadır. Bu nedenle en yüksek sediment tuzaklama verimi için en uygun çap

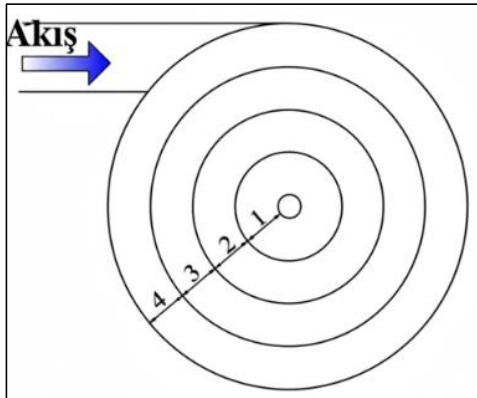
oranının 10–15 aralığında olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Sediment tuzaklama verimi genişlik oranı ile de artış göstermektedir. Genişlik oranı 7–8 değerlerinde verim en yüksek seviyeye ulaşmakta ve sonrasında azalmaktadır. Genişlik oranı 7.5'ten büyük olduğunda giriş koşulunun etkisi azalmaktadır. Bu durumda dönme kuvvetlerinin önemi azalmakta ve havuz klasik bir çökeltim havuzu gibi davranmaktadır. Genişlik oranı 7.5'ten küçük olduğunda dönme kuvvetleri çökeltim sürecinde etkili olmakta ve havuz gerçek bir vorteks çökeltim havuzu gibi davranmaktadır.

Hajiahmadi ve ark. (2014), araştırma kapsamında Şekil 2.11'de verilen 90°'lik radyal kesitlere ayrılmış vorteks çökeltim havuzuna yerleştirilen eğimli batık plakaların tuzaklama verimi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelenmiştir.



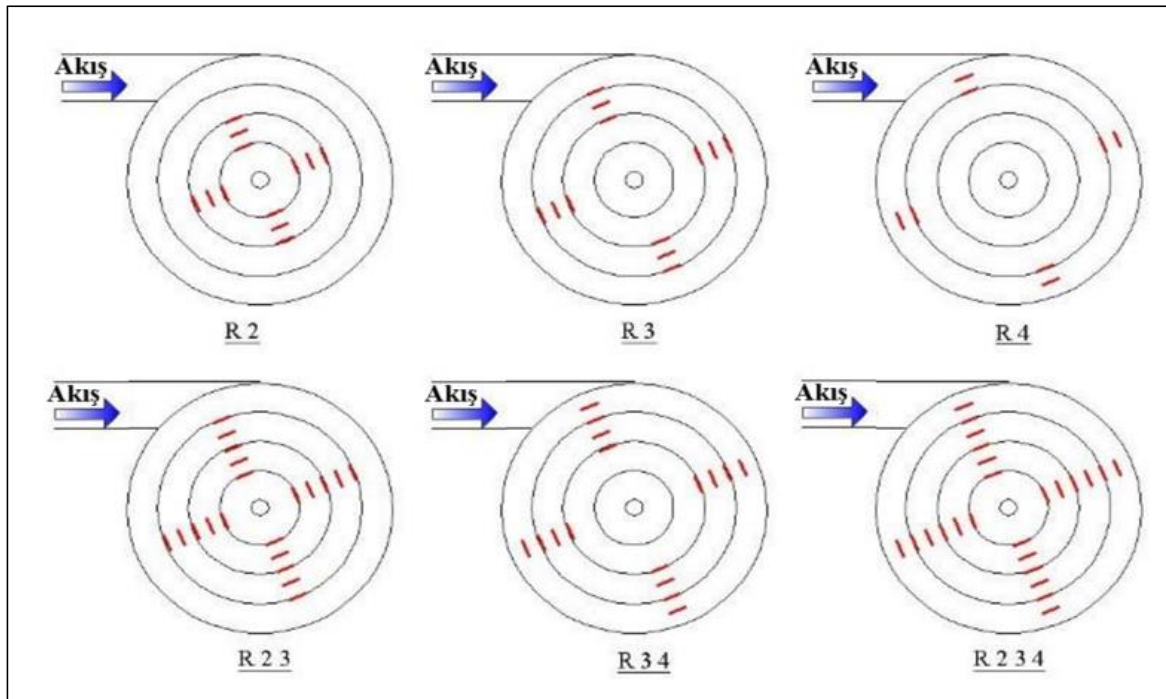
Şekil 2.11. 90°'lik radyal kesitte plaka yerleştirme bölgeleri (Hajiahmadi ve ark., 2014)

Plakalar bulundukları bölgeye göre adlandırılmış ve Şekil 2.12'de verildiği üzere altı farklı konumda yerleştirilmiştir. Bu altı farklı konum Şekil. 2.12 ile (R2, R3, R4, R23, R34 ve R234) verilmektedir.



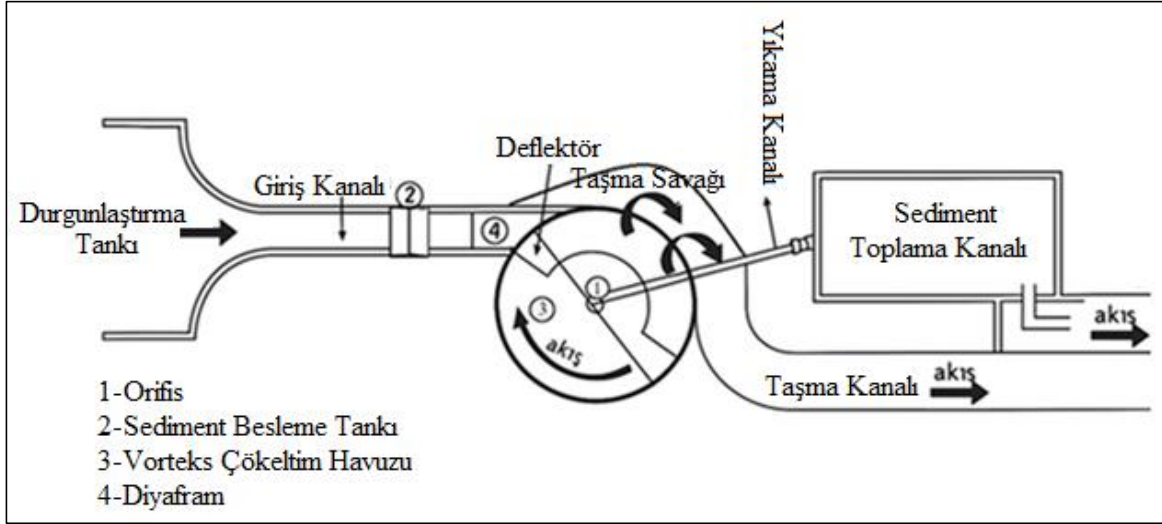
Şekil 2.12. Havuz tabanında 2, 3 ve 4 numaralı plaka yerleştirme bölgeleri (Hajiahmadi ve ark., 2014)

Deneyler 96 cm yüksekliğe, 206 cm çapa ve %10 taban eğimine sahip bir fiziksel model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda 45 l/s ve 37 l/s olmak üzere iki farklı debi ve 59 mm, 46 mm ve 36 mm çaplarında üç farklı orifis kullanılmıştır. Sediment olarak 0,22 mm homojen agregalar tercih edilmiştir. Deneylerde batık plakaların altı farklı konuma yerleştirilmesiyle elde edilen tuzaklama verimleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar plakaların orifisten daha uzak konumlara yerleştirilmesi durumunda verimin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 2.13'te gösterilen R3, R4 ve R3-4 havuz tabanından sedimentin uzaklaştırılması için en uygun yerleşimler olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.13. Farklı tür plaka yerleşim örnekleri (Hajiahmadi ve ark., 2014)

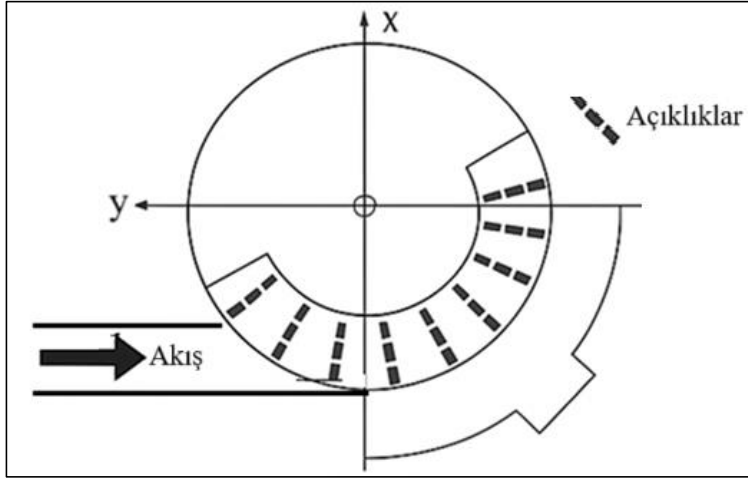
Ayrıca deneysel bulgulara göre vorteks çökeltim havuzuna batık plakaların yerleştirilmesi, orifis çapının büyümesiyle birlikte atılan debiyi ve tuzaklama verimini artırmaktadır. Batık plakalı vorteks çökeltim havuzlarında tuzaklama verimi sırasıyla orifis çapından, giriş debisinden ve plakaların radyal uzaklığından etkilenmektedir. Şekil 2.14.'de çalışmada kullanılan deney düzeneği verilmektedir.



Şekil 2.14. Hajiahmadi ve ark., 2014 çalışmasında kullanılan deney düzeneği

Mu ve ark. (2021) çalışmasında, vorteks çökeltim havuzlarında boşluklu deflektörlerin kullanımı, akışın yönünü ve hız dağılımını düzenleyerek sediment birikimini azaltmada etkili bir iyileştirme yöntemi olarak öne çıkmıştır. Elde edilen bulgulara göre, deflektördeki açıklık konumu ve açıklık oranı, merkezde oluşan hava çekirdeği boyutunu önemli ölçüde etkilemektedir. Açıklık oranı arttıkça hava çekirdeğinin merkeze uzaklığı artmakta, buna karşılık hava çekirdeği boyutu ve vorteks akım hızı küçülmektedir.

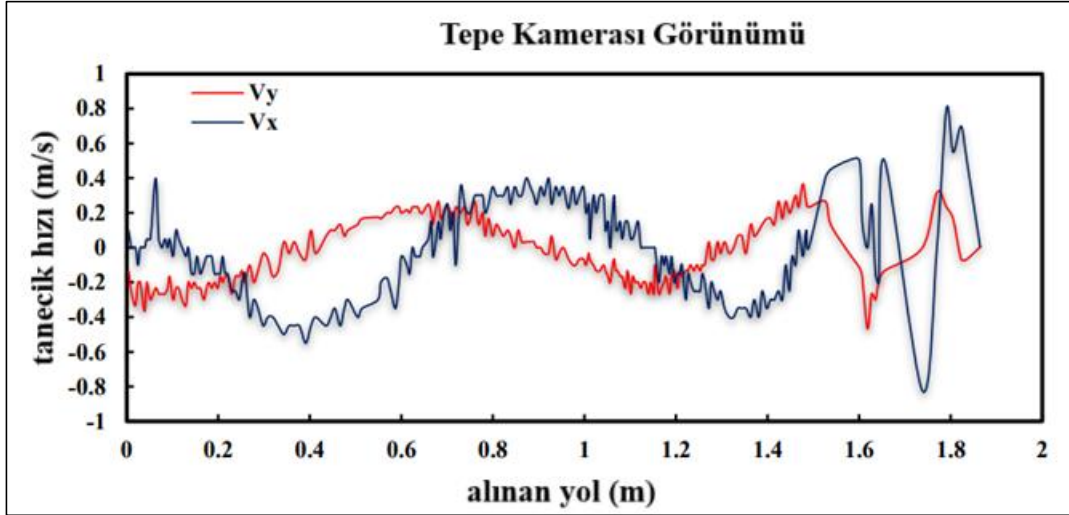
Deflektörün yalnızca dış taşma bölgesine açıklık uygulanması durumunda, hava çekirdeğinin merkezden sapma mesafesi azalmış ve çekirdek boyutu, açıklıksız orijinal vorteks çökeltim havuzu sisteminde gözlenen değerlere daha yakın hale gelmiştir. Ayrıca, yalnızca dış taşma bölgesinin delindiği deflektör tasarımlarında, sediment tuzaklama verimliliği ve su atma oranı, orijinal tasarımla benzer düzeyde kalırken, deflektör üzerindeki sediment birikimi önemli ölçüde azalmıştır. Deflektör üzerindeki açıklık oranının vorteks çökeltim havuzu performansı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, çok küçük açıklık oranları deflektör üzerinde sediment birikimini artırırken, aşırı büyük açıklık oranları sediment tuzaklama verimliliğinde belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Şekil 2.15’de vorteks çökeltim havuzunda deflektör tasarımında kullanılan açıklıklar gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Vorteks çökeltim havuzunda deflektör tasarım optimizasyonu için açıklıklar (boşluklar) (Mu ve ark., 2021)

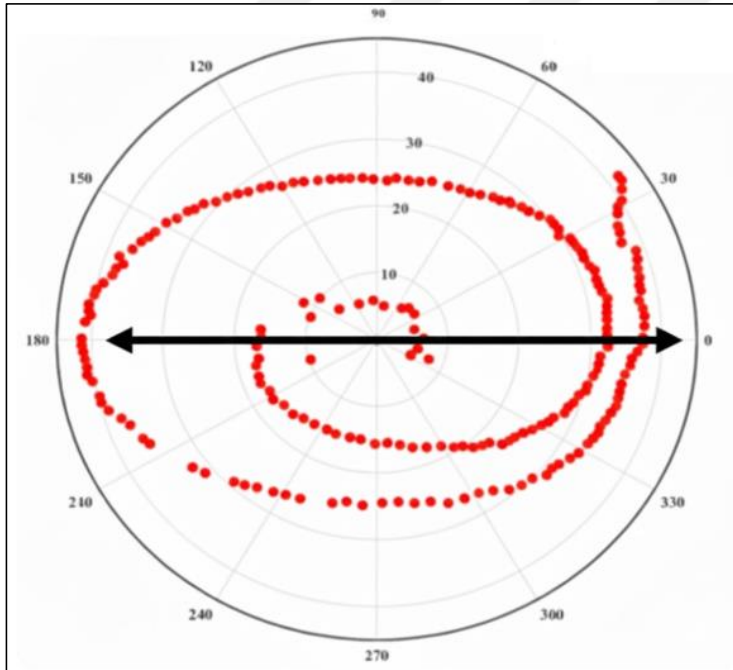
Dalır ve ark. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada sulama kanalları ile içme ve atıksu arıtma tesislerinde kullanılan vorteks çökeltim havuzlarının yıkama ve tuzaklama verimlilikleri laboratuvar ortamında incelenmiştir. Çalışmada, giriş debisi, merkezi orifis çapı, sediment tane çapı, eşik yüksekliği ve çıkış kanalı yüksekliği gibi parametrelerin, vorteks çökeltim havuzunun yıkama ve tuzaklama verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yıkama verimliliği için en etkili parametre %40 ile giriş debisi iken en az etkili parametre %0.4 ile orifis çapı olmuştur. Tuzaklama verimliliği için en etkili parametre %43 ile tane çapı olurken en az etkili parametre %6.90 ile çıkış kanalı yüksekliği olarak belirlenmiştir.

Mehrabani ve ark. (2022) deneylerinde özgül ağırlığı 1.41 olan küresel taneler kullanmıştır. Bu tanecikler havuzdan 37 cm ve 1.5 m mesafelerde Athar ve ark., (2003) çalışmasında belirtilen sediment enjeksiyon noktalarından bırakılmıştır. Her iki boyuna mesafe için taneler dokuz farklı noktadan bırakılmış ve her deney beş kez tekrarlanmıştır. Deneylerde görüntü almak için iki adet kamera kullanılmıştır. Taneler izlenerek radyal, teğetsel ve düşey yöndeki hızlar, Parçacık İzleme Tekniği (PTV) ve MATLAB 2020 yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Ayrıca tanelerin hareket yolu çizilmiş ve tane hızları akım hızlarıyla karşılaştırılmıştır. Vorteks çökeltim havuzu içerisindeki tane hareketi ve hız bileşenlerinin zaman serileri Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16. Sinüzoidal hız desenleri (Mehrabani ve ark., 2022)

Şekil 2.17'de görüldüğü üzere 150° – 210° ve 330° – 30° aralığındaki kesitlerde tanecikler duvara doğru, diğer kesitlerde orifise doğru yönelmektedir. Bu davranışın giriş ve çıkış kanalı konumundan kaynaklandığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.17. Farklı açısal kesitlerde sediment taneciklerinin hareketi (Mehrabani ve ark., 2022)

Nikou ve ark. (2025) tipik bir vorteks çökeltim havuzunun performansını sediment tuzaklama verimliliği, akış verimliliği ve giriş kanalı verimliliğini dikkate alınarak değerlendirmiştir. Çalışmada, hidrolik ve geometrik parametrelerin vorteks çökeltim havuzu performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. En iyi koşullarda giriş kanalı verimliliği

%94.09, sediment tuzaklama verimliliği %69.40 ve yıkama verimliliği %91.67 olarak bulunmuştur. Sediment uzaklaştırma verimliliği Eş. (2.5)'de verilmektedir. Tabandaki orifis aracılığıyla sedimentin ne kadarının sistemden dışarı atıldığını gösteren bir performans göstergesidir.

$$\eta_e = W_{\text{orifis}} / W_{\text{toplam}} \times 100\% \quad (2.5)$$

- W_{orifis} orifisten dışarı atılan sedimentin ağırlığıdır.
- W_{toplam} havuza giren toplam sedimentin ağırlığıdır.

Havuz tabanında biriken sediment yüzdesi (S_d) sediment tuzaklama verimliliği (η_o) ile sediment uzaklaştırma verimliliği arasındaki fark Eş. (2.6)'da hesaplanmaktadır.

$$\eta_o - \eta_e = S_d \quad (2.6)$$

Akış verimliliği Eş. (2.7)'de verilmektedir. Havuza giren debinin ne kadarının taşma (çıkış) kanalı üzerinden sistemden uzaklaştırıldığını gösterir. Akış verimliliği su atma oranı ile karıştırılmamalıdır. Su atma oranı, giren debinin çıkış kanalından atılan debiye değil orifisten atılan debiye oranıdır. Yıkama verimliliği de aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\eta_{\text{flow}} = (Q_{\text{out}} / Q_{\text{in}})100 \quad (2.7)$$

- Q_{in} havuza giren toplam debi
- Q_{out} çıkış kanalından atılan debi

Giriş kanalı verimliliği Eş. (2.8)'de verilmektedir. Giriş kanalına verilen sedimentin çökeltim havuzuna ulaşmadan önce kanalda çöken miktarını gösterir. Giriş kanalında sediment birikiminin düzeyini ölçer.

$$\eta_{\text{in}} = 100 \cdot (W_t - W_{\text{in}}) / W_t \quad (2.8)$$

- W_t giriş kanalına verilen toplam sediment miktarı
- W_{in} giriş kanalında çöken sediment miktarı

En iyi koşullar 0.3625 mm tane çapı, 0,1 m orifis çapı, 0,1 m eşik yüksekliği, 22 l/s giriş

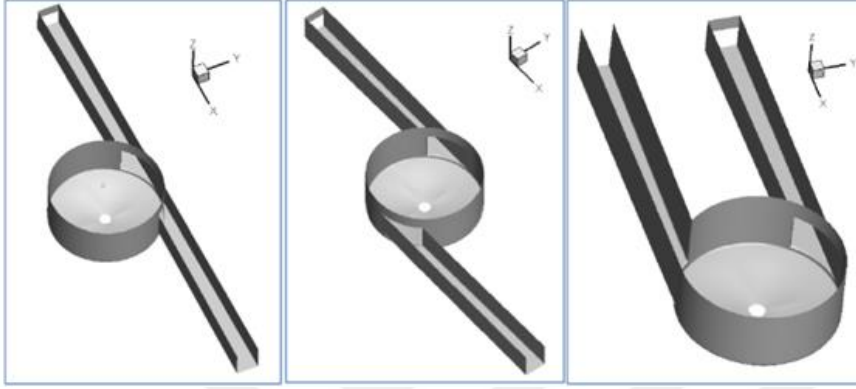
debisi ve 0.05 m çıkış kanalı yüksekliği ile elde edilmiştir. Sediment tane boyutu büyüdüğüde aynı zamanda giriş debisini artırmanın vorteks çökeltim havuzu performansını artırdığı görülmektedir. Ayrıca daha küçük orifis çapı ve daha alçak çıkış kanalı kullanılarak da verim artırılmaktadır.

2.2. Vorteks Çökeltim Havuzu Üzerine Yapılan Sayısal Çalışmalar

Chapokpour ve ark. (2012) dairesel bir vorteks çökeltim havuzunda Rankine tipi vorteks akışını Flow-3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelemiştir. Sayısal modelde havuz üç farklı bölgeye ayrılmıştır. Havuz merkezinin çevresi 0.5 cm, havuz duvarı ve taşma savaklarının bulunduğu bölge 1 cm ve diğer tüm akış bölgeleri 2 cm ağ ile modellenmiştir. Yapılan analizler sonucunda havuz içerisindeki zamana bağlı ortalama hız bileşenleri, türbülans bileşenleri ve türbülans yayılımı 2 boyutlu kesitler üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmada farklı zaman aralıklarında saat yönünde ve saat yönünün tersine vorteksler ile çeşitli çöküntü noktalarının oluştuğu ve bu yapıların zamanla sönümlenip yeniden meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca havuz sınır koşullarına yakın bölgelerde ve özellikle orifis çevresinde türbülans şiddeti ile türbülans yayılımının yüksek olduğu belirlenmiştir. Merkezi hava çekirdeği (air-core) simülasyonun başlangıcında kısmen oluşabilmiş ancak zaman ilerledikçe bu yapı kaybolmuştur. Türbülans kinetik enerjisi (TKE) havuz merkezindeki hava çekirdeği çevresinde diğer bölgelere kıyasla daha büyüktür. Havuz tabanından su yüzeyine doğru çıkıldıkça büyüklüklerde farklılaşma gözlenmiştir. Ancak farklı radyal kesitler arasında belirgin bir fark bulunmamıştır. Deneysel ve sayısal araştırmalar arasındaki en dikkat çekici bulgu, yan savakların havuz içerisindeki türbülans oluşumuna olan etkisi olmuştur.

Huang ve ark. (2017) çalışmalarında kullandıkları vorteks çökeltim havuzu 100 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindirik bir yapıdan oluşmakta olup tabandan 15 cm yükseklikte çıkış kanalı bulunmaktadır. Akış alanı Flow-3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak modellenmiş ve hız dağılımı incelenmiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen su yüzeyi profilleri karşılaştırıldığında simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmüş ve Flow-3D yazılımının vorteks çökeltim havuzu içerisindeki akışın modellenmesinde güvenilir bir araç olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca giriş derinliği ile çıkış debileri karşılaştırıldığında sayısal ve deneysel veriler arasındaki farkın %3.46'nın altında olduğu tespit edilmiştir. Sayısal model kapsamında tabandan 6.3 cm, 10.3 cm ve 14.3

alanı ve duvarlara yakın ikincil akımları başarıyla yakalayabildiğini göstermiştir. Ayrıca teğetsel hız bileşeni, giriş ve çıkış kanallarından uzak bölgelerde Rankine vorteks modeline uymuş ancak bu durum tüm bölgeler için geçerli olmamıştır. Türbülans modelleri karşılaştırıldığında $k-\omega$ modeli hem teğetsel hem de radyal hız bileşenlerinde laboratuvar ölçümleri ile uyumlu sonuçlar üretmiştir.



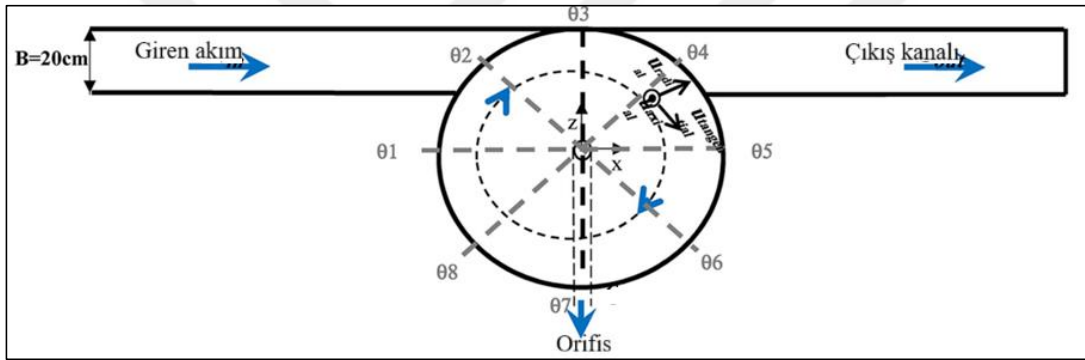
Şekil 2.19. Vorteks çökeltim havuzunda giriş ve çıkış kanallarının farklı bağlantı durumları (Norouzi ve ark., 2018)

Nikou ve ark. (2021) vorteks çökeltim havuzlarının tuzaklama performansının ve akış alanının havuz geometrisi ile ilişkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle incelemiştir. Çalışmada üç farklı vorteks çökeltim havuzu geometrisine ait akış yapısı modellenmiştir. Bu amaçla üç boyutlu Reynolds ortalamalı Navier–Stokes (RANS) modelleri (standart $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$) ile birlikte Büyük Girdap Simülasyonu (LES) Smagorinsky modeli ve Dinamik Alt-Grid Ölçeği (DSM) kullanılmıştır. Sayısal model sonuçları tipik bir vorteks çökeltim havuzu fiziksel modelinden elde edilen deneysel verilerle doğrulanmıştır. Smagorinsky modeli, hız bileşenleri ve serbest yüzey akışlarının tahmininde diğer türbülans modellerine kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada üç farklı vorteks çökeltim havuzu geometrisi incelenmiştir. Model 1, giriş ve çıkış kanallarının aynı doğrultuda konumlandırıldığı düzenektir. Bu durumda akış, havuz içerisinde simetrik ve saat yönünde bir vorteks oluşturmaktadır. Ancak debi yükseldiğinde akışın önemli bir kısmı havuzda yeterli dolaşımı yapmadan doğrudan çıkış kanalına yönelmektedir. Bu nedenle ince sedimentlerin çökmesi için gerekli koşullar sağlanamamaktadır (Şekil 2.20).

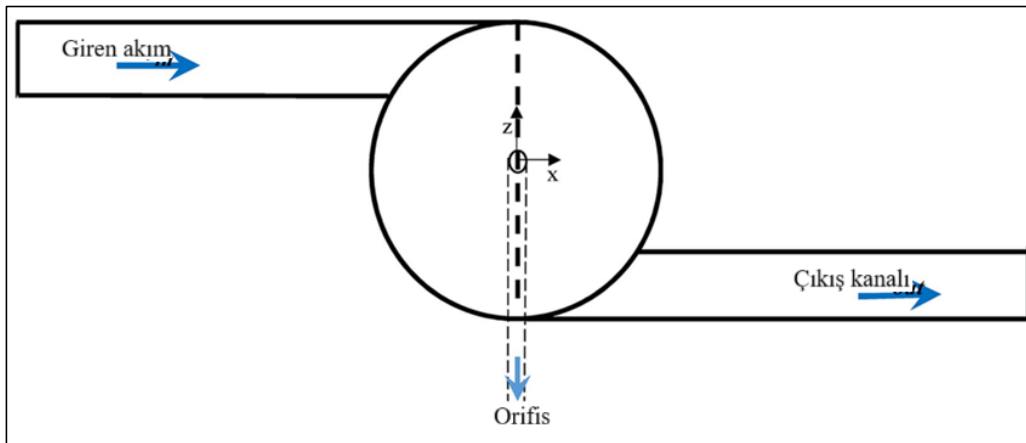
Model 2 (Athar ve ark., 2002) tarafından önerilen karşılıklı giriş–çıkış düzeni, giriş ve çıkış kanallarının birbirine zıt yönlerde konumlandırıldığı düzenektir. Bu modelde akış asimetrik bir vorteks oluşturmakta ve vorteks tabana kadar inmektedir. Bu modelde, orifisten daha

fazla suyun çıkış yaptığı belirlenmiş ve bunun sistemin genel verimliliğini azalttığı görülmüştür. Bu nedenle, Model 2 en düşük verimliliğe sahip tasarım olarak değerlendirilmiştir (Şekil 2.21).

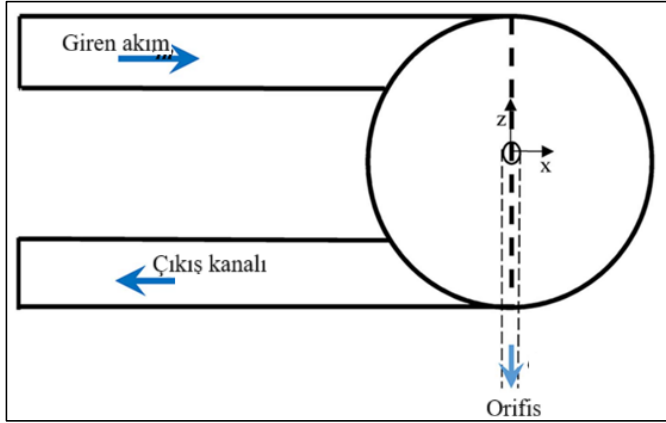
Model 3 en yeni tasarlanan model olmuştur. Giriş kanalı Model 1 ile aynı doğrultuda yer almakta ancak çıkış kanalı giriş kanalına paralel olacak şekilde dairenin dördüncü çeyreğinde yaklaşık 90° faz farkıyla konumlandırılmaktadır. Bu geometri ile akış havuz içinde simetrik ve saat yönünde bir vorteks oluşturmaktadır. Böylece taneler daha uzun çökme yoluna sahip olmakta ve daha yüksek oranda sediment tuzaklanmaktadır. Bu tasarımda su atma oranı artmadan verimlilik yükselmiştir. Yapılan değerlendirmeler Model 3'ün en uygun ve en verimli tasarım olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 2.22).



Şekil 2.20. Model 1 plan görünümü (Nikou ve ark., 2021)



Şekil 2.21. Model 2 plan görünümü (Nikou ve ark., 2021)



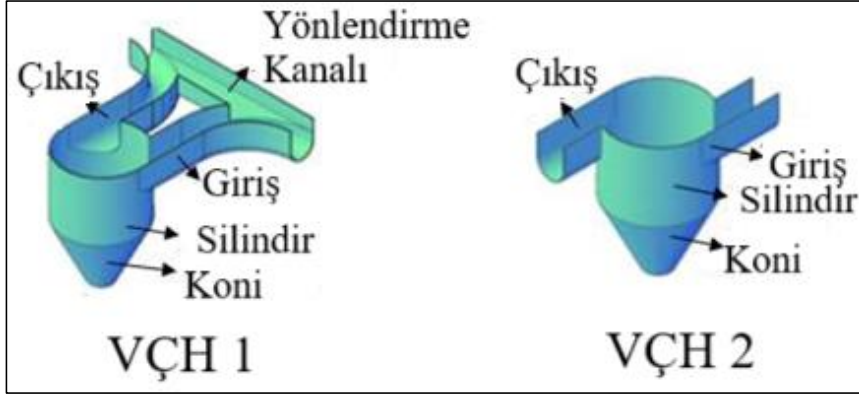
Şekil 2.22. Model 3 plan görünümü (Nikou ve ark., 2021)

Bu çalışmada, su atma oranı (Water abstraction ratio) ile giriş ve çıkış kanalı debisi oranı sistemin verimliliğini belirleyen temel göstergeler olarak değerlendirilmiştir. Sayısal modellerde su atma oranı %18–24 aralığında bulunmuştur. Elde edilen bu değerler Paul ve ark. (1991) tarafından rapor edilen gözlemler ile uyumluluk göstermektedir. Özellikle Model 1 için Smagorinsky modeli kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar deneysel gözlemler ile yüksek düzeyde uyum göstermiştir. Bununla birlikte, debinin artmasıyla su atma oranında bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, yüksek debilerde akışın önemli bir kısmının havuz içerisinde yeterli dolaşım oluşturmadan havuzu terk ettiğini göstermektedir. İnce sedimentlerin çökmesi için gerekli dolaşımın sağlanamaması sistemin genel verimliliğini olumsuz etkilemiştir. Analizlerde Model 1 ve Model 3, giriş ve çıkış debisi oranında daha yüksek verimlilik sağlamış, Model 2'nin daha düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir. Hem su atma oranı hem de giriş ve çıkış debisi oranı verimlilik göstergesi olarak kullanıldığında en uygun sonuçların Model 3 tasarımından elde edildiği belirtilmiştir.

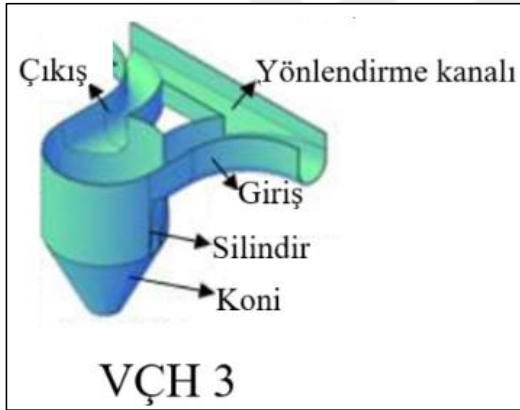
Nguza (2022) kanalizasyon sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan taşkın ve sediment birikimi sorunlarını incelemiştir. Basson (2020) tarafından önerilen vorteks çökeltim havuzu 1 olarak adlandırılan tasarım, hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli ile doğrulanmıştır. Ayrıca vorteks çökeltim havuzu 2 ve vorteks çökeltim havuzu 3 olarak adlandırılan iki farklı tasarım konfigürasyonunun değerlendirilmesi yapılmıştır.

Vorteks çökeltim havuzlarında elde edilen akış desenleri incelendiğinde, vorteks çökeltim havuzu 1 ve vorteks çökeltim havuzu 3'te akışın radyal yönde; vorteks çökeltim havuzu 1 ve vorteks çökeltim havuzu 2'de ise düşey yönde hız bileşenlerinin baskın olduğu belirlenmiştir. Havuz içerisindeki akış hızlarının derinlikle birlikte azaldığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca, tüm vorteks çökeltim havuzu modellerinde artan debiyle birlikte yük kayıplarının da arttığı tespit edilmiştir. Şekil 2.23 ve Şekil 2.24’te, Nguza (2022) tarafından çalışmada kullanılan vorteks çökeltim havuzu 1, 2 ve 3 modelleri gösterilmektedir.



Şekil 2.23. Vorteks çökeltim havuzu 1 ve Vorteks çökeltim havuzu 2’ye ait görünüm (Nguza, 2022)



Şekil 2.24. Vorteks çökeltim havuzu 3’e ait görünüm (Nguza, 2022)

2.3. Deneysel ve Sayısal Yöntemlerin Birlikte Kullanıldığı Çalışmalar

Nikou ve ark. (2018) deneylerinde 8–22 l/s debi aralığında havuz içerisindeki akım hızları ADV cihazı ile üç boyutlu olarak ölçülmüştür. Akım alanı üç boyutlu Reynolds ortalama Navier–Stokes denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Laminer durum ve türbülans modelleri (standart k- ϵ , k- ω ve Smagorinsky modelleri) değerlendirilmiştir. Su atma oranı belirlenmiş, su yüzeyi eğrileri oluşturulmuş ve teğetsel hız hesaplanmıştır. Su atma oranı sisteme giren toplam debi ile orifisten atılan debi arasındaki oranı ifade eder. Matematiksel olarak Eş. (2.9) olarak tanımlanır. Çalışmada su atma oranı %75–87.5 aralığında bulunmuştur.

$$\text{Su atma oranı} = (Q_u / Q_{in}) 100 \quad (2.9)$$

Burada Q_{in} giriş debisini, Q_u orifisten atılan debiyi göstermektedir. Deneylerde farklı su atma oranları kullanılarak akım desenleri, sediment tuzaklama verimi ve hidrolik kayıplar analiz edilmiştir. Boyut analizi ile doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak akım derinliği ve teğetsel hız bağıntıları geliştirilmiştir. Elde edilen bağıntılar mevcut ampirik denklemler ile karşılaştırılmıştır. Türbülans modelleri ile hesaplanan su atma oranı, su yüzeyi profilleri ve teğetsel hız değerleri deneysel verilerle karşılaştırıldığında, Smagorinsky modelinin deneysel sonuçlarla en yüksek uyumu sağladığı belirlenmiştir. Bu model için hesaplanan göreceli hata oranı %3'ten daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, Smagorinsky modelinde öngörülen serbest ve zorlanmış vorteks bölgelerinin konum ve büyüklük bakımından deneysel gözlemlerle yüksek düzeyde benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Nikou ve ark. (2020), vorteks çökeltim havuzlarında karmaşık akış alanını incelemek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanmışlardır. Üç boyutlu Reynolds ortalama Navier–Stokes türbülans modellerinden standart $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$ modelleri ile Büyük Girdap Simülasyonu Smagorinsky modeli değerlendirilmiştir. Deneysel olarak üç boyutlu hız alanı Akustik Doppler Hız ölçer kullanılarak ölçülmüş ve vorteks oluşumunun havuz performansı ile akış özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. İkincil akımların sediment tanelerinin tuzaklanmasında önemli bir rol oynadığı görülmüştür.

Hız ve basınç eşleştirmesi için PISO algoritması, serbest su yüzeyinin modellenmesi için VOF yöntemi uygulanmıştır. PISO Algoritması (Pressure Implicit with Splitting of Operators) basınç-hız eşleştirmesi için geliştirilmiş bir sayısal çözüm algoritmasıdır. Akışkanlar dinamiğindeki süreklilik denklemi (kütle korunumu) ile momentum denklemleri aynı anda çözülmektedir. Bu denklemleri doğrudan çözmek zor olduğundan PISO yöntemi basınç ve hız alanını iteratif olarak güncelleyerek doğru çözüme ulaşmaktadır. Özellikle zamana bağlı akımlar ve serbest yüzeyli problemler için etkilidir. VOF Yöntemi (Volume of Fluid) serbest su yüzeyi gibi faz sınırlarını modellemek için kullanılan bir yöntemdir. Su yüzeyi hareketi zamana bağlı olarak hassas şekilde izlenebilmektedir.

Çalışmanın deneysel kısmında vorteks çökeltim havuzu içerisindeki akış yapıları incelenmiştir. Teğetsel, radyal ve düşey hız bileşenleri ölçülmüştür. Teğetsel hız bileşeni havuz içindeki en baskın bileşen olmuş ve sedimentin çökmesini kolaylaştırırken orifisten

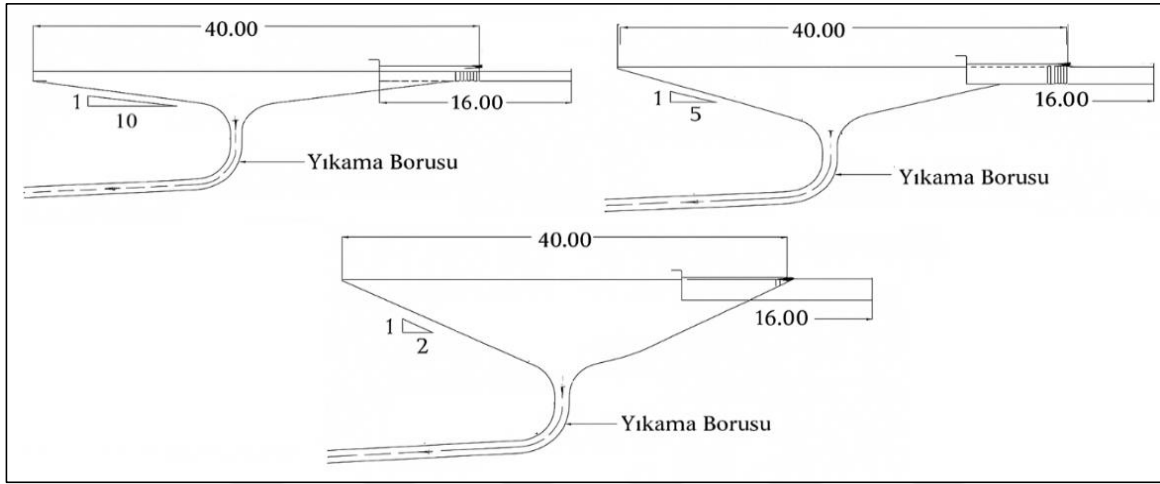
atılan su miktarını azaltmıştır. Radyal hız, ikincil akımları oluşturarak taneciklerin havuz duvarlarına doğru yönlendirmiştir. Düşey hız değerlerinin genellikle sıfıra yakın olduğu ancak orifis, giriş ve çıkış kanalları civarında belirginleştiği gözlenmiştir. Ayrıca, artan debiyle birlikte boyutsuz teğetsel hızın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, akışın önemli bir bölümünün doğrudan çıkış kanalına yönelmesi ve vorteks çökeltim havuzuna yeterince nüfuz etmemesiyle açıklanmıştır. Deneysel hız ölçümleri kullanılarak farklı kesitlerde akım çizgileri elde edilmiş ve bu veriler doğrultusunda havuz içindeki akış yapısı ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılması, Smagorinsky modelinin daha başarılı olduğunu göstermektedir. Çalışmada, zorlanmış vorteksin orifis çevresinde, serbest vorteksin ise havuz çevresinde oluştuğu ve bunun deneysel bulgularla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, vorteks çökeltim havuzu içerisindeki akışın doğası gereği, kararsız, güçlü ve yüksek düzeyde anizotropik bir türbülans alanı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, klasik RANS modelleri yerine, LES ve DNS kullanmanın daha uygun olduğu vurgulanmıştır.

Kiringu ve Basson (2020), 75 μm 'den büyük sediment tanelerinin tuzaklanmasını etkileyen parametreleri sayısal olarak ANSYS Fluent programında incelemiş ve deneysel modelleme ile doğrulamıştır. 100 l/s'den küçük su alma yapılarında kullanılacak vorteks çökeltim havuzları için temel tasarım kriterleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

- Orifis ve giriş debisi oranı (Q_u/Q_{in}) 0.05–0,10 aralığında olmalıdır. Bu aralık hem yüksek verimlilik hem de düşük su kaybı sağlamaktadır.
- Havuz yüksekliği ve havuz çapı oranı (D_t/H_v) 0.5'ten büyük olmalıdır. Havuz yüksekliğindeki değişimler sonuçlarda tutarsızlık yaratsa da genel olarak bu oran korunmalıdır.
- Giriş borusunun merkezinin tabandan yüksekliğinin vorteks çökeltim havuzunun toplam yüksekliğine oranıdır ve (H_{in}/H_v) 0.7'den büyük olmalıdır. H_{in} , giriş borusu ekseninin, vorteks çökeltim havuzu tabanından düşey mesafesini ifade etmektedir. H_v , vorteks çökeltim havuzunun tabanından su yüzeyine kadar olan toplam yüksekliktir.
- Havuz çapının havuza akışın teğetsel olarak girdiği boru çapına oranıdır ve (D_t/d_b) 8.2 olarak belirlenmiştir. Bu oran sediment tuzaklama veriminin artmasına katkı sağlamakla birlikte ekonomik tasarım için de uygun bir değerdir.

Isnaeni ve ark. (2023) Şekil 2.25'te gösterilen farklı taban eğimlerinin etkisini incelemiştir.

Taban eğimi 1:10, 1:5 ve 1:2 olan çökeltim havuzlarının sayısal analizleri, ANSYS R21 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri 1/40 ölçekli fiziksel model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, aynı hidrolik koşullar altında dikdörtgen çökeltim havuzlarına kıyasla, 1:5 taban eğimine sahip orifis haznesinin sedimentin çökmesi ve uzaklaştırılması açısından daha verimli bir performans sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 2.25. Çökeltim havuzundaki farklı taban eğimleri (Isnaeni ve ark., 2023)

2.4. Mevcut Tez Çalışmanın Önemi

Bu tez çalışmasında vorteks çökeltim havuzlarındaki tuzaklama verimliliği, yıkama verimliliği ve akım karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada ticari bir hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Flow-3D kullanılmıştır. Modelleme sürecinde Athar'ın (2000) doktora tezinde gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışma esas alınmış ve bu deneysel sonuçlar kalibrasyon verisi olarak değerlendirilmiştir. Deneysel veriler ile sayısal sonuçların karşılaştırılması sonucunda kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiş ve uygunluk sağlanmıştır. Kalibrasyon tamamlandıktan sonra vorteks çökeltim havuzlarının farklı geometrik konfigürasyonları modellenmiş ve bu konfigürasyonların akım karakteristikleri ile tuzaklama ve yıkama verimlerine etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

- Giriş ve çıkış kanallarındaki eşik yükseklikleri değiştirilmiştir.
- Merkezde bulunan orifis yarıçapı değiştirilmiştir.
- Giriş ve çıkış kanallarının çökeltim havuzuna bağlanma konumları değiştirilmiştir.

- Aynı fiziksel parametreler altında farklı sediment boyutları kullanılmıştır.

Literatür taramasında verilen sayısal model kullanan çalışmalar incelendiğinde, yapılan sayısal modellemelerde genellikle hız dağılımlarının incelendiği ve bu hız dağılımlarından yola çıkarak sediment tuzaklama verimliliği hakkında çıkarımlarda bulunulduğu görülmüştür. Bu çalışmada ise sadece su akımı değil sediment konsantrasyon eşitlikleri de Flow-3D Hydro yazılımıyla çözülerek sediment çökeltimi hakkında da doğrudan yorumlar yapma olanağı doğmuştur





3. SAYISAL MODELLEMEDE KULLANILAN FLOW-3D YAZILIMI

Bu çalışmada, vorteks çökeltim havuzlarındaki akım ve sediment hareketi, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal modelleme için Flow-3D ticari yazılımı kullanılmıştır. Flow-3D yazılımında oluşturulan model, literatürdeki deneysel çalışma sonuçları doğrultusunda kalibre edilmiş ve fiziksel model ile en yüksek uyumun sağlanabilmesi için gerekli koşullar araştırılmıştır. Ardından da kalibre edilmiş model, vorteks çökeltim havuzundaki farklı geometri şartlarını analiz etmek için kullanılmıştır.

Akışkanlar dinamiği problemleri akış içerisindeki herhangi bir noktada basınç, hız, kayma gerilmesi gibi büyüklüklerin çözülmesini gerektirir. Bu büyüklükler lineer olmayan kısmi ve ikinci dereceden diferansiyel denklemler olan Navier–Stokes denklemlerine dayanmaktadır. Bu denklemlerin analitik çözümü çoğu durumda mümkün olmadığından özellikle türbülanslı akış gibi karmaşık problemlerin çözümünde sayısal yöntemler kullanılmaktadır.

Sayısal çözümlemede üç boyutlu geometri, çözüm hücrelerine (mesh) ayrılmakta ve zaman parametresi adımlara bölünmektedir. Böylece her çözüm hücresi için basınç, hız, konsantrasyon gibi parametreler hesaplanabilmektedir. Bu yöntem çok sayıda eş zamanlı matris çözümüne dayanmaktadır. FlowScience tarafından geliştirilen Flow-3D yazılımı bu amaçla kullanılan en yaygın yazılımlardan biridir ve bu çalışmada vorteks çökeltim havuzu modellemesi için tercih edilmiştir.

Flow-3D yazılımında kullanılan, VOF (Volume of Fluid – Akışkan Hacmi) yöntemi serbest yüzeyli akışların sayısal modellenmesinde kullanılan bir HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) tekniğidir. Bu yöntemde her çözüm hücresi için bir hacim kesir fonksiyonu (V_F) tanımlanır.

- $V_F = 1$ ise hücre tamamen akışkan ile doludur.
- $V_F = 0$ olduğunda hücre boş olup hava ile doludur.
- $0 < V_F < 1$ ise hücre serbest yüzeyi içermektedir.

Bu yaklaşım sayesinde akışkanların serbest yüzey konumu ve şekli belirlenebilmektedir. Yöntem ilk olarak Hirt ve Nichols (1981) tarafından geliştirilmiştir ve çok fazlı akışlarda ara yüzeyin takibi için literatürde en çok kullanılan yöntemlerden biri olmuştur.

Bu bölümde sayısal modelleme aracı olarak kullanılan Flow-3D yazılımı hakkında genel bilgiler verilecek 4.bölümde ise ilgilenilen problemin Flow-3D kullanılarak nasıl modellendiği anlatılacaktır.

3.1. HAD Modellemesinde Çözülen Temel Denklemler

Kütle ve momentum korunumu denklemleri serbest yüzeyli akışların sayısal çözümünde VOF (Volume of Fluid – Akışkan Hacmi) yöntemi ile birlikte kullanılmaktadır. VOF yaklaşımında her bir hücre için tanımlanan hacim kesir fonksiyonu (V_F) ile akışkanın hücredeki doluluk oranı hesaplanmakta ve bu değerler Navier–Stokes denklemlerine entegre edilmektedir. Böylece hava–su arayüzü gibi serbest yüzeyler zamana bağlı olarak doğru biçimde izlenebilmektedir. Hirt ve Nichols (1981) tarafından geliştirilen bu yöntem çok fazlı akışlarda hem bellek kullanımındaki verimliliği hem de serbest yüzeyin yerini belirlemedeki başarısı nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.1. Kütle korunumu denklemi

Üç boyutlu sıkıştırılamaz akış için kütle korunumu denklemi kartezyen koordinat sisteminde Eş (3.1) ile verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \text{RSOR} \quad (3.1)$$

- (u, v, w) x, y, z doğrultusundaki hız bileşenleridir.
- (A_x, A_y, A_z) ilgili yöndeki yüzey alanlarının akışa açık olan kısmıdır.
- RSOR sisteme dışarıdan tanımlanmış kütle/momentum kaynağını göstermektedir.

3.1.2. Momentum korunum denklemleri (Navier-Stokes)

Kütle korunum denklemi ile eş zamanlı olarak çözülen momentum denklemleri kartezyen koordinatlarda Eş (3.2) ile verilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{VF} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + f_x - \frac{RSOR}{\rho_w VF} \quad (3.2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{VF} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + f_y - \frac{RSOR}{\rho_w VF} \quad (3.2b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{VF} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + f_z - \frac{RSOR}{\rho_w VF} \quad (3.2c)$$

Bu eşitlikte;

- p basınçtır.
- ρ_f akışkan yoğunluğudur.
- (g_x, g_y, g_z) x, y, z yönlerindeki yerçekimi ivmeleridir.
- (f_x, f_y, f_z) viskoz ivme bileşenleridir.
- V_F VOF yönteminde tanımlanan çözüm hücresindeki akışkan hacim oranıdır.

3.1.3. Sediment taşınım denklemleri

Flow-3D yazılımı, kullanıcı tarafından tanımlanan bir problemi belirlenen yöntemlere göre sayısal olarak çözümlemektedir. Yazılım, literatürde mevcut olan çeşitli yatak taşınım denklemlerinin (Meyer-Peter ve Müller, 1948; Nielsen, 1992; Van Rijn, 1984) kullanılmasına imkân tanımaktadır.

Meyer-Peter ve Müller (1948) tarafından geliştirilen model yatak yükü (bed load) taşınımını esas almaktadır. Modelin temel varsayımı kritik kayma gerilmesi (Shields parametresi) aşıldığında sedimentin harekete geçmesi ile ilgilidir. Modelin genel ifadesi Eş. (3.3) ile verilmektedir.

$$q_\beta = 8(\theta - \theta_c)^{1.5}(s - 1)gd^3 \quad (3.3)$$

- q_β birim yatak yükü taşınımıdır.
- θ Shields parametresidir.
- θ_c kritik Shields değeridir.
- s sediment yoğunluğunun akışkan yoğunluğuna oranıdır.
- d sediment dane çapıdır.

Bu model basit ve güvenilir olması sebebiyle özellikle iri taneli kohezyonsuz sediment için

yaygın olarak kullanılmaktadır. Nielsen sediment modeli, kıyı mühendisliğinde sediment taşınımını tahmin etmek için kullanılır. Nielsen (1992) tarafından geliştirilen model özellikle dalgaların etkili olduğu kıyılarda sediment taşınımını açıklamaktadır. Modelin genel formu Eş. (3.4) ile verilmektedir.

$$q_b = 0.004(s - 1) g d(u_{rms}^2 - u_{cr}^2)^{(3/2)} / (u_{cr}^3) \quad (3.4)$$

- q_b birim yatak yükü taşınımıdır. (m^2/s).
- u_{rms} tabana yakın bölgedeki türbülansın kök ortalama kare (rms) hız bileşeni (m/s).
- u_{cr} sedimentin harekete geçmesi için gerekli kritik hızıdır (m/s).
- s sediment yoğunluğunun akışkan yoğunluğuna oranıdır ($s = \rho_s / \rho_f$).
- g yerçekimi ivmesidir ($9.81 m/s^2$).
- d sediment tane çapıdır (m).

Van Rijn modeli, özellikle kanal ve kıyı mühendisliğinde sediment taşınımı ve taban yükü hareketini tahmin etmek için geliştirilmiş sayısal ve ampirik bir modeldir. Van Rijn (1984) tarafından geliştirilen model hem yatak yükü hem de askı yükü için ayrı denklemler sunmaktadır. Yatak yükü taşınımı için önerilen temel denklem Eş. (3.5) ile verilmektedir.

$$q_b = 0.053 \cdot d^{0.3} (\theta / \theta_c - 1)^{2.1} \quad (3.5)$$

Bu modelin en önemli özelliği farklı tane boyutları için uygulanabilir olmasıdır. Hem kanal hem de kıyı alanlarında geçerlidir. Ancak hesaplamalarının görece daha karmaşık olması ve deneysel kalibrasyon gerektirmesi modelin kısıtlı yönleri arasında yer almaktadır.

Literatürde en uygun türbülanslı Schmidt sayısını belirlemek amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak türbülanslı Schmidt sayısının en uygun değerinin tahmin edilmesi ve sayısal sonuçlar üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Arnold ve ark. (1989) bileşik kanal akışında deneysel ölçümler yaparak türbülanslı Schmidt sayısı değerlerini belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, 0,4 ile 1 aralığında değişmekte olup, çoğu değer 0,5 ile 0,9 aralığındadır. Sonuçlar, akışkanın dar bir kesitten yüksek hızla verildiği durum için 0,5 ve sınır tabakası davranışı için 0,9 olarak verilmiştir.

Oliver ve ark. (2008) akışkanın belirli bir noktadan verildiği durumu bilgisayar ortamında modellemek amacıyla standart $k - \epsilon$ türbülans modelini kullanmıştır. Başlangıçta türbülanslı Schmidt sayısı 0.9 olarak alınmış ancak deneysel verilerle tam uyum sağlanamayınca 0.6 olarak güncellenmiştir. Modelleme sürecinde Sc_t değeri optimize edilen bir parametre olarak kullanılmıştır.

Gualtieri ve ark. (2017) su ve hava ortamlarındaki çevresel akışlarda kullanılan türbülanslı Schmidt sayısı değeri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalar sonucunda elde edilen verileri sistematik şekilde özetlemişlerdir. Araştırmada, türbülanslı Schmidt sayısının doğru seçilmemesi durumunda model sonuçlarında önemli hatalar görülebileceği belirtilmiştir. Gualtieri ve ark. (2017) Çizelge 3.1’de yer alan Schmidt sayısı ile yapılan çalışmalarda kullanılan değerlere yer vermiştir.

Çizelge 3.1. Schmidt sayısı ile yapılan çalışmalarda kullanılan değerler(Gualtieri ve ark. 2017)

Çalışma	Çevresel Akış Koşulu	Schmidt sayısı değeri
Graf ve Cellino (2002)	Sediment içeren açık kanal akışı	$Sc_t > 1$ (taban şekli yok) $Sc_t < 1$ (taban şekli var)
Hsu ve Liu (2004)	Sediment içeren açık kanal akışı	$Sc_t = 0,7$
Huang ve ark. (2005)	Yoğunluğun düşey yönde değiştiği akışlarda ortaya çıkan türbülans	$Sc_t = 1,3$
Toorman (2008)	Sediment içeren açık kanal akışı	$Sc_t = 0,5-0,8$
Jha ve Bombardelli (2009)	Sediment içeren açık kanal akışı	$Sc_t = 0,4-0,9$
Jha (2009)	Sediment içeren açık kanal akışı	$Sc_t = 0,2-1,3$

Kullanılan yazılımda türbülans difüzyon katsayısının varsayılan değeri 1.43 olup Eş. (3.6) ile verilmektedir.

$$D_t = \nu / (Sc_t) \quad (3.6)$$

- D_t türbülans difüzyon katsayısıdır (m^2/s)
- ν suyun kinematik viskozitesidir (m^2/s)
- Sc_t türbülanslı Schmidt sayısıdır.

20°C sıcaklıktaki su için kinematik viskozite $1.004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ alınmıştır. Türbülanslı Schmidt sayısının 0.7 olması durumunda türbülans difüzyon katsayısı Eş. (3.7) ile verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$D_t = (1.004 \cdot 10^{-6}) / 0.7 \approx 1.434 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.7)$$

Schmidt sayısı 0.5 alındığında türbülans difüzyon katsayısı $2.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak elde edilmektedir. Bu durumda türbülans difüzyon katsayısı 2.0 olarak denenmiştir. Yapılan parametre analizleri türbülans difüzyon katsayısının vorteks çökeltim havuzu verimliliği üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle modelin varsayılan değeri olan 1.43 bırakılmış ve ilave bir kalibrasyona ihtiyaç duyulmamıştır.

Moleküllerin rastgele hareketi moleküler difüzyon olarak adlandırılmaktadır. Moleküller arası çarpışmalar sonucunda akışkan içerisindeki konsantrasyon gradyanı ortadan kalkana kadar bu süreç devam etmektedir. Ancak yüksek türbülans enerjisine sahip vorteks çökeltim havuzlarında konsantrasyon gradyanı sürekli olarak değişim göstermektedir. Bu nedenle moleküler difüzyonun etkisi türbülans etkileri altında oldukça küçük kalmaktadır. Bu çalışmada da söz konusu durum göz önünde bulundurularak moleküler difüzyon katsayısı varsayılan değerde bırakılmıştır.

Flow-3D sayısal modelinde sediment hareketinin hesaplanması; erozyon, adveksiyon ve çökeltme süreçlerinin birlikte değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Toplam sediment taşınımı, yatak yükü ve askı yükü olmak üzere iki temel bileşen şeklinde ele alınmaktadır. Askıdaki sedimentler genellikle düşük hacimsel konsantrasyonlara sahip olup, akışkanın taşıyıcı etkisiyle su kolonu içerisinde taşınmaktadır. Sediment, akışkan yüzeyinde meydana gelen yerel kayma gerilmeleri ve küçük ölçekli vorteksler ile yataktan kopma ve yeniden askıya alınma mekanizmaları sonucunda akış içerisinde sürüklenmektedir. Sediment konsantrasyon denklemi Eş. (3.8)'de verilmektedir.

$$\frac{\partial C_{s,i}}{\partial t} + \nabla \cdot (u_{s,i} C_{s,i}) = \nabla \cdot \nabla (D C_{s,i}) \quad (3.8)$$

Burada,

- $C_{s,i}$ askıdaki sedimentin konsantrasyonudur.
- D yönsel difüzyon katsayısıdır.

- $u_{s,i}$ ise askıdaki sedimentin hız vektörüdür.
- ∇ diferansiyel denklem operatörüdür.

3.2. Türbülans Modelleri

Hidrolik yapıların sayısal modellenmesinde kullanılan türbülans modellerini doğru tanımlamak akışın karmaşık doğasını yakalayabilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Vorteks çökeltim havuzlarında yüksek Reynolds sayıları ve güçlü çevrintilerden kaynaklanan oldukça karmaşık türbülanslı akışlar meydana gelmektedir. Bu kapsamda Flow-3D yazılımında kullanılan türbülans modelleri; k- ϵ , RNG, k- ω ve LES (Large Eddy Simulation) modelleridir.

Standard k- ϵ modeli iki eşitlikli bir model olup türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülansın sönümleme oranı (ϵ) için ayrı ayrı denklemlerin çözülmesini gerektirmektedir. Basit yapısı ve hesaplama kolaylığı nedeniyle endüstride ve mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

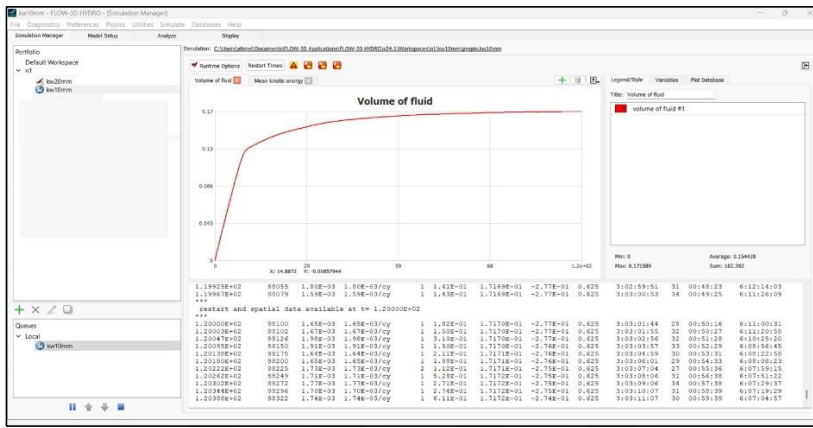
RNG modeli standard k- ϵ modelinin geliştirilmiş bir versiyonu olup özellikle dönel akımlar, akışın keskin bir şekilde yön değiştirdiği akımlar ve geçiş bölgelerinin daha doğru modellenebilmesi amacıyla yeniden normalizasyon grup teorisine dayalı ek terimler içermektedir. Bu yönüyle vorteks akışlarının modellenmesinde standard modele kıyasla daha gerçekçi sonuçlar sunabilmektedir.

K- ω modeli türbülans kinetik enerjisi (k) ile özgül türbülans frekansı (ω) denklemlerinin çözülmesine dayanır. Duvar yakınındaki akış bölgelerinde daha doğru sonuçlar üretebilmesi nedeniyle sınır tabakası etkilerinin önemli olduğu problemlerde avantaj sağlamaktadır.

LES (Large Eddy Simulation) modeli türbülanslı akımın büyük vorteks yapılarını doğrudan çözerken küçük ölçekli türbülans yapıları için alt-ızgara (subgrid) modellerinden yararlanır. Bu yaklaşım özellikle vorteks yapılarının ve zamana bağlı akış dinamiklerinin ayrıntılı incelenmesi gereken durumlarda en gerçekçi sonuçları sağlamaktadır. Ancak yüksek hesaplama maliyeti ve yoğun donanım gereksinimi modelin geniş ölçekli mühendislik uygulamalarında kullanımını sınırlamaktadır.

3.3. Flow-3D Arayüzü

Flow 3D paket programı, birçok hidrolik problemin HAD modellemesini, kullanıcı tarafından yazılıma tanımlan fiziksel özellikler ve seçilen sayısal çözüm yöntemleri doğrultusunda yapmaktadır. Flow-3D arayüzü Simülasyon Yöneticisi ve Model Kurulumu olarak iki ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Arayüz genel görünümü Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu ekran kullanılarak, Flow-3D’de simülasyonun zaman içindeki sıvı hacmi değişimi izlenebilir; ayrıca kararlılık ve yakınsama durumu değerlendirilebilir.



Şekil 3.1. Flow-3D Arayüzü genel görünüm

3.3.1. Simülasyon yöneticisi (Simulation manager)

Simülasyon yöneticisi başlığı altında kullanıcı tarafından çalışılan, tamamlanmış ve halihazırda çözümlenmesi devam etmekte olan simülasyonlar görülmektedir. Ayrıca bu simülasyonlar kullanıcının oluşturduğu bir veya birden fazla “Çalışma Alanı” içerisinde gruplandırılmaktadır. Simülasyon Yöneticisi sekmesinde, halihazırda çözümü devam etmekte olan simülasyonların durumları, hangi simülasyonun çözümlendiği gösterilmekte ve çözümlenmekte olan bu simülasyonlar ile ilgili anlık bilgiler verilmektedir.

3.3.2. Model kurulumu (Model setup)

Model Kurulumu başlığı kendi içerisinde Genel, Fizik, Akışkanlar, Çözüm Ağı ve Geometri, Çıktı ve Nümerik Seçenekler olarak altı başlığa ayrılmıştır.

Genel (General)

Genel sekmesi altında, simülasyon bitiş zamanı, çalışılan akışkan, modelde kullanılacak birim sistemi bulunmaktadır. Hidrolik model kurulum aşamasında ilk başta bu sekme altındaki bilgiler tamamlanmalıdır.

Mevcut çalışmada akış sıkıştırılamaz kabul edilmiştir. Akışkan olarak Newtonyen akışkan kabulü yapılmıştır. Uluslararası birim sistemi SI kullanılmıştır. Basınç tipi izafi (gauge) seçilmiştir. Referans basınç varsayılan değerinde $1.013 \cdot 10^5$ Pa olarak bırakılmıştır. Referans sıcaklık 20°C kabul edilerek standart şartlar altında çalışılmıştır (Şekil 3.2).

Units system	Mass	Length	Time	Charge	Temperature
SI	kg	m	s	coul	Celsius

Pressure type	Gauge	
Reference pressure (default = 1 atm)	1.013e+05	Pa
Reference temperature	20	C

Şekil 3.2. Flow-3D de global sekmesinde yer alan varsayılan değerler

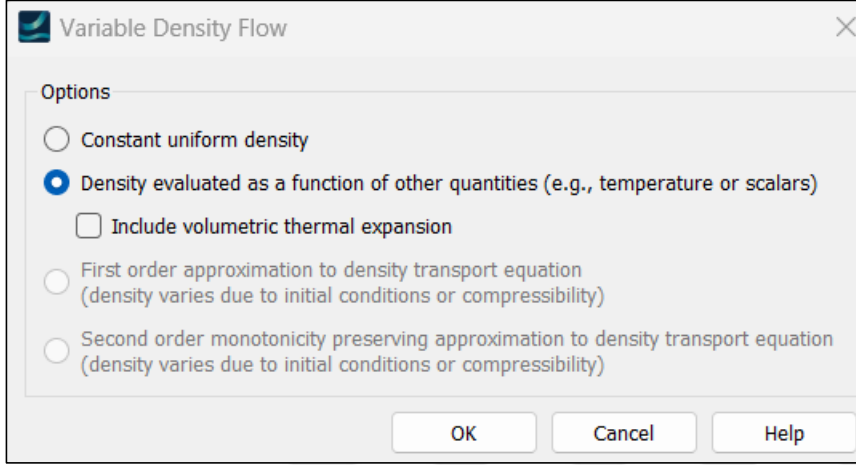
Fizik (Physics)

Fizik sekmesi, hidrolik modelin çözümünde kullanılabilecek fiziksel modellerin bulunduğu sekme olup yerçekimi ivmesi ve yönü, viskozite / türbülans tercihleri, sediment özellikleri, yoğunluk değişimleri modellemesi gibi özellikler fiziksel modeli çözümlenecek simülasyona tanıtılabilmektedir.

Modelleme sürecinde akışkanın fiziksel ve morfodinamik davranışlarının gerçeğe en yakın şekilde temsil edilebilmesi amacıyla Flow-3D yazılımının fizik sekmesi altında yer alan yerçekimi, viskozite-türbülans ve sediment taşınımı modelleri etkinleştirilmiştir.

Simülasyonlarda akışkan üzerinde etkili olan yerçekimi kuvveti “Gravity and Non-Inertial Reference Frame” sekmesi aracılığıyla tanımlanmış ve bu kapsamda yerçekimi ivmesi -Z yönünde 9.81 m/s^2 olarak tanımlanmıştır. Akışkan olarak 20°C su kullanılmış ve viskoz özellikleri bu sıcaklığa göre otomatik atanmıştır.

İç sürtünmelerin ve türbülanslı akış karakteristiklerinin modellenenebilmesi amacıyla ‘Viscosity and Turbulence Modeli’ aktif hale getirilmiştir. Fiziksel parametrelerin seçimi sonucu Şekil 3.3’te verilen ‘Değişken Yoğunluklu Akış (Variable Density Flow)’ özelliği otomatik olarak aktif hale gelmiştir. Bu özellik akışkanın yoğunluğunun sabit olmadığı zamanla veya konumla değiştiği akış türünü ifade etmektedir.



Şekil 3.3. Yüksek konsantrasyon gradyanlarından dolayı değişken yoğunluklu akışın aktif hale gelmesi

Akışkanlar (Fluids)

Bu sekme altında simülasyonda kullanılacak akışkan veya akışkanların fiziksel özellikleri kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır. Ancak, sık kullanılan bazı akışkanların fiziksel özellikleri yazılımın veri tabanında hazır olarak bulunmakta ve kullanıcı tarafından yeniden girilmesine gerek kalmamaktadır. 20°C sıcaklıktaki suyun fiziksel özellikleri Şekil 3.4’te gösterildiği gibi Flow-3D yazılımında kayıtlıdır ve doğrudan seçilebilmektedir. Seçilen 20 °C sıcaklıktaki su literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırma yapılabilmesine olanak sağlamış hem de laboratuvar koşulları ile uyumluluk açısından uygun bulunmuştur.

20 °C’de su yoğunluğu sabit 998.2 kg/m^3 ’tür. Sıkıştırılabilirlik $4.56123 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Pa}$ olarak varsayılan değerinde bırakılmış ve sıkıştırılamaz akış kabulü ile devam edilmiştir. Suyun dinamik viskozitesi 20 °C’de $0.001 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ olarak varsayılan değerinde bırakılmıştır.

The screenshot shows the 'Fluids' panel in ANSYS Fluent. The 'Properties for' dropdown is set to 'Fluid 1'. The 'Material name' is 'Water at 20 C'. The 'Reference temperature' is set to 0 C. The 'Density' tab is selected, showing a density of 998.2 kg/m³. The 'Viscosity' tab is also visible, showing a viscosity of 0.001 kg/m/s. The 'Thermal' tab is not selected. The 'Compressibility' is set to 4.56123e-10 1/Pa. The 'Volumetric thermal expansion' is set to 0 1/C.

Şekil 3.4. Akışkan özellikleri

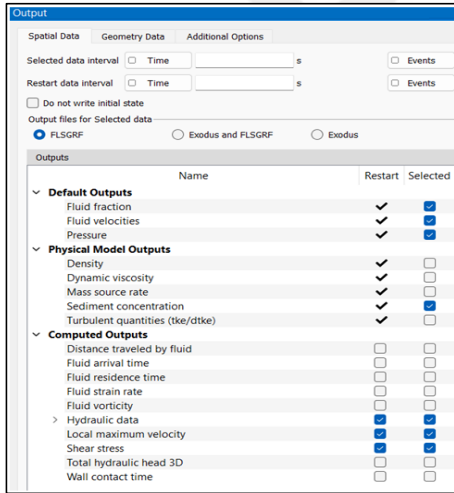
Çözüm ağı ve geometri (Meshing and geometry)

Bu sekme HAD modeli kurulumunun büyük bir kısmını içermektedir. Modelin çözülmesi için gerekli olan problem geometrisi, çözüm ağı yapısı, sınır ve başlangıç koşulları bu kısımda girilmektedir. Ayrıca tercihe ve problem türüne bağlı olarak eklenebilecek tanecik modeli özellikleri, iki boyutlu kütle / momentum kaynağı ve özellikleri, ölçüm alma araçları konumu ve özellikleri bu sekme altında tanımlanmaktadır. Sayısal çözümlerin başarıyla yapılabilmesi için gerekli sınır şartlarının doğru tanımlanması gerekmektedir. Daha sonra bahsedileceği üzere modelde en sık kullanılan sınır koşulu simetri olmuştur. Simetri düzlemi üzerindeki tüm özelliklerin normal yöndeki gradyanları sıfır alınmaktadır. Simetri sınır şartı fiziksel geometrinin ve akış alanının ayna simetrisine sahip olduğu durumlarda uygulanmaktadır. Bu nedenle üst üste gelen simetri sınır koşulunda kompakt ve kesintisiz bir akış sağlanmaktadır. Simetri sınır şartı özellikle fiziksel geometrinin ve akış alanının simetrik özellikler taşıdığı problemlerde hesaplama maliyetini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Duvar sınır koşulunda akışa izin verilmez. Duvarda, tüm yönlerdeki akış hızları sıfır olarak tanımlanır. Ancak basınç ve yoğunluk değerleri duvara en yakın hücredeki değerlerle eşitlenir. Belirlenmiş basınç (specified pressure) sınır koşulunda basınç değeri veya sıvı yüksekliği girilmektedir. Genellikle çıkış kanalı veya atmosferle temas eden serbest yüzeylerde uygulanmaktadır. Dalga çıkışı (wave outflow) sınır koşulunda akışın bir yüzeyden serbestçe akmasına izin verilmektedir. Model alanı içinde oluşan akım, çıkış sınırında yapay bozulmalar olmadan dışarı taşınır. Hacimsel debi (volume flow rate) sınır koşulu birim zamanda sisteme giren debi miktarını belirtmektedir.

Çıktı (Output)

Çıktı sekmesi simülasyon sonuçlarında kaydedilen hidrolik verilerin ve bu verilerin kaydedilme zaman aralığının seçiminin yaptığı bölümdür. Bu sekme altında mevcut olan seçenekler simülasyonda tercih edilen fiziksel modellere bağlı olarak değişmekte olup kullanıcı tarafından seçilen çıktı verisi arttıkça sonuç dosyasının kapladığı alan artmaktadır.

Çıktı dosyaları FLSGRF olarak varsayılan Flow-3D formatında, Şekil 3.5'te gösterilen Output sekmesinden alınır. Akış alanı, hız dağılımı ve basınç alanını görebilmek için “fluid fraction”, “fluid velocities” ve “pressure” seçilmiştir. Yerel hız dağılımları için “local max velocity” seçilmiştir. Hidrolik veri (Hydraulic data) seçilerek debi, yük, enerji çizgisi hesaplamaları yapılmıştır. Konsantrasyon dağılımı için sediment konsantrasyonu seçilmiştir. Ayrıca sediment hareketi ile ilgili kayma gerilmesi (shear stress) seçilmiştir.

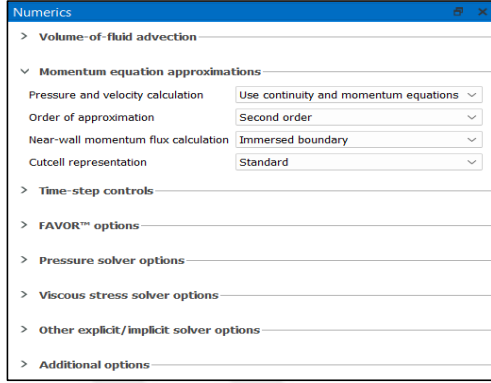


Şekil 3.5. Output sekmesinde istenen çıktıların belirlenmesi

Nümerik seçenekler (Numerics)

Nümerik çözüm seçeneklerinin belirlendiği bu sekmede çözüm güvenilirliği sağlatılmaya çalışılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerinde momentum adveksiyonunun derecesi akışkanın momentumu ne kadar doğru hesapladığını belirler. Birinci dereceden denklemler daha kararlı ve hızlı yakınsama sağlasa da gerçek fiziksel akışı temsil etmede yetersiz kalabilir. Özellikle keskin hız gradyanlarının ve sınır tabakalarının olduğu türbülanslı yapıların modellenmesinde sorunlara yol açabilir. Ayrıca akış enerjisini veya taşıdığı momentumu dağıtarak düşük tork hesaplanmasına ya da basınç alanlarının

bozulmasına neden olabilir. Dolayısıyla bu çalışmada ikinci dereceden yakınsama seçeneği kullanılmıştır. Şekil 3.6 ile sayısal parametreleri ayarlamak için “Numerics” ekranı verilmektedir.



Şekil 3.6. Sayısal parametreleri ayarlamak için Numerics ekranı

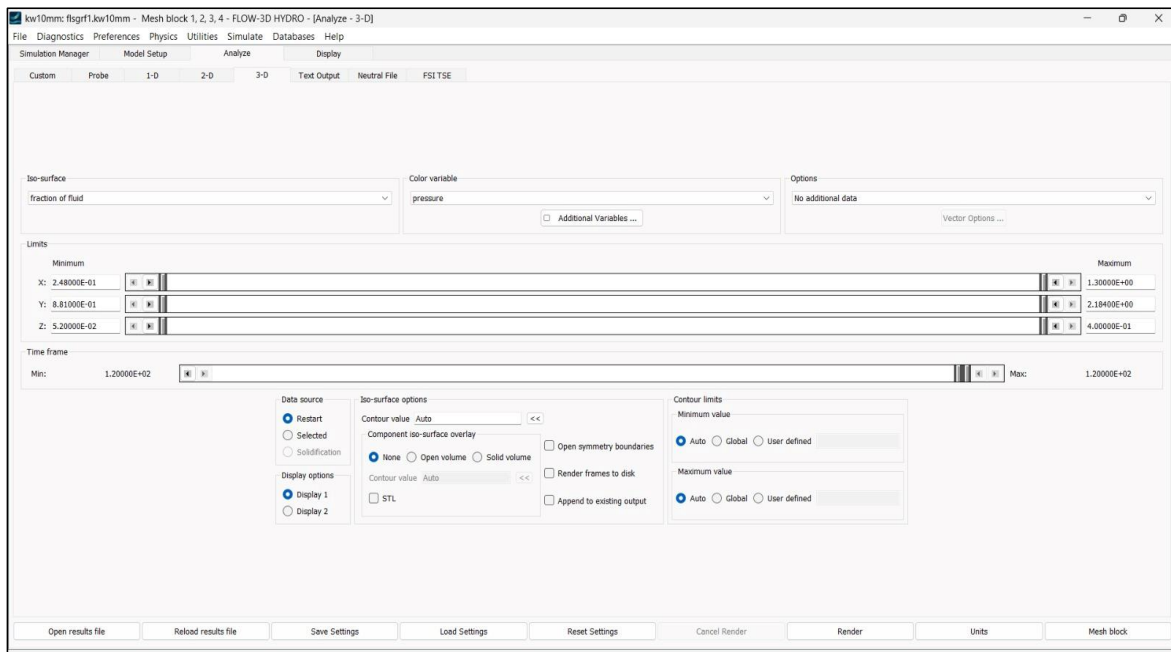
Analiz (Analyze)

Analiz başlığı kullanıcının simülasyon sonuçlarını bir, iki veya üç boyutlu olarak inceleyebildiği bölümdür. Bu kısımda kullanıcı tarafından incelenmek istenen fiziksel parametreler seçilebilmektedir. Ayrıca model kurulumu başlığı altında yer alan Çıktı (Output) sekmesinde yapılan tercihler analiz aşamasında incelenebilecek fiziksel parametrelerin çeşitliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle modelleme sürecinde istenilen verilerin elde edilebilmesi için çıktı seçeneklerinin doğru tanımlanması büyük önem taşımaktadır.

Şekil 3.7 ile sayısal çıktıları alabilmek için Analiz ekranı verilmiştir. Flow-3D analiz ekranı, yapılan sayısal model çalışmasının sonuçlarını görselleştirmek, ölçmek ve değerlendirmek için kullanılan bölümdür. Bu ekran, modelin çözümü tamamlandıktan sonra HAD sonuçlarını inceleme ve fiziksel anlamda yorumlama aşamasında kullanılmaktadır. Analiz aşamasında, model sonuçlarının fiziksel olarak değerlendirilmesi amacıyla birçok parametre ve görselleştirme aracı birlikte kullanılmaktadır. Bu kapsamda, akım alanındaki hız dağılımları incelenerek akışın yönü ve büyüklüğü belirlenmekte, akım çizgileri (streamlines) ile hız vektör alanları görselleştirilerek akış yapısı ayrıntılı biçimde ortaya konulmaktadır.

Serbest yüzey (free surface) profili incelenerek yüzey dalgalanmaları ve seviye değişimleri belirlenirken, vorteks ve türbülans yapıları analiz edilerek akımın kararsız bölgeleri tespit

edilmektedir. Ayrıca, akımın zamana göre değişimi izlenerek sistemin kararlı duruma geçişi değerlendirilmektedir. Türbülans kinetik enerjisi (TKE) ve türbülans yoğunluğu dağılımları hesaplanarak enerji kayıpları belirlenmektedir. Sediment konsantrasyonu dağılımları aracılığıyla askıdaki sediment hareketi incelenirken, hız, basınç, su seviyesi ve TKE gibi parametrelerin zamana bağlı değişimleri grafiksel olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca kontur haritaları ve yörünge çizgileri (pathlines) kullanılarak akış yapısı üç boyutlu olarak temsil edilmekte, 2B/3B kesitler ve animasyonlar oluşturularak model sonuçları hem görsel hem de sayısal açıdan detaylı biçimde analiz edilmektedir.



Şekil 3.7. Sayısal çıktıları alabilmek için Analiz ekranı

Görüntü (Display)

Bu başlık, Analiz sekmesinde tercih edilen simülasyon sonuçlarının yazdırıldığı ve kullanıcının inceleyebileceği görsellerin elde edildiği bölümdür. Analiz aşamasında kullanıcı tarafından gerekli parametreler seçildikten sonra yazılımda yer alan işleme (render) butonuna basıldığında Flow-3D otomatik olarak bu başlığa yönlendirmektedir. Böylece simülasyon çıktıları üç boyutlu görseller, kontur dağılımları, vektör diyagramları ve diğer grafikler şeklinde elde edilerek kullanıcıya detaylı inceleme imkânı sunulmaktadır.

4. SAYISAL MODELİN OLUŞTURULMASI VE DOĞRULANMASI

Sayısal modelin doğruluğu, simülasyon sonuçlarının deneysel çalışmaya olan uygunluğu ile ortaya konulmaktadır. Kalibrasyon aşaması modelin ürettiği sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması sürecidir. Model girdi parametreleri, simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla daha uyumlu hale gelene kadar fiziksel sınırlar içerisinde kalmak şartıyla güncellenir. Bu aşama modelin güvenilirliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Modelin kalibrasyon ve doğrulama işlemi tamamlandıktan sonra ise deney yapılmayan veya yapılamayan farklı durumların çözümünde, elde edilen model kullanılabilir.

Sayısal modelin ilk aşaması geometrik modelin kurulumudur. Geometrik model kurulumu sistemin iyi bir şekilde tanımlanmasını ve modelin işleyişini etkileyen önemli geometrik parametrelerin belirlenmesini gerektirir. Simülasyon ortamında kullanılan fiziksel model geometrisi, programın geometri sekmesindeki STL eklentisi aracılığıyla tanımlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle modelin üç boyutlu çizimi AutoCAD kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ardından STL formatında dışa aktarılmıştır. Elde edilen STL dosyası ölçeklendirme işlemleri için SketchUp yazılımına aktarılmış ve burada gerçek fiziksel model ölçeklerine uygun hale getirilmiştir. Ölçeklendirilmiş model, sonrasında tekrar STL formatında Flow-3D yazılımına aktarılmıştır.

Bu çalışmada vorteks çökeltim havuzlarında farklı geometrilerde sediment tuzaklama ve yıkama verimleri, hız ve konsantrasyon dağılımları sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal model Flow-3D Hydro yazılımı kullanarak oluşturulmuştur. Farklı geometrik şartların sayılan parametreler üzerindeki etkisini incelemeyen önce kurulan modelin kalibre edilerek doğrulanması gerekmektedir. Kalibrasyon ve doğrulama için Athar (2000)'ye ait deneysel çalışma kullanılmıştır. Aşağıdaki bölümde Athar (2000)'a ait deneysel çalışma açıklanmıştır.

4.1. Athar (2000) Deneysel Çalışması

Athar (2000) çalışmasında, geleneksel çökeltim havuzları yerine vorteks çökeltim havuzunda ikincil akımlar ile sedimentin daha etkili bir şekilde tuzaklanabileceğini gösterilmiştir. Bunun için vorteks çökeltim havuzunun akış yapısı ve sediment taşınımı deneysel olarak incelenmiş ve sediment tuzaklama verimliliğini etkileyen parametreler

araştırılmıştır.

Athar (2000) doktora tezinde yer alan deneyler, Hindistan Roorkee Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Athar (2000), çalışmasındaki deneysel parametreleri belirlerken literatürde yer alan önceki çalışmaları dikkate almıştır. Özellikle Sullivan (1972), Çeçen ve Bayazıt (1975), Salakhov (1975), Curi (1977), Mashauri (1986), Esen (1989) ve Paul ve ark. (1991) tarafından gerçekleştirilen araştırmalar deneysel düzeneğin boyutları ile çalışma aralıklarının seçiminde yol gösterici olmuştur. Bu çalışmaların bulguları vorteks çökeltim havuzlarının hidrodinamik davranışları ve sediment taşınım mekanizmaları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Literatürde yararlanılan bu çalışmalardan bazıları Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Literatürden elde edilen bazı konfigürasyonlar.

Araştırmacı	D_t (m)	d_o (m)	h_i (m)	h_p (m)	Q_{in} (m ³ /s) (10 ⁻³)	Q_u (m ³ /s) (10 ⁻³)	C (ppm)	d (mm)
Curi (1977)	0,90	0,025– 0,051	0,069– 0,148	0,069– 0,148	7,37– 12,13	0,359– 0,670	-	2,12
Mashauri M-I (1986)	0,50	0,015– 0,02	-	-	4–17	0,095– 0,108	100– 1000	0,375– 1,80
Mashauri M-II (1986)	0,50	0,01– 0,02	-	-	2,42– 3,51	0,133– 0,18	100– 1000	0,1875– 0,75
Esen (1989)	1,35	0,037	0,11– 0,238	0,185– 0,313	8,69– 14,73	0,460– 0,929	-	0,320– 2,70

Vorteks çökeltim havuzunun verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılan parametreler Çizelge 4.1 de görüldüğü üzere çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

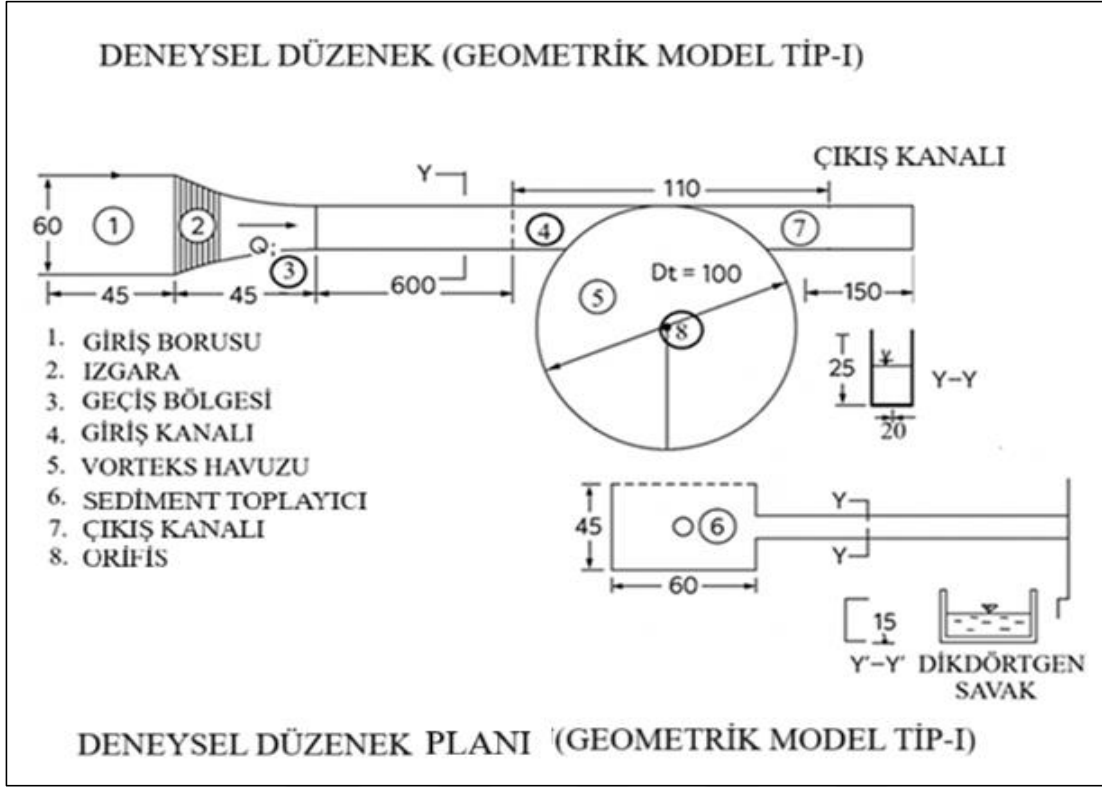
$D_t=2R_t$ (m) vorteks çökeltim havuzunun toplam çapıdır. Bu değer sistemin ana geometrik boyutunu belirler ve akım alanının genel yapısını doğrudan etkiler.

- d_o (m) orifis çapıdır. Orifis, akımın merkezden çıkışı sağlar.
- h_i (m) giriş kanalındaki su yüksekliğidir. Vorteks oluşumu öncesinde akımın enerji seviyesi ve giriş debisi ile doğrudan ilişkilidir.
- h_p (m) havuz içindeki su derinliği veya yüksekliğidir.
- Q_{in} (10⁻³ m³/s) giriş debisidir. Sisteme giren toplam su hacmini ifade eder.

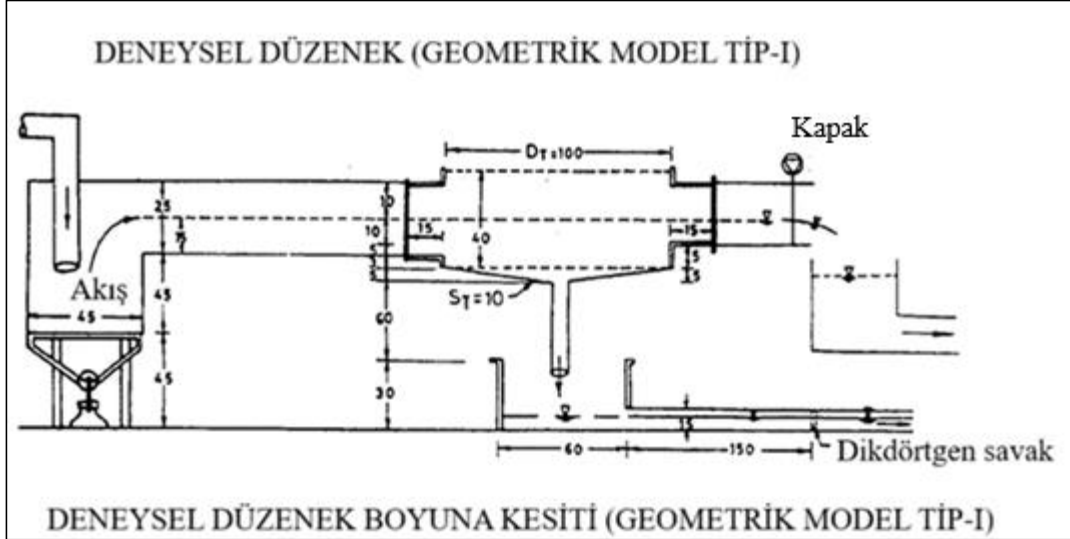
- Q_u ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) çıkış debisidir. Orifisten çıkan akımın miktarını gösterir ve giriş debisine oranı, sistemin hidrolik davranışını belirler.
- c (ppm) girişteki askıdaki sediment konsantrasyonudur. Tuzaklama verimi hesaplamalarında kullanılır.
- d (mm) sediment tanelerinin ortalama çapıdır. Çökeltme davranışı üzerinde doğrudan etkili olup deneylerde farklı tane boyutları ile sistem performansı değerlendirilmiştir.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 Athar (2000) deney düzeneğine aittir. Kullanılan vorteks çökeltim havuzuna ait temel bileşenler gösterilmiş olup tüm ölçüler santimetre cinsindendir. Düzenek temel olarak giriş kanalı, vorteks havuzu, çıkış kanalı ve orifisten oluşmaktadır. Vorteks havuzu çapı 1,0 m, yüksekliği 0,45 m olan 6 mm kalınlığındaki perspeks malzemeden imal edilmiştir. Vorteks çökeltim havuzunun tabanı 1:10 eğimli çelikten imal edilmiş olup koni şeklindedir. Bu eğim sedimentin orifise yönlendirilmesini kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Vorteks çökeltim havuzunun merkezinde çapı 0,10 m olan bir orifis yer almaktadır. Giriş kanalı 6,5 m uzunluğunda, 0,20 m genişliğinde ve 0,25 m yüksekliğinde olup teğetsel olarak vorteks çökeltim havuzuna birleşmektedir. Ayrıca 2,5 m uzunluğa ve 0,20 m genişliğe sahip bir çıkış kanalı bulunmaktadır. Giriş kanalı tabanı ile vorteks çökeltim havuzu tabanı arasındaki giriş eşiği 3 cm, vorteks çökeltim havuzu tabanı ile çıkış kanalı tabanı arasındaki çıkış eşiği yüksekliği 5 cm'dir.

Kesit üzerinde görülen serbest su yüzeyi akım koşullarına bağlı olarak şekillenmektedir. Özellikle havuzun merkezinde merkezkaç etkisiyle oluşan çöküntü nedeniyle su yüzeyi merkezde, çevresine göre daha düşük seviyededir. Vorteks çökeltim havuzu merkezinde yer alan orifis sayesinde sediment yüklü akışın dışarıya atılması sağlanmaktadır. Bu kesitte ayrıca seviye farkı (Z_h) parametresi, çıkış kanalı ve havuz tabanı arasındaki düşey mesafe olarak gösterilmektedir. Bu parametre akımın enerjisini ve havuz içerisindeki su derinliğini (h_p) doğrudan etkilemektedir.



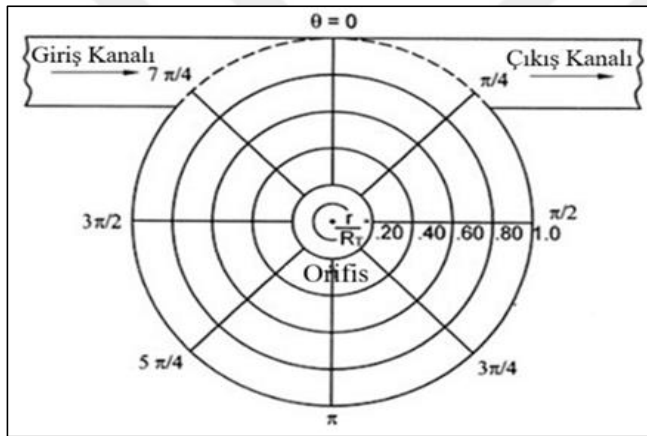
Şekil 4.1.Vorteks çökeltim havuzu plan görünümü (Athar, 2000)



Şekil 4.2.Vorteks çökeltim havuzu boyuna kesit görünümü (Athar, 2000)

Deneylerde öncelikle istenen giriş debisi ayarlanmıştır. Daha sonra vana kullanılarak istenen orifis debisi ayarlanmış, çıkış kanalında bulunan kapak yardımıyla çıkış kanalındaki su seviyesi istenen seviye getirilmiştir. Sabit debi ve su atım oranı sağlandıktan sonra sistemin hidrolik olarak kararlı duruma gelmesi için bir süre beklenmiştir.

Hız ölçümleri için Delft Hydraulics tarafından geliştirilmiş P.E.M.S. (Programmable Electromagnetic Shunt) hız ölçer cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile hem radyal hem de teğetsel hız bileşenleri eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Athar (2000), vorteks çökeltim havuzunu Şekil 4.3 ile gösterildiği üzere bölümlere ayırmıştır. Ölçümlere başlamadan önce cihaz sıfırlama işlemi gerçekleştirilmiş bu amaçla PEMS probu durgun suda yaklaşık 30 dakika bırakılmıştır. Noktaların konumlandırılmasında PEMS probu bir düşey kılavuz üzerinde hem radyal hem de düşey hareket ettirilerek istenilen (r, h, z) konumlarına getirilmiştir. Boyutsuzlaştırılmış radyal konum (r/R_T) 0,10-1,00 aralığını kapsamaktadır. Her noktada 20 saniyelik zamansal ortalama hız değerleri kaydedilmiştir. Tüm düşey seviyeler ve radyal noktalar için ölçümler tamamlanarak yaklaşık 240 nokta için kayıt alınmıştır.



Şekil 4.3. Vorteks çökeltim havuzundaki ölçüm bölgeleri (Athar, 2000)

Ölçümler sırasında su yüzeyi seviyesi ve hava çekirdeği oluşumu gözlemlenip not edilmiştir. Veri işleme aşamasında ölçülen hız değerleri giriş hızı V_{in} ile normalize edilerek V_t/V_{in} (boyutsuz teğetsel hız) ve V_r/V_{in} (boyutsuz radyal hız) değerleri elde edilmiştir. Radyal konumlar r/R_T ile boyutsuzlaştırılmıştır. Grafikselsel analiz kapsamında her bölge ve yükseklikte V_t/V_{in} ve V_r/V_{in} değerlerinin r/R_T ile değişimi çizilmiştir. Çizilen grafikler Rankine tipi vorteks profilleri ile karşılaştırılmıştır. Teğetsel hızın birçok bölgede Rankine tipi vortekse uyumlu veriler ürettiği ancak giriş-çıkış asimetrisinin genel dağılımı bozduğu raporlanmıştır. Ayrıca düşey yönde hız değişimleri incelenmiş ve etkilerin daha az belirgin olduğu görülmüştür. Belirli bir tane çapına sahip sedimentin, orifis ile çıkış kanalında toplanan numuneleri kurutularak kütle ölçümleri yapılmış ve tuzaklama verimliliği hesaplanmıştır.

Athar (2000) çalışmasında yapılan deneylerde kullanılan parametrelere ait değer aralıkları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney parametrelerine ait değer aralıkları (Athar, 2000)

Sıra	Parametre	Sembol	Birim	Aralık
1	Giriş debisi	Q_{in}	m^3/s	0,008 – 0,022
2	Orifis debisi	Q_u	m^3/s	0,000696– 0,00342
3	Havuz yarıçapı	R_t	m	0,50
4	Giriş akımı derinliği	h_{in}	m	0,10 – 0,19
5	Duvar da akım derinliği	h_p	m	0,15 – 0,28
6	Su atma oranı	Q_u/Q_{in}	%	8 – 17
7	Açısal bölme	θ	Derece	0 – 315
8	Radyal mesafe	r/R_t	–	0,10 – 1,00

Mevcut tez çalışmasında kalibrasyon ve doğrulama için Flow 3D-Hydro aracılığıyla modellenen vorteks çökeltim havuzunun yapısı ve geometrisi Athar (2000) doktora çalışmasında bulunan Tip-I olarak belirtilen deney düzeneğinin birebir aynısıdır. Tip-I çökeltim havuzunda hem giriş hem de çıkış kanalları vorteks çökeltim havuzuna teğet olacak şekilde düz bir hat boyunca hizalanmıştır (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2). Sayısal modelin kalibrasyonu için kullanılan deney düzeneğine ait geometri ve akım parametreleri Çizelge 4.3.’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan akım ve geometri parametrelerine ait değerler. (Athar, 2000)

Sıra	Parametre	Birim	Sembol	Değer
1	Giriş Debisi	m^3/s	Q_{in}	0,01
2	Orifis Debisi	m^3/s	Q_u	0,0013
3	Su Atma Oranı	%	Q_u / Q_{in}	13
4	Vorteks Havuzunun Çapı	m	D_t	1,0
5	Giriş Akımı Derinliği	m	h_{in}	0,118
6	Vorteks Havuzu ve Çıkış Kanalı Taban Seviyeleri Arasındaki Fark	m	Z_h	0,05
7	Sediment Konsantrasyonu	ppm	c	400
8	Sediment Boyutu	mm	d	0,055

4.2. Sayısal Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması

Bu bölümde oluşturulan HAD modelinin özellikleri ve oluşturulma aşamalarında dikkate alınan noktalar açıklanmaktadır. Nümerik modelin kurulmasında deneysel modelin fiziksel özellikleri referans alınmıştır. Deneysel modelde elde edilen sonuçlar kullanılarak sayısal model üzerinde gerekli ayarlamalar yapılmış, hata oranı azaltılmış ve deney sonuçları ile olabildiğince doğrulanmış bir HAD modeli elde edilmiştir. Çözüm yönteminin oluşturulması, model sonuçlarının çözüm ağı ve çözüm süresi ile ilişkilerinin araştırılması bu bölümde incelenmektedir. Aşağıda maddeler halinde verilen ve sonucu etkilemesi muhtemel parametrelerin modele etkisi incelenmiştir.

- Çözüm ağı boyutu
- Kullanılan türbülans modeli
- HAD çözüm süresi

Bu adımların her biri modelin doğruluğunu ve deneysel sonuçlarla uyumunu artırmaya yönelik olarak ayrı ayrı test edilmiş ve değerlendirilmiştir.

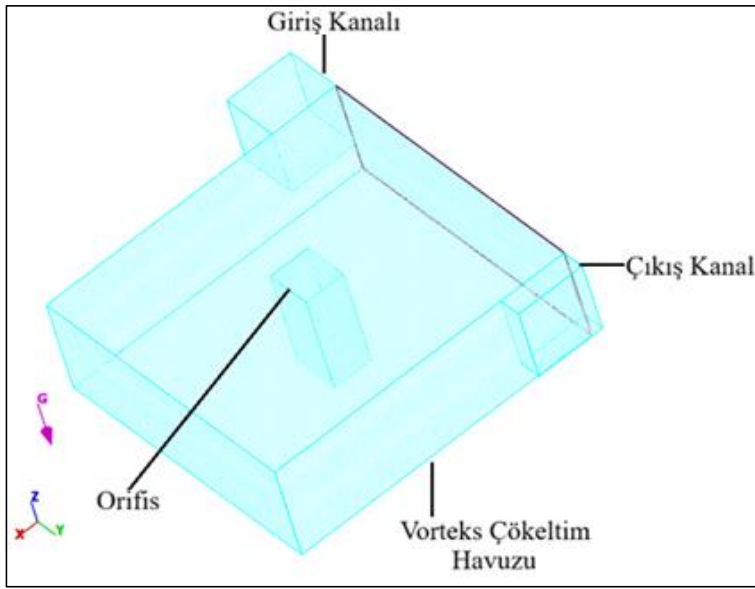
4.2.1. Çözüm ağının oluşturulması

Çözüm ağı oluşturma işlemi modeli oluşturan kısmi diferansiyel denklemler için sayısal çözümlerin elde edilmesinde önemli bir aşamadır. Flow-3D Hydro yazılımı uygulamalarında, çoğunlukla Kartezyen koordinatlar ve dikdörtgen çözüm ağı kullanılır. Bu çalışmada da benzer bir çözüm ağı kullanılmıştır. Üç boyutlu uzayda bir çözüm ağının düğüm noktaları (i, j, k) şeklinde tanımlanır. Burada, i indisi x , j indisi y ve k indisi z yönünü temsil etmektedir.

Çözüm ağı sürekli olmalıdır aksi halde çözüm ağındaki süreksizlik sayısal çözümlerde kararsızlığa neden olur. Çözüm ağına ait hücrelerin boyutlarının birbirine göre çok farklı olması durumu çözümün yakınsama davranışında sapmalara neden olur. Vorteks çökeltim havuzu modelinde 4 farklı ağ bloğu kullanılmıştır.

Bunlar; giriş kanalı, çıkış kanalı, havuzun kendisi ve orifis bölgesini içeren bloklar olup orifis bölgesindeki blok için diğer 3 bölgedeki bloktan daha küçük ağ boyutu kullanılmıştır.

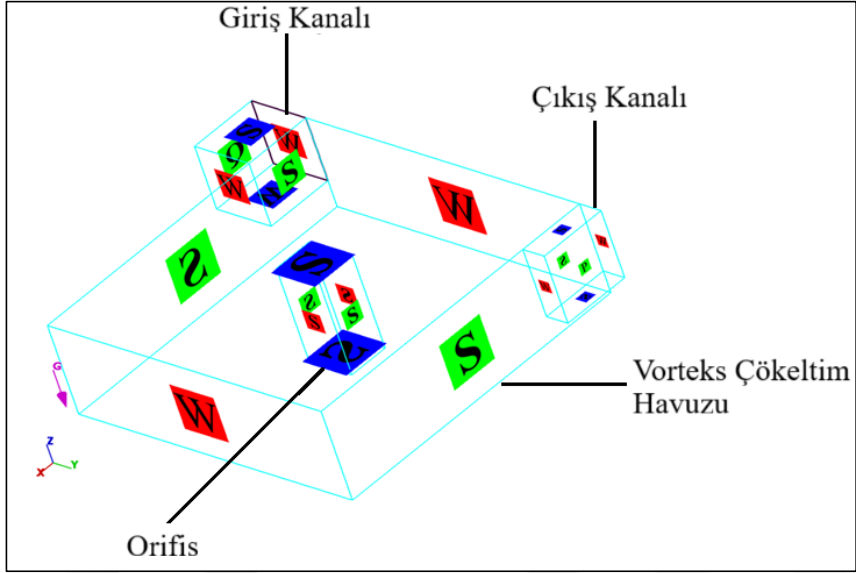
Bu yapı sayesinde hesaplama süresi optimize edilmeye çalışılmış ve farklı çözünürlük seviyelerine izin verilmiştir. Orifis bölgesi gibi yüksek hız değişimlerinin olduğu ve türbülanslı yapıların beklendiği bölgelerde daha ince çözüm ağı kullanabilmek için orifisin bulunduğu bölgeye "içiçe ağ" (nested block) ile detaylandırılmış ağ yapıları atanmıştır. Şekil 4.4 ile gösterilen ince ve kaba ağlar arasında geçişler yapıldığından ‘Non-conforming’ ağ tipi seçilmiştir. Çözüm ağındaki hücre boyutlarına nasıl karar verildiğine, aşağıda anlatılan sınır şartlarının belirlenmesi konusunun ardından değinilecektir.



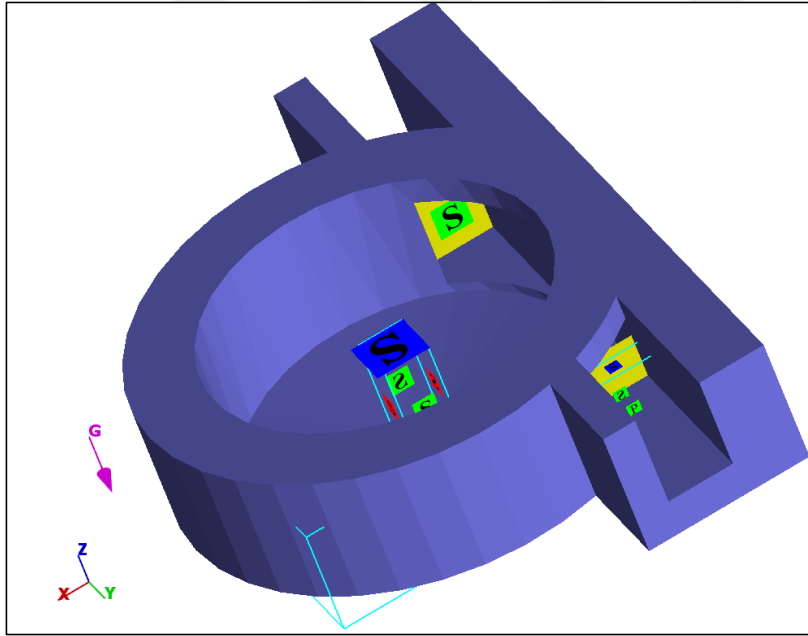
Şekil 4.4. Farklı bloklar kullanılarak oluşturulmuş vorteks çökeltim havuzundaki çözüm ağları

4.2.2. Sınır koşullarının belirlenmesi ve modelin fiziksel yapısı

Sayısal çözümlerin başarıyla yapılabilmesi için gerekli sınır şartlarının doğru tanımlanması gerekmektedir. Yazılımda oluşturulan her bir çözüm ağı bloğu için sınır şartları girilmelidir. Giriş kanalı, çıkış kanalı ve orifis bölgesinde fiziksel büyüklükler deneydeki fiziki koşulları temsil edecek şekilde doğrudan tanımlanmıştır. Vorteks çökeltim havuzu bloğunda katı yüzeylerde kaymama (no-slip) şartı uygulanmıştır. Model kalibrasyonu sürecinde kullanılan sınır koşulları ve açıklamaları Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Vorteks çökeltim havuzunda tanımlanan sınır şartları



Şekil 4.6. Vorteks çökeltim havuzunda tanımlanan sınır şartlarına ait görüntü

Çizelge 4.4. Tüm kanalı kapsayan genel çözüm ağı için sınır koşulları

Giriş Kanalı		Vorteks Çökeltim Havuzu	
-X	Duvar	+X	Duvar
+X	Duvar	-X	Duvar
-Y	Hacimsel debi	+Y	Simetri
+Y	Simetri	-Y	Simetri
-Z	Duvar	+Z	Simetri
+Z	Simetri	-Z	Simetri

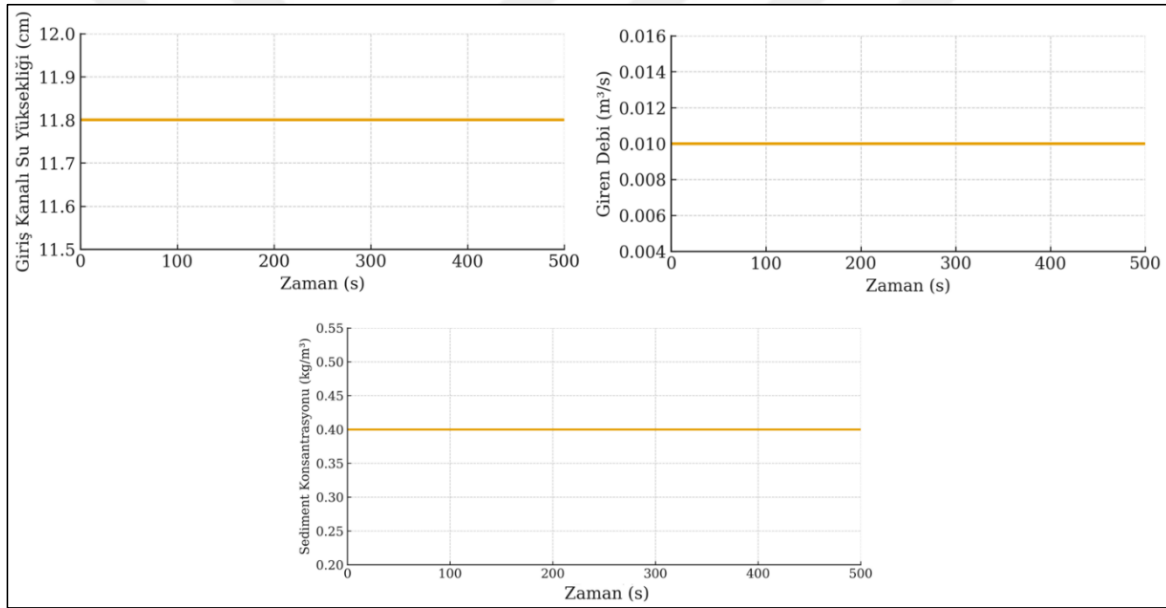
Çıkış Kanalı		Orifis	
+X	Duvar	+X	Simetri
-X	Duvar	-X	Simetri
+Y	Belirlenmiş basınç	+Y	Simetri
-Y	Simetri	-Y	Simetri
+Z	Simetri	+Z	Simetri
-Z	Simetri	-Z	Hacimsel debi

Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere en sık kullanılan sınır koşulu simetri olmuştur. Simetri düzlemi üzerindeki tüm özelliklerin normal yöndeki gradyanları sıfırdır. Simetri sınır şartı, fiziksel geometrinin ve akış alanının düzlem simetrisine sahip olduğu durumlarda uygulanır. Üst üste gelen simetri sınır koşulunda kesintisiz bir akış sağlanır. Bu çalışmada da kullanılan iç içe bloklarda örtüşen yüzeylere ait sınır koşulları yazılımın varsayılan ve tek seçeneği olarak “Simetri (S)” şeklinde tanımlanmıştır.

Duvar sınır koşulunda (Wall, W) akışa izin verilmez. Yapı yüzeyleri ve kanal duvarları gibi yerlerde kullanılır. Belirlenmiş basınç (specified pressure, P) sınır koşulunda basınç değeri veya sıvı yüksekliği girilir. Genellikle çıkışlarda veya atmosferle temas eden serbest yüzeylerde uygulanır. Dalga çıkışı (wave outflow, O) sınır koşulunda, akışın bir yüzeyden serbestçe çıkmasına izin verilir. Hacimsel debi (volume flow rate, Q) sınır koşulu birim zamanda sisteme giren debi miktarını belirtir.

Modelde; giriş kanalı bölgesi, havuz bölgesi, orifis sıkılaştırma bölgesi ve çıkış taşma kanalı

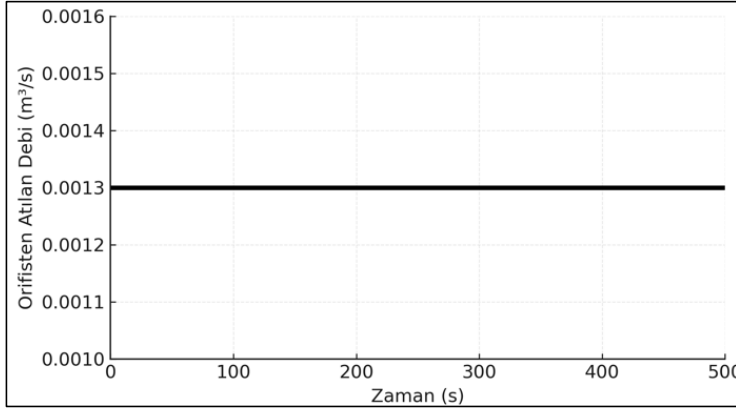
bölgesi olmak üzere 4 farklı ağ bloğu tanımlanmıştır. Giriş kanalında havuza giren yüzeye, deney koşullarına uygun olarak sabit debi ve sabit sabit askı sediment konsantrasyonu tanımlanmıştır. Deneyde yer aldığı şekilde giriş kanalına sabit 10 l/s giriş debisi ve 400 ppm (0.4 kg/m^3) sediment konsantrasyonu girilmiş ve Şekil 4.7’de gösterildiği üzere sabit tutulmuştur. Giriş kanalındaki su yüksekliği deneydeki değeri ile aynı olacak şekilde 0,118 m girilmiştir. Bu değerler Athar (2000) çalışmasından elde edilen debi ve ortalama hız verilerinin değerlendirilmesi sonucunda hesaplanmıştır. Giriş kanalı sınırı, vorteks çökeltim havuzu bloğuna çok yakın olduğunda hız profili akış gelişim bölgesinden olumsuz etkilenecektir. Bu nedenle belirlenen giriş kanalı sınır şartı akışın karakteristiğini doğru bir şekilde yansıtacak uzaklıkta seçilmiştir.



Şekil 4.7. Giriş kanalına ait sınır koşulları

Çıkış kanalının sonuna sınır koşulu olarak belirlenmiş basınç girilmiştir. Bu koşul, ilgili yüzeye deney koşullarında belirtilen sıvı yüksekliği girilerek tanımlanmıştır. Deneylerde su yüksekliği bir kapak yardımıyla istenilen seviyede tutulmuştur. Çıkış kanalı sınır şartı, akımın üniforma yaklaştığı ve sabit basıncın geçerli olabileceği bir mesafede tanımlanmıştır. Böylece çıkış kanalı sınır şartı büyük türbülansların olmadığı kararlı bir bölgede kalmıştır.

Sediment ve su atılımının gerçekleştiği orifis bölgesi için ayrıca bir çözüm ağı bloğu oluşturulmuştur. Orifis bölgesine “içiçe çözüm ağı (nested)” tanımlanmıştır. Deneylerde bir vana yardımıyla orifis sınır bloğunda sabit olarak tutulan akışın 1.3 l/s’lik debi değerini sağlamak için, Şekil 4.8’de gösterilen hacimsel debi sınır koşulu kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Orifis ağ bloğunda sabit tutulan debi değeri

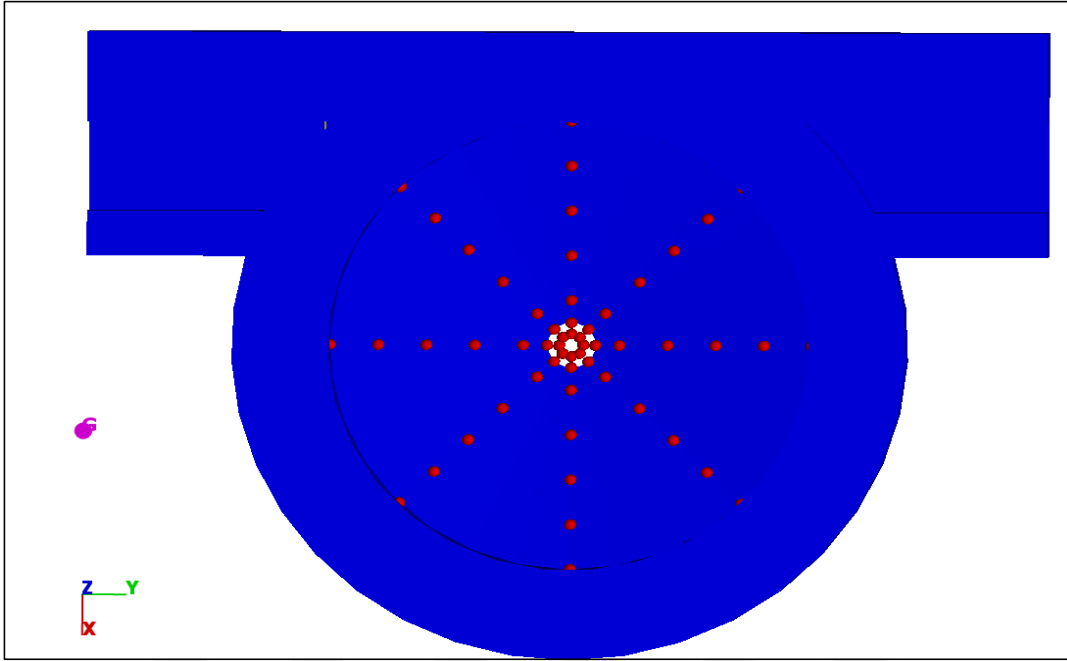
4.2.3. Çözüm ağı boyutuna karar verilmesi

Bu çalışmada, deneysel olarak elde edilen hız ve konsantrasyon verileri, sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeler, radyal (r), açısal (θ) ve düşey (z) konumlar üzerinden yapılmıştır. Teğetsel hız bileşeni için radyal konumlar merkezden itibaren 0.025, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 ve 0.50 m; açısal konumlar 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315° ; düşey konumlar ise tabandan itibaren 0,01, 0,04, 0,08, 0,11 ve 0,14 m olarak belirlenmiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).

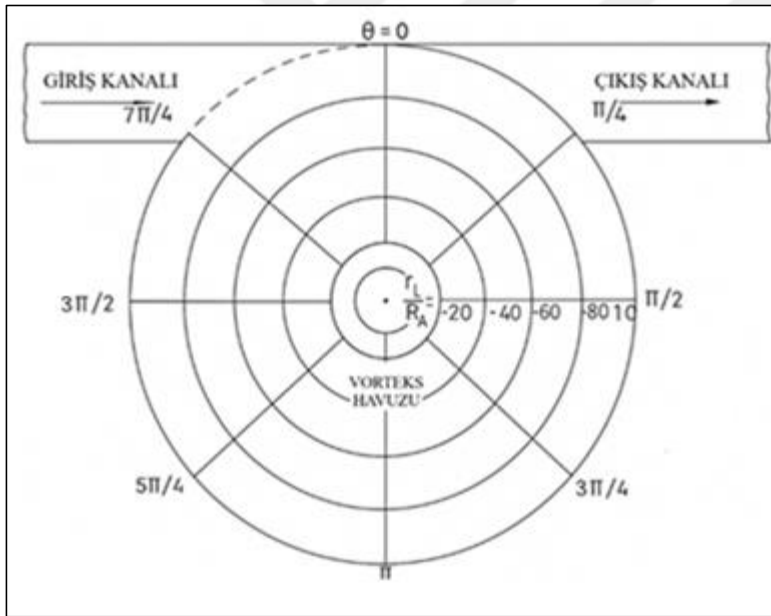
Athar (2000) çalışmasında tanımlanan ölçüm noktalarına (tez çalışmasında, Flow 3D yazılımında geçtiği şekilde prob olarak isimlendirilecektir) karşılık gelen bu konumlarda elde edilen deneysel hız ve konsantrasyon verileri, dört farklı ağ boyutu modeli [20 mm (tüm bloklar), 10 mm (tüm bloklar), 8 mm (tüm bloklar), 4/8mm (orifis bloğu 4 mm kalan bloklar 8 mm)] kullanılarak yapılan sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Modellerin performansları, deneysel verilerle karşılaştırılıp RMS (Root Mean Square) değerleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Her modelin sonuçları Athar (2000) deneysel modeline göre karşılaştırıp Eş. (4.1)'de görüldüğü üzere RMS hata hesabı yapılmıştır.

$$RMS_{hata} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{model,i} - V_{ATHAR,i})^2} \quad (4.1)$$



Şekil 4.9. Vorteks çökeltim havuzuna yerleştirilen problemlerin konumu



Şekil 4.10. Geometrik Tip-I vorteks çökeltim havuzuna ait kutupsal koordinatlar (Athar, 2000)

Athar (2000) hız ölçümlerini radyal ve teğetsel yönlerde yapmıştır. Fakat Flow-3D yazılımında kartezyen koordinatlar kullanıldığından karşılaştırma yaparken kartezyen koordinatlarda elde edilen hızları polar koordinatlara çevirmek gerekmektedir.

Sayısal modelde hız ölçümü için kullanılan her bir “prob”, merkezden r kadar radyal uzaklıkta ve θ açısında yerleştirilmiştir. Düzlem üzerindeki koordinatlar, kutupsal sistemden kartezyen koordinatlara Eş.(4.2) ile verildiği şekilde dönüştürülmüştür.

$$X = r\cos(\theta) \quad (4.2a)$$

$$Y = r\sin(\theta) \quad (4.2b)$$

Burada, r merkezden olan uzaklığı (m), θ ise radyan cinsinden açısal konumu göstermektedir.

Taban, merkeze doğru %10 eğimli olduğundan her bir r için taban yüksekliği Eş.(4.3) ile hesaplanmaktadır. Orifisin merkezi orijin olarak seçildiğinde yapılan örnek bir hesaplama aşağıda sunulmuştur.

$$Z_{\text{taban}}(r) = 0,1r \quad (4.3)$$

Eğer ölçüm probu, tabandan z kadar yüksekte yerleştiriliyorsa, toplam Z koordinatı Eş. (4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$Z = Z_{\text{taban}} + z \quad (4.4)$$

Örneğin, bir probun 0.3 m radyal mesafe, 45° ($\pi/4$) açısal konum ve tabandan 0.06 m yükseklikte yerleştirildiği varsayılırsa Eş. (4.5) ile verilen hesaplamalar yapılmaktadır.

$$X = 0,3\cos(0,785) = 0,2121 \text{ m} \quad (4.5a)$$

$$Y = 0,3\sin(0,785) = 0,2121 \text{ m} \quad (4.5b)$$

$$Z_{\text{taban}} = 0,1 \times 0,3 = 0,03 \text{ m} \quad (4.5c)$$

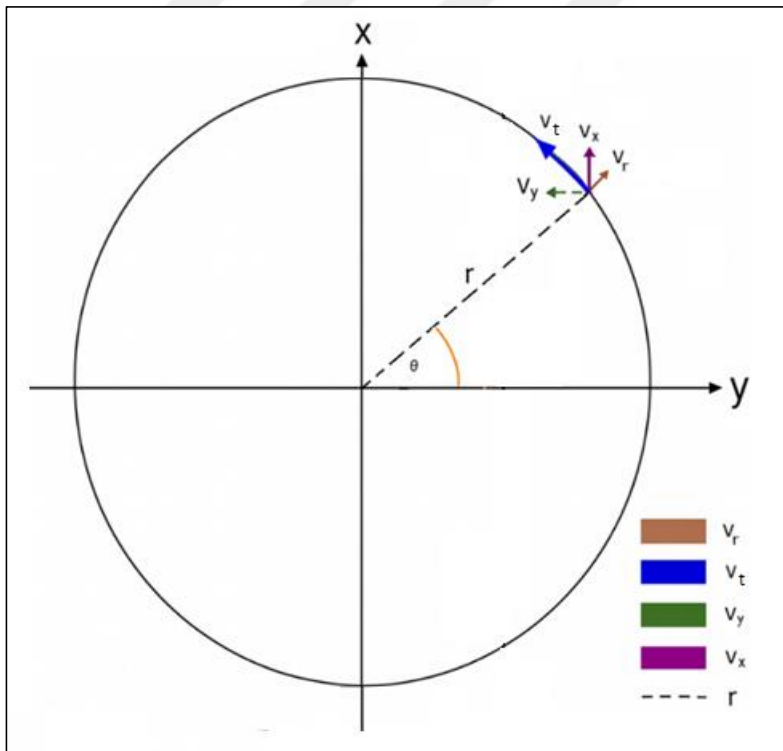
$$Z = 0,03 + 0,06 = 0,09 \text{ m} \quad (4.5d)$$

- X ve Y prob konumunun yatay düzlemdeki bileşenlerini göstermektedir.
- Z_{taban} , taban seviyesinden itibaren hesaplanan yükseklik değeridir.

- Z, taban yüksekliği ile eklenen ölçüm yüksekliğinin toplamını temsil etmektedir.

Vorteks çökeltim havuzunda teğetsel ve radyal hız bileşenleri, problemlerin farklı açısal konumlardaki ölçümleriyle belirlenmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görüldüğü gibi prob üzerinden geçen akışkanın y yönündeki hız bileşeni, 0° – 180° doğrultusundaki teğetsel hız bileşenini (V_t) temsil etmektedir. Benzer şekilde, prob üzerinden geçen akışkanın x yönündeki hız bileşeni ise 90° – 270° doğrultusunda teğetsel hızı ifade eder.

Benzer olarak, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterildiği üzere prob üzerinden geçen akışkanın x yönündeki hız bileşeni, 0° – 180° doğrultusundaki radyal hız bileşenini (V_r) vermektedir. Aynı şekilde, akışkanın y yönündeki hız bileşeni, 90° – 270° doğrultusunda ölçüldüğünde teğetsel hızı (V_t) ifade eder. Belirtilen x ve y yönlerinde hız bileşenleri, 0° – 180° ve 90° – 270° doğrultularında sırasıyla radyal veya teğetsel hız bileşenlerini temsil etmektedir. Ancak, 45° , 135° , 225° ve 315° konumlarında yapılan ölçümler doğrudan teğetsel veya radyal hız bileşenleri vermemektedir. Bu konumlarda prob tarafından ölçülen hız değerlerinin açısal konum dikkate alınarak bileşenlerine ayrıştırılması gerekmektedir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Kutupsal koordinat sisteminde hız bileşenleri

Kutupsal koordinat sisteminde elde edilen hız bileşenlerinin kartezyen koordinatlara

dönüşümü Eş. (4.6) ile verilen denklemler ile yapılmaktadır.

$$V_x = V_t \cdot \cos(\theta) - V_r \sin(\theta) \quad (4.6a)$$

$$V_y = V_t \cdot \sin(\theta) + V_r \cos(\theta) \quad (4.6b)$$

- V_r (m/s) radyal hız bileşenidir.
- V_t (m/s) teğetsel hız bileşenidir
- θ radyan cinsinden açısal konumdur.
- V_x (m/s) prob üzerinden geçen akışkanın x yönündeki hız bileşenidir.
- V_y (m/s) prob üzerinden geçen akışkanın y yönündeki hız bileşenidir.

Bu dönüşümlerin açıklanmasından sonra model ve deneysel ölçümler farklı çözüm ağ boyutları için karşılaştırılabilir. Kayıtlı problemler ile yapılan ölçümler kullanılarak toplam 492 veri noktasına ait teğetsel hız, radyal hız ve konsantrasyon dağılımları değerlendirilmiştir. Çizelge 4.5 ile verilen teğetsel hız ölçümlerine ilişkin 210 veri noktasının RMS analizi sonuçları incelendiğinde, toplamda 130 noktada 4/8mm ağ boyutu en düşük hatayı vermiştir. Ortalama RMS değerleri karşılaştırıldığında, 4/8 mm ağ boyutunun 0,0889 değeri, 10 mm ağ boyutunun 0.0921 değerine kıyasla %3.47'lik, 20 mm ağ boyutunun 0,1453'lik değerine karşı %38.8'lik iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 4.5 incelenirken şu nokta unutulmamalıdır. Ağ boyutu küçüldükçe özellikle orifis çevresindeki hızlar (düşük radyal mesafelerdeki hızlar) deneysel verilerle daha uyumlu elde edilmiştir. Orifisten uzak bölgelerde hız değerleri küçüktür ve havuz duvarına yakın bu bölgelerde ağ boyutunun büyümesi hız değerlerinin doğruluğunu çok değiştirmemektedir. Büyük ağ boyutuna sahip çözümlerde deneysel verilerle uyumlu olan noktalar genelde bu dış bölgedeki noktalardır.

Çizelge 4.5. Teğetsel hız için çözüm ağı kıyaslamaları

		En düşük hataya sahip toplam nokta sayısı		
Açı	Toplam Nokta	4/8mm	10mm	20mm
0°	35	20	15	0
135°	35	25	10	0
90°	35	15	20	0
180°	35	25	10	0
315°	35	20	15	0
270°	35	35	0	0
Toplam	210	130	80	0

Çizelge 4.6 ile verilen radyal hız ölçümlerinde 210 veri noktası üzerinden yapılan değerlendirmede, 4/8mm ağ boyutu 130 noktada en düşük hatayı vermiştir. Ortalama RMS değerlerinde 4/8mm ağ boyutunun 0,0693 değeri, 10 mm ağ boyutunun 0,0792 değerinden %12,5 oranında; 20 mm ağ boyutunun 0,1141'lık değerinden de %39,3 oranında daha iyi performans sergilemiştir. Deneysel olarak ölçülen radyal hızların havuzun büyük bir bölümünde (orifis yakınları hariç) çok küçük değerleri sahip olduğu unutulmamalıdır.

Çizelge 4.6. Radyal hız için çözüm ağı kıyaslamaları

		En düşük hataya sahip toplam nokta sayısı		
Açı	Toplam Nokta	4/8mm	10mm	20mm
0°	35	25	10	0
135°	35	20	15	0
90°	35	25	10	0
180°	35	20	15	0
315°	35	20	15	0
270°	35	20	15	0
Toplam	210	130	80	0

Çizelge 4.7 ile verilen konsantrasyon analizinde 72 veri noktası kullanılmıştır ve 4/8mm ağ boyutu 40 noktada en düşük hatayı vermiştir. Ortalama RMS değerleri incelendiğinde, 4/8 mm ağ boyutu 60,2'lik değeriyle 10 mm ağ boyutunun 67,6'lık değerinden %10,94 oranında,

73,7'lik değeriyle 20 mm ağ boyutundan % 18,31 oranında daha iyi performans göstermiştir.

Çizelge 4.7. Konsantrasyon için çözüm ağı kıyaslamaları

		En düşük hataya sahip toplam nokta sayısı		
Açı	Toplam Nokta	4/8mm	10mm	20mm
0°	9	6	3	0
45°	9	4	5	0
90°	9	6	3	0
135°	9	6	3	0
180°	9	6	2	1
225°	9	3	2	4
270°	9	4	2	2
315°	9	5	3	1
Toplam	72	40	24	8

Çizelge 4.8'de görüldüğü üzere toplam 492 veri noktası üzerinden yapılan değerlendirme sonucunda, 4/8mm ağ boyutu 300 noktada deneysel verilere en yakın sonuçları vermiştir.

Çizelge 4.8. Genel çözüm ağı kıyaslamaları

		En düşük hataya sahip toplam nokta sayısı		
Ölçüm Türü	Toplam Nokta	4/8mm	10mm	20mm
Teğetsel Hız (V_t)	210	130	80	0
Radyal Hız (V_r)	210	130	80	0
Konsantrasyon (C)	72	40	24	8
Toplam	492	300	184	8

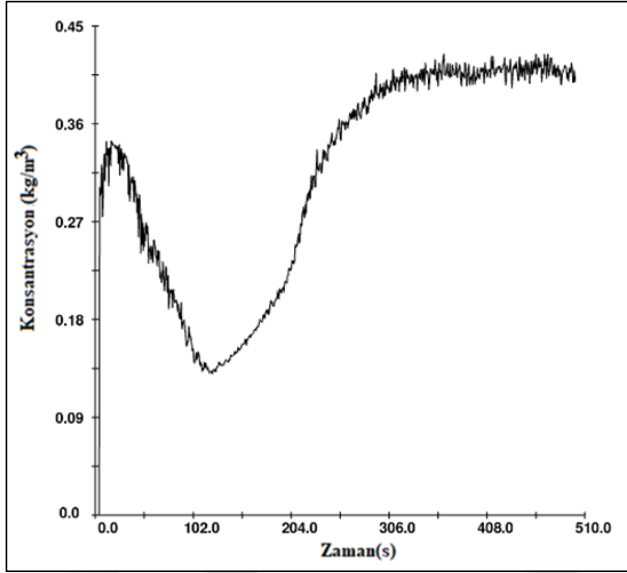
Yapılan analizler sonucunda 4/8 mm ağ boyutu uygun bulunmuştur. Burada şu nokta unutulmamalıdır. Orifis çevresinde oluşan vorteks profili orifise doğru düşey aşağı uzadıkça oldukça daralmaktadır. Dolayısıyla bu kısım için incelenen 4 mm ağ boyutu aslında en ideal olan ağ boyut değildir. Daha düşük ağ boyutu kullanılabilsaydı deneysel neticelerle daha uygun sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Ancak daha düşük ağ çözünürlüklerine inildiğinde hesaplama maliyeti önemli ölçüde artmakta ve bu durumda sadece 1 adet

simülasyon süresi ortalama olarak iki haftaya kadar uzamaktadır. Mevcut bilgisayar donanımının işlem kapasitesi dikkate alındığında bu düzeyde bir hesaplama yükü sürdürülebilir değildir. Bu nedenle hem doğruluk hem de hesaplama verimliliği açısından 4/8 mm ağ boyutu en uygun değer olarak seçilmiş ve tüm nihai analizler bu çözünürlükte gerçekleştirilmiştir. Seçilen ağ boyutu ile yapılan simülasyon sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

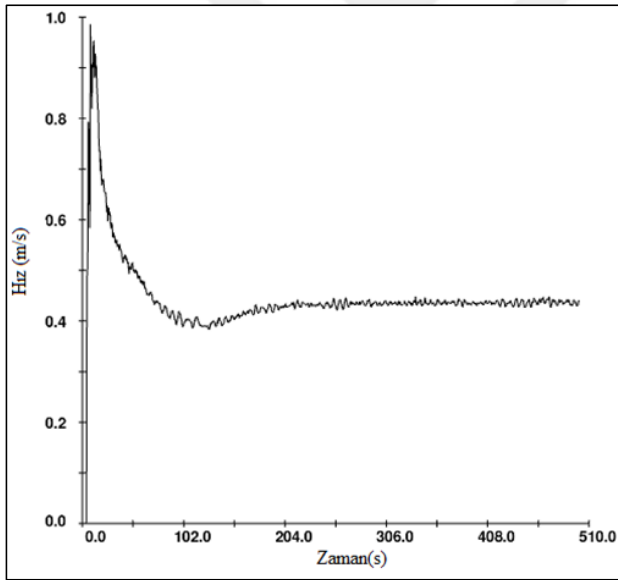
4.2.4. Simülasyon süresinin belirlenmesi

Simülasyonun başlangıcında akış alanı kararsız bir rejim göstermektedir. Ancak belirli bir sürenin ardından sistem kararlı duruma ulaşmakta ve bu noktadan itibaren elde edilen veriler mühendislik analizleri açısından güvenilir kabul edilmektedir. Anlamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi için tüm simülasyonların kararlı duruma ulaşması beklenmiştir.

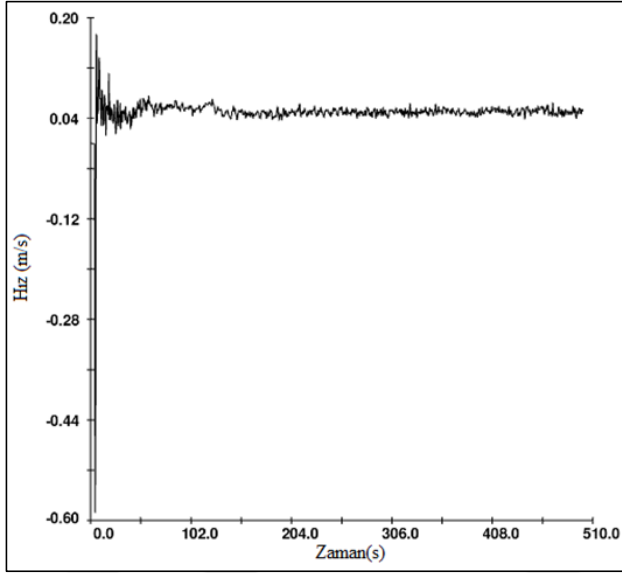
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri, Intel® Core™ i7-14700 14. nesil ve 20 çekirdekli, yüksek işlem gücüne sahip bir CPU, 32 GB RAM ve 1 TB NVMe SSD depolamaya sahip masaüstü bilgisayarda yürütülmüştür. Flow-3D yazılımı, çözüm sürecinde hesaplamaları yoğun olarak CPU üzerinde gerçekleştirmekte ve simülasyon sonuçlarının görselleştirilmesi aşamalarında ekran kartının (GPU) sağladığı grafik işleme kapasitesine ihtiyaç duymaktadır. Çok ince ağ boyutu kullanıldığında çözüm noktalarının sayısı arttığı için hesaplama yükü doğrudan artmakta ve bunu çözmek için daha güçlü bir işlemci gerekmektedir. Ağ boyutu küçüldükçe çözüm denklemlerini işleyen işlemci üzerindeki yük artarak hesaplama süresini önemli ölçüde uzatmaktadır. Merkezi orifisin 4 mm, diğer tüm bölgelerin ise 8 mm incelikte ağ yapısına sahip olduğu modelde, 500 saniyelik HAD çözümü yaklaşık 9 gün sürmüştür. Çözüm ağı inceliği 1,2 cm değerine çıkarıldığında ise çözüm süresi yaklaşık 1,5 güne düşmüştür. Aşağıda bulunan grafikler belirli konumundan ölçülen askıda sediment konsantrasyonu ve hız değerlerini göstermektedir. Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile verilen grafiklerinden görüldüğü üzere 320. saniyeden sonra dalgalanma genliği azalmakta ve daha kararlı bir durum ortaya çıkmaktadır. Tüm hesaplamalar kararlı aralıktaki veriler ile yapılmıştır.



Şekil 4.12. 90 derece, 0,06 m yükseklik ve 0,3m radyal mesafede ölçülen konsantrasyon değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 4.13. 90 derece, 0,06 m yükseklik ve 0,3 m radyal mesafede ölçülen teğetsel hız değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 4.14. 90 derece, 0,06 m yükseklik ve 0,3 m radyal mesafede ölçülen radyal hız değerlerinin zamanla değişimi

4.2.5. Türbülans modeli belirlenmesi

Vorteks çökeltim havuzları üç boyutlu türbülans yapıları içeren hidrolik yapılardır. Bu nedenle sayısal modellemede kullanılan türbülans modeli akış karakteristiklerinin doğru temsil edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı türbülans modellerinin kullanıldığı görülmektedir.

Ziaei ve McDonough (2007) tarafından yapılan çalışmalarda, $k - \epsilon$ ve $k - \omega$ gibi türbülans modellerinin Boussinesq varsayımına dayanması nedeniyle vorteks çökeltim havuzundaki dönel ve kararsız akış yapısını tam olarak temsil edemediği ifade edilmiştir.

Norouzi ve ark. (2020) çalışmalarında klasik $k - \epsilon$ ve $k - \omega$ türbülans modellerini kullanmıştır. $k - \epsilon$ modeli teğetsel hız dağılımlarını doğru şekilde yakalayamamış özellikle vorteks merkezinde başarısız sonuçlar vermiştir. Buna karşılık $k - \omega$ modeli hem teğetsel hem de radyal hız bileşenlerinde deneysel verilerle daha uyumlu bulunmuştur.

Nikou ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda Smagorinsky ve Dinamik Alt-Grid Ölçeği (DSM) LES tabanlı modeller kullanılmıştır. LES modelleri vorteks çekirdeği, ikincil akımlar ve serbest yüzey etkileşimlerini daha gerçekçi bir şekilde ortaya koymuştur. Bu nedenle deneysel verilerle karşılaştırıldığında LES modeli RANS tabanlı modellere göre daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Literatürde vorteks çökeltim havuzlarının akış yapılarının modellenmesinde ön değerlendirme için $k-\omega$ modeli, detaylı ve zamana bağlı vorteks yapılarının yakalanması için ise LES Smagorinsky modeli tercih edilmiştir. Ancak LES modelinin başarı sağlayabilmesi için çözüm ağının oldukça küçük bir boyuta sahip olması gerekmektedir.

Bu çalışmada türbülans modeli seçiminde vorteks çökeltim havuzuna ait farklı türbülans modellerinin ($k-\epsilon$, RNG, $k-\omega$ ve LES) performansları hem konsantrasyon hem de hız açısından değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.9 farklı açılarda (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315°) dört farklı türbülans modeli ($k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, LES ve $k-\omega$) için üç farklı radyal mesafede (0,1 m, 0,3 m ve 0,5 m) elde edilen teğetsel hızlara ait RMS değerlerini göstermektedir. Athar (2000) çalışmasında verilen teğetsel hız değerleri ile her bir model için beş farklı düşey konumda (0,01 m, 0,04 m, 0,08 m, 0,11 m ve 0,14 m) hesaplanan teğetsel hızlar, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. RMS (Root Mean Square) değerleri hesaplanmış daha sonra ortalamaları alınmıştır. Çizelgede 4.9’da her bir satır için en düşük RMS değeri yeşil renkle ikinci en düşük RMS değeri ise sarı renkle gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Farklı türbülans modellerinde teğetsel hızlara ait RMS hata değerleri (m/s)

Açı (θ)	$k-\epsilon$ Modeli	$k-\omega$ Modeli	RNG Modeli	LES Modeli
0°	0,191	0,182	0,202	0,187
90°	0,156	0,133	0,170	0,096
135°	0,204	0,222	0,222	0,126
180°	0,213	0,205	0,208	0,164
270°	0,186	0,147	0,222	0,096
315°	0,175	0,184	0,194	0,161

Giriş kanalına yakın bölgede $k-\omega$ modeli diğer modellere kıyasla deneysel verilere en yakın sonucu üretmiştir. Buna karşın, 90° ile 315° arasındaki açısal konumların hepsinde LES modeli en iyi performansı göstermiştir. Özellikle 90° , 135° , 180° , 270° ve 315° açılarında LES modelinin, diğer üç modele göre daha düşük RMS hata değerleri verdiği tespit edilmiştir. RNG ve $k-\epsilon$ modelleri genel olarak orta düzeyde performans göstermiş, bazı açısal konumlarda makul sonuçlar vermiştir.

Çizelge 4.10'da ise farklı açılarda (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315°) dört farklı türbülans modeli (k- ϵ , RNG k- ϵ , LES ve k- ω) için, üç farklı radyal mesafede (0,1, 0,3 ve 0,5 m) elde edilen radyal hızlara ait hata değerleri gösterilmektedir. Athar (2000) çalışmasında verilen radyal hız değerleri ile her bir model için beş farklı düşey konumda (0,01 m, 0,04 m, 0,08 m, 0,11 m ve 0,15 m) hesaplanan radyal hızlar, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.10'da her bir satır için en düşük RMS değeri yeşil renkle ikinci en düşük RMS değeri ise sarı renkle gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Farklı türbülans modellerinde radyal hız RMS hata değerleri (m/s)

Açı (θ)	k- ϵ Modeli	k- ω Modeli	RNG Modeli	LES Modeli
0°	0,1061	0,1116	0,1076	0,1440
90°	0,1444	0,1378	0,1692	0,1226
135°	0,1241	0,1219	0,1071	0,1112
180°	0,1027	0,0954	0,1129	0,1160
270°	0,2858	0,2956	0,2471	0,3186
315°	0,3695	0,3699	0,3374	0,3471

Farklı türbülans modellerinin radyal hız tahminlerine ilişkin RMS değerleri incelendiğinde, model performanslarının açısal konuma bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Radyal hız değerlerinde görülen bu değişkenlik daha önce de belirtildiği gibi radyal hızların havuzun çok büyük bir bölümünde (orifis çevresi hariç) oldukça küçük kalmasından dolayıdır. Analizler sonucunda farklı açılardaki radyal hız dağılımının modellenmesinde tek bir türbülans modelinin tüm bölgeler için en iyi sonucu vermediği anlaşılmaktadır. RNG modeli genel anlamda daha tutarlı ve düşük hata oranlarına sahip olsa da özellikle giriş kanalının havuza bağlandığı bölgelerde tüm modellerin performansının düştüğü gözlenmektedir.

0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315° açılarında, dört farklı türbülans modeli (k- ϵ , RNG k- ϵ , LES ve k- ω) için üç farklı radyal mesafede (0,1 m, 0,3 m ve 0,5 m) elde edilen konsantrasyon hata değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir. Athar (2000) çalışmasında verilen konsantrasyon değerleri ile her bir model için üç farklı düşey konumda (0,01 m, 0,06 m ve 0,11 m) hesaplanan konsantrasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.11'de her bir satır için en düşük RMS değeri yeşil renkle ikinci en düşük RMS değeri ise sarı renkle gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Farklı türbülans modellerinde konsantrasyon RMS hata değerleri (ppm)

Açı (θ)	k- ϵ Modeli	RNG Modeli	LES Modeli	k- ω Modeli
0°	126,30	96,18	124,39	116,94
45°	151,61	85,98	135,37	96,72
90°	183,47	44,38	164,89	48,11
135°	171,04	47,80	177,96	59,63
180°	171,90	65,20	143,21	68,03
225°	205,37	85,52	143,32	78,78
270°	162,99	76,30	141,10	82,63
315°	152,74	78,74	159,47	98,75

RNG modeli çoğu açıda en düşük RMS değerlerini vererek en iyi performansı göstermektedir. Sadece 225° açısında k- ω modeli, RNG'den daha iyi sonuç elde etmiştir. LES ve k- ϵ modelleri genel olarak daha yüksek RMS değerleri ile öne çıkmış, k- ω modeli özellikle 225° için iyi performans göstermesine rağmen çoğunlukla RNG'nin gerisinde kalmıştır. RNG modeli farklı açılarda tutarlı şekilde en iyi performansı sergileyen model olmuştur. Çizelge 4.9-4.11'de verilen gerek hız değerleri gerek konsantrasyon değerleri incelendiğinde k- ω türbülans modeli, incelenen tüm açısal konumlarda istikrarlı ve dengeli bir performans sergilemiştir.

Hız modellemesinde LES modeli daha düşük hata değerleri üretmiş olsa da, k- ω modeli genel akış alanı boyunca en iyi ikinci olarak tutarlı ve güvenilir sonuçlar sağlamıştır. Sediment konsantrasyonu açısından değerlendirildiğinde, k- ω modeli incelenen sekiz açısal konumda en düşük ikinci hata değerlerini elde ederek RNG modelinin ardından en iyi performansı göstermiştir. Konsantrasyon değerlerinde bazı açısal konumlarda en iyi olan k- ω modeli, RNG modeline son derece yakın sonuçlar üretmiştir. Hız ve konsantrasyon etkisi birlikte göz önüne alındığında, modelleme sürecinde genel tutarlılığı nedeniyle türbülans modeli olarak k- ω modeli tercih edilmiştir.

4.2.6. Sediment taşınım modeli belirlenmesi

FLOW-3D yazılımında sediment taşınımının modellenmesinde Meyer-Peter-Müller, Van Rijn ve Nielsen bağıntıları kullanılmaktadır. Bu modellerin her biri sediment hareketinin başlaması, taşınım miktarı ve yatak üzerindeki etkileşimi farklı fiziksel varsayımlar ve

ampirik ilişkiler çerçevesinde tanımlamakta olup, bu nedenle farklı taşınım denklemleri çözmektedir. Bu kapsamda, söz konusu yaklaşımların vorteks çökeltim havuzları ve benzeri hidrolik yapılardaki uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla literatürde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar incelenmiştir.

Bravo, Osterkamp ve Lopes (2004) sediment taşınımında kullanılan Meyer–Peter–Müller yaklaşımını incelemişlerdir. Sediment taşınımını sürdüren hidrolik parametreler ile sediment hareketinin başlangıcını kontrol eden parametreler arasında benzerlik bulunduğunu varsaymışlardır.

Castillo ve Carrillo (2017) tarafından yapılan bu çalışmada, baraj inşası sonucunda nehirde oluşması beklenen oyulma derinliği ve oyulma geometrisi FLOW-3D aracılığıyla incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, baraj yapımı sonrasında meydana gelebilecek zamana bağlı oyulma problemlerinin önlenmesine yönelik hidrolik ve sedimentolojik etkilerin değerlendirilmesidir. Sediment oyulma modelinde, yatak yükü taşınım oranının belirlenmesinde Meyer–Peter–Müller bağıntısından yararlanılmıştır.

Hamad ve Torres (2019) çalışmalarında, köprü ayakları etrafında oluşan türbülans kaynaklı oyulma süreçlerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Sayısal modellemede Flow-3D yazılımı kullanılmış, yatak yükü taşınımı Meyer–Peter–Müller bağıntısı ile hesaplanmıştır.

Literatürde vorteks çökeltim havuzlarının Flow-3D ile modellenmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Ancak pek çok çalışma havuzun yıkama verimliliğine odaklanırken, tuzaklama verimliliği üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan sediment taşınım modeli belirtilmemiştir. Çalışılan farklı hidrolik koşullar için Meyer-Peter–Müller modelinin yaygın biçimde tercih edilmesi dikkate alınarak, sediment taşınımının modellenmesinde Meyer-Peter–Müller modeli seçilmiştir. Sayısal modelleme çalışmaları bu bağıntı esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

4.3. Model Sonuçlarının Deney Verileri ile Karşılaştırılması

Bu bölümde, model kalibrasyonu sonrasında elde edilen nihai parametrelerle yürütülen sayısal simülasyon sonuçlarının, Athar (2000)'ye ait deneysel verilerle karşılaştırması

yapılmıştır. Ayrıca, sayısal modelin deneysel sonuçları temsil etme düzeyi çeşitli istatistiksel hata analizleri yardımıyla değerlendirilmiştir. Model kalibrasyonu sürecinde, sayısal ve deneysel veriler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmış olup analizler aşağıda sıralanan konular üzerinden yürütülmüştür. Bu parametrelerden deney verisi olanlar için bahsedilen karşılaştırma yapılırken deney verisi olmayanlar için sadece model sonuçlarına göre yorumlamalar yapılmıştır.

- Teğetsel, radyal ve düşey hız bileşenlerinin ve konsantrasyonun havuz içerisindeki genel dağılım karakteristikleri incelenmiştir.
- Türbülans kinetik enerjisi (TKE) ve türbülans şiddeti grafikleri ile akım içerisindeki türbülans enerjisi yayılımı incelenmiştir.
- Tuzaklama verimlilikleri karşılaştırılarak sayısal modelin çökeltim performansının deneysel bulgularla uyumu değerlendirilmiştir.

4.3.1. Hız dağılımları

Teğetsel hız dağılımları

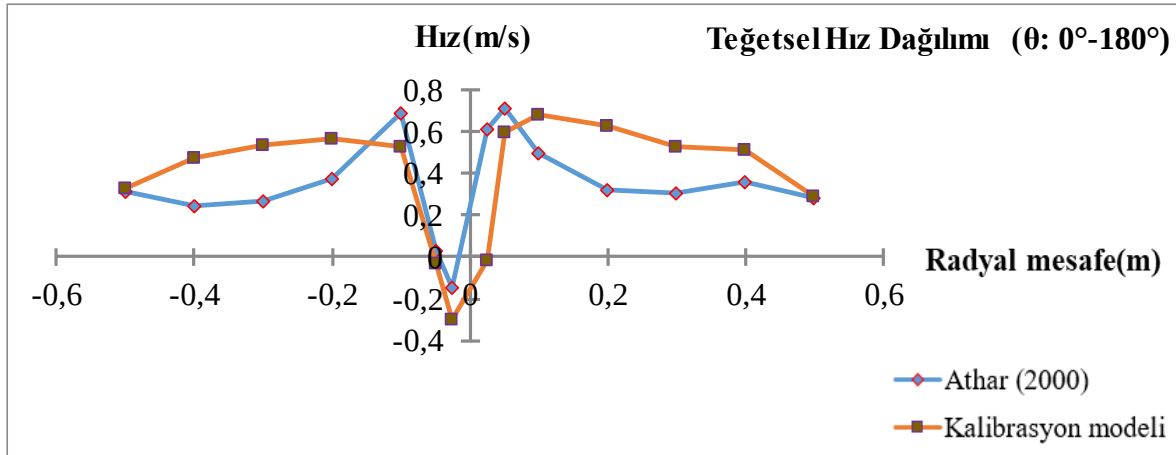
Teğetsel hız, vorteks çökeltim havuzunda akımın merkez etrafında dönmesini sağlayan hız bileşeni olup, vorteksin şiddetini, merkezde oluşan düşük basınç bölgesini ve sedimentin havuz tabanına yönlendirilmesini doğrudan kontrol etmektedir. Bu bölümde vorteks çökeltim havuzu içerisinde 8 farklı açısal, 7 farklı radyal ve 5 farklı düşey konumda teğetsel hızların hata hesapları verilmiştir.

Çizelge 4.12, Athar (2000) deneysel verileri ile kalibrasyon modelinden elde edilen hesaplama sonuçlarının yüzdesel hata karşılaştırmasını göstermektedir. En yüksek hatalar 135° - 315° doğrultusundadır. Ortalama hata %31 olarak elde edilmiştir. En düşük hata değerleri ise 90° - 270° doğrultusundadır. Ortalama hata %23,10 olarak elde edilmiştir. Bazı açısal bölgelerde orifis çevresinde ve tabana yakın yerlerde vorteksten dolayı, teğetsel hızlar doğru hesaplanamamış ve bu nedenle ilgili alanlar boş bırakılmıştır.

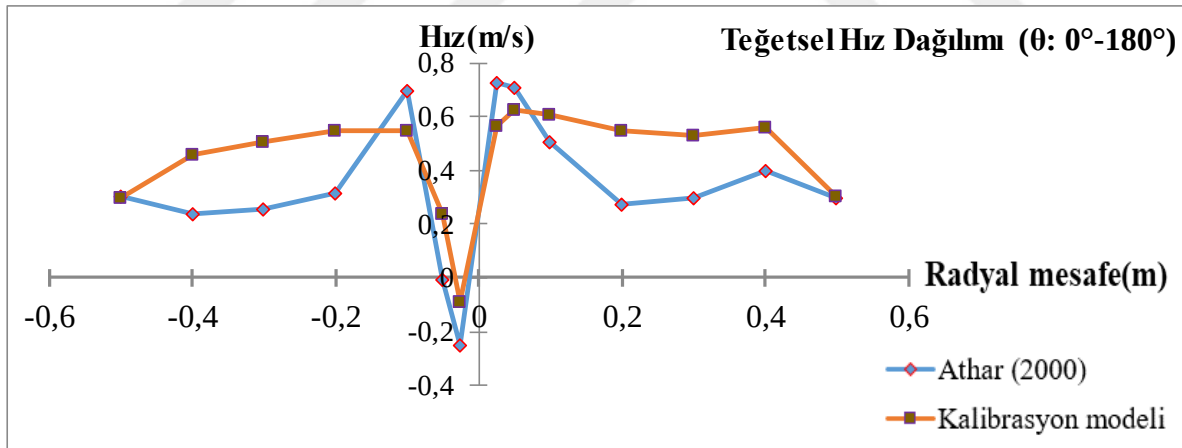
Çizelge 4.12. Athar (2000) deneysel verileri ile kalibrasyon modelinden elde edilen teğetsel hız hesaplama sonuçlarının yüzdesel hata karşılaştırması

r (m)	Açı	z (m)				
		0,01	0,04	0,08	0,11	0,14
0,025	90°	--	--	—	—	—
0,05		%40,70	%12,22	%15,72	—	—
0,1		%17,74	%3,83	%27,79	%24,05	%45,07
0,2		%6,92	%10,71	%10,84	%10,84	%15,06
0,3		%11,01	%16,74	%19,32	%22,77	%23,13
0,4		%1,00	%14,36	%16,21	%16,33	%14,68
0,5		%50,69	%20,26	%8,48	%15,48	%18,10
0,025	270°	%11,00	%36,02	%17,88	—	—
0,05		%31,10	%33,11	%34,68	%48,90	%57,56
0,1		%33,17	%15,75	%26,60	%33,14	%24,81
0,2		%22,80	%23,13	%20,83	%18,53	%20,43
0,3		%33,19	%35,56	%40,93	%38,29	%32,53
0,4		%26,09	%40,25	%46,50	%46,97	%29,37
0,5		%5,37	%1,79	%5,38	%3,16	%3,21
0,025	135°	—	—	—	—	—
0,05		—	—	—	—	—
0,1		%42,49	%45,21	%57,40	%47,56	%51,11
0,2		%10,52	%24,35	%17,86	%13,62	%18,72
0,3		%25,70	%32,22	%30,58	%30,66	%30,74
0,4		%34,14	%41,75	%40,72	%37,80	%37,16
0,5		%10,44	%13,73	%17,68	%1,08	%20,27
0,025	315°	—	—	—	—	—
0,05		%19,90	%23,16	%14,60	%31,20	%33,58
0,1		%18,96	%20,60	%14,09	%13,69	%15,64
0,2		%42,61	%42,35	%41,75	%41,40	%40,20
0,3		%42,68	%37,72	%44,72	%45,79	%47,02
0,4		%36,22	%35,87	%40,17	%38,18	%40,74
0,5		%39,80	%50,00	%21,07	%25,04	%15,02

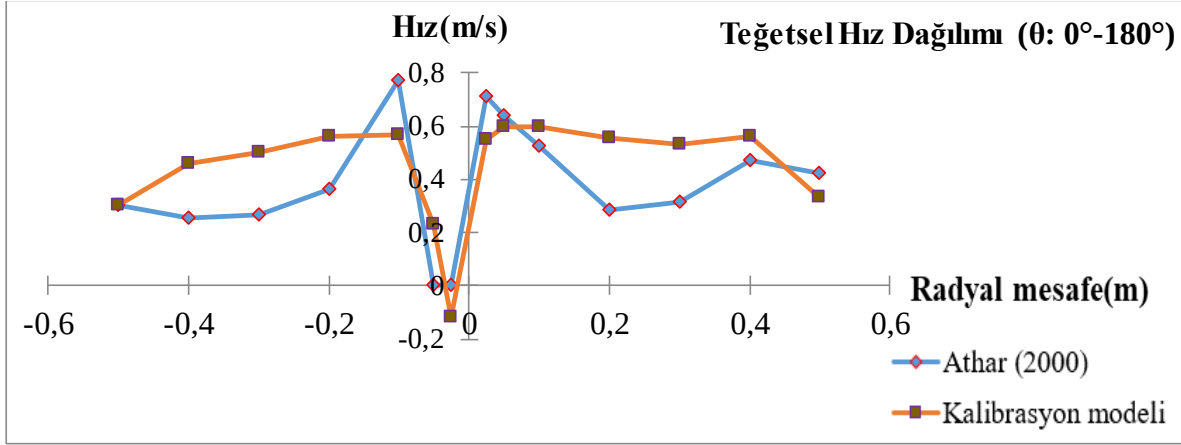
Aşağıda vorteks çökeltim havuzu içerisinde 6 farklı açısal, 7 farklı radyal ve 3 farklı düşey konumda teğetsel hızlara ait grafiklere yer verilmiştir. Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17, 0° - 180° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde teğetsel hız değişimini göstermektedir. Teğetsel hız dağılımı, iç kısımda zorlanmış, dış kısımda ise serbest Rankine tipi vorteks ile uyumlu olup literatür ile tutarlıdır.



Şekil 4.15. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

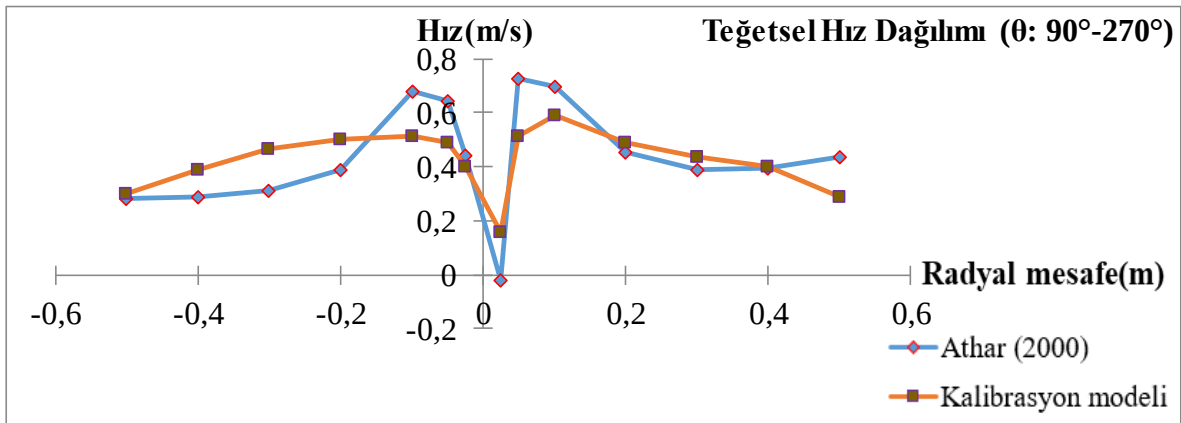


Şekil 4.16. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

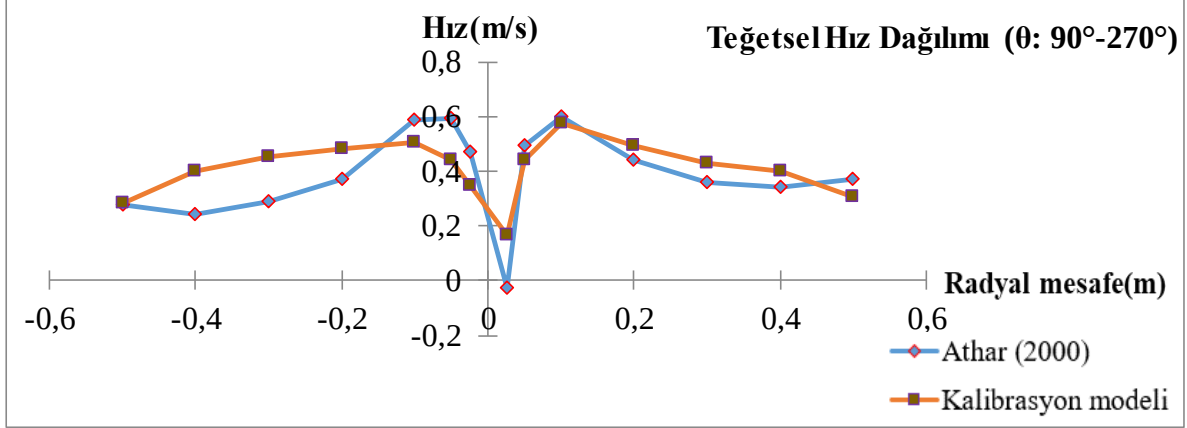


Şekil 4.17. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

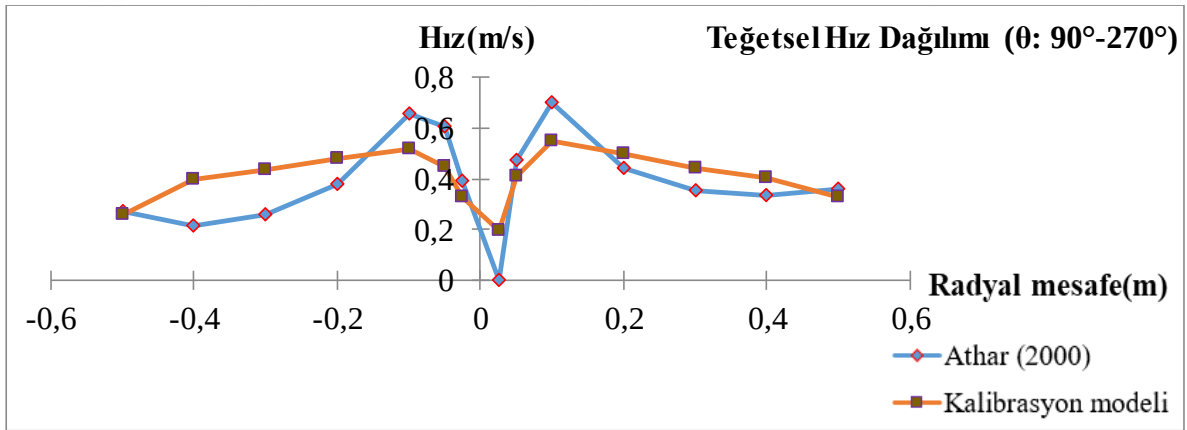
Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20, 90°-270° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde teğetsel hız değişimi göstermektedir. Bu doğrultuda kalibrasyon modelinde teğetsel hız, deneysel verilere 0-180° doğrultusundan daha çok yaklaşmıştır. Bu durumun, söz konusu doğrultunun giriş kanalından havuza giren akımın karmaşıklığından daha az etkilendiği ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Orifis çevresinde teğetsel hızlar en büyük seviyeye ulaşmış ve daha sonra ani düşüş yapmıştır. Deneylerden elde edilen en yüksek teğetsel hızların, kalibrasyon modelinde elde edilenden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

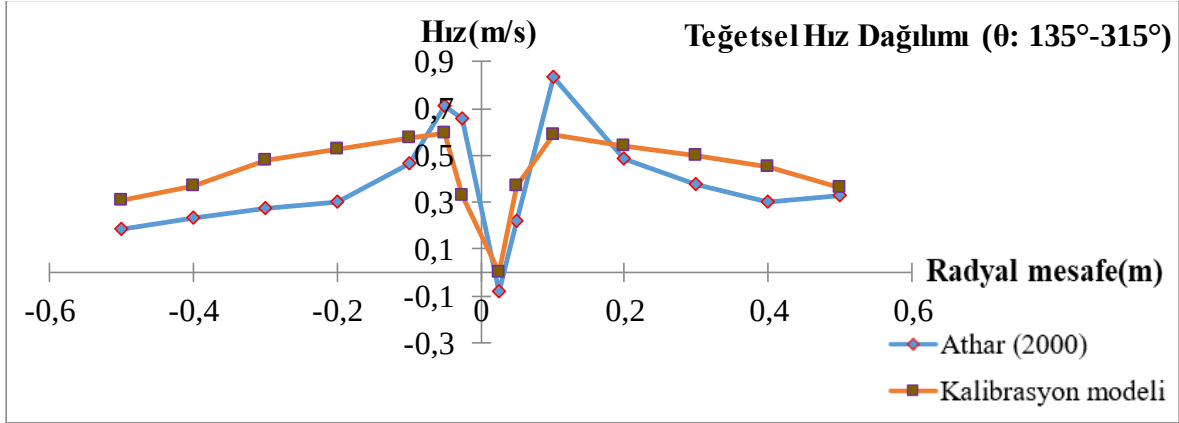


Şekil 4.19. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

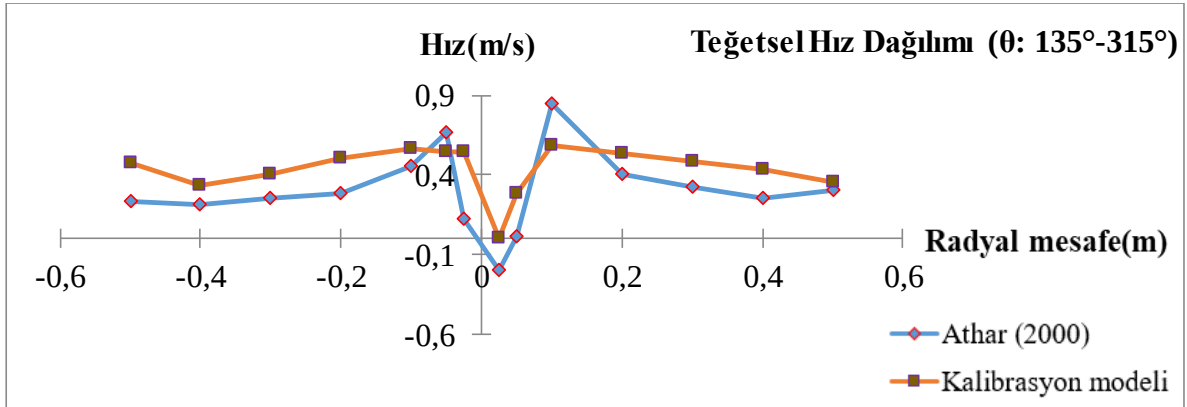


Şekil 4.20. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

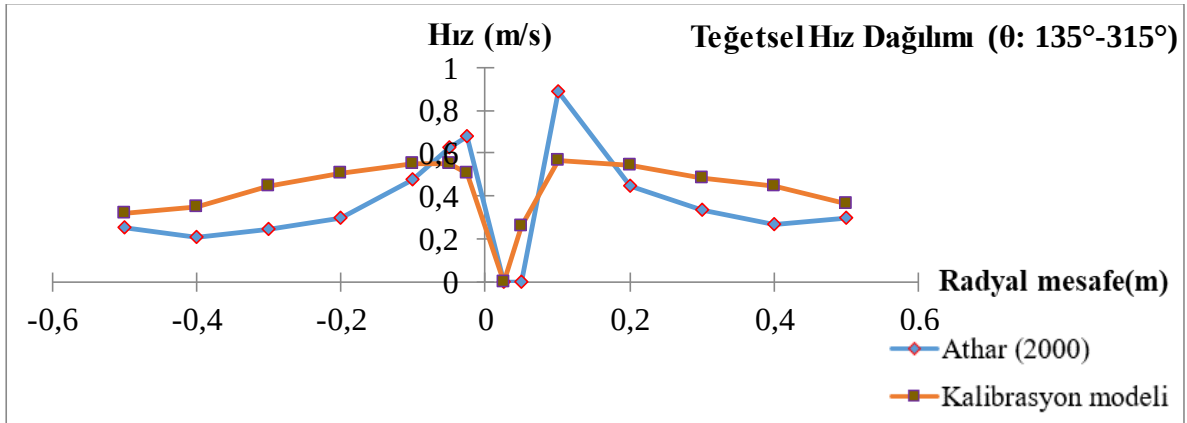
Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23, 135°-315° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde teğetsel hız değişimini göstermektedir. Bu doğrultuda kalibrasyon modeli teğetsel hız verileri deneysel verilere daha yakın ilerlemiştir. Düşey 0,04 m yükseklikte kalibrasyon modeli deneysel modele benzer bir profil göstermiştir. Tüm sonuçlarda olduğu üzere kalibrasyon modeli havuzun orta bölgesinde teğetsel hızları daha yüksek hesaplamıştır. Her iki durumda orifis çevresinde teğetsel hızlar en büyük seviyeye ulaşmış ve daha sonra ani düşüş yapmıştır. Athar (2000) deneysel çalışmasında elde edilen en yüksek teğetsel hızların kalibrasyon modelinde elde edilenden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı



Şekil 4.22. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 135°-315° derece boyunca elde edilen teğetsel hız dağılımı

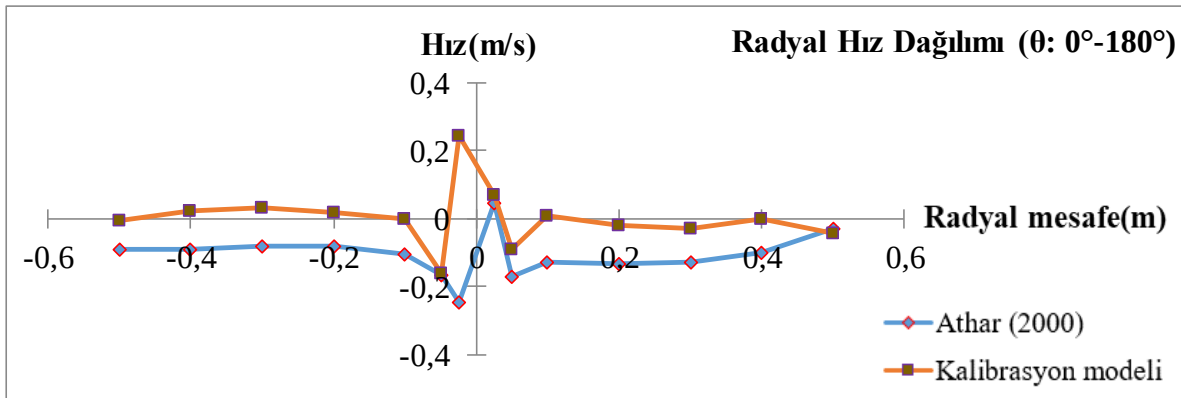


Şekil 4.23. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 135°-315° derece boyunca elde edilen teğetsel hız dağılımı

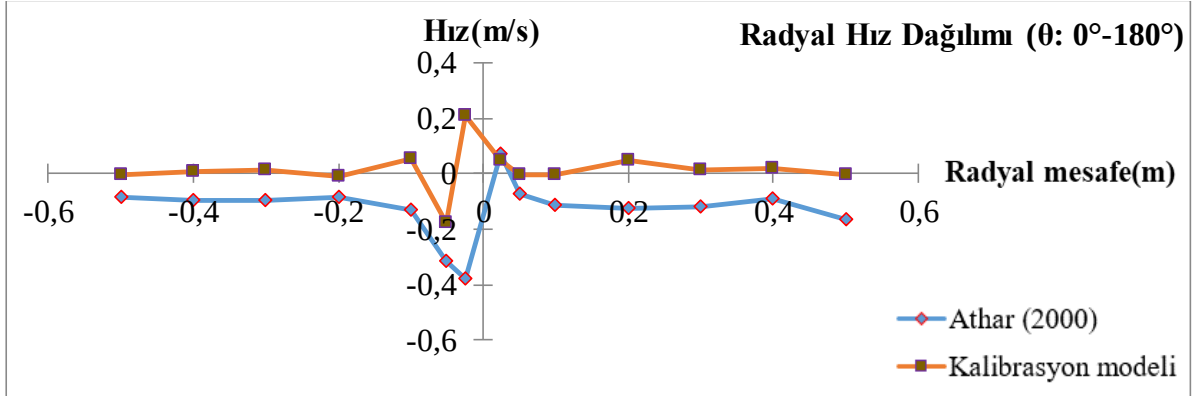
Radyal hız dağılımları

Radyal hız, vorteks çökeltim havuzunda akımın havuz merkezine doğru veya merkezden dışarı doğru olan hareketini temsil eden hız bileşenidir. Silindirik koordinat sisteminde tanımlanan radyal hız, akımın yarıçap doğrultusundaki momentumunu ifade etmekte olup, sediment taneciklerinin merkez bölgeye taşınmasında ve taban orifisine yönlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Athar (2000) çalışmasında radyal hızlar çok küçük ölçüldüğünden Flow-3D ile bulunan değerler yakın olsa dahi hata oranları çok yüksek gözükmemektedir. Bu nedenle radyal hız hata oranları ile ilgili bir çizelge sunulmamıştır.

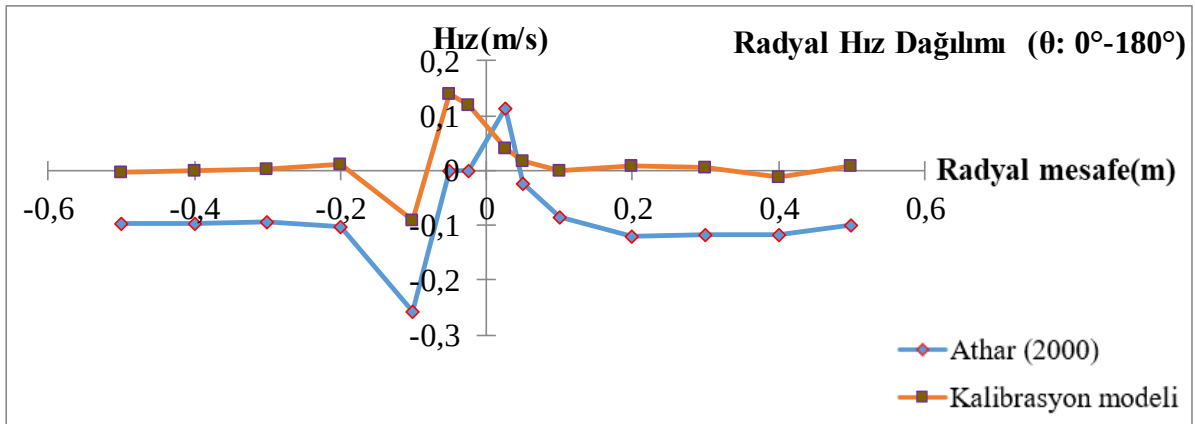
Bu bölümde vorteks çökeltim havuzu içerisinde 6 farklı açısal, 7 farklı radyal ve 3 farklı düşey konumda radyal hızlara ait grafiklere yer verilmiştir. Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26, 0° - 180° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde radyal hız değişimini göstermektedir. Her iki modelde (sayısal ve deneysel) radyal hız profilleri doğrultu olarak benzer bir eğilim göstermiştir. Her iki modelde orifise yakın bölgede radyal hız ani yön değiştirmiştir. Athar (2000) için orifis bölgesinde hız değişimi kalibrasyon modeline göre daha büyük olmuştur. Orta radyal bölgede, her iki model için radyal hızlar oldukça düşük değerler sahip olup orifis merkezine doğru radyal hızlar artmaktadır. Tüm durumlarda kalibrasyon modeli, Athar (2000) modelinden daha yüksek değerler üretmiştir. Athar (2000) modelinde yükseklik ile birlikte radyal hızlar orifis bölgesinde artmış, orta radyal bölgede sıfıra yakın değerlerde seyretnmiştir.



Şekil 4.24. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

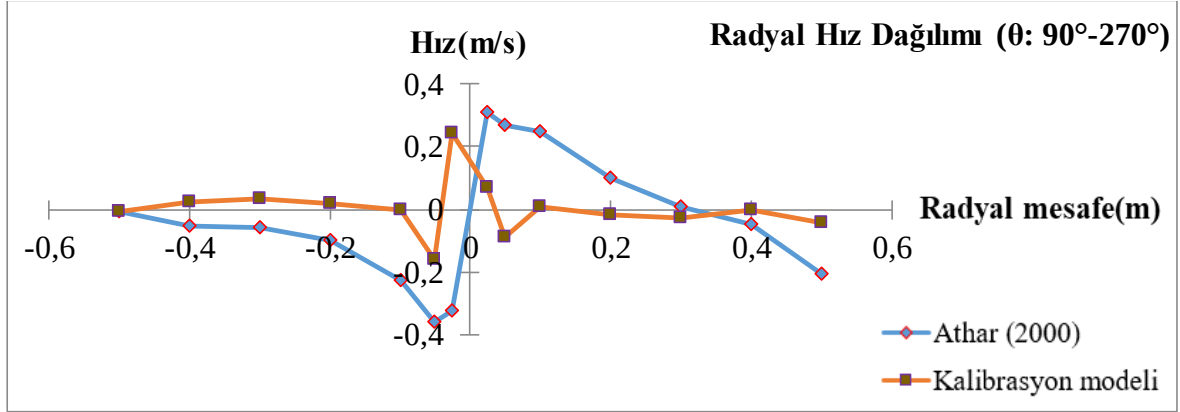


Şekil 4.25. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

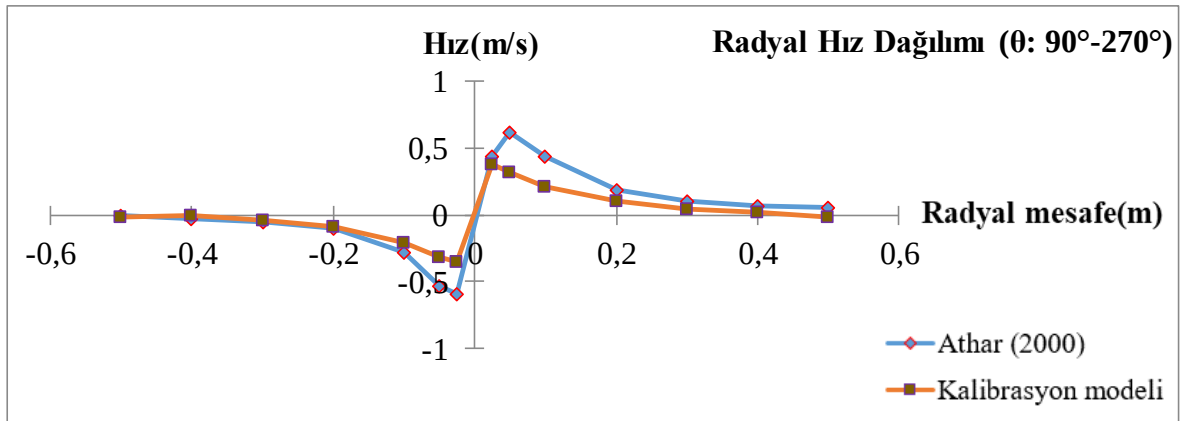


Şekil 4.26. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

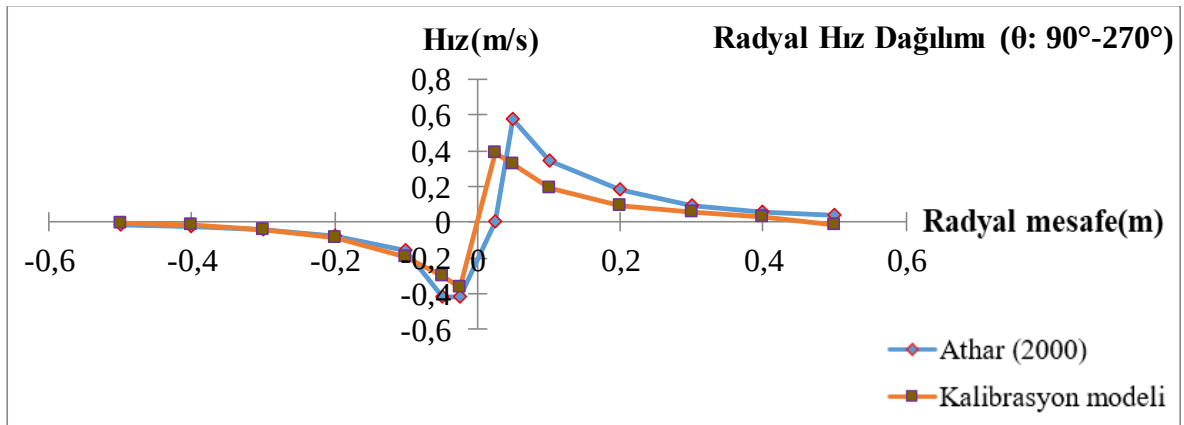
Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29, 90°-270° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde radyal hız değişimini göstermektedir. Radyal hız dağılımları incelendiğinde, 0,01 m düşey yükseklikte Athar (2000) verilerinin merkeze yakın konumlarda 0,3 m/s'nin üzerine çıkan pozitif hız tepe noktası, kalibrasyon modelinde daha düşük 0,25 m/s olarak hesaplanmıştır. Düşey 0,04 m mesafede Athar (2000) verileri en yüksek radyal hıza ulaşmakta; 270° açılı bölgesinde 0,6 m/s'ye yaklaşan keskin bir tepe noktası görülmektedir. Kalibrasyon modeli ise bu tepe değerini yaklaşık 0,4 m/s olarak deneysel veriye göre daha düşük hesaplamıştır. Düşey 0,08 m mesafede 90° açısında Athar (2000)'nin -0,6 m/s civarına ulaşan hız değeri kalibrasyon modeli tarafından tamamen karşılanamamış olsa da eğrinin genel şekli ve değişim eğilimi doğru bir şekilde yakalanmıştır. Düşey 0,04 m ve 0,08 m mesafede kalibrasyon modeli ile deneysel veriler arasındaki fark belirgin olarak azalmıştır.



Şekil 4.27. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

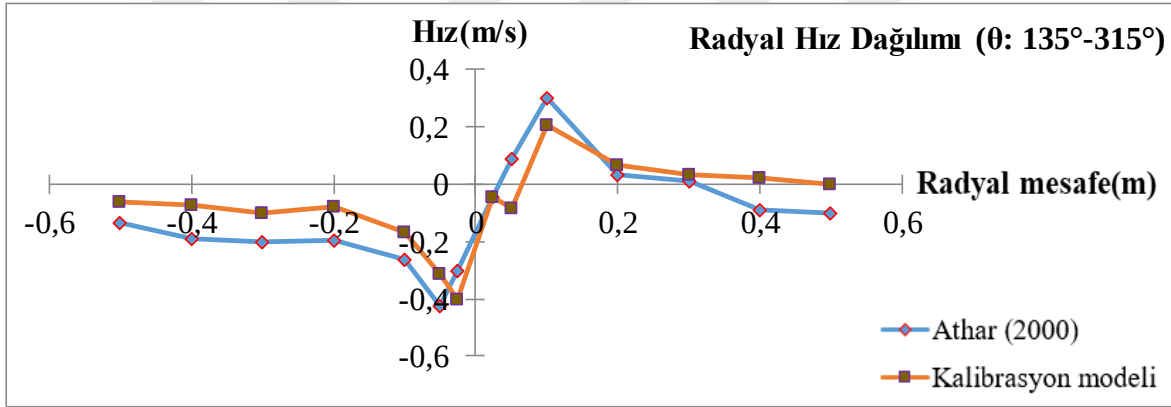


Şekil 4.28. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

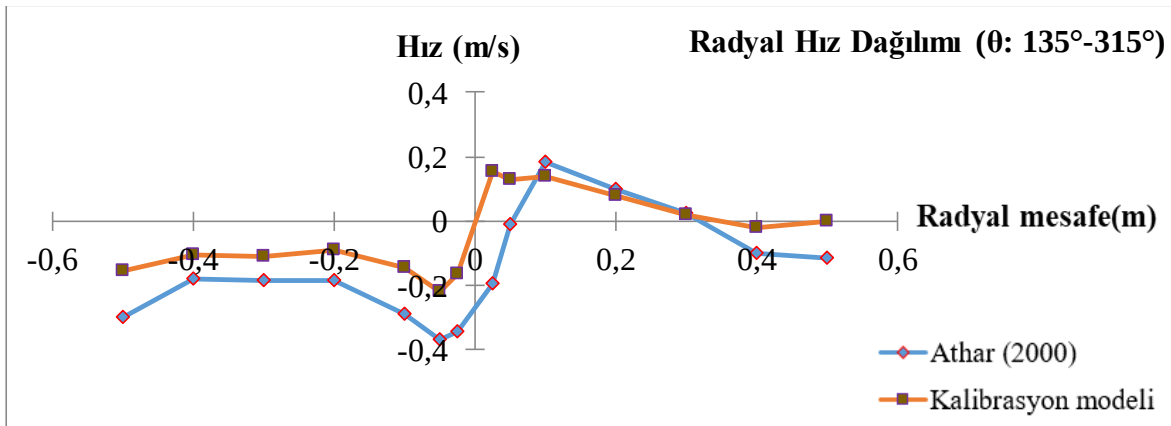


Şekil 4.29. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

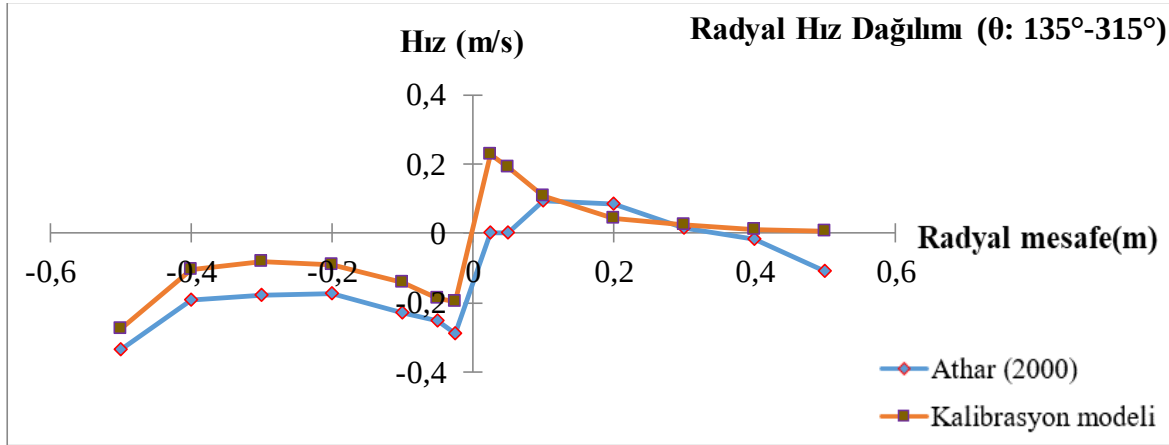
Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32, 135° - 315° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde radyal hız değişimini göstermektedir. Düşey 0,01 m mesafede merkeze yakın bölgede hem kalibrasyon modeli hem de deney verileri merkez noktada ani bir hız artışı göstermektedir. Deneydeki en yüksek hızın kalibrasyon modeline göre biraz daha yüksek olduğu görülse de, genel eğilimler büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Düşey 0,04 m mesafede, 315° açısında 0,2 m civarında model ile deney verilerinin neredeyse tamamen örtüştüğü gözlemlenmektedir. Kalibrasyon modeli, 315° açısındaki bölgedeki değişimleri 135° açısındaki bölgeden daha iyi hesaplamıştır. Düşey 0,08 m mesafede, 315° açısında hem kalibrasyon modeli hem de deney verilerinin tepe noktası orifis civarında büyük ölçüde çakışmaktadır. 315° açısında veriler çoğunlukla örtüşmüş ancak kalibrasyon modeli değerleri daha yüksek kalmıştır.



Şekil 4.30. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135° - 315° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı



Şekil 4.31. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 135° - 315° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

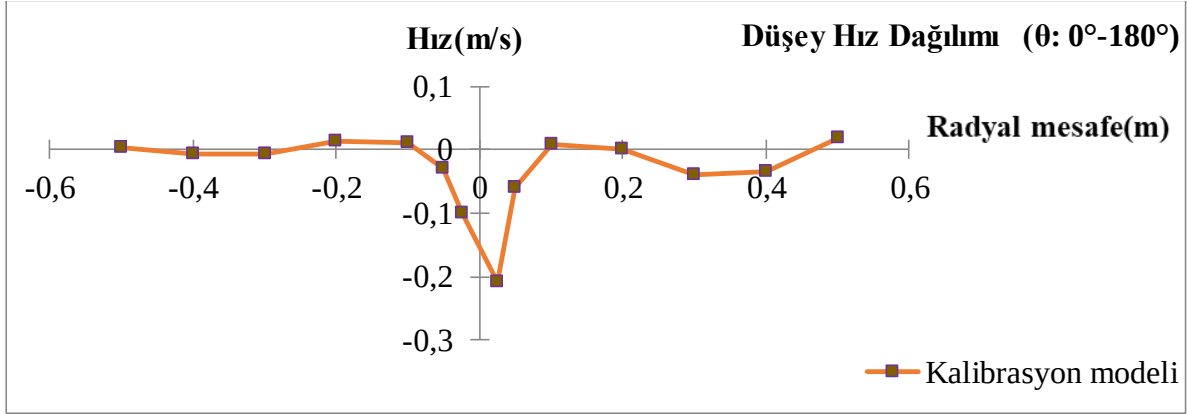


Şekil 4.32. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

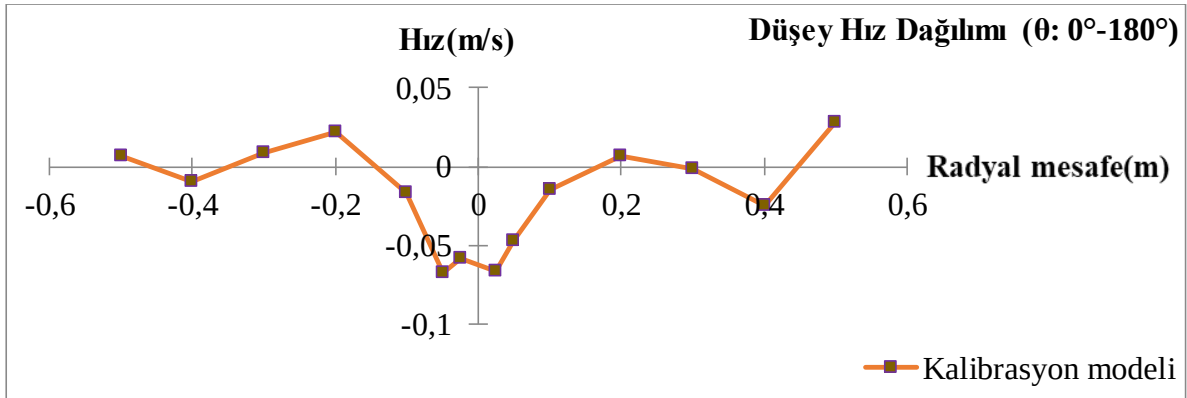
Düşey hız dağılımları

Düşey hız, vorteks çökeltim havuzunda akımın düşey doğrultudaki hareketini temsil eden hız bileşenidir. Bu hız bileşeni, akımın havuz tabanına yönelmesini, merkez bölgedeki aşağı yönlü akışın oluşmasını ve sediment taneciklerini taban orifisine doğru taşınmasını belirleyen temel hidrodinamik parametrelerden biridir.

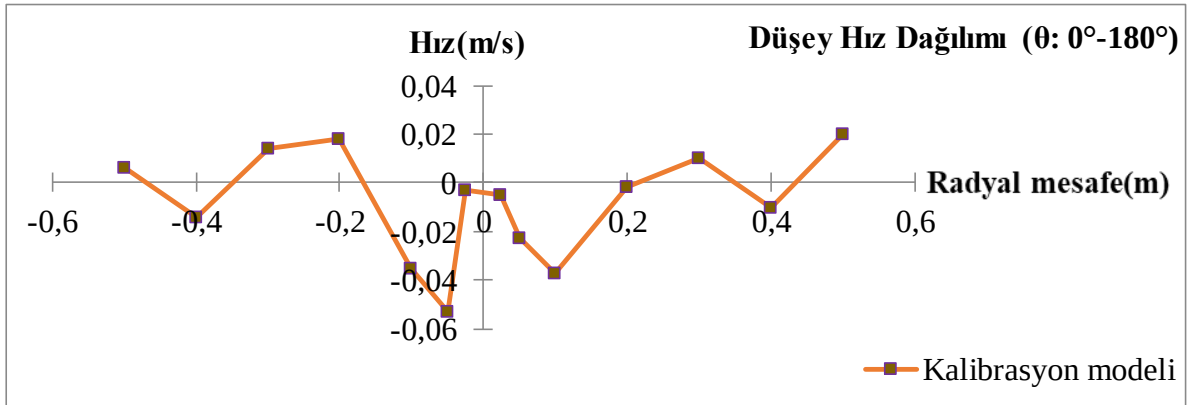
Bu bölümde vorteks çökeltim havuzu içerisinde 6 farklı açısal, 7 farklı radyal ve 3 farklı düşey konumda düşey hızlara ait grafiklere yer verilmiştir. Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35, 0°-180° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde düşey hız değişimini göstermektedir. Deneysel çalışmada düşey hızlar ölçülmediği için bu grafiklerde sadece sayısal model sonuçlarına yer verilmiştir. Düşey 0,01 m mesafe incelendiğinde düşey hız bileşenlerinin daha belirgin değişimler gösterdiği görülmektedir. Düşey 0,04 m mesafede orifiste düşey hızın etkisi belirgin şekilde azalmıştır. Akımın türbülanslı yapısı ve hız değerlerinin düşüklüğü orta radyal bölgede hızın yön işaretlerinin ani değişiminden belirgin şekilde anlaşılmaktadır. Düşey 0,08 m mesafede ise negatif hızların -0,05 m/s kadar küçüldüğü görülmektedir. Yükseklik arttıkça düşey hız bileşeni küçülmüştür.



Şekil 4.33. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

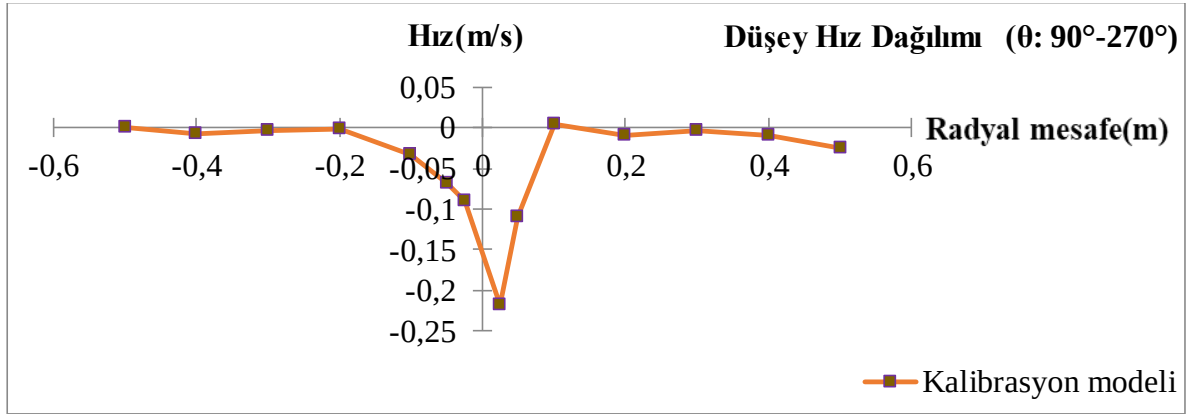


Şekil 4.34. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

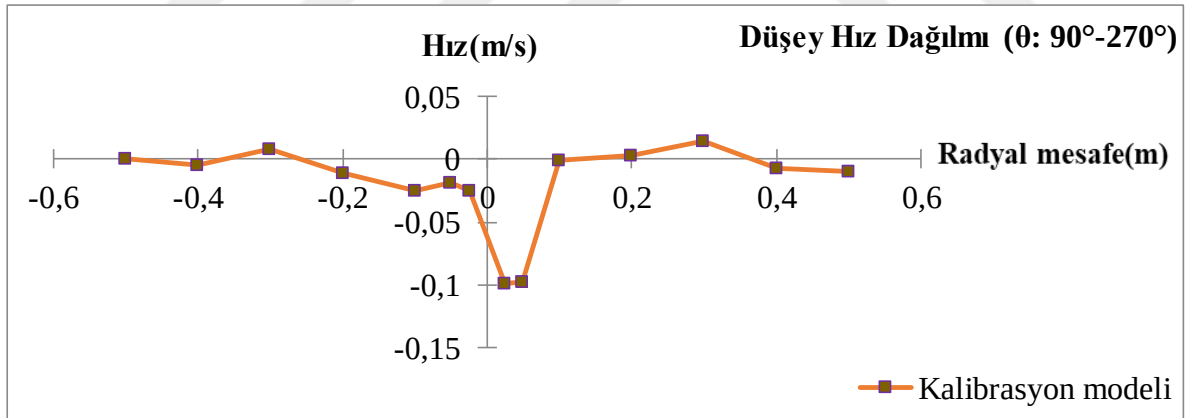


Şekil 4.35. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

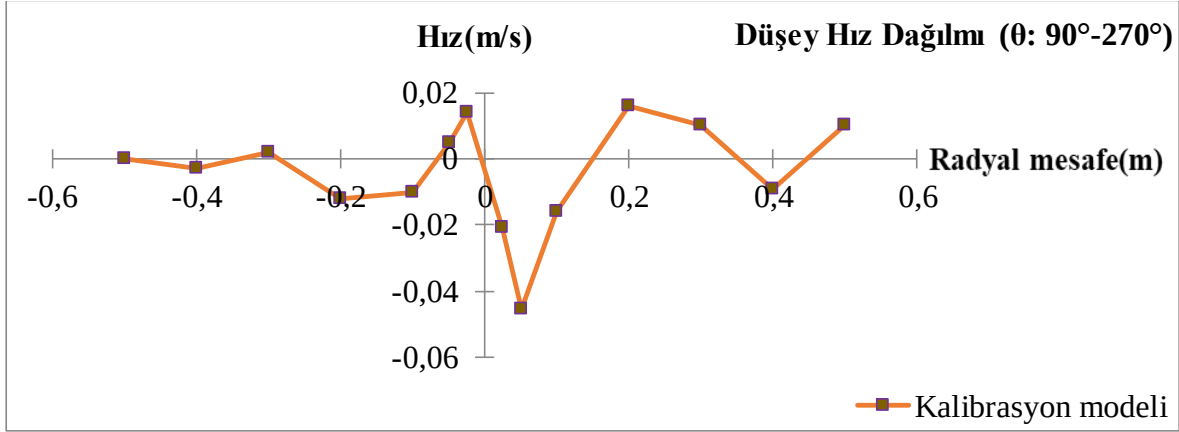
Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38, 90° - 270° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 düşey mesafelerinde düşey hız değişimini göstermektedir. Düşey hız dağılımları 0° - 180° boyunca benzer bir eğilim göstermiştir. Düşey 0,01 m yükseklikte düşey hız bileşeni en yüksek değerine ulaşmakta, merkezde yaklaşık $-0,22$ m/s'lik belirgin bir negatif tepe oluşmaktadır. Su yüzeyine yaklaşıldıkça düşey hız azalmıştır. Orifiste düşey hız negatif aşağı yöndedir.



Şekil 4.36. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90° - 270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

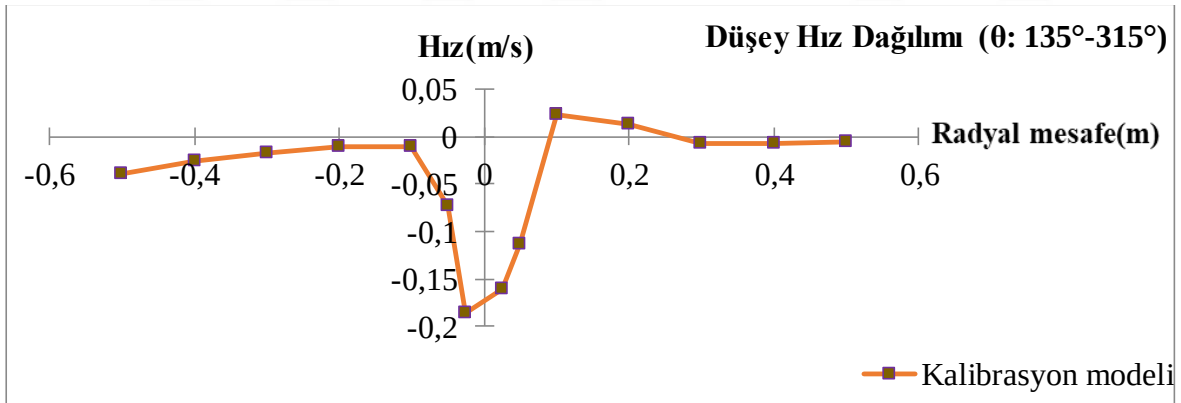


Şekil 4.37. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90° - 270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

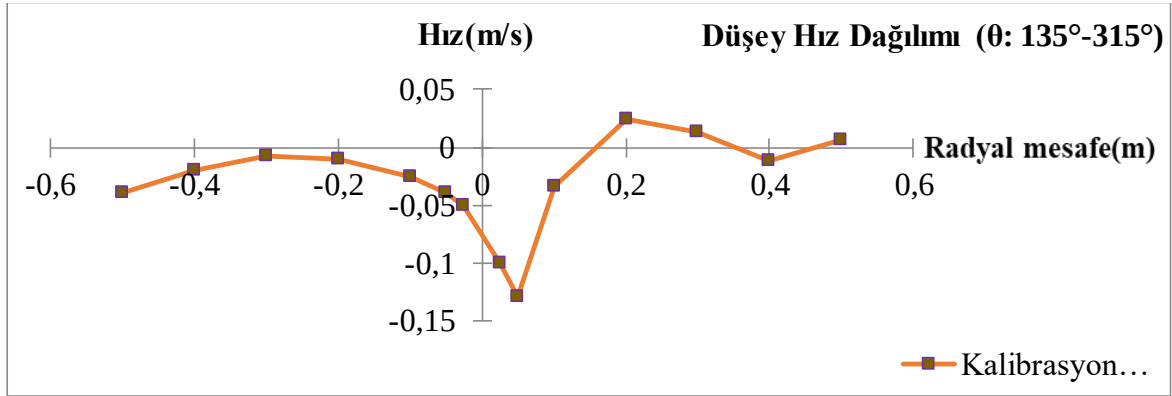


Şekil 4.38. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

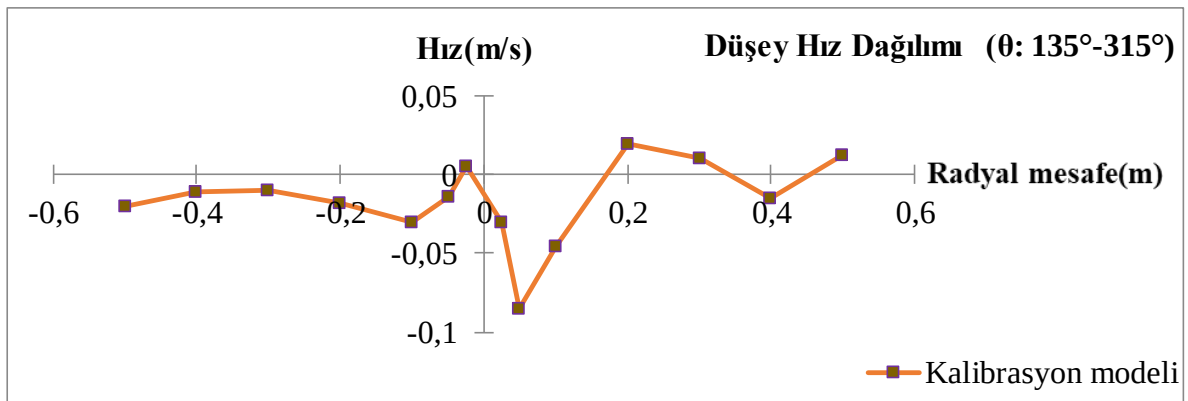
Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41, 135°-315° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,04 ve 0,08 m düşey mesafelerinde düşey hız değişimini göstermektedir. Düşey 0,01 m yükseklikte merkez orifis bölgesine yakın bölgede düşey hız -0,17 ile -0,19 m/s değerlerine ulaşmıştır. Merkezden uzaklaşıldıkça düşey hız, radyal $\pm 0,25$ –0,35 m bölgelerinde -0,03 m/s ile 0 m/s değerlerine kadar düşmüş ve aşağı yönlü hareket zayıflamıştır. Benzer davranışlar 0,04 m ve 0,08 m düşey yüksekliklerde de gözlemlenmiştir.



Şekil 4.39. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı



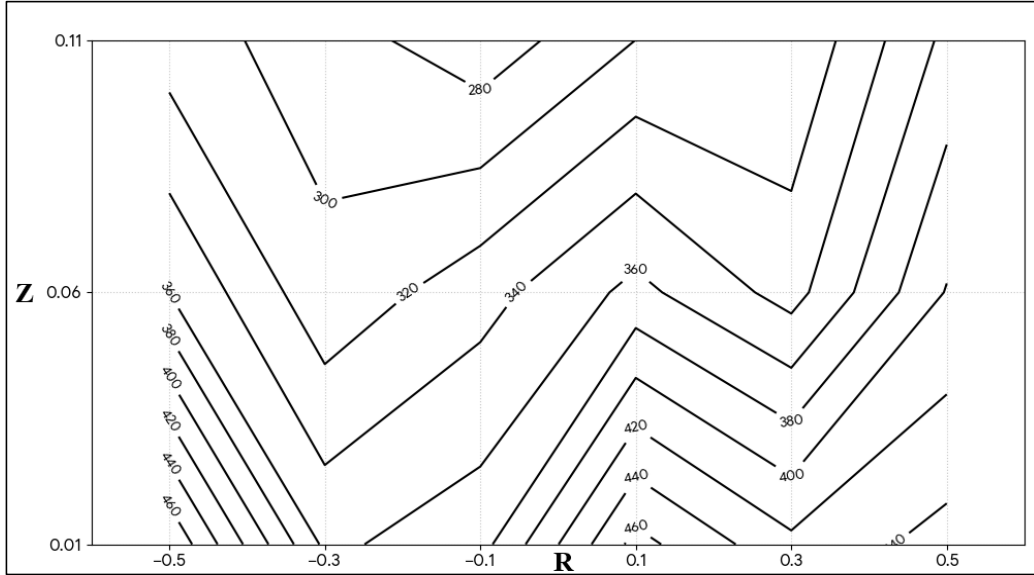
Şekil 4.40. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı



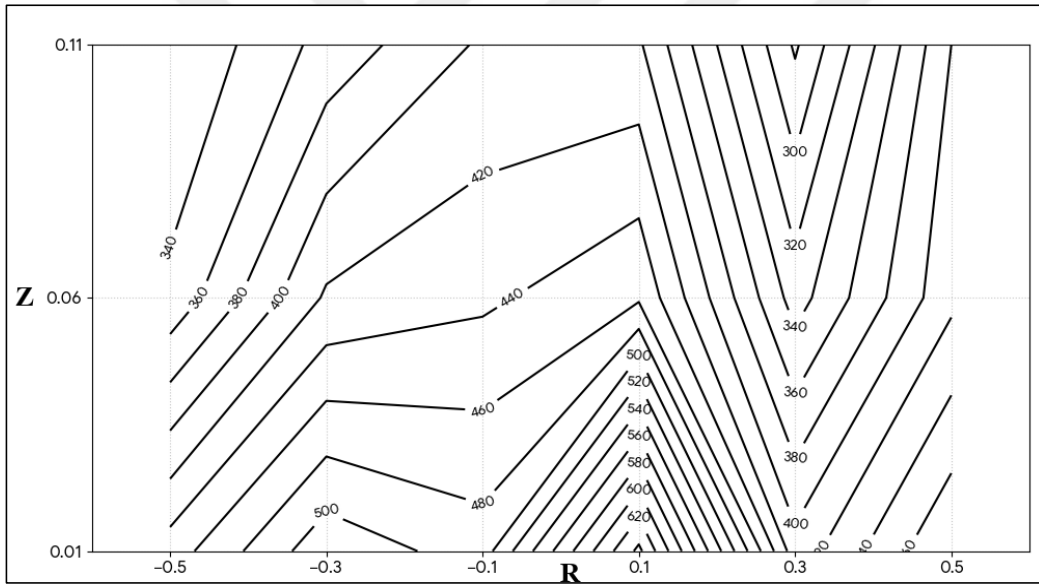
Şekil 4.41. Kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

4.3.2. Konsantrasyon Dağılımı

Şekil 4.42, Athar (2000) verilerine ait ve Şekil 4.43 kalibrasyon modeline ait 0°-180° derece doğrultusunda elde edilen konsantrasyon kontür dağılımını göstermektedir. Kalibrasyon modeli ile Athar (2000) deneysel verilerine ait konsantrasyon kontürleri genel olarak benzer bir topoloji göstermektedir. Bununla birlikte özellikle yüksek konsantrasyon değişimlerinin olduğu bölgelerde iki model arasında sapmalar olduğu görülmektedir. Ancak her iki modelde de tabana doğru gittikçe konsantrasyon artmaktadır.



Şekil 4.42. Athar (2000) 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon kontür dağılımı



Şekil 4.43. Kalibrasyon modeline ait 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon kontür dağılımı

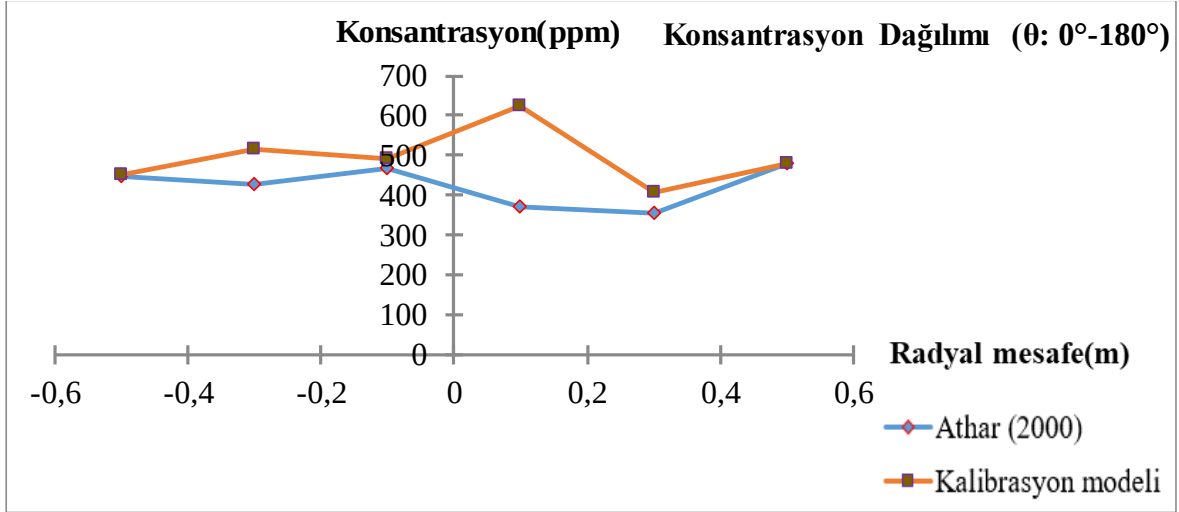
Çizelge 4.13, Athar (2000) deneysel verileri ile kalibrasyon modelinden elde edilen konsantrasyon sonuçlarının karşılaştırmasını göstermektedir. Çizelge incelendiğinde en düşük hatalar, 90° yönünde, 0,5 m radyal mesafe ve 0.06 m düşey konumunda elde edilmiştir. Buna karşılık en yüksek hatalar, özellikle 0°, 45° ve 225° açılarında, 0,1 m ve 0,3 m radyal mesafelerinde ve çoğunlukla 0,01m ile 0,11m düşey konumlarında ölçülmüştür. Gelen akımdan dolayı giriş kanalına yakın 0° açısal bölgesinde konsantrasyon değerleri daha yüksek hata ile ölçülmüştür. Gelen akımın havuz içindeki ilk kurb noktası 45° açılı bölgesinde de ortalama hata yüksektir.

Kalibrasyon modeli, konsantrasyon değerlerini Athar (2000) değerlerinden genel olarak yüksek hesaplamış ancak 225° açısıl bölgesinde konsantrasyon değerleri belirgin şekilde daha düşük hesaplanmıştır. Kalibrasyon modeli konsantrasyon değerlerini havuz tabanı ve yüzeye yakın bölgelerde daha büyük hata değerleri ile hesaplamış, havuzun orta bölgelerinde ise daha düşük hata değeri ile hesaplayabilmiştir.

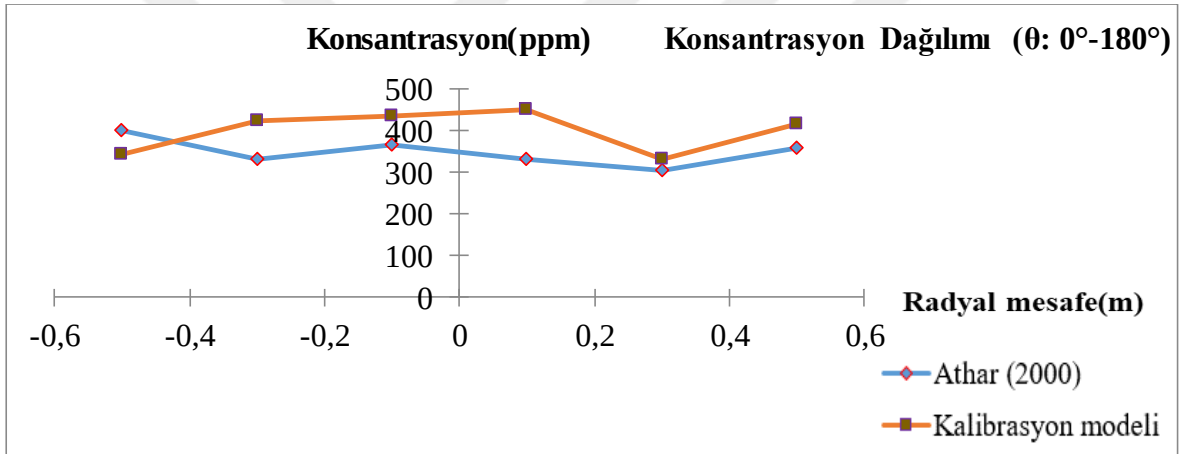
Çizelge 4.13. Athar (2000) deneysel verileri ile kalibrasyon modelinden elde edilen konsantrasyon verilerinin yüzdesel hata karşılaştırması

θ Açısı	z (m)	r (m)		
		0,1 m	0.3 m	0.5 m
0°	0,01	%42.25	%12.82	%0.44
	0.06	%27.35	%7.61	%13.33
	0,11	%33.70	%-4.57	%22.58
90°	0,01	%13.97	%13.37	%-2.36
	0.06	%4.87	%12.59	%1.16
	0,11	%20,20	%-0.88	%2.33
180°	0,01	%4.73	%17.30	%0.56
	0.06	%16.15	%21.51	%-16.32
	0,11	%25.51	%17.77	%-14.06
270°	0,01	%22.85	%27.10	%-4.60
	0.06	%18.88	%19.95	%-4.63
	0,11	%20,17	%15.13	%5.31

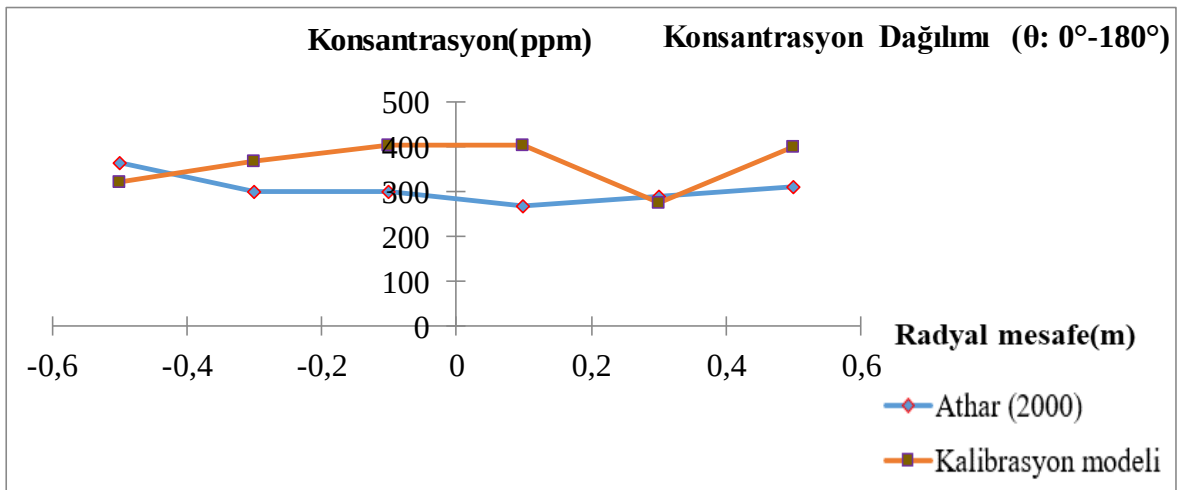
Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 sırasıyla 0,01 ,0.06 ve 0,11 m düşey yüksekliklerde Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait 0° - 180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımını gösterilmektedir. Gerek sayısal gerek deneysel modelde konsantrasyon değerlerinde ani değişimler görülmemiş sayısal model genelde deneysel verilerden daha yüksek konsantrasyon değerleri vermiştir.



Şekil 4.44. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

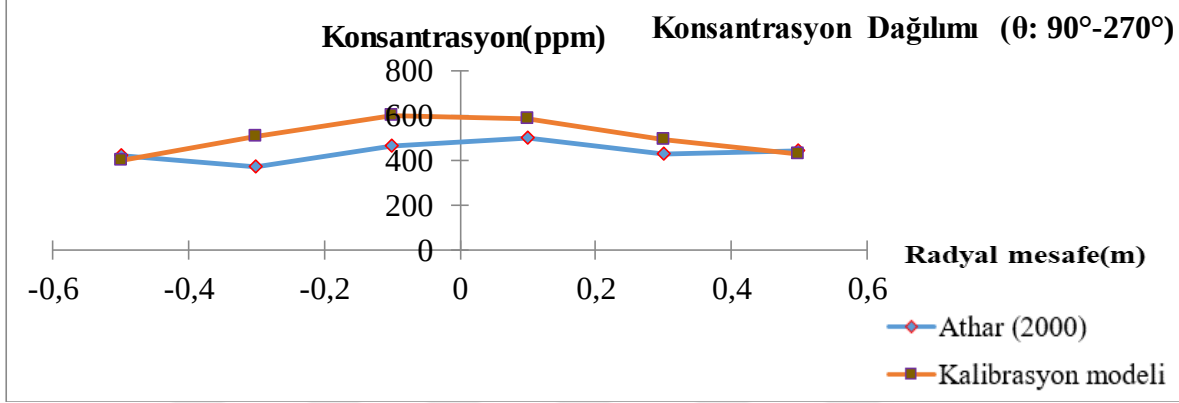


Şekil 4.45. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

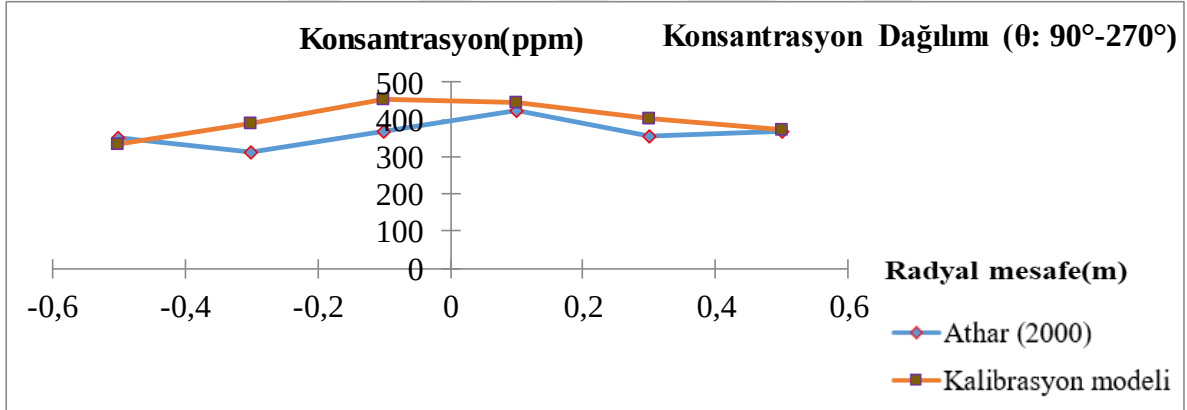


Şekil 4.46. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

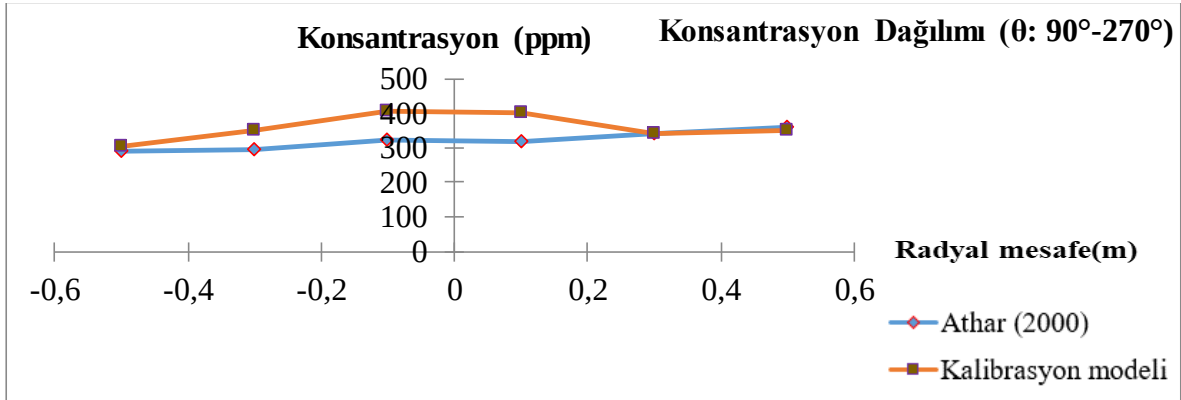
Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49; Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından sırasıyla 0,01 0,06 ve 0,11 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı gösterilmektedir. 90°-270° doğrultusunda en yüksek konsantrasyon değerleri genelde havuz merkezine yakın bölgede görülmüştür.



Şekil 4.47. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

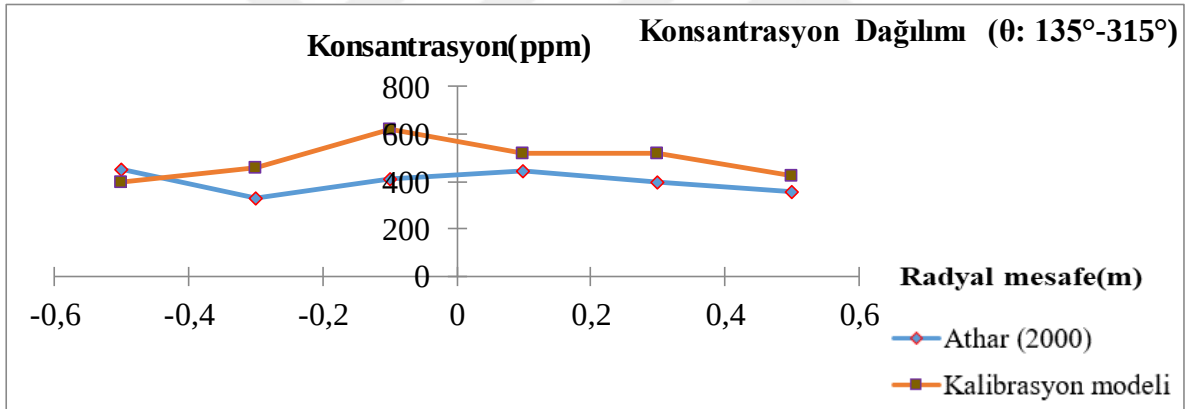


Şekil 4.48. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

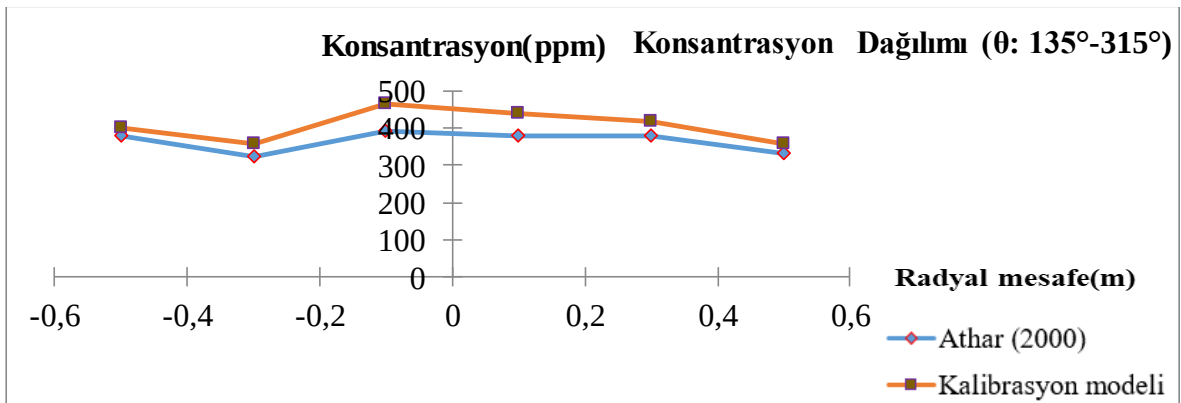


Şekil 4.49. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

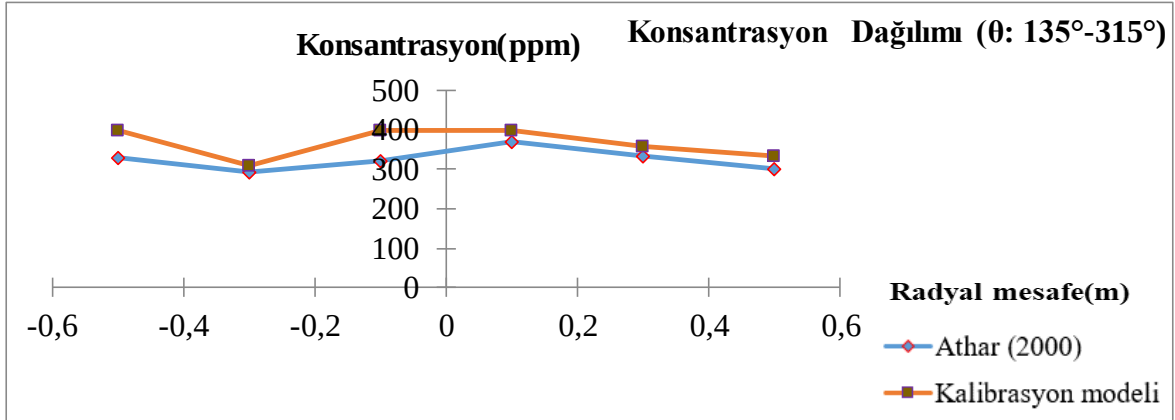
Şekil 4.50, Şekil 4.51. ve Şekil 4.52’de 0,01, 0,06 ve 0,11m düşey yüksekliklerde 135°-315° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı gösterilmektedir. Bu doğrultuda görülen davranış da diğer doğrultulardakine benzerdir.



Şekil 4.50. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı



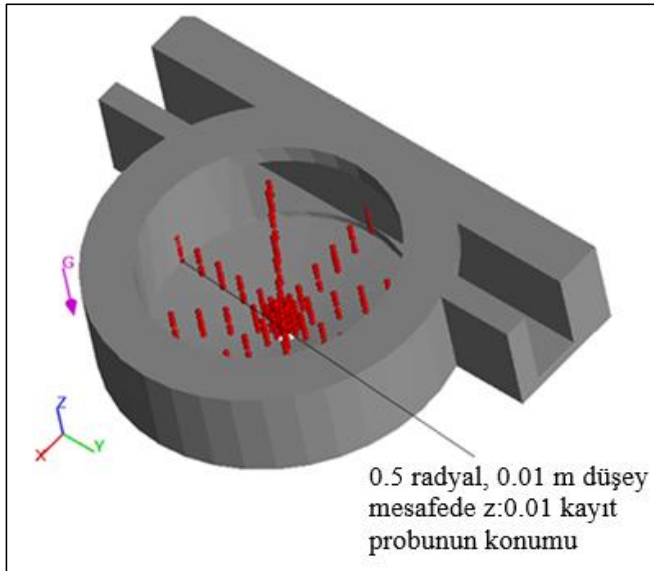
Şekil 4.51. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı



Şekil 4.52. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 135°-315° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

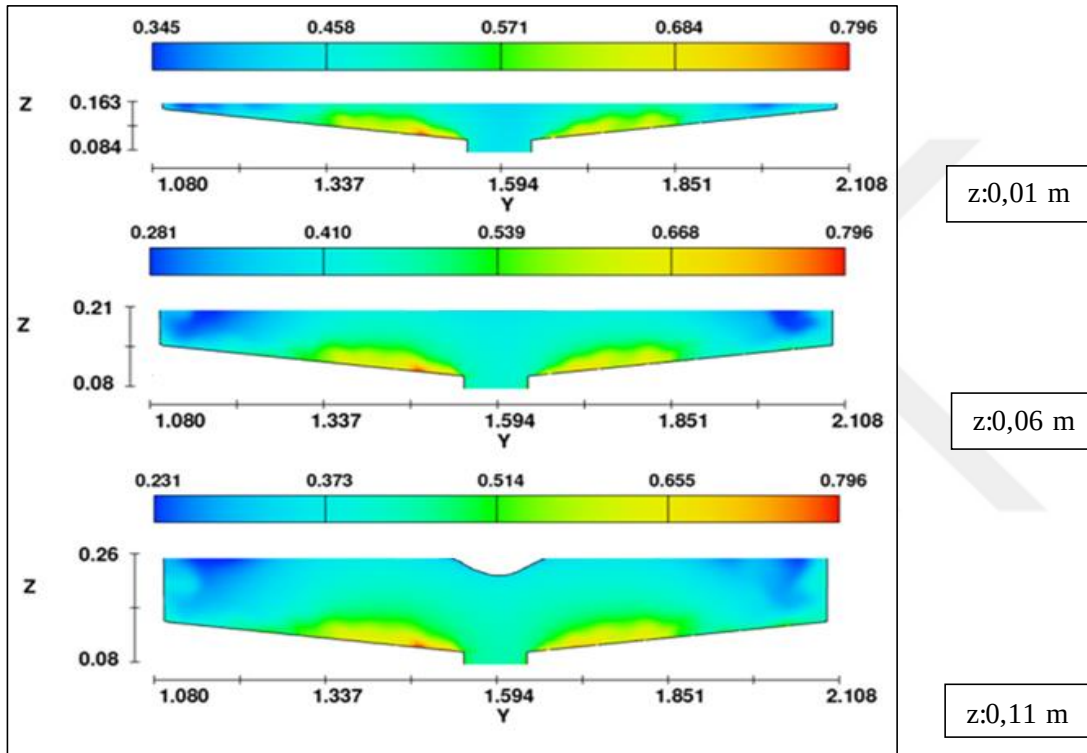
Askıda sediment konsantrasyonu dağılımının sayısal model yardımıyla incelenmesi

Şekil 4.53, Athar (2000)'de ölçüm noktası olarak seçilen konumlardan 0,01 m yüksekliğine yerleştirilen kayıt probunu göstermektedir. İlgili şekil, 0.5 m radyal mesafe boyunca, ilk ölçüm yüksekliği olan 0,01 m'den başlayarak farklı düşey seviyelerde elde edilen kesit görüntülerini içermektedir.



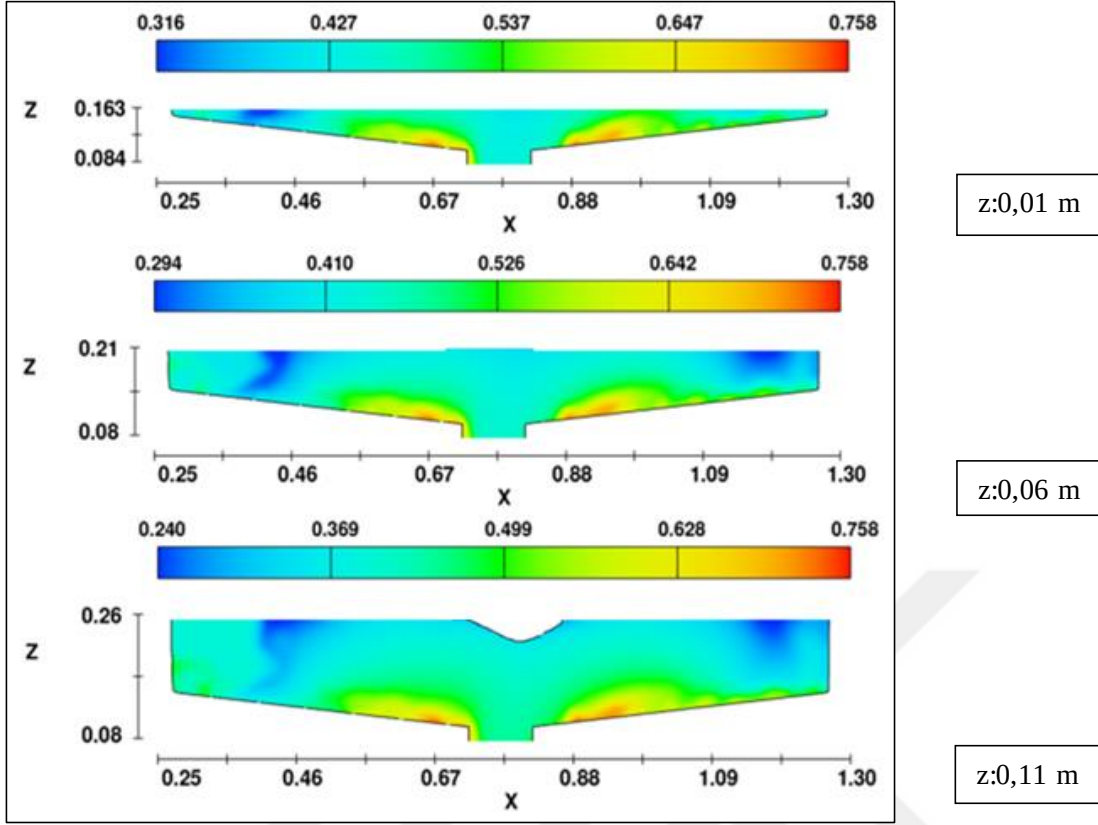
Şekil 4.53. Athar (2000) çalışmasında ölçüm noktası olarak seçilen konumlara kayıt problemlerinin yerleştirilmesi

Şekil 4.54 askıda sediment konsantrasyonunun Y-Z ekseninde radyal 0.5 metrede sırasıyla 0,01, 0,06 ve 0,11 m yüksekliklerinde alınan kesit görüntülerini göstermektedir. 90°-270° doğrultusunda askıda sedimentin orifise yakın tabanda halka şeklinde biriktiği görülmektedir. Belirtilen 90°-270° doğrultusu giriş kanalından çıkış kanalına doğru uzanan yöndür. Havuz duvarlarına yakın bölgelerde konsantrasyonda azalma meydana gelmiştir. Havuzun orta üst bölgelerinde konsantrasyon değerleri nispeten dengeli dağılmıştır.



Şekil 4.54. Askıda sediment konsantrasyonunun Y-Z ekseninden 90°-270° sırasıyla 0,01 m, 0,06 m ve 0,11 m yüksekliklerinde alınan kesit görüntüleri

Şekil 4.55 askıda sediment konsantrasyonunun X-Z ekseninden 0°-180° doğrultusunda sırasıyla 0,01 m, 0,06 m ve 0,11 m yüksekliklerinde alınan kesit görüntülerini göstermektedir. Sedimentin orifise yakın bölgede tabana halka şeklinde yayılı birikim gösterdiği görülmektedir. Havuz duvarlarına yakın bölgelerde 90°-270° doğrultusuna benzer şekilde askıya kalkan konsantrasyonda düşüş meydana gelmiştir. Havuzun orta üst bölgelerinde konsantrasyon değerleri azalmış ve yüzeyde en düşük değerini almıştır. Genel olarak derinlik arttıkça konsantrasyon dağılımının üst kısımlarda seyrelip alt kısımlarda yoğunlaştığı görülmüştür.



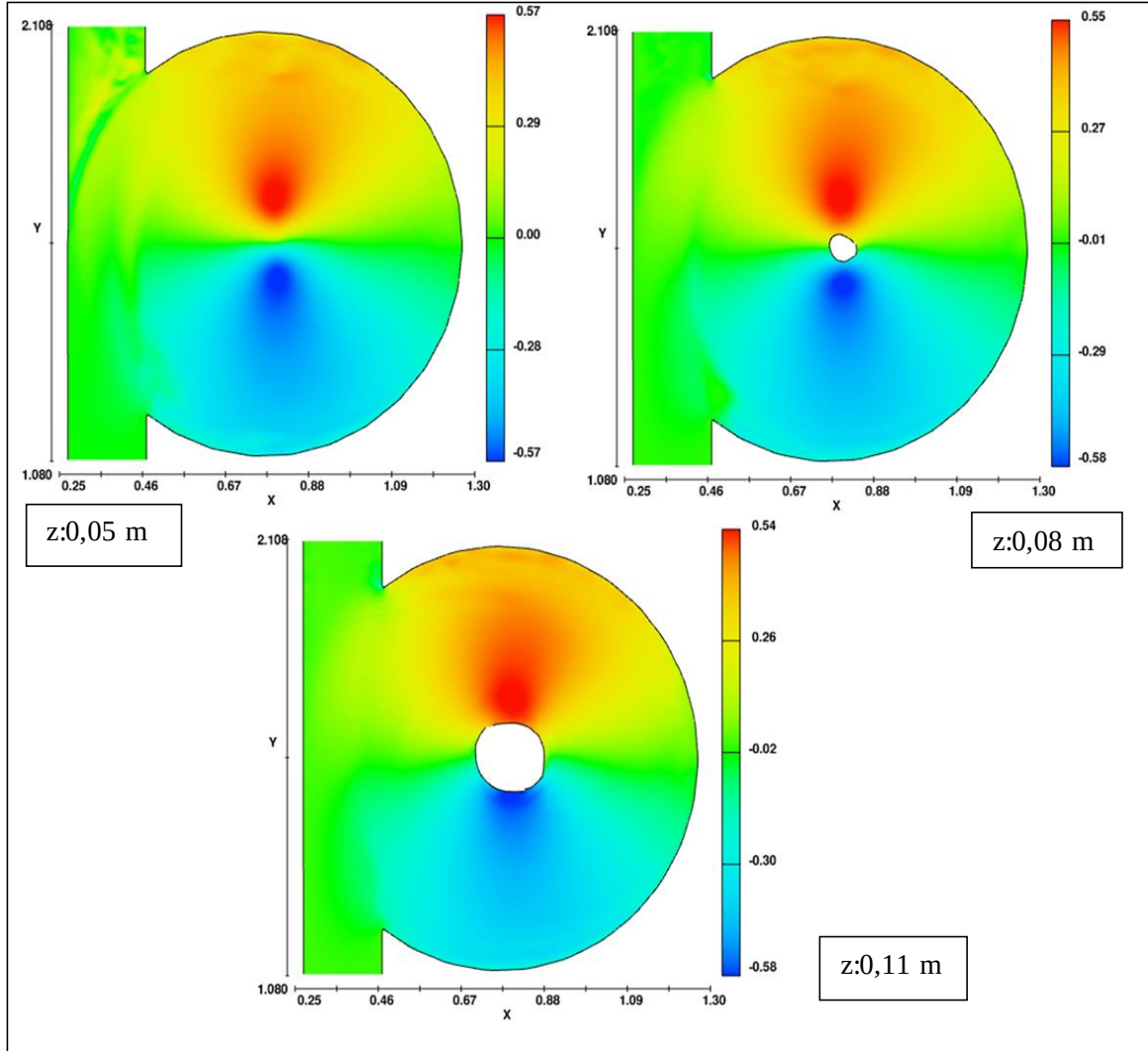
Şekil 4.55. Askıda sediment konsantrasyonunun X-Z ekseninden 0° - 180° doğrultusunda sırasıyla 0,01, 0,06 ve 0,11 yüksekliklerinde alınan kesit görüntüleri

Teğetsel, radyal ve düşey hız dağılımının sayısal model yardımıyla incelenmesi

Vorteks çökeltim havuzlarında akış, radyal, teğetsel ve düşey olmak üzere üç temel hız bileşeni ile tanımlanır. Radyal hız, havuz merkezinden dışa veya dıştan merkeze doğru olan hareketi gösterir. Teğetsel hız, havuz etrafındaki dönme hareketini ifade eder ve yüksek teğetsel hız, merkezde düşük basınç oluşturarak sediment tanelerinin tabanda birikmesini sağlar. Düşey hız ise yukarı-aşağı yönlü akışı belirtir ve negatif değerler, sedimentin çökmesini kolaylaştırır.

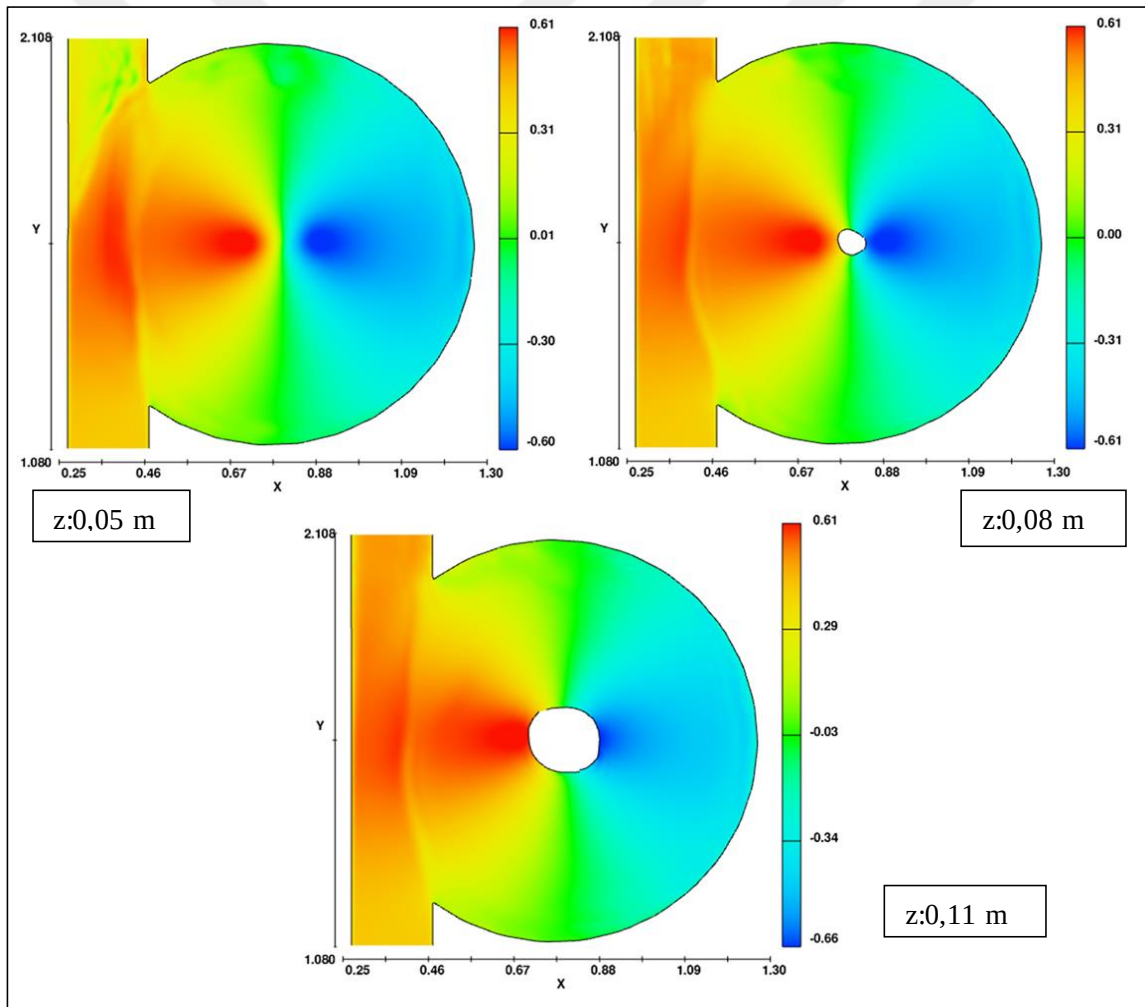
Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere y yönü giriş kanalından çıkış kanalına doğru uzanan doğrultudur. Y yönü boyunca uzanan hız vektörü 0° - 180° doğrultusunda teğetsel hız vektörünü temsil etmektedir. Y yönü, 90° - 270° doğrultusu için radyal hıza karşılık gelmektedir. Tam tersi durumda x yönündeki hız vektörü teğetsel hıza karşılık gelmektedir. Bu durumda x yönündeki hız 90° ve 270° konumlarında teğetsel, 0° ve 180° konumlarında radyal hızı vermektedir.

Şekil 4.56 x yönündeki hızı göstermektedir. Plan görünümü sırasıyla 0,05, 0,08 ve 0,11 m düşey kesitlerden elde edilmiştir. 90° ve 270° konumlarında teğetsel hız orifise yakın bölgede artmaktadır. Akış dairesel bölge içinde simetrik ve hız merkez çevresinde güçlü bir gradyana sahiptir. Yükseklik arttıkça hız değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemiş ancak vorteks yapısına bağlı olarak vorteks çapı büyümüştür.



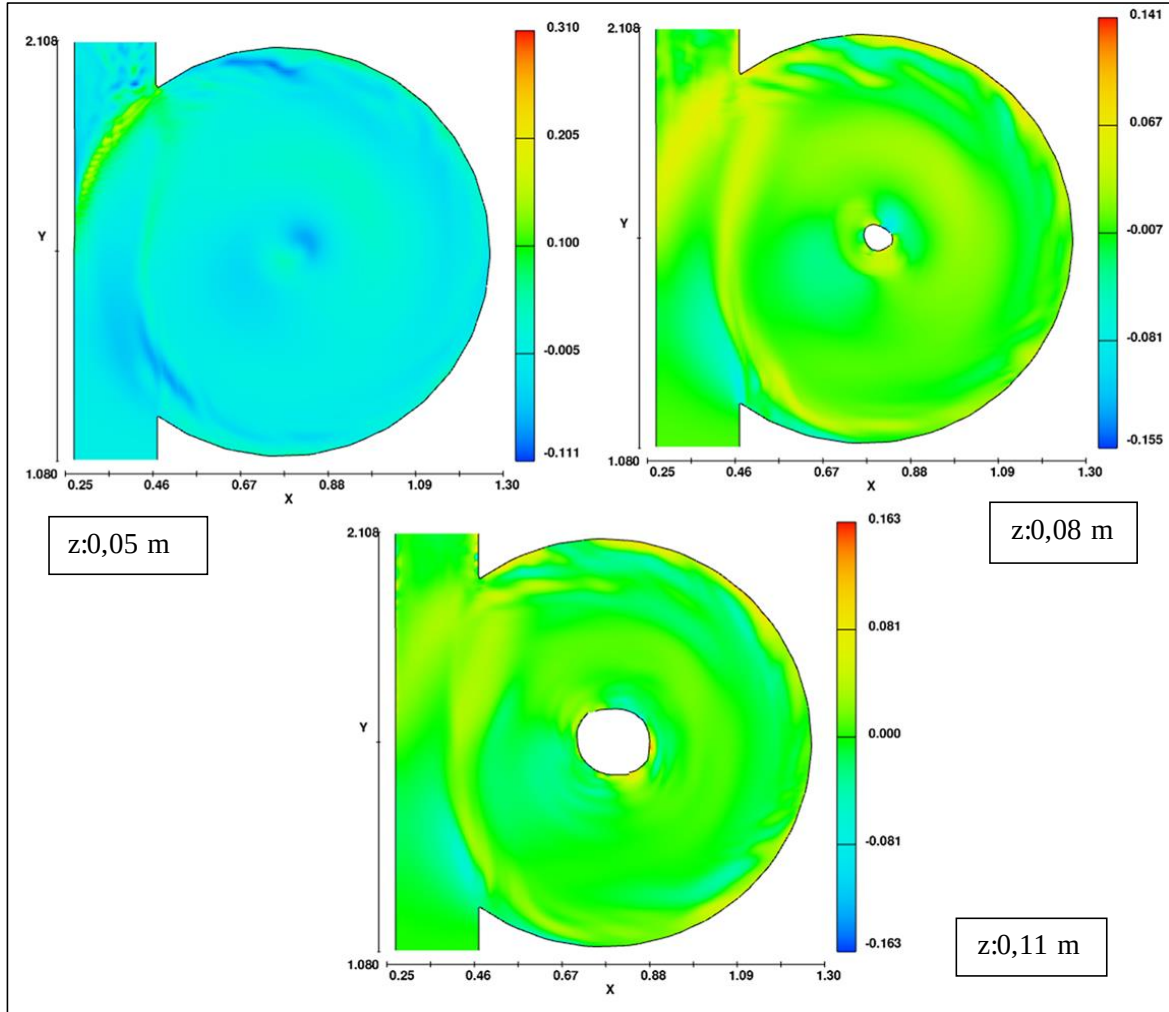
Şekil 4.56. X yönündeki hız dağılımının plan görünümü

Şekil 4.57, y yönündeki hızı göstermektedir. Plan görünümüleri sırasıyla 0,05, 0,08 ve 0,11 m düşey kesitlerden elde edilmiştir. Radyal 0° açısında, gelen akımın sahip olduğu başlangıç momentumunun teğetsel hız bileşeni, havuz bölgesine girişte artış göstermektedir. Bu artışın temel nedeni, akışın dairesel geometri boyunca yönünü koruyarak dönme hareketini sürdürmesidir. Bu nedenle 180° açısındaki y-yönü hızları, büyüklük olarak 0° açısına benzer bir davranış sergilemektedir. Özellikle orifis çevresinde oldukça güçlü bir dönme oluşmakta ancak yüzeye doğru çıkıldıkça hız büyüklüklerinde belirgin bir değişim görülmemektedir. Buna karşın, vorteks yapısının karakteristik davranışı nedeniyle su yüzeyindeki düşüm miktarı artmış ve bunun sonucunda vorteksin görünür çapı genişlemiştir.



Şekil 4.57. Y yönündeki hız dağılımının plan görünümü.

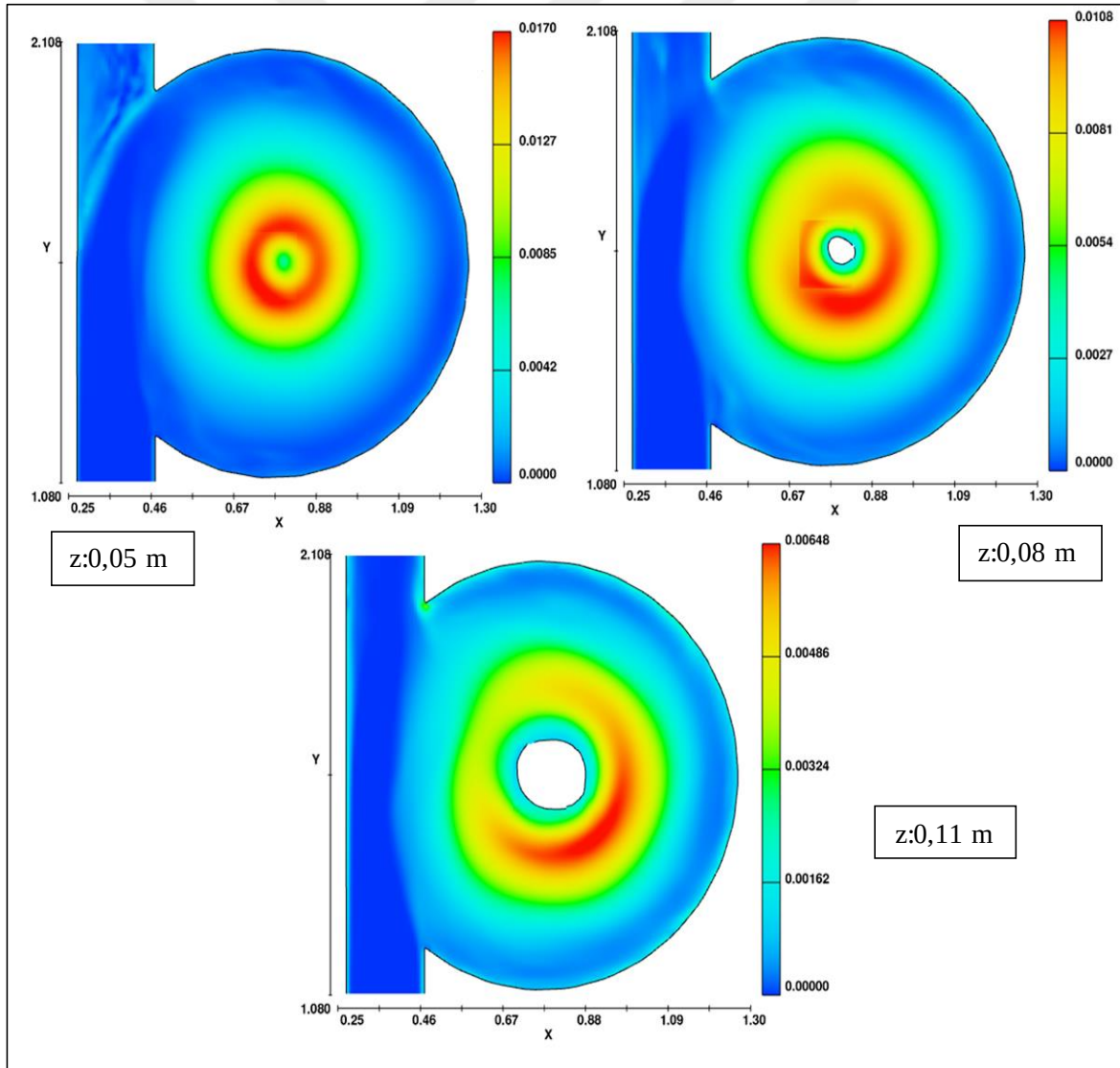
Şekil 4.58, z yönündeki hızı göstermektedir. Plan görünümü sırasıyla 0,05, 0,08 ve 0,11 m düşey kesitlerden elde edilmiştir. Düşey hız havuzda kesit boyunca sabit kalmış ancak orifis bölgesine yaklaştıkça bir miktar arttığı görülmüştür.



Şekil 4.58. Z yönündeki hız dağılımının plan görünümü.

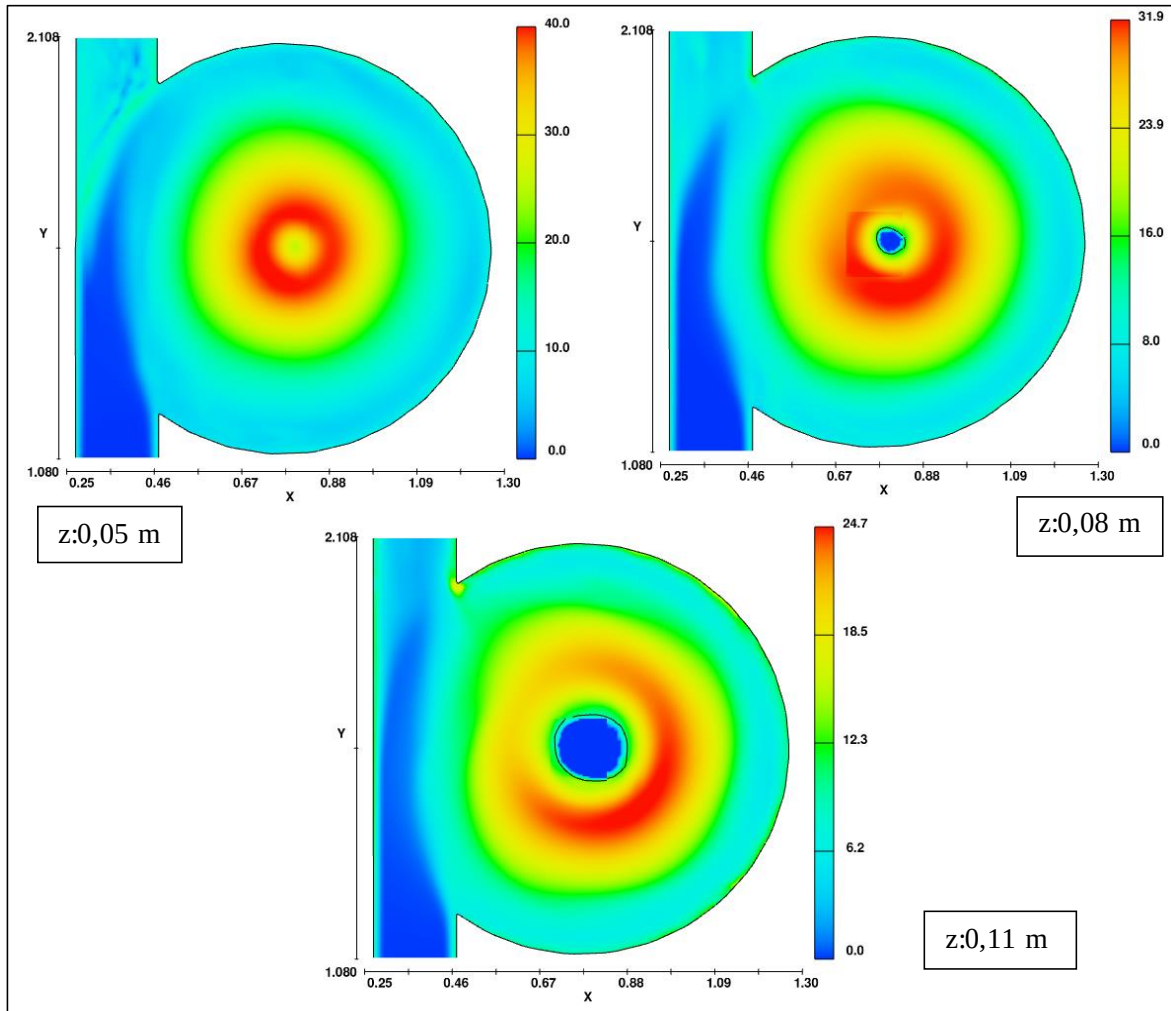
Türbülans parametrelerinin incelenmesi

Şekil 4.59 türbülans enerjisi dağılımını göstermektedir. Plan görünümüleri sırasıyla 0,05, 0,08 ve 0,11m düşey kesitlerden elde edilmiştir. Düşey 0,05 m yükseklikte türbülans enerjisi merkezde dairesel ve simetrik. Düşey 0,08 m yükseklikte vorteksten ötürü simetri bozulmaktadır. Düşey 0,11 m yükseklikte ise merkezdeki türbülans enerjisi daha geniş bir alana yayılmış ancak büyüklüğü azalmıştır. Akım orifise ulaştığında kesit daralır ve buna bağlı olarak hız artmaya başlar. Artan hız ile akımın helisel hareketi, orifis çevresinde şiddetli hız gradyanlarının oluşmasına yol açar. Dönel akıştaki artış, orifis çevresinde radyal kayma gerilmelerine yol açar ve vortisiteyi artıran türbülansı üretir. Bu etkiler sonucunda orifis bölgesi, vorteks çökeltim havuzu içerisinde TKE'nin en yüksek olduğu kritik bölgedir. oluşturur.



Şekil 4.59. Türbülans enerjisi dağılımının plan görünümü

Şekil 4.60 türbülans şiddeti dağılımını göstermektedir. Plan görünümüleri sırasıyla 0.05, 0.08 ve 0.11 m düşey kesitlerden elde edilmiştir. Düşey 0.05 m yükseklikte türbülans şiddeti merkezde, dairesel olarak yayılmaktadır. Orifiste daralan kesitte akış hızlanır ve türbülans şiddeti artar. Düşey 0.08 m yükseklikte vorteks kaynaklı genişlemeyle birlikte simetri bozulmaktadır. Düşey 0.11m yükseklikte ise merkezdeki türbülans enerjisi daha geniş bir alana yayılmış ancak büyüklüğü azalmıştır. Türbülans şiddeti, türbülans enerjisine benzer bir dağılım göstermiştir.

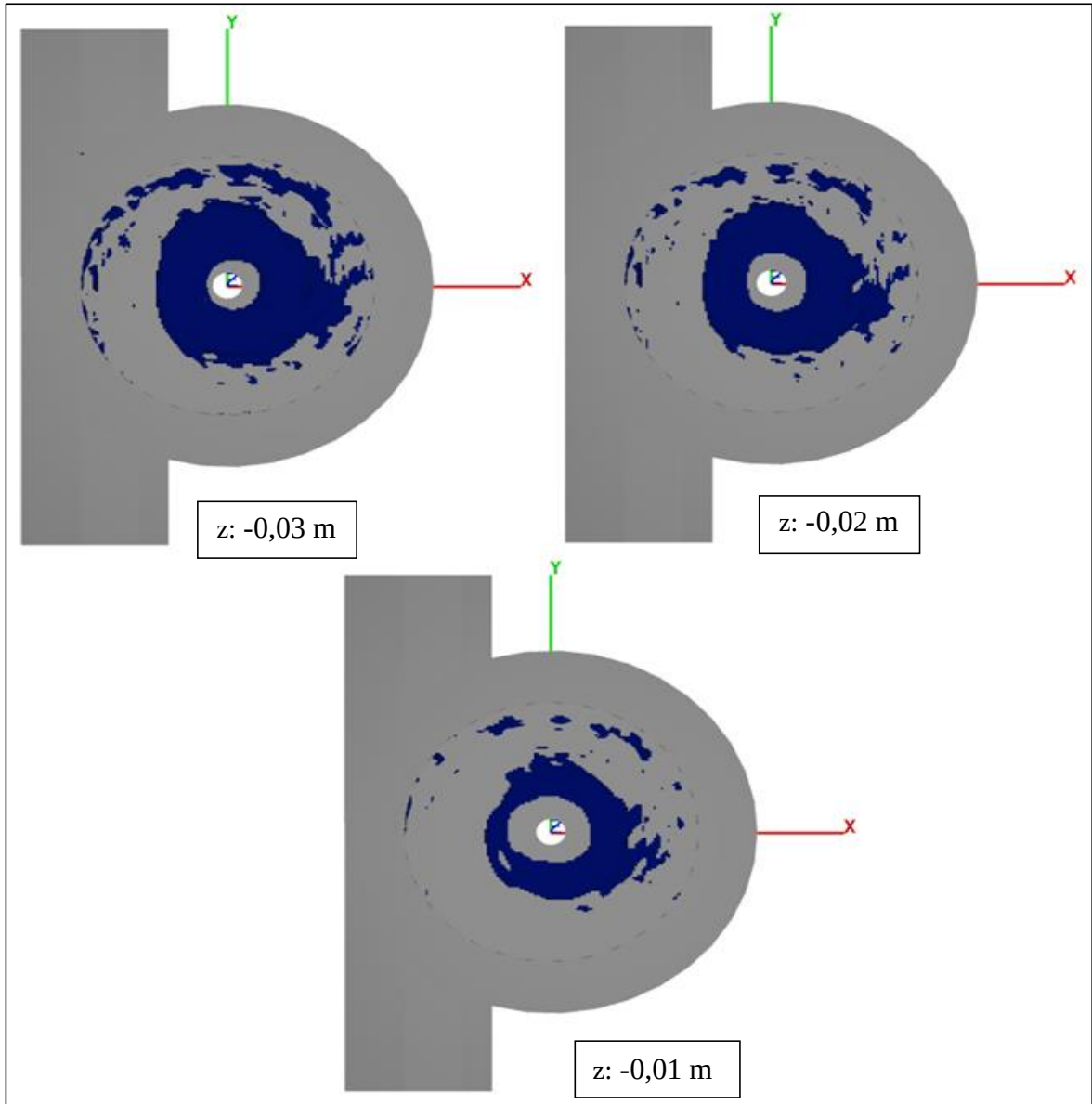


Şekil 4.60. Türbülans şiddeti dağılımının plan görünümü

Tabanda biriken sediment ve tuzaklama verimliliğinin incelenmesi

Şekil 4.61 kararlı akım durumunda vorteks çökeltim havuzu tabanında biriken sediment miktarını göstermektedir. Plan görünümüleri sırasıyla -0.03 , -0.02 ve -0.01 m düşey kesitlerden elde edilmiştir. Koyu lacivert bölgeler çökeltim havuzu tabanında biriken sediment miktarını göstermektedir. Vorteks çökeltim havuzunda sediment taneleri, dairesel

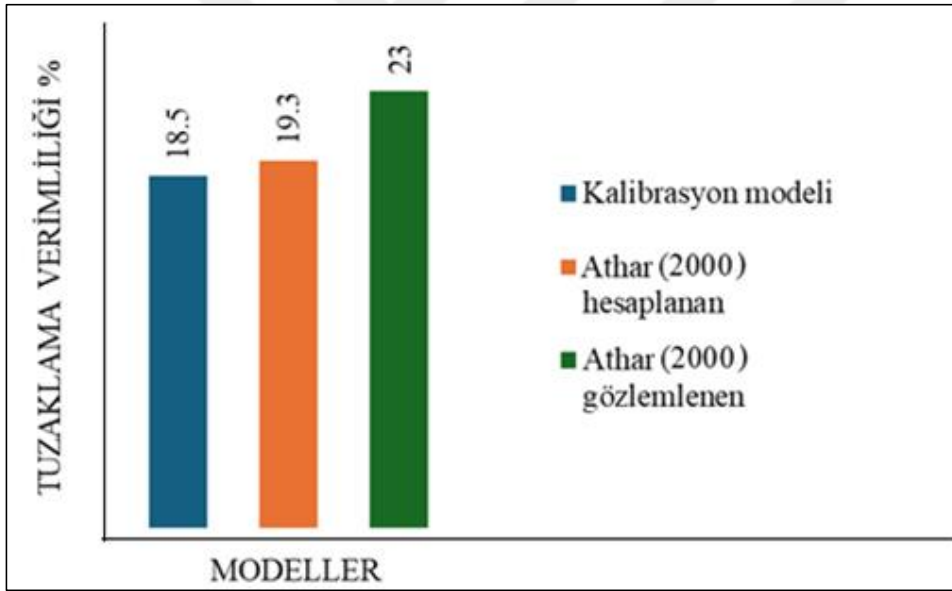
akım yapısından dolayı havuz boyunca helisel bir hareketle ilerler. Helisel yol, sedimenti merkezdeki düşük basınç bölgesine doğru yönlendirir. Akış, belirlenen dönme yönünde hareket ettiği için sedimentler de bu yön doğrultusunda taşınır ve havuz tabanında dönme yönüne paralel bir yayılım gösterir. Ayrıca dönme hareketinin etkisiyle havuzun kenar bölgelerinde de birikmeler oluşur. Tabana yaklaşıldıkça merkezdeki birikimin artmış olduğu görülmüştür. Orifise doğru olan dairesel birikim iç kısımlara doğru yoğunlaşmaktadır. Akış saat yönünde dönerek ilerlediği için havuzda biriken sediment dağılımı da saat yönünde olmuştur. Orifisin çok yakınlarında ise sediment görülmemektedir, bu bölge gerek orifis akımı gerekse taban eğimi nedeniyle tamamen temizlenmektedir.



Şekil 4.61. Kararlı akım durumunda vorteks çökeltim havuzu tabanında biriken sediment miktarının dağılımı

Sediment tuzaklama verimliliği havuza giren toplam sediment kütlesi ile havuzda biriken ve orifisten atılan sediment kütlesi arasındaki oranı ifade eder. Bu değer, havuzun çökeltim etkinliğinin bir göstergesi olarak kullanılır.

Şekil 4.62 Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılmasını sütun grafik olarak sunmaktadır. Tuzaklama verimliliği incelendiğinde, kalibrasyon modelinin %18.5 ile Athar (2000)'nin hesaplanan değeri olan %19.3'e oldukça yakın bir sonuç ürettiği görülmektedir. Öte yandan Athar (2000)'nin deneysel olarak gözlemlediği tuzaklama verimliliği %23 olup, hem kalibrasyon modelinin hem de Athar'ın kendi hesaplamalarının üzerinde bir değerdir. Genel olarak değerlendirildiğinde, kalibrasyon modeli deneysel değeri tam olarak yakalayamasa da Athar (2000) hesaplanan değerine yakınlığı nedeniyle güvenilir bir performans sergilemektedir.



Şekil 4.62. Athar (2000) ve kalibrasyon modeline ait tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması.



5. FARKLI AKIM VE GEOMETRİK KOŞULLAR İÇİN ÇÖKELTİM HAVUZU PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Bu bölümde, 4. Bölümde anlatılan kalibre edilmiş sayısal model kullanılarak farklı akım ve geometri koşullarına sahip çökeltim havuzlarında; hız, konsantrasyon dağılımı, tuzaklama ve yıkama verimliliği gibi parametreler incelenmiş ve çökeltim havuzlarının performansları hakkında yorumlar yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sayısal sonuçlar, grafikler, çizelgeler ve şekiller halinde sunulularak ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, farklı giriş-çıkış eşik yükseklikleri, orifis çapları, giriş-çıkış kanalı konfigürasyonları ve sediment çapları için model analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm kıyaslamalarda, hız ve konsantrasyonun dağılım karakteristikleri incelenmiş; konsantrasyonun ve hızın yatay ve düşeydeki değişimleri değerlendirilmiştir. Çıkış kanalından ve orifisten çıkan sediment miktarları hesaplanarak tuzaklama verimliliği elde edilmiştir. Yıkama verimliliği, orifisten atılan debi ve havuza giren debi kullanılarak bulunmuştur. Ayrıca türbülans şiddeti ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) dikkate alınarak akımdaki türbülansın yoğun olduğu bölgeler belirlenmiştir.

İncelenen farklı koşullar maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Öncelikle kalibrasyon modelinde 2 cm olan giriş-çıkış eşik yüksekliği farkı, 5 cm ve 8 cm olarak değiştirilmiştir. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzunun performansı değerlendirilmiştir.
- Kalibrasyon modelinde 5 cm olan orifis yarıçapı, 3 cm ve 7 cm olarak değiştirilmiştir.
- Kalibrasyon modelinde aynı hat boyunca uzanan giriş-çıkış kanalı konfigürasyonu, planda U ve S şekillerinde denenmiştir.
- Kalibrasyon modelinde 0,055 mm olarak denen sediment çapı 0,1 mm ve 0,2 mm çaplarında analiz edilmiştir.

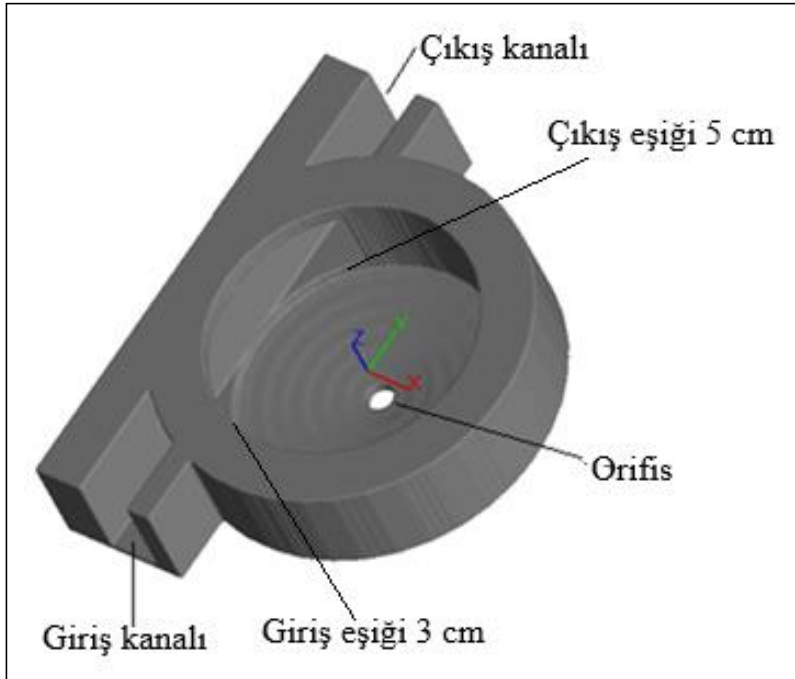
Athar (2000) deneysel çalışması kalibre edilirken kullanılan kalibrasyon parametreleri değiştirilmemiştir. Kalibrasyon modelinde $k-\omega$ olan türbülans modeli ve sediment taşınım parametreleri sabit kabul edilmiştir. Orifisteki vana kısıtlaması ile çıkış kanalındaki kapak yapısı ortadan kaldırılmıştır. Kalibrasyon aşamasında kullanılan ağ boyutları korunarak denemeler başlatılmış ve sistem kararlı duruma ulaşınca kadar beklenmiştir. Hız ve konsantrasyon ölçümleri, daha önce de belirtildiği üzere, “problar” aracılığıyla okunmuş ve

akım debileri de “flux” değerleri yardımıyla kontrol edilmiştir. Yukarıda sıralanan parametreler her bir farklı geometri veya akım durumu için aşağıda sunulan alt başlıklarda detaylı olarak anlatılmıştır.

5.1. Giriş-Çıkış Eşik Yükseklikleri Farkının Etkisi

Sayısal model, Athar (2000) çalışmasında bulunan geometrik tip-I olarak belirtilen deney düzeneğinin birebir aynısıdır. Temel olarak giriş kanalı, vorteks havuzu, çıkış kanalı ve orifisten oluşmaktadır. Vorteks havuzu çapı 1,0 m yüksekliği 0,45 m’dir. Vorteks çökeltim havuzunun tabanı 1:10 eğimli koni şeklindedir. Vorteks çökeltim havuzunun merkezinde çapı 0,10 m olan bir orifis yer almaktadır. Giriş kanalı 6,5 m uzunluğunda, 0,20 m genişliğinde ve 0,25 m yüksekliğinde olup teğetsel olarak vorteks çökeltim havuzuna birleşmektedir. Ayrıca 2,5 m uzunluğa ve 0,20 m genişliğe sahip bir çıkış kanalı bulunmaktadır. Giriş ve çıkış kanalının taban seviyesi vorteks çökeltim havuzu tabanına göre daha yüksek olup aradaki yükseklik farkı giriş kanalı için 3 cm ve çıkış kanalı için 5 cm’dir. Giriş ve çıkış kanalı arasındaki eşik farkı ilk model için 2 cm’dir (Şekil 5.1). Kullanılan tüm modellerde giriş kanalı, havuz, orifis sıkılaştırma ve çıkış kanalı bölgesi olmak üzere 4 farklı ağ bloğu tanımlanmıştır (Şekil 5.2). Giriş kanalındaki fiziksel büyüklükler deneydeki fiziki koşulları temsil edecek şekilde girilmiştir. Kalibrasyon modelinde olduğu üzere giriş kanalında havuza deney koşullarına uygun olarak sabit debi ve sabit sediment konsantrasyonu tanımlanmıştır. Deneyde yer aldığı şekilde sabit 10 l/s giriş debisi, 0,055 mm sediment çapı için sediment konsantrasyonu ise 400 ppm olarak sabitlenmiştir (Çizelge 5.1). Giriş kanalındaki su yüksekliği deneydeki değer ile aynı olacak şekilde 0,118 m girilmiştir. Bu değer Athar (2000) çalışmasından elde edilen debi ve ortalama hız verilerinin değerlendirilmesi sonucunda hesaplanmıştır. Kalibrasyon modelinden farklı olarak çıkış kanalı ve orifis bölgesinde akış serbest bırakılmıştır.

Bu bölümde toplamda üç ayrı eşik yüksekliği farkı denenmiş ve sonuçlar birbiri ile kıyaslanmıştır. Eşik yüksekliği farkları sırasıyla 2 cm, 5 cm ve 8 cm’dir. Şekil 5.1 ile eşik yükseklik farkı 2 cm olan modelin görünümü verilmektedir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 sırasıyla eşik yükseklik farkı 5 cm ve 8 cm olan modellere aittir.

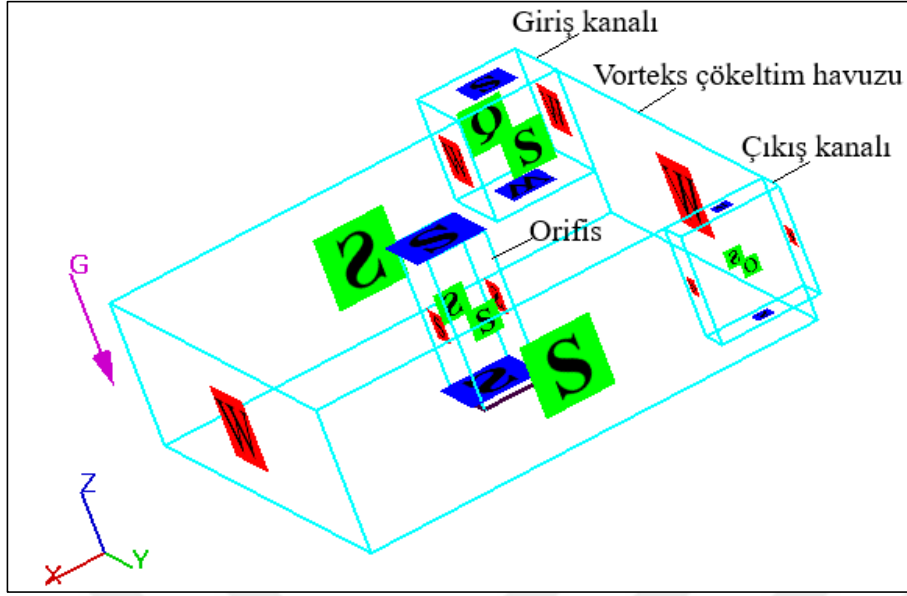


Şekil 5.1. Eşik yükseklik farkı 2 cm olan modelin görünümü

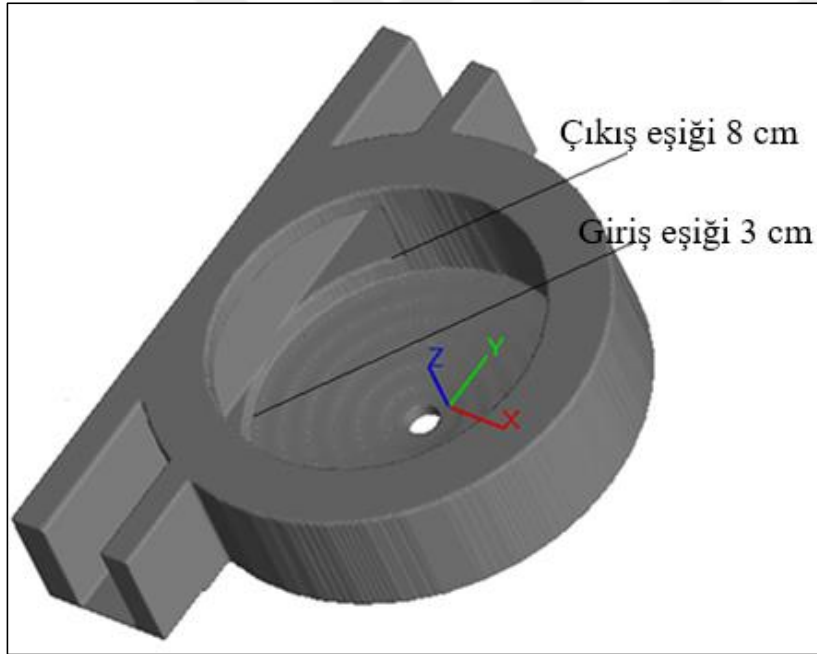
Çizelge 5.1. Vorteks çökeltim havuzu sınır şartları

Giriş Kanalı		Vorteks Çökeltim Havuzu	
-X	Duvar	+X	Duvar
+X	Duvar	-X	Duvar
-Y	Hacimsel debi	+Y	Simetri
+Y	Simetri	-Y	Simetri
-Z	Duvar	+Z	Simetri
+Z	Simetri	-Z	Simetri

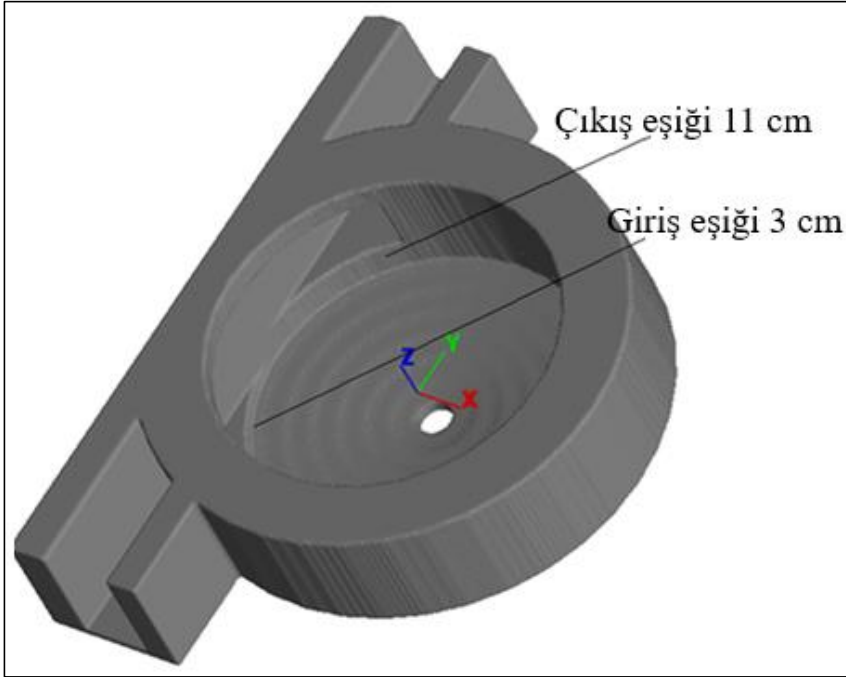
Çıkış Kanalı		Orifis	
+X	Duvar	+X	Simetri
-X	Duvar	-X	Simetri
+Y	Dalga çıkışı	+Y	Simetri
-Y	Simetri	-Y	Simetri
+Z	Simetri	+Z	Simetri
-Z	Simetri	-Z	Dalga çıkışı



Şekil 5.2. Farklı eşik yüksekliklerine ait modeller için kullanılan sınır şartları



Şekil 5.3. Eşik yükseklik farkı 5 cm olan modelin görünümü



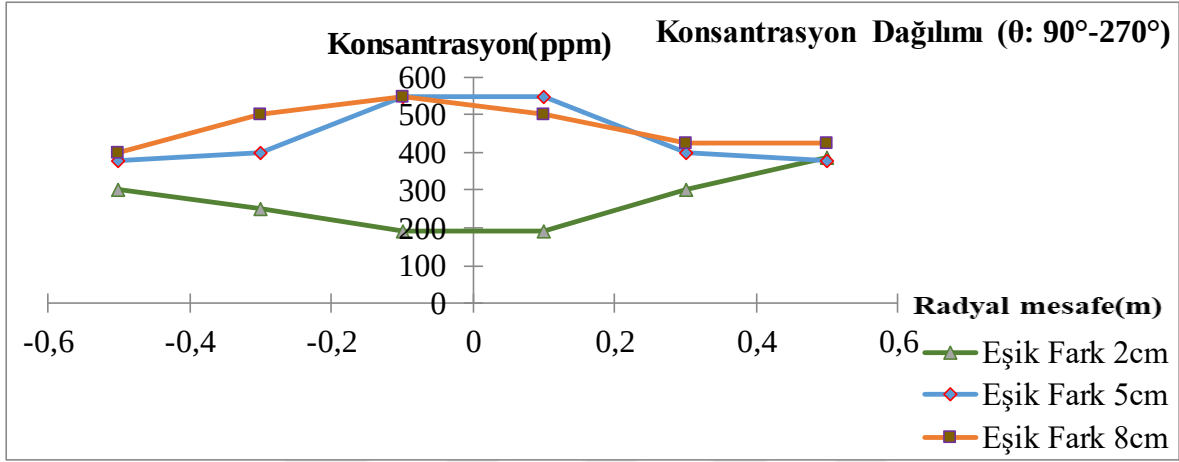
Şekil 5.4. Eşik yükseklik farkı 8 cm olan model görünümü

Modellemesi yapılan vorteks çökeltim havuzunun tabanı, merkeze doğru %10 eğime sahip koni şeklindedir. Akım ve sediment özelliklerinin incelenmesi amacıyla, ölçüm problemleri (ölçüm noktaları) merkezden itibaren 0,10 m, 0,30 m ve 0,50 m radyal uzaklıklarda konumlandırılmıştır. Ancak tabanın eğimli olması nedeniyle, bu radyal konumlarda taban kotu değişmekte ve dolayısıyla tabana göre konumlandırılan 0,01, 0,06 ve 0,11 m düşey mesafeler aynı yükseklikleri temsil etmemektedir. Başka bir ifadeyle, ölçümler tabana göre tanımlanmış olup eğimli taban geometrisi nedeniyle prob noktaları farklı düşey kotlarda yer almaktadır. Konsantrasyon ve hız ölçümleri Athar (2000) çalışmasında verilen çizelgeye uygun noktalardan yapılmıştır.

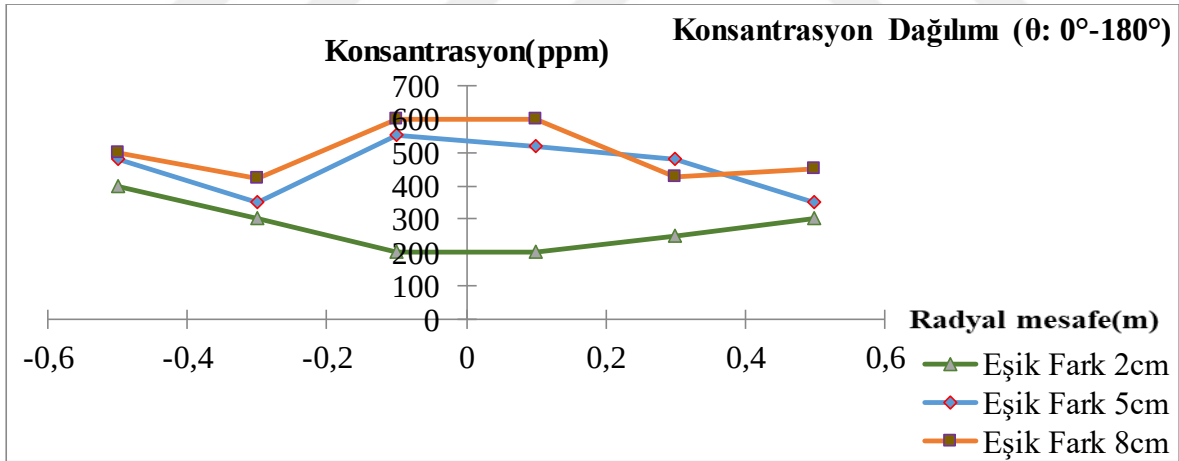
Bu bölümde farklı eşik yükseklikleri için hesaplanan konsantrasyon dağılımları; teğetsel, radyal, düşey hız dağılımları; türbülans kinetik enerjisi (TKE) ve türbülans şiddeti dağılımları; yıkama ve tuzaklama verimlilikleri analiz edilmiştir.

Şekil 5.5, 90°–270° doğrultusunda düşey 0,01 m, Şekil 5.6, 0°–180° doğrultusunda düşey 0,01 m yüksekliğinde sediment konsantrasyonunun radyal mesafeye göre değişimini 2 cm, 5 cm, 8 cm giriş-çıkış eşik yüksekliği farkları için göstermektedir. Havuz içerisinde sediment konsantrasyonu, merkezde oluşan vorteks çekirdeği ve buna bağlı gelişen hız bileşenleri tarafından kontrol edilmektedir. Orifis çevresinde artan dönel hız ve türbülans, sedimentin askıda tutulmasına yol açmaktadır. Çıkış eşik yüksekliği farkının artması, vorteks yapısını

güçlendirerek vorteks akımına katılan askı konsantrasyonunu artırmaktadır. Buna karşılık düşük eşik yüksekliği farkında vorteks zayıflamakta ve vorteks akımına katılan askıdaki sediment konsantrasyonu belirgin şekilde düşerek sediment çıkış kanalına yönelmektedir. Vorteks çökeltim havuzunda konsantrasyon dağılımı, doğrudan vorteks şiddeti ile eşik farkı etkileşiminin bir sonucudur.



Şekil 5.5. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı



Şekil 5.6. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

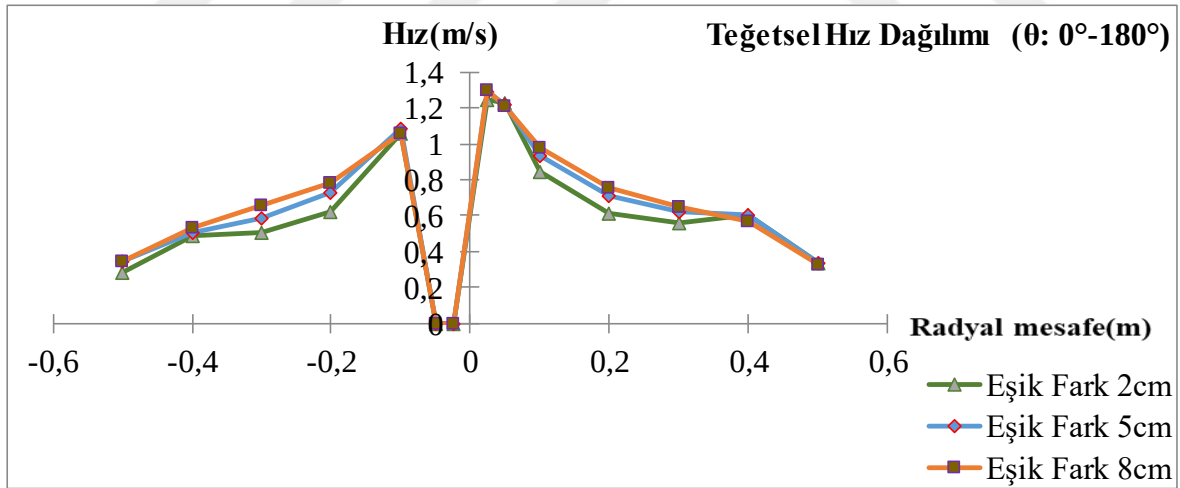
Şekil 5.7, 0°-180° doğrultusunda 0,01 m ve Şekil 5.8, 90°-270° doğrultusunda 0,08 metre yükseklikteki teğetsel hızın radyal mesafeye göre değişimini 2 cm, 5 cm, 8 cm eşik yükseklikleri farkları için göstermektedir.

Eşik yüksekliği farkı 5 cm ve 8 cm için çıkış eşiğinin yükselmesiyle birlikte havuzda tutulan su hacmi ve akımın bekleme süresi artmakta; bu durum, düşey hız bileşenlerinin zayıflamasına ve akım enerjisinin dönel harekete daha dengeli biçimde aktarılmasına olanak

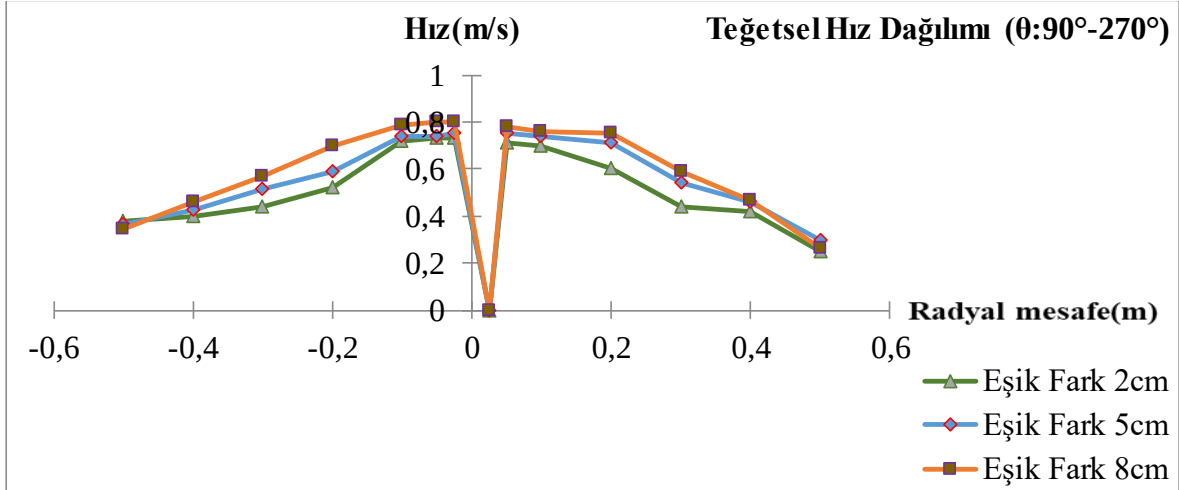
sağlamaktadır. Vorteks yapısı daha kararlı hâle gelmekte ve teğetsel hızlar, özellikle vorteks çekirdeği çevresi ve orta radyal bölgelerde daha belirgin değerler almaktadır.

Özellikle orifise yakın vorteks çekirdeği çevresinde, açısal momentumun korunumu nedeniyle teğetsel hızlar yüksek değerlere ulaşmaktadır. Buna karşılık 2 cm eşik farkı durumunda, çıkış kontrolünün zayıflamasıyla birlikte akımın havuzda kalma süresi azalmakta ve düşey momentum bileşeni baskın hâle gelmektedir. Bu durum, dönel akımın sürdürülebilirliğini sınırlandırarak vorteks yapısının zayıflamasına neden olmakta; buna bağlı olarak teğetsel hız bileşeni, özellikle havuzun orta ve dış radyal bölgelerinde belirgin biçimde düşmektedir.

Bu davranış, 0° – 180° ve 90° – 270° doğrultularında, 0,01 m, 0,04 m ve 0,08 m düşey yüksekliklerden elde edilen teğetsel hız dağılımlarının tamamında tutarlı biçimde gözlenmiştir. Farklı eşik yüksekliği farkları (2 cm, 5 cm ve 8 cm) için teğetsel hızın radyal mesafeye bağlı değişimi, her iki doğrultu ve tüm düşey seviyelerde benzer karakteristikler sergileyerek eşik yüksekliği farkının vorteks yapısı üzerindeki belirleyici etkisinin genel olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.7. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0° – 180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

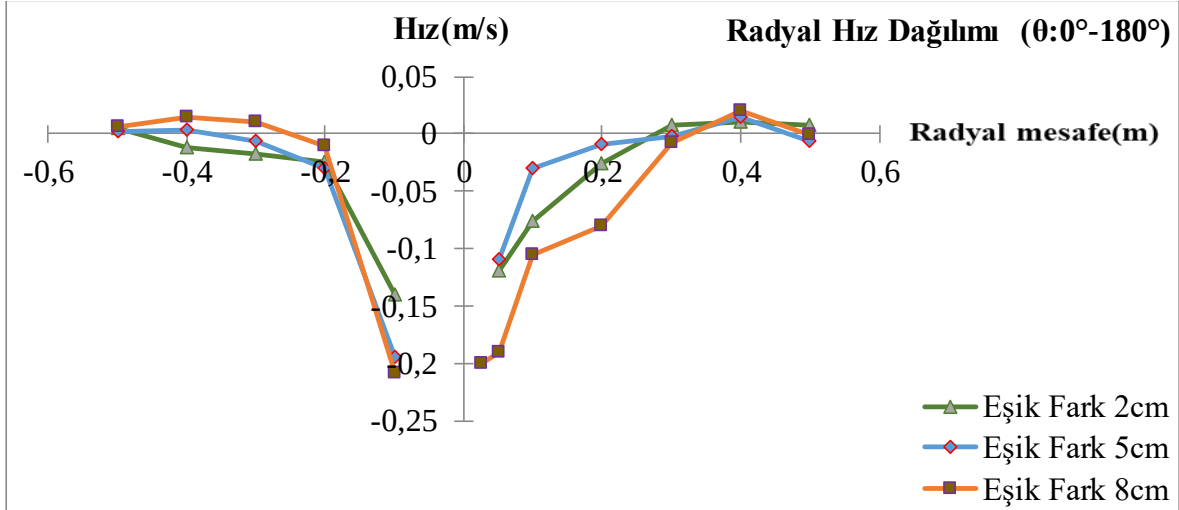


Şekil 5.8. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

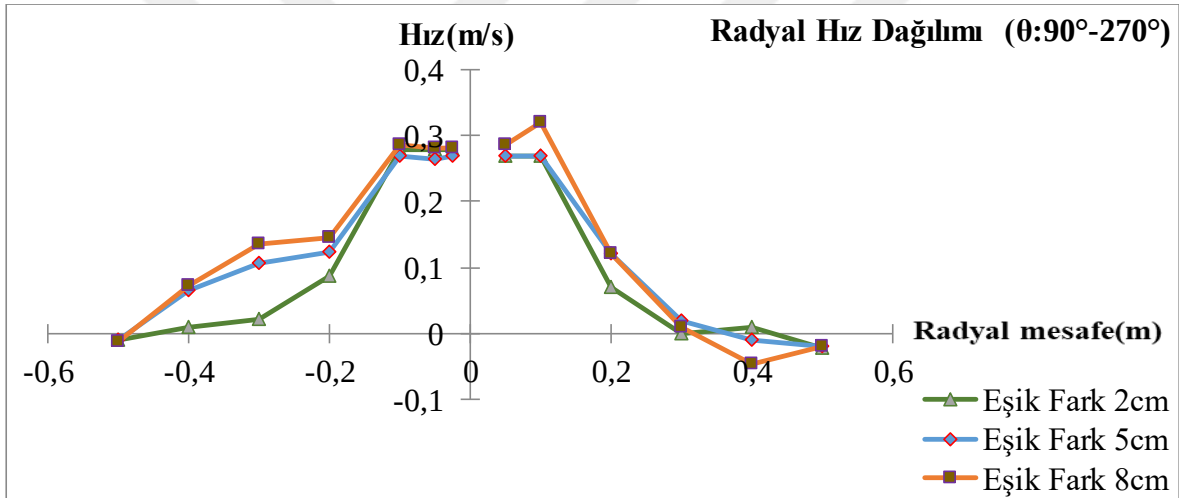
Şekil 5.9, 0°–180° doğrultusunda 0,08 m ve Şekil 5.10, 90°-270° doğrultusunda 0,01 metre yükseklikte radyal hızın radyal mesafeye göre değişimini 2 cm, 5 cm ve 8 cm eşik yüksekliği farkları için göstermektedir.

Radyal hız bileşeninin dağılımı, vorteks çekirdeği çevresinde gelişen radyal basınç gradyeni ile kütle sürekliliği koşuluna bağlı momentum dengesi tarafından belirlenmektedir. Tüm eşik yüksekliği farklarında, vorteks çekirdeği çevresi ve çekirdek–dış akım geçiş bölgesinde gözlenen radyal hızlar, akımın dış bölgelerden merkeze doğru yönlendiğini ve orifise doğru gelişen ikincil radyal taşınım mekanizmasını ortaya koymaktadır. Eşik yüksekliği farkının artmasıyla birlikte havuz içerisinde daha kararlı ve güçlü bir dönel akım yapısı oluşmakta; buna bağlı olarak çekirdek çevresinde gelişen radyal basınç gradyeni, ikincil radyal akımın etkinliğini artırmaktadır.

Bununla birlikte, tüm eşik yüksekliği farklarında radyal hız profillerinin benzer karakteristikler sergilemesi, radyal akım yapısının temel olarak vorteks yapısı tarafından kontrol edildiğini; eşik yüksekliği farkının ise bu yapının şiddetini ve etkinliğini belirleyen baskın hidrodinamik parametre olduğunu göstermektedir. Bu davranış, 0°–180° ve 90°–270° doğrultularında, 0,01 m, 0,04 m ve 0,08 m düşey yüksekliklerden elde edilen radyal hız dağılımlarının tamamında tutarlı biçimde gözlenmiştir. Farklı eşik yüksekliği farkları (2 cm, 5 cm ve 8 cm) için radyal hızın radyal mesafeye bağlı değişimi, her iki doğrultu ve tüm düşey seviyelerde benzer karakteristikler sergilemiştir.



Şekil 5.9. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı



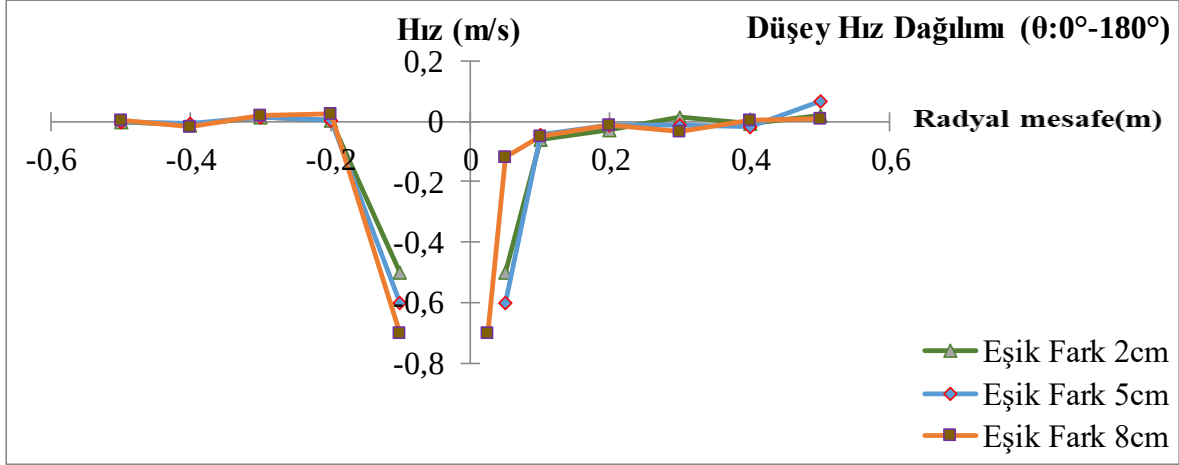
Şekil 5.10. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

Şekil 5.11, 0°–180° doğrultusunda 0,04 m ve Şekil 5.12, 90°-270° doğrultusunda 0,08 metre yükseklikte düşey hızın radyal mesafeye göre değişimini 2 cm, 5 cm, 8 cm eşik yükseklikleri farkları için göstermektedir.

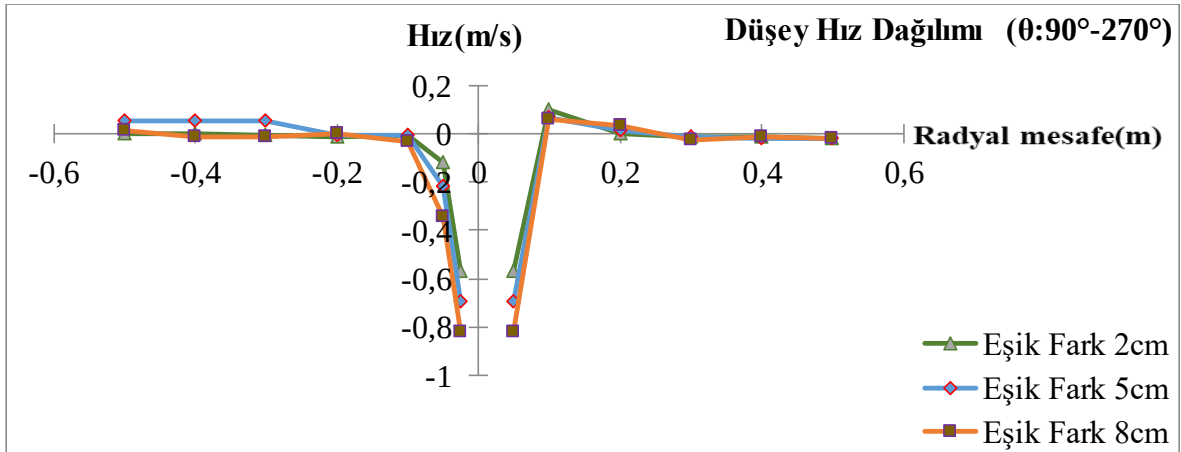
Tüm modellerde, merkez bölgesinde belirgin bir düşey hız çekirdeği olduğu ve bu bölgenin havuz içerisindeki aşağı yönlü akım yolunu temsil ettiği görülmektedir. Düşey hız değerleri, vorteks çekirdeğinde oluşan düşey basınç gradyeni ve orifisin emme etkisinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Merkezden uzaklaşıldıkça düşey hız bileşenlerinin azalması ve sıfıra yaklaşması, düşey taşınımın büyük ölçüde vorteks çekirdeği bölgesiyle sınırlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, havuzun dış bölgelerinde düşey akımın zayıflamasıyla birlikte teğetsel hız bileşenleri görece olarak baskın hâle gelmekte ve akımın

dönel karakteri ön plana çıkmaktadır.

Eşik yüksekliği farkının artmasıyla birlikte, özellikle 8 cm eşik yüksekliği farkında, merkezdeki aşağı yönlü düşey hızların belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu durum, artan eşik yüksekliği farkının havuz içerisindeki hidrolik yükü ve vorteksi güçlendirmesi, dolayısıyla orifise yönelen düşey momentum taşınımını artırması ile açıklanmaktadır.

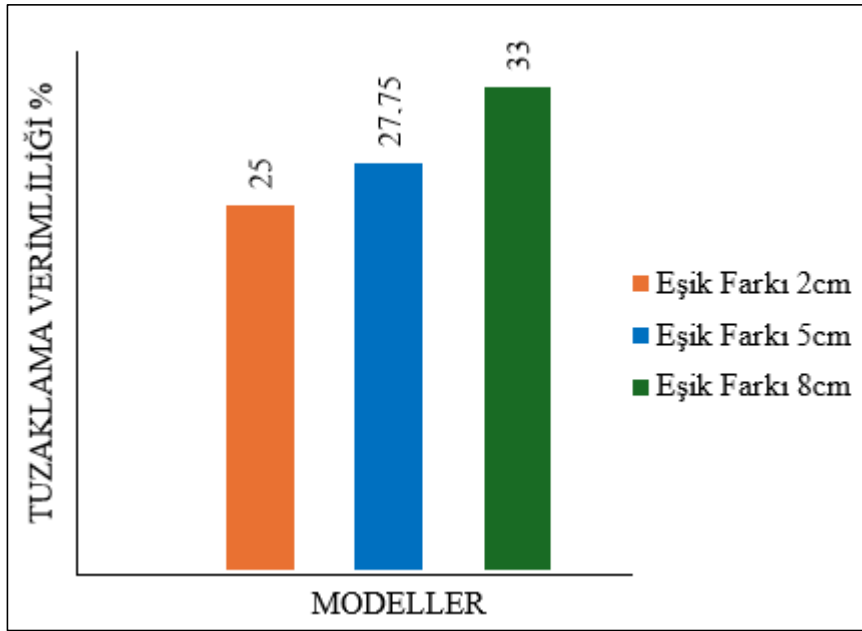


Şekil 5.11. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı



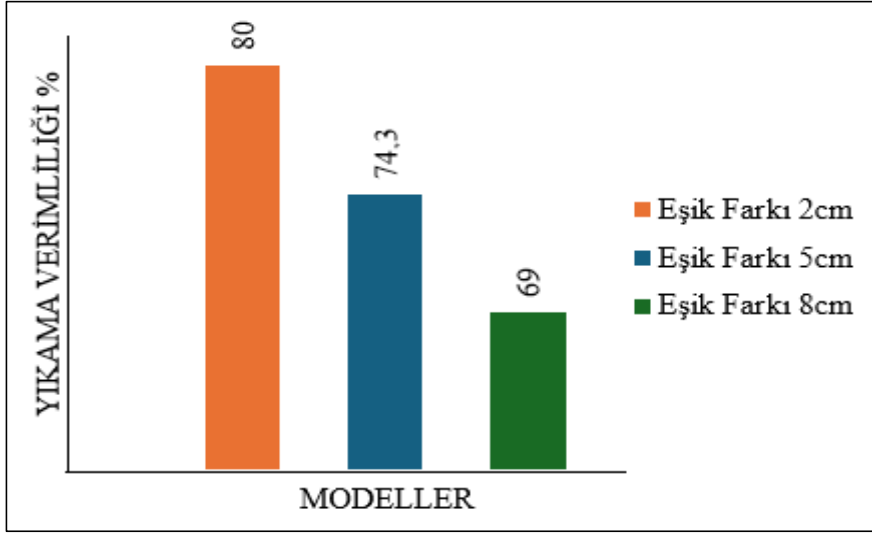
Şekil 5.12. Farklı eşik yüksekliklerine ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

Şekil 5.13; 2 cm, 5 cm, 8 cm eşik yükseklikleri farklarına sahip modellerin tuzaklama verimliliklerini göstermektedir. Bulgulara göre eşik yüksekliği farkı arttıkça tuzaklama verimliliği belirgin şekilde artmaktadır. Eşik yüksekliği farkı 2 cm için verimlilik %25, 5 cm için %27.75, 8 cm için ise %33 olarak hesaplanmıştır. Eşik yüksekliğinin tuzaklama verimliliği üzerinde doğrudan etkili olan bir tasarım parametresi olduğu, yüksek eşik farklarında sediment tuzaklama performansının önemli ölçüde arttığı görülmektedir.



Şekil 5.13. Farklı eşik yüksekliklerine ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması

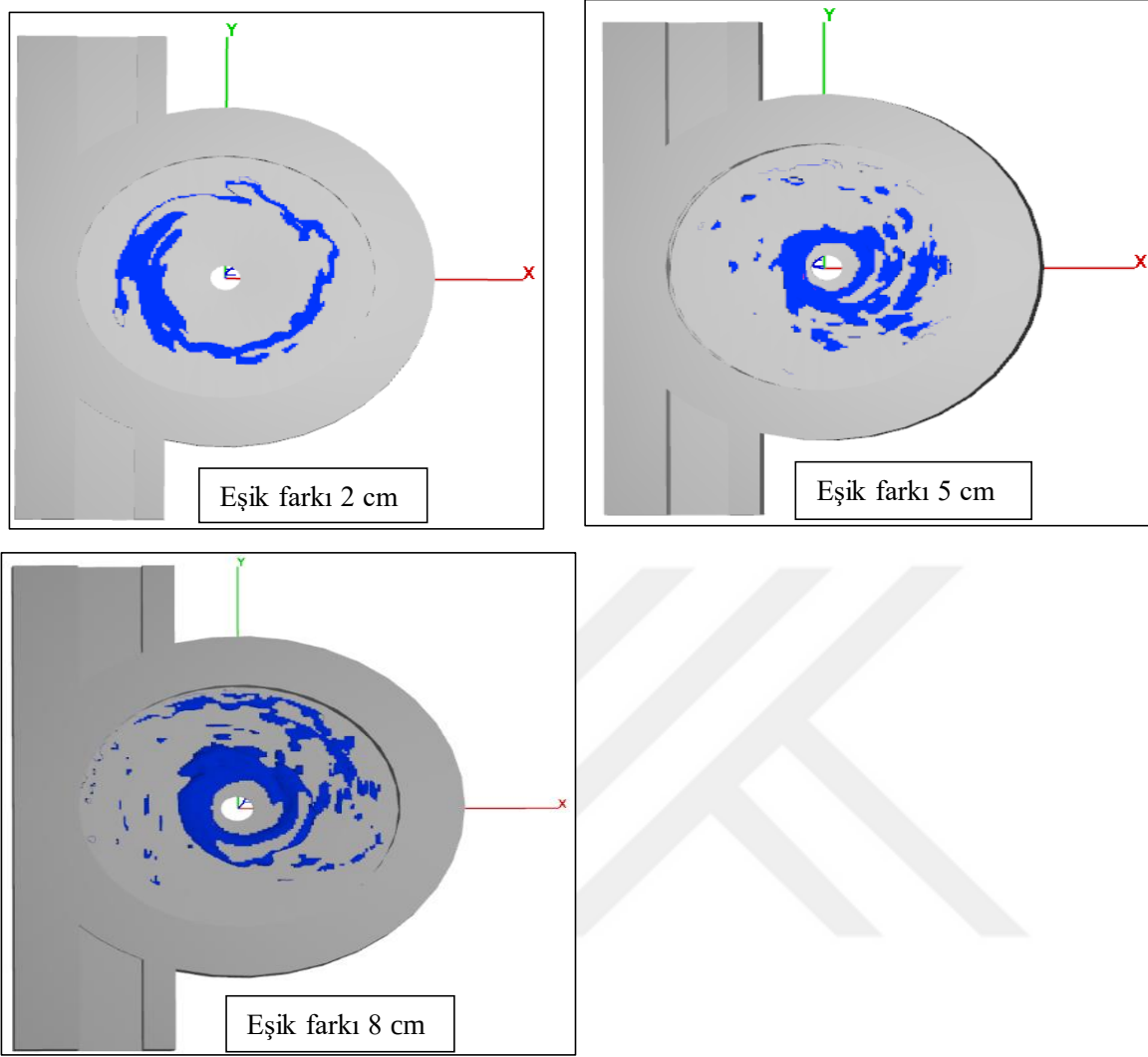
Şekil 5.14, 2 cm, 5 cm, 8 cm eşik yüksekliği farklarına sahip modellerin yıkama verimliliklerini göstermektedir. Bulgulara göre, eşik yüksekliği farkı arttıkça yıkama verimliliğinin azaldığı görülmektedir. Eşik yüksekliği farkı 2 cm için yıkama verimliliği %80, 5 cm için %74.3, 8 cm için ise %69 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, düşük eşik yüksekliği farkının, akımın büyük kısmının çıkış kanalına yönelmesine neden olarak, orifisten geçen akımı azaltmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.14. Farklı eşik yüksekliklerine ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.15 farklı eşik yüksekliklerine ait modeller için havuzda biriken sedimentin dağılımını sırasıyla 2 cm, 5 cm ve 8 cm eşik yükseklikleri farkı için göstermektedir. Eşik yüksekliği farkı 2 cm iken havuz içindeki dönme momenti daha zayıf olduğundan sediment tanecikleri havuz merkezine güçlü şekilde çekilememekte, bunun yerine giriş yönünden itibaren saat yönünde geniş bir dairesel bölge oluşturarak orta–dış yarıçaplarda birikmektedir. Bu durum nedeniyle sedimentlerin yeterince merkeze taşınmadığını düşünülmektedir. Eşik yüksekliği farkı 5 cm olduğunda dönel akım belirgin şekilde güçlenmiş, bu nedenle sedimentin önemli bir kısmı havuz merkezine daha yakın bir dairesel yapı içerisinde toplanmıştır.

Eşik yüksekliği farkı 8 cm’de ise sediment büyük oranda merkeze yakın bölgede birikmiştir. Havuzda oluşan yüksek dönme momenti ve güçlü serbest vorteks bölgesi, sedimentleri orifis çevresindeki taban çekirdek bölgesine toplamıştır. Şekil 5.15 ile verilen kesitler 0,01 m kayıt probunun altından, -0,03 m kotundan alınmıştır.

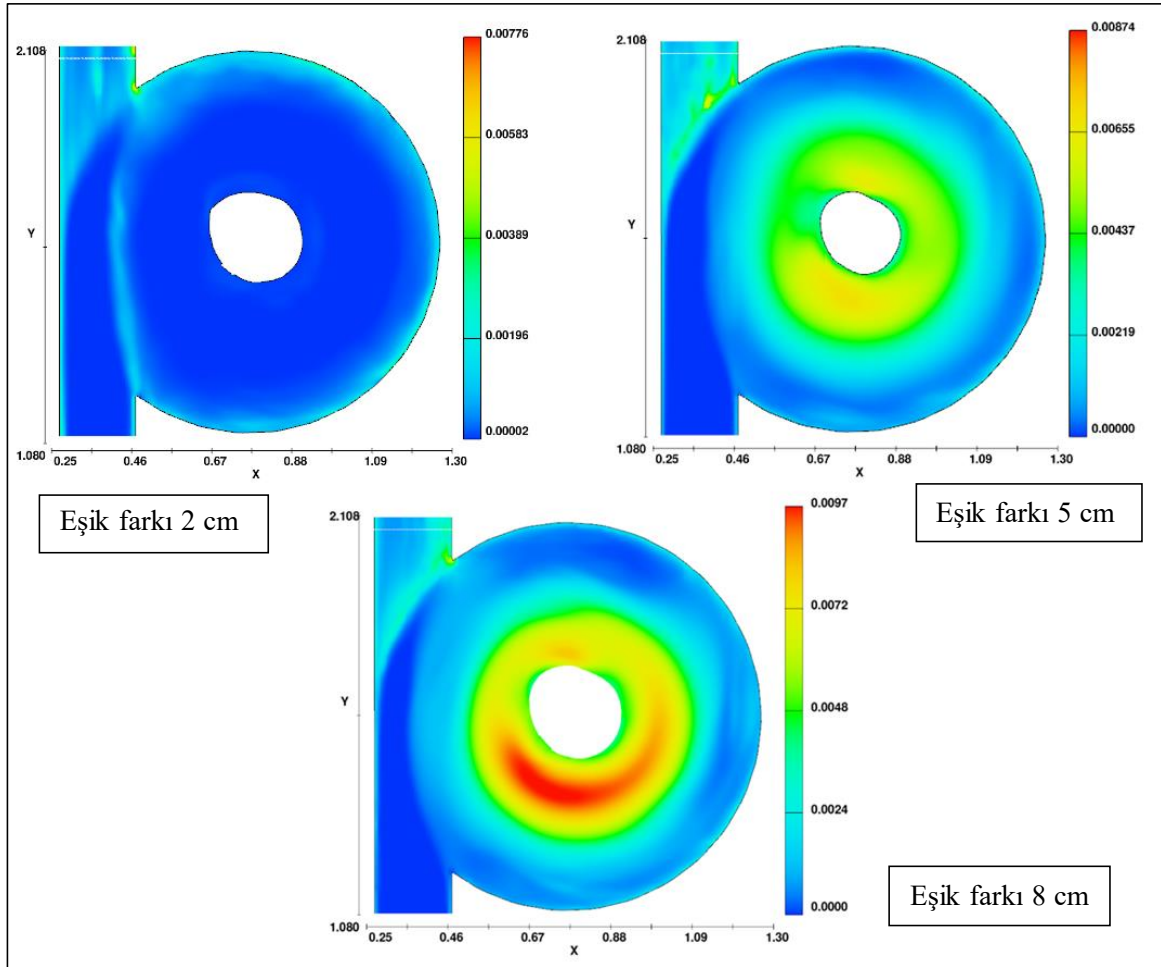


Şekil 5.15. Farklı eşik yüksekliklerine ait modeller için havuzda biriken sedimentin dağılımı

Şekil 5.16 eşik yüksekliği farkı 2 cm, 5 cm ve 8 cm için vorteks çökeltim havuzundaki türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımlarını göstermektedir. Eşik yüksekliği farkı arttıkça havuz içerisindeki dönel akımın güçlendiği ve buna bağlı olarak türbülans seviyesinin belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Eşik yüksekliği farkı 2 cm için TKE genel olarak düşük, enerji daha çok giriş bölgesi ve duvar yakınlarında sınırlı kalmaktadır. Eşik yüksekliği farkı 5 cm durumunda ise özellikle orifis etrafında ve orta radyal bölgede halka biçimli yüksek TKE bölgesi oluşmakta, bu da vorteks çekirdeğinin daha kararlı ve güçlü hale geldiğini göstermektedir. Eşik yüksekliği farkı 8 cm için TKE en yüksek seviyelere ulaşmakta, orifis çevresi başta olmak üzere geniş bir alanda yoğun türbülans enerjisi görülmektedir.

Eşik yüksekliği farkının artmasıyla birlikte havuzda tutulan su kütlesinin artması, akımın potansiyel enerjisinin yükseltilmiş ve dolayısıyla daha güçlü dönel hareketler üretmiştir.

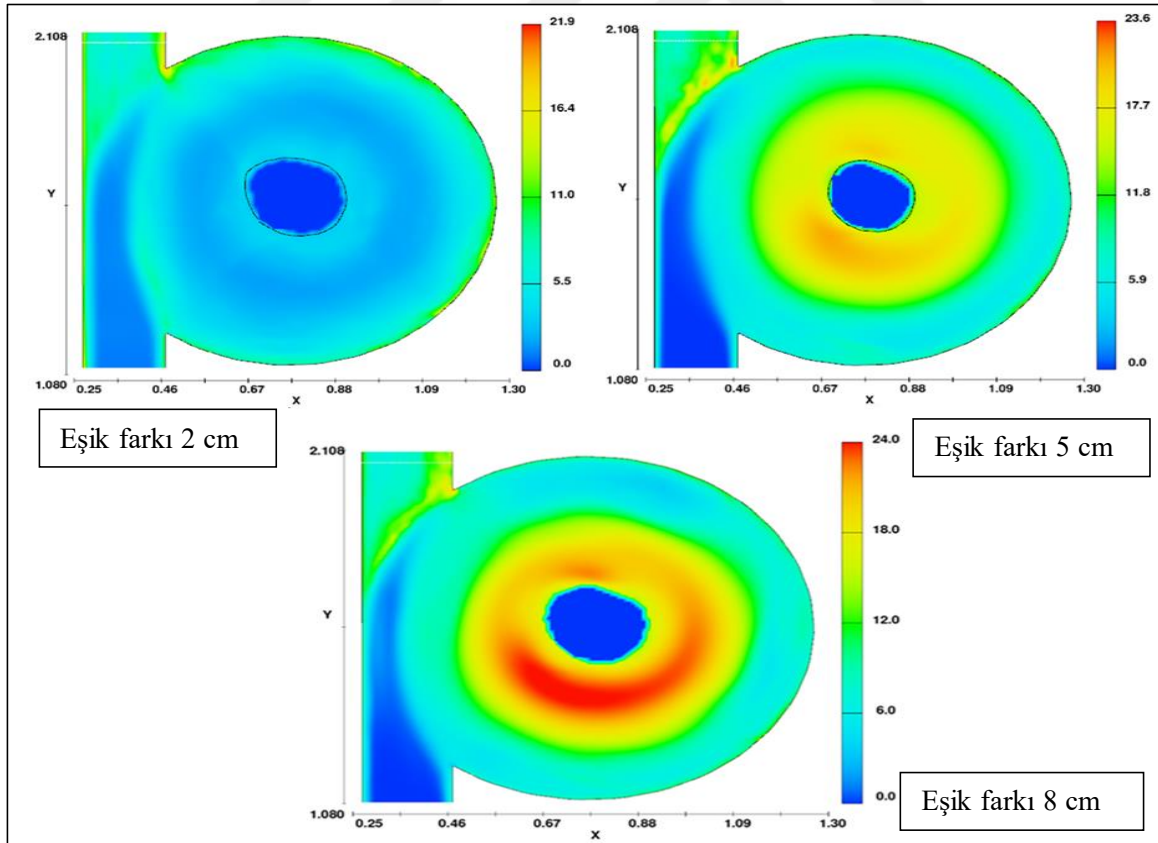
Bu durum, vorteks çekirdeği çevresinde düşey akım ile dönel akımın daha kararlı ve sürekli biçimde etkileşmesine olanak sağlamaktadır. Söz konusu etkileşim, özellikle çekirdek çevresinde yüksek hız gradyanları ve kayma gerilmeleri oluşturarak türbülans üretimini artırmaktadır. Buna bağlı olarak, artan eşik yüksekliği farklarında TKE'nin havuz merkezinde belirgin biçimde yükseldiği gözlenmektedir. Bu şekillerdeki kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



Şekil 5.16. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımları

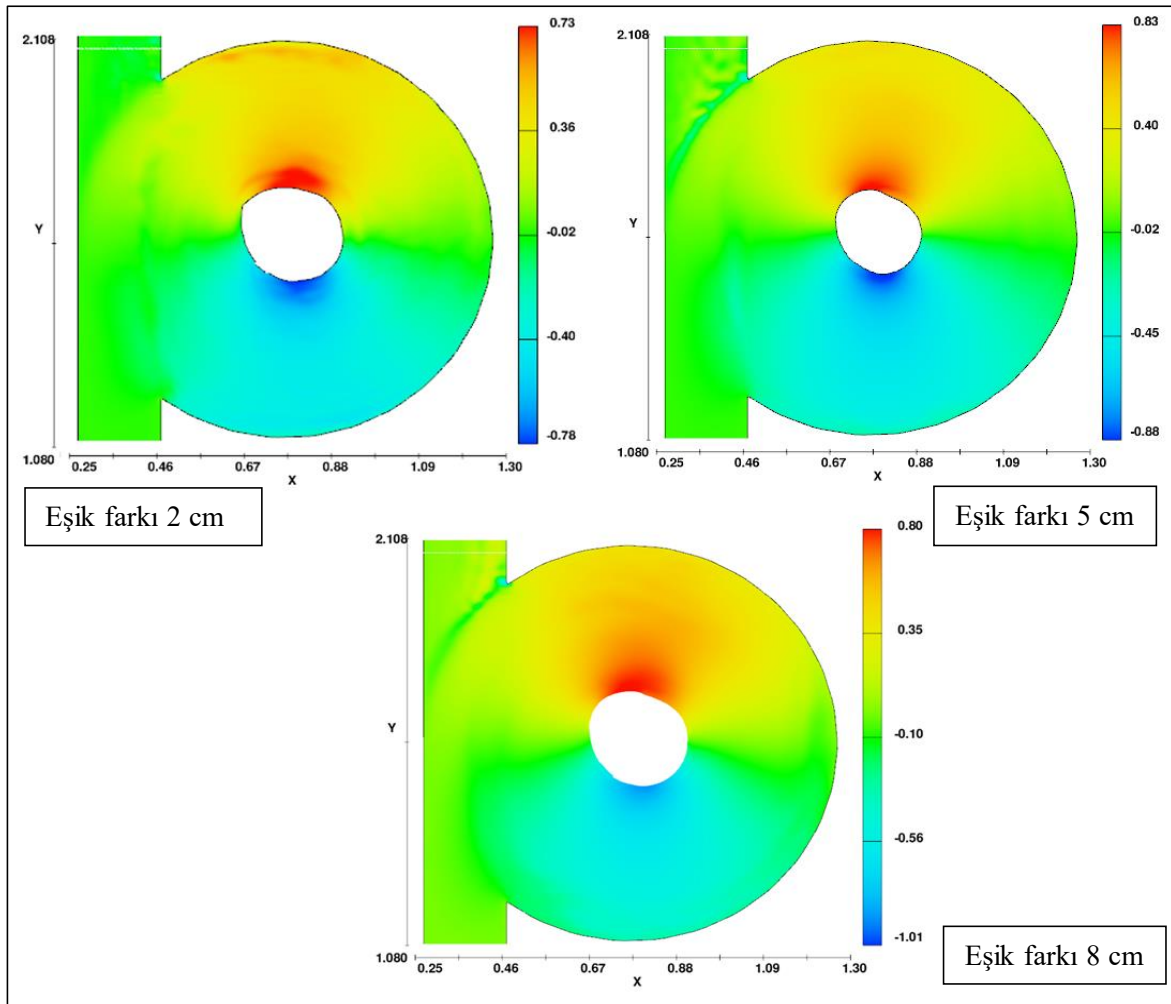
Şekil 5.17 sırasıyla eşik yüksekliği farkı 2 cm, 5 cm ve 8 cm için vorteks çökeltim havuzundaki türbülans şiddeti dağılımlarını göstermektedir. Türbülans şiddeti türbülans kinetik enerjisi dağılımlarıyla paralellik göstermektedir. Türbülans şiddeti dağılımları, türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımlarıyla genel olarak paralellik göstermektedir. Eşik yüksekliği farkının 2 cm olduğu durumda türbülans şiddeti düşük seviyelerde kalmakta; daha çok giriş yakınında, duvar boyunca ve sınırlı ölçüde orifis çevresinde yoğunlaşmaktadır. Eşik yüksekliği farkının 5 cm'ye çıkarılmasıyla birlikte dönel akımın belirgin şekilde

güçlenmesine bağlı olarak türbülans şiddeti artmakta ve özellikle orifis çevresinde halka biçiminde en yüksek değerlerin gözlendiği bir bölge oluşmaktadır. Eşik yüksekliği farkının 8 cm olduğu durumda ise türbülans şiddeti en yüksek değerlere ulaşmakta; başta orifis çevresi olmak üzere giriş bölgesi ve orta-dış radyal bölgelerde daha yaygın bir türbülans alanı gelişmektedir. Bu durum, artan eşik yüksekliği farkı ile akımın havuzda kalma süresinin uzaması ve düşey, teğetsel ve radyal hız bileşenleri arasındaki etkileşimin güçlenmesi sonucunda daha belirgin hız gradyenleri ve kuvvetli kayma tabakalarının oluşmasıyla açıklanabilmektedir. Dairesel havuz geometrisi nedeniyle akım doğrusal hareketten dönel harekete zorlandığından, giriş bölgesinde yön değişimine bağlı olarak yüksek türbülans seviyeleri oluşmakta; duvar yakınlarında sürtünme ve sınır tabaka etkileri, orifis çevresinde ise kesit daralması ve hız gradyenlerinin artması nedeniyle türbülans şiddeti yükselmektedir. Çıkış eşiği bölgesinde ise akımın savak üzerinden aşarak hızlanması ve serbest yüzey etkilerinin devreye girmesiyle yerel ölçekte türbülans şiddetinde yeniden artış gözlenmektedir. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



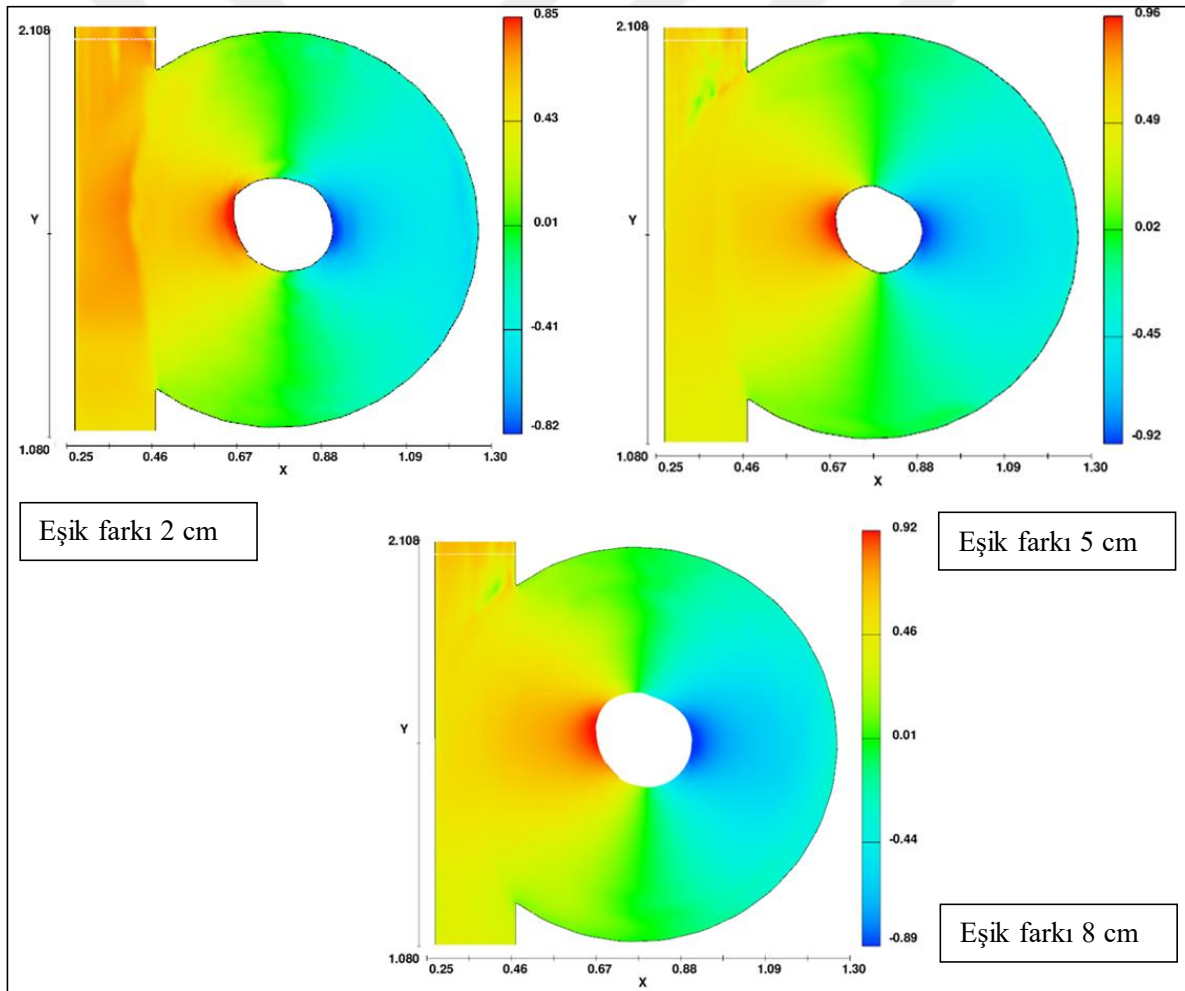
Şekil 5.17. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki türbülans şiddeti dağılımları

Şekil 5.18 sırasıyla eşik yüksekliği farkı 2 cm, 5 cm ve 8 cm için vorteks çökeltim havuzunda x yönündeki hız dağılımını göstermektedir. Havuzun karşılıklı iki yarısında simetrik şekilde olup akımın saat yönlü dönel hareketi sırasında x bileşeninin yön değiştirdiğini göstermektedir. Eşik yüksekliği farkı 2 cm için x yönündeki hız büyüklükleri düşük seviyelerde kalırken, 5 cm ve 8 cm durumunda özellikle orifis çevresi ve orta radyal bölge boyunca artarak havuz içinde daha kuvvetli bir dolaşım oluşturmaktadır. Duvar yakınlarında sürtünme ve sınır tabaka etkisiyle hız düşmüş, orifis çevresinde ise kesit daralması nedeniyle hızlanmıştır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır



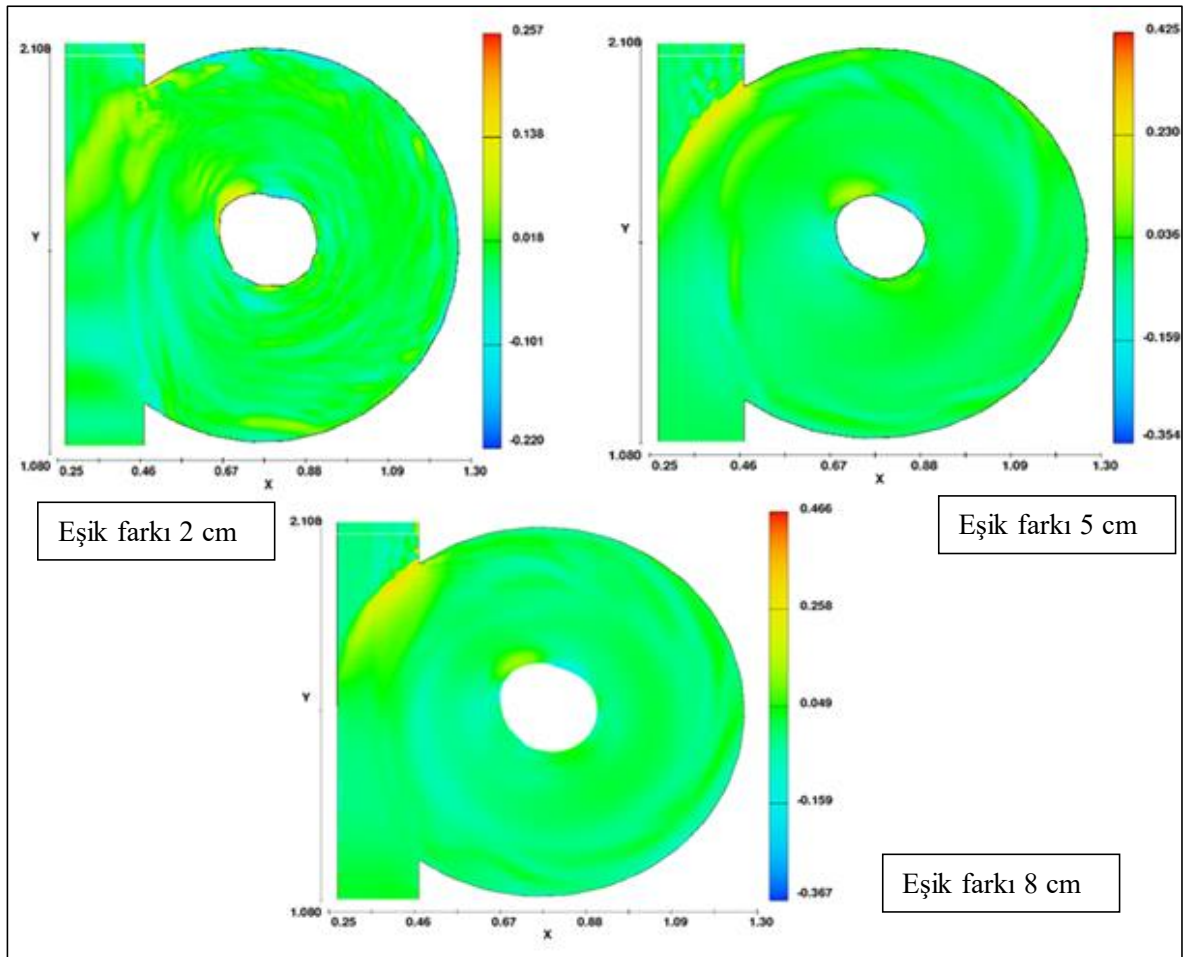
Şekil 5.18. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki x yönündeki hız dağılımları

Şekil 5.19 sırasıyla eşik yüksekliği farkı 2 cm, 5 cm ve 8 cm için vorteks çökeltim havuzunda y yönündeki hız dağılımlarını göstermektedir. Akımın dairesel geometrisi nedeniyle havuz içinde belirgin şekilde pozitif ve negatif hız bileşenlerinin olduğu görülmektedir. Eşik yüksekliği farkı 2 cm için y yönlü hızların büyüklükleri görece daha zayıftır. Eşik yüksekliği farkı 5 cm ve 8 cm için özellikle orifis çevresinde y yönlü hızlar artarak havuz içinde daha güçlü dolaşım yapısı oluşturmaktadır. Bu dağılımın temel nedeni, dairesel havuzda akımın doğrusal hareketten dönel harekete zorlanması ve merkezde güçlü bir vorteks çekirdeğinin gelişmesidir. Çekirdeğe yakın bölgede zorlanmış vorteks karakteri nedeniyle hızlar artmış, dış bölgede ise serbest vorteks yapısına geçilerek hızlar artan radyal mesafe ile birlikte azalmıştır.



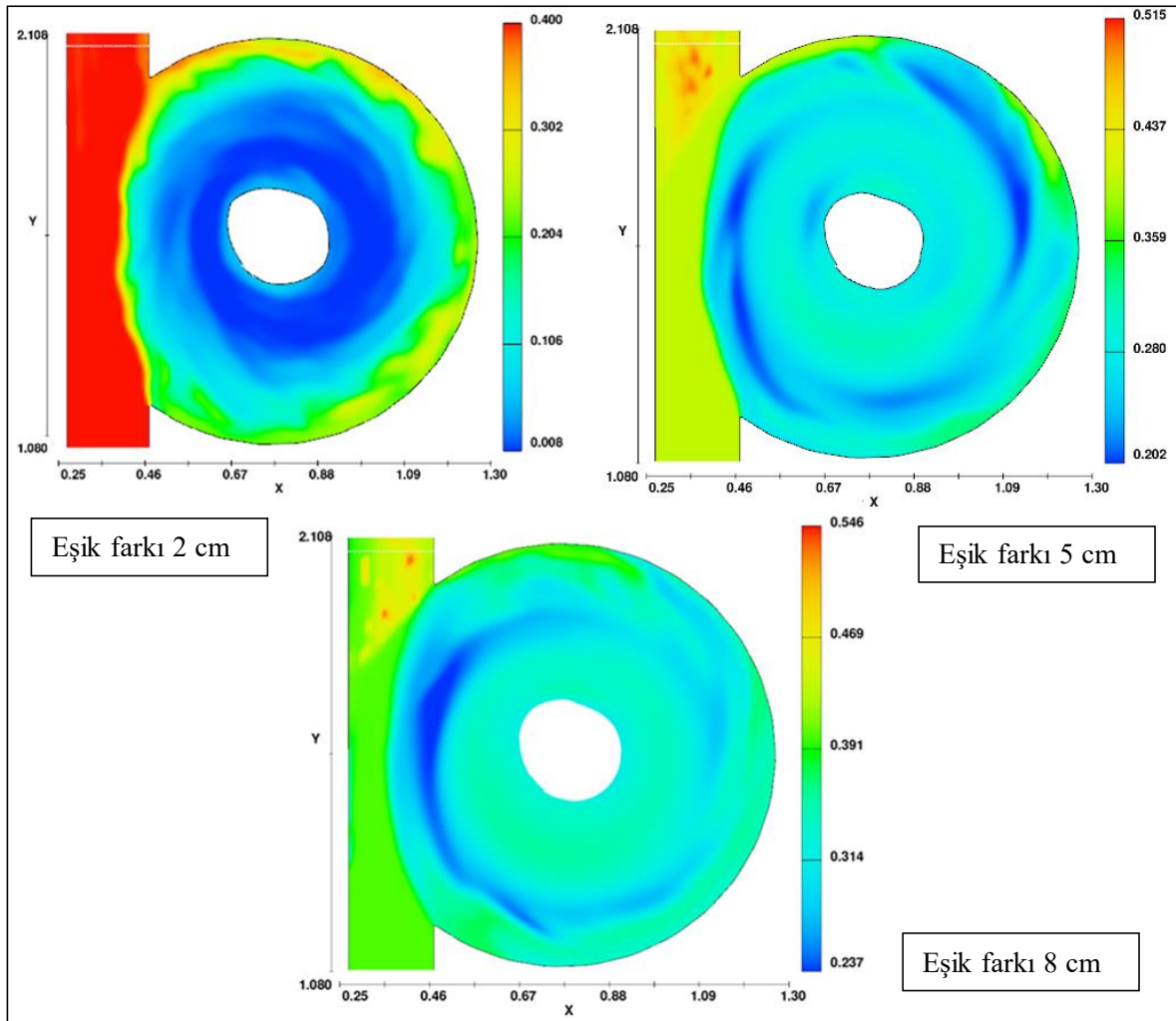
Şekil 5.19. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki y yönündeki hız dağılımları

Şekil 5.20 sırasıyla eşik yüksekliği farkı 2 cm, 5 cm ve 8 cm için vorteks çökeltim havuzundaki z yönündeki (düşey) hız dağılımlarını göstermektedir. Akımın düşey hız bileşenleri özellikle orifis çevresinde yoğunlaşmıştır. Eşik yüksekliği farkı 2 cm için düşey hızlar genel olarak düşüktür. Eşik farkı 5 ve 8 cm için ise vorteksin güçlenmesine bağlı olarak orifis çevresinde belirgin bir düşey akım bölgesi gelişmiştir. Merkezde zorlanmış vorteks bölgesinde güçlü bir çekirdek (emme) akımı oluşurken, dış bölgede serbest vorteks karakterine geçilmesiyle birlikte düşey hız bileşenleri zayıflamaktadır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



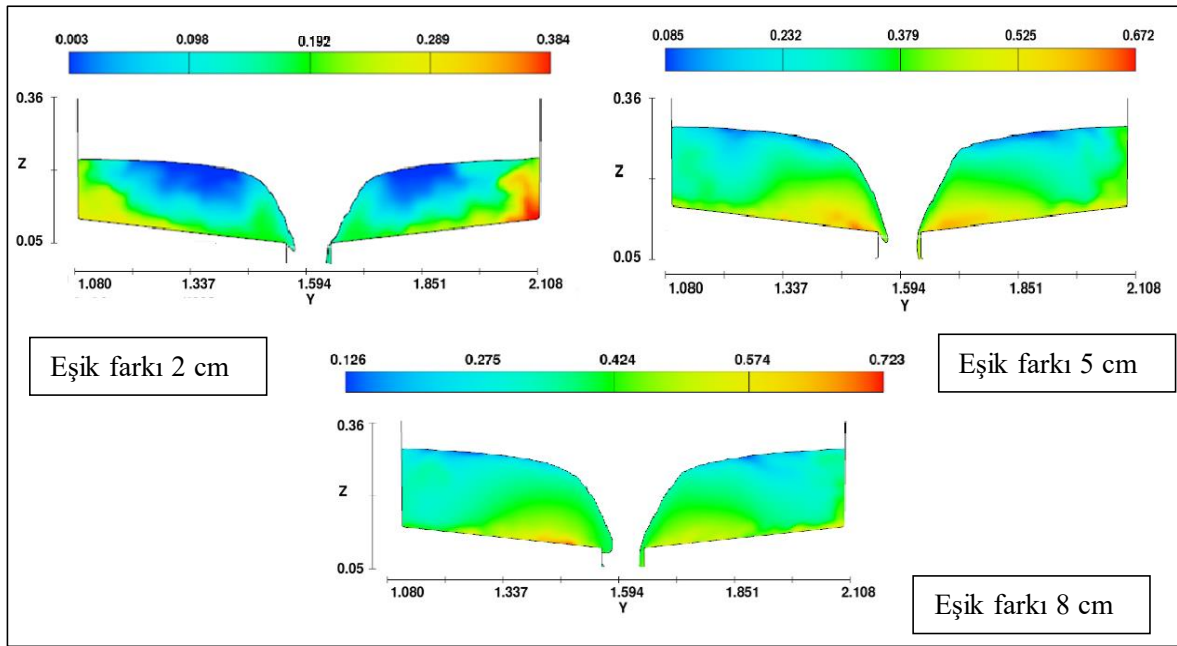
Şekil 5.20. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki düşey hız dağılımları

Şekil 5.21 eşik yüksekliği farkı 2 cm, 5 cm ve 8 cm için konsantrasyon dağılımlarını göstermektedir. Eşik yüksekliği farkı 2 cm için giriş kanalında çok yüksek konsantrasyonlar oluşmakta, sediment yüklü akım havuza girdikten sonra dairesel hareketle duvar boyunca dönerek havuz içinde halka şeklinde nispeten yüksek konsantrasyonlu bir bölge oluşturmaktadır. Buna karşılık orifis çevresinde belirgin bir düşük konsantrasyon halkası gelişmektedir. Eşik yüksekliği farkı 5 cm ve 8 cm için, giriş bölgesindeki konsantrasyon bir miktar azalmış, havuz içinde ise vorteksin izlediği yol boyunca görece yüksek konsantrasyonlar ortaya çıkmıştır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır

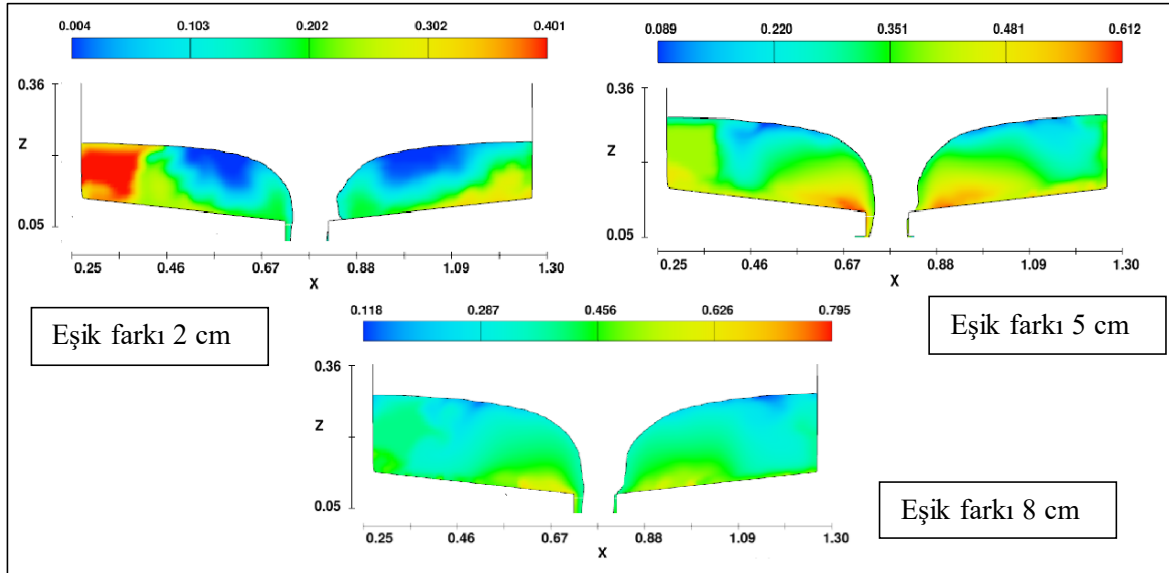


Şekil 5.21. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki konsantrasyon dağılımları

Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’da sırasıyla 90° – 270° ve 0° – 180° doğrultusunda giriş kanalından çıkış kanalına uzanan kesit boyunca sırasıyla eşik yüksekliği farkı 2 cm, 5 cm ve 8 cm için konsantrasyon dağılımlarını göstermektedir. Eşik yüksekliği farkı arttıkça vorteks çökeltim havuzu içinde askıdaki sediment miktarının belirgin şekilde arttığı ve çökelmenin giderek merkez ve taban ağırlıklı hâle geldiği görülmektedir. Bu durum artan eşik farkıyla birlikte debinin havuzda kalma süresinin uzaması, daha büyük dönme momentinin oluşmasıyla Rankine tipi vorteks çekirdeğinin güçlenmesi ve merkezde oluşan aşağı yönlü akımın sedimentleri hızla tabana taşımasıyla açıklanabilir.



Şekil 5.22. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki Y-Z doğrultusunda konsantrasyon dağılımları



Şekil 5.23. Farklı eşik yükseklikleri için vorteks çökeltim havuzundaki X-Z doğrultusunda konsantrasyon dağılımları

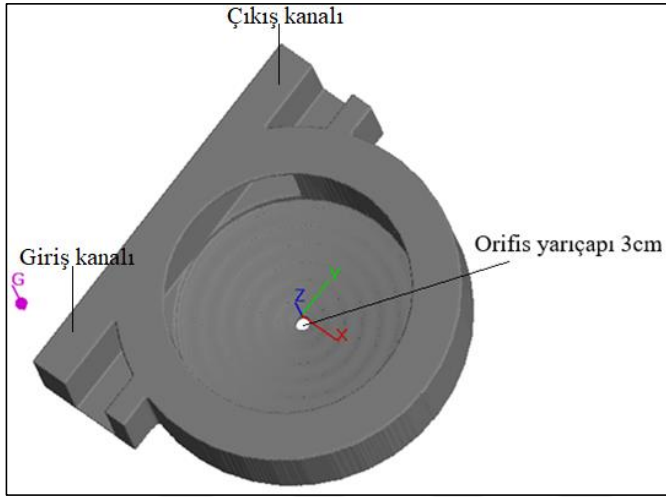
5.2. Orifis Yarıçapının Etkisi

Bu kısımda kullanılan sayısal model düzeneği; havuz geometrisi, hidrolik özellikleri bakımından Athar (2000) tarafından tanımlanan Tip-I deney geometrisinin birebir aynısıdır. Düzenek temel olarak giriş kanalı, vorteks çökeltim havuzu, çıkış kanalı ve merkezi taban orifisinden oluşmaktadır. Vorteks havuzunun çapı 1,0 m, toplam yüksekliği ise 0,45 m'dir. Havuz tabanı 1:10 eğimli konik bir forma sahip olup merkezinde yer alan orifisin çapı deney senaryosuna bağlı olarak değiştirilmiştir. Kalibrasyon modelinde 5 cm olan orifis yarıçapı, bu kapsamda 3 cm ve 7 cm yapılarak üç farklı konfigürasyon incelenmiştir.

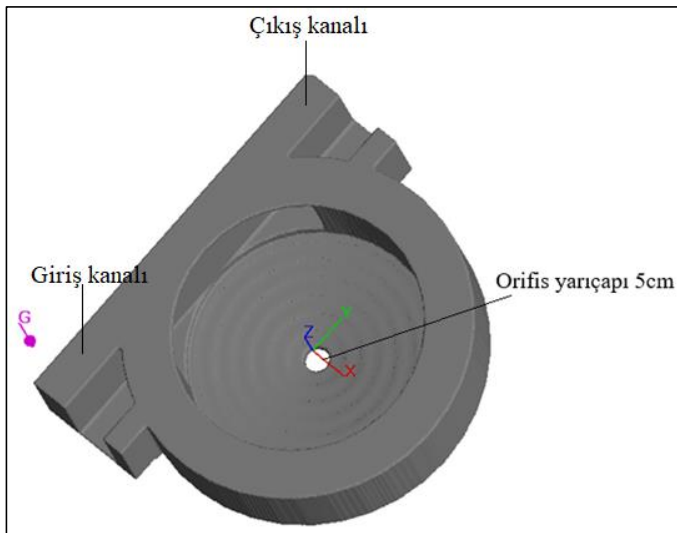
Giriş kanalı 6,5 m uzunluğunda, 0,20 m genişliğinde ve 0,25 m yüksekliğinde olup akım havuza teğetsel olarak bağlanmaktadır. Çıkış kanalı ise 2.5 m uzunluk ve 0,20 m genişlik değerlerine sahiptir. Her iki kanalın eşik seviyesi Athar (2000) çalışması ile birebir aynıdır.

Üç boyutlu sayısal modellerde giriş kanalı, vorteks havuzu, orifis bölgesi ve çıkış taşıma kanalı olmak üzere dört ayrı ağ bloğu tanımlanmıştır. Giriş kanalına ait debi ve sediment koşulları deneysel düzenek ile uyumlu olarak sabit tutulmuştur. Bu kapsamda giriş kanalı boyunca 10 l/s sabit debi, 0,055 mm sediment çapı için sediment konsantrasyonu ise 400 ppm olarak sabitlenmiştir. Giriş su yüksekliği 0,118 m olarak tanımlanmış olup bu değer Athar (2000) tarafından belirtilen debi ve ortalama hız ilişkilerinin değerlendirilmesiyle hesaplanmıştır.

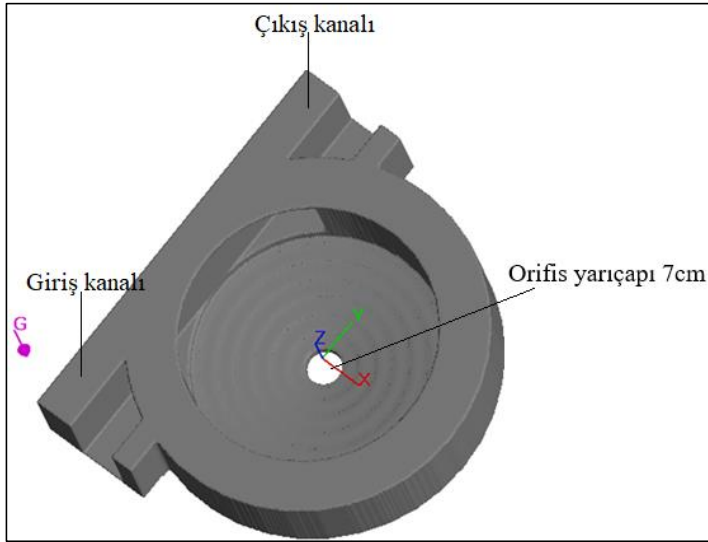
Kalibrasyon modelinden farklı olarak, karşılaştırma modellerinde çıkış kanalı ve orifis bölgesinde akım dalga çıkışı (wave outflow) koşulu ile tanımlanmıştır. Bu bölümde orifis yarıçapı sırasıyla 3 cm, 5 cm ve 7 cm olacak şekilde üç ayrı durum analiz edilmiş ve her bir modelin hidrolik performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.24 orifis yarıçapı 3 cm olan modelin görünümünü vermektedir. Şekil 5.25 ve Şekil 5.26 sırasıyla 5 cm ve 8 cm olan modelin görünümünü vermektedir. Tüm durumlarda kullanılan sınır şartları Şekil 5.27 ile verilmiştir.



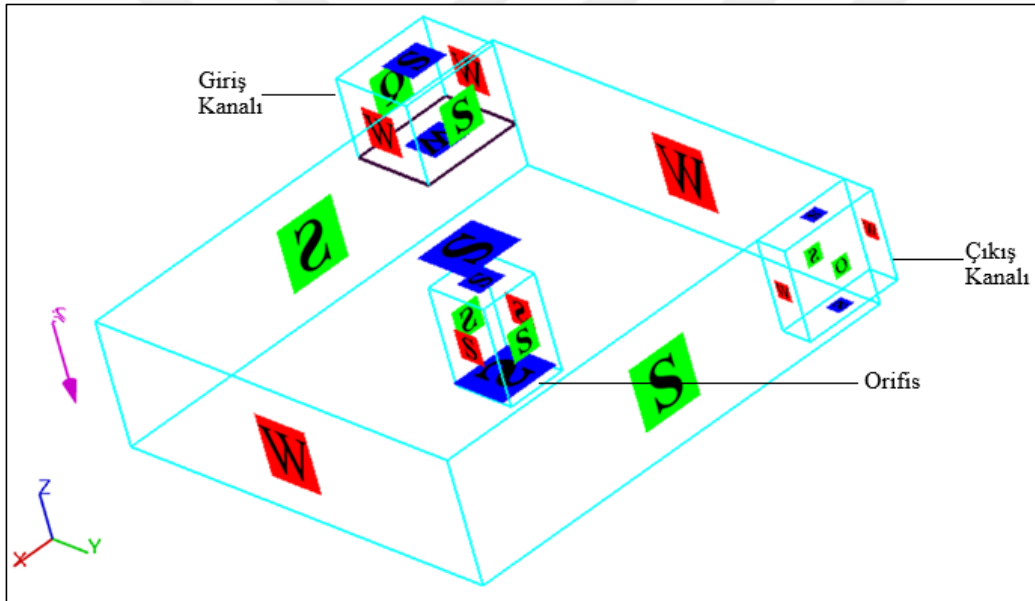
Şekil 5.24. Orifis yarıçapı 3 cm olan modelinin görünümü



Şekil 5.25. Orifis yarıçapı 5 cm olan modelinin görünümü



Şekil 5.26. Orifis yarıçapı 7 cm olan modelinin görünümü



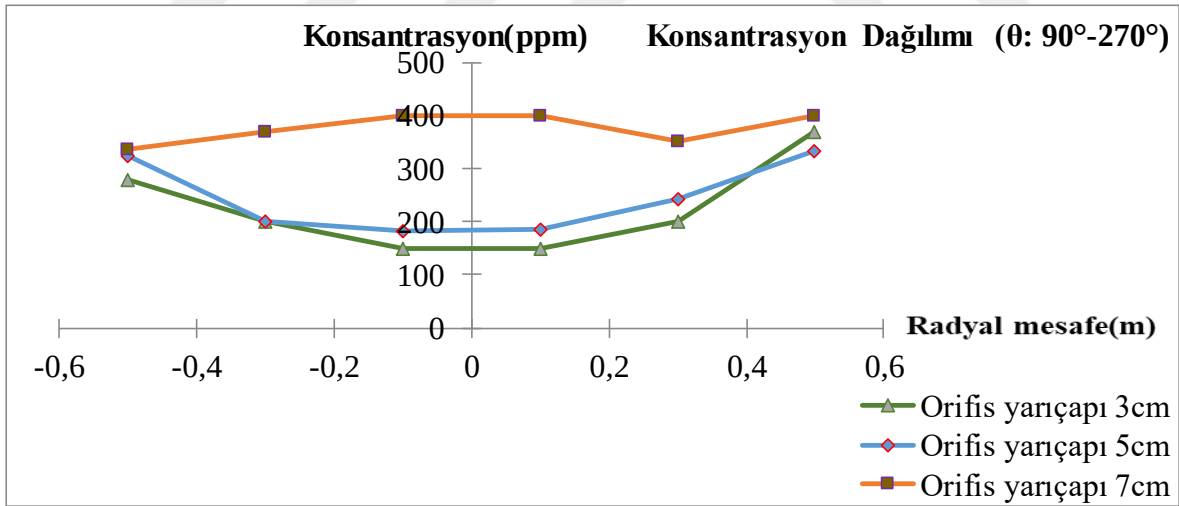
Şekil 5.27. Farklı orifis yarıçapları için uygulanan sınır şartları

Şekil 5.28 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90° - 270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımını ve Şekil 5.29 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0.06 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımını göstermektedir.

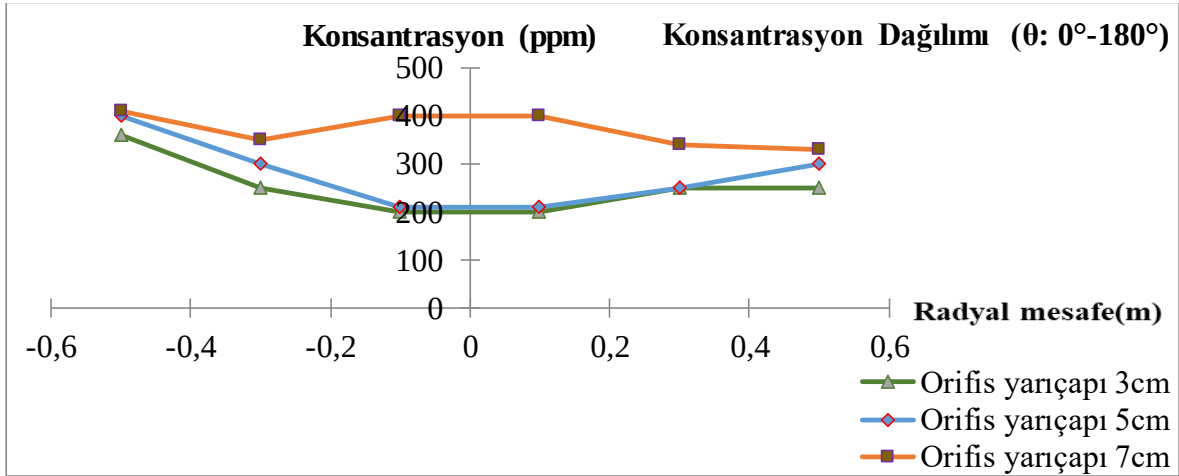
Orifis çapının konsantrasyon değişiminde belirleyici olmasının temel nedeni, süreklilik denklemi ve momentum korunumu gereği akımın çıkış kesitinde zorlanarak hızlanmasıdır. Sabit giriş debisi ve konsantrasyon koşullarında, orifis kesitinin daralması akımın debiyi

daha küçük bir alandan geçirmek zorunda kalmasına neden olmakta ve bu durum, orifis çevresinde yüksek düşey hızlar ve belirgin bir basınç düşümü oluşturmaktadır.

Orifis çapı büyüdükçe kesit daralması etkisi ortadan kalkmakta, çıkış akımı daha geniş bir alana yayılmakta ve hız ile basınç gradyenleri zayıflamaktadır. Buna bağlı olarak vorteks çekirdeği genişlemekte, dönel akımın merkezdeki yoğunluğu azalmakta ve sediment daha geniş bir hacme dağılarak konsantrasyon seviyeleri düşmektedir. Orifis çapının artmasıyla birlikte, orifis kesitindeki karakteristik emiş hızının azaldığı görülmektedir. Ancak bu durum, sediment taşınımının azalması anlamına gelmemektedir. Orifis çapı büyüdükçe orifisten geçen debi artmaktadır. Bu nedenle, daha büyük orifisler daha düşük düşey hızlara sahip olmalarına rağmen, havuz tabanında daha geniş bir etki alanı oluşturarak radyal ve düşey hız bileşenlerinin daha yaygın bir bölgede etkin olmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, dar orifislerde sınırlı bir alanda yüksek hızlarla gerçekleşen taşınımına kıyasla, sediment taban boyunca daha kararlı bir şekilde orifise yönelmekte; orifise sürüklenen yüksek konsantrasyonlu akımın sürekliliği belirginleşmekte ve orifisten uzaklaştırılan sediment miktarı artmaktadır.



Şekil 5.28. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı



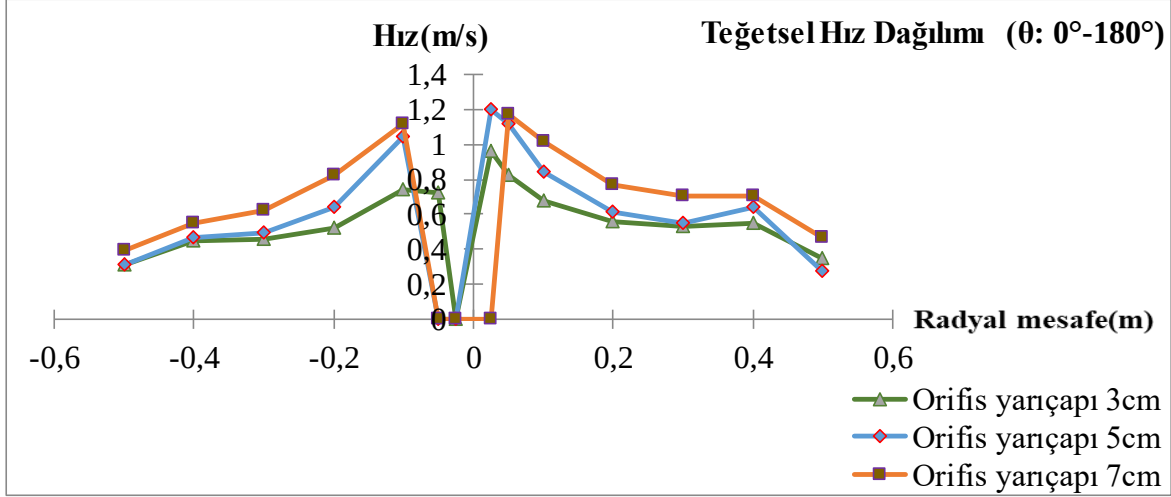
Şekil 5.29. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0.06 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

Şekil 5.30 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımını ve Şekil 5.31 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımını göstermektedir.

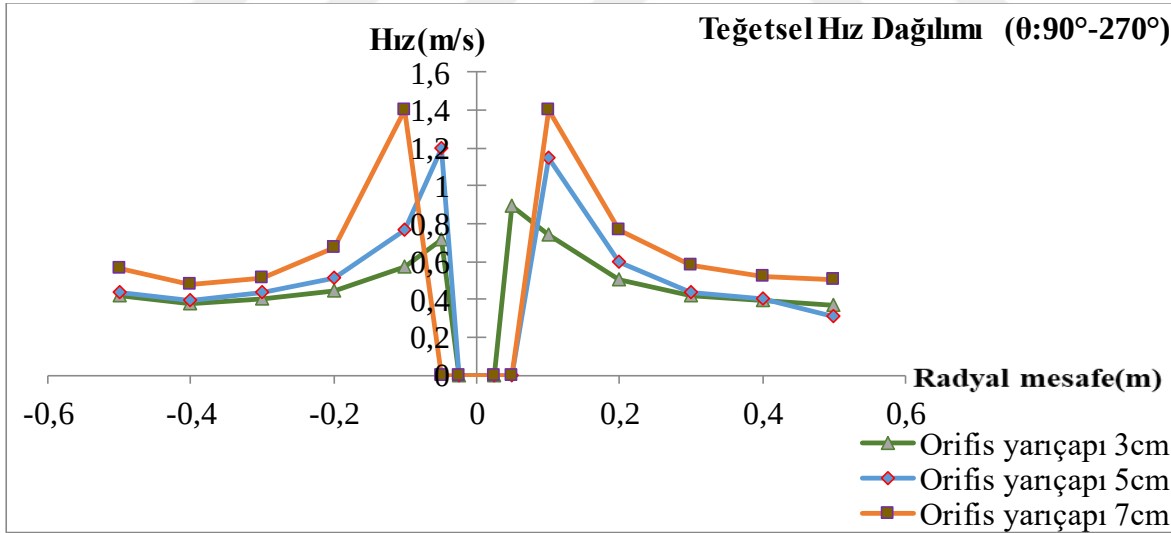
Vorteks çökeltim havuzu içerisinde teğetsel hızlar en yüksek değerlerini en büyük orifis yarıçapında, en düşük değerlerini ise en küçük orifis yarıçapında almaktadır. Bu durum orifis kesitinin akım içindeki momentum bileşenleri arasındaki enerji paylaşımını doğrudan kontrol etmesinden kaynaklanmaktadır. Küçük orifis yarıçapında ortaya çıkan kesit daralması, süreklilik koşulu gereği akımın büyük ölçüde düşey yönde hızlanmasına neden olmakta; bu durum, akım enerjisinin baskın biçimde düşey momentum üretimine harcanmasına yol açmaktadır. Dönel harekete aktarılabilen açısal momentum bileşeni sınırlanmakta ve merkeze yakın teğetsel hız bileşeni baskılanmaktadır.

Buna karşılık orifis yarıçapının büyütülmesiyle birlikte çıkış kesiti genişlemekte, düşey hız gradyanları azalmakta ve akımın momentumu daha dengeli bir şekilde paylaşılmaktadır. Bu koşullarda, akım enerjisinin daha büyük bir bölümü dönel harekete aktarılabilmekte, vorteks yapısı daha kararlı bir şekilde gelişmekte ve buna bağlı olarak teğetsel hızlar belirgin biçimde artmaktadır. Küçük orifislerde vorteks çekirdeğinin dar bir yapıya sıkışması, dönel akımın merkezde erken sönümlenmesine yol açarken; daha büyük orifis yarıçaplarında vorteks çekirdeği daha geniş ve sürdürülebilir bir yapı kazanarak teğetsel hız gelişimini desteklemektedir.

Düşey ve teğetsel momentum bileşenleri arasındaki etkileşim, küçük orifislerde düşey momentumun baskın hâle gelmesine neden olarak dönel akımı sınırlandırmakta; daha geniş orifislerde ise akım kinetik enerjisinin hız bileşenleri arasındaki dengeli dağılım vorteks yapısının güçlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.30. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

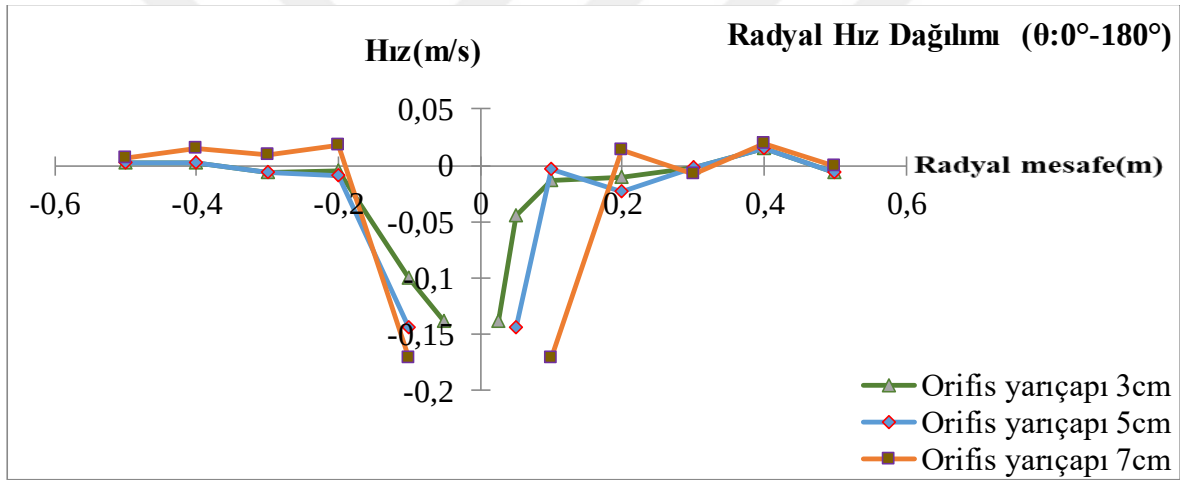


Şekil 5.31. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

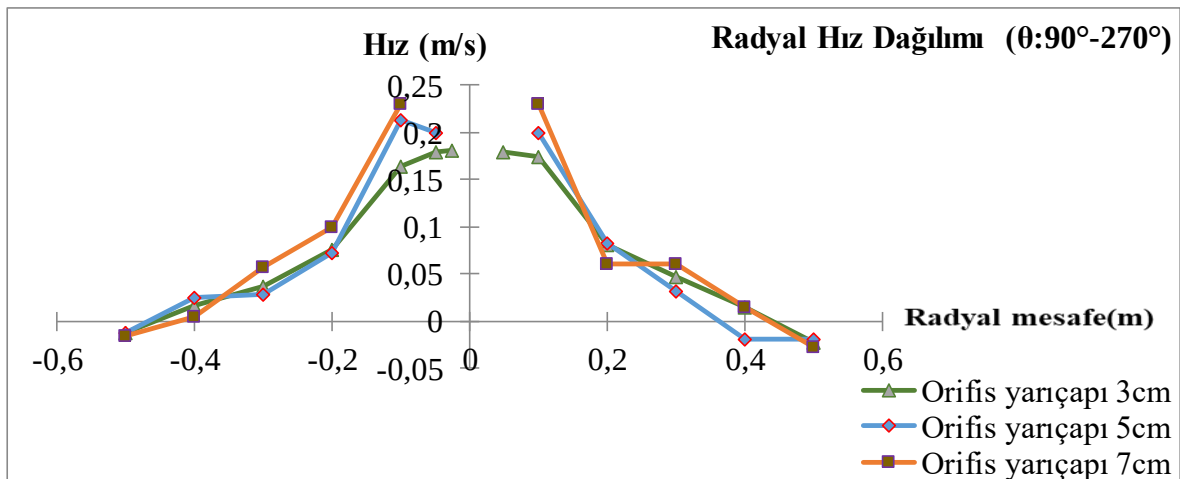
Şekil 5.32 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı ve Şekil 5.33 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımını göstermektedir.

Radyal hız sonuçlarında orifis çapına bağlı olarak görülen farkın temel nedeni, ölçüm noktaları sabit tutulmasına rağmen vorteks çekirdeğinin konumu ve genişliğinin orifis çapıyla yer değiştirmesidir. Çok küçük olan radyal hızların ölçümü zor ve 7 cm orifis durumunda vorteks çekirdeği daha geniş bir alana yayıldığından, seçilen ölçüm noktalarının bir kısmı doğrudan çekirdek bölgesiyle çakışmaktadır. Radyal hız farkları, esas olarak vorteks çekirdeğinin orifis çapına bağlı olarak yer değiştirmesi nedeniyle ölçüm noktalarının farklı hidrodinamik bölgelerde kalmasından kaynaklanmaktadır.

Buna karşılık 3 cm orifiste vorteks çekirdeği daha dar kaldığından aynı ölçüm noktaları çekirdek dışında, yani çekirdek-dış akım geçiş bölgesine denk gelmektedir. Bu bölgede süreklilik ve basınç gradyeni etkisiyle çekirdeğe doğru belirgin bir radyal akım oluşur.



Şekil 5.32. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

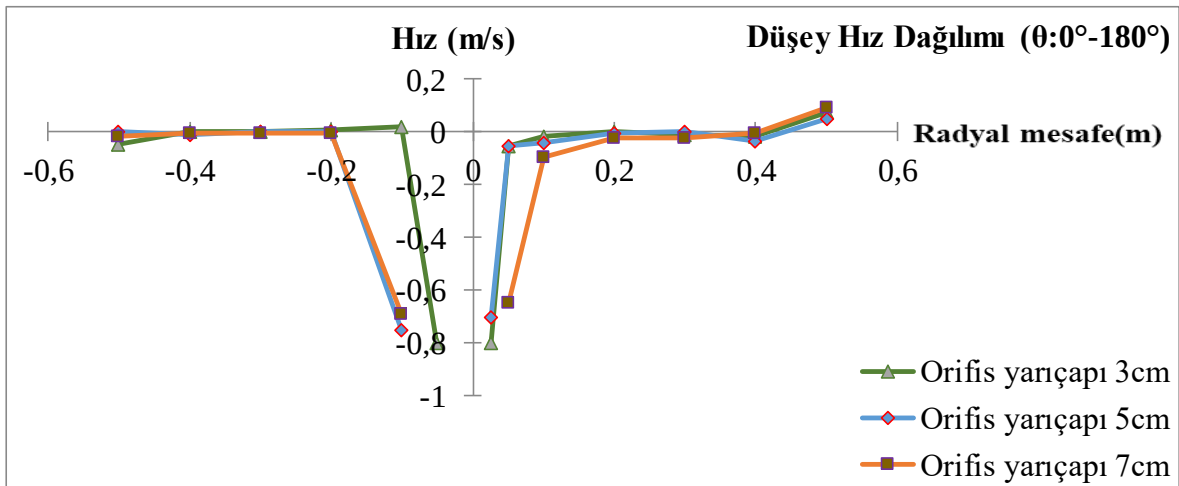


Şekil 5.33. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

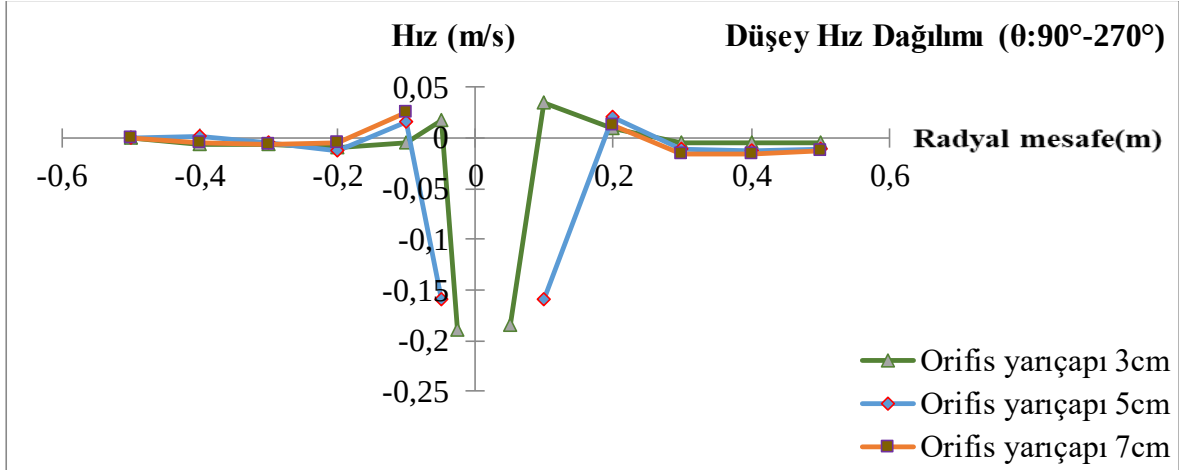
Şekil 5.34 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı ve Şekil 5.35 farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90° - 270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımını göstermektedir.

Düşey hız dağılımlarında gözlenen farklılıklar, orifis çapına bağlı olarak vorteks çekirdeğinin konumu ve genişliğinin değişmesi ile doğrudan ilişkilidir. Ölçüm noktaları tüm modellerde aynı tutulmasına rağmen, 7 cm orifis durumunda vorteks çekirdeği genişleyerek ölçüm noktalarıyla çakışmakta ve bu nedenle bu bölgede akım esas olarak dönel (teğetsel) rejim tarafından kontrol edilmektedir. Dolayısıyla 7 cm orifiste merkeze yakın bölgelerde düşey hızların düşük ya da anlamsız görünmesi, ölçüm hatasından ziyade çekirdek içi akım yapısının doğal bir sonucudur.

Buna karşılık 3 cm orifis durumunda vorteks çekirdeği daha dar bir yapı sergilemekte ve aynı ölçüm noktaları çekirdek dışı akım geçiş bölgesine denk gelmektedir. Bu bölgede, süreklilik koşulu ve orifisin emme etkisi nedeniyle akım çekirdeğe doğru kuvvetli bir aşağı yönlü taşınım sergilemekte ve bu durum merkeze yaklaşıldıkça düşey hızların en yüksek değerlere ulaşmasına neden olmaktadır. 5 cm orifis, çekirdek genişliği açısından ara bir rejim oluşturarak düşey hızların orta seviyelerde gerçekleştiği bir davranış göstermektedir.

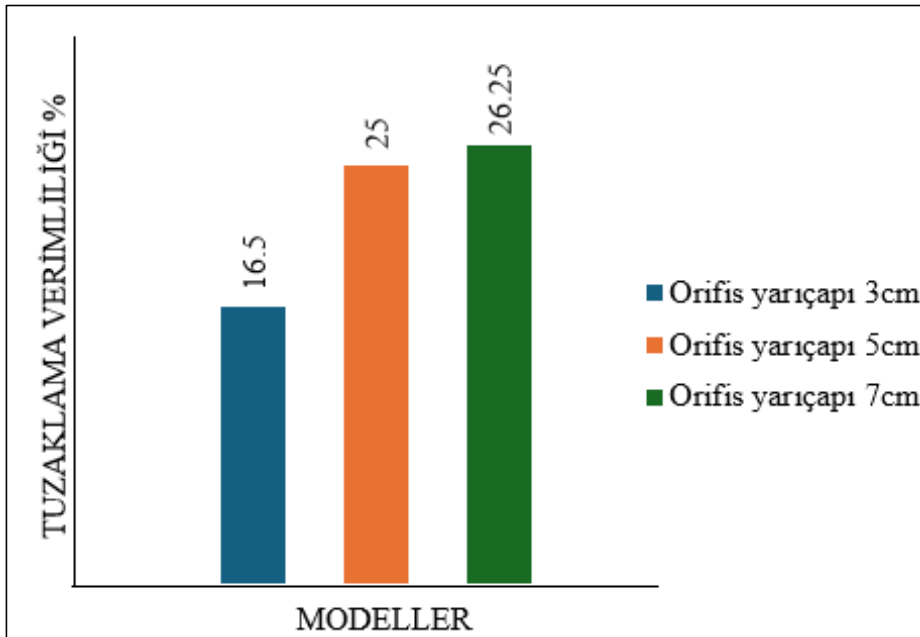


Şekil 5.34. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı



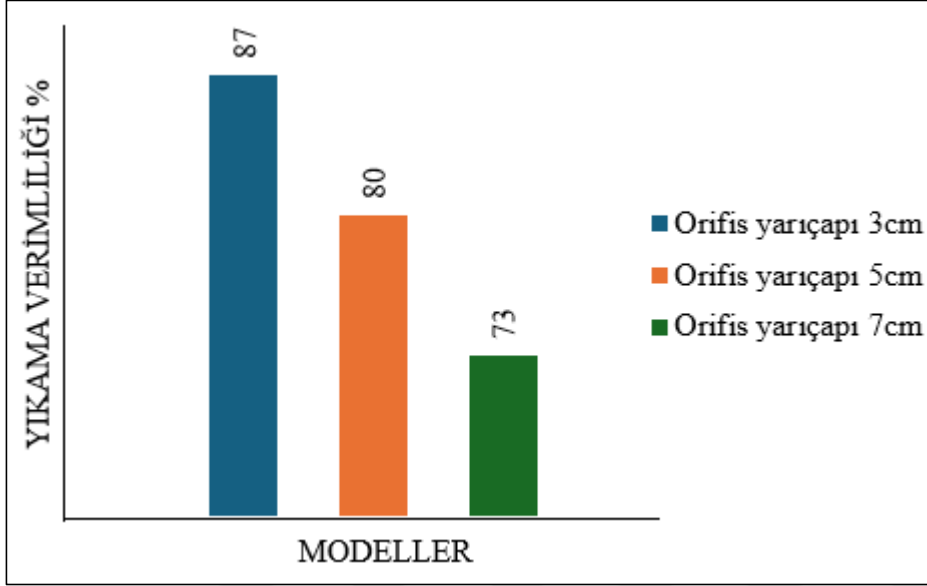
Şekil 5.35. Farklı orifis yarıçaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

Şekil 5.36, 3 cm, 5 cm, 7 cm orifis yarıçaplarının vorteks çökeltim havuzundaki tuzaklama verimliliği üzerindeki etkisini göstermektedir. Bulgulara göre, orifis yarıçapı büyüdükçe tuzaklama verimliliği artmaktadır. Orifis yarıçapı 3 cm olan modelde verim %16,5, 5 cm olan modelde %25, 7 cm olan modelde ise %26,25 olarak hesaplanmıştır. Daha büyük orifis yarıçapı, sedimentlerin havuz içinde daha fazla çökmesine imkân tanımış; böylece sediment tuzaklama performansı yükselmiştir.



Şekil 5.36. Farklı orifis yarıçaplarına ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.37, 3 cm, 5 cm, 7 cm orifis yarıçaplarının vorteks çökeltim havuzundaki yıkama verimliliği üzerindeki etkisini göstermektedir. Bulgulara göre orifis yarıçapı büyüdükçe yıkama verimliliği azalmaktadır. Orifis yarıçapı 3 cm olan modelde yıkama verimi %87, 5 cm orifiste %80 ve 7 cm orifiste ise %73 olarak ölçülmüştür.



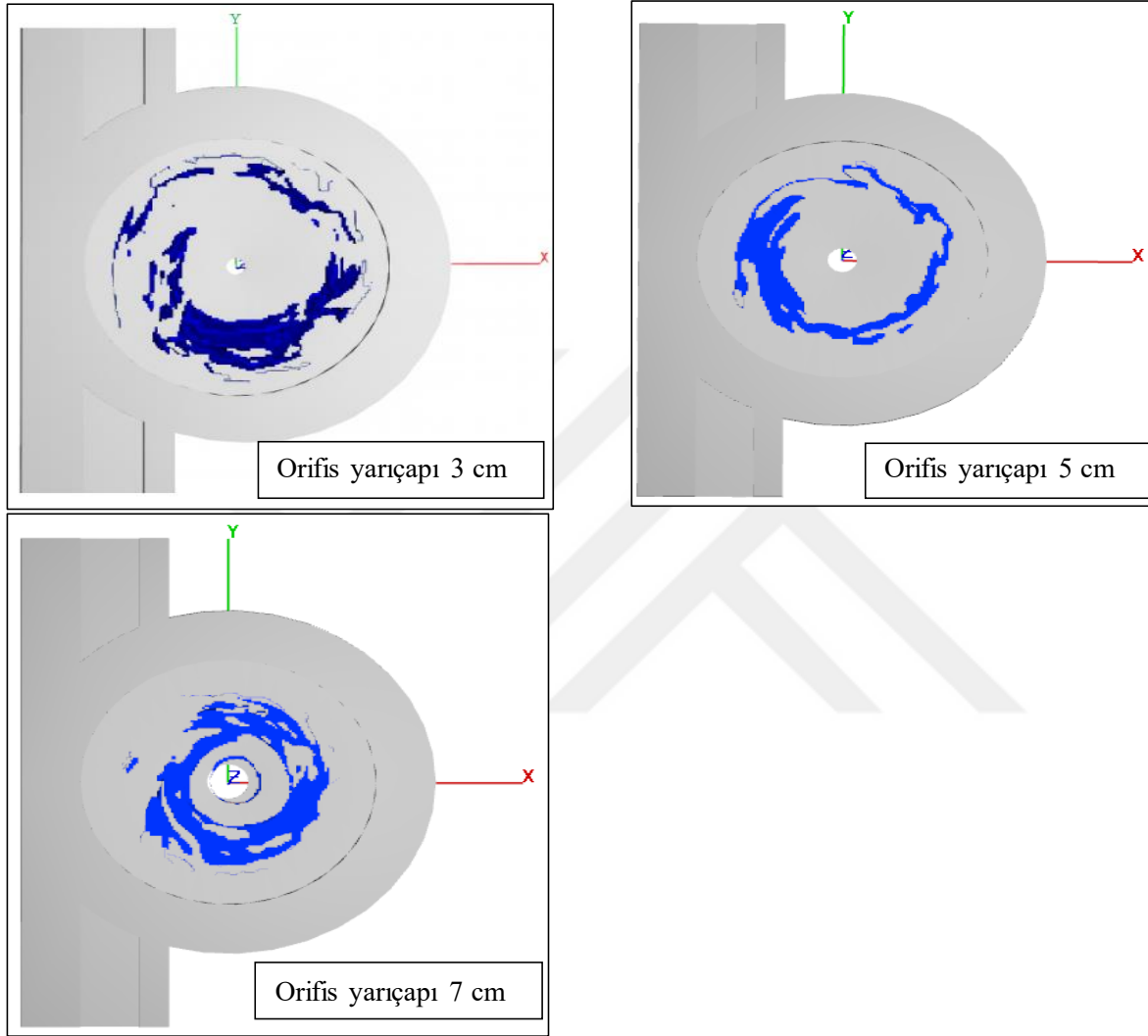
Şekil 5.37. Farklı orifis yarıçaplarına ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.38 sırasıyla 3 cm, 5 cm ve 7 cm orifis yarıçapı modelleri için havuzda biriken sedimentin dağılımını göstermektedir. Vorteks çökeltim havuzu tabanındaki sediment birikimi, orifis yarıçapının değişimine bağlı olarak farklılaşmaktadır.

3 cm orifis yarıçapı durumunda vorteks çekirdeği dar bir yapı sergilemektedir ve merkezde oluşan dönel akım sedimentin orifise etkin biçimde yönlendirilmesini sağlayamamaktadır. Bu koşullarda sediment tanecikleri, orta ve dış radyal mesafelerde geniş dairesel yörüngeler izleyerek taşınmakta ve özellikle havuz duvarlarına yakın bölgelerde birikim oluşturmaktadır. Bu durum, merkezdeki düşey taşınımın yetersiz kalması ve sedimentin dış bölgelerde daha uzun süre dolaşması ile ilişkilidir.

Orifis yarıçapının 5 cm'ye artırılmasıyla, sedimentin önemli bir bölümü merkeze doğru yönlendirilmekte, taban birikimi orifis çevresinde yoğunlaşmakta ve duvarlardaki birikim azalmaktadır. En büyük orifis yarıçapı olan 7 cm durumunda ise vorteks çekirdeği genişleyerek merkezde yoğun birikim oluşturmaktadır. Bu koşullarda sediment büyük ölçüde merkeze yakın bölgede toplanmakta ve dış radyal bölgelerde birikim ihmal edilebilir.

düzeylere inmektedir. Artan orifis yarıçapı, sedimentin dış bölgelerde tutulmasını engelleyerek merkezde birikim yapısı meydana getirmektedir. Kesitler kesitler 0,01 m kayıt probunun altından, -0.03 m kotundan alınmıştır.

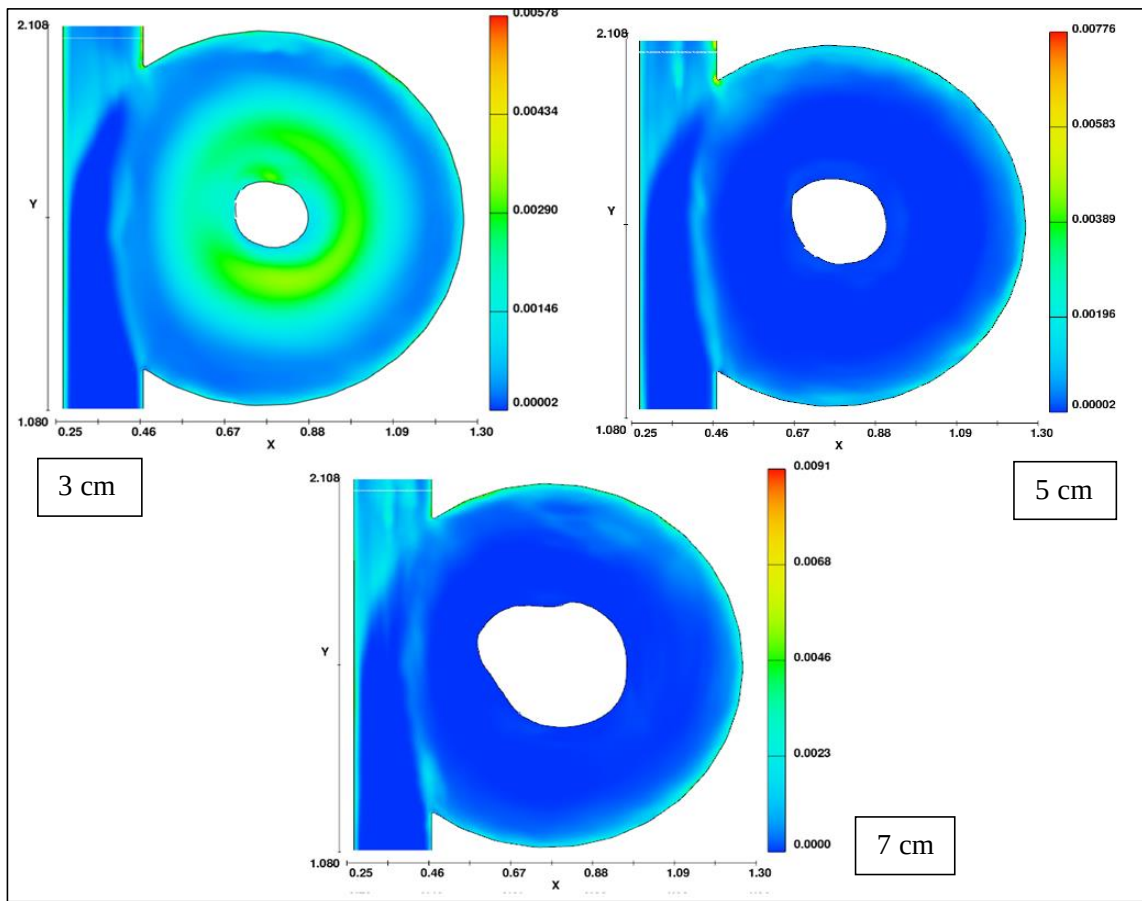


Şekil 5.38. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için havuzda biriken sedimentin dağılımı

Şekil 5.39, sırasıyla 3 cm, 5 cm ve 7 cm orifis yarıçapları için vorteks çökeltim havuzundaki türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımlarını sunmaktadır. Bulgular, orifis yarıçapının TKE'nin hem şiddetini hem de geometrik yayılımını doğrudan kontrol ettiğini göstermektedir. Orifis yarıçapı küçüldükçe, orifis kesitinde oluşan yüksek hız gradyanları ve güçlü emme etkisi, vorteks çekirdeği çevresinde halka şeklinde yoğun bir türbülans bölgesinin gelişmesine neden olmaktadır. Özellikle 3 cm orifis yarıçapı durumunda, orifisten geçen akımın yüksek düşey hızları nedeniyle merkez çevresinde kuvvetli aşağı yönlü çekirdek akımı oluşmakta; bu düşey akım ile sınırlı dönel akım arasındaki yüksek hız gradyanları, vorteks çekirdeği çevresinde türbülans üretimini artırarak TKE'nin bu bölgede

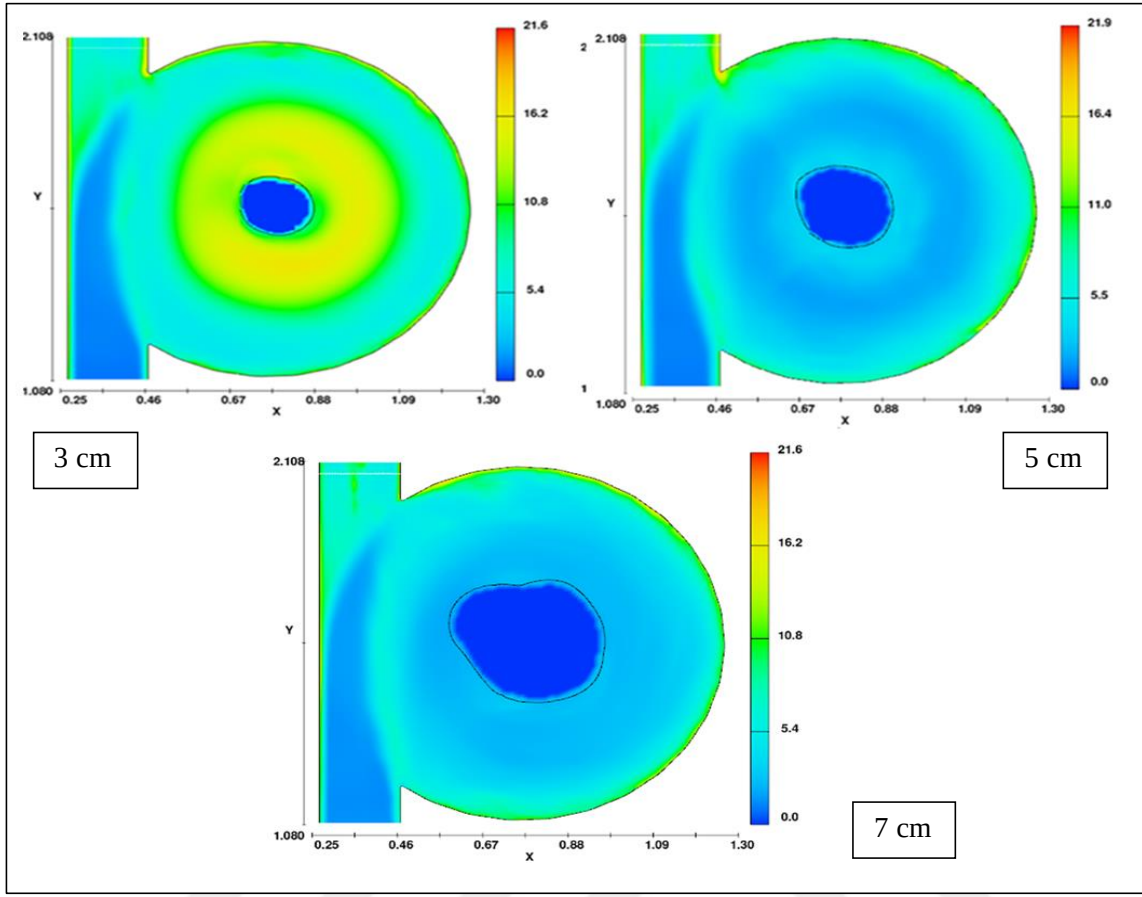
yoğunlaşmasını açıklamaktadır.

Orifis yarıçapının 5 ve 7 cm'ye artırılmasıyla birlikte orifis kesiti genişlemektedir. Geniş orifis kesiti, akımın merkezde güçlü bir vorteks halkası oluşturmasını sınırlandırmaktadır. Bunun sonucu akım daha düzenli ve düşük türbülanslı bir yapıda doğrudan orifise yönelme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle TKE dağılımı düşük genlikli, vorteks çekirdeği ise daha geniş ancak daha düşük enerjili bir karakter sergilemektedir. Kesitler kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



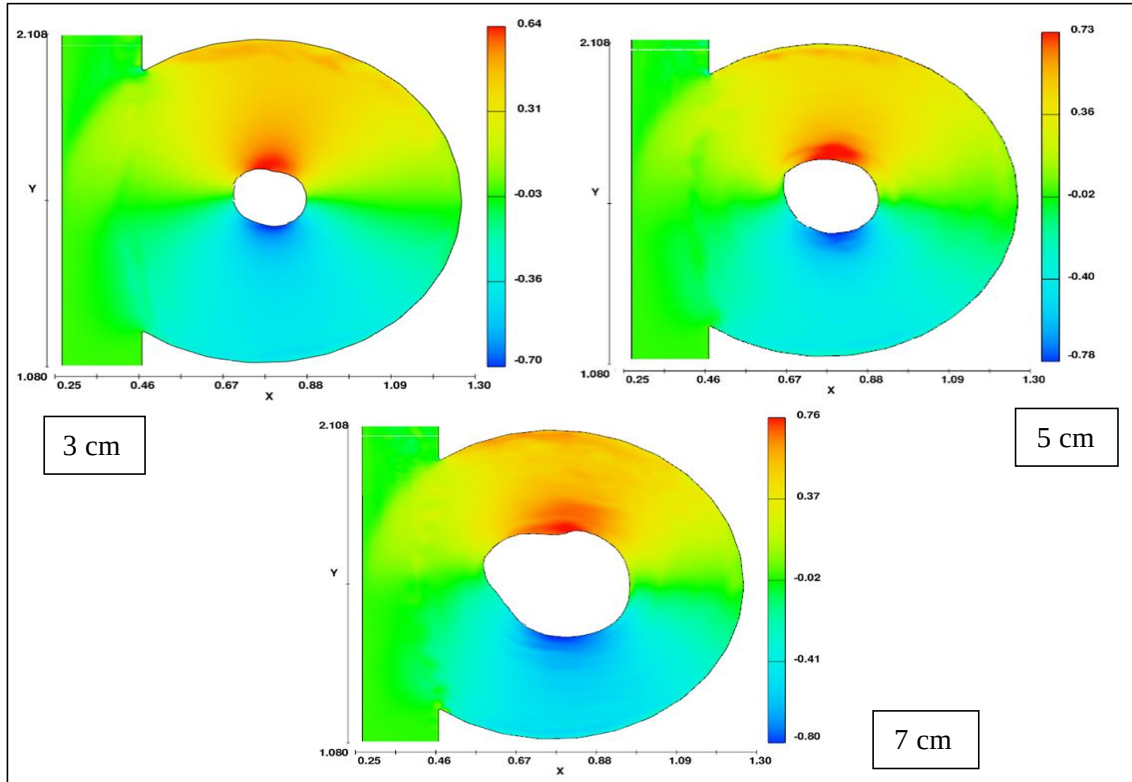
Şekil 5.39. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için türbülans kinetik enerjisinin dağılımı

Şekil 5.40, sırasıyla 3 cm, 5 cm ve 7 cm orifis yarıçaplarına sahip vorteks çökeltim havuzu modellerinde türbülans şiddeti dağılımlarını göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisinde gözlenen eğilimle uyumlu olarak, orifis yarıçapının küçülmesiyle birlikte türbülans şiddetinin vorteks çekirdeği çevresinde halka biçiminde yoğunlaştığı, yarıçap büyüdükçe ise azalarak daha dış bölgelere yayıldığı görülmektedir.

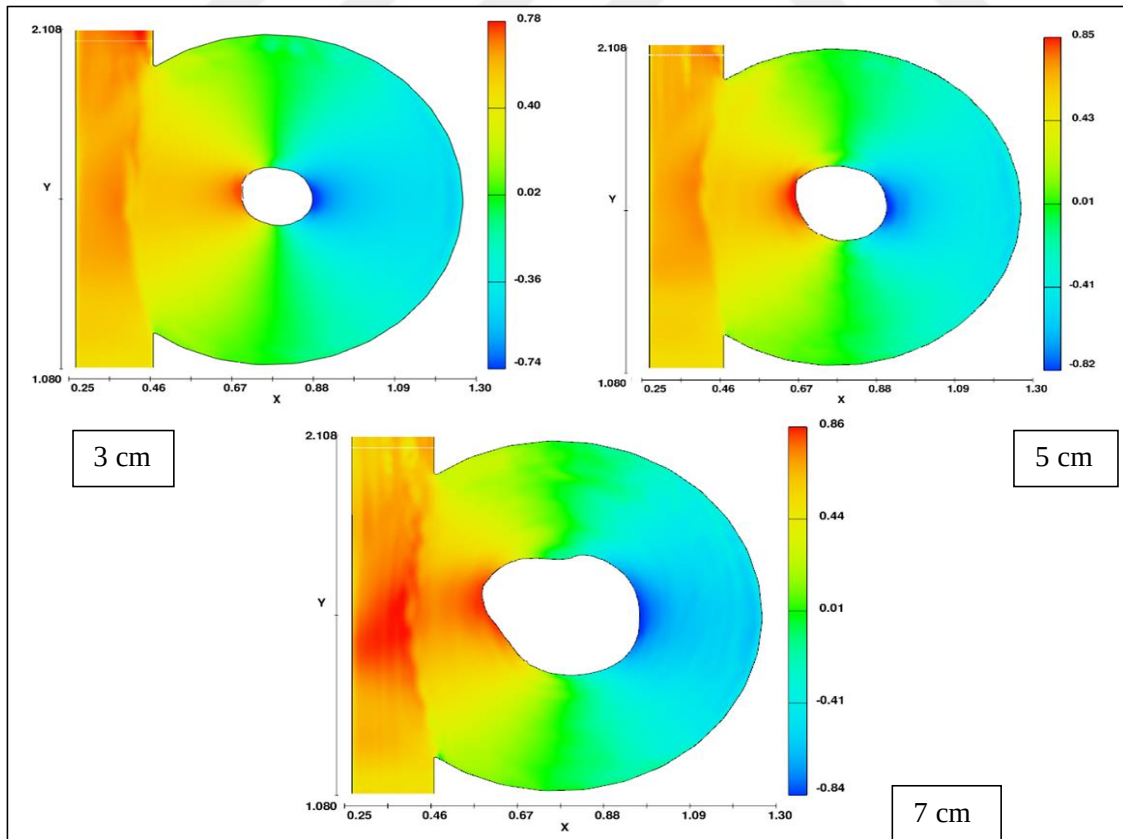


Şekil 5.40. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için türbülans şiddetinin dağılımı

Şekil 5.41 ve Şekil 5.42, farklı orifis yarıçaplarına sahip vorteks çökeltim havuzu modellerinde sırasıyla x ve y yönündeki hız bileşenlerinin mekânsal dağılımlarını göstermektedir. Her iki hız bileşeninde de en yüksek hız büyüklükleri 7 cm orifis yarıçapı için elde edilmiştir. Orifis yarıçapı havuz içerisindeki yatay momentum taşınımı ve akımın yönlenmesi üzerinde etkilidir. Orifis yarıçapının 7 cm'ye çıkarılmasıyla birlikte çıkış kesiti genişlemekte ve akım, merkezde hızlanmaya zorlanmadan havuz içerisinde daha serbest ve kararlı bir yatay dolaşım geliştirmektedir. Buna karşılık 3 cm orifis yarıçapında, kesit daralması nedeniyle akım enerjisinin büyük kısmı düşey yönde hızlanmaya harcanmakta ve akım, orifis çevresinde güçlü bir emme rejimine zorlanmaktadır. Bu durum, yatay momentumun bastırılmasına yol açarak x ve y yönlü hız bileşenlerinin daha düşük seviyelerde kalmasına neden olmaktadır. 5 cm orifis yarıçapı ise bu iki uç durum arasında ara bir davranış sergileyerek yatay hız büyüklüklerinde orta seviyelerde değerler üretmektedir. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.

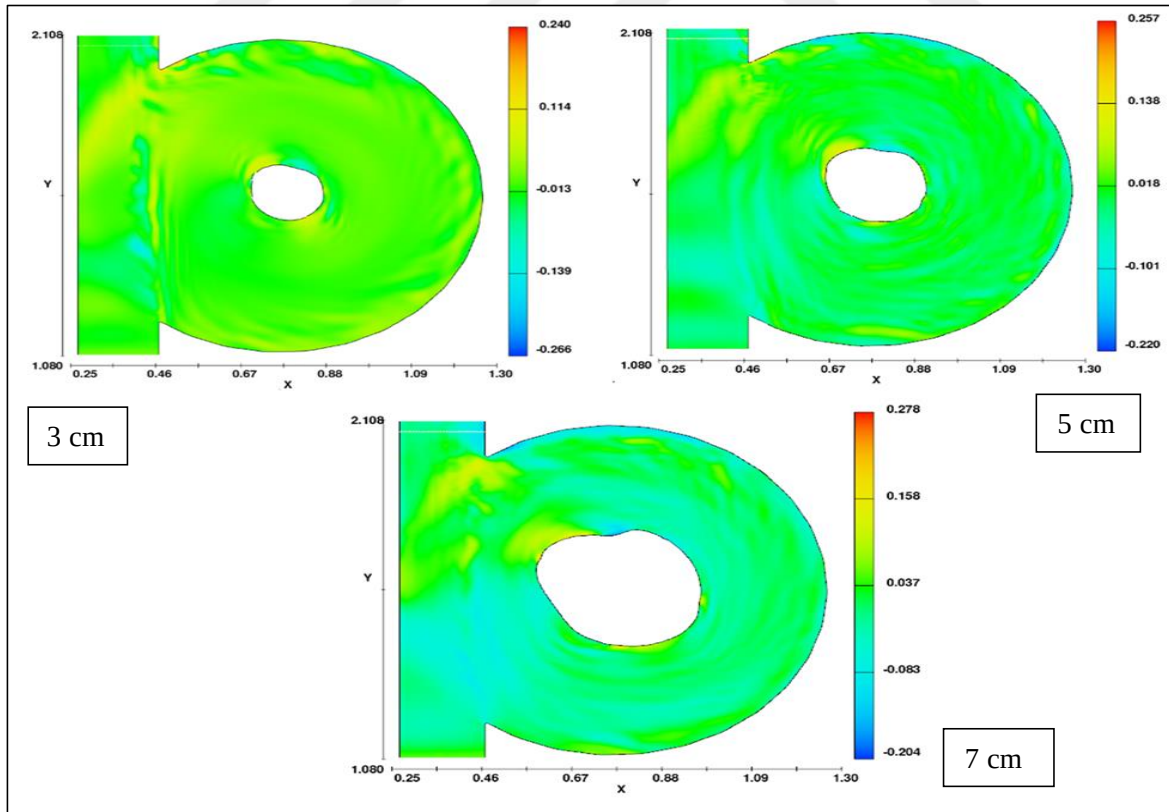


Şekil 5.41. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için x yönündeki hız dağılımı



Şekil 5.42. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için y yönündeki hız dağılımı

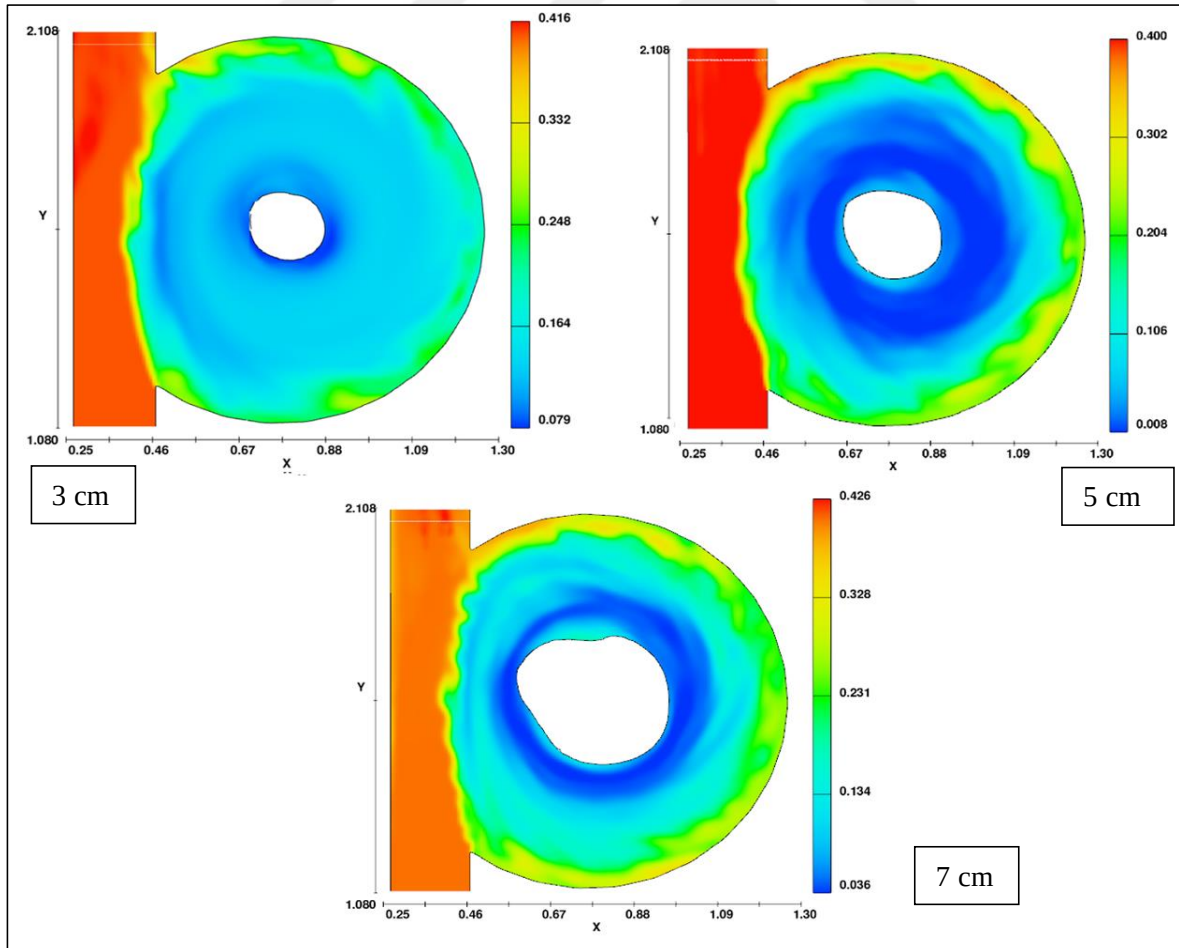
Şekil 5.43 farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için z yönündeki hız dağılımı havuz genelinde değerlendirildiğinde en yüksek düşey hız büyüklükleri 7 cm orifis yarıçapı için elde edilirken, merkez bölgesinde en yüksek düşey hızlar 3 cm orifis yarıçapı durumunda gözlenmiştir. Bu farklılık, orifis yarıçapının vorteks çekirdeğinin konumu, genişliği ve düşey momentumun havuz içindeki dağılımı üzerindeki etkisiyle açıklanmaktadır. 3 cm orifis yarıçapında, kesit daralması nedeniyle merkezde güçlü bir emme çekirdeği oluşmakta ve bu durum, vorteks çekirdeği çevresinde yerel olarak en büyük düşey hızları üretmektedir. Ancak bu yüksek düşey hızlar, dar bir merkez bölgesiyle sınırlı kalmakta ve havuzun geneline yayılmamaktadır. Buna karşılık 7 cm orifis yarıçapında, çıkış kesitinin genişlemesiyle birlikte akım, merkezde aşırı hızlanmaya zorlanmamakta ve düşey momentum daha geniş bir alana yayılmaktadır. Bu durum, merkezdeki düşey hızı değerlerini sınırlamakla birlikte, havuzun tamamında daha yüksek ve daha kararlı düşey hız dağılımlarının oluşmasına neden olmaktadır. 5 cm orifis yarıçapı ise bu iki davranış arasında ara bir rejim sergileyerek hem merkez hem de havuz geneli için orta seviyelerde düşey hızlar üretmektedir. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



Şekil 5.43. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için z yönündeki hız dağılımı

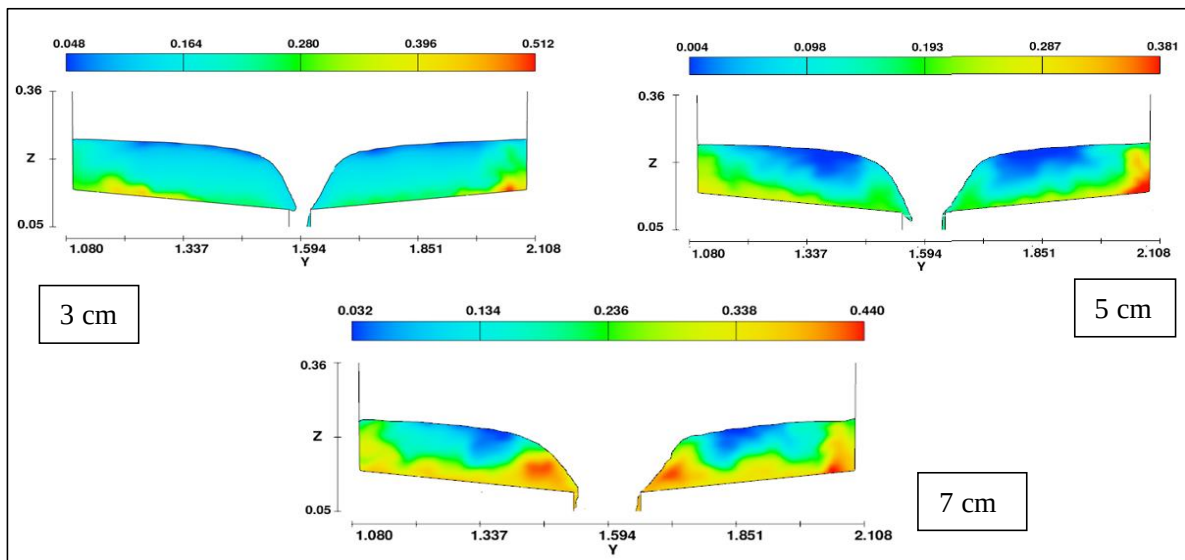
Şekil 5.44. farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için konsantrasyon dağılımının plan görünümüdür. Plan görünümünde elde edilen sediment konsantrasyon dağılımları incelendiğinde, konsantrasyonun ağırlıklı olarak havuz duvarlarına yakın bölgelerde yoğunlaştığı, en yüksek konsantrasyonların 7 cm orifis yarıçapı durumunda olduğu ayrıca giriş çıkış kanalı doğrultusunda devam eden yüksek konsantrasyonlu akış görülmektedir. Bu dağılım, plan görünümünün doğası gereği, akımın düşey bileşenine ilişkin bilgi içermemesi nedeniyle yalnızca yatay taşınım ve çevresel birikim eğilimlerini temsil etmektedir.

Bu nedenle plan görünümünden elde edilen konsantrasyon sonuçları, havuz içi genel eğilimleri ve duvara yönelen sediment birikimini ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir. Merkez bölge ve düşey yöndeki taşınım mekanizmalarına ilişkin ayrıntılı yorumlar, kesitler görünümüleri üzerinden yapılmıştır. Dolayısıyla duvar dışındaki bölgelerde gözlenen konsantrasyon değişimleri, bu aşamada bilinçli olarak tartışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.

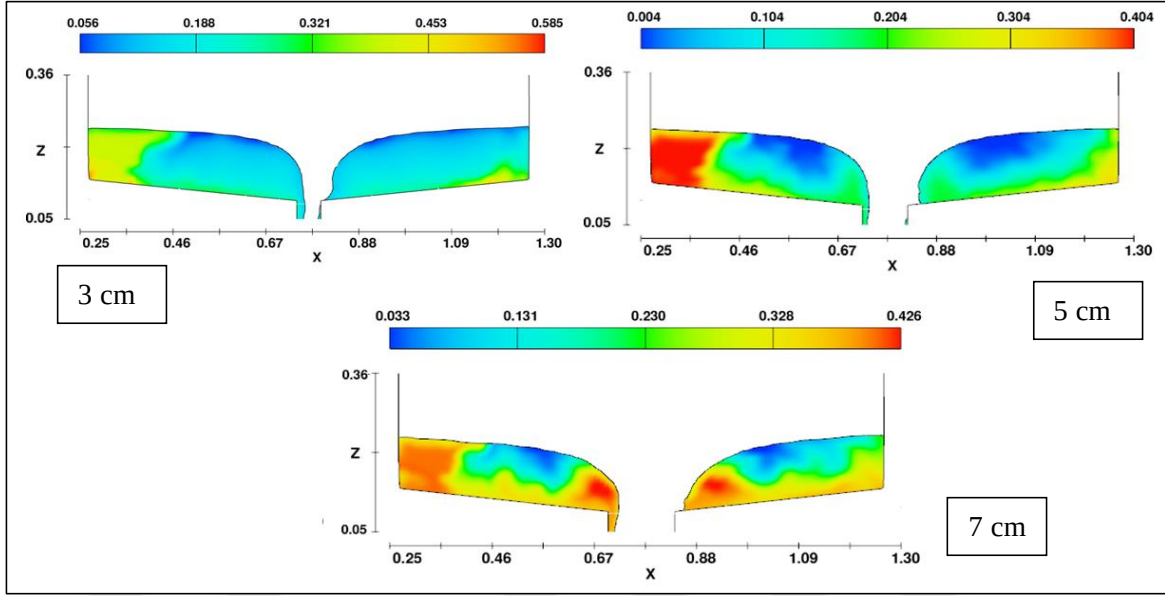


Şekil 5.44. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için konsantrasyon dağılımı

Şekil 5.45, Y-Z doğrultusu ve Şekil 5.46 X-Z doğrultusu birlikte değerlendirildiğinde, tüm orifis yarıçaplarında sedimentin ağırlıklı olarak tabana yakın bölgelerde çöktüğü ve özellikle çıkış kanalına komşu kesitlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu dağılım, dairesel havuz geometrisinin akımı helisel bir yörüngeye zorlaması, girişte sediment yüklü akımın duvarla etkileşerek yanal yönde yayılması ve taban sınır tabakası içerisinde hızların düşmesiyle çökmenin hızlanması sonucu oluşmaktadır. Duvarlara yakın düşük hız bölgelerinde yerel birikimler gözlenmekle birlikte, baskın çökme mekanizması orifis çevresinde gerçekleşmektedir. 3 cm orifis yarıçapında, dar kesit alanı nedeniyle çekirdek akımı kuvvetlenmekte ve sediment tabanda ince fakat göreceli olarak yüksek konsantrasyonlu bir şerit halinde birikmektedir. 5 cm orifis yarıçapında, çekirdek bölgesinin genişlemesi ve orifisten geçen debinin artmasıyla birlikte taban boyunca, özellikle çıkış tarafına yakın kesitlerde yüksek konsantrasyonlu bölgenin kalınlaştığı, buna karşılık yüzeye yakın bölgelerde konsantrasyonun azaldığı görülmektedir. 7 cm orifis yarıçapında ise genişleyen orifis kesiti sedimentin tabandan daha etkin biçimde çekilmesini sağlamakta ve bu nedenle tabanın orifise yakın kesiminde çok belirgin bir yüksek konsantrasyon bölgesi oluşurken, orifis çevresinde hem yatay hem düşey yönde genişleyen bir düşük konsantrasyon bölgesi gelişmektedir. Her iki kesit birlikte ele alındığında, orifis yarıçapının sedimentin taban boyunca taşınma biçimini ve çökme davranışını belirleyen temel parametrelerden biri olduğu ayrıca büyük orifis yarıçaplarının merkez odaklı bir çökme davranışı oluşturduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.45. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için Y-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı



Şekil 5.46. Farklı orifis yarıçaplarına ait modeller için X-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı

5.3. Geometrik Konfigürasyonun Etkisi

Bu kısımda kullanılan model; havuz geometrisi, hidrolik özellikleri ve işletme koşulları bakımından Athar (2000) tarafından tanımlanan Tip-I deney sisteminin birebir aynısıdır. Geometrik konfigürasyon denemelerinde kalibrasyon modeli olarak kullanılan model bu kısımda I-şekilli model olarak isimlendirilmiştir. Bu konfigürasyonda giriş ve çıkış kanalları doğrusal biçimde aynı ekseninde yer almakta ve birbirinin devamı niteliğindedir. Kalibrasyon aşaması tamamlandıktan sonra havuz geometrisi değiştirilerek iki ek varyasyon daha denenmiştir.

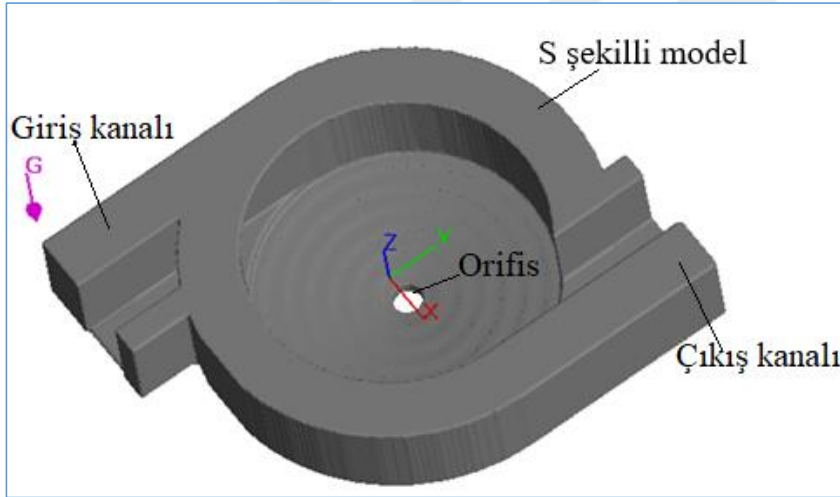
- S şekilli geometride giriş ve çıkış kanalları havuza çapraz konumlanmış olup akım havuz içinde S formunda yön değiştirmektedir.
- U şekilli geometride giriş ve çıkış kanalları birbirine zıt yönlerde konumlanmış olup akım havuz içerisinde U formunda yön değiştirerek ilerlemektedir.

Bu üç geometrik düzenleme (I, S ve U) ile giriş-çıkış kanal konfigürasyonunun akım oluşumu, sediment davranışı ve hidrolik performans üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

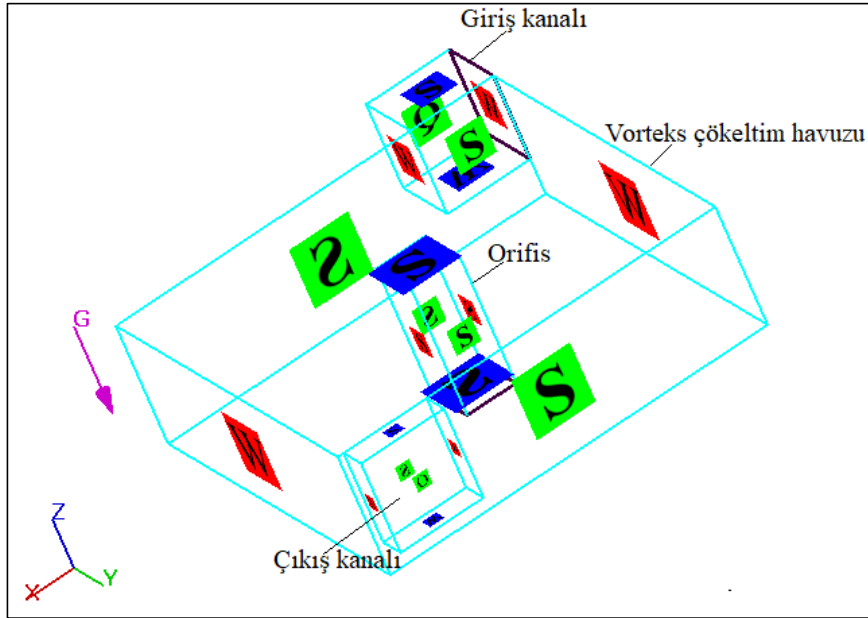
Vorteks havuzunun çapı 1.0 m, toplam yüksekliği ise 0.45 m'dir. Havuz tabanı 1:10 eğimli konik bir yapıya sahiptir. Orifis yarıçapı 5 cm'dir. Giriş kanalı 6.5 m uzunluğunda, 0,20 m

genişliğinde ve 0,25 m yüksekliğindedir ve akım tüm geometrilerde havuza teğetsel olarak bağlanmaktadır. Çıkış kanalı 2.5 m uzunluk ve 0,20 m genişlik değerlerine sahiptir. Giriş ve çıkış eşikleri arasındaki fark 2 cm'dir. I, S ve U geometrileri arasındaki temel fark kanal eksenlerinin yönü olup kanal kesitleri, kotları ve giriş koşulları aynıdır. Sayısal modelde giriş kanalı, vorteks havuzu, orifis bölgesi ve çıkış taşıma kanalı olmak üzere dört ayrı ağ bloğu tanımlanmıştır. Giriş debisi 10 l/s olarak, 0,055 mm sediment çapı için sediment konsantrasyonu ise 400 ppm olarak sabitlenmiştir. Giriş su yüksekliği 0,118 m olarak girilmiştir.

Karşılaştırma modellerinde çıkış kanalı ve orifis bölgesi dalga çıkışı (wave outflow) sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Böylece havuz geometrisinin vorteks gelişimi, çekirdek bölge oluşumu, taban yakınındaki akım yapısı ve sediment taşınım süreçleri üzerindeki etkisi doğrudan analiz edilebilmiştir. Şekil 5.47 S şekilli geometrik konfigürasyona ait görünümü ve Şekil 5.48 konfigürasyona ait sınır şartlarını göstermektedir.

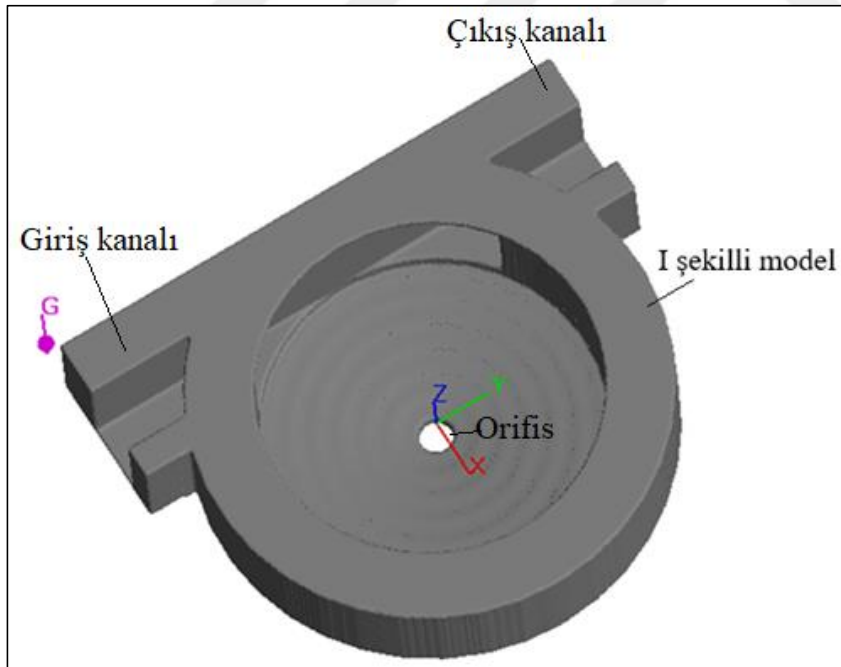


Şekil 5.47. S şekilli geometrik konfigürasyona ait görünüm

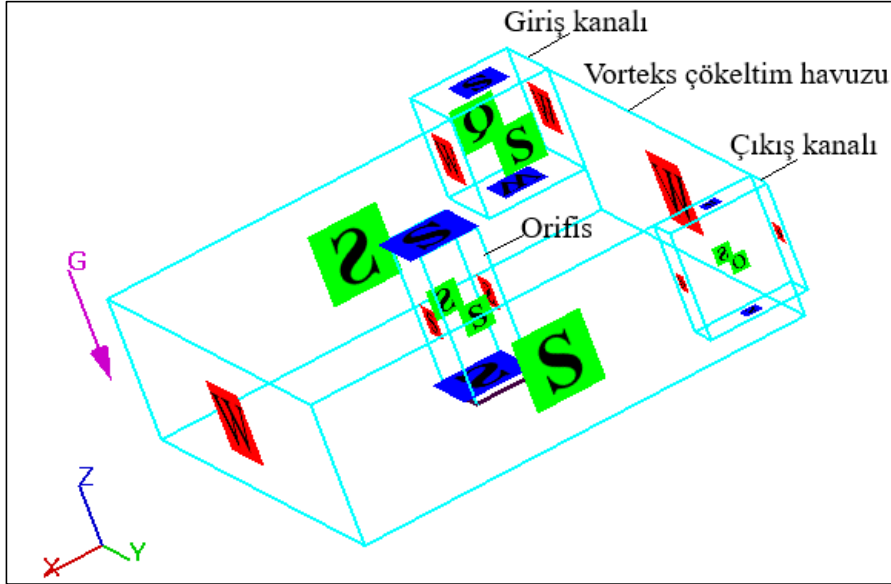


Şekil 5.48. S şekilli geometrik konfigürasyona ait sınır şartları

Şekil 5.49 I şekilli geometrik konfigürasyona ait görünümü ve Şekil 5.50 konfigürasyona ait sınır şartlarını göstermektedir.

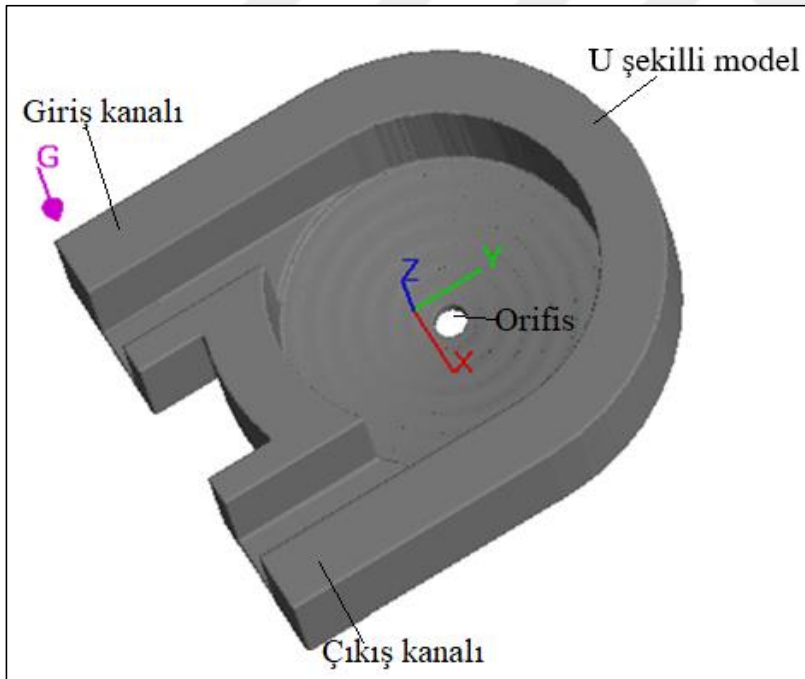


Şekil 5.49. I şekilli geometrik konfigürasyona ait görünüm

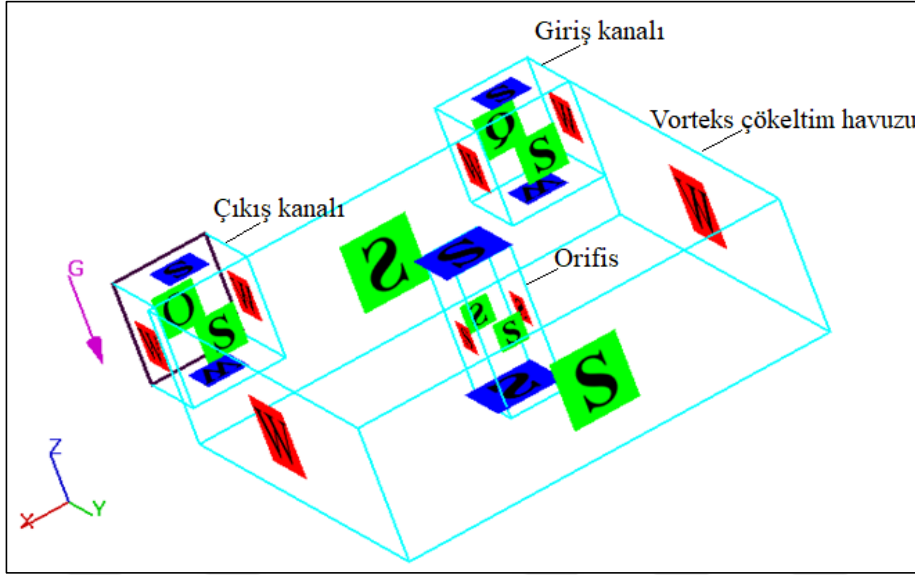


Şekil 5.50. I şekilli geometrik konfigürasyona (kalibrasyon modeli) ait sınır şartları

Şekil 5.51 U şekilli geometrik konfigürasyona ait görünümü ve Şekil 5.52 konfigürasyona ait sınır şartlarını göstermektedir.



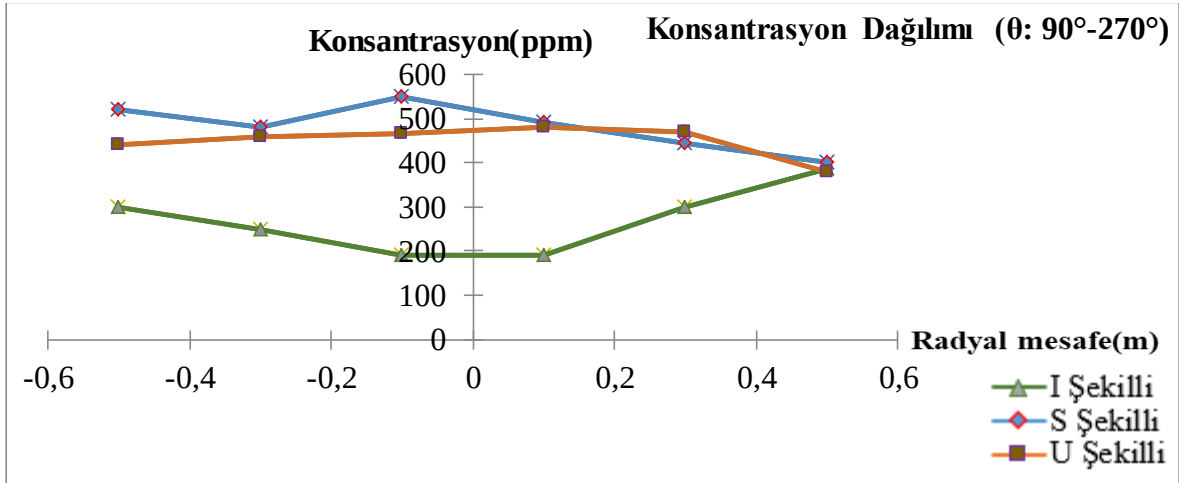
Şekil 5.51. U şekilli geometrik konfigürasyona ait görünüm



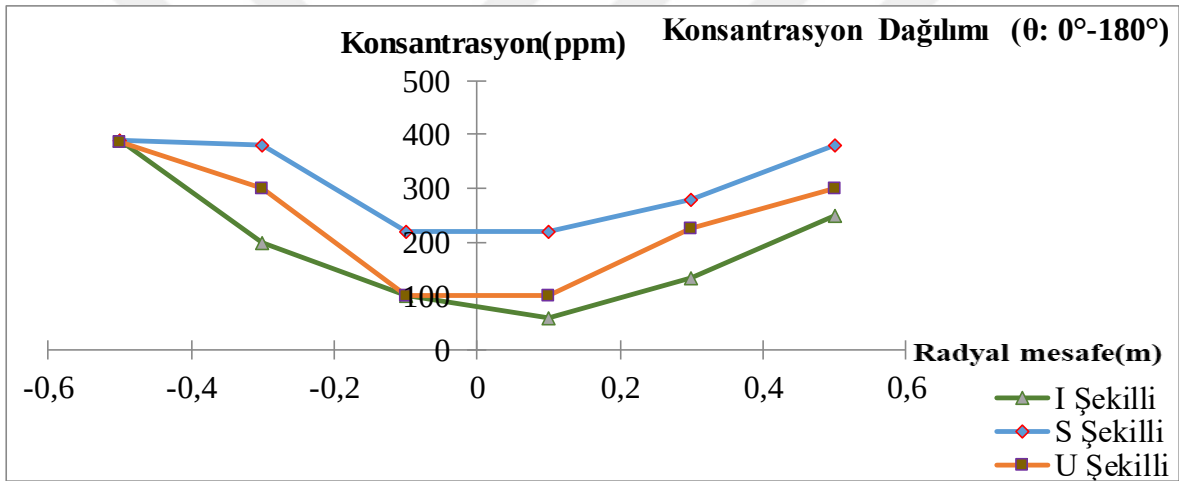
Şekil 5.52. U şekilli geometrik konfigürasyona ait sınır şartları

Şekil 5.53, I, S ve U şekilli geometrik konfigürasyonların 90° – 270° doğrultusunda 0,01 m seviyesindeki konsantrasyon dağılımını ve Şekil 5.54 farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 0° – 180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımını göstermektedir.

Vorteks çökeltim havuzunda S şekilli, U şekilli ve I şekilli geometrik konfigürasyonlar, havuz içindeki akımı yalnızca yönlendirmekle kalmayıp vorteks ekseninin konumunu, düşey momentum taşınımının yönünü ve sedimentin havuz içindeki kalma süresini değiştirmiştir. S şekilli konfigürasyon, giriş akımını ardışık yön değişimlerine zorlayarak vorteksin gücünü arttırmış ve akımın alt kotlara doğru iletilmesine neden olmuştur. Bu durum, sedimentin taban yakınında yoğunlaşmasına, dolayısıyla en yüksek taban konsantrasyonlarının oluşmasına yol açmıştır. Ayrıca serbest su yüzeyine yakın en yüksek konsantrasyonlar S şekilli konfigürasyonda gözlenmiştir. U şekilli konfigürasyon ise akımı havuz içerisinde saat yönünde dolaşıma sokmakla birlikte, yön değişimini daha geniş ölçekli ve simetrik bir şekilde gerçekleştirmiştir. Bu geometri düşey taşınımın daha çok askıda kalma rejimi şeklinde gelişmesine ve sedimentin serbest su yüzeyine yakın bölgelerde yoğunlaşmasına neden olmuştur. Bu nedenle U şekilli konfigürasyonda toplam konsantrasyon seviyesi S şekline yakın olmakla birlikte, askıdaki madde miktarı taban yerine üst kotlarda baskın hale gelmiştir. Buna karşılık I şekilli konfigürasyon, giriş ve çıkış kanallarının doğrusal hizalanması nedeniyle vorteksin zayıf ve süreksiz gelişmesine, düşey ve dönel akım bileşenlerinin zayıflamasına neden olmuştur. Sonuç olarak I şekilli konfigürasyonda hem taban hem de serbest yüzey bölgelerinde en düşük konsantrasyon seviyelerini göstermiştir.

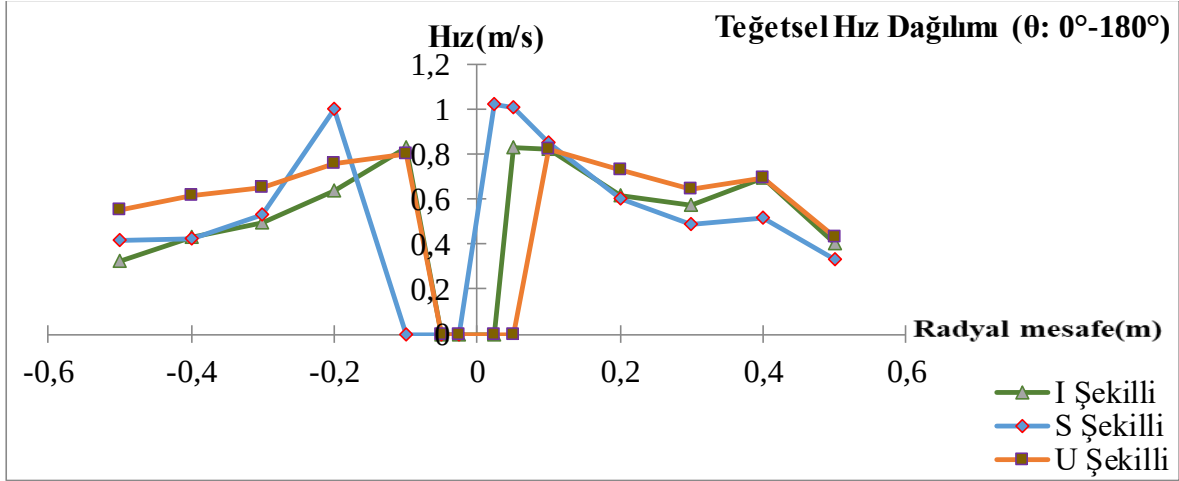


Şekil 5.53. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

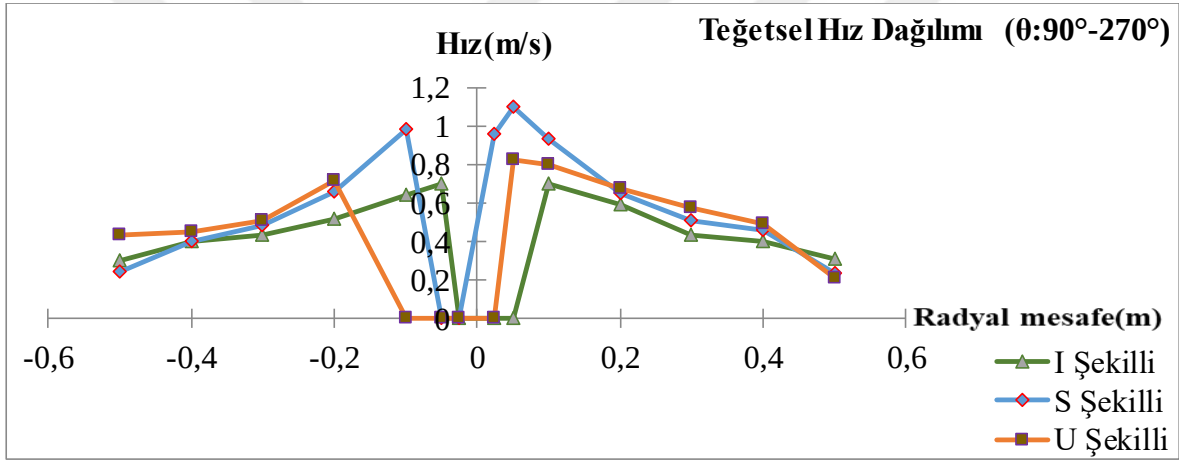


Şekil 5.54. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,11 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

Şekil 5.55 farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı ve Şekil 5.56 farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımını göstermektedir. S şekilli konfigürasyon, akımı havuz içerisinde ardışık ve ters yönlü sapmalara zorlayarak açısal momentum üretimini artırmaktadır. Bu nedenle en yüksek teğetsel hızlar bu geometride oluşmaktadır. U şekilli konfigürasyon saat yönünde hizalanmış çıkış kanalında akış, hızlanma evresindeyken havuzu terk etmekte ve bu durum nedeniyle teğetsel hızlar orta seviyelerde kalmaktadır. I şekilli konfigürasyonda ise giriş-çıkış kanallarının doğrusal hizalanması akımın doğrudan çıkışa yönelmesine neden olmakta, vorteks gelişimi zayıflamakta ve en düşük teğetsel hızlar elde edilmektedir.



Şekil 5.55. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı.

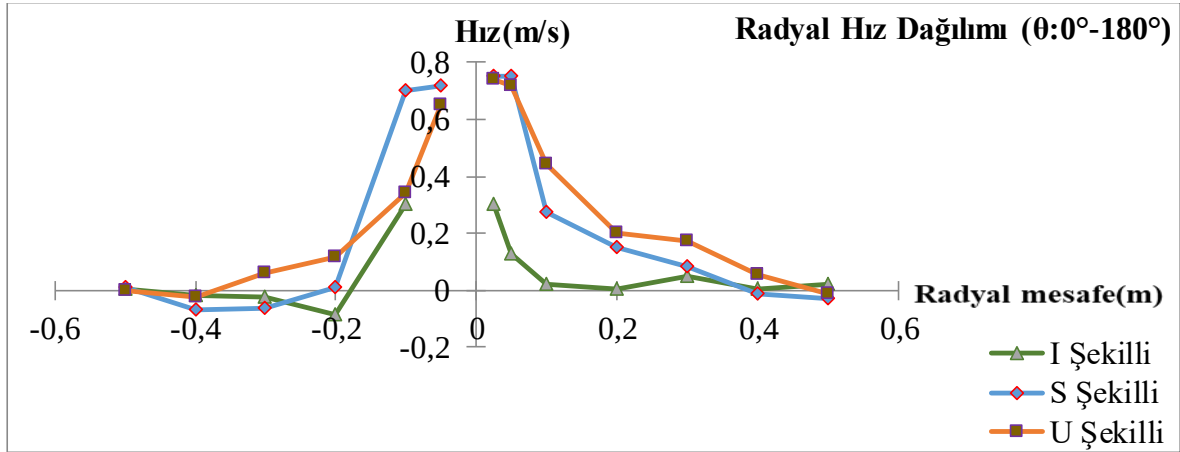


Şekil 5.56. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı

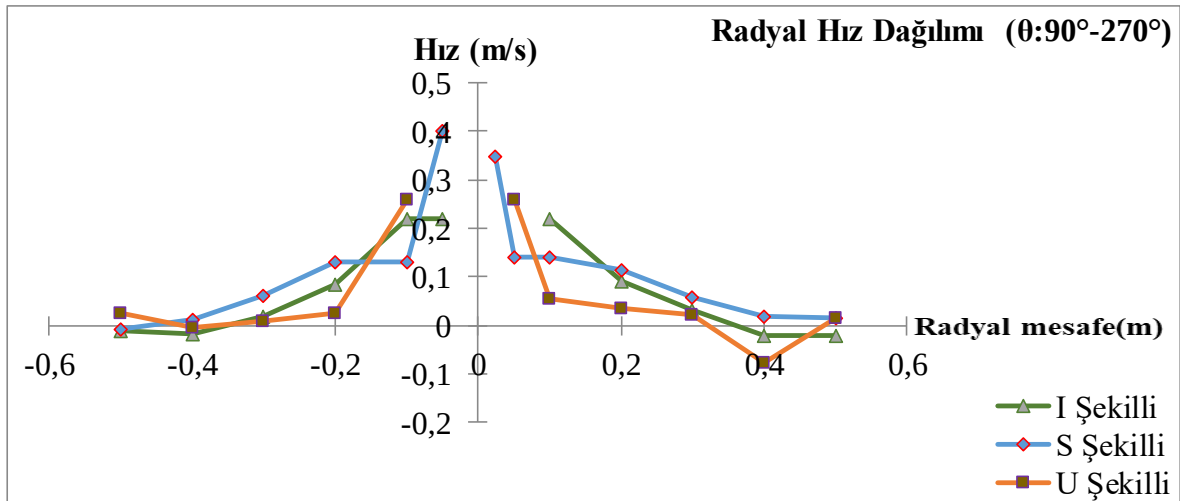
Şekil 5.57 farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımını ve Şekil 5.58 farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımını göstermektedir.

S şekilli konfigürasyon, akımı havuz içerisinde tekrarlı yön değişimlerine ve merkeze doğru zorlanmış bir dolaşıma maruz bırakarak radyal basınç gradyenlerini belirgin biçimde artırmaktadır. Bu durum, dış bölgelerden vorteks çekirdeğine doğru güçlü bir besleme akımı oluşturarak en yüksek radyal hızların bu geometride ortaya çıkmasına neden olmaktadır. U şekilli konfigürasyonda saat yönünde dolaşımı sürdürmekle birlikte çekirdeğe yönelen radyal taşınım daha sınırlı kalmakta ve radyal hızlar orta düzeylerde gerçekleşmektedir. I şekilli konfigürasyonda ise doğrusal akım yolu radyal yönelimi baskılamakta, vorteks

çekirdeğine doğru taşınım zayıflamakta ve en düşük radyal hızlar oluşmaktadır. Vorteks çekirdeği davranışı, radyal hız bileşeni açısından teğetsel hız dağılımlarına benzer bir karakter sergilemiştir. Başka bir ifadeyle, yüksek radyal hızların ve vorteks merkezindeki düşük basınç bölgesinin dar bir çekirdek yerine daha geniş bir alan boyunca dağılım göstermesi, vorteks çekirdeğinin genişlediğine işaret etmektedir. Bu durumda vorteks çekirdeği daha kararlı bir yapı kazanmıştır.



Şekil 5.57. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

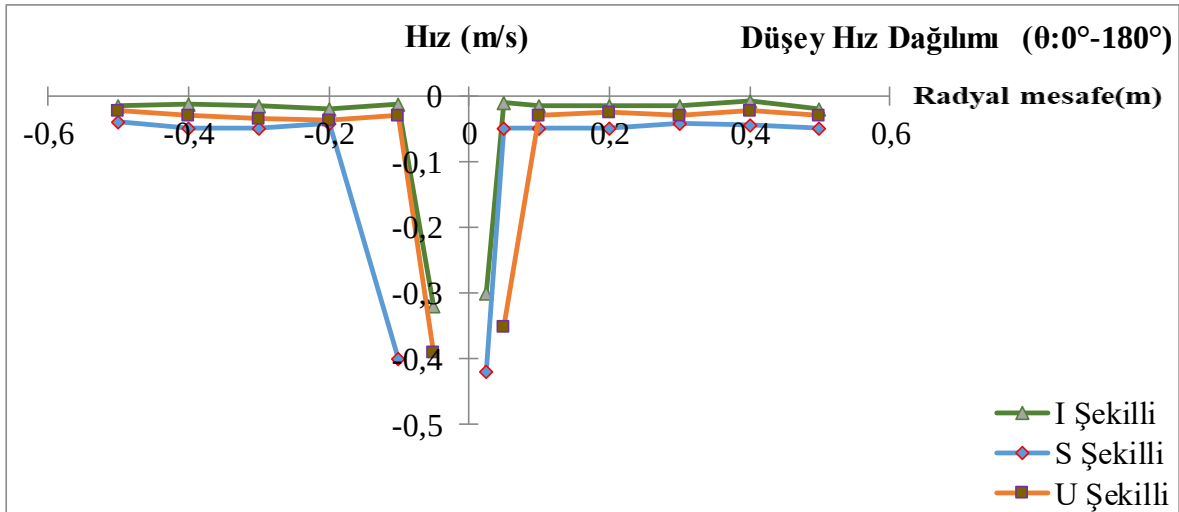


Şekil 5.58. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

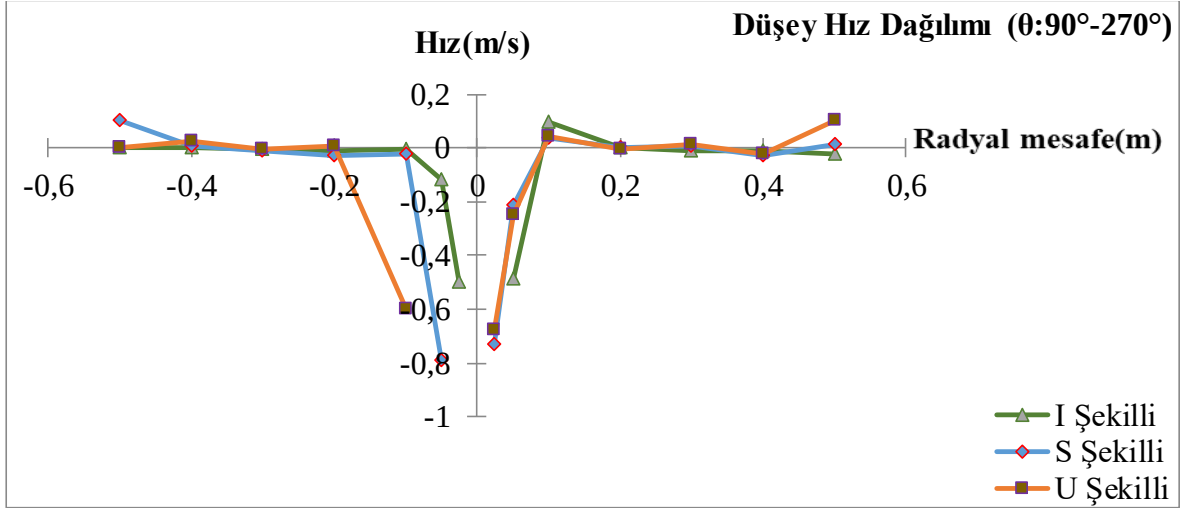
Şekil 5.59 farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımını ve Şekil 5.60 farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda

elde edilen düşey hız dağılımını göstermektedir.

Vorteks çökeltim havuzu merkez bölgesinde düşey hız davranışı, vorteks çekirdeği boyunca gelişen basınç alanı ve süreklilik koşulu tarafından belirlenmektedir. Dönel akımın etkisiyle vorteks çekirdeğinde düşük basınçlı bir merkez bölgesi oluşmakta ve serbest su yüzeyi ile tabandaki orifis arasında belirgin bir basınç farkı meydana gelmektedir. Bu basınç farkı, akımı çekirdek boyunca aşağı yönde ivmelendirerek merkezde güçlü bir düşey emme oluşturmaktadır, akımın vorteks çekirdeği boyunca orifise doğru taşınmasına neden olmaktadır. Şekillerde görülen durum, basınç gradyeninde kontrollü aşağı yönlü akımın doğrudan bir göstergesidir. Merkezden uzaklaşıldıkça ise akımın baskın bileşeni teğetsel hız hâline gelmekte, düşey yöndeki basınç gradyeni zayıflamakta ve akım ağırlıklı olarak yatay düzlemde dönel hareket sergilemektedir. Bu nedenle düşey momentum taşınımı dış yarıçaplarda sınırlı kalmakta, düşey hızlar azalarak sıfıra yaklaşmakta ve düşey akım yalnızca vorteks çekirdeği çevresinde etkin olmaktadır. Şekil 5.59 ile verilen düşey hız dağılımında, 0° - 180° doğrultusunda serbest su yüzeyine yaklaşıldığında vorteks çekirdeğinde gözlenen yüksek hız davranışının zayıfladığı ve merkezdeki belirgin düşey hızların vorteks konisinin genişlemesi nedeniyle ölçülememiği görülmüştür.

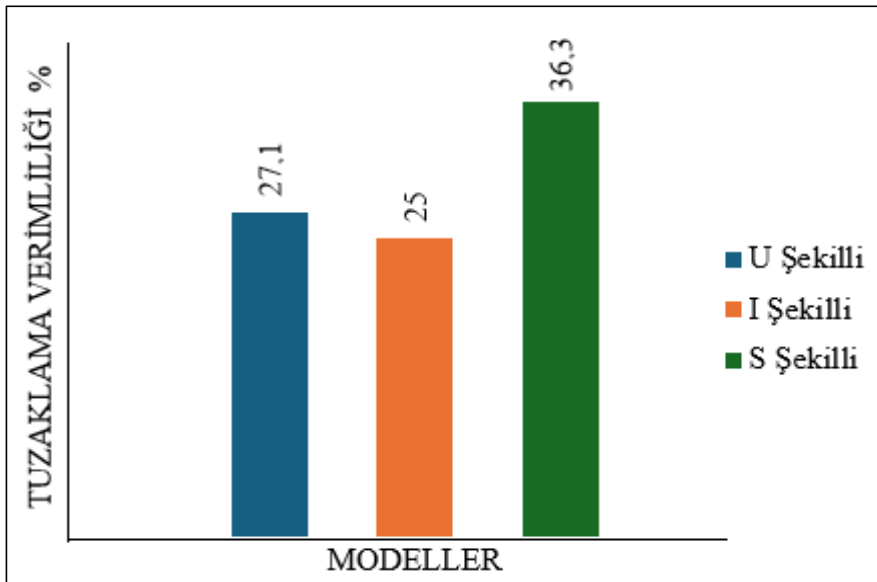


Şekil 5.59. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı



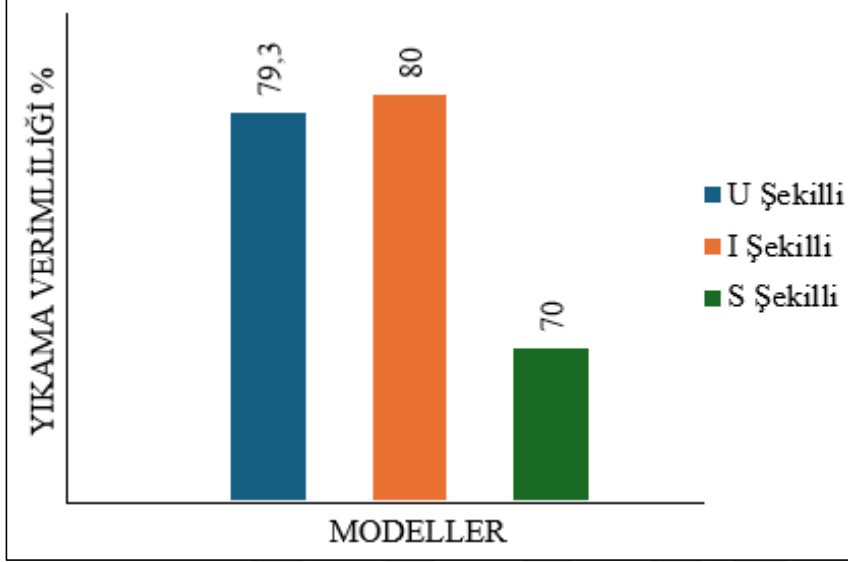
Şekil 5.60. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

Şekil 5.61 ile I, S ve U şekilli geometrik konfigürasyona sahip vorteks çökeltim havuzu modellerinin tuzaklama verimlilikleri gösterilmektedir. En yüksek tuzaklama verimliliği S şekilli konfigürasyonda %36,3 olarak ölçülmüştür. Tuzaklama verimliliği U şekilli konfigürasyonda %27,1 ve I şekilli konfigürasyonda %25 olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, tuzaklama verimliliğinin geometrik konfigürasyon ile değişebileceğini göstermektedir.



Şekil 5.61. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.62, I, S ve U şekilli geometrik konfigürasyona sahip vorteks çökeltim havuzu modellerinin yıkama verimliliklerini göstermektedir. I şekilli konfigürasyonda %80, U şekilli konfigürasyonda %79.3 yıkama verimliliği hesaplanmıştır. S şekilli modelde %70 ile en düşük yıkama verimliliği hesaplanmıştır.



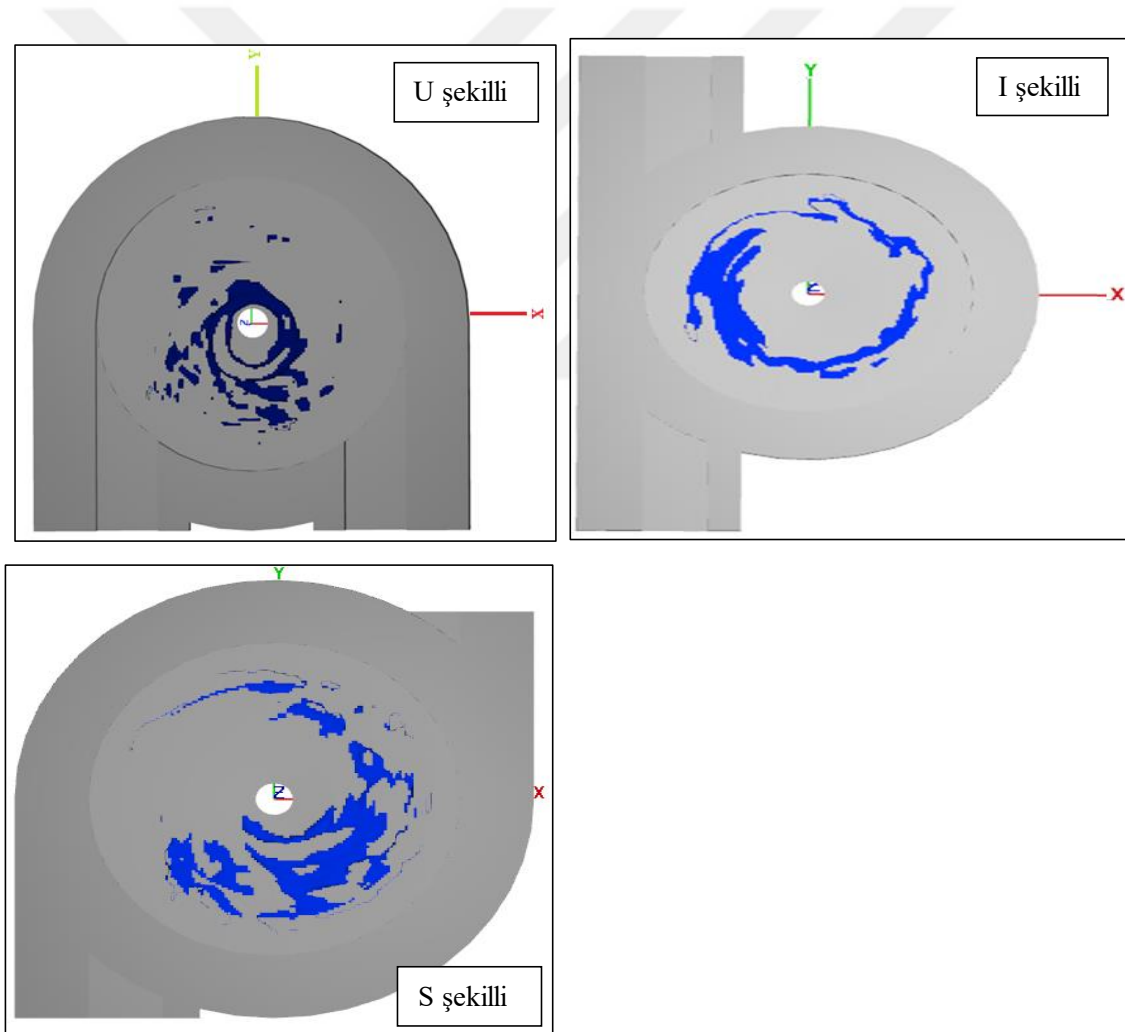
Şekil 5.62. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.63, U, S ve I şekilli geometrik konfigürasyonlara sahip vorteks çökeltim havuzlarında tabanda oluşan sediment birikim alanlarını göstermektedir. Her üç konfigürasyonda da birikimin genel olarak dairesel bir karakter sergilemesi, havuz içindeki dönel akımdan kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, birikim alanlarının konumu, açisal yayılımı ve merkezden uzaklığı, giriş-çıkış kanalı geometrisine bağlı olarak belirgin biçimde farklılaşmaktadır.

U şekilli konfigürasyonda, giriş ve çıkış kanalları arasındaki saat yönündeki açık dolaşım, sedimentin ağırlıklı olarak merkez çevresinde ve akımın yön değiştirmeye zorlandığı giriş-çıkış kanalı arasındaki 270°'lik açı doğrultusunda birikmesine yol açmaktadır.

S şekilli konfigürasyonda, akım havuz içerisinde ardışık yön değişimlerine maruz kalmakta ve vorteks eksenine asimetric bir biçimde belirli bir açisal bölgeye doğru kaymaktadır. Bu nedenle sediment tanecikleri, özellikle 180°–270° aralığında, yoğun birikim göstermektedir. Bu konfigürasyonda birikimin belirli bir bölgede toplanması, vorteks yapısının asimetric ve yönlendirilmiş bir karakter kazandığını göstermektedir. Buna karşılık I şekilli

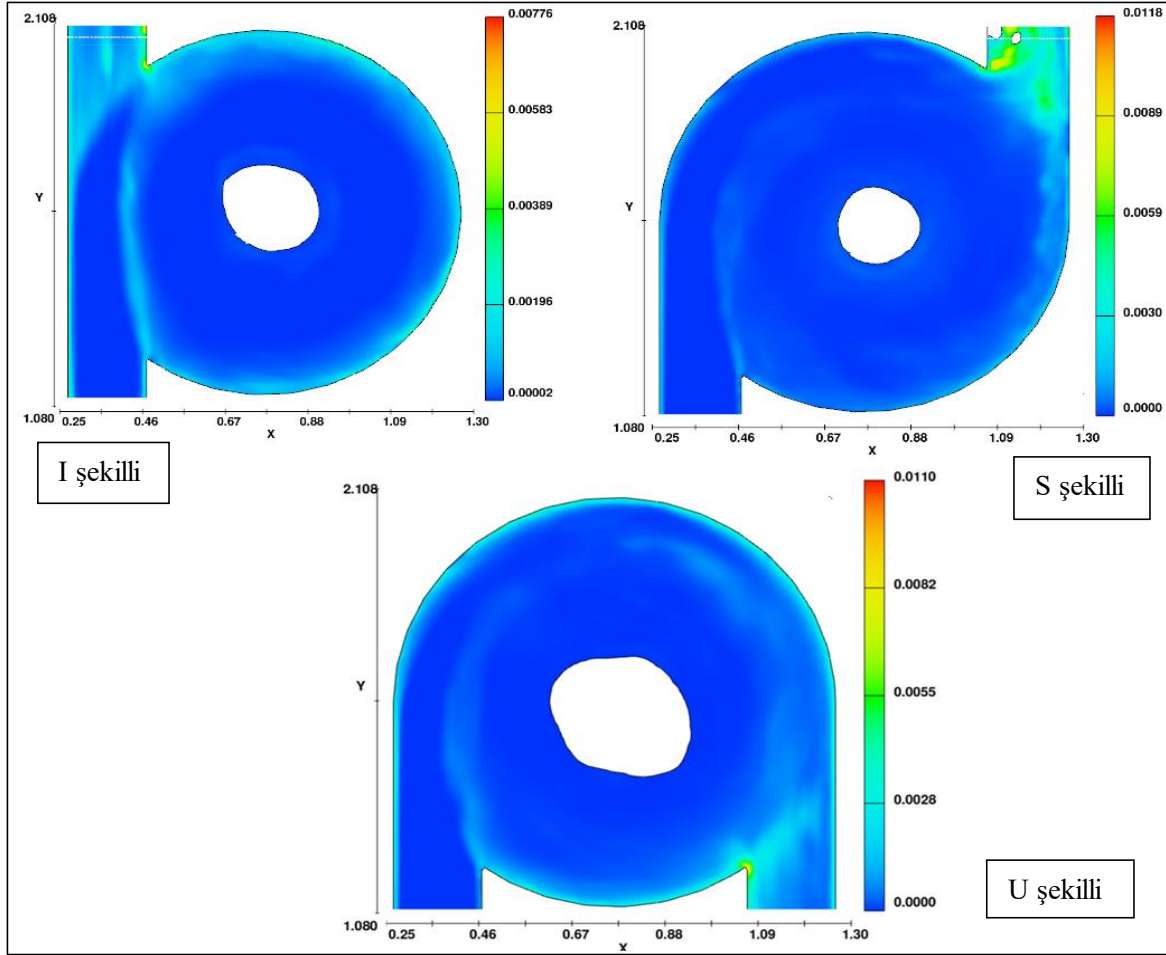
konfigürasyonda, giriş ve çıkış kanallarının doğrusal hizalanması akımın havuz içerisinde zayıf bir dolaşım yapmasına neden olmaktadır. Bu durumda sediment, merkezden daha uzakta ve daha geniş bir dairesel alan boyunca birikmektedir. Bu dağılım, akım enerjisinin havuz geneline dağılması ve çökelmenin daha geniş alana yayılmasından kaynaklanmaktadır. Geometrik konfigürasyon sediment birikiminin yalnızca miktarını değil, havuz içerisindeki dağılımını ve açısal yoğunlaşma bölgelerini de belirleyen temel bir parametredir. U şeklinli konfigürasyonda giriş-çıkış kanalı arasındaki bölgede birikim, S şeklinli konfigürasyonda belirli bir bölgede yoğunlaşmış asimetric birikim, I şeklinli konfigürasyon ise merkezden uzak ve halkasal birikim rejimi oluşturmaktadır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun altından, -0.03 m kotundan alınmıştır.



Şekil 5.63. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için havuzda biriken sediment dağılımı

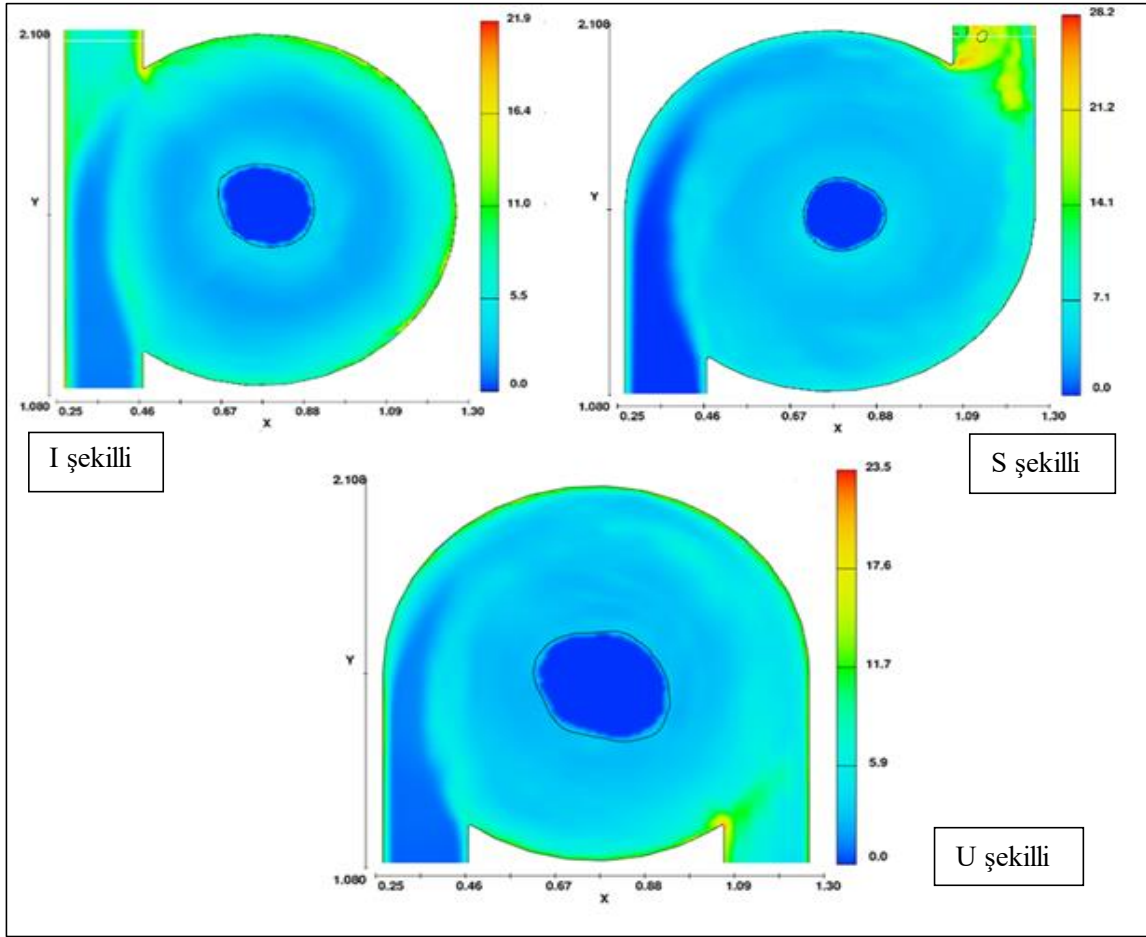
Şekil 5.64’te gözlenen türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımlarındaki farklılıklar, giriş-çıkış kanal geometrisinin havuz içindeki ortalama hız alanını, buna bağlı olarak türbülans

üretimini doğrudan kontrol etmesinden kaynaklanmaktadır. Türbülans kinetik enerjisi, Reynolds ayrıştırmasına dayalı olarak, yüksek hız gradyanları, akım ayrılması, yeniden birleşme bölgeleri ve duvar yakınındaki kayma tabakalarında üretilmektedir. Tüm durumlarda havuz içerisindeki TKE değeri düşük ve birbirine yakındır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



Şekil 5.64. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için türbülans kinetik enerjisi dağılımı

Şekil 5.65, sırasıyla I, S ve U şekilli geometrik konfigürasyonlara ait vorteks çökeltim havuzlarında türbülans şiddeti dağılımlarını göstermektedir. Türbülans şiddetinin havuz içerisindeki dağılımı, türbülans kinetik enerjisinde (TKE) gözlenen eğilimlerle büyük ölçüde paralellik göstermektedir, bu durum her iki büyüklüğün aynı hidrodinamik mekanizmalar tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



Şekil 5.65. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için türbülans şiddeti dağılımı

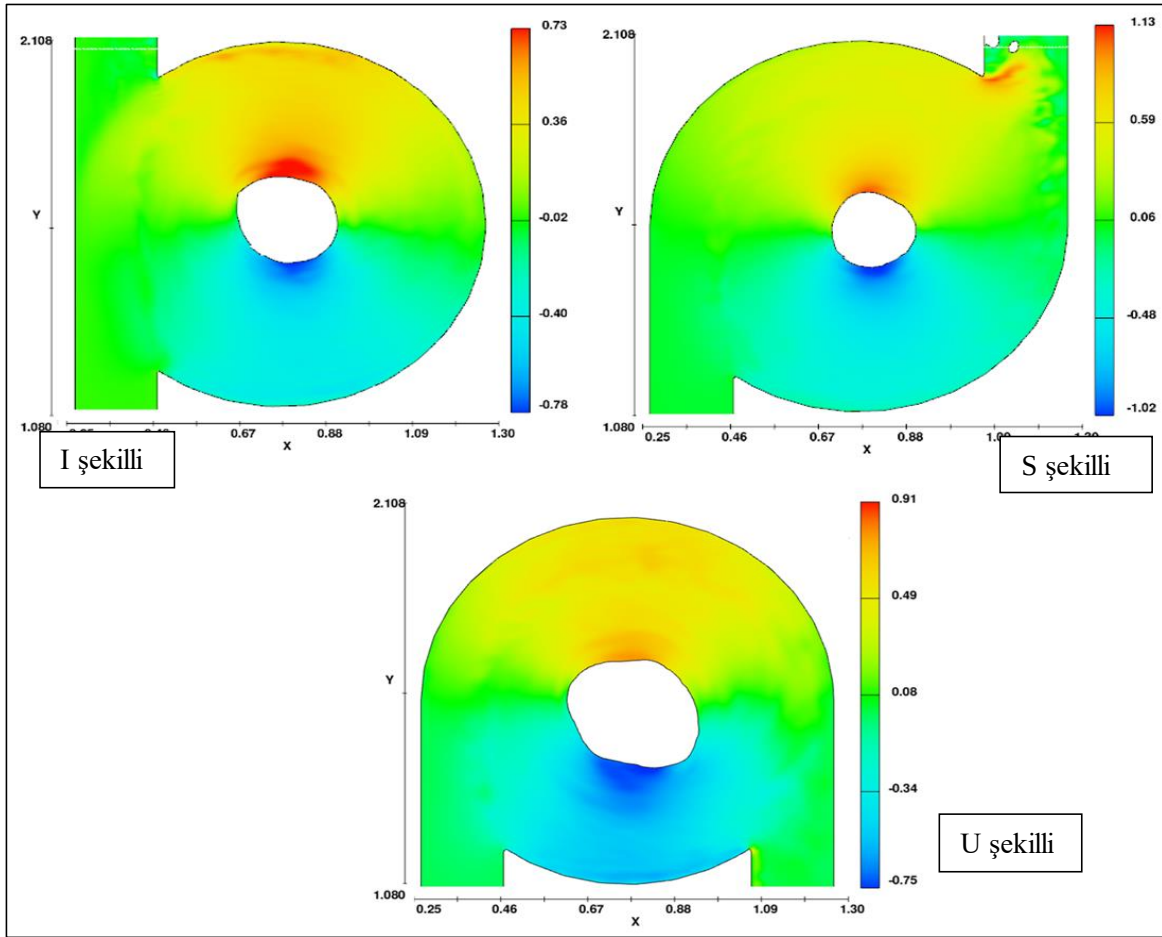
Şekil 5.66 ve Şekil 5.67 birlikte değerlendirildiğinde, vorteks çökeltim havuzlarında x ve y yönlü hız bileşenlerinin, havuz içindeki dönel akım yapısı ve giriş-çıkış kanal geometrisi tarafından doğrudan kontrol edildiği görülmektedir. Tüm geometrik konfigürasyonlarda dönel hareketin doğal bir sonucu olarak pozitif-negatif hız ayrışması meydana gelmekte ve bu hız yapısının şiddeti konfigürasyona bağlı olarak farklılaşmaktadır.

I şekilli konfigürasyonda, giriş ve çıkış kanallarının aynı eksen üzerinde yer alması nedeniyle dönel akım görece simetrik ve dengeli bir yapı sergilemektedir. Bu durumda hem x hem de y yönlü hız dağılımlarında, orifis çevresinde üst-alt bölgelerde zıt işaretli hız bileşenlerinin olduğu klasik vorteks yapısı gözlenmektedir. En yüksek hızlar, giriş akımının havuz içinde kırıldığı bölgede ve orifis çevresindeki çekirdek bölgesinde yoğunlaşmaktadır.

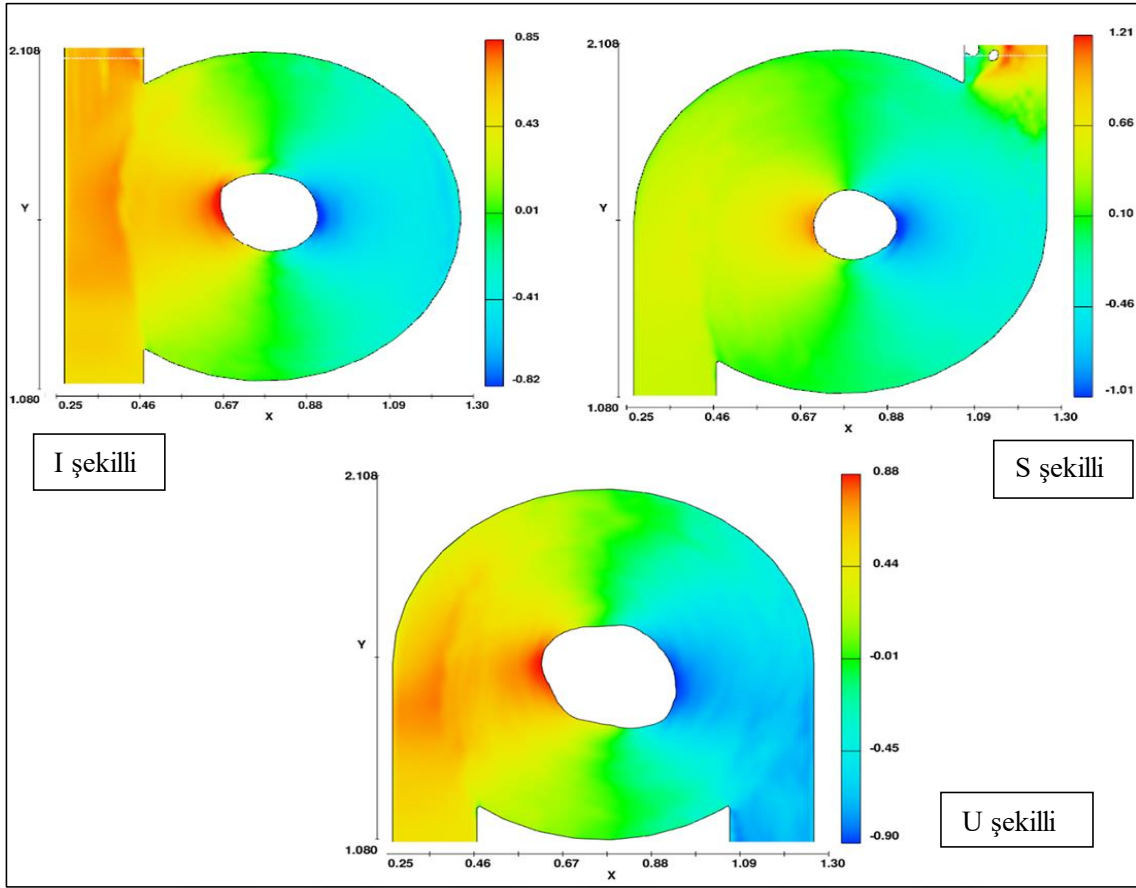
U şekilli konfigürasyonda, akım havuz içerisinde saat yönünü takip ederek çıkışa yöneldiğinden, bu doğrultudaki hız bileşenleri baskın hale gelmektedir. Bununla birlikte y

yönlü hız bileşenleri, giriş-çıkış kanallarının vorteksin teğetsel yönüne karşılık gelmesi nedeniyle merkezden duvara doğru kademeli olarak azalan bir dağılım sergilemektedir.

S şekilli konfigürasyonda ise akımın havuz içerisinde ardışık yön değişimlerine maruz kalması, hem x hem de y yönlü hız alanlarında teğetsel hız dağılımının sınırlandığı bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda vorteks çapı en küçük olmakla birlikte hız değerleri en büyüktür. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



Şekil 5.66. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için x yönündeki hız dağılımı



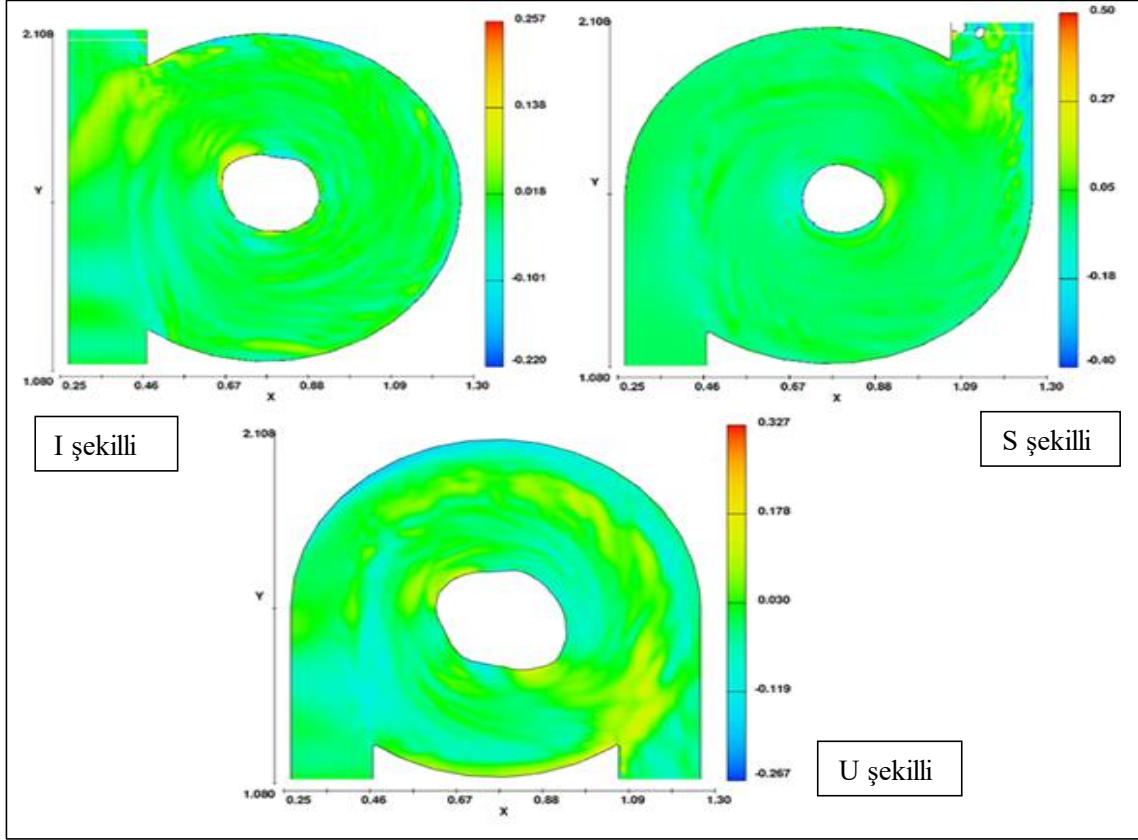
Şekil 5.67. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için y yönündeki hız dağılımı

Şekil 5.68 ile farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için z yönündeki hız dağılımı verilmektedir. Tüm modellerde en yüksek düşey hızların orifis çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, serbest su yüzeyi ile orifis arasında oluşan basınç farkının, akımı merkezde aşağı yönde ivmelendirmesi ve vorteks çekirdeği boyunca belirgin bir düşey emme kuvveti oluşturmasıyla açıklanmaktadır.

Havuzun dış bölgelerinde ve özellikle duvarlara yakın kesimlerde akımın ağırlıklı olarak yatayda dönel hareket sergilemesi nedeniyle düşey hız bileşeni zayıflamakta ve yer yer sıfıra yaklaşmaktadır.

I şekilli konfigürasyonda, giriş akımının havuza daha doğrudan yönelmesi sonucu havuzda vorteks gelişimi zayıf olduğundan düşey hızlar en düşük seviyelerde kalmaktadır. U şekilli konfigürasyonda, akımın havuz içerisinde kurb yapmasıyla birlikte düşey hız alanı kısmen güçlenmekte ve düşeyde yerel hız artışları gözlenmektedir. Bununla birlikte akımın hızlanma evresinde havuzu terk etmesi nedeniyle düşey yönlü hızlar sınırlı seviyelerde kalmaktadır. S şekilli konfigürasyonda ise akımın havuz içerisinde iki kez yön değiştirmeye

zorlanması, vorteks genişliğini sınırlamakta ancak düşey hız büyüklüğünü artırmaktadır. Bu durum aşağı yönlü düşey hız çekirdeğinin daha dar bir alana yayılmasına ve daha yüksek şiddetlere ulaşmasına neden olmaktadır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.

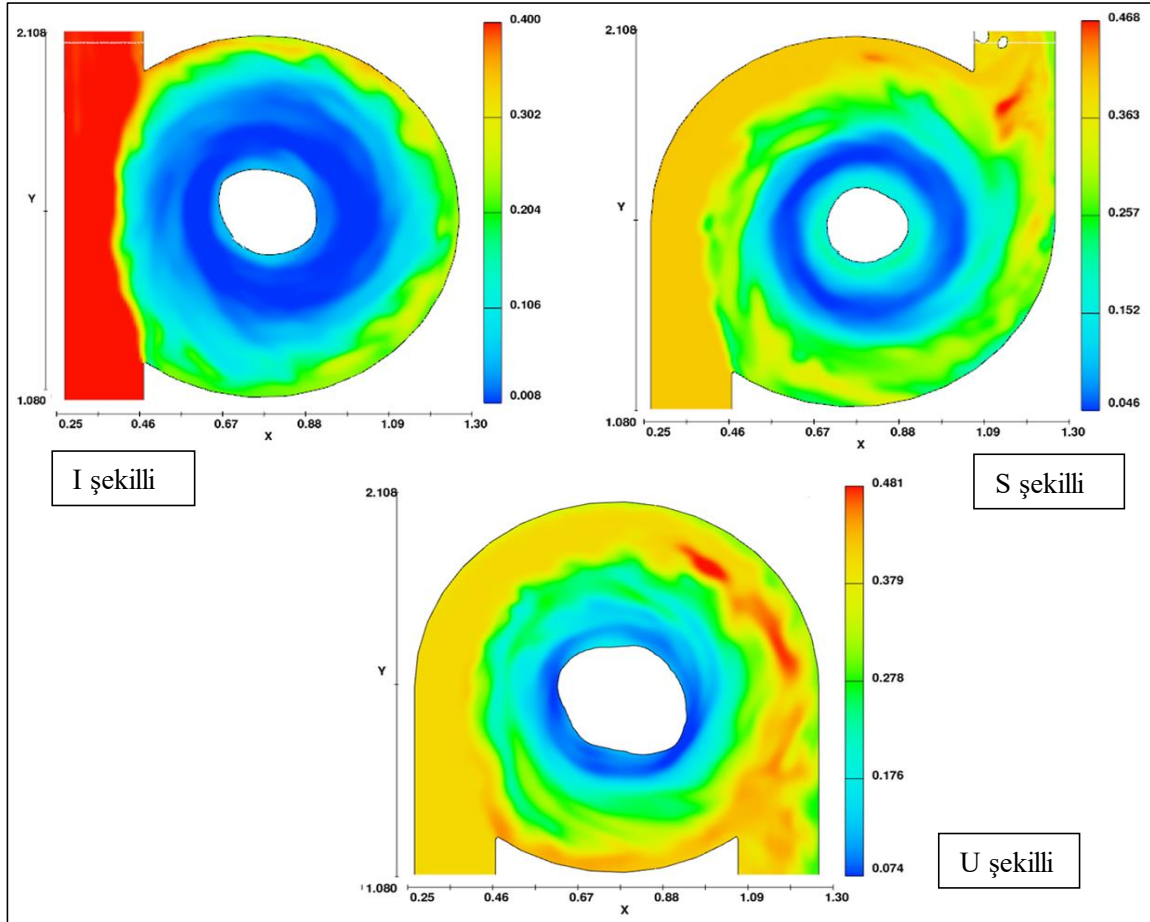


Şekil 5.68. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için z yönündeki hız dağılımı

Şekil 5.69, I, U ve S şekilli geometrik konfigürasyonlara sahip vorteks çökeltim havuzlarında sediment konsantrasyonunun plan görünümdeki dağılımını göstermektedir. Dairesel havuz içerisinde oluşan dönel akım yapısı, merkezde yer alan orifis, giriş akımının havuza giriş açısı ve giriş-çıkış geometrisinin yönlendirici etkisi tarafından birlikte kontrol edilmektedir. Tüm konfigürasyonlarda en düşük konsantrasyon değerleri genellikle vorteks çekirdeğinde gözlenirken bu durumun plan görünümünden kaynaklandığı unutulmamalıdır. En yüksek konsantrasyonlar giriş kanalına yakın bölgelerde ve havuz duvarı boyunca halka biçiminde yoğunlaşmaktadır.

Bu dağılımın temel nedeni, dönel akım altında sediment taneciklerinin merkezkaç kuvvetinin etkisiyle serbest vorteks bölgesinde merkezden dışa doğru taşınması, buna karşılık vorteks çekirdeği çevresinde yüksek düşey hızlar ve emme etkisi nedeniyle

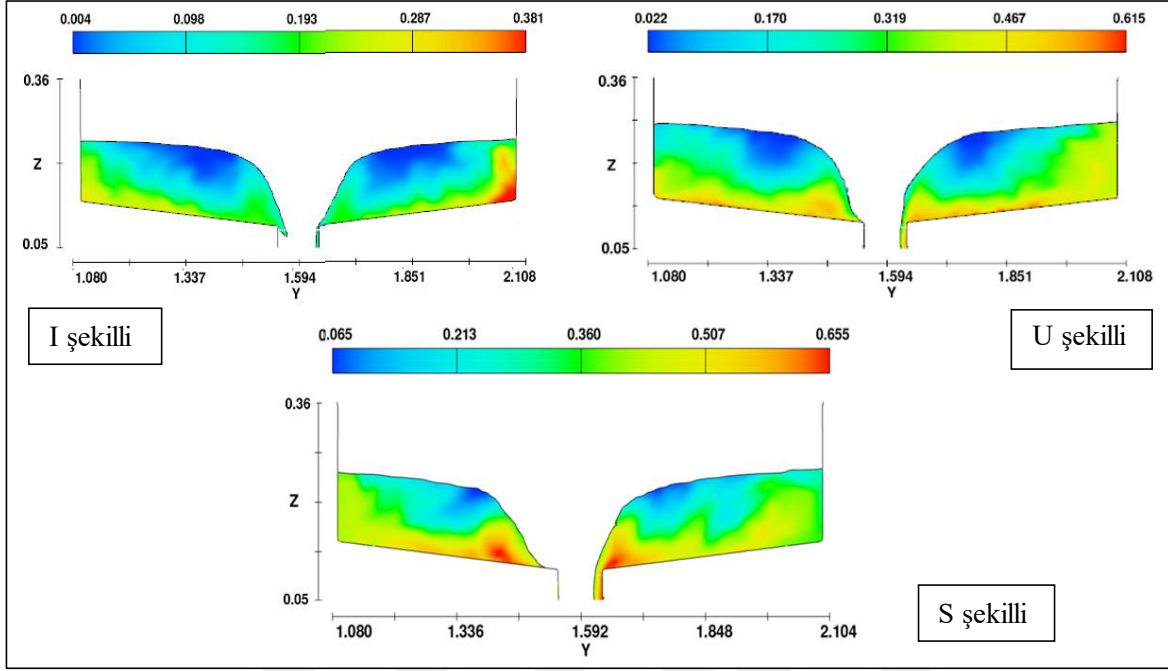
taneciklerin hızla aşağı yönde uzaklaştırılmasıdır. Böylece çekirdek bölgesi düşük konsantrasyonlu kalırken, dış duvar boyunca sediment birikimine elverişli bir halka yapı oluşmaktadır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan alınmıştır.



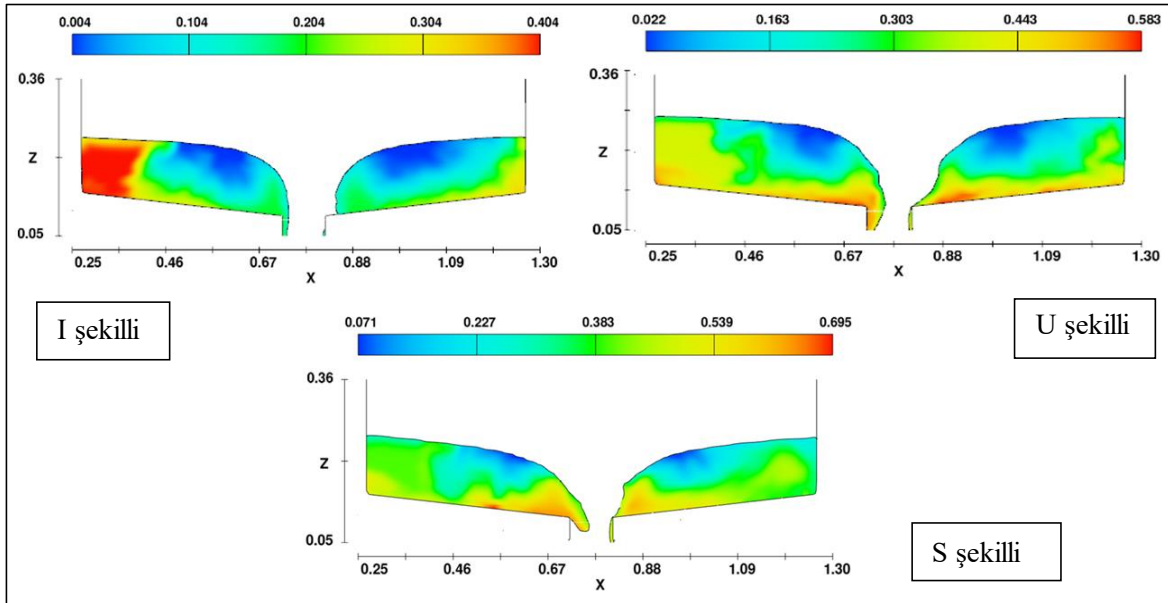
Şekil 5.69. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için konsantrasyon dağılımı

Şekil 5.70 farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için Y-Z kesitinde konsantrasyon dağılımını ve Şekil 5.71 X-Z kesitinde konsantrasyon dağılımını göstermektedir. Her iki kesit birlikte değerlendirildiğinde, vorteks çökeltim havuzlarında sediment konsantrasyonunun düşey ve yatay dağılımının, Rankine tipi vorteks yapısı ile orifis çevresinde gelişen düşey emme etkisinin ortak sonucu olarak şekillendiği görülmektedir. Tüm geometrik konfigürasyonlarda konsantrasyonlar tabana yakın bölgelerde orifis dış yarıçapı boyunca yüksek, buna karşılık serbest su yüzeyine yaklaşıldıkça orifis çevresinde belirgin biçimde daha düşük değerler almaktadır. Bu davranış, dönel akım altında sediment taneciklerinin merkezkaç etkisiyle merkezden dışa doğru taşınması, taban ve duvar yakınlarında hızların azalmasıyla çökeltmenin hızlanması, buna karşılık orifis çevresinde

artan aşağı yönlü düşey hızlar nedeniyle askıdaki sedimentin hızla çekilerek ortamdan uzaklaştırılması ile açıklanmaktadır.



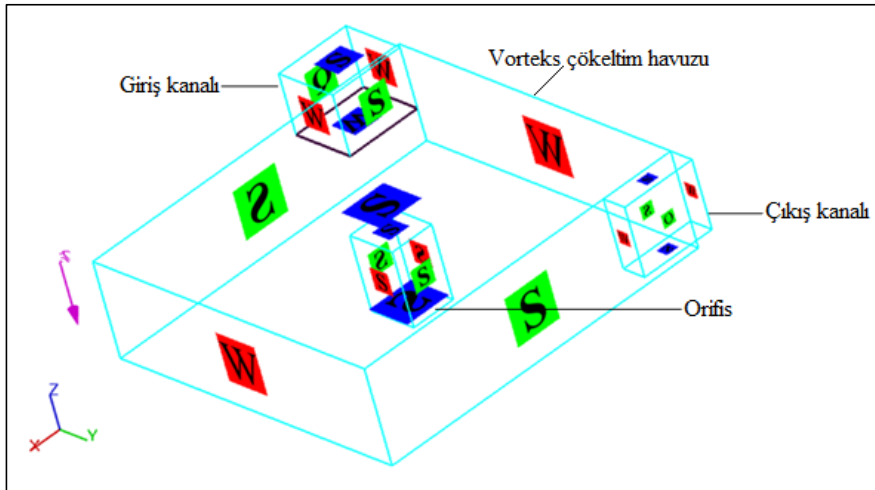
Şekil 5.70. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için Y-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı



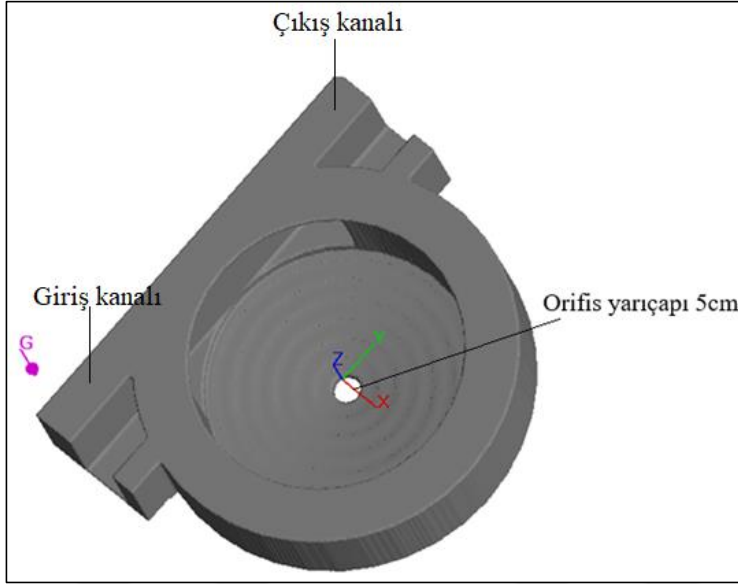
Şekil 5.71. Farklı geometrik konfigürasyonlara ait modeller için X-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı

5.4. Sediment Çapının Etkisi

Bu bölümde, 0,055 mm 0,1 mm ve 0,2 mm çaplarında sediment tanelerinin çökeltme davranışı değerlendirilmiştir. Her bir sediment çapı için hidrolik davranış, akım yapısı, sediment taşınımı ve birikim karakteristikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kısımda kullanılan model düzeneği; havuz geometrisi ve hidrolik özellikleri bakımından Athar (2000) tarafından tanımlanan Tip-I deney sisteminin birebir aynısıdır. Kalibrasyon modelinde giriş ve çıkış kanalları doğrusal biçimde aynı eksende yer almakta ve birbirinin devamı niteliğindedir. Vorteks havuzunun çapı 1,0 m, yüksekliği 0,45 m olup tabanı 1:10 eğimli konik bir yapıya sahiptir. Merkezdeki taban orifisi sabit 5 cm yarıçap değerine sahiptir. Giriş kanalı 6,5 m uzunluğunda, 0,20 m genişliğinde ve 0,25 m yüksekliğinde olup akım havuza teğetsel olarak bağlanmaktadır. Çıkış kanalı ise 2,5 m uzunluk ve 0,20 m genişliğe sahiptir. Giriş ve çıkış eşikleri arasındaki yükseklik farkı 2 cm'dir. Sayısal modelde giriş kanalı, vorteks havuzu, orifis bölgesi ve çıkış taşma kanalı olacak şekilde dört ayrı ağ bloğu tanımlanmıştır. Giriş debisi tüm modellerde 10 l/s, sediment konsantrasyonu tüm farklı sediment çapları için 400 ppm olacak şekilde ayarlanmıştır. Giriş su yüksekliği 0,118 m olarak ayarlanmıştır. Karşılaştırma modellerinde çıkış kanalı ve orifis bölgesi dalga çıkış (wave outflow) koşulu ile tanımlanmıştır. Böylece sediment tane çapının vorteks çekirdek yapısı, akım ve sediment taşınım süreçleri üzerindeki etkisi doğrudan gözlemlenebilmiştir. Şekil 5.72 farklı sediment çapı denemeleri için kullanılan kalibrasyon modelinin sınır şartlarını ve Şekil 5.73 kullanılan kalibrasyon modelinin görünümünü vermektedir.



Şekil 5.72. Farklı sediment çapı denemeleri için kullanılan kalibrasyon modelinin sınır şartları

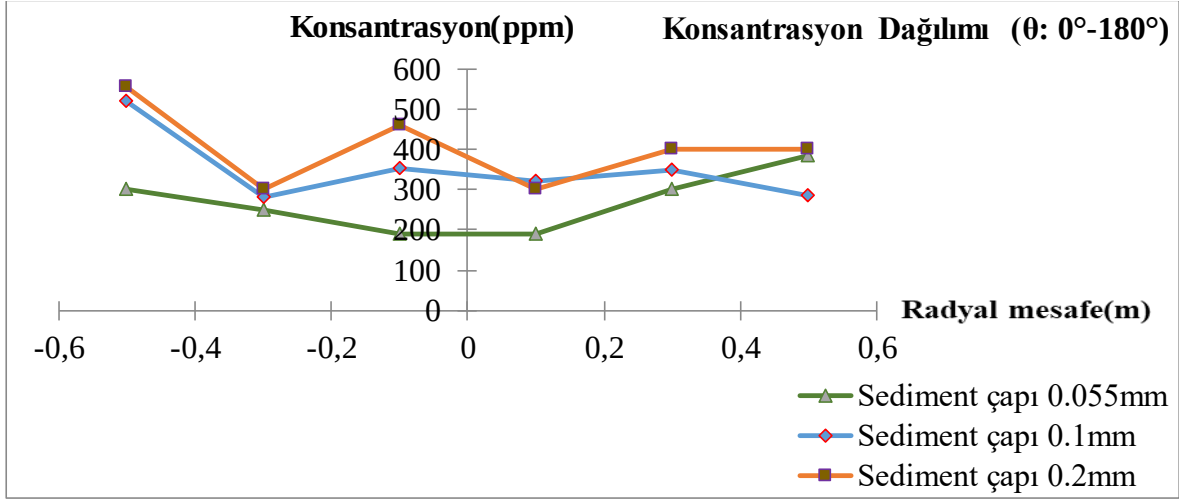


Şekil 5.73. Farklı sediment çapı deneyleri için kullanılan kalibrasyon modelinin görünümü

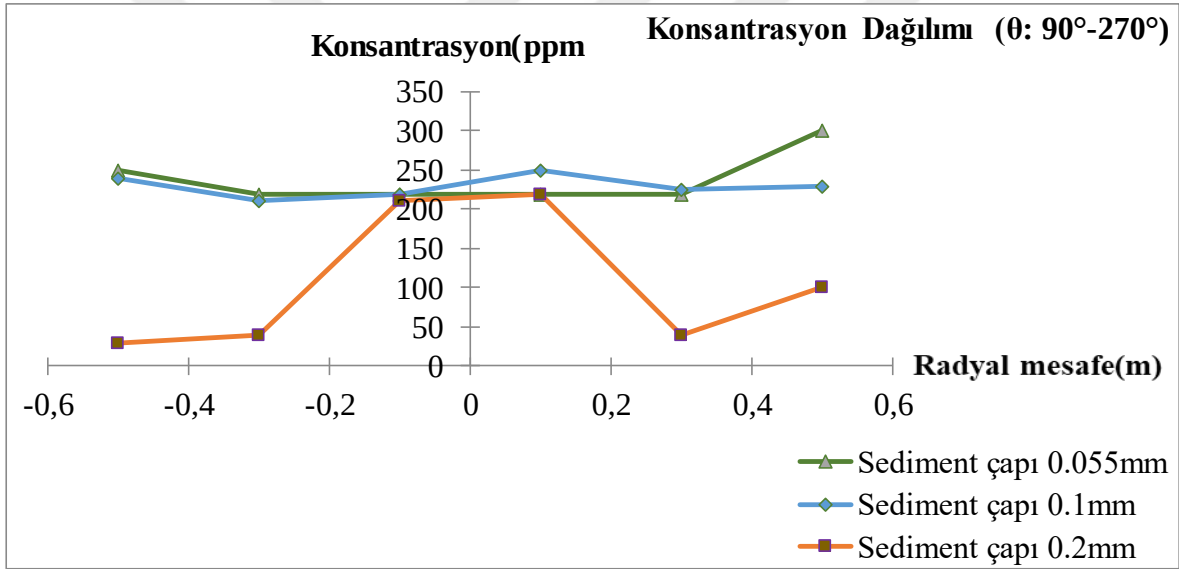
Şekil 5.74 farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda ve Şekil 5.75 farklı sediment çaplarına ait 90° - 270° doğrultusunda düşey 0.06 m yüksekliğinde konsantrasyon dağılımını göstermektedir.

İri taneli sedimentler, daha büyük kütleye ve daha yüksek çökme hızına sahiptir. Bu tanecikler, vorteks çökeltim havuzunda oluşan mevcut sınır şartlarından dolayı oluşan türbülanslı akım içerisinde yukarı yönlü askıda tutulmak için yeterli enerjiye sahip değildir. Bu nedenle Şekil 5.75’de gösterildiği gibi iri taneli sediment havuzun orta derinliklerinde ancak vorteks bölgesinde askıya geçebilirken merkezden uzak bölgelerdeki konsantrasyonu azıdır. Havuzun tabana yakın bölgelerinde ise iri taneli sediment çökme davranışından ötürü en yüksek konsantrasyonlara sahiptir (Şekil 5.74).

Buna karşılık ince taneli sedimentler düşük çökme hızları ve küçük ataletleri nedeniyle türbülanslı akımın yukarı yönlü hız dalgalanmalarına daha kolay uyum sağlayabilmektedir. Bu tanecikler, özellikle vorteks çekirdeği çevresinde oluşan türbülanslı yapı içinde daha uzun süre askıda kalabilmekte, böylece düşey yönde daha kararlı bir konsantrasyon dağılımı sergilemektedir.



Şekil 5.74. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı



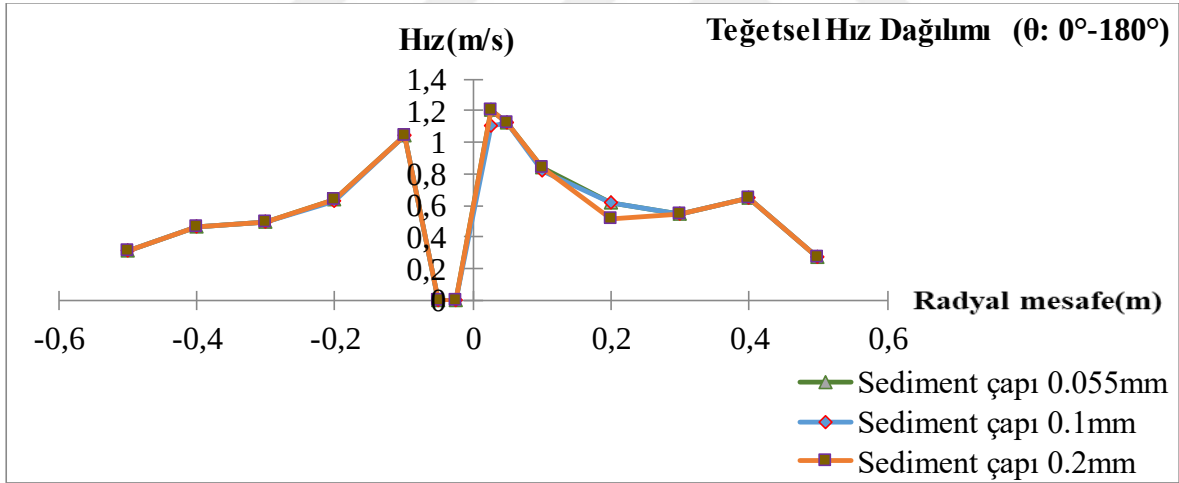
Şekil 5.75. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,06 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen konsantrasyon dağılımı

Şekil 5.76 farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımını ve Şekil 5.77 farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımını göstermektedir. Şekil 5.78 farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımını ve Şekil 5.79 farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımını göstermektedir. Şekil 5.80 farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımını ve Şekil 5.81 farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre

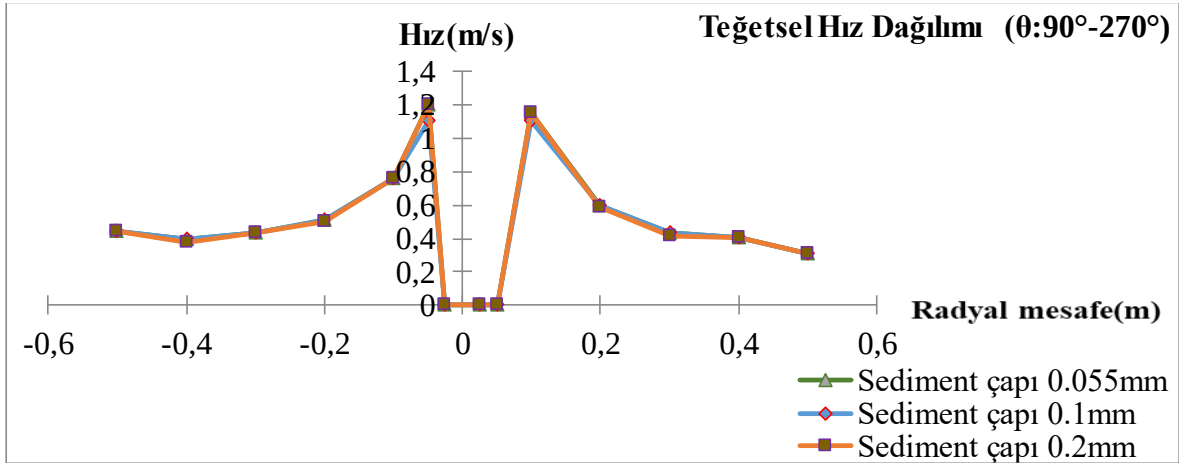
yükseklikte ve 90° - 270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımını göstermektedir.

Farklı sediment çapları için elde edilen teğetsel, radyal ve düşey hız profillerinin büyük ölçüde örtüşmesi, vorteks çökeltim havuzlarında akım alanının esas olarak giriş koşulları, taşınan akım momentumu ve geometrik konfigürasyon tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır. İncelenen sediment konsantrasyonları, akım alanını ve hız dağılımlarını değiştirecek düzeyde olmadığından, sediment çapı akım içerisinde hidrodinamik açıdan pasif bir bileşen olarak davranmaktadır.

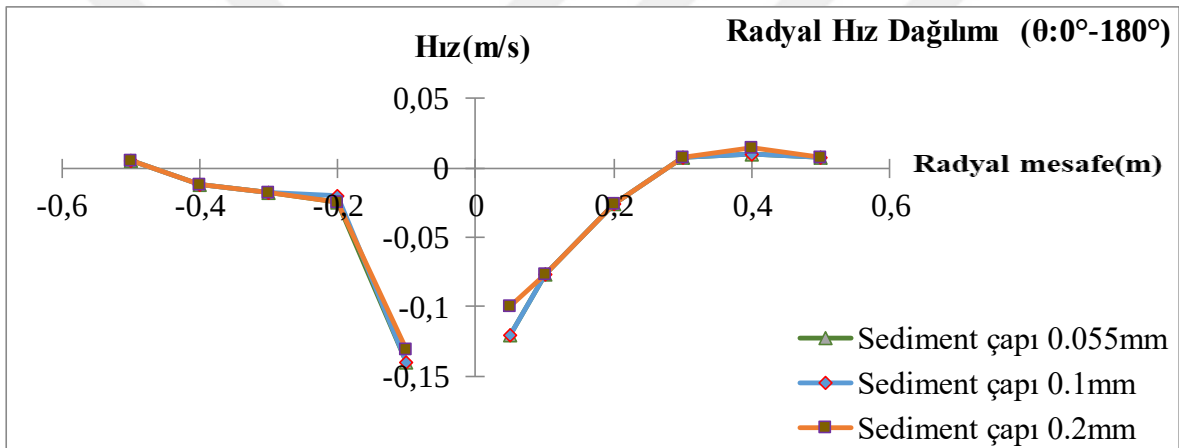
Bu koşullar altında sediment, akım tarafından taşınmakta ancak akımın momentum dengesi üzerinde belirgin bir etki oluşturmamaktadır. Dolayısıyla hız alanı ile sediment taşınımı arasındaki etkileşimde, akım alanı sediment davranışını kontrol ederken, sedimentin akım alanı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Bu durum neticesinde hızlar teğetsel, radyal ve düşey bileşenlerde benzer davranışlar göstermiştir.



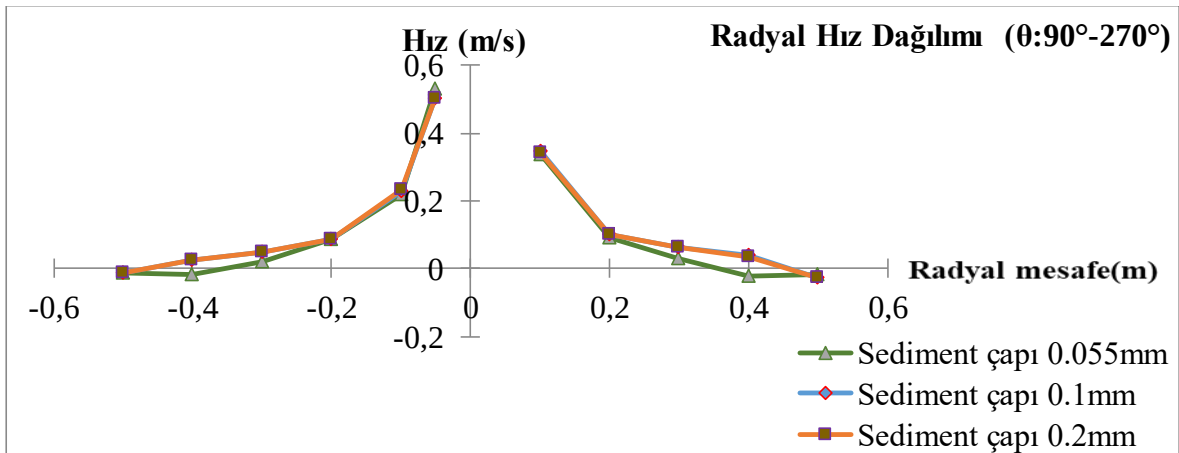
Şekil 5.76. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0° - 180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı



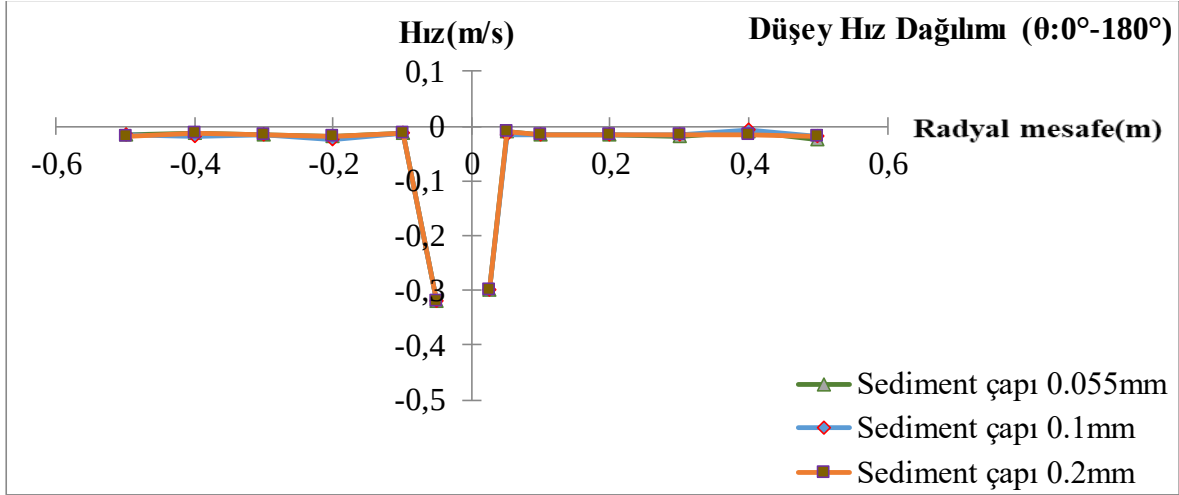
Şekil 5.77. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen teğetsel hız dağılımı



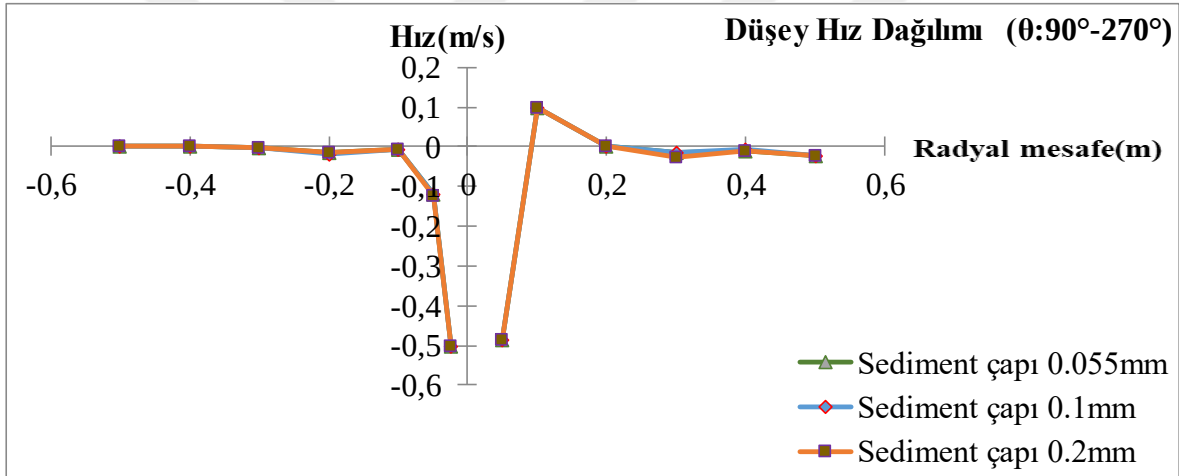
Şekil 5.78. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı



Şekil 5.79. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,04 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen radyal hız dağılımı

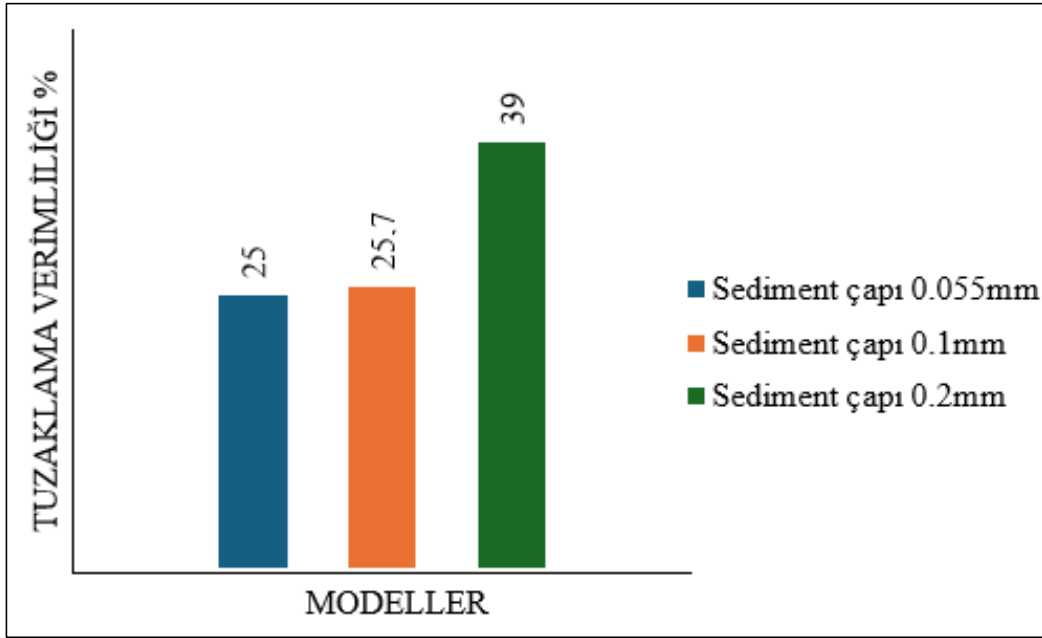


Şekil 5.80. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,08 metre yükseklikte ve 0°-180° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı



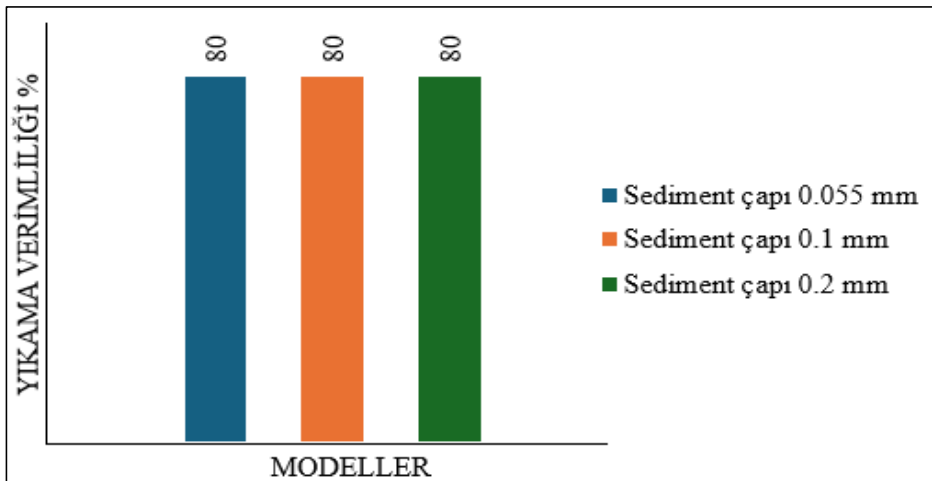
Şekil 5.81. Farklı sediment çaplarına ait havuz tabanından 0,01 metre yükseklikte ve 90°-270° doğrultusunda elde edilen düşey hız dağılımı

Şekil 5.82, farklı sediment çapları için hesaplanan tuzaklama verimliliği değerleri görülmektedir. Tane boyutunun büyümesiyle verimliliğin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. En küçük tane boyutu 0,055 mm için tuzaklama verimliliği %25, 0,1 mm için %25,7 ve en büyük tane boyutu için %39 olmuştur. Bu durum, tuzaklama performansının sediment tane çapına duyarlı olduğunu ve özellikle büyük tane boyutlarının daha etkili şekilde tuzaklanabildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.82. Farklı sediment çaplarına ait modellerin tuzaklama verimliliklerinin karşılaştırılması

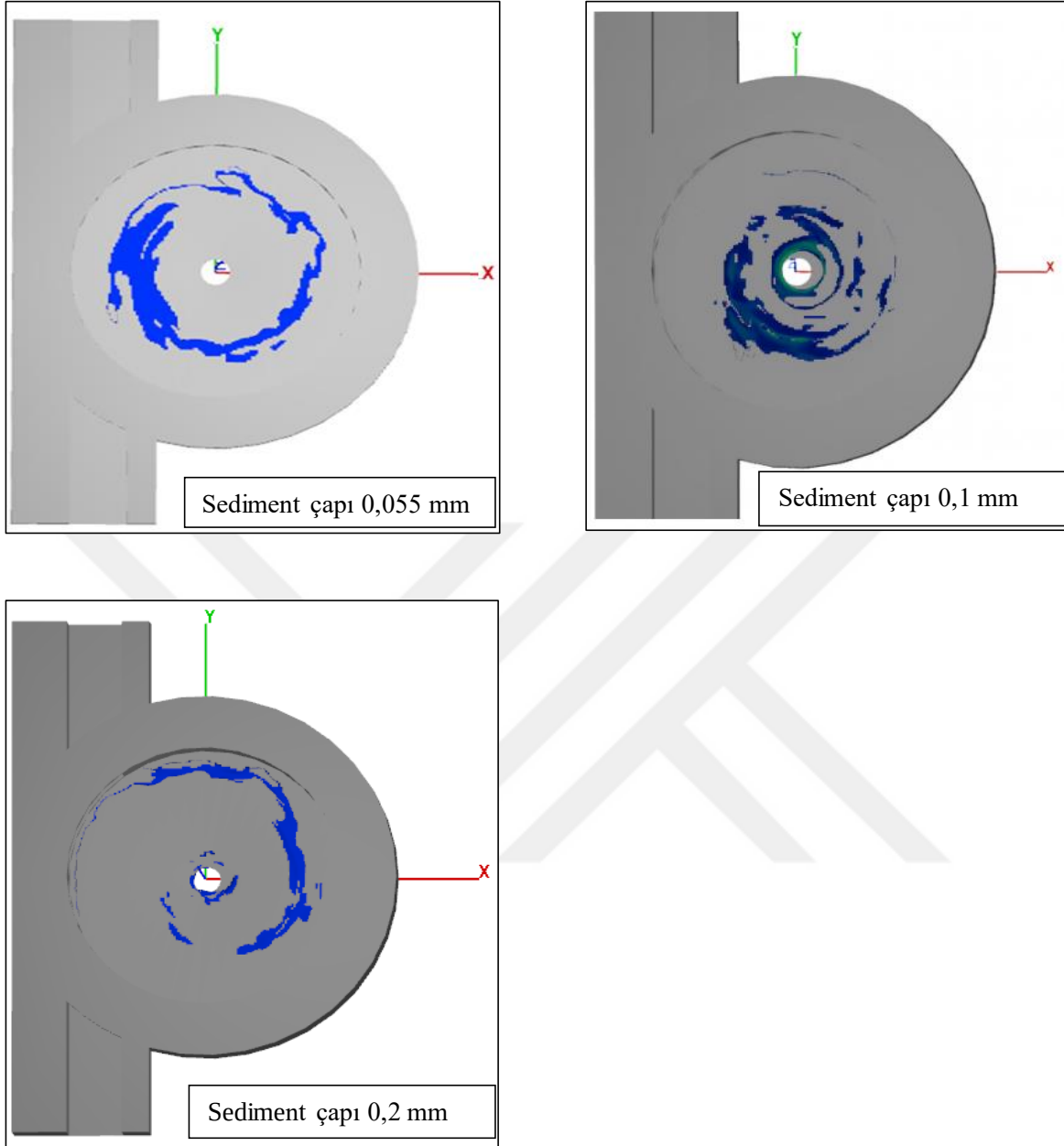
Şekil 5.83, farklı sediment çapları için hesaplanan yıkama verimliliği değerlerini göstermektedir. Tane boyutu değiştiğinde yıkama performansının değişmediği, tüm modellerde %80 seviyesinde kaldığı görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, yıkama verimliliğinin orifisten geçen su debisine bağlı olmasıdır. Sistemden dışarı atılan su miktarı, sedimentin tane boyutundan bağımsız olduğu için yıkama verimi sediment çapı değişiminden etkilenmemiştir. Diğer bir ifadeyle, 0,055 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm gibi farklı büyüklükteki sedimentler farklı çökelme davranışlarına sahip olsalar dahi yıkama verimliliği sabit kalmıştır.



Şekil 5.83. Farklı sediment çaplarına ait modellerin yıkama verimliliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.84, 0,055 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm sediment çapları için çökeltim havuzunda tabanda biriken sediment dağılımlarını göstermektedir. Sediment çapına bağlı olarak birikim deseninin merkezden dış yarıçaplara doğru belirgin biçimde değiştiği görülmektedir. Bu farklılık, taneciklerin ataleti, merkezkaç etkisine tepkisi ile doğrudan ilişkilidir. Sediment tane çapının artmasıyla birlikte taneciklerin kütle ve ataletinin büyümesi, aynı zamanda çökme hızının artması nedeniyle taneciklerin vorteks akımına uyum kabiliyeti azalmaktadır. Bu durum, iri tanelerin dönel akım içerisinde sınırlı sayıda tur atarak kısa sürede düşey emme etkisine maruz kalmasına ve orifis çevresinde yoğunlaşmasına neden olmaktadır. 0,055 mm çaplı ince taneli sedimentlerde, taneciklerin düşük kütle ve ataletleri nedeniyle dönel akıma kolayca uyum sağladığı görülmektedir. Bu tanecikler, vorteks içinde daha uzun süre askıda kalabilmekte ve merkezkaç etkisi altında çok sayıda tur atarak dış yarıçaplara doğru taşınmaktadır. Havuz tabanında daha geniş ve dairesel bir birikim deseni oluşturmaktadır. Bu davranış, ince tanelerin akım tarafından yönlendirilmesinin daha mümkün olduğunu göstermektedir. 0,1 mm çaplı sedimentlerde, tanecik ataletinin artmasıyla birlikte dönel akıma uyum kabiliyeti kısmen azalmaktadır. Bu durumda sediment tanecikleri hem vorteks çekirdeğine yönelmekte hem de merkezkaç etkisiyle dışa taşınmaktadır.

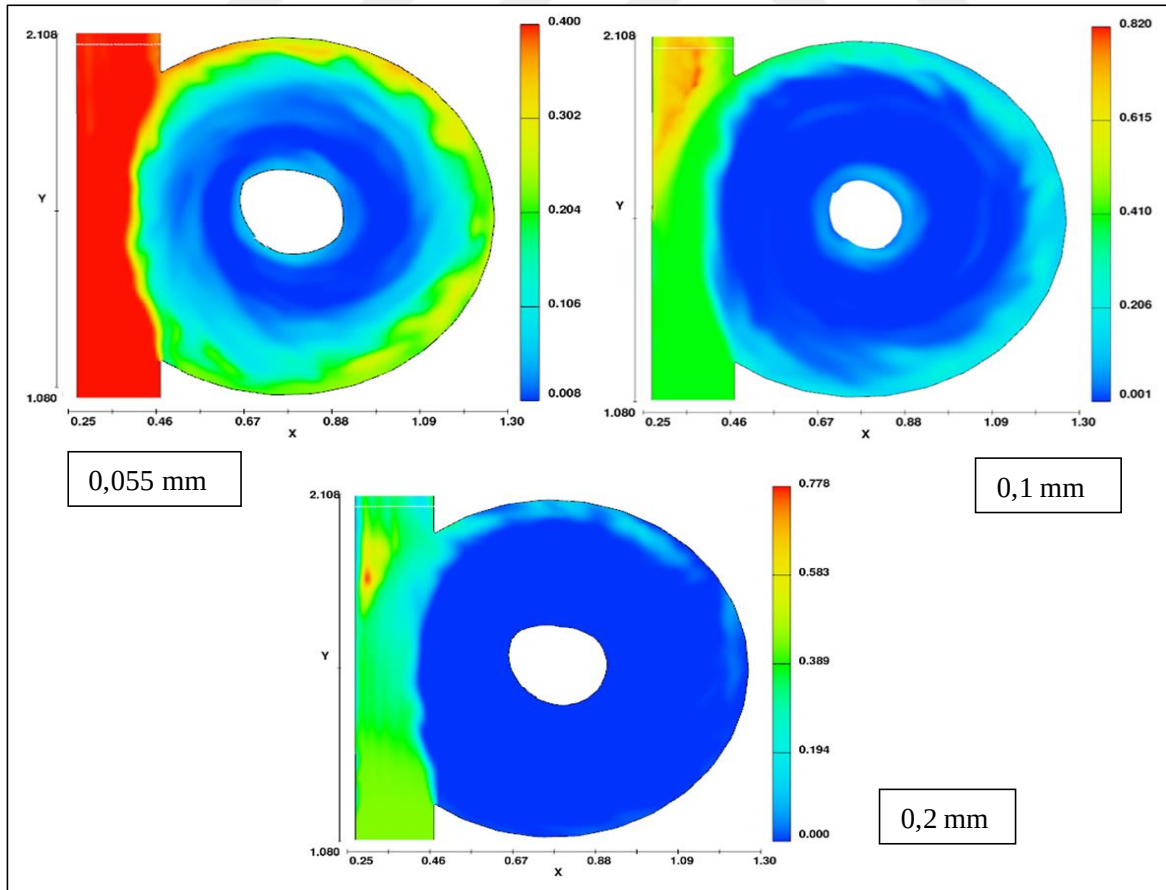
Birikim hem merkez çevresinde hem de orta radyal bölgelerde gerçekleşmektedir. 0,2 mm çaplı iri taneli sedimentlerde ise taneciklerin yüksek ataletleri ve yüksek çökme hızları nedeniyle vorteks akımıyla birlikte çok sayıda dönel hareket yapmadan, daha kısa sürede aşağı yönlü düşey emme etkisine maruz kaldıkları görülmektedir. Bu tanecikler, merkezkaç kuvvetine uzun süre maruz kalacak kadar askıda kalamadığından, doğrudan vorteks çekirdeğine yakalanmakta ve helisel izler oluşturmaktadır. Kesitler 0,01 m kayıt probunun altından, -0,03 m kotundan alınmıştır.



Şekil 5.84. Farklı sediment çaplarına ait modeller için havuzda biriken sediment dağılımı

Şekil 5.85 ile farklı sediment çaplarına ait modeller için konsantrasyon dağılımının plan görünümü verilmektedir. 0,055 mm sediment çapı için konsantrasyon dağılımında en yüksek değerler, giriş kanalının havuza bağlandığı bölgede ve dış duvar boyunca halka biçiminde yoğunlaşmaktadır. Buna karşılık vorteks çekirdeği ve özellikle orifis çevresinde konsantrasyon belirgin biçimde düşüktür. Bu durum, ince taneli sedimentin düşük atalet ve düşük çökme hızı nedeniyle akım ile kolayca askıya kalkabilmesi, dönel akım içerisinde taşınabilmesi ve merkezdeki güçlü düşey emme etkisiyle hızla orifise yönlendirilmesiyle açıklanmaktadır.

0,1 mm sediment çapı için konsantrasyon seviyeleri 0,055 mm'ye kıyasla artmakta; özellikle havuzun dış duvarı boyunca daha kalın ve daha belirgin bir yüksek konsantrasyon halkası oluşmaktadır. Girişten gelen sediment, dönel akımın merkezkaç etkisi altında hızla dış yarıçaplara taşınmakta ve duvarlara yakın bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Orifis çevresinde ise artan düşey hızlar nedeniyle askıdaki sedimentin sistemden uzaklaştırılması devam etmekte ve bu bölgede düşük konsantrasyon değerleri korunmaktadır. 0,2 mm sediment çapı için plan görünümde en yüksek konsantrasyonlar, girişe yakın bölgelerde ve dış duvar boyunca daha dar fakat daha yoğun bölgede toplanmaktadır. İri tanelerin yüksek ataletleri ve çökme hızları nedeniyle dönel akım içerisinde uzun süre askıda kalamaması, bu taneciklerin giriş sonrası kısa sürede tabana yönelmesine ve dış duvar yakınında yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Plan görünümde yüksek konsantrasyon alanları daha sınırlı bir bölgede fakat daha yüksek genlikte ortaya çıkmaktadır. Ancak iri taneli sedimentin düşey yöndeki davranışı ve orifis çevresindeki taşınım mekanizması kesit görünümleri üzerinden ayrıntılı olarak değerlendirilecektir. Kesitler 0,01 m kayıt probunun üstünden, 0,07 m kotundan yani havuzun orta bölgelerinden alındığı unutulmamalıdır.



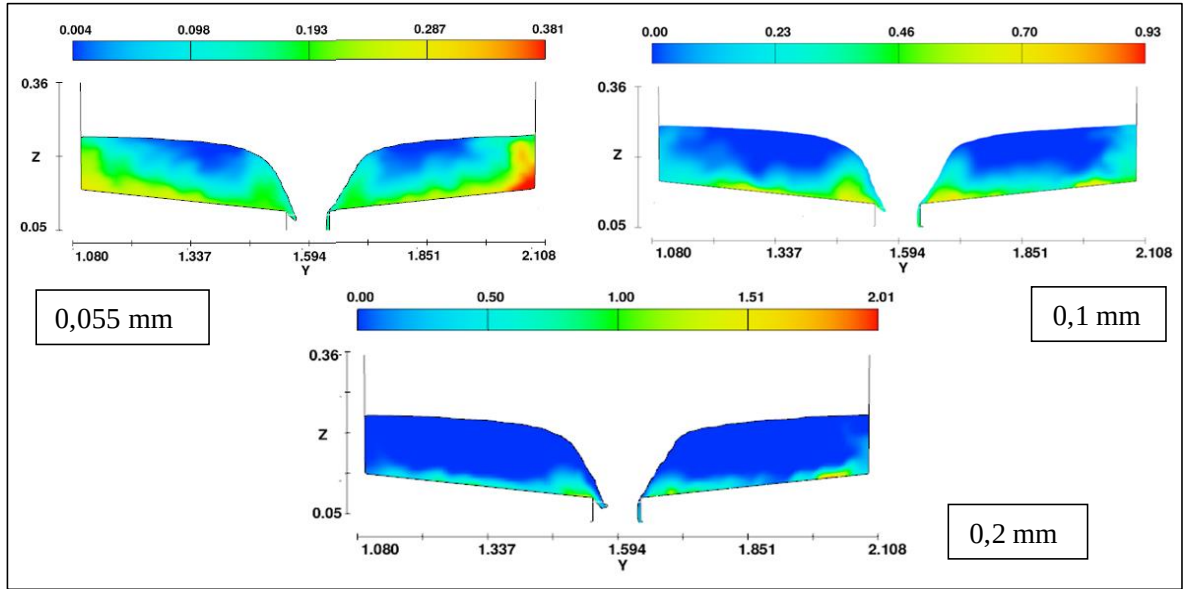
Şekil 5.85. Farklı sediment çaplarına ait modeller için konsantrasyon dağılımı

Şekil 5.86, Y–Z kesiti ve Şekil 5.87, X–Z kesiti birlikte değerlendirildiğinde, vorteks çökeltim havuzunda sediment konsantrasyonunun düşey ve yatay dağılımının sediment tane çapına bağlı çökme–askıda kalma dengesi ile dönel akımın oluşturduğu ikincil akımların ortak etkisi altında şekillendiği görülmektedir. Tüm sediment çaplarında konsantrasyonlar ağırlıklı olarak tabana yakın bölgelerde yoğunlaşmaktadır.

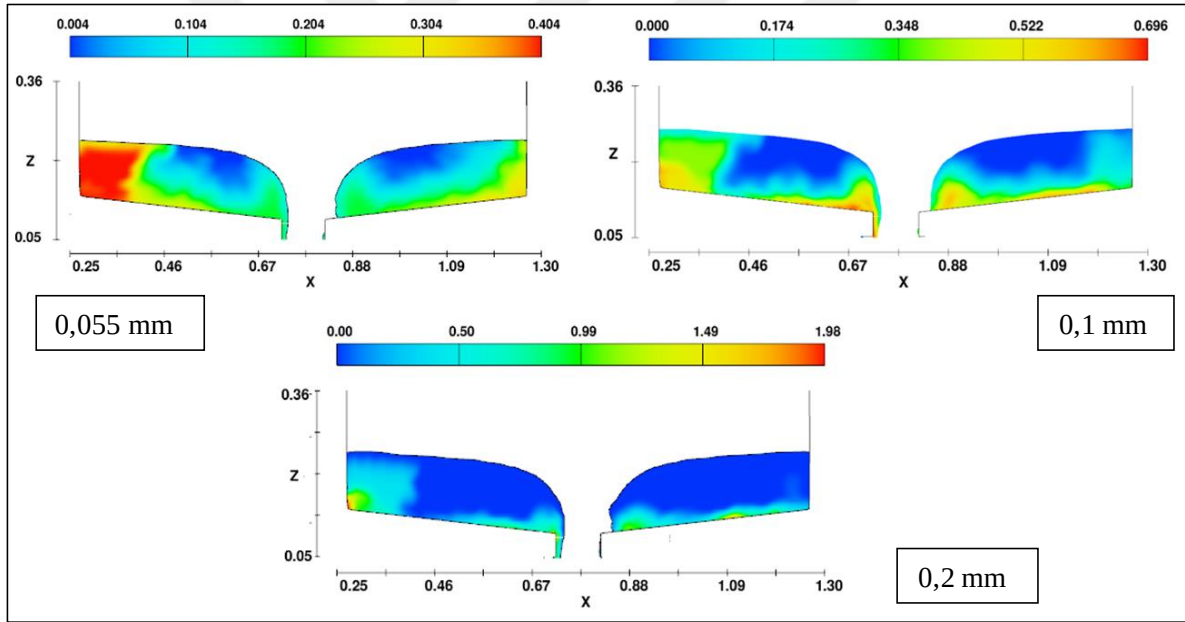
0,055 mm sediment çapı için her iki kesitte de konsantrasyon seviyeleri genel olarak düşüktür. İnce taneler, düşük atalet ve düşük çökme hızları nedeniyle türbülanslı akım içerisinde uzun süre askıda kalabilmekte ve dönel akım tarafından taşınmaktadır. Bu nedenle merkezkaç etkisiyle dış yarıçaplara sürüklenseler dahi, taban boyunca kalın ve sürekli bir çökme tabakası oluşturmaktadır. Y–Z kesitinde özellikle giriş tarafına yakın dış bölgelerde sınırlı bir yoğunlaşma görülmüştür.

0,1 mm sediment çapı için konsantrasyon dağılımı her iki kesitte de belirgin biçimde artmakta ve tabana yakın bölgelerde daha kalın, daha sürekli ve düzenli bir çökme şeriti oluşmaktadır. Bu tane çapı, hem türbülans tarafından kısmen askıda tutulabilecek kadar küçük hem de merkezkaç etkisine yeterince duyarlı olacak kadar iri olduğundan, havuz içinde en dengeli çökme rejimini sergilemektedir. Dönel akım altında gelişen ikincil akımlar, sedimentin taban boyunca dış yarıçaplara taşınmasını desteklemektedir.

0,2 mm sediment çapı için konsantrasyon dağılımı ise kesitlerde daha yerel ve tabana sıkışmış bir yapı sergilemektedir. Büyük taneler yüksek ataletleri ve yüksek çökme hızları nedeniyle vorteks akımı içerisinde uzun süre askıda kalamamakta; bu nedenle girişten sonra kısa sürede tabana yönelerek dar fakat yüksek yoğunluklu çökme şeritleri oluşturmaktadır. Hem Y–Z hem de X–Z kesitlerinde, konsantrasyonun tabana çok yakın dar bölgelerde yoğunlaştığı, havuzun üst bölgelerinde ve orifise yakın kesimlerde ise oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Bu davranış, iri tanelerin ikincil akımlar ve düşey emme tarafından yukarı taşınmadığını, çökmenin yerçekimi baskın rejimde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5.86. Farklı sediment çaplarına ait modeller için Y-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı



Şekil 5.87. Farklı sediment çaplarına ait modeller için X-Z kesitinde konsantrasyon dağılımı

6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışmasında, vorteks çökeltim havuzlarında sediment yıkama ve tuzaklama verimliliğini etkileyen parametreler ve akım ve sediment dağılımı karakteristikleri Flow-3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Askıdaki sediment konsantrasyonu ve havuz içerisindeki hız dağılımlarının, havuzun sediment tuzaklama (ayırma) ve yıkama verimliliklerinin; havuzun geometrik konfigürasyonu, orifis çapı, sediment çapı ve eşik yüksekliği ile olan ilişkileri araştırılmıştır. HAD ile elde edilen çıktılar literatürdeki mevcut deneysel çalışma verileriyle karşılaştırılmıştır. Ulaşılan temel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Athar (2000)'e ait deneysel veriler kullanılarak yapılan kalibrasyon aşamasında, hız dağılımlarını en iyi tahmin eden türbülans modelinin LES, askı konsantrasyonunu tahmin eden en iyi türbülans modelinin RNG modeli olduğu görülmüştür. Bu durumun çözüm ağı hassasiyeti ile de ilişkili olduğu düşünülmektedir.
- Bu çalışmada gerek askı sediment konsantrasyonu gerekse hız dağılımları açısından ikinci sırada performans gösteren k-w türbülans modeli seçilmiştir.
- Tüm modellerde teğetsel hız dağılımları merkezde zorlanmış vorteks, dış bölgelerde ise serbest vorteks karakteri sergilemiştir.
- Tüm modellerde düşey hız bileşenleri orifis çevresinde en yüksek değerleri göstermiştir.
- Tüm modellerde teğetsel hız bileşeni, radyal ve düşey hız bileşeninden daha büyük ölçülmüştür.
- Tüm modellerde türbülans kinetik enerjisi dağılımı türbülans şiddetiyle benzer sonuçlar göstermiştir.
- Giriş-çıkış eşik yüksekliği farkının artmasıyla birlikte havuz içerisindeki potansiyel enerji seviyesi yükselmiş, bu durum akım açısıl momentumunu artırarak teğetsel hızların büyümesine neden olmuştur. Artan teğetsel hızlar, vorteks çekirdeğini daha kararlı hâle getirmiş ve merkezde yoğunlaşan bir akım yapısı oluşturmuştur.
- Giriş-çıkış eşik yüksekliği farkı arttıkça tuzaklama verimliliği artarken yıkama verimliliği azalmıştır.
- Orifis yarıçapının büyümesiyle birlikte vorteks çekirdeği geometrik olarak genişlemiştir.
- Küçük orifislerde sedimentin dış duvarlarda birikme eğilimini artarken, büyük orifislerde sedimentin doğrudan merkeze yönelmesi sonucu orifis çevresinde yoğun bir

çökelme bölgesi oluşmuştur.

- Orifis yarıçapı büyüdükçe tuzaklama verimi artmış yıkama verimliliği azalmıştır.
- Giriş çıkış kanalının planadaki şeklinin “S” olması durumunda tuzaklama veriminin daha yüksek elde edilmesi, sedimentin çıkışa ulaşabilmek için iki kez yön değiştirmek zorunda kalması ve bununla birlikte oluşan vorteksin gücü ile doğrudan ilişkilidir.
- U ve özellikle I şekilli konfigürasyonlarda ise vorteksin gücünün sınırlı olması sebebiyle, sedimentin tuzaklanması açısından sınırlı bir performans sergilemiştir.
- İnce taneli sedimentlerde askıda kalma durumu hakimken, iri taneli sedimentlerde çökelme davranışı güçlenmiştir.
- Küçük çaplı sedimentler havuz içerisinde daha homojen dağılırken, iri taneliler yerel yığılmalar oluşturmuştur.
- Çökeltim havuzunun iri taneli sedimentleri tuzaklama oranı daha yüksekken yıkama verimlilikleri sediment çapı ile değişmemektedir.

İlerleyen çalışmalarda yüksek kapasiteli bilgisayarlar kullanılarak daha düşük çözüm ağı hassasiyeti ile havuz içerisindeki hız dağılımlarının daha iyi temsil edilmesi mümkündür. Tuzaklama verimliliğinin yüksek olmasına karşın yıkama verimliliğinin düşük değerlerde kalması, tasarım parametrelerinin optimize edilmesinin gerekli olduğunu göstermektedir. Ayrıca çökeltim havuzlarında deflektör veya diyafram kullanımının, farklı sediment çaplarının farklı geometrik düzenekler üzerine etkisinin, farklı giriş kanal debi ve geometrilerinin incelenmesi, havuzların çökeltim performanslarının karşılaştırılmasında faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ansari, M. A. (2008). *Performance evaluation of vortex settling basins*. Unpublished Doctor of Philosophy Thesis, Aligarh Muslim University, Aligarh.
2. Ansari, M. A. ve Athar, M. (2013a). Design parameters of vortex settling basin. *Water Management*, 166(5), 262-271.
3. Ansari, M. A. ve Athar, M. (2013b). Artificial neural networks approach for estimation of sediment removal efficiency of vortex settling basins. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 19(1), 38-48.
4. Ansari, M. A. ve Khan, M. A. (2014). Performance assessment of vortex settling chambers. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 20(3), 324-338.
5. Anwar, H. O. (1967). *Vortices at low-head intakes*. *Water Power*, 19(11), 455-457.
6. Arnold, U., Hottges, J. ve Rouv, G. (1989, 21-25 August). *Turbulence and mixing mechanisms in compound open channel flow*. Proceedings of the 23rd International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Congress, Ottawa, 133-140.
7. Avcı, İ. (1995). Design of intakes and settling basin. *DSİ*, Ankara.
8. Athar, M. (2000). *Study of vortex chamber type sediment extractor*. Unpublished Doctor of Philosophy Thesis, Indian Institute of Technology, Roorkee.
9. Athar, M., Kothiyari, U. C. ve Garde, R. J. (2002). Sediment removal efficiency of vortex chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(12), 1051-1059.
10. Athar, M., Kothiyari, U. C. ve Garde, R. J. (2003). Distribution of sediment concentration in the vortex chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), 427-438.
11. Basson, G. R. (2020). Upgrade of the existing Philippi Collector Sewer: Hydraulic design report. *Ingerop*, Belville.
12. Bombardelli, F. A. ve Jha, S. K. (2009). Hierarchical modeling of the dilute transport of suspended sediment in open channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 9, 207-235.
13. Bravo, M., Osterkamp, W. R. ve Lopes, V. L. (2004). Transporte de sedimentos en corrientes naturales. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 377-386.
14. Camp, T. R. (1946). Sedimentation and the design of settling tanks. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 111.

15. Castillo, L. G. ve Carrillo, J. M. (2017). Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 92, 171–187.
16. Çeçen, K. ve Akmandor, N. (1973). Circular settling basins with horizontal floor. *TETAK*, Ankara.
17. Çeçen, K. ve Bayazıt, M. (1975, 28 July- 2 August). *Some laboratory studies of sediment controlling structures*. Proceedings of the 9th International Congress on Irrigation and Drainage, Moscow, 107-111.
18. Çeçen, K. (1976). *Su kuvvetleri*. (1.Baskı). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası.
19. Chapokpour, J. ve Farhoudi, J. (2011). Sediment extraction and flow structure of vortex settling basin. *World Applied Sciences Journal*, 14(5), 782-793.
20. Chapokpour, J., Farhoudi, J. ve Tokaldani, E. A. (2011). Turbulent flow measurement in vortex settling basin. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 2(4), 382–389.
21. Chapokpour, J., Ghasemzadeh, F. ve Farhoudi, J. (2012). The numerical investigation on vortex flow behavior using FLOW-3D. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 3(1), 88–96.
22. Chapokpour, J., Farhoudi, J., Tokaldani, E. A. ve Majedi-Asl, M. (2012). Flow visualization in vortex chamber. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 2(1), 26–34.
23. Chrysostomou, V. (1983). *Vortex-type settling basin*. Unpublished Master of Science Thesis, University of Southampton, Southampton.
24. Curi, K. V., Esen, İ. İ. ve Velioğlu, S. G. (1979). Vortex type solid–liquid separator. *Progress in Water Technology*, 7(2), 183-190.
25. Dalir, M., Ziaei, A. N. ve Nikou, N. S. R. (2021). Investigation of Trapping, Sedimentation, and Volumetric Fraction Efficiencies of a Vortex Settling Basin Using the Taguchi Method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1337–1350.
26. Esen, İ. İ. (1989). Solid–liquid separation by vortex motion. *Solid–Liquid Flow*, 1(1), 21-27.
27. Flow Science Inc. (2008). Flow-3D user manual . *Flow Science Inc.*, Santa Fe, 1-817.
28. Hamad, K. ve Torres, C. (2019). Análisis hidráulico con modelación numérica CFD–FLOW-3D de la erosión local en pilas de puentes. *Revista Politécnica*, 51(1), 93-102.
29. Hajiahmadi, A., Saneie, M. ve Azhdari Moghadam, M. (2014a). Experimental investigation of curvature submerge vane effects with 90° radial section in efficiency of vortex settling basin. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 3(3), 11-20.
30. Hajiahmadi, A., Saneie, M. ve Azhdari Moghadam, M. (2014b). Effects of curvature

- submerge vane in efficiency of vortex settling basin. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 1(2), 80-85.
31. Hajiahmadi, A., Khanjani, M. J., Saneie, M. ve Azhdari Moghaddam, M. (2016). Laboratory investigation of the effect of the size of orifice on the performance of curvature submerge vanes for sediment leaching of the vortex settling basin's floor. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 64(3), 781–789.
 32. Hirt, C. W. & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.
 33. Hite, J. E. ve Mih, W. C. (1994). Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(3), 284-297.
 34. Hsu, T.-J. ve Liu, P. L.-F. (2004). Toward modeling turbulent suspension of sand in the nearshore. *Journal of Geophysical Research*, 109, C06018.
 35. Huang, H., Imran, J. ve Pirmez, C. (2005). Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, 283–293.
 36. Yildirim, N. (2007). Sediment Transport Technology, *DSİ*, Ankara, 415-478.
 37. Golzarian, M. R., Sheikh Rezazadeh Nikou, N., Ziaei, A. N. ve Mehrabani, E. (2022). Investigation of particle movement pattern in vortex settling basin based on particle tracking technique. *Journal of Hydraulics*, 17(4), 1–15.
 38. Graf, W. H. ve Cellino, M. (2002). Suspension flow in open channels: Experimental study. *Journal of Hydraulic Research*, 40(4), 435–447.
 39. Gualtieri, C., Angeloudis, A., Bombardelli, F., Jha, S. ve Stoesser, T. (2017). On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows. *Fluids*, 2(2), 17.
 40. Isnaeni, M., Kusuma, M. S. B., Nugroho, J., Farid, M. ve Cahyono, M. (2023). Experiments of geometric shape of sediment trap rectangular and vortex settling desilting basin. *International Journal of Geotechnique, Construction Materials, and Environment*, 24(106), 93–100.
 41. Jha, S. K. (2017). Effect of particle inertia on the transport of particle-laden open channel flow. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 62, 32–41.
 42. Julien, P. Y. (1985). Motion of a sediment particle in Rankine-combined vortex. *Colorado State University*, Fort Collins, 1-37.
 43. Julien, P. Y. (1986). Concentration of very fine silts in a steady vortex. *Journal of Hydraulic Research*, 24(4), 255–264.
 44. Keshavarzi, A. R. ve Gheisi, A. R. (2006). Trap efficiency of vortex settling chamber for exclusion of fine suspended sediment particles in irrigation canals. *Irrigation and Drainage*, 55, 419–434.

45. Gheisi, A. R., Alavimoghaddam, M. R. ve Dadrasmoghaddam, A. (2006). Markovian-octant analysis based stable turbulent shear stresses in near-bed bursting phenomena of vortex settling chamber. *Environmental Fluid Mechanics*, 6, 549–572.
46. Kiringu, K. ve Basson, G. R. (2020). Factors influencing the removal of fine non-cohesive sediment by vortex settling basin at small river abstraction works. *International Journal of Sediment Research*, 36, EE2.
47. Mashauri, D. A. (1986). *Modeling of a vortex settling basin for primary clarification of water*. Unpublished Doctor of Philosophy Thesis, Tampere University of Technology, Tampere.
48. Meyer-Peter, E. ve Müller, R. (1948, 7-9 June). *Formulas for bed-load transport*. Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, Stockholm, 39–64.
49. Mosonyi, E. (1965). *Water power development II*. (1.Baskı). Budapest:House of the Hungarian Academy of Sciences.
50. Mu, Z., Ma, Y. ve Li, L. (2021). Design optimization of perforation on deflector for improved performance of vortex settling basin. *Irrigation and Drainage*, 71(14).
51. Nielsen, P. (1992). *Coastal bottom boundary layers and sediment transport*. (1.Baskı). Singapore: World Scientific Publishing, 324.
52. Niknia, N., Keshavarzi, A. R. ve Hosseini pour, E. Z. (2011, 22-26 May). *Improvement the trap efficiency of vortex chamber for exclusion of suspended sediment in diverted water*. World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability, Reston, 4124–4134.
53. Nikou, N., Ziaei, A. N. ve Ansary, H. (2018). Study of vortex settling basin performance for different discharges by experimental and numerical modeling. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 12(4), 798–810.
54. Nikou, N. S. R., Ziaei, A. N., Ansary, H. ve McDonough, J. M. (2020). Flow field investigation in a vortex settling basin using acoustic Doppler velocimetry and large eddy simulation. *Water and Environment Journal*, 35, 865–883.
55. Nikou, N. S. R., Ziaei, A. N. ve McDonough, J. M. (2021). Numerical modeling of flow field in three types of vortex settling basins. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(12).
56. Nikou, N. S. R., McNabola, A. ve Ziaei, A. N. (2025). Enhancing ecological design principles in vortex settling basins for sustainable water management. *Water*, 17, 496.
57. Norouzi, S., Ziaei, A. N. ve Tehrani, A. (2021). 3D simulation of flow field in vortex settling basin using SSIIM numerical model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(11), 2925–2936.

58. Nguza, T. C. (2022). *Evaluation of vortex settling basin performance in grit removal from sewer lines*. Unpublished Master of Science Thesis, Stellenbosch University, Stellenbosch.
59. Odgaard, A. J. (1986). Free-surface air core vortex. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112, 610-620.
60. Ogihara, H. ve Sakaguchi, S. (1984, 26-30 November). *New systems to separate the sediments from the water flow by using the rotating flow*. Proceedings of the Fourth Congress of the Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research, Chiang Mai, 753–766.
61. O'Hara Murray, R. B. (2011). Intrawave observations of sediment entrainment processes above sand bedforms under irregular waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, C04016.
62. Oliver, C. J., Davidson, M. J. ve Nokes, R. I. (2008). K- ϵ predictions of the initial mixing of desalination discharges. *Environmental Fluid Mechanics*, 8, 617–625.
63. Paul, T. C., Sayal, S. K., Sakhuja, V. S. ve Dhillon, G. S. (1991). Vortex-settling basin design considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2), 172-189.
64. Rea, Q. (1984). *Secondary currents within the circulation chamber sediment extractor*. Unpublished Master of Science Thesis, University of Southampton, Southampton.
65. Salakhov, F. S. (1975, 28 July-2 August). *Rational design and methods of hydraulic calculation of load-controlling water intake structures for mountain rivers*. Proceedings of the 9th International Commission on Irrigation and Drainage, Moscow, 151-161.
66. Samarin, A., Popov, K. W. U. ve Fandeyev, W. W. (1961). *Wasserbau*. (1. Baskı). Berlin: Volkseigener Betrieb Verlag für Bauwesen, 612.
67. Saneie, M., Asefi, M. ve Smaeeli, K. (2013). Experimental studies on increasing sedimentation efficiency of vortex settling basin by using submerged vanes. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 24-31.
68. Soulsby, R., (1997). *Dynamics of marine sands*. London: Thomas Telford Publications.
69. Sullivan, R. H. (1972). The swirl concentrator as a combined sewer overflow regulatory facility, U.S. Environmental Protection Agency, Washington.
70. Svarovsky, L. (1981). *Solid-liquid separation*. Essex: Butterworth & Co. Ltd., 162–188.
71. Taştan, K. ve Yıldırım, N. (2018). Effects of intake geometry on the occurrence of a free-surface vortex. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(4).

72. Taştan, K. ve Barbaros, E. (2021, 27-28 March). *Vorteks tipi çökeltim havuzlarının akım özelliklerinin ve verimlerinin karşılaştırılması*. Presented at Middle East International Conference on Contemporary Scientific Studies, Ankara.
73. Toorman, E. A. (2008). Vertical mixing in the fully developed turbulent layer of sediment-laden open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, 1225–1235.
74. Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431–1456.
75. Ziaei, A. N., McDonough, J. M., Emdad, H. ve Keshavarzi, A. R. (2007). Using vorticity to define conditions at multiple open boundaries for simulating flow in a simplified vortex settling basin. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 54, 1–28.
76. Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M. ve Burnham, J. (2014). The sedimentation–scour model in FLOW-3D. *Flow Science Inc*, Santa Fe, 1-29.



Gazili olmak ayrıcalıktır