



**SU ALMA AĞZI MEMBASINDA OLUŞAN OYULMA ÇUKURU
KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

Berkay ERAT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

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.

Berkay ERAT

20/01/2023

SU ALMA AĞZI MEMBASINDA OLUŞAN OYULMA ÇUKURU KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Berkay ERAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Çalışmada sediment dane çapının, su alma ağzı debisi ve konumunun, membasında oluşan oyulma çukuruna etkiler deneysel ve sayısal model ile çalışılmıştır. Deneysel gözlemler, yüzey altı çevrıntiler ve akım alanındaki hız dağılımı olmak üzere, sediment taşınımında etkin iki farklı olayın olduğunu göstermektedir. Radyal akım kaynaklı taşınım deney başlangıcında kısa süreli etkiye sahip olup deneyin büyük bir kısmında ağza sediment taşınımı çevrıntiler ile gerçekleşmektedir. Densimetrik Froude sayısının artması ile oyulma geometrisinin genişliğinin, uzunluğunun ve derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Su alma ağzı – kanal yatağı arası mesafe arttıkça oyulma çukurunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Ölü-son duvarın yarattığı sınır sürtünme etkisinden ötürü su alma ağzı ile ölü-son duvarının bitişik olması durumunda maksimum oyulma derinliğinin en düşük değerde olduğu; aradaki mesafenin artmasıyla ise maksimum oyulma derinliğinin arttığı görülmüştür. Maksimum oyulma derinliğinin su alma ağzı – ölü-son duvarı mesafesine göre değişimi için elde edilen sonuçlar, sediment danesinin su alma ağzına ilk girişi durumunu tanımlayan kritik Froude sayısı için de geçerlidir. Oyulma çukuru maksimum uzunluğu ve genişliği parametrelerinde etkin taşınım mekaniği radyal hız dağılımı olup su alma ağzından uzak noktalarda çevrıntilerin taşınımına etkisi düşüktür. Bu nedenle su alma ağzı – ölü-son duvarı arası mesafenin artması maksimum oyulma çukuru uzunluğu ve genişliğinin düşmesine neden olur. Deneysel çalışmalardan edilen oyulma değerleri ile oyulma çukuru karakteristik özelliklerinin her biri için birer ampirik denklem geliştirilmiştir. Çalışmanın sayısal modellenmesi kısmında ise Flow 3D yazılımı kullanılmıştır. Optimum modeli oluşturabilmek için çeşitli türbülans modelleri ve çözüm ağı konfigürasyonları incelenmiştir. Genel olarak kabul gören kritik Shields yaklaşımı oluşturulmasında kullanılan deneysel çalışmaların, çevrinti etkilerinin yoğun olduğu taşınımlarda yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu nedenle sayısal model, farklı su alma ağzı debileri ve konumları için yapılan deneylerle, kritik Shields sayısı düzeltme parametresi olarak kullanılarak doğrulanmıştır. Sonuç olarak, Flow-3D yazılımının belirli akım ve geometrik koşullar altında oyulma karakteristiklerini, tahmin etmede başarılı olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91101

Anahtar Kelimeler : Su alma ağzı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ölü-son duvarı, oyulma, sediment

Sayfa Adedi : 164

Danışman : Doç.Dr. Kerem TAŞTAN

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS OF SCOUR HOLE CHARACTERISTICS UPSTREAM OF INTAKES

(M. Sc. Thesis)

Berkay ERAT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

In this study, the effects of sediment diameter, intake discharge and the intake location on the scour hole upstream of intake were studied experimentally and numerically. Experiments show that there are two different mechanisms effective on sediment transport, namely sub-surface vortices and velocity effect. The velocity induced transport is dominant at the beginning of the experiment and the sediment transport is continued by the sub-surface vortices for the rest of the experiment. It has been observed that the width, length and depth of the scour geometry increased with increasing densimetric Froude number. Also, the scour hole becomes smaller as the distance between the intake and the sediment specimen layer increases. Due to the boundary friction effect created by the dead-end wall, has been observed that the maximum scour depth is the lowest when the intake is adjacent to the dead-end, and deepen with distance increase. The results for the variation of the maximum scour depth value with the distance between intake and the dead-end wall are also valid for the critical Froude number, which defines the initial entrainment of the sediment particle. Since the sub-surface vortices occur mostly below the intake, their influence on the width and length of the scour pit is not as impactful as that of the scour depth. The effective transport mechanism for the maximum scour hole length and width parameters is radial velocity distribution. The effect of the sub-surface vortices at points far from the intake is low. Therefore, increasing the distance between the intake and the dead-end wall causes the maximum scour pit length and width to decrease. Using the scour values obtained from the experimental studies, an empirical equation has been developed for each of the scour hole characteristics. Flow 3D has been used for the numerical modelling part of the study. Various turbulence models and mesh configurations were investigated to generate the optimum model. It is seen that Shields approach are insufficient for flow conditions where the effects of the vortices are dominant. Therefore, the numerical model was validated by experiments for different intake flow rates and locations using the critical Shields number as a calibration parameter. As a result, the Flow 3D software was found to be successful in predicting the scour character under certain flow and geometrical conditions.

Science Code : 91101

Key Words : Intake, computational fluid dynamics, dead-end wall, scour, sediment

Page Number : 164

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Kerem TAŞTAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde büyük emeği olan, çalışma süresince engin bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Kerem TAŞTAN'a; çalışma süresince laboratuvar deneylerinde desteklerini esirgemeyen Öğr. Gör. Levent BÜTÜN'e ve Arş. Gör. Efe BARBAROS'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca kıymetli zamanlarını bu çalışma için ayıran, çok değerli yorumlarının yanı sıra olumlu ve yapıcı eleştirileri ile tecrübe ve bilgi birikimlerini paylaşan değerli tez jüri üyelerim Doç. Dr. Nihat EROĞLU'na ve Doç. Dr. Melih ÇALAMAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın sayısal modelleme kısmında, karşılaştığımız problemler ile ilgili destek veren Azim TURAN'a ve İOG Mühendisliğe teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak başta kıymetli ailem olmak üzere dostlarım İbrahim H. CENGİZ'e, Hüseyin ÖZDEMİR'e ve Dr. Coşkun COŞKUN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. DENEYLER.....	15
3.1. Deney Yöntemi	17
3.2. Oyulma Mekanığı.....	24
3.2.1. Radyal hız dağılımının sediment taşınımına etkisi	25
3.2.2. Yüzey altı çevrintilerin sediment taşınımına etkisi	26
3.3. Deney Sonuçları	27
4. FLOW 3D YAZILIMI HAKKINDA GENEL BİLGİLER	39
4.1. HAD modellemesinde çözülen temel denklemler.....	40
4.1.1. Hareket denklemleri	41
4.1.2. Türbülans modelleri	42
4.1.3. Kütle / momentum kaynağı yaklaşımı	44
4.1.4. Sediment taşınım denklemleri.....	44

	Sayfa
4.2. Flow 3D Arayüzü	48
4.2.1. Simülasyon yöneticisi (Simulation manager)	49
4.2.2. Model kurulumu (Model setup)	49
4.2.3. Analiz (Analyze)	52
4.2.4. Görüntü (Display)	52
5. SU ALMA AĞZININ MEMBASINDAKİ OYULMANIN HAD İLE MODELLENMESİ	53
5.1. Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Modelin Fiziksel Yapısı	59
5.2. Çözüm Ağının Belirlenmesi ve Sonuçların Çözüm Ağından Bağımsızlaştırılması.....	61
5.3. Simülasyon Süresinin Belirlenmesi	71
5.4. Sediment Yatak Taşınım Modelinin Belirlenmesi ve Oyulma Modeli.....	74
5.5. Türbülans Modeli Belirlenmesi.....	76
5.6. Kanalin Modellenen Kısımının Uzunluğunun Belirlenmesi	79
5.7. Modellemede Yapılan Diğer Fiziksel Girdiler.....	82
6. HAD MODELİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	85
6.1. Kritik Shields Sayısı $\theta_{kr} = 0,05$ Değeri Kullanılarak Oluşturulan HAD Modeli	87
6.2. Kritik Shields Sayısı Düzeltilmiş HAD Modeli.....	95
6.2.1. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı değerlerinin F_d ile değişimi.....	106
6.2.2. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı değerlerinin l/D ile değişimi	112
7. SONUÇLAR	119
KAYNAKLAR	123
EKLER.....	127
ÖZGEÇMİŞ	164

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Deneysel parametreler ve sayısal aralıkları	20
Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan numuneler ve özellikleri.....	21
Çizelge 3.3. Yapılan deneyler ve özellikleri	22
Çizelge 5.1. HAD modellemesinde incelenen deney düzenekleri ve özellikleri	57
Çizelge 5.2. Tüm kanalı kapsayan genel çözüm ağı için sınır koşulları.....	61
Çizelge 5.3. Çözüm ağı belirlenmesinde incelenen çözüm blokları özellikleri ve bu incelemeler sonucu elde edilen sonuçlar	64
Çizelge 6.1. Deney sonuçları ve kritik Shields sayısı $\theta_{kr} = 0,05$ kullanılarak oluşturulan HAD modeli karşılaştırmalı sonuçları.....	89
Çizelge 6.2. Deney sonuçları ve kritik Shields sayısı deney sonuçlarına göre düzeltilerek oluşturulan HAD modeli karşılaştırmalı sonuçları.....	99

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Su alma ağızlarının yönlerine ve yapısal farklılıklarına göre sınıflandırılması (Knauss, 1987).....	2
Şekil 2.1. İncelenen su alma ağızı, oyulma alanı geometri parametreleri ve kartezyen koordinat sistemi (a) plan ve (b) profil gösterimi (Powell ve Khan, 2012)..	6
Şekil 3.1. Deneysel çalışma geometrik parametreleri.....	15
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik (a) plan (b) profil görünümü.....	18
Şekil 3.3. Oyulma geometrisine ait derinlik kontürleri.....	21
Şekil 3.4. (a) $l/D = 0,00$ ve (b) $l/D > 0,00$ su alma ağızı konumları için KKY'nin gösterilmesi ve ölü-son duvarının etkisi	26
Şekil 3.5. Yüzey altı çevrinti oluşumunun şematik gösterimi	27
Şekil 3.6. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma derinliğinin F_d değerine göre değişimi.....	29
Şekil 3.7. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma derinliğinin c/D değerine göre değişimi.....	30
Şekil 3.8. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişimi.....	30
Şekil 3.9. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma genişliğinin F_d değerine göre değişimi.....	31
Şekil 3.10. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma genişliğinin c/D değerine göre değişimi.....	31
Şekil 3.11. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma genişliğinin l/D değerine göre değişimi	32
Şekil 3.12. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma uzunluğunun F_d değerine göre değişimi.....	32
Şekil 3.13. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma uzunluğunun c/D değerine göre değişimi.....	33
Şekil 3.14. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma uzunluğunun l/D değerine göre değişimi	33

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. Ağza sediment girişinin başladığı F_d değerinin l/D değerine göre değişimi	34
Şekil 3.16. Türetilen denklemlerin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma derinliği değerlerine göre incelenmesi	35
Şekil 3.17. Türetilen denklemlerin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma genişliği değerlerine göre incelenmesi	36
Şekil 3.18. Türetilen denklemlerin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma uzunluğu değerlerine göre incelenmesi	36
Şekil 4.1. Sediment danesine etkiyen kuvvetler (Apsley ve Stansby, 2008)	45
Şekil 4.2. Flow 3D Arayüzü genel görünümü	48
Şekil 5.1. Sayısal modelleme ve HAD modeli kalibrasyonu çalışmalarının şematik ifadesi	54
Şekil 5.2. HAD modeli ve parametreleri genel görünümü	58
Şekil 5.3. Su alma ağzının ölü-sona bitişik olduğu düzeneklerde model yapısı ve sınır koşulları ($l/D = 0,00$)	60
Şekil 5.4. Su alma ağzı ölü-son arasında mesafe olan düzeneklerde model yapısı ve sınır koşulları ($l/D > 0,00$)	60
Şekil 5.5. Numune 2 için (a) 0,80 cm inceliğinde ve (b) 1,25 cm inceliğinde çözüm ağları ile alınan sonuçların 3 boyutlu kıyaslanması ($c/D = 0,50$; $l/D = 1,00$)	63
Şekil 5.6. Maksimum oyulma derinliğinin çözüm hücresi sayısına göre değişimi	65
Şekil 5.7. Maksimum oyulma genişliğinin çözüm hücresi sayısına göre değişimi	65
Şekil 5.8. Maksimum oyulma uzunluğunun çözüm hücresi sayısına göre değişimi	66
Şekil 5.9. Numune 1 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması	67
Şekil 5.10. Numune 1 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 1,00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması	68

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Numune 2 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması.....	69
Şekil 5.12. Numune 2 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1.00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması.....	70
Şekil 5.13. Numune 1 ve Numune 2 için (a) $c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$ ve (b) $c/D = 0.50$; $l/D > 0.00$ modellerinde kullanılan 1,25 cm inceliğe sahip çözüm ağı bloğu profil görüntüsü	71
Şekil 5.14. Zamana bağlı oyulmanın incelendiği noktalar (koordinatlar cm cinsindedir)	72
Şekil 5.15. Seçilen noktalarda oyulmanın zamana bağlı değişimi ($c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$; $\theta_{kr} = 0.06$)	72
Şekil 5.16. Seçilen noktalarda oyulmanın zamana bağlı değişimi ($c/D = 0.50$; $l/D = 0.50$; $\theta_{kr} = 0.05$)	73
Şekil 5.17. Seçilen noktalarda oyulmanın zamana bağlı değişimi ($c/D = 1.00$; $l/D = 0.50$; $\theta_{kr} = 0.05$)	73
Şekil 5.18. Mevcut üç farklı yatak taşınım yaklaşımının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1.00$; $Q = 6.00$ l/s durumu için karşılaştırılması.....	75
Şekil 5.19. 3 farklı türbülans modelinin (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$; $Q = 6$ l/s durumu için durumu için karşılaştırılması.....	77
Şekil 5.20. 3 farklı türbülans modelinin (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.50$; $Q = 6$ l/s durumu için durumu için karşılaştırılması.....	78
Şekil 5.21. Kısa kanal (0,5 m) ve uzun kanal (1,0 m) modellenmesinde (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$, $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması.....	80
Şekil 5.22. Kısa kanal (0,5 m) ve uzun kanal (1,0 m) modellenmesinde (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 2.00$, $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması.....	81

Şekil	Sayfa
Şekil 5.23. $l/D > 0,00$ durumu için HAD modelinin çözümleme esnasında görünümü	83
Şekil 5.24. Membada kullanılan üç farklı fiziksel özelliğe sahip dalga kırıcı blok için (a) serbest yüzey alanının ve (b) akışkan hacminin zamana bağlı değişimlerinin kıyaslanması	84
Şekil 6.1. HAD modelinin ($\theta_{kr} = 0,05$) deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma derinliği değerlerine göre incelenmesi	87
Şekil 6.2. HAD modelinin ($\theta_{kr} = 0,05$) deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma genişliği değerlerine göre incelenmesi	88
Şekil 6.3. HAD modelinin ($\theta_{kr} = 0,05$) deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma uzunluğu değerlerine göre incelenmesi	88
Şekil 6.4. $c/D = 0,50$ düzeneği ve $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin F_d değişimine göre kıyaslanması.	90
Şekil 6.5. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin c/D değerine göre değişiminin kıyaslanması.	91
Şekil 6.6. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişiminin kıyaslanması.	92
Şekil 6.7. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile Powell ve Khan (2015) deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin F_d değerine göre değişiminin kıyaslanması	93
Şekil 6.8. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile Powell ve Khan (2015) deney sonuçlarının maksimum oyulma uzunluğunun F_d değerine göre değişiminin kıyaslanması	94
Şekil 6.9. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile Powell ve Khan (2015) deney sonuçlarının maksimum oyulma genişliğinin F_d değerine göre değişiminin kıyaslanması	94
Şekil 6.10. Numune 1 için farklı kritik Shields sayıları ile yapılan HAD model denemelerinin (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1,00$; $Q = 6$ l/s durumu için değerlendirilmesi	96
Şekil 6.11. HAD modelinin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma derinliği değerlerine göre incelenmesi	97
Şekil 6.12. HAD modelinin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma genişliği değerlerine göre incelenmesi	98

Şekil	Sayfa
Şekil 6.13. HAD modelinin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma uzunluğu değerlerine göre incelenmesi	98
Şekil 6.14. $c/D = 0,50$ düzeneği ve düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin F_d değişimine göre kıyaslanması.....	100
Şekil 6.15. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin c/D değerine göre değişiminin kıyaslanması	100
Şekil 6.16. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişiminin kıyaslanması	101
Şekil 6.17. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması	102
Şekil 6.18. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,50$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması	103
Şekil 6.19. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması	104
Şekil 6.20. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması	105
Şekil 6.21. Deney sonuçlarına göre düzeltilmiş kritik Shields sayısının F_d parametresine göre değişimi.....	106
Şekil 6.22. Su alma ağzı etrafında türbülans kinetik enerjisinin $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$ su alma ağzı konumu için (a) $F_d = 14$; $\theta_{kr} = 0,060$ (b) $F_d = 19$; $\theta_{kr} = 0,050$ ve (c) $F_d = 29$; $\theta_{kr} = 0,020$ plan ve profil bakılarından görüntüsü	108
Şekil 6.23. Su alma ağzı etrafında z yönündeki vortisite değerlerinin $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$ su alma ağzı konumu için (a) $F_d = 14$; $\theta_{kr} = 0,060$ (b) $F_d = 19$; $\theta_{kr} = 0,050$ ve (c) $F_d = 29$; $\theta_{kr} = 0,020$ profil görüntüsü	109

Şekil

Sayfa

- Şekil 6.24. Su alma ağzı altında oluşan oyulma üzerindeki farklı simülasyon zamanlarına ait kritik üzeri kayma gerilmelerinin $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$ su alma ağzı konumu için (a) $F_d = 14$; $\theta_{kr} = 0,060$ (b) $F_d = 19$; $\theta_{kr} = 0,050$ ve (c) $F_d = 29$; $\theta_{kr} = 0,020$ plan görüntüsü 111
- Şekil 6.25. Deney sonuçlarına göre düzeltilmiş kritik Shields sayısının l/D parametresine göre değişimi..... 112
- Şekil 6.26. Su alma ağzı etrafında türbülans kinetik enerjisinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ plan ve profil görüntüsü 114
- Şekil 6.27. Su alma ağzı etrafındaki hızı değerlerinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ profil görüntüsü 115
- Şekil 6.28. Su alma ağzı altında oluşan oyulma üzerindeki farklı simülasyon zamanlarına ait kritik üzeri kayma gerilmelerinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ plan görüntüsü 116
- Şekil 6.29. Su alma ağzı etrafında z yönündeki vortisite değerlerinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ profil görüntüsü..... 117

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deney düzeneğinin yüksek bir noktadan çekilmiş fotoğrafı	19
Resim 3.2. Deney düzeneğinin su alma ağzı ve ölü-son yakınlarından çekilmiş fotoğrafı ($l/D = 0,00$).....	19

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A_K	Küresel kuyu yüzeyi alanı
A_s	Akıştan etkilenen efektif sediment kesit alanı
$A_{x,y,z}$	x , y ve z yönlerindeki akış olan yüzey alanı
B	Kanal genişliği
b_1	Su alma ağzının kanalın sol duvarına olan mesafesi
b_2	Su alma ağzının kanalın sağ duvarına olan mesafesi
c	su alma ağzı merkez eksenini, kanal tabanı arası mesafe
c_s	Askıdaki sediment miktarının toplam hacme oranı
d	Sediment dane çapı
D	Su alma ağzı çapı
$d_{15,9}$	Danelerin %15,9'unun geçtiği elek çapı
d_{50}	Danelerin %50'sinin geçtiği elek çapı
$d_{84,1}$	Danelerin %84,1'inin geçtiği elek çapı
d_*	Boyutsuz bir parametre
F	Froude sayısı
F_d	Densimetrik Froude sayısı
f_x, f_y, f_z	x , y ve z yönlerindeki viskoz ivme bileşenleri
g_x, g_y, g_z	x , y ve z yönlerindeki yerçekimi ivmesi
h	Su yüksekliği
H	Su alma ağzı batıklığı
h_m	Oyulma çukuru maksimum derinliği
h_s	Sediment katmanı yüksekliği
i	Deney verilerinin her birini ifade eden alt indis değeri
k	Türbülans kinetik enerjisi
l	Su alma ağzı ile ölü-son duvarı arası mesafe

Simgeler**Açıklamalar**

L_c	Karakteristik uzunluk
L_m	Oyulma çukuru maksimum uzunluğu
N	İstatistiksel uygunluğu sınanan verinin büyüklüğü
n_s	Sediment paketi normal vektörü
p	Piyezometrik basınç
q_b	Birim genişlikten geçen sediment debisi
Q	Su alma ağzından çekilen debi
Re	Reynolds sayısı
R_h	Hidrolik yarıçap
R_{SOR}	Kütle / momentum kaynağı
t	Simülasyon süresi
U_∞	Kesit alanı ortalamalı yaklaşım hızı
u, v, w	x, y ve z yönlerindeki hız bileşenleri
u_{lift}	Sürüklenme hızı
$u_{settling}$	Askıdaki sedimentin çökme hızı
$u_{settling}^*$	Dane etkileşimiyle sedimentin çökme hızı
V	Su alma ağzı içerisindeki ortalama akış hızı
V_c	Karakteristik hız
V_F	Çözüm hücresi içerisindeki akışkan oranı
V_K	Küresel kuyu yüzeyi üzerindeki radyal hız
W_m	Oyulma çukuru maksimum genişliği
W'	Sedimentin sudaki ağırlığı
y	Referans olarak alınan deney sonuçları
$\hat{y}$	Deney verisine karşılık gelen HAD modeli sonucu
$\bar{y}$	Referans olarak alınan deney sonuçlarının ortalaması
α_i	Sediment numunesi için sürüklenme parametresi
β	Kanal eğimi
$\beta_{MPM,i}, \beta_{NIE,i}, \beta_{VR,i}$	yatak taşınım yaklaşımları için ampirik katsayılar
ζ_{user}	Richardson – Zaki katsayısı kullanıcı çarpanı
ζ_0	Richardson – Zaki katsayısı
μ_w	Akışkanın dinamik viskozitesi

Simgeler**Açıklamalar**

ε	Türbülans sönümlenme oranı
θ	Yerel Shields katsayısı
θ_{kr}	Kritik Shields katsayısı
σ_g	Üniformluk derecesi
φ	Sediment numunesi içsel sürtünme açısı
ψ	akım kuvveti ile sediment ağırlığı arasındaki açı
ω	Türbülans frekansı
ρ_s	Sediment numunesi yoğunluğu
ρ_w	Akışkan yoğunluğu
τ	Yatak kayma gerilmesi
ν	Kinematik viskozite
σ_g	Üniformluk derecesi
Φ	Birim yatak genişliğinden geçen sediment debisi
Ω	Vortisite

Kısaltmalar**Açıklamalar**

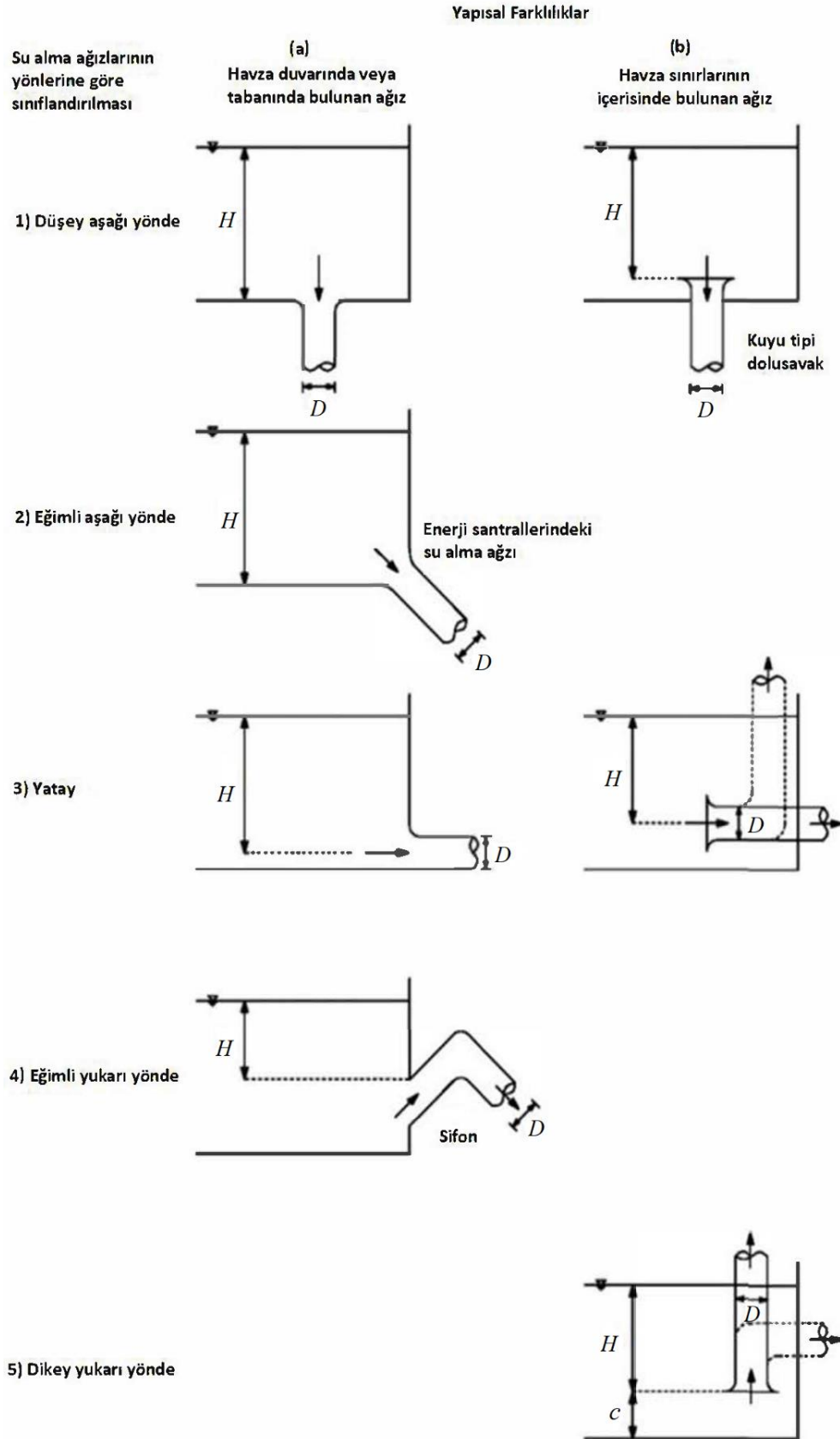
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KKY	Küresel kuyu yüzeyi
LES	Büyük Girdap Simülasyonu
MSE	Ortalama hataların kareleri toplamı
N1	Numune 1 ($d_{50} = 1,25$ mm)
N2	Numune 2 ($d_{50} = 0,62$ mm)
R²	Pearson'un korelasyon katsayısının karesi
RANS	Reynolds ortalama Navier – Stokes denklemleri
RMSE	Ortalama hataların kareleri toplamının karekökü
RNG	Re-normalize Grup
VOF	Akışkan Hacmi

1. GİRİŞ

Suyun kaynağından kontrollü bir şekilde ihtiyaç duyulan yere taşınması, tarih öncesi kurulan ilk yerleşik toplumlardan günümüze kadar gelen bir ihtiyaçtır. Bu ihtiyaç, yerleşik hayata geçen ilk tarım toplumlarında sulama ve içme suyunun taşınması olarak ortaya çıkmıştır. Teknolojinin gelişmesi ve nüfusun artması ile tarımsal sulama suyu ve içme suyu taşınımı ihtiyacına; enerji üretimi, nükleer tesis soğutma suyu temini ve endüstriyel kullanım ihtiyaçları da eklenmiştir. Tüm bu ihtiyaçlar doğrultusunda suyun rezervuar ve denizler gibi durgun ortamlardan veya nehir ve kanal gibi akış ortamlarından derivasyonunu sağlayan mühendislik yapılarına su alma yapıları denir. Küçük ölçekli su alma ağızları, Knauss (1987) tarafından yönleri ve yapısal farklılıklarına göre Şekil 1.1'deki gibi sınıflandırılmıştır. Serbest su yüzü ile su alma ağızı arası mesafe literatürde “batıklık” olarak ifade edilir ve Şekil 1.1'de H ile gösterilmiştir. Su alma ağızı çapı D ile, düşey yukarı yönde su alma ağızlarında havza tabanı ile su alma ağızı arası mesafe ise c ile gösterilmiştir.

Su alma ağızları tasarımında dikkat edilmesi gereken başlıca konular; istenilen miktarda suyun alınabilmesi ve alınan suyun boyut ve nicelik bakımından izin verilen sınırların üzerinde sediment içermemesi ve ağza hava girişinin engellenmesidir. Su alma ağzına ait batıklık yeterli değilse ağza hava girişi meydana gelir. Giren bu hava, akış kesitini daraltır ve bu da ağızdan geçen debiyi düşürür. Ayrıca sistem üzerindeki pompa ve türbin gibi mühendislik yapılarında kavitasyon ve titreşimler oluşturarak hasara sebebiyet verir.

Su alma ağızı verimini düşüren bir diğer unsur ise ağza sediment girişidir. Meydana gelen sediment taşınımı; su içerisinde askıda, sıçrama hareketleri (saltasyon) ile veya sürüntü hareketi ile meydana gelmektedir. Taşınan sediment, tıpkı ağızdan hava girişinde olduğu gibi debi verimini düşürmektedir. Daha önemlisi ise taşınan bu malzemenin, boyutu ve miktarına bağlı olarak, su alma ağzının tıkanmasına ve su iletim hattında bulunan türbin, pompa gibi yapıların aşınmasına sebep olmasıdır. Bu durum, pahalı mekanik parçaların öngörülenden çok daha kısa süre içerisinde kullanılamaz hale gelmesine ve dolayısıyla ciddi maddi kayıplara yol açar. Çözüm için, alınan su istenilen yere iletilmeden önce çökeltim havuzlarında sedimentten arındırılmaya çalışılsa da sediment taşınımı bakımından kötü tasarlanmış bir su alma ağzından alınan suyun arındırılması için kullanılacak çökeltim havuzunun maliyeti yüksek olacaktır.



Şekil 1.1. Su alma ağızlarının yönlerine ve yapısal farklılıklarına göre sınıflandırılması (Knauss, 1987)

Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda su alma ağız tasarımının en verimli şekilde yapılması ve bu doğrultuda sediment sorununun kaynağında çözülmesi gerekliliği ortadadır. Bu çalışmada, ölü-son duvarına sahip dikdörtgen bir kanaldan su alan yatay su alma ağızına kanal tabanında bulunan sediment girişi ve neticesinde oluşan oyulma çukuru özellikleri deneysel ve sayısal olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli ile incelenmiştir. Deneylerde dairesel su alma ağızı kullanılmış olup farklı ağız debileri, ağızın kanal içindeki farklı konumları ve farklı sediment çapları için deneyler yapılmıştır. Akışkan hareketinin, momentum transfer denklemleri ve süreklilik denklemleri kullanarak bilgisayar ortamında nümerik yaklaşımlar ile bir, iki veya üç boyutlu olarak çözümlenmesine HAD denilmektedir. Çalışmanın sayısal kısmında ise, ağıza sediment girişi sonucu oluşan oyulma çukurunun geometrik karakteristikleri (çukurun uzunluğu, genişliği, derinliği ve hacmi) ve bu parametrelerin ağızın kanal içindeki konumu ile ve sediment ve akış özellikleriyle nasıl değiştiğinin analizi bir HAD yazılımı olan Flow 3D ile yapılmıştır. Bu çalışmada HAD modelinin kalibrasyonu için yapılan deneylerin sonuçları kullanılmıştır. HAD çalışmaları ve uygulamaları, bilgisayar donanım teknolojisinin de gelişmesi ile 21. yüzyılda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. HAD modelleri mühendislik yapılarının tasarım aşamasında, kısa süreli nümerik çözüm ortaya koyması ve düşük maliyet ile yeterli doğrulukta öngörü sağlaması ile avantajlıdır. Bunun yanında halihazırda mevcut olan bir yapının daha verimli çalışması için fiziksel deney modeli oluşturmada birçok farklı çözüm önerisinin hızlı kolayca denenebilmesine olanak tanır.

Bu çalışmada, su alma ağızlarına sediment girişi sonucunda oluşan oyulma çukurunun karakteristik özelliklerinin (çukur derinliği, genişliği ve uzunluğu); ağız debisi, ağızın kanal sınırlarına olan mesafeleri ve sediment dane çapıyla olan ilişkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca oyulma çukuru özelliklerinin HAD ile ne ölçüde belirlenebildiği ortaya konarak kullanılan yazılımın bu tip bir olayı modellemedeki başarısının hangi etkenlere bağlı olduğu incelenmiştir. HAD ile ne ölçüde belirlenebildiği ortaya konarak, su alma ağızlarının sediment taşınımı bakımından daha iyi tasarlanması için kriterler oluşturulmak istenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

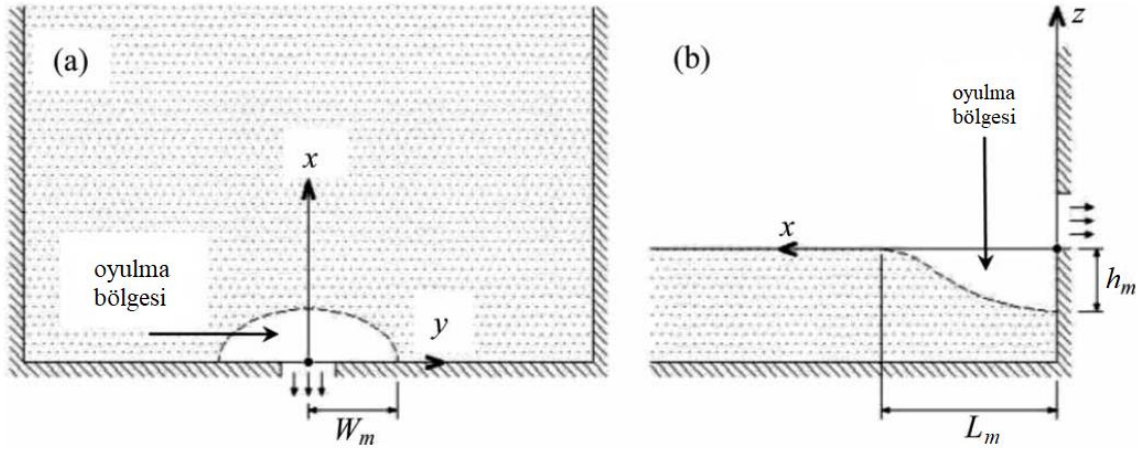
Çalışma kapsamına giren ve çalışmanın ilerlemesine yardımcı olan araştırmalar bu başlık altında incelenmiştir. Öncelikle dairesel su alma ağızları membasındaki akım karakteristikleri ile ilgili çalışmalar incelenmiş olup daha sonra köprü ayağı ve kapak altı oyulmaları ve benzeri oyulma durumlarının HAD modeli ile incelendiği çalışmalar sunulmuştur.

Dairesel su alma ağızlarının incelendiği çalışmalar

Shammaa, Zhu ve Rajaratnam (2005), dairesel orifis ve kapak altı akışlarını potansiyel akım yaklaşımı ile çözümlemişlerdir. Farklı debiler için dairesel su alma ağızı membasında oluşan yarı eliptik hız konturlarını, literatürde mevcut olan diğer çalışmalara çok yakın şekilde hesaplamışlardır. Çalışmada kapak altı akışlar için basit çizgisel kuyu yaklaşımı önerilmiş olup, hesaplanan hız değerleri literatürdeki diğer deneysel ve nümerik çalışmalar ile kıyaslandığında sonuçların literatür ile uyumlu geldiği gözlemlenmiştir.

Bryant, Khan ve Aziz (2008), dairesel orifisin membasında oluşan hız profillerini, basınç gradyanının etkili olduğu tekil büyük orifis ve çoklu orifislerin kullanıldığı fiziksel model yardımı ile incelemişlerdir. Daha sonra orifis membasında oluşan akış hızlarının tespiti için basınç gradyanının da hesaba katıldığı yeni bir potansiyel akım yaklaşımı öne sürmüşlerdir. Yeni yaklaşımın fiziksel modelden alınan ölçümlerle uyumluluk gösterdiği görülmüştür. Yeni potansiyel akım yaklaşımının Shammaa, Zhu ve Rajaratnam (2005) tarafından öne sürülmüş potansiyel akım denkleminde daha üstün olduğu gösterilmiştir.

Powell ve Khan (2011, 2012, 2015), durgun rezervuarda mevcut dairesel su alma yapısının membasındaki oyulmayı farklı hidrolik yükler altında ve farklı sediment numuneleri ile deneysel ve nümerik incelemişlerdir. Çalışmalar kapsamında incelenmiş olan su alma ağızı konumu, sediment oyulma alanı ve koordinat sistemi şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir. Çalışmalarda eliptik oyulma bölgesi uzunluğu L_m , maksimum yarım genişliği W_m ve merkez ekseninde meydana gelen maksimum oyulma derinliği ise h_m olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.1. İncelenen su alma ağızı, oyulma alanı geometri parametreleri ve kartezyen koordinat sistemi (a) plan ve (b) profil gösterimi (Powell ve Khan, 2012)

Powell ve Khan (2011), sabit bir hidrolik yük altında farklı kalınlıkta üç adet sediment numunesinin orifis akışı kaynaklı taşınımını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada araştırmacılar oyulma olayının iki aşamada gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. İlk aşamada 1,5-2 dakika kadar, kritik üzeri kayma gerilmesinden dolayı radyal taşınım gözlemlenmiştir. Ardından radyal taşınımın yatak formasyonunu değiştirmesinden kaynaklı akış düzeninin değişmesi ve buna bağlı olarak rastgele çevrıntiler ve çevrinti kaynaklı oyulmalar gözlemlenmiştir. Çalışmada sediment dane çapının maksimum oyulma derinliğine ve oyulma hacmine etkisi de incelenmiş ve oyulmanın sediment dane çapının azalması ile arttığı gösterilmiştir.

Powell ve Khan (2012), önceki deneysel çalışmalarına benzer şekilde üç farklı sediment numunesi ve üç farklı hidrolik yük altında toplam dokuz farklı deney seti ile çalışmışlardır. Çalışmada denge durumuna gelmiş olan oyulma için Şekil 2.1’de gösterilen oyulma geometrisi parametreleri incelenmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda hidrolik yük arttığında su alma ağızından geçen debi artmış, dolayısıyla oyulma çukuru genişlemiştir. Bunun yanında önceki çalışma ile paralel olarak sediment dane çapı arttığında oyulma çukurunun küçüldüğü ve oyulma miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Deney sonuçları ışığında, regresyon analizi ile oyulma geometrisini ifade edecek denklemler türetilmiştir. Ayrıca oyulma olmayan sabit yatak durumunda yapılan hız ölçümleri ile x eksenini boyunca görülen akış hızı değişimini ifade eden bir denklem ortaya konulmuştur.

Powell ve Khan (2015), daha önce yapılan deneysel modelin Flow 3D yazılımı ile HAD modellemesini de çalışmışlardır. HAD modellemesinde kullanılan türbülans modeli standart $k - \varepsilon$ modeli olup diğer tüm ayarların varsayılan ayarlarda bırakıldığı belirtilmiştir. Modelde sediment oyulması modeli çalışılmamış, deney sonuçlarından elde edilen denge durumundaki oyulma geometrisi ayrıca yazılıma tanıtılmıştır. Çalışmada deney sonuçlarından elde edilen, hareketli ve sabit yatak durumunda su alma ağzı etrafındaki hız değerleri incelenmiş ve HAD modelinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Sarkardeh, Zarrati, Jabbari ve Marosi (2014), rezervuara bağlı dairesel yatay su alma yapısında meydana gelen çevrinti ve hava girişi oluşumlarını deneysel ve HAD modeli ile incelemişlerdir. İnceleme sonucu HAD modelinin, deneylerden elde edilen çevrinti merkezi hızlarını %10 daha fazla öngördüğü sonucuna varılmıştır. Çalışmada rezervuarda su alma ağzına doğru huni şeklinde bir akış alanı tespit edilmiştir.

Tataroğlu (2014) ve Sungur (2018), yatay dairesel su alma yapılarında çevrinti oluşumunu ve kritik batıklık değerlerini Flow 3D yazılımı ile numerik olarak incelemişlerdir. Tataroğlu (2014) HAD modelinin oluşturulmasında üniform 0,75 cm çözüm ağı kullanırken tüm kanal için 1,5 cm çözüm ağı kullanmıştır. Sungur (2018) ise su alma ağzının bulunduğu yerde üniform 0,3 cm çözüm ağı kullanılırken, tüm kanal için 1,5 cm çözüm ağı kullanmıştır. İki çalışmada da modelden elde edilen kritik batıklık değerleri literatürde mevcut olan deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Tataroğlu (2014) modelde laminar akış ve LES türbülans modeli ile elde edilen sonuçları kıyaslamıştır. LES kullanılan modelin deney sonuçlarına daha yaklaştığı gözlemlenmiştir. Sungur (2018) yapmış olduğu araştırmada ise yalnızca LES türbülans modeli kullanmış ve oluşturduğu HAD modelinin %3-17 aralığında hata ile deney sonuçlarına yaklaştığını gözlemlemiştir.

Aghajani, Karami, Sarkardeh ve Mousavi (2020), dairesel su alma yapılarında ızgara yapısının ve batıklık seviyesinin hava girişi ve su alma ağzı verimine etkisini, HAD modellemesi ve deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Oluşturulan HAD modelinde sisteme su giriş ve çıkışı Flow 3D yazılımı seçenekleri içerisinde mevcut, kaynak / kuyu akış modellemesi özelliği ile sağlanmıştır. Çalışmada, deneysel sonuçlar yardımı ile sayısal model doğrulaması yapılmıştır. Çalışma sonucu ızgara yapısının yüzeyde çevrinti oluşumunu azalttığı, aynı zamanda akış enerjisi kaybını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Keshavarzi, Mohammadi ve Hamidifar (2022), dip savak membasında oluşan akış ve oyulma karakteristiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada 20, 30 ve 40 cm yüksekliğindeki üç farklı hidrolik yük değeri altında 0,3, 0,7 ve 0,9 mm çaplarında üç farklı sediment numunesi incelenmiştir. Orifis akışı sonucu oluşan yarı eliptik oyulmanın uzunluğu, derinliği ve hacmi için denge durumunda elde edilen maksimum değerlere bağlı denklemler türetilmiştir. Oyulma geometrisinin zamana bağlı değişimi incelenmiş, regresyon çalışması yapılarak oyulma derinliğinin zamana bağlı denklemi ifade edilmiştir. Son olarak küçük dane çapına sahip numunede (0,3 mm) gözlemlenen maksimum oyulma derinliğinin büyük dane çapına sahip numunedeki (0,9 mm) maksimum oyulma derinliğinden %10 daha fazla olduğu gösterilmiştir.

Köprü ayağı oyulmasının HAD modeli kullanılarak incelendiği çalışmalar

Zhu ve Liu (2012), dairesel köprü ayağı etrafında oluşan oyulmayı HAD modellemesi ile incelemişlerdir. Oluşturulan modelde çözüm süresi düşünülerek standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli tercih edilmiştir. Literatürde mevcut deney sonuçları ile HAD modeli sonuçları; akış çizgileri, tabanda oluşan kayma gerilme değerleri ve maksimum oyulma derinliği parametreleri değerlendirilerek kıyaslanmış ve sonuçların isabetli olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, araştırmacılar oyulma biçiminin ve maksimum oyulma derinliğinin olduğu noktanın deney sonuçlarından farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bunun sebebi olarak oluşturulan HAD modelinin oyulma çukuru şevlerinin yıkılmasını modelleyememesini işaret etmişlerdir.

Ghasemi ve Soltani-Gerdefaramarzi (2017), dairesel tekli köprü ayağı etrafında farklı debili akışlardan kaynaklı oluşan oyulmayı Flow 3D yazılımı kullanarak modellemişlerdir. Oluşturulan HAD modelinde deney sonuçları ile daha uyumlu olması sebep gösterilerek, Re-normalize Grup (RNG) $k - \varepsilon$ türbülans modeli tercih edilmiştir. Sayısal modelden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların kıyaslandığı çalışmada, HAD modelinin %20-30 oranlarında oyulma derinliğini olduğundan daha az öngördüğü gözlemlenmiş, benzer çalışmalarda da bu derecede hatalar ile karşılaşıldığı işaret edilmiştir.

Ghaderi ve Abbasi (2019), HAD modellemesi ile kanat profilli köprü ayaklarının oyulmaya etkilerini incelemişlerdir. Yapılan modellemede Flow 3D yazılımı kullanılmış olup oyulma sonuçları ile deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır. Elde edilen HAD modeli sonuçları ile deney

sonuçlarının yeterince örtüştüğü görülmüştür. Doğrulanmış model kullanılarak dairesel kesitli köprü ayakları ile kanat profilli köprü ayaklarının oyulmaya etkileri incelenmiştir. Son olarak kanat profilli köprü ayağında nehir yatağına bitişik plaka kullanılmasının ve plakasız kanat profilinin akışa göre yönünün oyulmaya etkisi araştırılmıştır.

Mendonça, Canilho ve Fael (2019), nehir akışı ile taşınan yıkıntıların köprü ayağı oyulma derinliğine etkisini deneysel ve HAD modeli kullanarak incelemişlerdir. Deneysel modelde farklı yıkıntı geometrileri denenmiş ve yıkıntı yapısındaki varyasyonların maksimum oyulmaya etkisi incelenmiştir. Son olarak deneysel model, Flow 3D yazılımı kullanarak modellenmiş ve HAD modeli sonuçlarının deneysel model sonuçlarından %30 mertebesinde sapma gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak deneysel çalışmadan elde edilen oyulma geometrisi, HAD modeline sabit yatak olarak tanıtılması durumunda ise hız değerlerinin deneysel modelde yapılan ölçümlerle yüksek uyum gösterdiği gözlemlenmiştir.

Kapak altı akışlarda oyulmanın HAD modeli kullanılarak incelendiği çalışmalar

Karim ve Ali (2000), FLUENT yazılımını kullanarak kapak altı akışlarda oluşan su jetinin iki boyutlu modellemesini oluşturmuşlar ve elde edilen sonuçları, daha önce literatürde mevcut deneysel hız ve kayma gerilme ölçümleri ile kıyaslamışlardır. Çalışmada ayrıca türbülans modellerinden standart $k - \varepsilon$ modeli, Reynolds gerilme modeli ve RNG $k - \varepsilon$ modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmış, RNG $k - \varepsilon$ modelinin çok daha az iterasyon sayısı ile daha isabetli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Wei, Brethour, Grünzner ve Burnham (2014), kapak altı akışlarında oyulma olayının Flow 3D yazılımı kullanılarak oluşturulan HAD modeli ile incelemişlerdir. Modelde kritik Shields parametresi 0,05 kabul edilmiş, diğer tüm değişkenler ise varsayılan değerinde bırakılmıştır. HAD modeli, literatürde mevcut olan kapak altı oyulma deneyi sonuçları ile doğrulanmıştır. Doğrulan HAD modeli üç ayaklı dairesel köprü ayağı oyulması, baraj mansabında meydana gelen oyulma olayı ve sığ nehir akışında meydana gelen oyulma olayı incelemesi için kullanılmıştır. Bu incelemeler için deney sonuçları değerlendirilmemiş, yalnızca model sonuçları yorumlanmıştır.

An, Ku ve Julien (2015), kapak altı oyulma olayını Flow 3D yazılımını kullanarak modellemişlerdir. Çalışmada iki ve üç boyutlu HAD modelleri, yatak yükü taşınım yaklaşımları (Meyer, Peter ve Muller 1948, Engelund ve Fredsøe 1976, Nielsen 1992) ve türbülans modelleri (RNG $k - \varepsilon$ ve Büyük Girdap Simülasyonu, LES) incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde iki boyutlu modelin, genişlik yönündeki hızları hesaba katmaması neticesinde isabetli sonuçlar vermediği gözlemlenmiştir. İncelenen yatak taşınım yaklaşımlarının tümünün deneyler ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Son olarak LES türbülans modelinin oyulma / biriktirme profilini, RNG $k - \varepsilon$ modelinden çok daha yüksek isabetle öngördüğü sonucuna varılmıştır. Ancak LES modeli çözüm süresi ve hesap yükü açısından ele alındığında, bu türbülans modelinin pratikte uygulanabilirliğinin düşük olduğu ifade edilmiştir.

Mehdifard, Dalfardi, Baghdadi ve Seirfar (2015), kapak altı oyulma olayını Flow 3D yazılımını kullanarak modellemiş ve deney sonuçları ile kıyaslamışlardır. Farklı dane çapı ve debilerin incelendiği çalışmada, HAD modeli maksimum oyulma değerini ortalama %11 hata ile öngörmüştür. Oyulma uzunluğu %9-20 aralığında, mansaptaki biriktirme yüksekliğini ise %12-40 hata ile hesaplamıştır.

Aydın ve Karaduman (2018), Flow 3D yazılımı ile kapak altı oyulma olayını modellemiş ve literatürde mevcut deney sonuçları ile kıyaslamışlardır. Oluşturulan HAD modelinde $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılmış ve yukarıda ifade edilen An, Ku ve Julien, (2015)'in yapmış olduğu çalışmaların tersine, türbülans modeli oyulma / biriktirme profilini isabetli öngörmüştür. Hata oranının %5-10 aralığında gözlemlendiği çalışmada, HAD modelinin ve kullanılan türbülans modelinin isabetli olduğu sonucuna varılmıştır.

Lee, Xu ve Huang (2019), kapak altı akışı kaynaklı oyulma olayını OpenFOAM açık kaynak yazılımı kullanarak incelemişlerdir. Oluşturulan modelin deney sonuçları ile kıyaslandığı çalışmada, oyulma derinliğinin ve birikinti uzunluğunun isabetli öngörüldüğü ancak birikinti yüksekliğinin model tarafından olduğundan az bulunduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada ayrıca HAD modelinin belli zamanlarda su jetinden kaynaklı aşırı dikleşen sediment birikintisinin stabilitesini kaybedip yıkılmasını hesapladığı da gözlemlenmiştir.

Diğer hidrolik yapılarda gözlemlenen oyulmanın HAD modeli kullanılarak incelendiği çalışmalar

Apsley ve Stansby (2008), sediment taşınımında genel olarak kullanılan yatak yükü denklemlerinde, küçük eğimli ve sediment hareketinin büyük çoğunlukla akış kaynaklı gerilmelerden oluşması varsayımını temel almışlar ve bu denklemleri yüksek eğimlerde doğru çalışabilecek şekilde modifiye etmişlerdir. Modifiye denklemler kullanılarak oluşturulan HAD modeli sonuçları, 1/300 eğimli ve menderesli nehir akışlarının deneysel inceleme sonuçlarından elde edilmiş olan oyulma ve biriktirme profilleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca modifiye edilmiş sediment taşınım denklemleri ile (Meyer, Peter ve Muller 1948, Van Rijn 1984, Nielsen 1992) dairesel koni ve simetrik eksenli Gauss dağılımı şekillerindeki sediment tepeciklerinin, eğimli akış altında hareketleri incelenmiş ve şekil değişimleri literatürde halihazırda mevcut deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Nielsen (1992) yaklaşımının sediment taşınımını olduğundan fazla hesapladığı, Van Rijn (1984) ve Meyer, Peter ve Muller (1948) yaklaşımlarının ise kütleli taşınımı yeterli doğrulukta öngördüğü gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan numunenin içsel sürtünme açısı değeri bilinmediğinden, Van Rijn (1984) yaklaşımında diğer sediment taşınım denklemlerinde kullanılan ve varsayılan değer olan 32° içsel sürtünme açısı yerine, kumlar için önerilen aralığın en alt sınırı olan 26° buna ek olarak denenmiş ve denklemin daha isabetli taşınım tahmini sağladığı gözlemlenmiştir.

Epely-Chauvin, de Cesare ve Schwindt (2014), Flow 3D yazılımı ile oluşturulan HAD modelinin, düşü havuzlarında görülen su jeti kaynaklı oyulmalar için doğruluğunu incelemiştir. Bu inceleme için daha önce literatürde mevcut olan deney sonuçları kullanılmış ve HAD modelinin güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Nisar, Sarwar ve Nabi (2015), halihazırda çalışan bir barajın dolu savağını farklı işletme koşulları için Flow 3D yazılımı ile modellemişlerdir. Kullanılan HAD modelinde, türbülans modeli için yazılım el kitabı işaret edilerek RNG $k - \varepsilon$ seçilmiştir. Araştırmacılar tarafından modelden elde edilen serbest su yükseklikleri, basınç değerleri ve hız değerleri sahadan alınan ölçümler ile kıyaslanmış, HAD modelinin karmaşık dolu savak akışını başarı ile modellediği sonucuna varılmıştır.

Pourshahbaz, Abbasi ve Taghvaei (2017), kıyılarda erozyonu engellemek amacıyla kullanılan setlerde gerçekleşen sediment oyulmasını Flow 3D yazılımı ile sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada deney sonuçları ile kıyaslanan HAD modelinin, debi arttığında tekrar kalibre edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Movahedi, Kavianpour ve Aminoroayaie Yamini (2018), baraj mansaplarında sıçratma eşiği sonrası meydana gelen oyulma olayını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. İncelenen sıçratma eşiğinin Flow 3D yazılımı kullanılarak oluşturulan HAD modeli, deneysel model ile kalibre edilmiştir. HAD modelinin eşik sonrası mansapta oluşan oyulma profillerinde isabetli sonuçlar verdiği görülmüştür. Farklı debiler ve iki farklı sediment dane çapı için HAD modelinden elde edilen oyulma profilleri incelenmiştir.

Choufu, Abbasi, Pourshahbaz, Taghvaei ve Tfwala (2019), kıyı koruma setlerinde görülen oyulmanın azaltılması için HAD modeli kullanmışlardır. HAD modeli sonuçları; set boyutları membadan mansaba doğru azalacak şekilde yerleştirildiğinde maksimum oyulma derinliğinin %55, artan şekilde yerleştirildiğinde ise %77 azaldığını göstermiştir.

Taha, El-Feky, El-Saiad ve Fathy (2020), dolu kutu menfez mansabında meydana gelen oyulma karakteristiğini Flow 3D yazılımı kullanarak incelemişler, deney sonuçları ile sayısal çözüm sonuçlarını kıyaslamışlardır. HAD modeli doğruluğu gösterildikten sonra kutu menfezin farklı doluluk değerlerinin oyulma geometrisine ve memba su profiline etkisi incelenmiştir. Maksimum oyulma derinliği ve menfez yüksekliği oranı için menfez doluluk oranı, batıklık ve Froude sayısına bağlı bir denklem öne sürmüşlerdir.

Mevcut Çalışmanın Literatürdeki Yeri

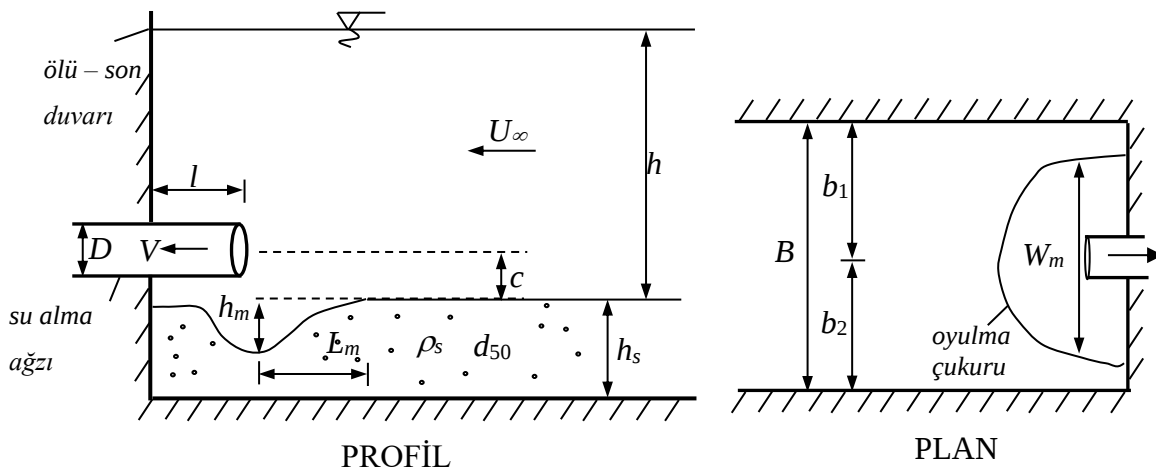
Daha önce yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, literatürde dairesel su alma ağzlarında sediment taşınımının ve bu taşınmadan kaynaklanan oyulma geometrisinin HAD modellemesi ile yeterince incelenmediği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar büyük çoğunlukla köprü ayağı oyulmalarının ve kapak altı akış kaynaklı oyulmaların HAD modellemesi ile incelenmesi üzerine yoğunlaşmış olup orifis akışlarından kaynaklanan oyulmaların HAD incelemesi mevcut değildir. Powell ve Khan (2015)'ın çalışmaları, literatürde mevcut incelenen konuya en yakın çalışma olsa da içerisinde sediment taşınımının nümerik modellemesini veya su alma ağzının farklı konumlarının incelenmesini

barındırmamaktadır. Araştırmacılar deney sonuçlarından elde edilen geometrileri yazılıma dışarıdan tanıtmış ve oyulma geometrisinin hız değerlerine etkisini incelemişlerdir. Ancak literatürde mevcut diğer HAD çalışmalarında da görüldüğü üzere oyulma olayı, içerisinde çok daha fazla belirsizlik barındırmakta olup nümerik olarak öngörülmesi, hidrolik parametrelerden (hız, basınç vb.) farklıdır ve çok daha zordur. Ayrıca bu çalışmada deneysel olarak incelenen, su alma ağzının yatak tabanı ve ölü-sona göre farklı konumlarının oyulma geometrisine etkisi, daha önce deneysel veya nümerik olarak çalışılmamıştır. Bu çalışmada farklı su alma ağzı konumlarının, ağız membasında oluşan oyulmaya etkisi deneysel model ve HAD modeli ile incelenmiş, Flow 3D paket yazılımından faydalanılmış ve yapılan deneysel çalışma sonuçları, modelin doğrulanması için kullanılmıştır. Literatürde daha önce benzer bir çalışma olmadığı gösterilmiştir. Çalışmanın günümüzde kullanım alanı artan HAD modellemesi uygulamalarının gelişmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca literatürde genel kabul gören Shields (1936) yaklaşımının farklı akım koşulları için geliştirilebilmesi hedeflenmektedir.

3. DENEYLER

Çalışmada önceki yapılan deneysel çalışmalardan farklı olarak, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi farklı l (su alma ağzı – ölü-son arası mesafe) ve c (su alma ağzı merkez eksenini – yatak üst yüzeyi arası mesafe) değerleri için oyulma çukuru karakteristikleri deneysel olarak incelemiştir. Bunun yanında l mesafesinin, su alma ağzına sediment girişinin başladığı kritik Froude sayısına etkisi de deneysel olarak çalışılmıştır.

Su alma ağzlarında sediment taşınımının Flow 3D ticari yazılımı kullanılarak modellenmesi çalışması, bu çalışmada yapılan deneysel çalışma sonuçlarına dayandırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın genel çerçevesi, yöntemi ve çalışmadan elde edilen sonuçlar bu bölümde incelenecektir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışma geometrik parametreleri

Oyulma çukuru geometrik karakteristiğini ifade eden maksimum oyulma derinliği, genişliği ve uzunluğu değerlerini etkileyen bağımsız değişkenler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$h_m, W_m, L_m = f_1(c, l, h, b_1, b_2, D, V, U_\infty, (\rho_s - \rho_w), \rho_w, g, \mu_f, h_s, \sigma_g, d_{50}, t) \quad (3.1)$$

Eş. 3.1’de h_m, W_m, L_m sırasıyla maksimum oyulma derinliği, maksimum oyulma genişliği ve maksimum oyulma uzunluğunu ifade etmektedir. h , su yüksekliğini; b_1 ve b_2 , su alma ağzının sağ ve sol duvara olan mesafesini; D , su alma ağzı çapını; V ve U_∞ , sırasıyla su alma ağzı içerisindeki ortalama hızı ve kesit alan ortalamalı yaklaşım hızını; ρ_s ve ρ_w , sırasıyla sediment tanesi ve akışkan yoğunluğunu; g yerçekimi ivmesini; μ_f , akışkan viskozitesini;

h_s sediment katmanı yüksekliğini; σ_g üniformluk derecesini; d_{50} , sediment numunesi ortalama dane çapını ve t , deney zamanının ifade etmektedir. Eş. 3.1 ile verilen değişkenler dikkate alınarak yapılmış olan boyut analizi çalışması aşağıda Eş. 3.2 ile verilmektedir.

$$\frac{h_m, W_m, L_m}{D} = f_2 \left[F_d, R, \frac{c}{D}, \frac{l}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b_1}{D}, \frac{b_2}{D}, \frac{h_s}{D}, \frac{V}{D}, \frac{Vt}{D}, \sigma_g \right] \quad (3.2)$$

Yapılan deneysel incelemelerde h , h_s , b_1 , b_2 , ρ_s , ρ_w , D , ve σ_g değişkenleri sabit tutulmuş olup yalnızca akım sınırlarının, su alma ağzı debisinin ve sediment dane çapının incelenmesi sağlanmıştır. Dey ve Sarkar (2006), $\sigma_g < 1,4$ olması durumunda sedimentin üniform kabul edilebileceğini ifade etmişlerdir. Kullanılan iki numunenin de üniformluk derecelerinin 1,17 ve 1,18 olmasından ötürü modelleme çalışmasında bu numuneler üniform kabul edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada pompa ile çekilen su kanalın membasına geri iletilerek akış sağlandığından V/U_∞ değeri sabit bir değere eşit olacaktır ve bu nedenle ihmal edilebilir. Bu durum Eş. 3.3 ile gösterilmektedir.

$$Q = \frac{V\pi D^2}{4} = U_\infty B h; \quad \frac{V}{U_\infty} = \frac{4Bh}{\pi D^2} \quad (3.3)$$

Literatürde Roberts ve Matthews (1984), Köse ve Yanmaz (2010), Hoffmans (1998), Rajaratnam ve Manzurek (2002) tarafından yapılmış jet akışları ile ilgili mevcut çalışmalar, Reynolds sayısının 2 000'den büyük olması durumunda etkisinin ihmal edilebileceğini bildirmektedir. Yapılan deneylerde Reynolds sayısının en küçük değerinin yaklaşık 23 900 olması sebebiyle etkisi göz önüne alınmamıştır. Madadi, Rahimpour ve Qaderi (2016) tarafından yapılan, su alma ağızları membasında oyulmanın deneysel incelenmesi çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da denge durumu, 2 saatlik süre içerisinde oyulma çukuru içerisinde 2 mm'den daha fazla değişim olmaması olarak tanımlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada oyulma geometrisinin 12 saatlik deney sonunda denge durumuna geldiğine karar verilmiş ve bu süre deney süresi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle oyulma geometrisi ifade eden parametreler hesaplanırken Vt/D değişkeni ihmal edilebilir.

Tüm bu açıklamalar ve kriterler dikkate alındığında boyut analizi sadeleşmiş hali Eş. 3.4 ile verilmiştir.

$$\frac{h_m, W_m, L_m}{D} = f_2 \left[F_d, \frac{c}{D}, \frac{l}{D} \right] \quad (3.4)$$

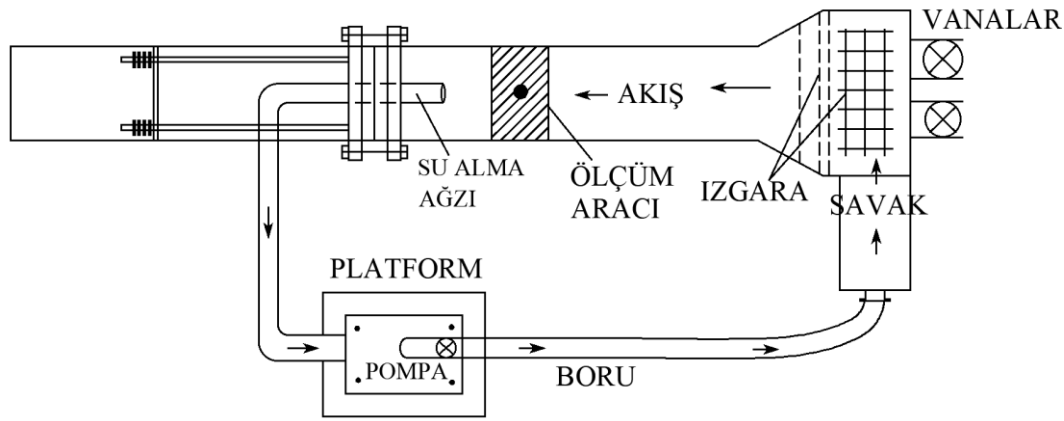
Yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların incelenmesi ve yorumlanması, boyut analizi sonucu elde edilen bu değişkenler ve değişkenlerin oyulma çukuru parametrelerine etkisi incelenerek yapılmıştır.

3.1. Deney Yöntemi

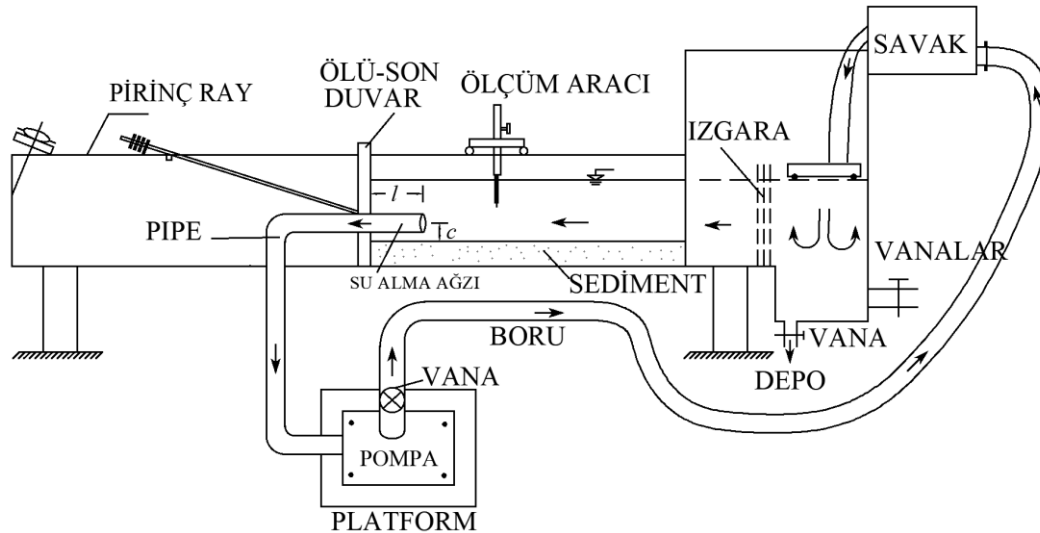
Deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.2 ve Resim 3.1’de gösterilmiştir. Deneylerde yatay ve dikdörtgen kesite sahip bir kanal kullanılmıştır. Kanalin tabanı camdan yapılmış olup, tabandaki sediment hareketinin rahat gözlemlenebilmesi için her iki yanı güçlendirilmiş cam malzemeden, geri kalan kısmı ise galvanizli sac malzemeden imal edilmiştir. Kanal tabanının eğimi imalatından dolayı sıfırdır, yani kanal tabanı yataydır. Kanala giren akımın üniform ve çevrintisiz olması amacıyla kanal başına enerji kırıcı ızgaralar yerleştirilmiştir. Bu yüzden kanalın çalışma boyu 7,5 m’dir. Kanalin en başında bir hazne bulunmaktadır. Hazne kısmı, su pompasının depodan kanala getirmiş olduğu suyun kanala verilmeden önce depolandığı kısımdır. Hazne kısmının akabinde akımda olası gerçekleşebilecek herhangi bir rahatsızlığın kanal içerisinde hissedilmemesini sağlayacak akım düzenleyiciler yer almaktadır. Su pompasından gelen su, hazne içerisinde depolanmadan önce haznenin üzerinde bulunan üçgen savağa gelerek üçgen savaktan hazneye aktarılmaktadır. Üçgen savak yardımıyla su pompası ile çekilen debi ölçülmektedir. Kanalin içerisinde pleksiglas malzeme ile ölü-son oluşturulmuştur. Ölü son kanaldaki raylardan destek alınarak sabitlenmiştir. Ölü-son ve su alma ağzı Resim 3.2’de görülmektedir. Kullanılan pompa ile maksimum 6,0 l/s debi çekilmekte olup pompa emme borusu, kanalın sonuna doğru yerleştirilen ve pleksiglas malzemeden imal edilen ölü-son duvarı içerisinden geçerek su alma ağzını oluşturmaktadır. Kanal genişliği (B) 50 cm, su alma ağzı merkez ekseninin sağ ve sol duvarlara mesafeleri (b_1 ve b_2) ise birbirlerine eşit ve 25 cm’dir. Su yüksekliği (h) 25,2 cm değerinde sabit tutulmuştur. Dairesel su alma ağzı çapı (D) 5,22 cm olup ortalama hız değerleri pompa ile çekilen debi ile hesaplanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda iki farklı çapta sediment numunesi ve 1,0 – 6,0 l/s arası debi değerleri kullanılmıştır. İncelenen sediment numunelerinin yoğunluğu (ρ_s) 2 650 kg/m³, ortalama dane çapı (d_{50}) 1,25 ve 0,62 mm, sediment katmanının yüksekliği (h_s) ise 17,7 cm’dir. Daha

önce yapılan çalışmalarda olduğu gibi oyulma geometrisini temsil eden, W_m , L_m ve h_m parametreleri incelenmiştir.

Yapılan deneylerde sediment yüzeyi – su serbest yüzeyi mesafesi (h) ve sediment kalınlığı (h_s) değerleri sabit tutulmuş olup sırasıyla $h/D = 4,74$ ve $h_s/D = 3,33$ ($h = 25,2$ cm ve $h_s = 17,7$ cm) boyutları kullanılmıştır. Serbest su seviyesinin belirlenmesinde pompa ile çekilecek olan maksimum debide yüzey çevrintilerinin oluşmaması dikkate alınmıştır. Kanal tabanına serilen sediment kalınlığında ise maksimum oyulma koşullarında sediment kalınlığının oyulma parametrelerini etkilememesi göz önünde bulundurulmuş ve gözlem ile belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik (a) plan (b) profil görünümü



Resim 3.1. Deney düzeneğinin yüksek bir noktadan çekilmiş fotoğrafı



Resim 3.2. Deney düzeneğinin su alma ağızı ve ölü-son yakınlardan çekilmiş fotoğrafı ($l/D = 0,00$)

Su alma ağzının kanal içerisindeki konumu, deney düzeneğine göre değişkenlik göstermektedir. Yapılan çalışmada su alma ağzı membasında oluşan oyulmanın aşağıda maddeler halinde özetlenen parametrelere bağlı değişimi incelemiştir.

- su alma ağzı – ölü-son (l) mesafesi
- su alma ağzı merkez eksen – kanal tabanı (c) mesafesi
- Granülometrik analiz sonucu danelerin %50'sinin geçtiği elek medyan çapı (d_{50})
- Su alma ağzından çekilen su debisi (Q)

Değişken su alma ağzı koşullarının oyulmaya etkileri iki farklı dane çapına sahip kuvars kum numune üzerinde, 1,0 l/s – 6,0 l/s arasında değişen debiler ile çalışmıştır. Farklı dane çapına sahip numunelerin birbirleri ile kıyaslanmasında akım koşulları ve numune özelliklerinin bir arada değerlendirilmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda yapılan incelemelerde Froude sayısı ile densimetrik Froude sayısı (F_d) birlikte kullanılmıştır. Densimetrik Froude sayısı, Froude sayısının ($F = V/(gR_h)^{0.5}$) hidrolik yarıçap (R_h) kısmının sediment fiziksel özellikleri ile değiştirilerek modifiye edilmesi ile elde edilmektedir. Densimetrik Froude sayısı aşağıda verilen Eş. 3.5'te verilmektedir.

$$F_d = \frac{V}{\sqrt{g \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_{50}}} \quad (3.5)$$

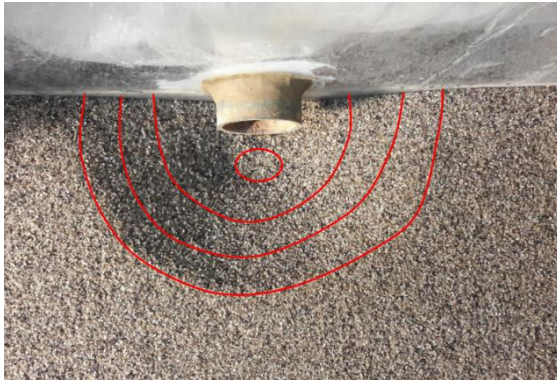
İncelenen debi değerine bağlı olarak, su alma ağzı için Froude sayısı değeri (F) gibi Reynolds sayısı'nda ($Re = VR_h/\nu$) değişkenlik göstermektedir. Verilen eşitliklerde V ortalama akış hızı, g yerçekimi ivmesi, ρ_s ve ρ_w sırasıyla sediment ve su yoğunlukları, d_{50} sediment ortalama dane çapı ve ν kinematik viskozite değeridir. Deneysel çalışma kapsamında incelenmiş olan parametreler ve sayısal aralıkları özetlenmiş ve Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel parametreler ve sayısal aralıkları

c/D	l/D	F_d	d_{50}/D	h/D	h_s/D	F	R
0,5 – 1,5	0 – 3	5 – 29	0,0118 – 0,0239	4,74	3,33	0,65 – 4	$2,3 \times 10^4$ - $1,44 \times 10^5$

Deneylerde su alma ağzı debisi $\pm \%2$ hassasiyete sahip üçgen ölçüm savağı ile, oyulma derinlikleri ise $\pm 0,1$ mm hassasiyetli iğne uçlu limnimetre ile ölçülmüştür.

Boyut analizi çalışmasının yapıldığı kısımda da ifade edildiği üzere oyulma geometrisinin 12 saatlik deney sonunda denge durumuna geldiğine karar verilmiş ve bu süre deney süresi olarak belirlenmiştir. 12 saatlik deney süresi sonunda pompa kapatılıp mevcut su kanaldan tahliye edilmiştir. Su alma ağzı membasında oluşan oyulma derinlikleri iğne uçlu limnimetre ile ölçülmüş ve oyulma geometrisi için eş derinlik eğrileri elde edilmiştir. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3. Oyulma geometrisine ait derinlik kontürleri

Yapılan deneysel çalışmada iki farklı kohezyonsuz sediment numunesi kullanılmış olup bu numunelerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Kullanılan sediment numuneleri seçilirken ortalama dane çapı değerlerinin birbirlerinden yeterince farklı olmasına dikkat edilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan numuneler ve özellikleri

Sediment Özellikleri	Birim	Numune 1	Numune 2
Yoğunluk (ρ_s)	kg/m ³	2 650	2 650
Ortalama Dane Çapı (d_{50})	mm	1,25	0,62
Üniformluk Derecesi ($\sigma_g = d_{84.1}/d_{15.9}$)	-	1,17	1,18
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)	derece	35°	35°

Yapılan deneysel çalışmada; Numune 1 için 70 adet, Numune 2 için ise 49 olmak üzere toplam 119 adet farklı akım durumu için deney yapılmıştır. Yapılan deneyler özet olarak Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Yapılan deneyler ve özellikleri

NUMUNE	c/D	l/D	Q (l/s)	F_d
NUMUNE 1	0,50	0,00	1,07	3,51
			2,11	6,95
			3,14	10,33
			4,14	13,61
			5,15	16,92
			5,91	19,41
		0,50	1,12	3,69
			2,05	6,74
			3,03	9,97
			3,98	13,09
			5,01	16,45
			5,91	19,42
		1,00	1,00	3,30
			2,12	6,97
			3,07	10,10
			4,00	13,16
			4,96	16,29
			6,00	19,72
		1,50	1,01	3,31
			2,00	6,58
			3,16	10,39
			3,99	13,12
			5,14	16,88
			5,98	19,63
		2,00	1,01	3,31
			2,02	6,63
			3,02	9,93
			4,00	13,16
			5,00	16,41
			5,91	19,42
	0,75	0,00	3,51	11,52
			4,04	13,26
			4,57	15,01
			5,01	16,45
			5,51	18,10
			6,10	20,03
		0,50	3,00	9,87
			3,51	11,52
			4,03	13,23
			4,49	14,75
			5,01	16,45
			5,51	18,10
		1,00	6,00	19,71
			3,00	9,87
			3,51	11,52
			4,00	13,16
			4,52	14,86
			5,08	16,69
			5,59	18,35

Çizelge 3.3. (devam) Yapılan deneyler ve özellikleri

NUMUNE	c/D	l/D	Q (l/s)	F_d
NUMUNE 1	0,75	1,00	5,95	19,55
	1,00	0,00	5,47	17,98
			6,04	19,85
			3,00	9,86
		0,50	3,53	11,58
			4,03	13,23
			4,50	14,78
			5,00	16,41
			5,56	18,27
			5,91	19,42
			5,01	16,45
		1,00	5,50	18,06
			5,94	19,50
			5,01	16,45
		1,50	5,51	18,10
			5,92	19,46
	1,25	0,50	5,48	18,02
			5,96	19,59
		1,00	5,01	16,45
			5,50	18,06
			5,98	19,63
NUMUNE 2	0,50	0,00	1,01	4,72
			2,00	9,35
			3,00	14,01
			4,00	18,68
			5,01	23,36
		0,50	6,33	29,52
			1,06	4,94
			3,06	14,30
			5,01	23,36
		1,00	6,18	28,82
			1,04	4,87
			2,99	13,97
			5,01	23,36
		1,50	6,19	28,88
			1,23	5,75
			3,07	14,34
			5,03	23,47
		2,00	6,18	28,82
			1,10	5,11
			3,06	14,26
			5,01	23,36
		3,00	6,10	28,44
			1,10	5,11
			2,98	13,89
			4,98	23,25
			6,06	28,25
	1,00	0,00	5,01	23,36
			5,51	25,70

Çizelge 3.3. (devam) Yapılan deneyler ve özellikleri

NUMUNE	c/D	l/D	Q (l/s)	F_d
NUMUNE 2	1,00	0,00	6,42	29,97
		0,50	4,06	18,93
			5,01	23,36
			6,34	29,58
			4,03	18,78
		1,00	5,01	23,36
			6,35	29,65
			4,04	18,83
		1,50	5,01	23,36
			6,18	28,82
			4,00	18,68
		2,00	5,19	24,20
			6,20	28,94
			4,17	19,47
		3,00	5,01	23,36
			6,11	28,50
			6,22	29,01
	1,50	0,00	6,22	29,01
		0,50	6,42	29,97
		1,00	6,38	29,78
		1,50	6,15	28,69
		2,00	6,18	28,82

3.2. Oyulma Mekanığı

Yapılan deneylerde sediment taşınımının ilk 1 – 2 dakikalık zaman zarfında radyal akış etkisiyle olduğu gözlemlenmiştir. Bu taşınımın, su alma ağzı membasındaki oyulma derinliğinin artması ile etkisini kısa sürede kaybettiği ve yerini yüzey altında oluşan rastgele çevrıntilerden kaynaklı sediment taşınımına bıraktığı görülmüştür. Rastgele çevrıntilerin deney boyunca oluşmaya devam ettiği, ancak oyulma derinliği arttıkça sediment danelerini su alma ağzına kadar taşıyamadığı, sediment danelerinin oyulma alanı içinde yalnızca yer değiştirdiği ve oyulma geometrisin 12 saatlik deney süresi sonunda denge durumuna geldiği gözlemlenmiştir. Deney süresince yüzey altında meydana gelen çevrıntiler, dolayısıyla ağzın membasında oluşan oyulma geometrisi ağız konumu ve ağzın çevresindeki sınır ve engellerden etkilenmektedir. Deney esnasında yapılan gözlemler sırasıyla aşağıda verilmiştir.

1. Sediment danesinin harekete başlaması için gerekli kritik Froude sayısının su alma ağzı pozisyonuna, çekilen debiye ve sediment dane çapına bağlı değişim gösterdiği incelenmiştir. Farklı fiziksel özelliklere bağlı olarak yatak taşınımının olduğu kritik

Froude sayısı değişiklik göstermektedir.

2. Deneylerde sediment taşınım hareketinin başladığı ilk 1 – 2 dk içerisinde taşınım radyal olarak gerçekleşmektedir. Küçük Froude sayılarında taşınım yalnızca bu mekanizma ile sağlanmaktadır.
3. Deney başlangıç anından yaklaşık 2 – 5 dk sonra radyal taşınım yerini rastgele oluşan çevrintilerden kaynaklanan sediment taşınımına bırakmaktadır. Bu taşınım deney sonuna kadar etkinliğini sürdürmektedir. Su alma ağzından çekilen debinin ve bununla beraber Froude sayısının artması ile serbest yüzey altında, kanal tabanı ile su alma ağzı arasında çevrintilerin oluşma sıklığının ve çevrintilerin kuvvetinin arttığı not edilmiştir. Oluşan çevrintilerin sıklığı ve konumu rastgele olmakla beraber çoğunlukla su alma ağzının hemen altında ve çevresinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
4. Deneyin bitirilmesi öncesinde oyulma derinliğinin yeterince artması ile rastgele oluşan çevrintilerin güçlerinin sediment danesini su alma ağzına taşımaya yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Çevrintiler yalnızca oyulma geometrisi içerisinde sediment danelerini bir noktadan başka bir noktaya taşıyarak periyodik değişimler gözlemlenmeye başladığında ve oyulma alanı içerisindeki değişim 2 mm'den daha az bir seviyeye geldiğinde deney durdurulmuştur.

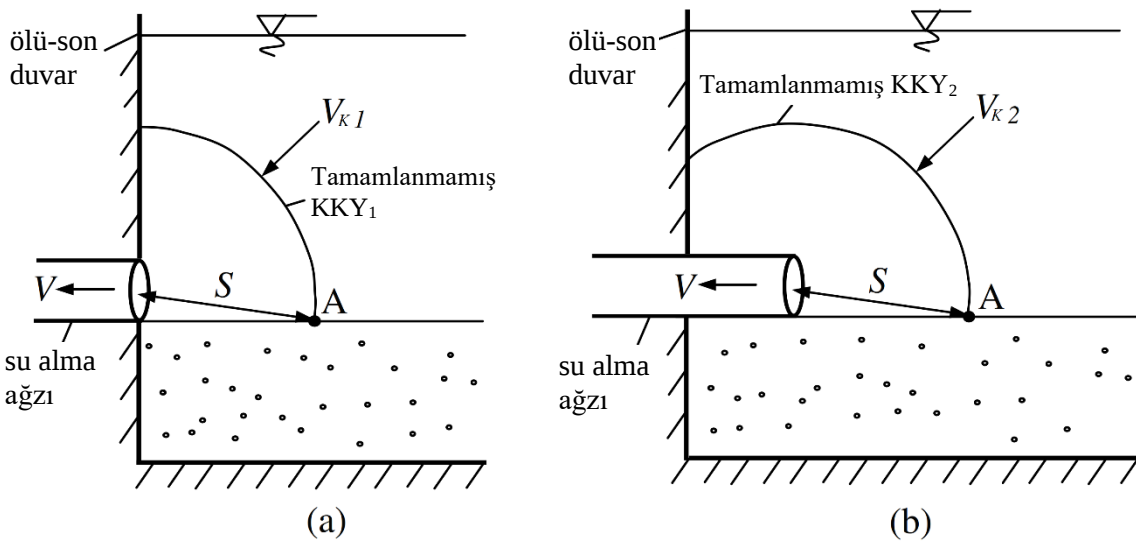
Yukarıda sırası ile verilen deneysel gözlemler sonucunda, sediment taşınımında etkin rol oynayan radyal akım ve yüzey altı çevrinti etkileri incelenmiştir.

3.2.1. Radyal hız dağılımının sediment taşınımına etkisi

Yıldırım ve Kocabaş (1995), potansiyel akım kabulünün bir sonucu olarak su alma ağzı akımı dolayısıyla akım alanında hayali küresel kuyu yüzeylerinin (KKY) var olacağını göstermiştir. Bu kuyu yüzeylerinin merkezleri su alma ağzı merkezi olup yüzeylerden geçen debi de, kütlenin korunumu yasasından ötürü ağız debisi ile aynı olmak zorundadır. Bu durum KKY'nin alanı küçüldükçe, KKY üzerinde oluşan radyal hızların artmasına neden olacaktır. Potansiyel akım çözümüne göre her bir KKY üzerinden geçmesi gereken debi Eş. 3.6 ile verilmiştir.

$$Q = A_K V_K \quad (3.6)$$

Verilen eşitlikte A_K net etkin küresel kuyu yüzeyi (KKY) alanını, V_K ise KKY üzerindeki radyal hızı ifade etmektedir. Şekil 3.4'te verilen şematik KKY gösterim ile aynı S çapına sahip iki kuyu yüzeyi üzerindeki radyal hız üzerinde, ölü-son duvarının etkisi incelenmiştir. A noktasındaki radyal KKY alanının daha büyük olması nedeniyle potansiyel akış kabulüne göre $l/D > 0,00$ durumunda daha az olacaktır. $V_{K1} > V_{K2}$ olacağından su alma ağzı çevresinde oluşan oyulmanın genişliği ve uzunluğu $l/D = 0,00$ durumunda daha büyük olacaktır. Çevrinti etkisi ise su alma ağzı altında ve yakın çevresinde gözlemlendiğinden, oyulma derinliği üzerinde bir etkiye sahip olup aşağıda açıklanmıştır.

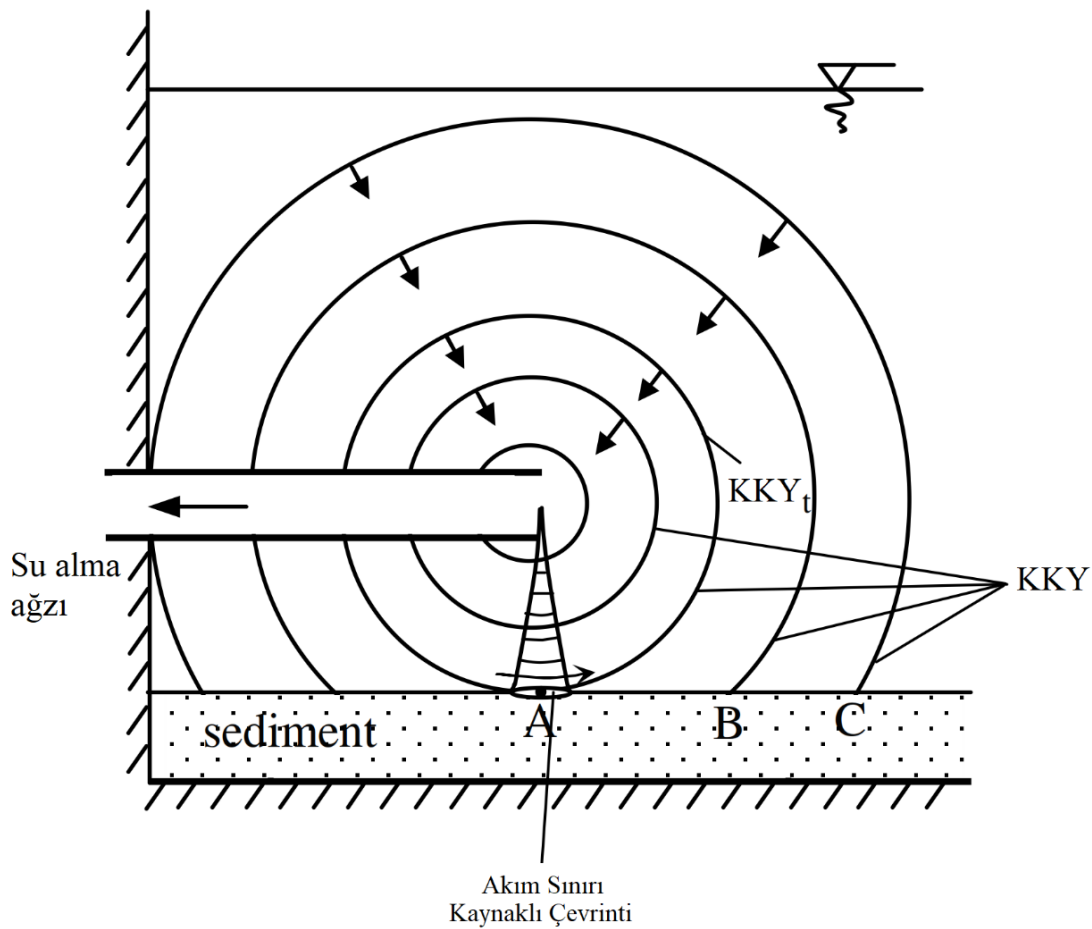


Şekil 3.4. (a) $l/D = 0,00$ ve (b) $l/D > 0,00$ su alma ağzı konumları için KKY'nin gösterilmesi ve ölü-son duvarının etkisi

3.2.2. Yüzey altı çevrintilerin sediment taşınımına etkisi

Deney başlangıcından yaklaşık 2 – 5 dk sonra radyal akım kaynaklı taşınım etkisini yitirdiğinde su alma ağzı altı ve çevresinde yüzey altı çevrintiler gözlemlenmeye başlar ve bu çevrintiler deney sonuna kadar devam eder. Yüzey altı çevrinti oluşumu Şekil 3.5 ile verilen şematik gösterim ile ifade edilmektedir. Şekilde sediment yüzeyine teğet olan küresel çekim yüzeyi KKY_t olarak, diğer küresel kuyu yüzeyleri ise KKY olarak gösterilmiştir. Verilen şekilde sediment yüzeyinde işaretlenen A, B ve C noktalarında hız sıfıra eşit olmalıdır. Bu durum su alma ağzına doğru çökmekte olan ve sediment yüzeyine teğet olan KKY_t üzerindeki hızın düşmesine ve sediment yüzeyine temas etmeyen, su alma ağzına daha yakın olan kuyu yüzeyleri ile arasındaki hız farkının daha fazla artmasına neden olur. KKY_t üzerindeki bu bozulma su alma ağzı altında ve yakınlarında büyük hız gradyanlarının ve

dolayısıyla güçlü çevrintilerin oluşmasına neden olmaktadır. Yüzey altı çevrintileri, ölü-son duvarı gibi sınırların oluşturduğu sürtünme etkilerine karşı hassastır ve bu tip etkiler çevrintilerin oluşmasına engel olabilir. Su alma ağzı ile ölü-son duvarı arasındaki mesafe arttıkça sınır etkilerinden kaynaklanan sürtünme etkileri azalacak ve çevrintilerin oluşma sıklığı ve şiddeti artacaktır. Bu durum maksimum oyulma derinliği üzerinde etkilidir. Şekil 3.8’de oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişimi gösterilmiştir. Ölü-son duvarından kaynaklı sürtünme etkisi; $F_d = 19$ değeri için $l/D = 0,50$ konumunda, $F_d = 29$ değeri için $l/D = 1,00$ konumunda çevrintiler üzerindeki etkisini kaybetmiştir.



Şekil 3.5. Yüzey altı çevrinti oluşumunun şematik gösterimi

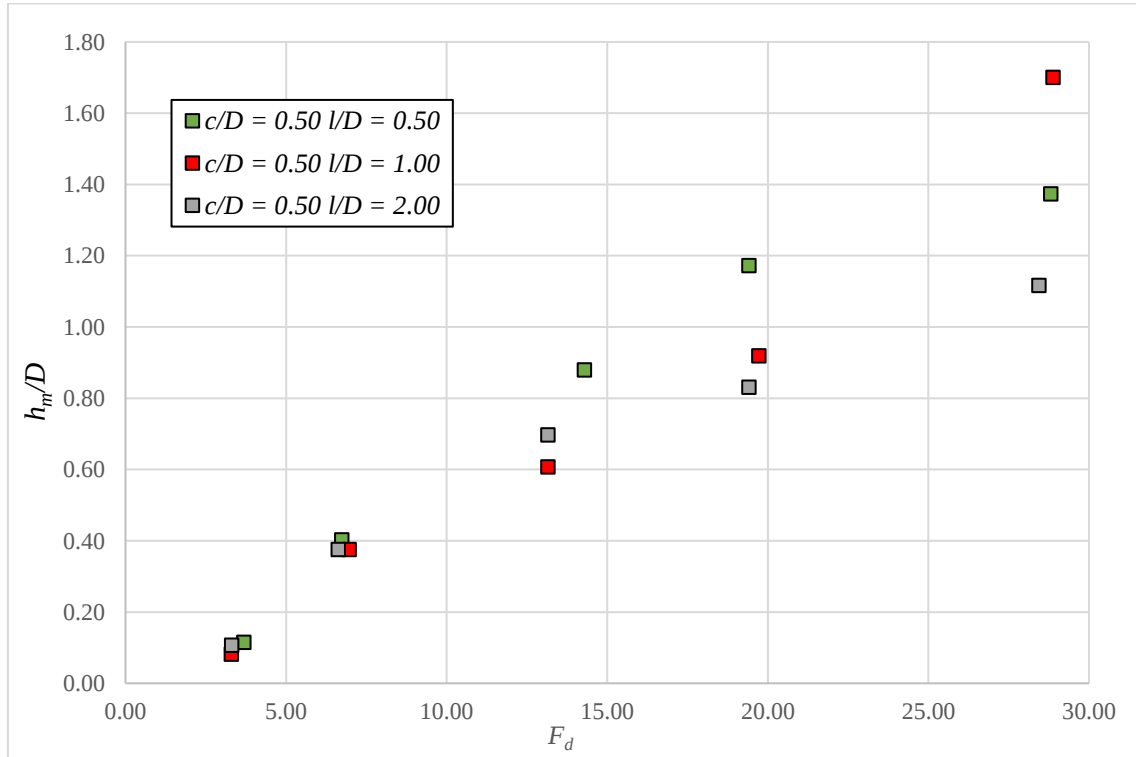
3.3. Deney Sonuçları

İki farklı ortalama dane çapına sahip numuneler kullanılarak yukarıda verilen farklı fiziksel şartlar altında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir.

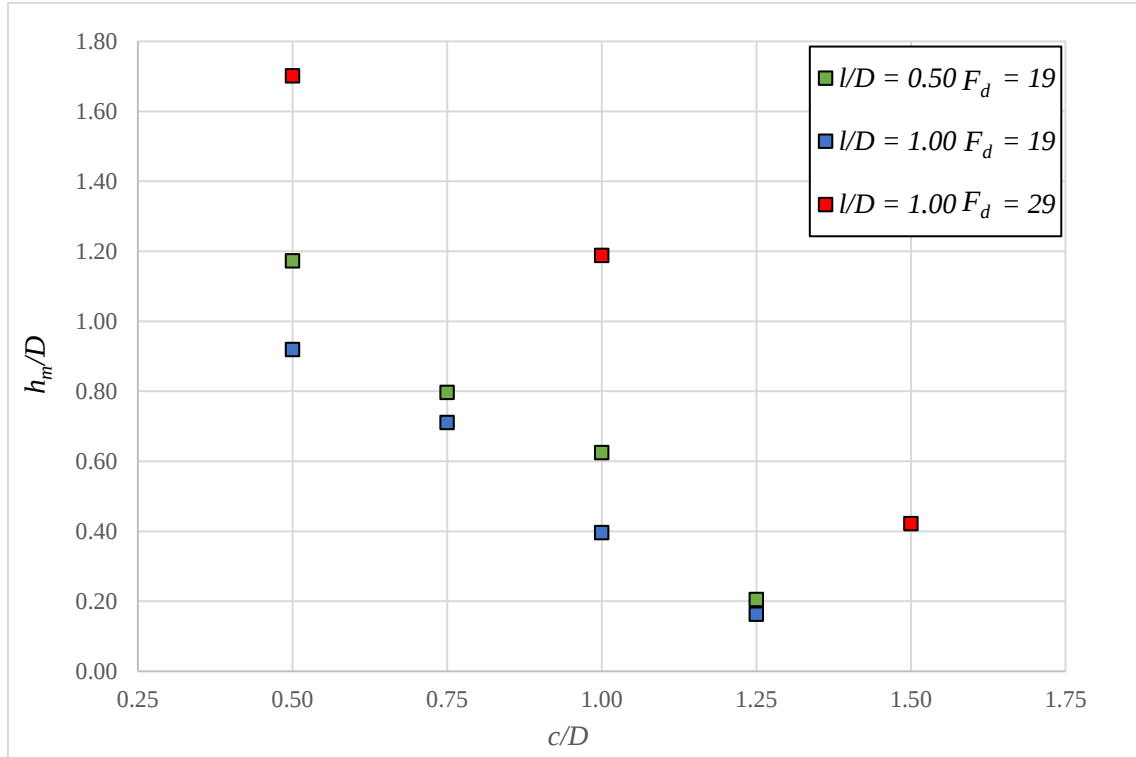
- Yapılan çalışmada sediment taşınımına etkiyen iki farklı faktör olduğu görülmüştür. Bu faktörlerden birincisi ağız membasındaki akım hızı, ikincisi ise yüzey altı çevrıntiler olup bu olguların farklı sınır etkileri altında davranışları ve oyulma geometrisine etkileri incelenmiştir.
- Su alma ağzının sınır koşullarına göre konumu ve ortalama dane çapı etkilerinden bağımsız olarak su alma ağzından çekilen debinin artması densimetrik Froude sayısı değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum ile birlikte oyulma geometrisinin genişliğinin, uzunluğunun ve derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Ortalama dane çapı değerinin artması ise densimetrik Froude sayısının azalmasına dolayısıyla oyulma çukuru genişliğinin, uzunluğunun ve derinliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Yapılan bu deneysel gözlem Şekil 3.6, Şekil 3.9 ve Şekil 3.12 ile verilen, sırasıyla maksimum oyulma derinliğinin, genişliğinin ve uzunluğunun F_d ile değişim grafiklerinde görülebilir.
- Su alma ağzı – kanal yatağı arası mesafe (c) arttıkça yatakta oluşan kayma gerilmeleri ve yüzey altında oluşan çevrıntilerin kuvvetlerinin azaldığı ve dolayısıyla çukurun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Yapılan bu deneysel gözlem Şekil 3.7, Şekil 3.10 ve Şekil 3.13 ile verilen, sırasıyla maksimum oyulma derinliğinin, genişliğinin ve uzunluğunun c/D ile değişim grafiklerinde görülebilir.
- Ölü-son duvarın yarattığı sınır sürtünme etkisinden ötürü $l/D = 0$ durumunda maksimum oyulma derinliğinin iki sediment numunesi için de en düşük değerde olduğu gözlemlenmiştir. Ölü-son duvarı ve su alma ağzı arası mesafe artırıldığında ($l/D = 0,5 \sim 1,0$) ölü-son duvarı sürtünme etkisinin azalmasından dolayı, oyulma derinliğinin en yüksek değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Oyulma derinliği, $l/D > 0,5 \sim 1,0$ durumunda maksimum derinlikten daha düşük bir değere düşer, $l/D > 1,5 \sim 2,0$ değerlerine gelindiğinde ise aynı c/D ve densimetrik Froude sayıları için sabit kalmaktadır. Bu durum yüzey altı çevrıntiler ile radyal hız etkilerinin denge durumuna gelmesi olarak açıklanabilir. $l/D < 0,5$ durumunda daha düşük oyulma derinliklerinin gözlemlenmesi ise yüzey altı çevrıntilerin üzerinde ölü-son duvarının sürtünme etkilerinin radyal hız etkilerinden daha kuvvetli olması nedeniyledir. Yapılan bu deneysel gözlemler Şekil 3.8, Şekil 3.11 ve Şekil 3.14 ile verilen, sırasıyla maksimum oyulma derinliğinin, genişliğinin ve uzunluğunun l/D ile değişim grafiklerinde görülebilir.
- Yüzey altı çevrıntilerin büyük oranda su alma ağzı altında oluşmasından ötürü, oluşan

oyulma çukuru genişliği ve uzunluğu üzerindeki etkisi, oyulma derinliğinde olduğu kadar fazla değildir. Maksimum uzunluk ve genişlik parametrelerinde etkin taşınım akım hızından kaynaklı sediment daneleri üzerindeki sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri olup çevrıntiler su alma ağzı altında olduğundan, su alma ağzından uzak noktalarda çevrıntilerin taşınımına etkisi düşüktür.

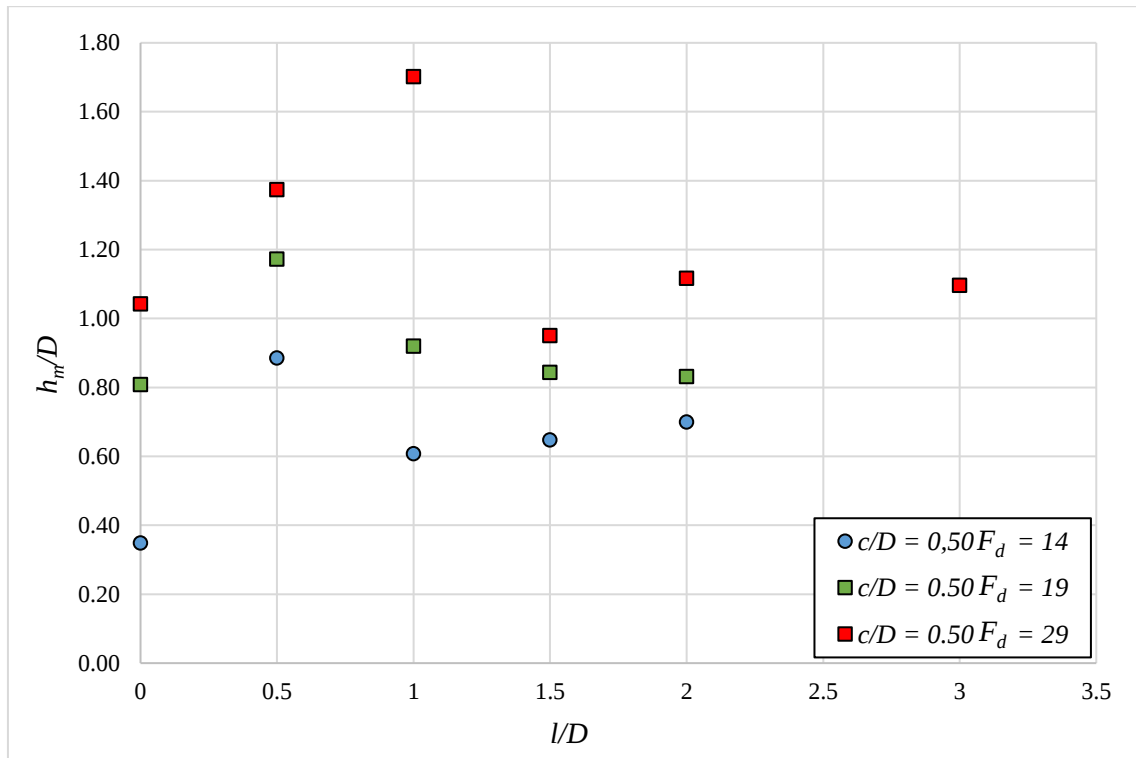
- Maksimum oyulma derinliğinin l/D değeri ile değişimi için yapılan çıkarımlar, sediment danesinin su alma ağzına ilk girişi durumunu tanımlayan kritik F_d sayısı için de geçerlidir. Sediment danesinin su alma ağzına girişinin başladığı kritik Froude sayısı, oyulma derinliğinin maksimum olduğu l/D değerinde minimum olmaktadır ve l/D arttıkça bu değerden bağımsızlaşır (Şekil 3.15).



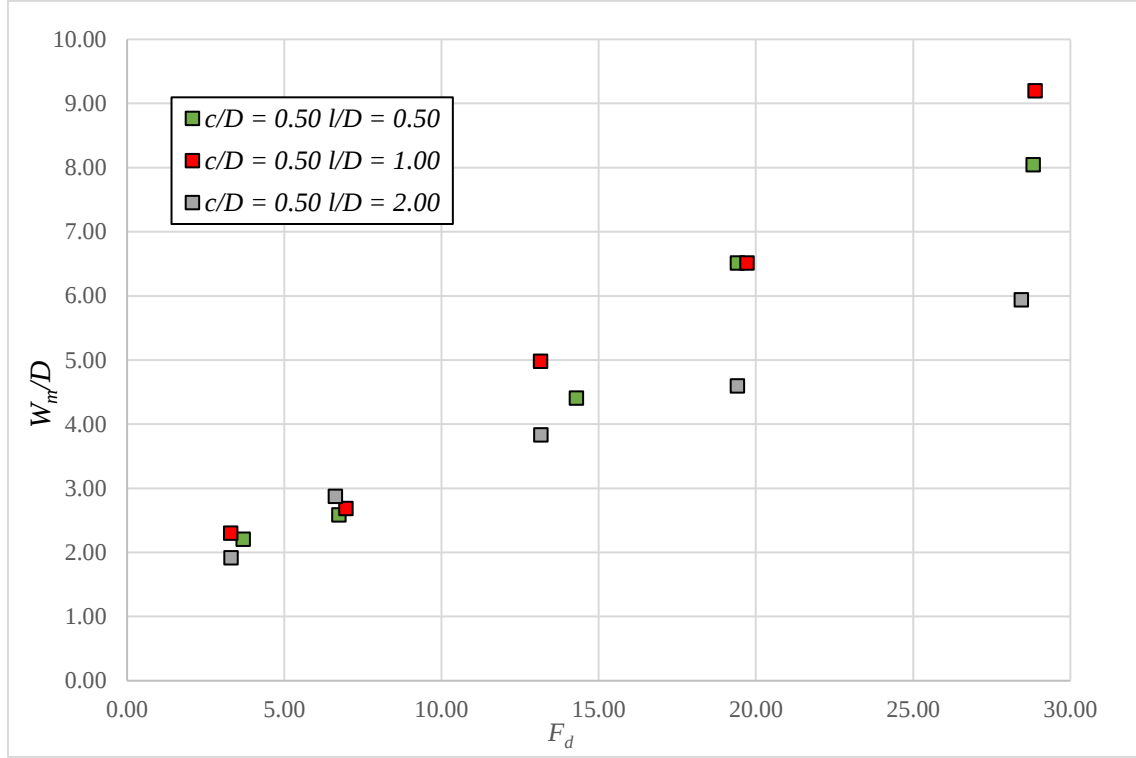
Şekil 3.6. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma derinliğinin F_d değerine göre değişimi



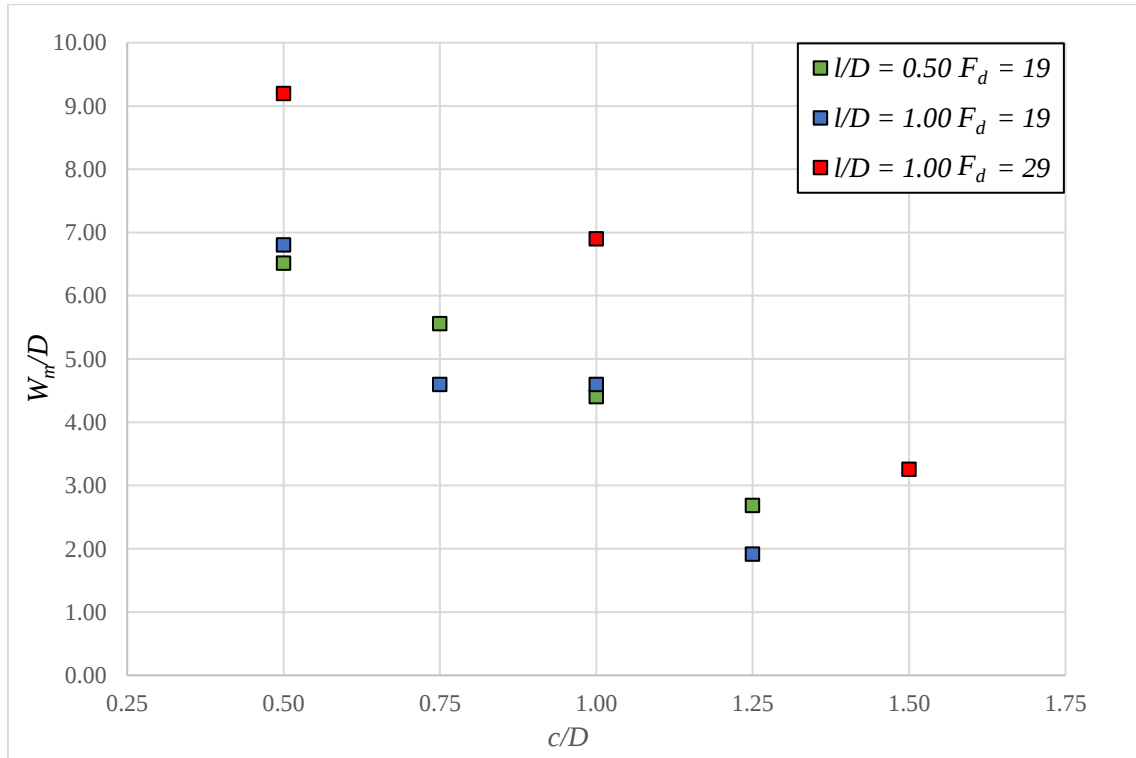
Şekil 3.7. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma derinliğinin c/D değerine göre değişimi



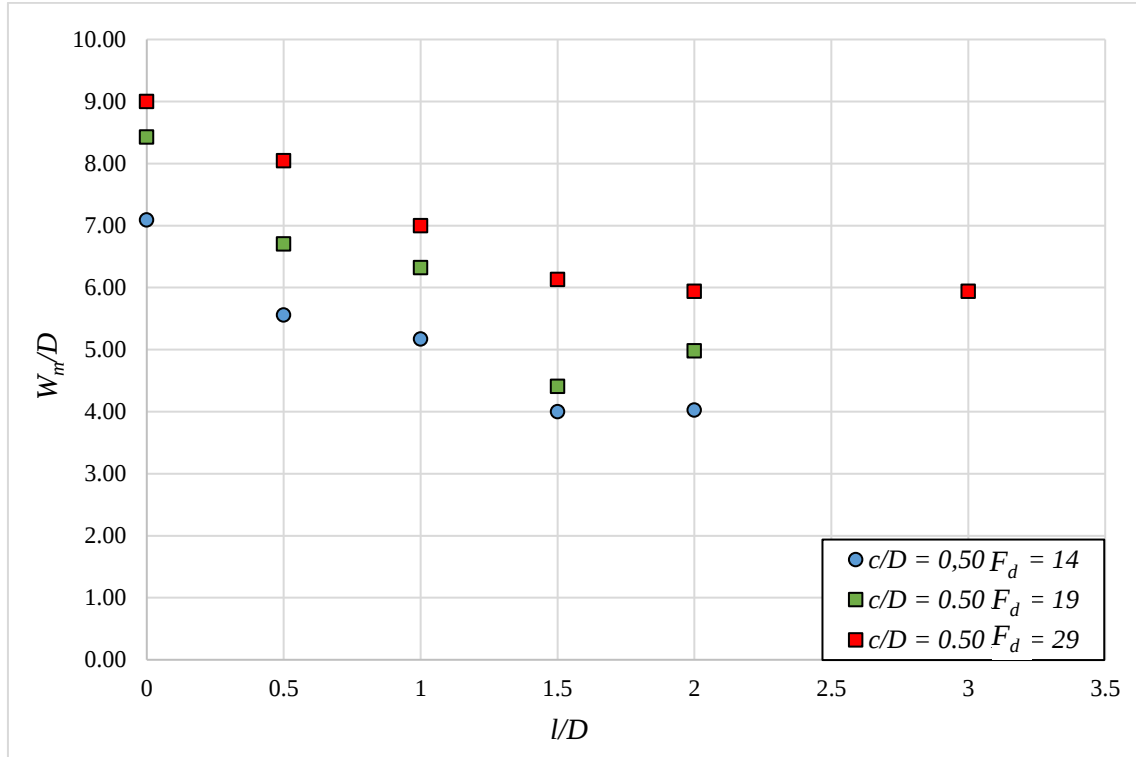
Şekil 3.8. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişimi



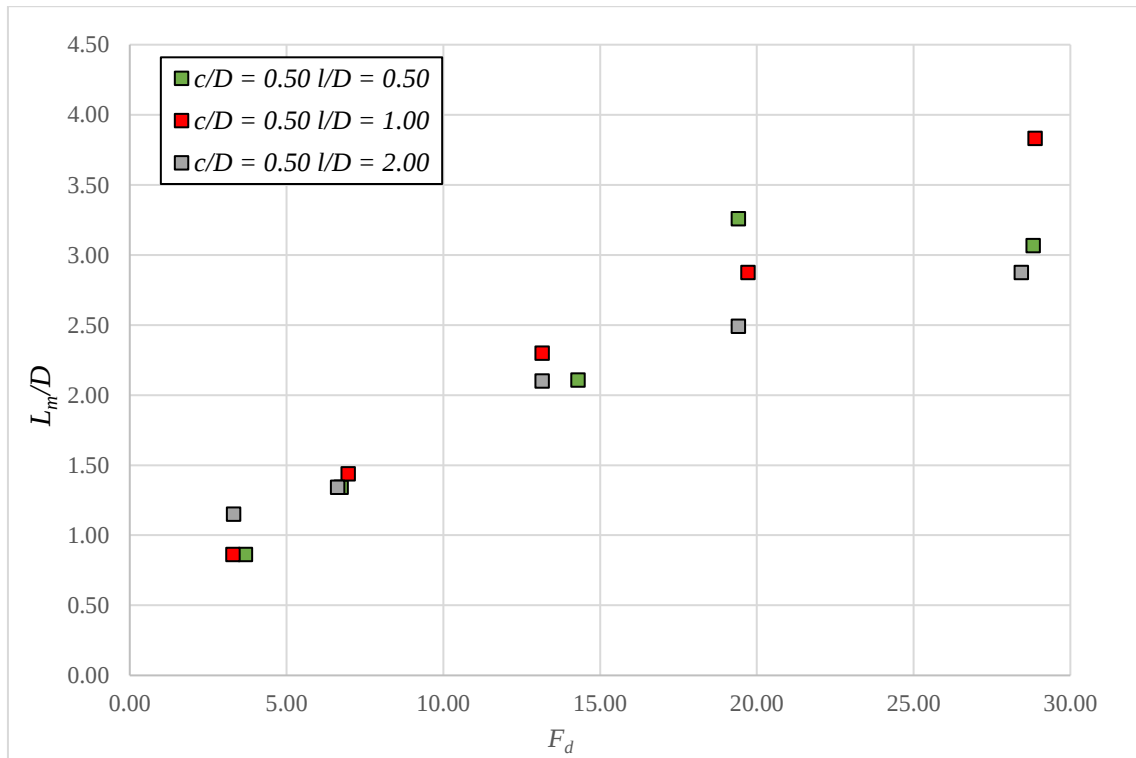
Şekil 3.9. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma genişliğinin F_d değerine göre değişimi



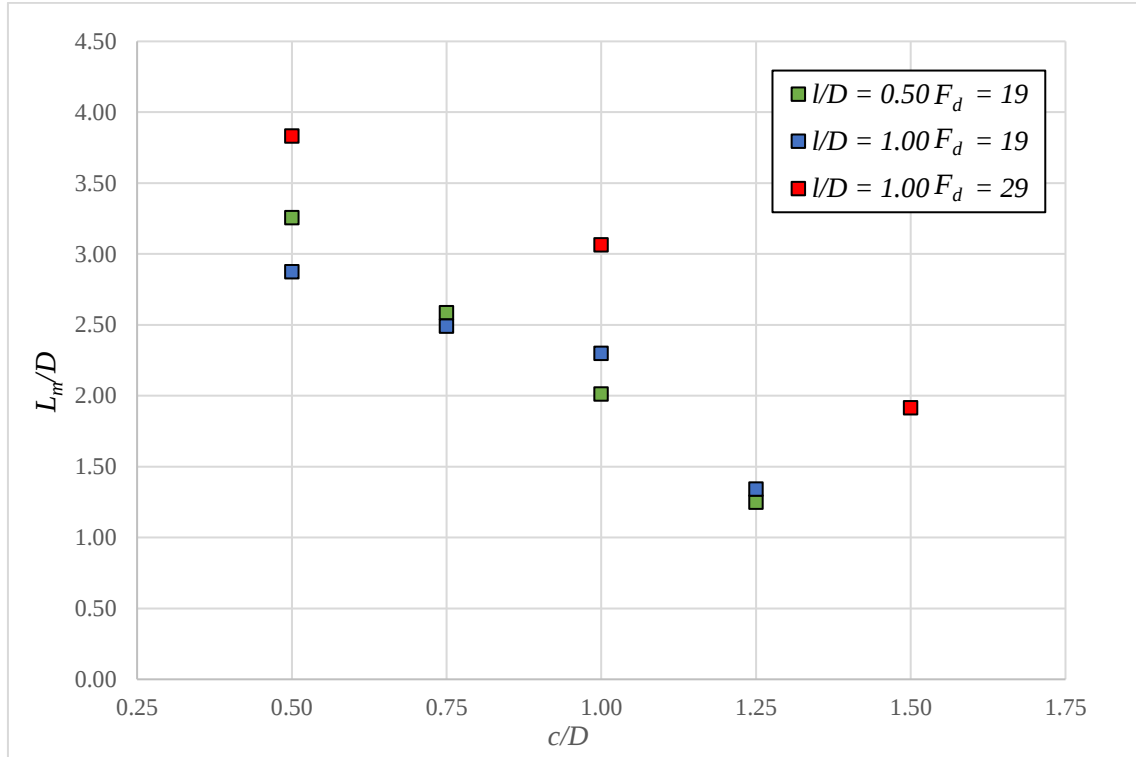
Şekil 3.10. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma genişliğinin c/D değerine göre değişimi



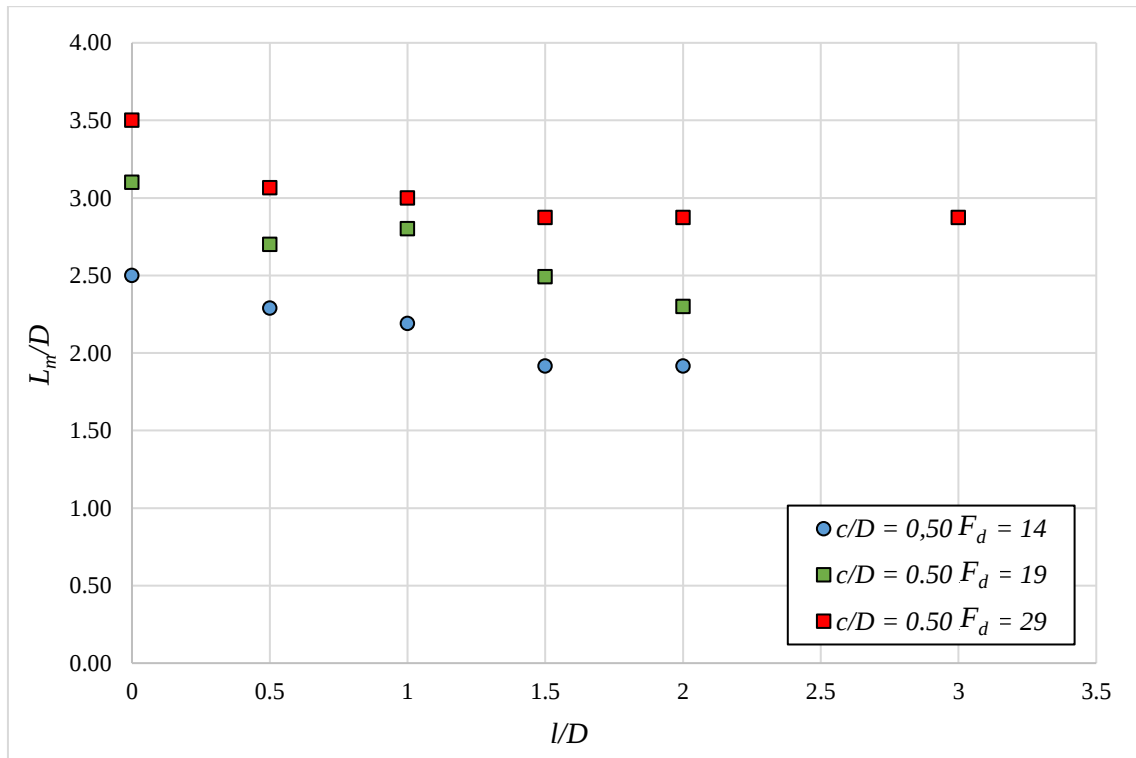
Şekil 3.11. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma genişliğinin l/D değerine göre değişimi



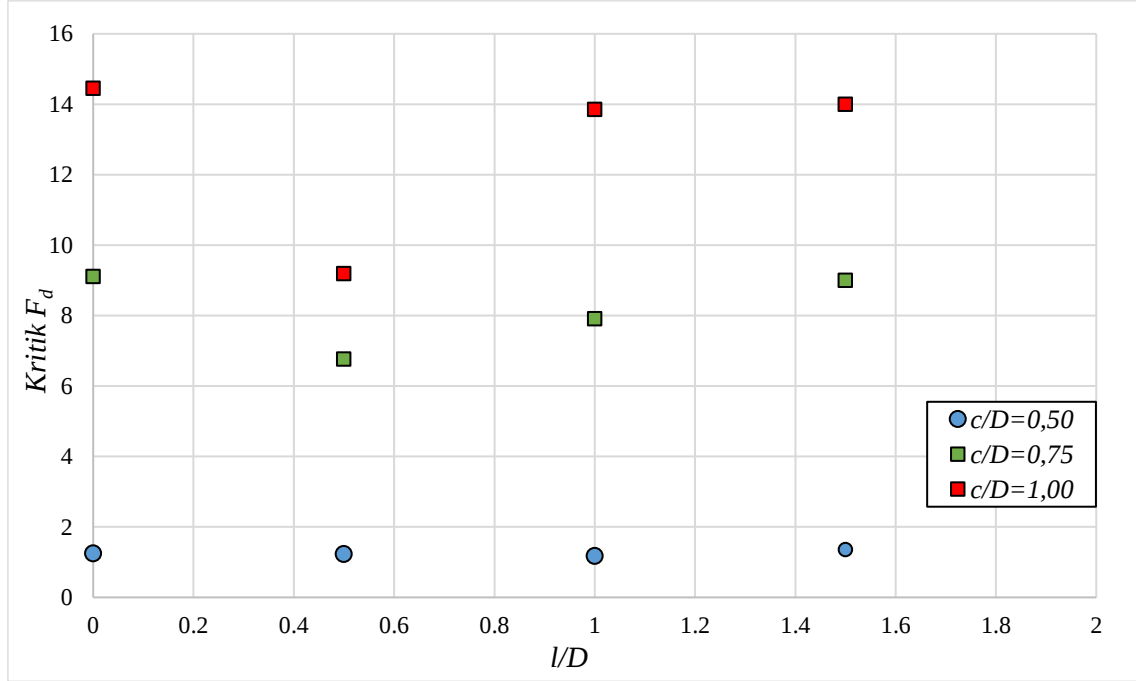
Şekil 3.12. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma uzunluğunun F_d değerine göre değişimi



Şekil 3.13. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma uzunluğunun c/D değerine göre değişimi



Şekil 3.14. Deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum oyulma uzunluğunun l/D değerine göre değişimi



Şekil 3.15. Ağza sediment girişinin başladığı F_d değerinin l/D değerine göre değişimi

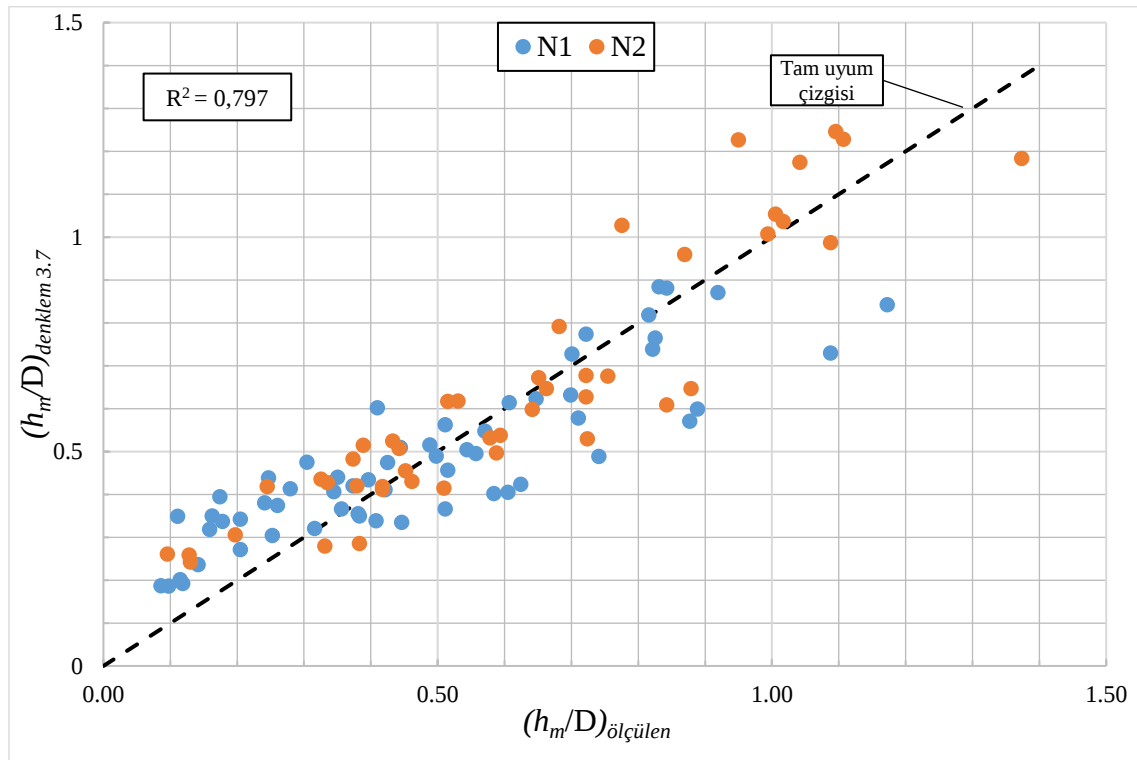
Deneysel çalışmaların başlangıcında yapılan boyut analizi çalışması ve deneysel gözlemler, su alma ağzı membasında oluşan oyulma geometrisinin su alma ağzı konumuna, sediment numunesi fiziksel özelliklerine ve su alma ağzından çekilen debi / akış hızına bağlı olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen oyulma değerleri kullanılarak h_m/D , W_m/D ve L_m/D bağımlı değişkenlerinin her biri için birer denklem elde edilmiştir. Elde edilen ampirik denklemler, deney sonuçlarının SPSS yazılımı kullanılarak çoklu regresyon analizi ile elde edilmiştir. Bu denklemler Eş. 3.7, Eş. 3.8 ve Eş. 3.9 ile verilmiş olup deneysel çalışma ölçümleri ile elde edilen denklemlerden elde edilen sonuçların kıyaslanması ise Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 ile verilmiştir. Elde edilen denklemler $c/D = 0 - 1,5$; $l/D = 0 - 3$; $F_d = 5 - 29$ değer aralıkları için geçerlidir.

$$\frac{h_m}{D} = 0,032 F_d^{0,862} \left(\frac{c}{D}\right)^{-0,99} \left(1 + \frac{l}{D}\right)^{0,07} ; R^2 = 0,8 \quad (3.7)$$

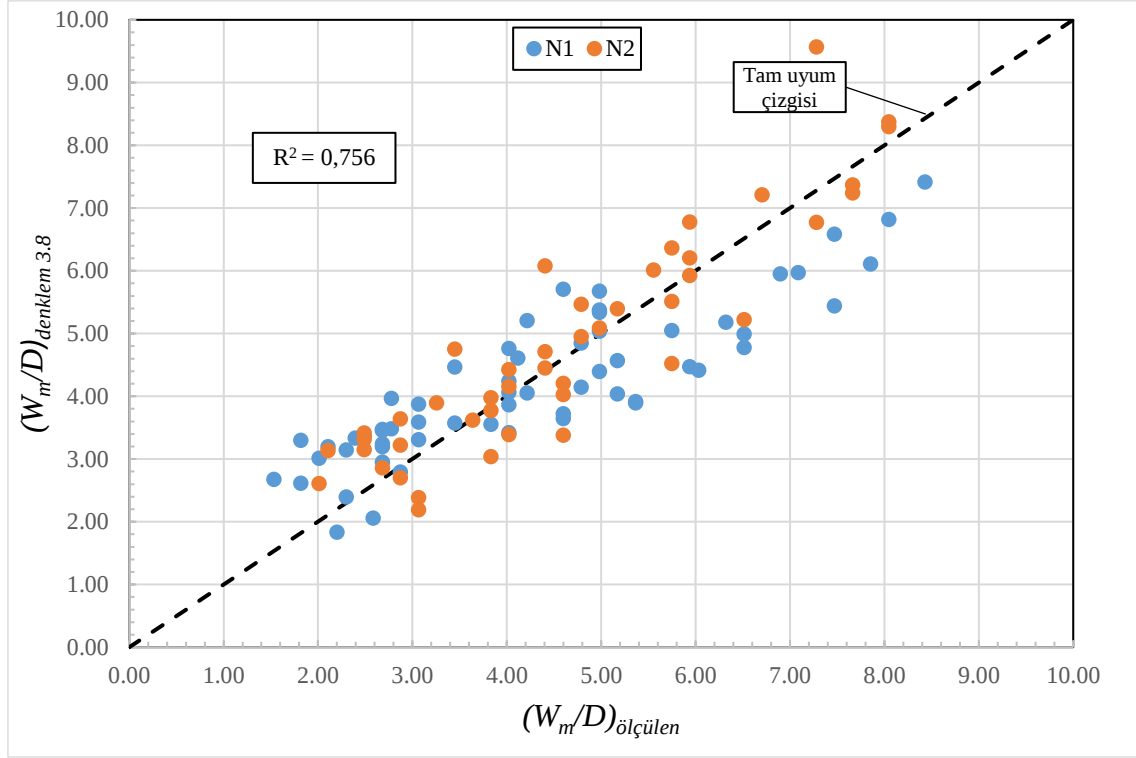
$$\frac{W_m}{D} = 0,748 F_d^{0,609} \left(\frac{c}{D}\right)^{-0,705} \left(1 + \frac{l}{D}\right)^{0,293} ; R^2 = 0,76 \quad (3.8)$$

$$\frac{L_m}{D} = 0,339 F_d^{0,55} \left(\frac{c}{D}\right)^{-0,575} \left(1 + \frac{l}{D}\right)^{0,033} ; R^2 = 0,76 \quad (3.9)$$

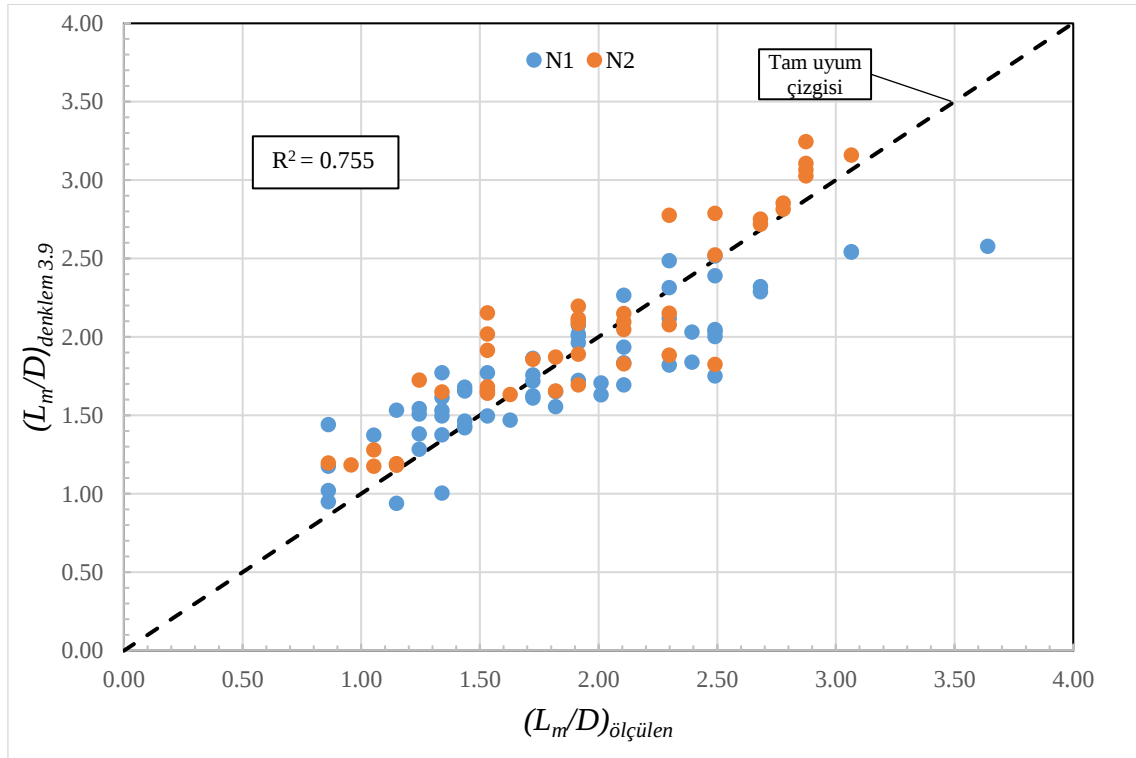
Şekillerde deney sonuçları Numune 1 (N1) ve Numune 2 (N2) olarak ifade edilmiştir. Yatay eksenler deney sonuçlarından elde edilen oyulma parametreleri olup *ölçülen* alt indisi ile gösterilmiştir. Düşey eksenler ise deney sonuçları doğrultusunda oluşturulan denklem ile elde edilen oyulma parametresi olup *denklem* alt indisi ile gösterilmiştir. Türetilen denklemlerin deneysel okuma değerleri ile uyumunu ifade eden R^2 değerleri 0,75 – 0,80 mertebesinde bulunmuş olup sediment taşınımı olayının karmaşık doğası düşünüldüğünde yukarıda belirtilen uygulama sınırları içerisinde deney sonuçlarını ifade etmekte yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 3.16. Türetilen denklemlerin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma derinliği değerlerine göre incelenmesi



Şekil 3.17. Türetilen denklemlerin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma genişliği değerlerine göre incelenmesi



Şekil 3.18. Türetilen denklemlerin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma uzunluğu değerlerine göre incelenmesi

Farklı ortalama çaplara sahip sediment numunelerinin, su alma ağızı debilerinin ve akım sınırlarının su alma ağızı membasında oluşan oyulma çukuruna etkisi deneysel olarak çalışılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca tüm deneylerden elde edilen sonuçlar EK-1 ile verilmiştir. Elde edilen bu sonuçların fiziksel olarak açıklamaları yapılmış olup bu açıklamalar Flow 3D ticari yazılımı kullanılarak sayısal modelleme ile desteklenmiştir. Çalışmanın sonraki kısımlarında yapılan sayısal modelleme çalışmaları, çalışmanın metodu ve çalışmanın sonuçları anlatılmıştır.

4. FLOW 3D YAZILIMI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Bir önceki bölümde genel hatları ile bahsedilen, bu çalışma kapsamında yapılmış olan deneysel çalışma sonucunda dairesel su alma ağzı membasında oluşan oyulmanın özellikleri ile ilgili yorumlamalarda bulunulmuş, oyulma karakteristiklerinin akım ve geometrik şartlardan etkilendiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada deneysel modeli çalışılmış olan su alma yapısının HAD modeli Flow 3D ticari yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan HAD modeli deney sonuçları doğrultusunda olabildiğince kalibre edilerek fiziksel model ile uyumlu olması için hangi koşulların olması gerektiği araştırılmıştır.

Akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümündeki temel amaç, akış içerisinde herhangi bir noktanın belli bir zamanda basınç, hız, kayma gerilmesi vb. gibi değerlerinin hesaplanmasıdır. Bu değerlerin matematiksel olarak ifadesi lineer olmayan, kısmi ve ikinci dereceden diferansiyel denklemlere dayandırılmaktadır. Bu denklemler, belli kabuller yapılmadan analitik olarak çözülemez. Ancak türbülanslı akışlar gibi karmaşık yapıda problemlerin çözülmesi, analitik çözümü mümkün olmayan bu diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümü ile mümkün olabilmektedir. Sayısal çözümleme için iki veya üç boyutlu geometrinin hücrelere ayrılması ve istenilen çözüm zamanının aralıklara bölünmesi gerekmektedir. Parçalara bölünen çözüm geometrisi içerisindeki her bir hücre için basınç, hız gibi değerlerin hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu sayısal çözümleme, çok sayıda eş zamanlı hesaplama ve matris çözümlemelerine dayanmakta olup, çözümlemeler için çeşitli kurumlar tarafından ticari veya açık kaynaklı HAD algoritmaları geliştirilmiştir. FlowScience tarafından geliştirilmiş olan Flow 3D yazılımı da bu algoritmalarından biridir ve çalışmadaki sayısal çözümlemelerin yapılmasında kullanılmıştır.

Flow 3D paket programı, akışkanların hareketini tanımlayan ve yukarıda bahsedilen diferansiyel denklemler olan süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerini (momentum denklemleri) sayısal olarak çözümlemektedir. Bu denklemler dışında, mevcut problemlerin gereksinimlerine göre sediment taşınım denklemleri, gözenekli ortam akışı, farklı fazlardaki akışkanların birbirleri ile etkileşimleri (termodinamik çözümleme), ısı transferi ve difüzyon denklemleri gibi ek çözümleri HAD modeline entegre edilebilmektedir.

Flow 3D, serbest su yüzeyinin modellenmesinde Akışkan Hacmi (The Volume of Fluid – VOF) yöntemi kullanmaktadır. VOF yöntemi Hirt ve Nichols (1981) tarafından verilmiş

olup iki veya daha fazla akışkan ara yüzeyinin takibini sağlamaktadır. Serbest yüzeyli akışlarda, hava – su ara yüzeyinin Navier – Stokes eşitliği ile çözülerek modellenmesini sağlar. VOF yöntemi, her çözüm hücresine bir V_F hacim oran değeri atanması ile sağlanır. V_F değeri çözüm hücresinin akışkan muhteviyatını temsil eder. Açık kanal akışı için konuşulacak olursa, V_F değeri tamamen su içeren bir çözüm hücresi için bire, tamamen hava içeren bir çözüm hücresi için ise sıfıra eşittir. V_F değerinin sıfır ve bir arasında değere sahip olduğu hücreler ise hava – su ara yüzeyindedir ve bu bölgedeki basınç ve hız gibi değerler ortalama hacim oran değerine göre hesaplanır.

Sayısal modellemenin mevcut probleme göre belirlenmiş kabul edilebilir hata aralığında sonuç verdiğinden emin olunduktan sonra oluşturulan model pratik çözümler için kullanılabilir. Bu sebeple HAD modellemesi laboratuvar sonuçları ile desteklenmelidir. Çalışmada önceki bölümde bahsedilmiş olan, deneysel çalışma modellenmiş ve deney sonuçları ile sayısal model sonuçları kıyaslanmıştır. Flow 3D paket yazılımına, deneysel çalışmanın şartlarını en gerçekçi şekilde ifade edecek şekilde fiziksel özellikleri, sınır koşulları ve başlangıç koşulları tanımlanmıştır. Laboratuvar koşullarının fiziksel olarak tanıtılmasının ardından sayısal çözümden kaynaklı oluşan hatanın ve çözüm süresinin en az olacağı en ideal çözüm ağı ve çözüm süresi belirlenmiştir.

Bu bölümde Flow 3D ticari paket yazılımında kullanılan sayısal çözüm metotları, simülasyon modelleri, yazılım arayüzü ve yazılım hakkında verilen tüm bilgiler, mevcut çalışmanın kapsamından çıkılmaması adına genel çerçevede verilmiştir. Yazılım hakkında detaylı bilgi için FlowScience Inc. Flow 3D v9.3 Kullanıcı El Kitabı'na (2008) başvurulmalıdır.

4.1. HAD modellemesinde çözülen temel denklemler

Flow 3D yazılımı kullanıcının tanıttığı bir problemi, yine kullanıcının belirlediği yöntemler ile nümerik olarak çözümlenmektedir. Yazılım literatürde mevcut olan yatak taşınım denklemlerinden Meyer, Peter ve Müller (1948), Nielsen (1992) ve Van Rijn (1984) yaklaşımlarının kullanılabilmesine imkân tanımaktadır. Türbülanslı akım modellemesi için ise Prandtl karışım uzunluğu modeli, tek eşitlikli türbülans enerji modeli, iki eşitlikli $k - \varepsilon$ ve $k - \omega$ türbülans modelleri, RNG $k - \varepsilon$ ve LES türbülans modeli seçeneklerini sunmaktadır.

İlgili probleme bağlı ve özel amaçlı olan bu seçenekler ve akışın hidrolik modellenmesi için nümerik olarak çözümlenmesi gereken hareket denklemleri bu başlık altında incelenecektir.

4.1.1. Hareket denklemleri

Yazılım tarafından sayısal olarak çözümlenen, 3 boyutlu sıkıştırılamaz akışa ait kütle korunum denklemi kartezyen koordinat sisteminde Eş. 4.1 ile verilmiştir. Yazılım tarafından çözümlenen tüm denklemler kartezyen koordinat sisteminde verildiğinden yönler x, y, z ile ifade edilmiş, verilen yönler göre hızlar ise u, v, w şeklinde verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = R_{SOR} \quad (4.1)$$

Eşitlikte A , yüzdesel olarak akış olan yüzey alanını ifade eder. Yönlü bir değişken olup x, y, z alt indisleri ile yüzey normali yönü tarif edilmektedir. Eşitliğin sağ tarafında yer alan R_{SOR} parametresi ise sisteme dışarıdan girişi tanımlanan kütle / momentum kaynağını ifade etmektedir.

Momentum korunum denklemleri veya Navier – Stokes eşitlikleri, kütle korunum denklemleri ile eş zamanlı olarak sayısal olarak çözümlenmektedir. Bu denklemler Eş. 4.2 ile gösterilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} \quad (4.2 - a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} \quad (4.2 - b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} \quad (4.2 - c)$$

Eş. 4.2’de daha önce tanımlanan değişkenlere ek olarak;

- (g_x, g_y, g_z) x, y ve z yönlerindeki yerçekimi ivmesidir.
- p basıncı ifade etmektedir.
- ρ_w akışkan yoğunluğunu ifade etmektedir.
- (f_x, f_y, f_z) viskoz ivme bileşenleridir.
- V_F , VOF yönteminde ifade edilmiş olan bir çözüm hücresindeki oransal akışkan hacmidir ve sıfır ve bir arasında değer alır.

Yukarıda verilen denklemler çok daha kapsamlı olmasına karşın, Flow 3D yazılımında mevcut olan geçirimli yüzey hesabı, ısı transferi hesaplanması, sıkıştırılabilir akışkan yoğunluğunun ve hacminin hesaplanması gibi özellikler mevcut problemin kapsamı dışında kaldığından denklemlerde ilgili değişkenlere yer verilmemiştir. Ayrıca kütle / momentum kaynağının sabit olduğu kabul edilen şekilde denklem indirgenmiştir.

4.1.2. Türbülans modelleri

Su alma ağızları yakınlarında, kuvvetli çvrinilerin ve yüksek Reynolds sayılarının olduğu akışlar gözlemlenmektedir. Bu nedenle su alma ağızları hidrolik olarak modellenirken seçilen türbülans modeli büyük önem taşır. Flow 3D paket yazılımı kullanıcıya Prandtl karışım uzunluğu, tek eşitlik modeli, iki eşitlik modelleri ($k - \varepsilon$ ve $k - \omega$), RNG $k - \varepsilon$ modeli ve LES modeli seçeneklerini sunar. Bu bölümde hidrolik model çözümünde kullanılabilen bu altı türbülans modeli teorik özelliklerinden bahsedilmiştir.

Akış hızının artması ile Reynolds sayısı (Re) artar ve bu da akışın laminar akıştan türbülanslı akışa geçmesine neden olur. Reynolds sayısı Eş. 4.3 ile verilmiştir.

$$Re = \frac{V_c L_c}{\nu} = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} \quad (4.3)$$

Eşitlikte V_c karakteristik akım hızını, L_c karakteristik uzunluğu, ν ise akışkanın kinematik viskozitesini ifade etmektedir. Türbülanslı akışlarda, akış hızında düzensiz ve rastgele dalgalanmalar ve gerçekleşmektedir. Reynolds sayısının artması ile ortaya çıkan bu girdaplar ve hızlardaki düzensiz dalgalanmaların sayısal olarak ifade edilebilmesi için Navier – Stokes denklemlerinin Reynolds ortalamalı Navier – Stokes (RANS) denklemleri

şeklinde modifiye edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım Navier – Stokes denklemlerinde türbülanslı akışın doğası gereği, parametrelerde görülen dalgalanmaların zamana göre ortalaması ve anlık değişimlerin ayrıştırılarak ifade edilmesini içermektedir. Bu ifade sonucunda türbülans salınımlarından kaynaklı Reynolds gerilmeleri ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu yeni bilinmeyenin çözümlenmesi için RANS tabanlı türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerden en basit olanı Prandtl karışım uzunluğu modelidir. Model, türbülanslı akım çözümlenmesi konusunda temel taşı niteliğinde olmasına karşın tüm akış tipleri için genel bir çözüm sunamamakta ve her bir akış tipi için farklı karışım uzunluğu boyu kullanılmasını gerektirmektedir. Tek eşitlik modeli ise, Reynolds gerilmelerinin çözümlenmesinde farklı olarak türbülans kinetik enerjisini (k) de dahil etmektedir. Bu yöntem ile türbülansın sadece anlık etkileri değil önceki zaman aralıklarındaki etkilerinin de göz önüne alınması sağlanmıştır. İleriki tarihlerde geliştirilen ve günümüzde de sıklıkla kullanıldığı literatür taramalarında gözlemlenmiş olan $k - \varepsilon$ türbülans modeli ise türbülans kinetik enerjisinin yanında türbülans sönümlenme oranı (ε) parametresini de model içerisine dahil etmiştir. Bu modelin Re-normalize Grup metodu kullanılarak yeniden düzenlenmiş ve istatistiksel yaklaşımlardan yararlanılarak daha verimli hale getirilmiş hali ise RNG $k - \varepsilon$ türbülans modelidir. Bu model HAD çalışmalarında çok daha yaygın kullanılmaktadır. Flow 3D paket yazılımı içerisindeki RANS tabanlı türbülans modeli seçenekleri arasında kullanılabilecek son türbülans modeli ise $k - \omega$ modelidir. Bu yaklaşımda ω türbülans frekansı kullanılmakta olup bu değişken ε / k değerine eşittir. Yaklaşımın bu özelliği türbülans kinetik enerjisinin sıfıra eşit olduğu sınır bölgelerinin çözümlenmesinde $k - \varepsilon$ türbülans modeline üstünlük sağlamaktadır. Menter (1997) $k - \varepsilon$ türbülans modelinin serbest akışta sınır tabakası çözümlerinde düşük performans gösterdiğini söylemiştir.

RANS denklemlerinden ortaya çıkan türbülans gerilmeleri tamamen modellenebileceği gibi, LES türbülans modeli kullanılarak çözüm ölçeğine göre büyük girdapların daimi olmayan özellikleri sayısal olarak çözümlenip, çözüm ölçeğinden daha küçük olan girdaplar matematiksel model ile ifade edilebilir. LES modeli RANS tabanlı türbülans modellerinden daha detaylı bir türbülanslı akım çözümü sağlasa da modelin doğruluğu çözüm ağı yapısı ile doğrudan ilintilidir. LES modelinde kullanılacak olan çözüm ağı yapısının diğer modeller için kullanılan / kullanılabilecek çözüm ağı yapılarına göre çok daha ince olması gerekmektedir. Bu durum görece uzun çözüm sürelerini ortaya çıkarmakta ve LES modelinin kullanımını güçleştirmektedir.

4.1.3. Kütle / momentum kaynağı yaklaşımı

Kütle / momentum kaynağı, model içerisinde farklı geometri, yön ve boyutlara sahip iki boyutlu akış kaynağı veya kuyu tanımlanmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, model içerisinde nozul ve boru gibi sisteme su giriş / çıkışını sağlayan herhangi bir çözüm alanından görece çok daha küçük akış kaynağının, yapının esas geometrinin modellenmesine gerek kalmadan sayısal olarak çözümlenmesinde kullanılmaktadır. Kütle / momentum kaynağı, zamana göre değişen veya sabit debi değeri tanımlanarak modellenbildiği gibi ayrıca x, y, z eksenlerinde hız değerleri de tanımlanabilmektedir. Negatif girilen debi veya hız değerleri kaynak normal eksenine tersinde akış oluşmasını sağlar ve kütle / momentum kaynağı kuyu şeklinde davranır.

4.1.4. Sediment taşınım denklemleri

Sediment taşınım modeli kohezyonsuz sediment numunesinin ortalama dane çapını, içsel sürtünme açısını, yoğunluğunu vb. gibi fiziksel özelliklerini kullanarak çeşitli akım durumlarında askıdaki sediment taşınımı, yatak yükü taşınımı ve çökme hareketlerini hesaplamaktadır. Ampirik ve boyutsuz bir ifade olan kritik Shields parametresi ($\theta_{kr,i}$) kullanıcı tarafından girilebilmektedir. Ayrıca Eş. 4.4'te verilen Soulsby – Whitehouse denklemi kullanılarak da belirlenebilir. Verilen tüm eşitliklerde, i alt indisi sediment numunesini ifade etmektedir ve ilgili parametrelerin aynı modelde incelenen farklı numuneler için değişkenlik gösterdiğini ifade etmektedir.

$$\theta_{kr,i} = \frac{0,3}{1 + 1,2d_{*,i}} + 0,055[1 - \exp(-0,02d_{*,i})] \quad (4.4)$$

Verilen bu denklemde $d_{*,i}$ değeri i sediment numunesi yoğunluğuna, dane çapına, akışkan viskozitesine ve yoğunluğuna bağlı boyutsuz bir parametredir ve Eş. 4.5 ile aşağıda verilmiştir.

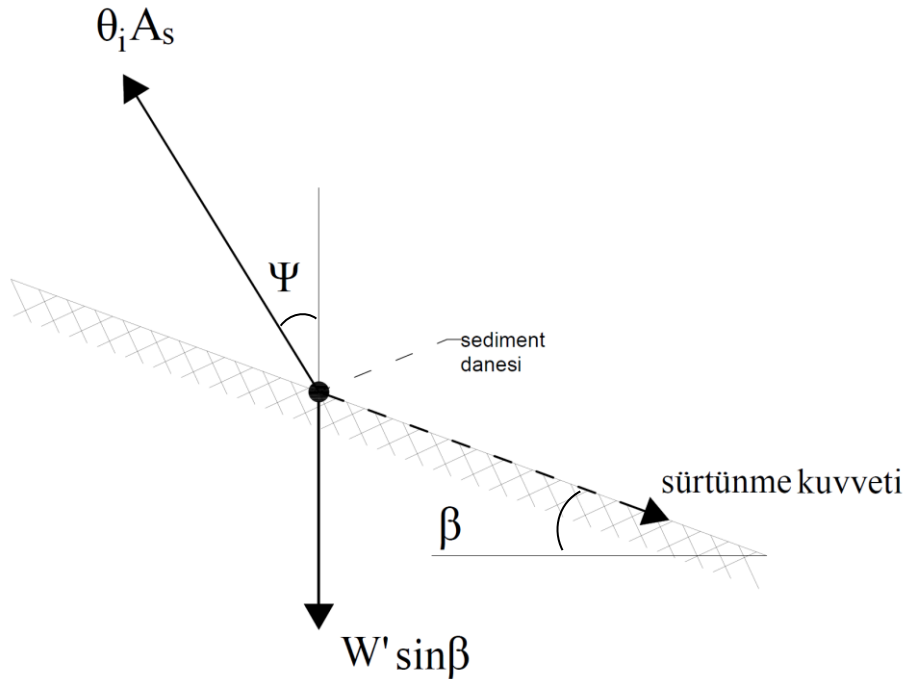
$$d_{*,i} = d_i \left[\frac{\rho_w(\rho_{s,i} - \rho_w)\|g\|}{\mu_w^2} \right]^{1/3} \quad (4.5)$$

Verilen eşitlikte $\rho_{s,i}$ ve ρ_w sırasıyla i sediment numunesinin yoğunluğu ve akışkan yoğunluğunu, d_i sediment ortalama dane çapını, μ_w akışkanın dinamik viskozitesini ve $\|g\|$ yerçekimi ivmesi büyüklüğünü ifade etmektedir. Denklemden sediment numunesi yoğunluğu vektörel bir büyüklük olmadığından yerçekimi ivmesi ifadesi yönsüz büyüklük şeklinde verilmiştir.

Kritik Shields parametresinin kanal eğimi (β) ve i sedimenti içsel sürtünme açısı (φ) ile değişimi Eş. 4.6 ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlik aynı zamanda literatürde Apsley ve Stansby (2008) tarafından, büyük eğimlerde yatak taşınımı denklemleri için öne sürülen modifikasyondur.

$$\theta'_{kr,i} = \theta_{kr,i} \frac{\cos \psi \sin \beta + \sqrt{\cos^2 \beta \tan^2 \varphi_i - \sin^2 \psi \sin^2 \beta}}{\tan \varphi_i} \quad (4.6)$$

Eşitlikte ψ sediment danesine akımdan kaynaklı etki eden kuvvetin yönü ile yerçekiminden kaynaklı kuvvet arasındaki açıdır. (Şekil 4.1)



Şekil 4.1. Sediment danesine etkiyen kuvvetler (Apsley ve Stansby, 2008)

Şekil 4.1’de $\theta_i A_s$ = (yerel Shields katsayısı x efektif sediment kesit alanı) olarak verilen ifade, akımdan kaynaklı sediment danesine etkiyen kuvvettir. $W' \sin \beta$ ise kaldırma kuvveti

etkisi altındaki sedimentin sudaki ağırlığının düşey yöndeki bileşenidir. Yerel Shields katsayısı Eş. 4.7 ile aşağıda verilmektedir.

$$\theta_i = \frac{\tau}{\|g\|d_i(\rho_{s,i} - \rho_w)} \quad (4.7)$$

Yukarıda verilen eşitlikte τ , yatak kayma gerilmesine eşittir. Sediment danesinin akışkan içerisinde askı hale geçmesini sağlayan sürüklenme hızı ($u_{lift,i}$) Eş. 4.8’de verilmektedir.

$$u_{lift,i} = \alpha_i n_s d_{*,i}^{0,3} (\theta_i - \theta'_{kr,i})^{1,5} \sqrt{\frac{\|g\|d_i(\rho_{s,i} - \rho_w)}{\rho_w}} \quad (4.8)$$

Verilen eşitlikte α_i numune için sürüklenme parametresini ifade etmektedir. Yazılımda varsayılan ve kılavuzda önerilen değer 0,018’dir. n_s , sediment paketi normal vektörüdür ve pozitif yönü serbest yüzeye doğrudur. Yukarıda verilen denklem ile hesaplanan $u_{lift,i}$ değeri paket halden süspansiyon hale geçen sediment miktarının tespit edilmesini sağlar. Süspansiyon haldeki sediment daha sonra akış ile taşınır. Akış ile belli bir miktar taşınan sediment danesi, çoğunlukla ağırlığından ötürü çöker. Bu çökme hareketi Soulsby (1997) tarafından önerilmiş olan Eş. 4.9 ile sayısal modelde tanımlanmıştır. Çökme hareketinin yerçekimi ivmesi yönünde olacağı kabulü yapılmaktadır.

$$u_{settling,i} = \frac{v_w}{d_i} [(10,36^2 + 1,049d_*^3)^{0,5} - 10,36] \quad (4.9)$$

Askıdaki sediment daneleri çökme sırasında birbirlerini etkilemektedir. Eşitlik 4.9 tekil danenin çökme hızını ifade etmektedir. Bu danelerin çökme sırasında birbirleri ile etkileşimleri Richardson – Zaki (1954) korelasyonunun çökme hızına uygulanması ile ifade edilmektedir. Eş. 4.10’da sediment danelerinin birbirleri ile etkileşimlerinin hesaba katıldığı çökme hızı ($u_{settling,i}^*$) verilmiştir.

$$u_{settling,i}^* = u_{settling,i} (1 - \min(0,5; c_b))^{\zeta} \quad (4.10)$$

Yukarıda verilen eşitlikte c_b askıdaki sediment miktarının toplam hacme oranıdır. Denklemden $\zeta = \zeta_{user}\zeta_0$ şeklinde ifade edilmektedir. ζ_{user} , katsayı kullanıcı çarpanıdır ve varsayılan değeri 1,0'dır. ζ_0 ise Reynolds sayısına göre değişen Richardson – Zaki katsayısıdır.

Yatak yükü taşınımı, sediment danesinin yuvarlanma ve sekme hareketleri ile taşınmasını kapsamaktadır. Flow 3D yazılımı üç farklı yatak yükü taşınım yaklaşımı seçeneği içermektedir. Bu yaklaşımlar sırasıyla Meyer, Peter ve Müller (1948), Nielsen (1992) ve Van Rijn (1984) olup, birim yatak genişliğinden geçen boyutsuz sediment debisi (Φ_i) denklemleri sırasıyla Eş. 4.11'de ifade edilmektedir.

$$\Phi_i = \beta_{MPM,i}(\theta_i - \theta'_{kr,i})^{1.5} C_{b,i} \quad (4.11 - a)$$

$$\Phi_i = \beta_{NIE,i}\theta_i^{0.5}(\theta_i - \theta'_{kr,i})^{1.5} C_{b,i} \quad (4.11 - b)$$

$$\Phi_i = \beta_{VR,i}d_{*,i}^{-0.3}\left(\frac{\theta_i}{\theta'_{kr,i}} - 1.0\right)^{2.1} C_{b,i} \quad (4.11 - c)$$

Eş. 4.11'de verilen yatak taşınım denklemlerinde $\beta_{MPM,i}$, $\beta_{NIE,i}$ ve $\beta_{VR,i}$ katsayıları ampirik değerler olup literatürde genellikle $\beta_{MPM,i} = 8,0$, $\beta_{NIE,i} = 12,0$ ve $\beta_{VR,i} = 0,053$ olarak alınmaktadır. Kullanıcının birden fazla sediment numunesi tanıtmaması durumuna karşı denklemlere ek olarak $C_{b,i}$ çarpanı eklenmiştir. Bu çarpan i numunesinin yatak materyali içerisinde hacimsel oranını ifade etmektedir. Kurulan simülasyonlara tek bir sediment numunesi tanıtılması durumunda katsayı 1,0'e eşit olmaktadır. Eş. 4.11'de elde edilen boyutsuz sediment debisi ile aşağıda verilen Eşitlik 4.12 kullanılarak birim genişlikten geçen sediment debisi elde edilmektedir.

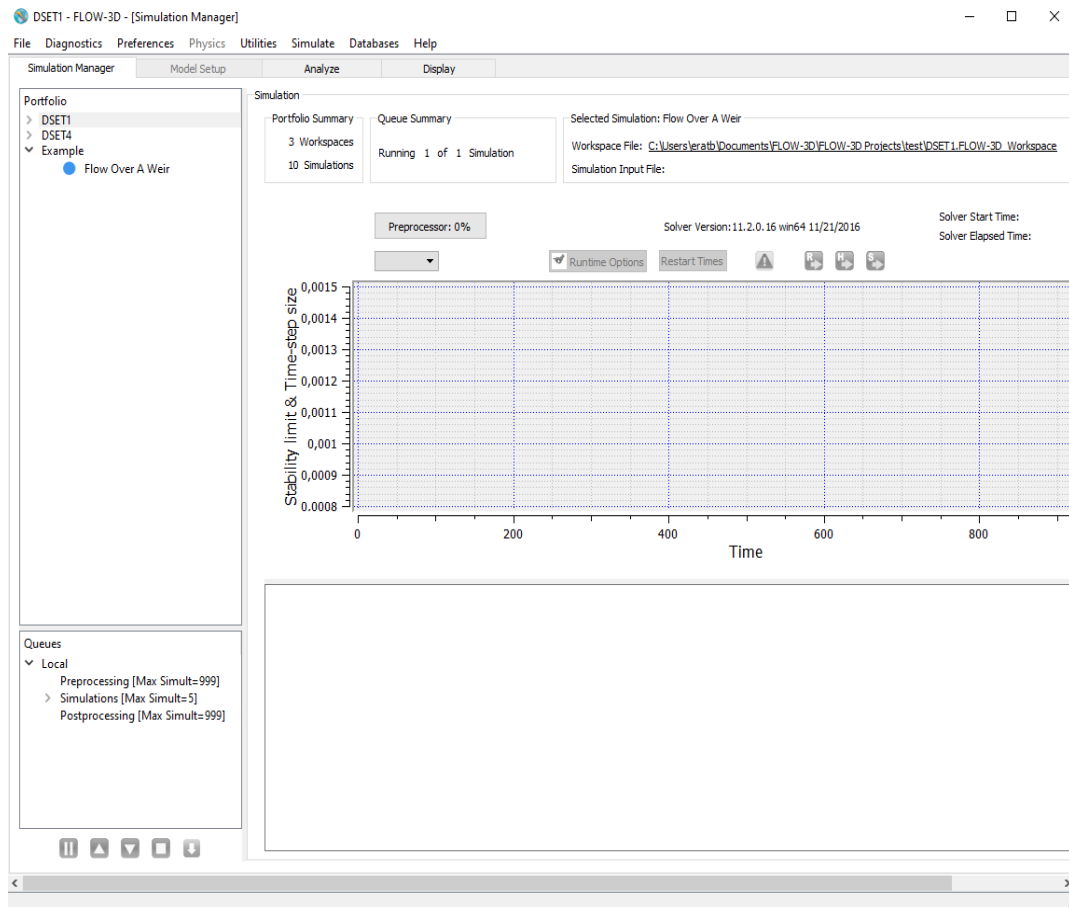
$$q_{b,i} = \Phi_i \left[\|g\| \left(\frac{\rho_i - \rho_w}{\rho_w} \right) d_i^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

Sediment taşınımı iki farklı faz olarak modellenmektedir. Eş. 4.12'de verilen birim genişlikten geçen sediment debisi, sediment danesinin yuvarlanarak veya sıçrama (saltasyon) hareketlerinden kaynaklı taşınım miktarını ifade etmektedir. Süspansiyon hale geçen sediment danesinin taşınımı ise Eş. 4.8, Eş. 4.9 ve Eş. 4.10 ile modellenmektedir.

Yatak taşınım denklemleri ile ilgili mevcut olan ve çalışmada kullanılan, Flow 3D paket programı içerisinde yer alan üç farklı yaklaşımın oyulma sonuçlarında dikkate değer farklılıklara neden olmadığı An, Ku ve Julien (2015) tarafından kapak altı akımdan kaynaklı oyulmanın modellenmesi çalışmasında gösterilmiş ve verilen üç yaklaşımın da gerçekçi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

4.2. Flow 3D Arayüzü

Flow 3D paket programı, birçok hidrolik problemin HAD modellemesini kullanıcı tarafından yazılıma tanıtılan fiziksel özellikler ve seçilen sayısal çözüm yöntemleri doğrultusunda yapmaktadır. Kullanıcı tarafından verilen çözüm yöntemi ve problem bilgileri girdileri programın arayüzü kullanılarak yapılmaktadır. Çözüm nihai sonuçları da yine bu arayüz yardımı ile kullanıcı tarafından analiz edilebilmektedir. Flow 3D arayüzü Simülasyon Yöneticisi, Model Kurulumu Analiz ve Görüntü olarak dört ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Arayüz genel görünümü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Flow 3D Arayüzü genel görünümü

4.2.1. 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 gruptandırılmaktadır. Simülasyon Yöneticisi sekmesinde, halihazırda çözümü devam etmekte olan simülasyonların durumları, hangi simülasyonun çözümlendiği gösterilmekte ve çözümlenmekte olan bu simülasyonlar ile ilgili anlık bilgiler verilmektedir.

4.2.2. 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, modellenen akışkan sayısı (mevcut iki akışkan yoğunluğu farkı, atmosfer – su gibi çok büyük olduğu modellerde tek akışkan modeli tercih edilmelidir), akışkan modeli (sıkıştırılabilir / sıkıştırılamaz akışkan çözümü), modelde kullanılacak birim sistemi ve kullanıcı notları gibi genel girdi alanları mevcuttur. Hidrolik model kurulum aşamasında ilk başta bu sekme altındaki bilgiler tamamlanmalıdır.

Mevcut çalışmada akış sıkıştırılamaz kabul edilmiştir ve modellenen akışkan sayısı bir akışkan olarak seçilmiştir. Kullanılan birim sistemi SI olup tüm modelleme ve sonuçların elde edilmesi süresince bu şekilde devam edilmiştir.

Fizik (Physics)

Fizik sekmesi, hidrolik modelin çözümünde kullanılabilecek fiziksel modellerin bulunduğu sekme olup, yerçekimi ivmesi ve yönü, viskozite / türbülans tercihleri, sediment özellikleri, yoğunluk değişimleri, yüzey gerilimi, ısı transferi modellemesi ve bunlar gibi 27 farklı fiziksel model çözümlenecek simülasyona tanıtılabilmektedir.

Çalışma kapsamında yerçekimi ivmesi ve yönü, viskozite / türbülans tercihleri ve sediment özellikleri fiziksel modelleri aktif hale getirilmiştir. Yazılımın sediment çözümlemesi metodu ve akışkanın yoğunluğunun süspanse sediment içeriğinden kaynaklı değişmesinden ötürü sediment oyulma modeli aktif hale getirildiğinde otomatik olarak yoğunluk değişim modeli de aktif olmaktadır.

Akışkanlar (Fluids)

Bu sekme altında simülasyonda kullanılmak üzere kullanıcı tarafından akışkan veya akışkanların fiziksel özellikleri (yoğunluk, viskozite vb.) girilmektedir. Sıklıkla kullanıldığı görülen bazı sıvıların fiziksel özellikleri yazılım içerisinde kayıtlı olup (20 °C sıcaklığındaki su gibi) kullanıcının girdi yapmasına gerek kalmadan seçilebilmektedir.

Yapılan modelleme çalışmalarında akışkan fiziksel özellikleri olarak 20 °C sıcaklığındaki su seçilmiştir.

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 parçacık modeli özellikleri, iki boyutlu kütle / momentum kaynağı ve özellikleri, geçirimsiz perde özellikleri, vana özellikleri ve ölçüm alma araçları konumu ve özellikleri bu sekme altında modelde tanımlanmaktadır.

Model oluşturulması aşamasında çözüm hacmi limitleri için kullanılabilecek 10 adet sınır koşulu mevcuttur. Bu koşullar sayısal çözümleme için bilinen / kabul edilen başlangıç değerlerini sağlar. Dirichlet Sınır Koşulu olarak da bilinen Duvar Sınır Koşulu, katı yüzeylerdeki sıvı davranışını tanımlamak için kullanılır. Bu tanımlamayı, duvarda her yönde akış hızını sıfır, basınç ve yoğunluk değerlerini ise en yakın hücrenin değerine eşit belirleyerek yapar. Simetri Sınır Koşulu, akış parametreleri türevlerinin sıfır kabul edildiği, yani basınç, hız ve benzeri hidrolik parametrelerde sınır boyunca herhangi bir değişiklik olmaksızın çözüm alanının dışında da devam ettiğini tanımlar. Simetri sınır koşulu içerisinde akış gerçekleşmez. Farklı kaynaklarda ayna sınır koşulu olarak da

adlandırılmaktadır. Belirlenmiş Basınç sınır koşulu, seçilen çözüm ağı yüzeyinin arkasında kullanıcı tarafından belirlenen bir basınç olduğunu ifade eder. Bu basınç etkisi ile model içerisine veya model dışarısına akış gerçekleşebilir (hidrostatik basınç nedeniyle akış).

Model geometrisi, yazılım içerisinde mevcut olan basit geometrik cisimler birleştirilerek oluşturulabileceği gibi herhangi bir üç boyutlu çizim yazılımı kullanılarak oluşturulan geometrik cisim .stl uzantılı olması koşuluyla Flow 3D yazılımına tanıtılabilir.

Çözüm ağı yapısı ve çözüm ağı inceliği, deneysel model geometrisinin yazılıma tanıtılması, sayısal çözümde uygun çözümün sağlanması için gereken sınır koşulları, yapılan diğer kabuller ve modelleme yaklaşımları ve elde edilen sonuçların bu değişkenden bağımsızlığı 5. bölümde tüm detayları ile irdelenmiş, edilen sonuçlar karşılaştırılarak modelin uygunluğu gösterilmiştir.

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.

Nümerik Seçenekler (Numerics)

Nümerik çözüm seçeneklerinin belirlendiği bu sekmede genelde kullanıcının varsayılan ayarları koruması yeterli olmaktadır. Başlangıç ve minimum / maksimum zaman adımları, basınç çözüm seçenekleri, akışkan – katı cisim etkileşiminin sonlu eleman yaklaşımı olan FSI/TSE (Akışkan Yapı Etkileşimi – *Fluid Structure Interaction* / Termal Gerilim Gerilimi – *Thermal Stress Evolution*) çözüm seçenekleri, viskoz gerilim çözüm seçenekleri, su hacmi adveksiyonu ve momentum adveksiyon seçenekleri kullanıcı tarafından bu sekme altında değiştirilebilir.

Mevcut çalışma kapsamında yazılımın varsayılan sayısal ayarları – çözüm doğruluğunu artırmak amacıyla momentum transfer yaklaşımı ikinci dereceden momentum korunum

yaklaşımı seçilmesi dışında – yeterli görünmüş ve bu seçenekler değiştirilmeden korunmuştur.

4.2.3. Analiz (Analyze)

Analiz başlığı kullanıcının simülasyon sonuçlarını bir, iki veya üç boyutlu olarak inceleyebildiği kısımdır. Kullanıcı tarafından incelenmek istenen fiziksel parametre (basınç, hız, su yüksekliği vb.) bu başlık altında seçilir. Model Kurulumu başlığı altında bulunan *Çıktı* sekmesinde tercih edilen seçeneklerin analiz başlığında incelenebilecek fiziksel parametre seçeneklerine doğrudan etkisi vardır.

4.2.4. Görüntü (Display)

Bu başlık, Analiz başlığında tercih edilen simülasyon nihai sonuçlarının yazdırıldığı ve kullanıcının inceleyebileceği görsel materyallerin elde edildiği kısımdır. Analiz başlığında kullanıcı tarafından gerekli tercihler yapıldıktan sonra işleme (*render*) butonuna basıldığında yazılım otomatik olarak bu başlığa yönlendirmektedir.

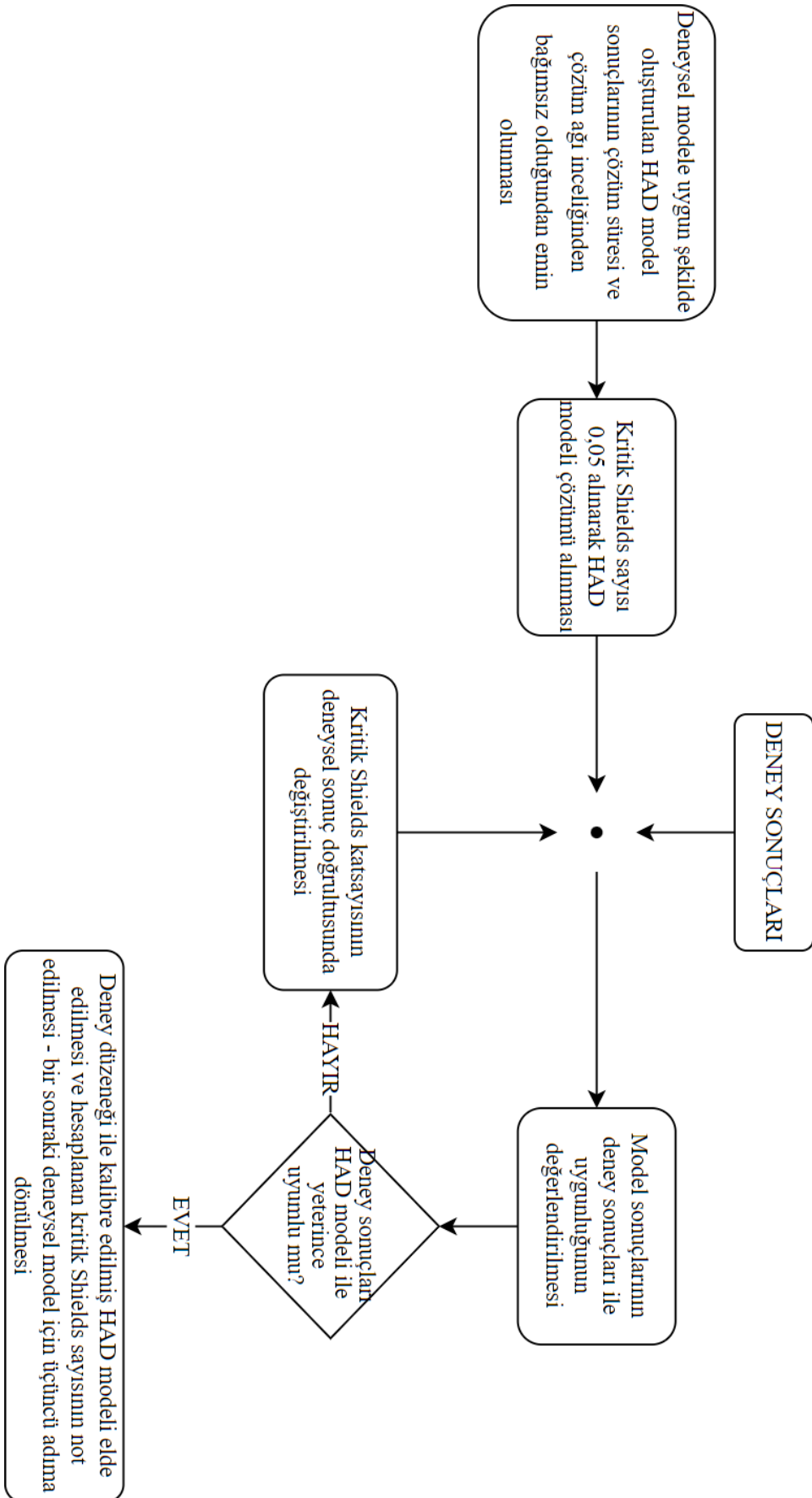
5. SU ALMA AĞZININ MEMBASINDAKİ OYULMANIN HAD İLE MODELLENMESİ

Bu bölümde oluşturulan HAD modeli özellikleri ve oluşturulma aşamalarında dikkate alınan noktalar anlatılmaktadır. Nümerik modelin oluşturulmasında 3. bölümünde detaylı bir şekilde bahsedilen deneysel modelin fiziksel özellikleri referans alınmıştır.

Deneysel modelde elde edilen sonuçlar kullanılarak sayısal modelde gerekli ayarlamalar yapılmış, hata oranı görece azaltılmış ve deney sonuçları ile doğrulanmış bir HAD modeli elde edilmiştir. Çalışmaya referans olan deneysel modelin sayısallaştırılmasında ve modelin kalibrasyonunda Şekil 5.1’de verilen akış şeması takip edilmiştir. Akış şeması başlangıcında verilen HAD modeli çözüm yönteminin oluşturulması, model sonuçlarının çözüm süresi ve çözüm ağı inceliğinden bağımsızlığının araştırılması bu bölümde incelenmektedir. Modelleme sürecinde, kullanılan çözüm yaklaşımları belirlenmiş ve bu yaklaşımların uygunluğu model sonuçları ile doğrulanmıştır.

Akış şemasında verildiği üzere, aşağıda maddeler halinde verilen ve sonucu etkileyeceği düşünülen değişkenlerin modele etkisi incelenmiştir. Model sonuçları aşağıda sıralanan değişkenlerin deney sonuçlarına en uygun olan halini yansıtacak şekilde elde edilmiştir.

- Sediment yatak taşınım yaklaşımı (Meyer, Peter ve Muller, Van Rijn veya Nielsen)
- Kullanılan türbülans modeli
- Kanalin modellenen kısmının uzunluğu
- Çözüm ağı inceliği
- HAD modeli çözüm süresi uzunluğu



Şekil 5.1. Sayısal modelleme ve HAD modeli kalibrasyonu çalışmalarının şematik ifadesi

Shields sayısı Eşitlik 4.4 ile verilen Soulsby – Whitehouse yaklaşımı ile tayin edilmemiş, dışarıdan el ile girilerek oyulma sonuçlarının deney sonuçları ile kalibrasyonu sağlanmıştır. Bu çalışmada ele alınan numune dane çapları için Soulsby – Whitehouse yaklaşımı ile hesaplanan kritik Shields sayısı değerleri Numune 1 ve Numune 2 için sırasıyla 0.033 ve 0.030 bulunmuştur. 6. Bölümde, bu çalışmanın sonucu olarak farklı akış koşulları için bu değerlerden daha büyük veya küçük kritik Shields sayılarının hesaplandığı gösterilmiştir. Kritik Shields sayısının yalnızca sediment yoğunluğu ve sediment ortalama dane çapına bağlı, diğer tüm akış özelliklerinden bağımsız bir değişken olmadığı düşünülmektedir.

Kritik Shields sayısının modelleme aşamasında deney sonuçları doğrultusunda değiştirilecek parametre olarak belirlenmesi, varsayılan kritik Shields yaklaşımının su alma ağızı membasında meydana gelen rastgele çevrintilerden kaynaklı taşınma kuvvetlerini dikkate almaması, Shields grafiğinin üniform akım koşulları incelenerek elde edilmiş olması olarak gösterilebilir. Bu durum literatürde benzer çalışmalar ile desteklenmektedir.

Hager ve Oliveto (2002), dikdörtgensel ve dairesel ayak etkisinin farklı dane çaplarındaki sediment formasyonu oyulması üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişler ve Shields (1936) tarafından verilen sediment taşınım yaklaşımı ile öngörülen sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Hager ve Oliveto (2002) çalışmanın çıkış noktasını aşağıdaki şekilde ifade etmektedirler.

Shields yaklaşımının basit çerçevesi halihazırda kabul edilen bir yaklaşım olsa da mühendisler kayma hızının doğrudan belirlenememesinden ötürü sediment taşınımının başlangıcını öngörmekte problemler yaşamaktadırlar. Çalışmanın ilk amacı bu eksikliği basit hidrolik değişkenler kullanarak sediment taşınımı başlangıç şartı tanımını iyileştirmektir. İkinci amaç ise Shields denklemini oluşturan deney alanını, dairesel ve dikdörtgensel köprü ayağı çevresinde oluşan oyulma deneyleri ile genişletmektir. (Hager ve Oliveto, 2002)

Yapılan çalışma sonucunda sediment danesinin ilk hareketinin, Shields (1936) tarafından verilen sediment taşınım yaklaşımı ile öngörülenden daha düşük densimetrik Froude sayılarında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Miedama (2010), yapmış olduğu çalışmada, sediment danesinin hacimsel olarak akışa maruz kalma oranı ve ideal dairesel şekilden uzaklığı ile Shields sayısı ilişkisini incelemiş ve bu

doğrultuda kritik Shields sayısının öngörülen değerlerden çok daha küçük veya büyük değerler alabileceğini ifade etmektedir.

Mendonça, Canilho ve Fael (2019), nehir akışı ile taşınan yıkıntıların köprü ayağı oyulma derinliğine etkisini deneysel ve HAD modeli kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada deneylerden elde edilen ayak oyulması geometrisi, dışarıdan .stl formatında sabit yatak olarak tanıtıldığında ve Flow 3D sediment oyulması modeli kullanılmadığında köprü ayağı çevresinde ölçülen hızlar ile HAD modelinden elde edilen hız değerlerinin ortalama %3.4 sapma ve %2.3 standart sapma ile uyduğu gözlemlenmiştir. Ancak deney sonucu olarak elde edilen oyulma geometrisi Soulsby – Whitehouse denklemi ile elde edilen kritik Shields yaklaşımı ile hesaplanmak istendiğinde, oyulma miktarının yaklaşık %30 mertebesinde daha az hesaplandığı sonucuna varılmıştır.

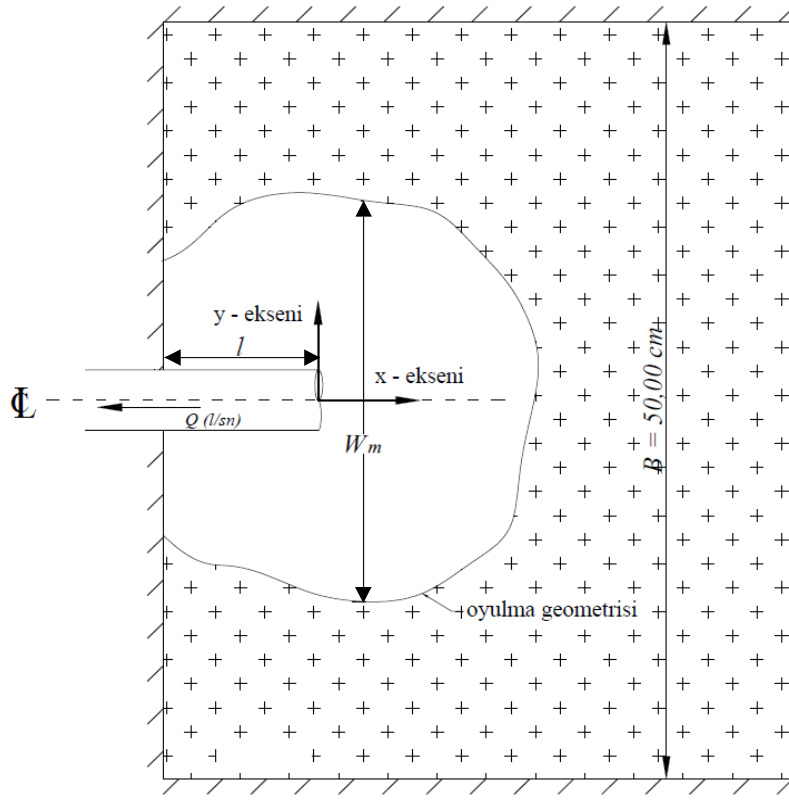
Baykal, Sumer, Fuhrman, Jacobsen ve Fredsøe (2017) oluşturmuş oldukları sayısal modelde dairesel ayak üzerine etki eden dalga kuvvetlerinden kaynaklı oluşan oyulmayı incelemişlerdir. Modelin doğrulanmasında Sumer, Petersen, Locatelli, Fredsøe, Musumeci, ve Foti (2013) tarafından yapılmış olan deney sonuçlarını kullanmışlardır. Çalışmada deney sonuçları ile HAD modelinin uyumu farklı deney koşulları için kritik Shields sayısı değiştirilerek sağlanmıştır. Sedimentin harekete başladığı kritik Shields sayısının 0,05 olarak hesaplandığı belirtilmiş, buna karşın sayısal model ve deneysel sonuçlar kıyaslandığında sediment hareketinin daha yüksek Shields sayılarında oluştuğu görülmüştür.

Tüm bu çalışmaların dışında literatürde HAD modellemesi kullanılarak sediment oyulmasının incelendiği çalışmalar EK-1’de özetlenmiştir. Modelin oluşturulmasında literatürde yapılmış benzer çalışmalar ve bu çalışmaların yapılış metotları dikkate alınmıştır.

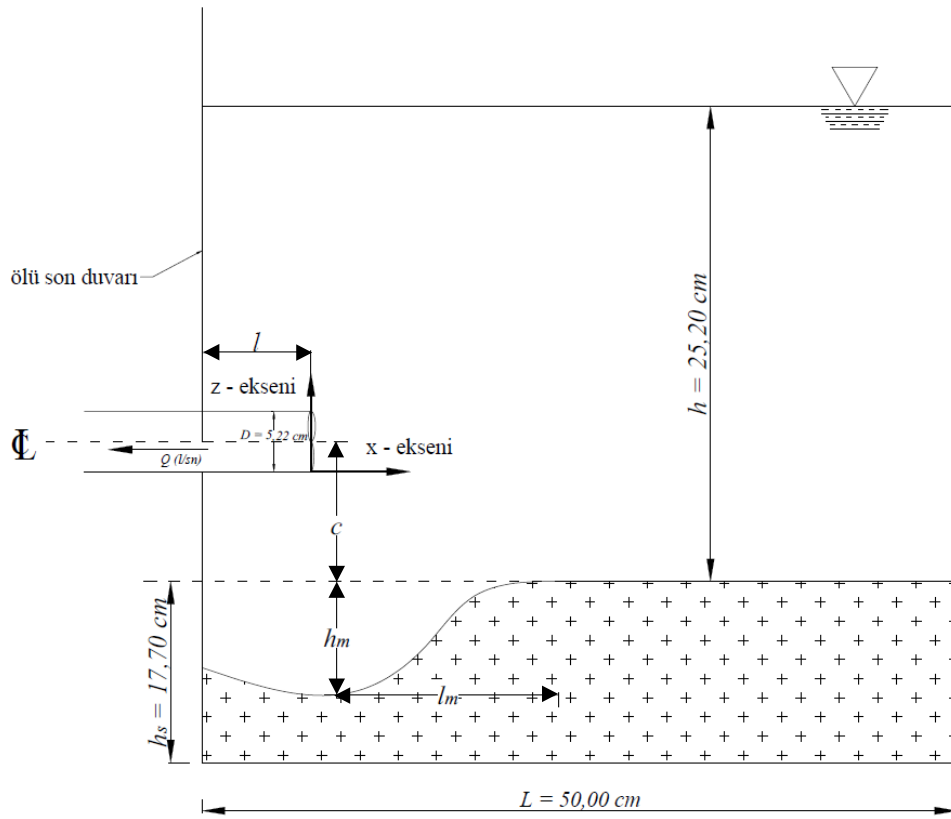
HAD modellemesi için incelenen deney düzenekleri, iki farklı sediment numunesini kapsamakta (Sediment numune bilgileri detaylı bir şekilde Çizelge 3.2’de verilmektedir) ve toplamda 26 adet olmaktadır. İncelenen modellere ait fiziksel özellikler, özet olarak Çizelge 5.1’de verilmekte olup seçilen deneyler özellikle su alma ağzının ölü-sona ve kanal tabanına göre konumunun oyulmaya etkisinin incelenebilmesi göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Modelleme için kullanılan eksen takımı ve model genel fiziksel özellikleri Şekil 5.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. HAD modellemesinde incelenen deney düzenekleri ve özellikleri

NUMUNE	c/D	l/D	Q (l/s)	F_d
NUMUNE 1	0,50	0,00	2,11	6,95
			4,14	13,61
			5,91	19,41
	0,50	1,00	2,00	6,57
			4,00	13,16
			6,00	19,72
	1,00	1,00	5,94	19,50
	1,25	1,00	5,98	19,63
	0,50	1,50	5,98	19,63
	0,50	0,50	5,91	19,42
	0,50	2,00	4,00	13,16
			5,91	19,42
	1,00	0,50	5,91	19,42
	1,25	0,50	5,96	19,59
NUMUNE 2	0,50	0,00	3,00	14,01
			6,33	29,52
	1,00	0,00	6,42	29,97
	1,00	1,50	6,22	29,01
	0,50	0,50	3,06	14,30
			6,18	28,82
	0,50	1,00	2,99	13,97
			6,19	28,88
	1,00	1,00	6,35	29,65
	1,50	1,00	6,38	29,78
	0,50	2,00	3,06	14,26
			6,10	28,44



(a)



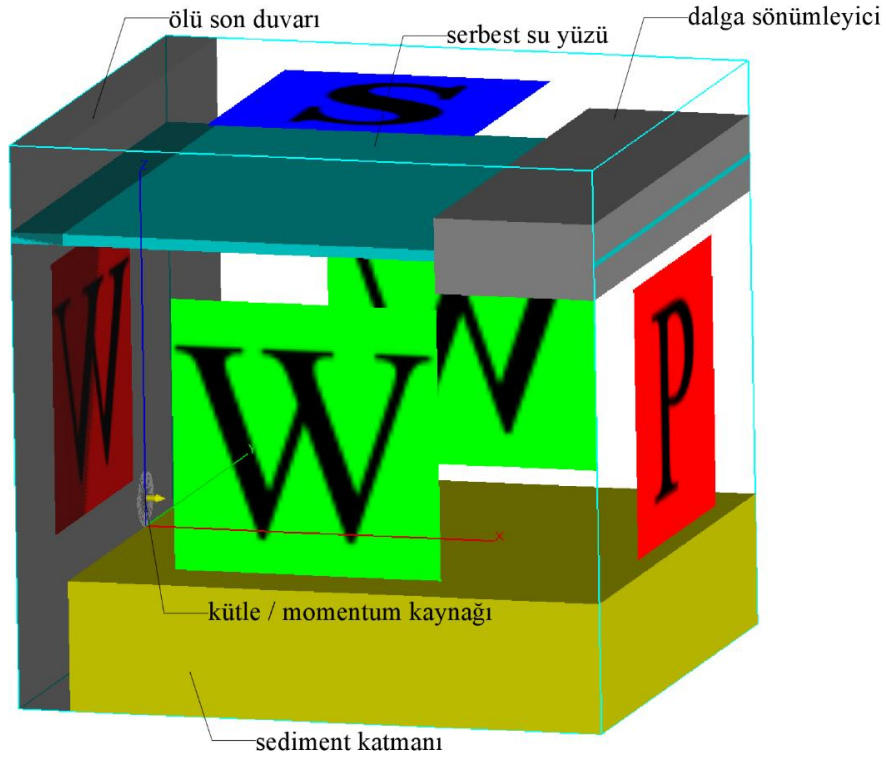
(b)

Şekil 5.2. HAD modeli ve parametreleri genel görünümü

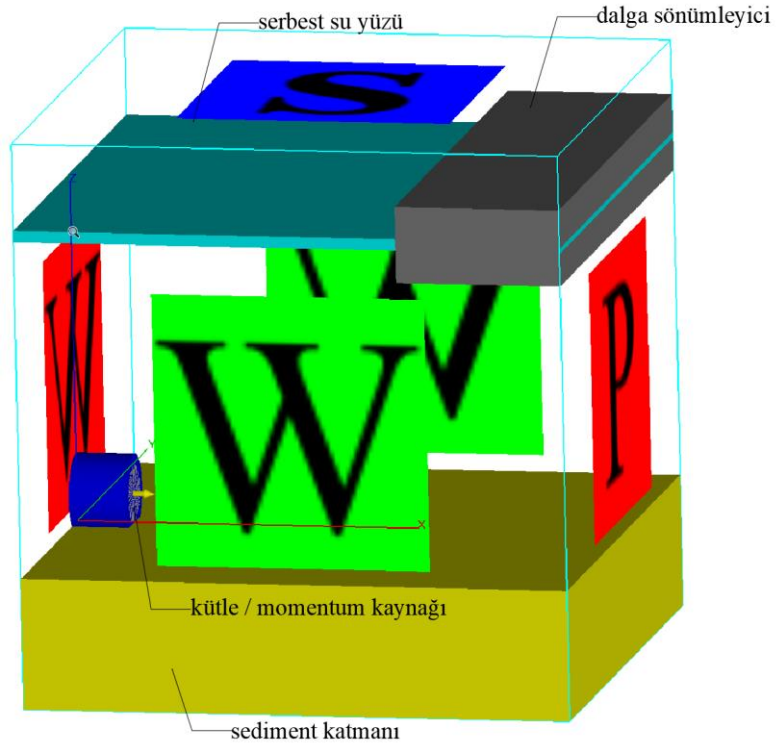
5.1. Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Modelin Fiziksel Yapısı

Model oluşturulma aşamasında sınır koşullarının doğru belirlenmesi, nümerik modelin gerçek fiziksel koşulları yansıtması açısından önemlidir. Su alma ağzındaki akış, deneysel modelde kullanılan su alma ağzı iç çapına eşit dairesel kütle / momentum kaynağı ile modellenmiştir. Kütle / momentum kaynağı çözüm hacmi sınırı ile bitişik olması durumunda kaynaktan çekilen debi hatalı olmaktadır. Bu durum Flow 3D (2008) Kullanıcı El Kitabı'nda da tavsiye edilmeyen bir durum olarak belirtilmektedir. Bunun engellenmesi adına $l/D = 0,00$ olan deney düzeneklerinin modellenmesinde farklı olarak ölü-son cidarı tanıtılmıştır. $l/D > 0,00$ düzeneklerinde ise ölü-son ile su alma ağzı arasında belli bir mesafe bulunduğundan ölü-son cidarı duvar sınır koşulu olarak modele tanıtılmıştır. Bu doğrultuda belirlenmiş olan sınır koşulları $l/D = 0,00$ ve $l/D > 0,00$ düzenekleri için sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' da verilmiş olup açıklamaları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Su alma ağzından çekilen suyun kanala geri verilmesi ve sistemin sürekliliğinin sağlanması amacıyla kanal memba sınır koşulu olarak hidrostatik basınç değeri verilmiştir. Bu basınç simülasyon zamanı $t = 0$ sn'sinde kanal içerisinde mevcut olan başlangıç su yüksekliğine eşittir. Son olarak kanal cidarları duvar sınır koşulu, çözüm hacminin atmosfere açılan yüzeyi ise simetri olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.3. Su alma ağzının ölü-sona bitişik olduğu düzeneklerde model yapısı ve sınır koşulları ($l/D = 0,00$)



Şekil 5.4. Su alma ağzı ölü-son arasında mesafe olan düzeneklerde model yapısı ve sınır koşulları ($l/D > 0,00$)

Çizelge 5.2. Tüm kanalı kapsayan genel çözüm ağı için sınır koşulları

Sınır Koşulu (Kısaltması)	Sınır koşulunun tanımlandığı çözüm ağı yüzeyi
Basınç (P)	+X yüzeyi (kanal membası)
Duvar (W)	-X (ölü-son cidarı)
	$\pm Y$ (kanal sağ ve sol duvarı)
	-Z (kanal tabanı)
Simetri (S)	+Z (kanalın atmosfere açılan yüzeyi)

5.2. Çözüm Ağının Belirlenmesi ve Sonuçların Çözüm Ağından Bağımsızlaştırılması

Simülasyon modelinin kurulumunda önemi yüksek olan çözüm ağı tercihi için $d_{50} = 1.25$ cm olan (Numune 1) sediment numunesi için üç farklı, $d_{50} = 0.62$ cm olan (Numune 2) sediment numunesi için ise dört farklı yoğunlukta çözüm ağı incelenmiştir. Bu çözüm ağ blokları, kanalın tümü için üniform tekil bir blok olarak belirlenmiştir. Çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde etmek amacıyla iki farklı deney düzeneği incelenmiştir. İncelenen deney düzenekleri, su alma ağzının ölü-son ile bitişik olduğu ($c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$) ve su alma ağzı ile ölü-son arası mesafenin su alma ağzı çapı kadar olduğu ($c/D = 0,50$; $l/D = 1,00$) düzeneklerdir. l/D parametresinin çevrinti kuvvetini, dolayısıyla oyulma geometrisini etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle seçilecek olan çözüm ağının tüm deney düzenekleri için geçerli olduğu gösterilmek istenmiştir. Su alma ağzından çekilen debi kütle / momentum kaynağı kullanılarak sağlandığından su alma ağzı için ayrıca bir çözüm ağı bloğu tanımlanmamıştır. İncelenen çözüm ağı özellikleri ve elde edilen oyulma geometrisi parametreleri Çizelge 5.3'te kıyaslanmıştır. Bu deney düzenekleri 6,00 l/s debiler kullanılarak çalışılmış ve simülasyon süresi için oyulmanın denge durumuna geldiği süre seçilmiştir.

Çözüm ağı tercihi yapılırken farklı incelikte çözüm blokları denenmesine karşın, Numune 1 için yapılan tercihte esas sınırlayıcı faktörün çözüm ağı aralığı ve sediment danesi çapı oranı olduğu görülmüştür. Kullanılan yazılım, sediment danesi çapı / çözüm ağı aralığı oranının %10 değerinden fazla olmasının önerilmeyen bir durum olduğunu ifade eden bir uyarı mesajı göstermektedir. Bu durum yazılım el kitabında dikkat ile yaklaşılması gereken bir durum

olarak işaret edilmiştir. Ayrıca yapılan denemeler sonucunda bu oranın artmasının çözümün doğasında mevcut olan hata oranını artırdığı tecrübe edilmiştir. Bunun yanında sediment danesi çapı / çözüm ağı aralığı oranının %10'dan daha büyük olacak şekilde seçilmesi durumunda, sonuç alınamayacak ve çalışmanın verimini olumsuz yönde etkileyecek çözüm süreleri ortaya çıkmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında, sediment dane çapı değiştirilemeyeceğinden yazılım tarafından önerilen minimum çözüm ağı inceliği önerilen oran sağlanacak şekilde sınırlandırılmıştır.

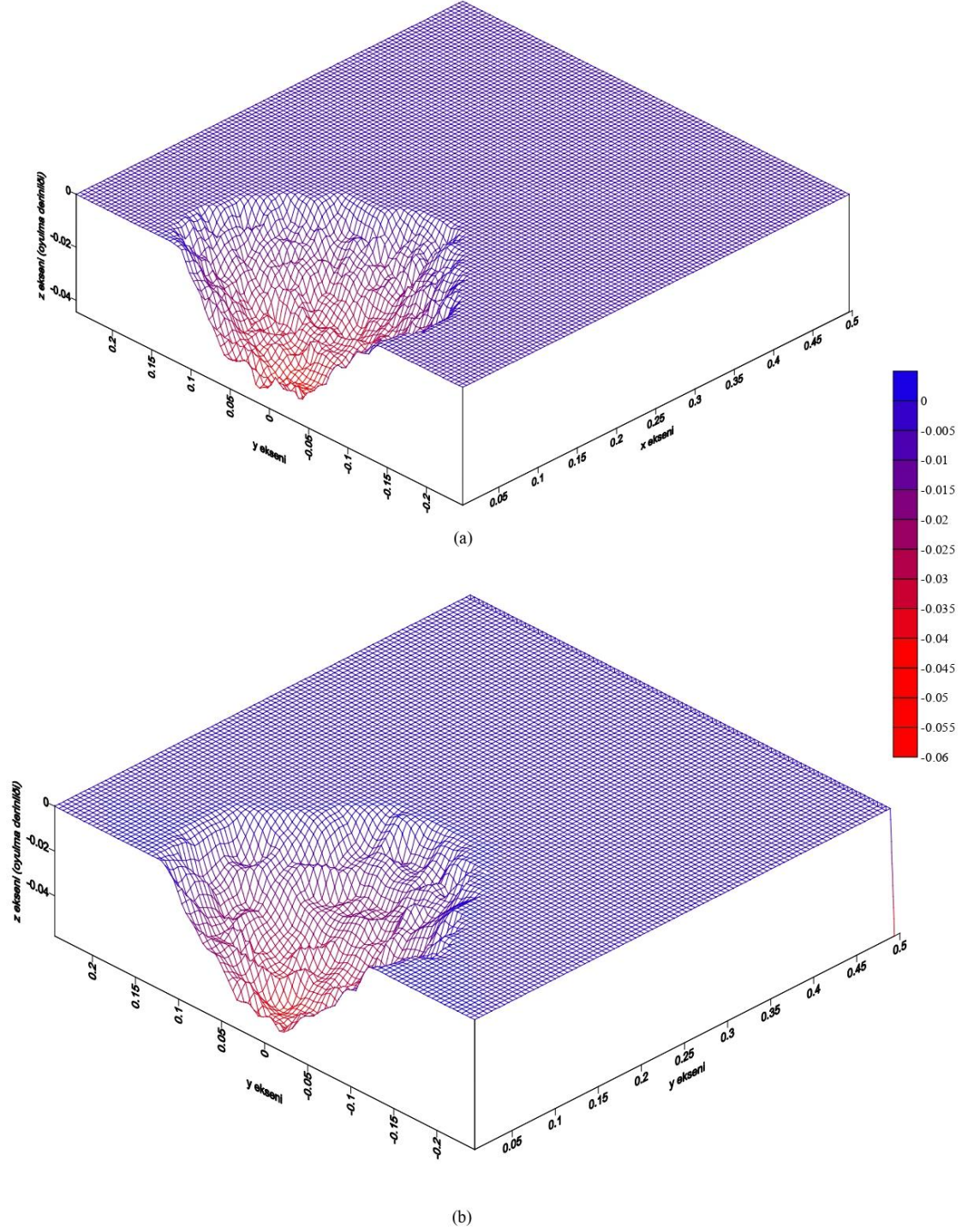
Numune 2 için bu durum sınırlayıcı bir faktör olmadığından ek olarak daha ince dördüncü ve beşinci iki çözüm bloğu denemesi daha yapılmıştır. Bu çözümlerin, Numune 1 için kullanılan çözüm ağı yapısı ile görece farkı düşük olduğu gösterilmiş ve çözüm süresinin de verimliliğinin gözetilmesi gerektiğinden Numune 1 için kullanılan ağı inceliğinin Numune 2 için de tercih edilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür.

Bu incelemeler sonucunda Numune 1 ve Numune 2 için çözüm ağı blok inceliği 1,25 cm belirlenmiş olup seçilen çözüm ağı sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 ile sırasıyla maksimum oyulma derinliği, genişliği ve uzunluğunun çözüm hücresi sayısına göre değişimi verilmiştir. Çözüm hücre sayısına göre oyulma özelliklerinin incelendiği bu şekiller incelendiğinde elde edilen çözümlerin seçilen çözüm ağı inceliğinden yeterince bağımsız olduğu görülmektedir. Seçilen çözüm ağı bloğu yapısı profil görüntüsü $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$ ve $c/D = 0,50$; $l/D > 0,00$ durumları için Şekil 5.13'de verilmektedir.

Numune 2'nin dane çapının küçük olmasından ötürü daha ince çözüm ağı ile deneme yapılabilmiş olup çözüm ağı inceliğinin sonuçlara etkisinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı gösterilmiştir. Bununla birlikte Şekil 5.5'de, yeterli kabul edilen 1,25 cm çözüm ağı inceliği ile 0,80 cm çözüm ağı inceliği kullanılarak elde edilen sonuçlar 3 boyutlu olarak kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonucunda iki farklı hassasiyete sahip çözüm ağı çözümleri ile elde edilen oyulma geometrilerinin birbirlerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Son olarak Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 ile iki farklı numune için denenmiş olan çözüm ağı inceliklerinden elde edilen, su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve kanalın boyuna eksenindeki profil sonuçları gösterilmiştir. Farklı çözüm ağları kullanılarak elde

edilen sonuçların kıyaslanması sonucunda 1,25 cm çözüm ağı inceliğinin uygun olduğunu görülmüştür.

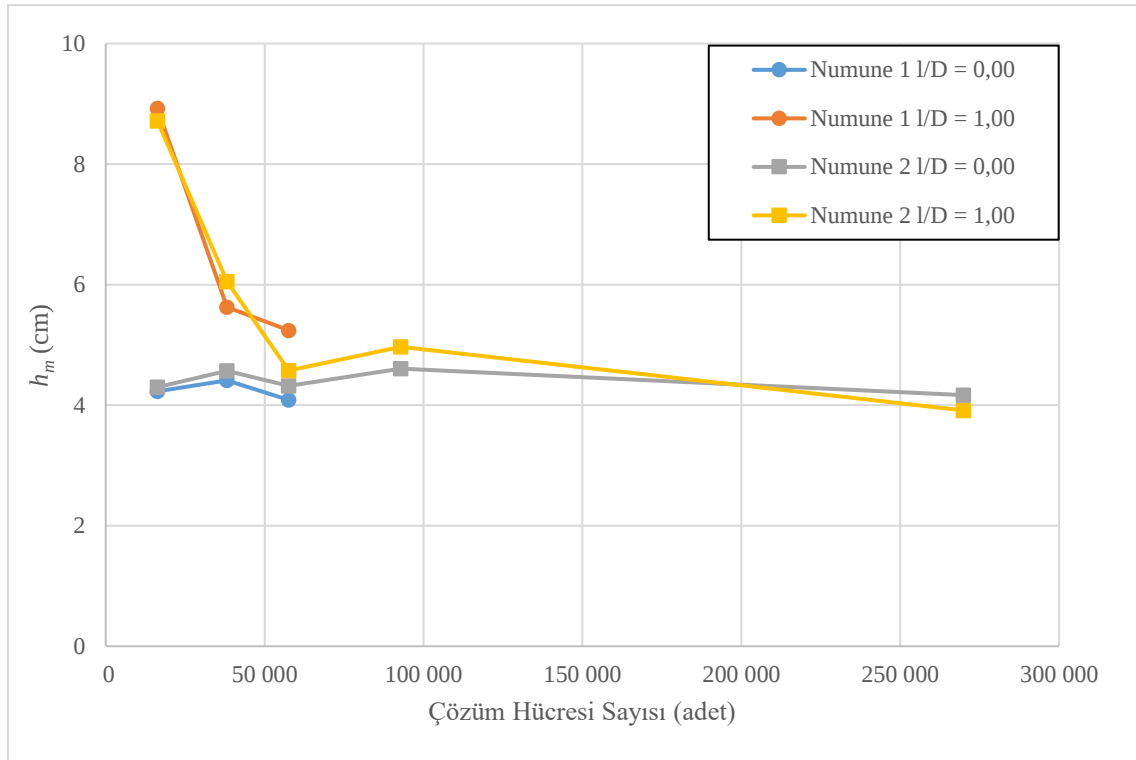


Şekil 5.5. Numune 2 için (a) 0,80 cm inceliğinde ve (b) 1,25 cm inceliğinde çözüm ağıları ile alınan sonuçların 3 boyutlu kıyaslanması ($c/D = 0,50$; $l/D = 1,00$)

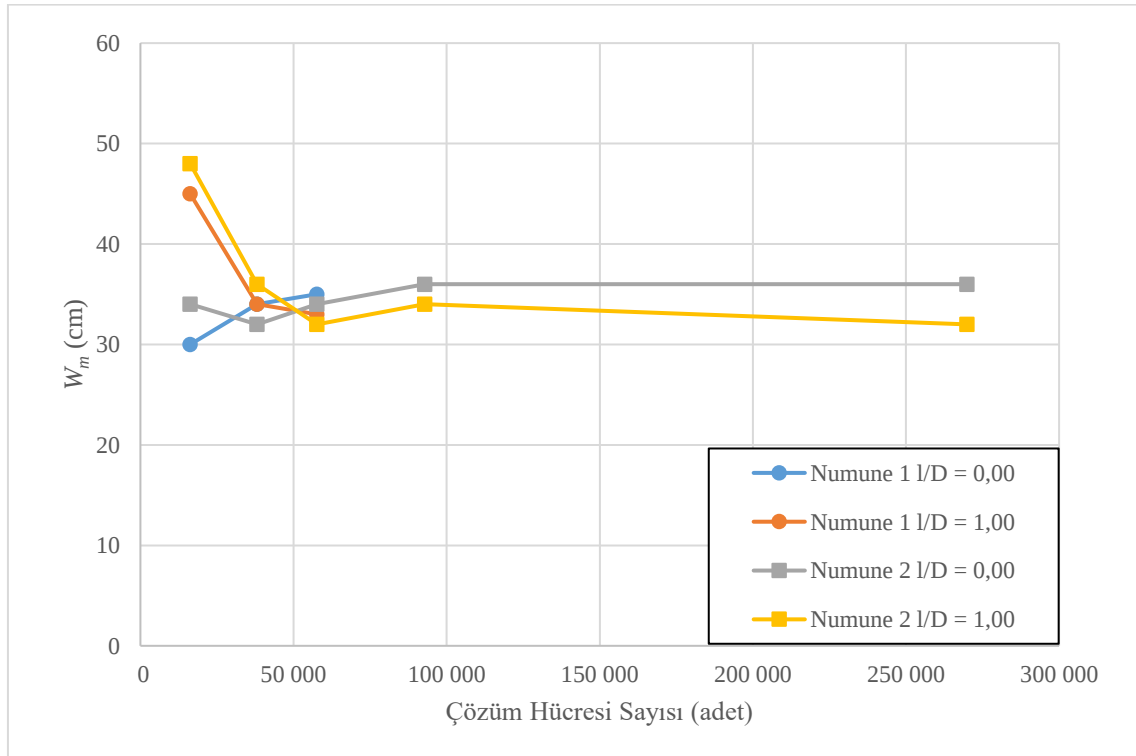
HAD simülasyonları yapılırken Intel® Core™ i5-8400 işlemcisine ve 16 gb 2400 Mhz CL15 çift kanal RAM sistemine sahip kişisel masaüstü bilgisayar kullanılmıştır. Sonuçların çözüm ağı özelliklerinden bağımsız olmasının sağlanması için yapılan çalışmalarda 0,80 cm inceliğindeki çözüm ağı kullanılan 1500 sn süreli HAD modelinin çözümlenmesi 7 gün sürmektedir. Çözüm ağı inceliği 1,15 cm değerine çıkarıldığında bu süre yaklaşık 3 güne düşmekte; 1,25 cm çözüm ağı inceliği ile ise çözüm süresi yaklaşık 1 gün olmaktadır. Farklı çözüm ağları ile elde edilen sonuçlar ve bu çözüm ağlarının çözümleme süresine etkileri göz önüne alınmıştır.

Çizelge 5.3. Çözüm ağı belirlenmesinde incelenen çözüm blokları özellikleri ve bu incelemeler sonucu elde edilen sonuçlar

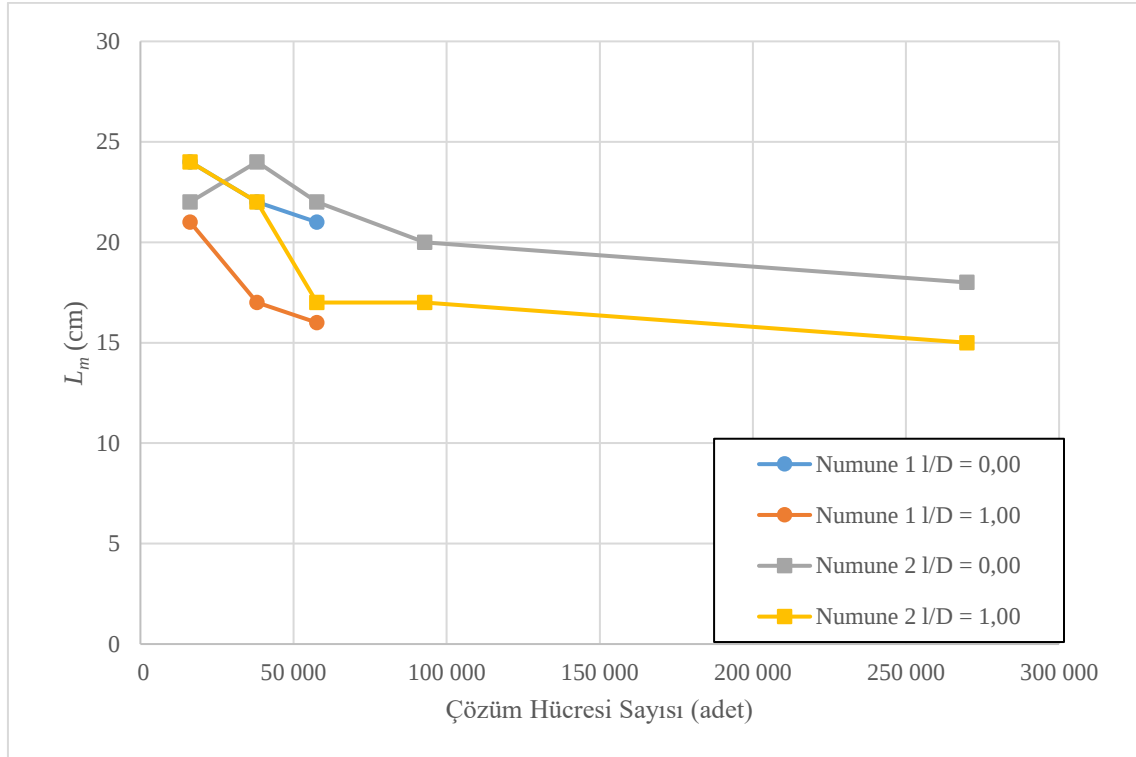
Deney Düzeneği			Çözüm Ağ Bloğu Özellikleri		Oyulma Geometrisi Parametreleri		
Numune	c/D	l/D	Çözüm Hücresi Sayısı (adet)	Çözüm Ağı inceliği (cm)	h_m (cm)	W_m (cm)	L_m (cm)
Numune 1	0,50	0,00	57600	1,25	4,09	35	21
			38115	1,50	4,41	34	22
			16250	2,00	4,23	30	24
		1,00	57600	1,25	5,24	33	16
			38115	1,50	5,63	34	17
			16250	2,00	8,93	45	21
Numune 2	0,50	0,00	269892	0,80	4,17	36	18
			92880	1,15	4,61	36	20
			57600	1,25	4,32	34	22
			38115	1,50	4,57	32	24
			16250	2,00	4,30	34	22
		1,00	269892	0,80	3,91	32	15
			92880	1,15	4,97	34	17
			57600	1,25	4,58	32	17
			38115	1,50	6,05	36	22
			16250	2,00	8,72	48	24



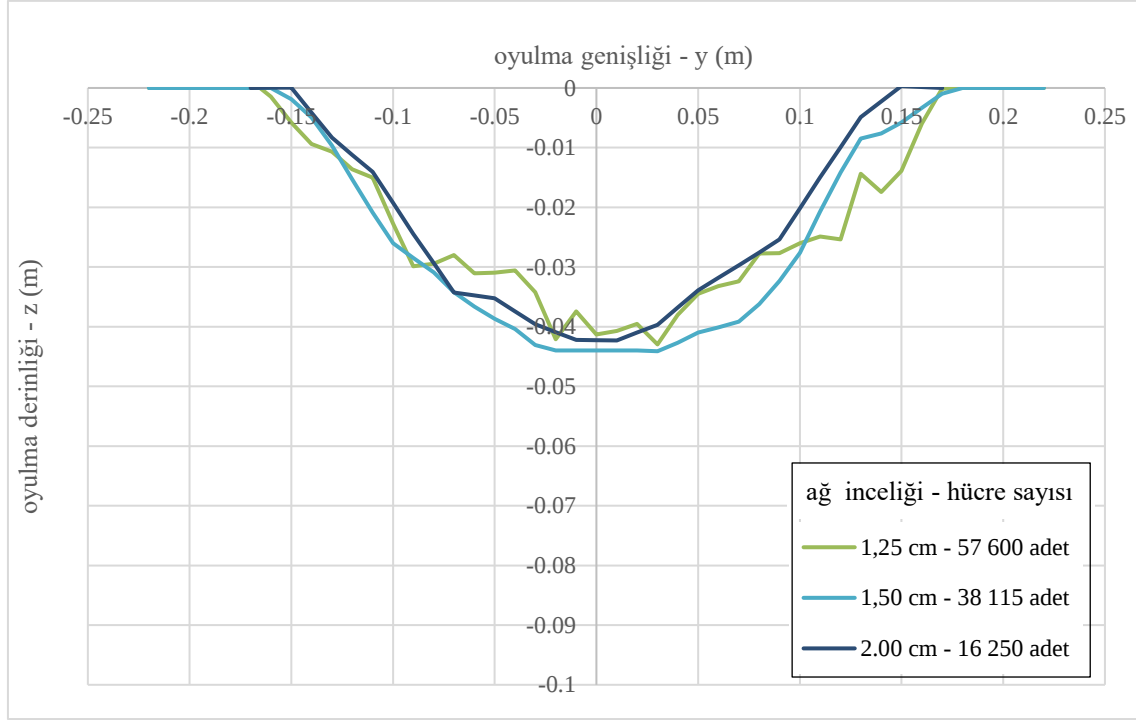
Şekil 5.6. Maksimum oyulma derinliğinin çözüm hücresi sayısına göre değişimi



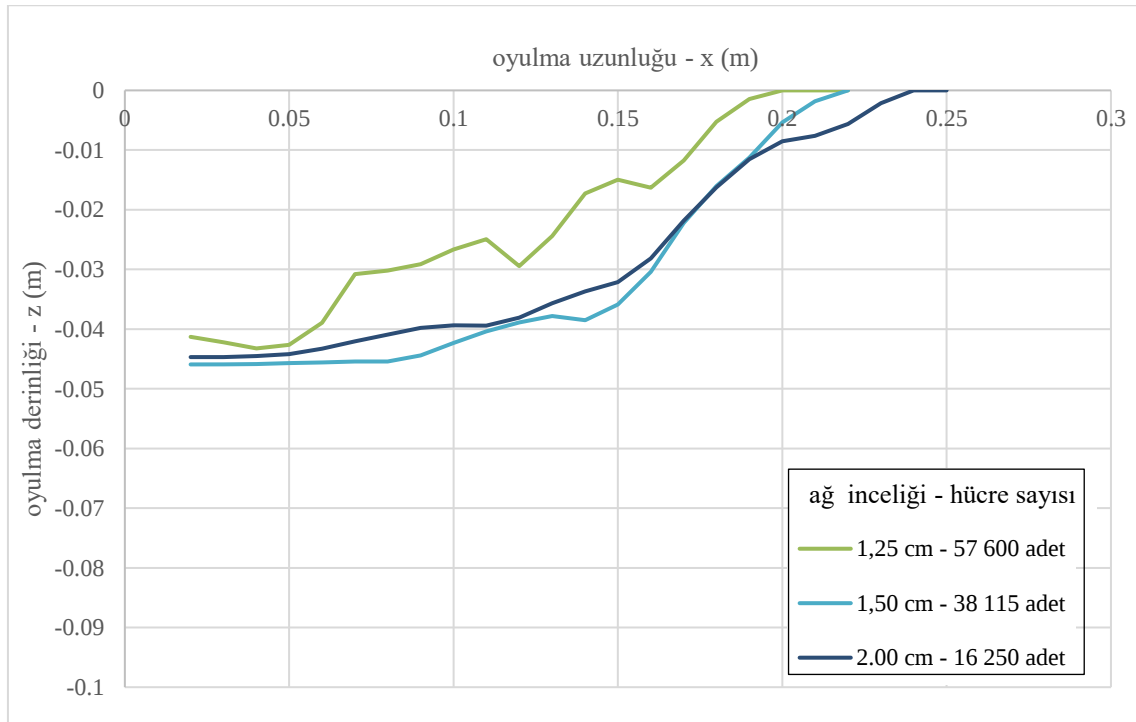
Şekil 5.7. Maksimum oyulma genişliğinin çözüm hücresi sayısına göre değişimi



Şekil 5.8. Maksimum oyulma uzunluğunun çözüm hücresi sayısına göre değişimi

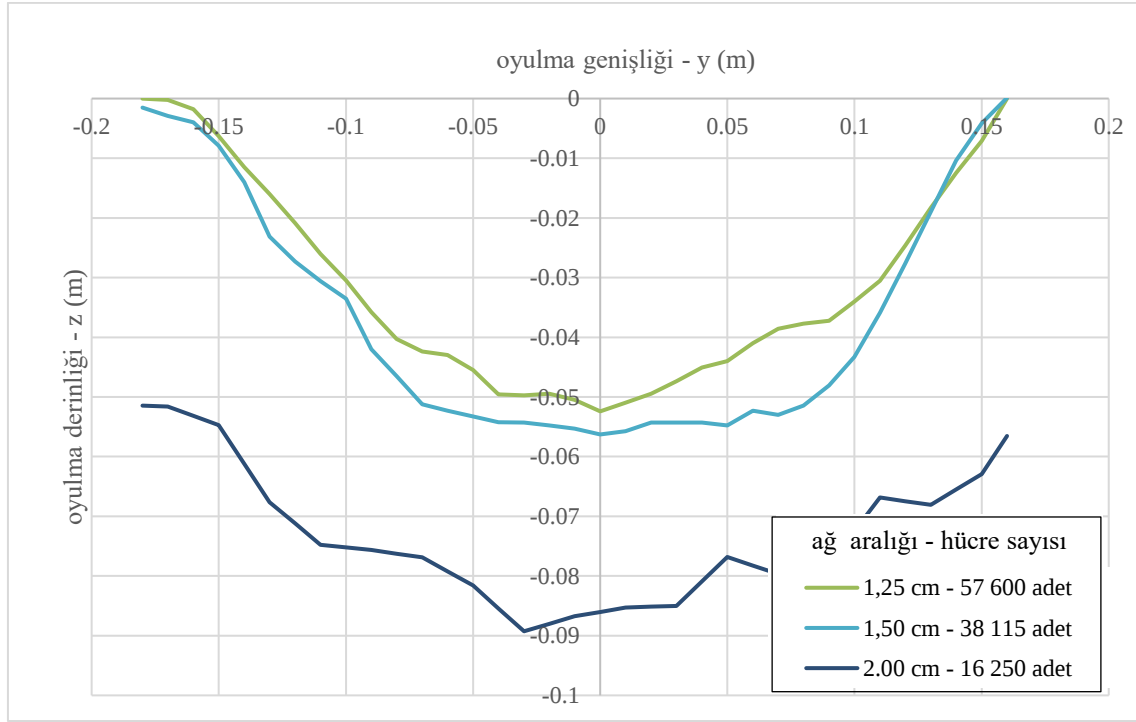


(a)

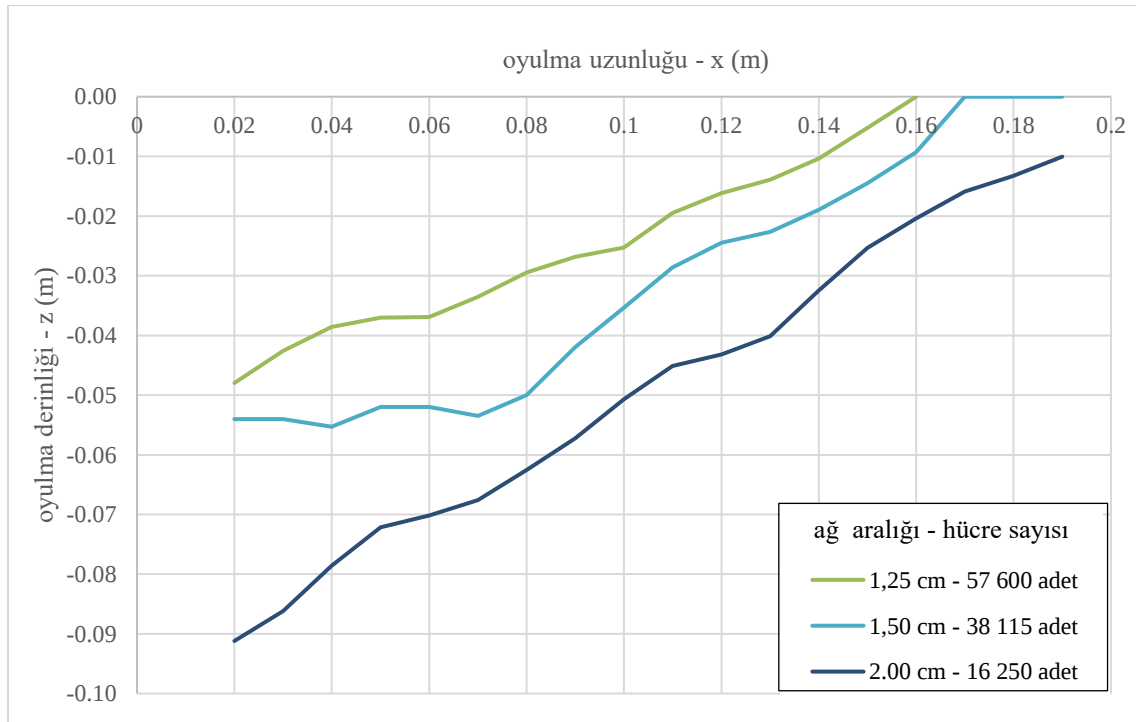


(b)

Şekil 5.9. Numune 1 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması

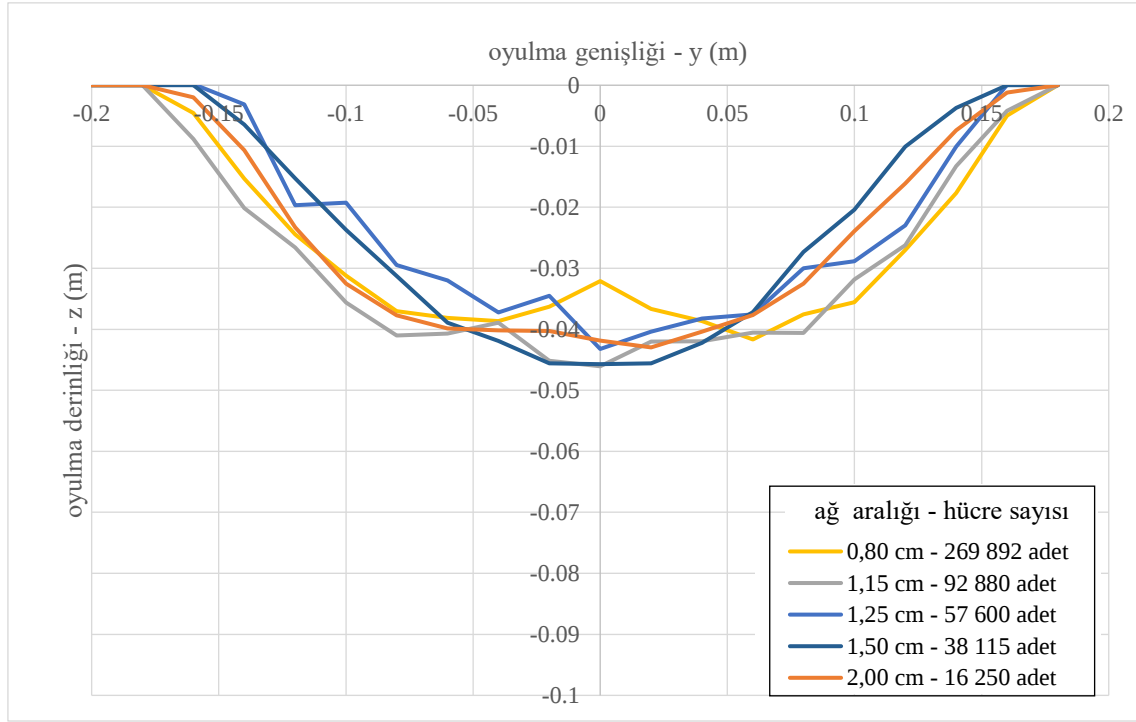


(a)

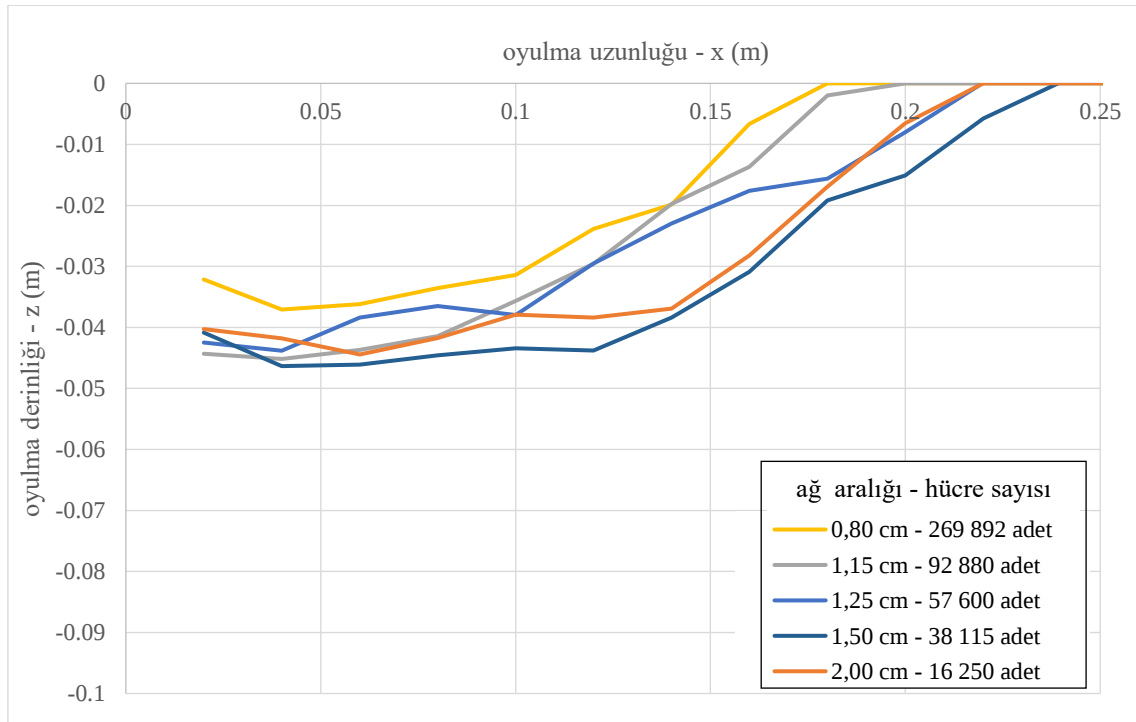


(b)

Şekil 5.10. Numune 1 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1,00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması

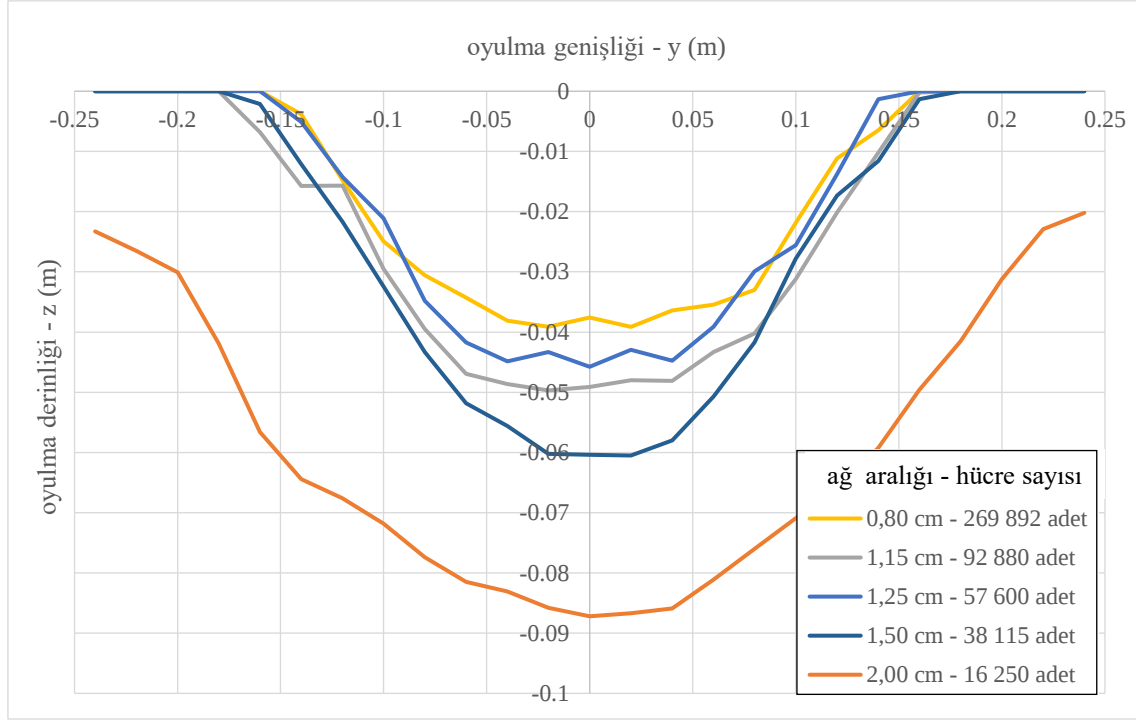


(a)

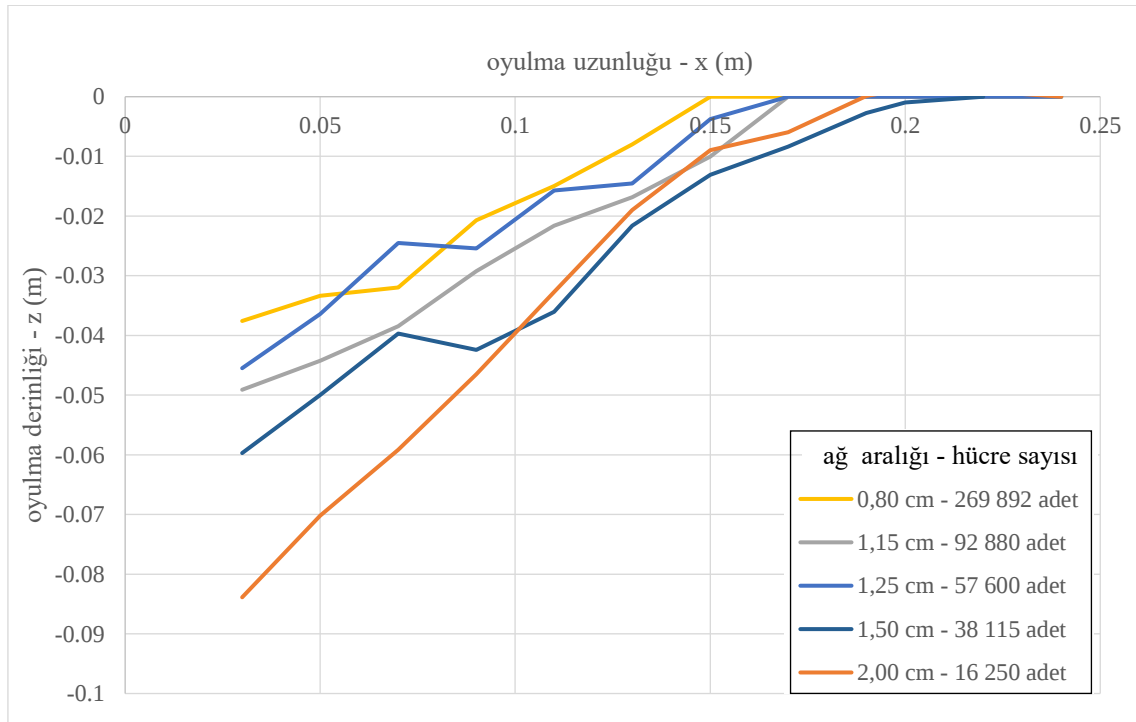


(b)

Şekil 5.11. Numune 2 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0,00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması

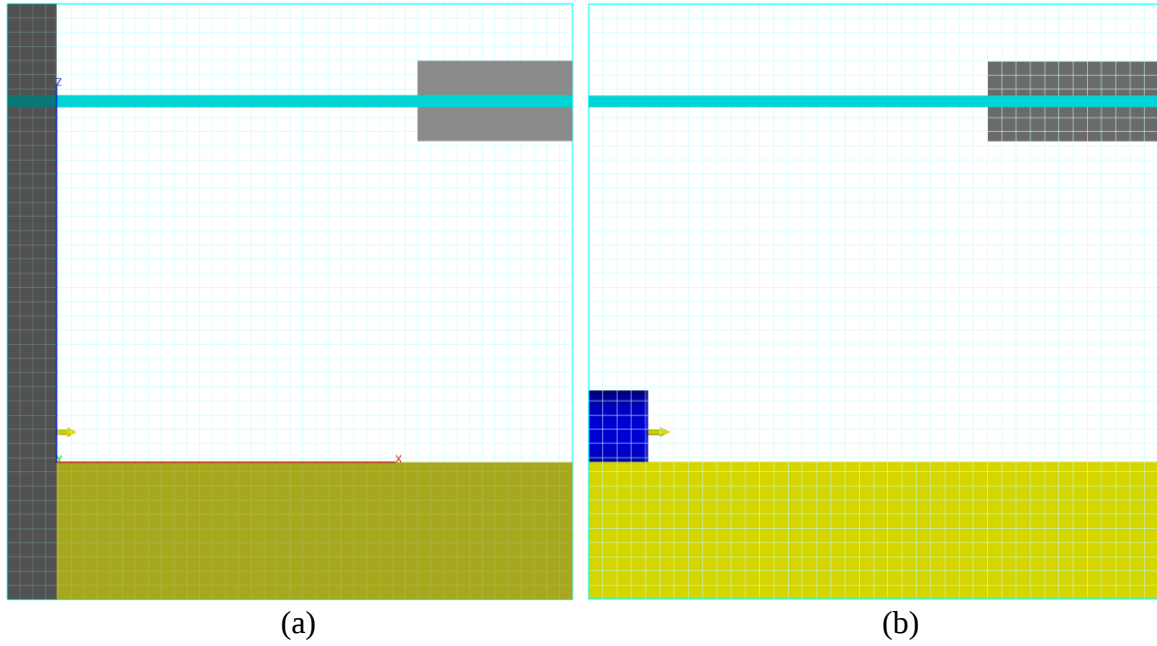


(a)



(b)

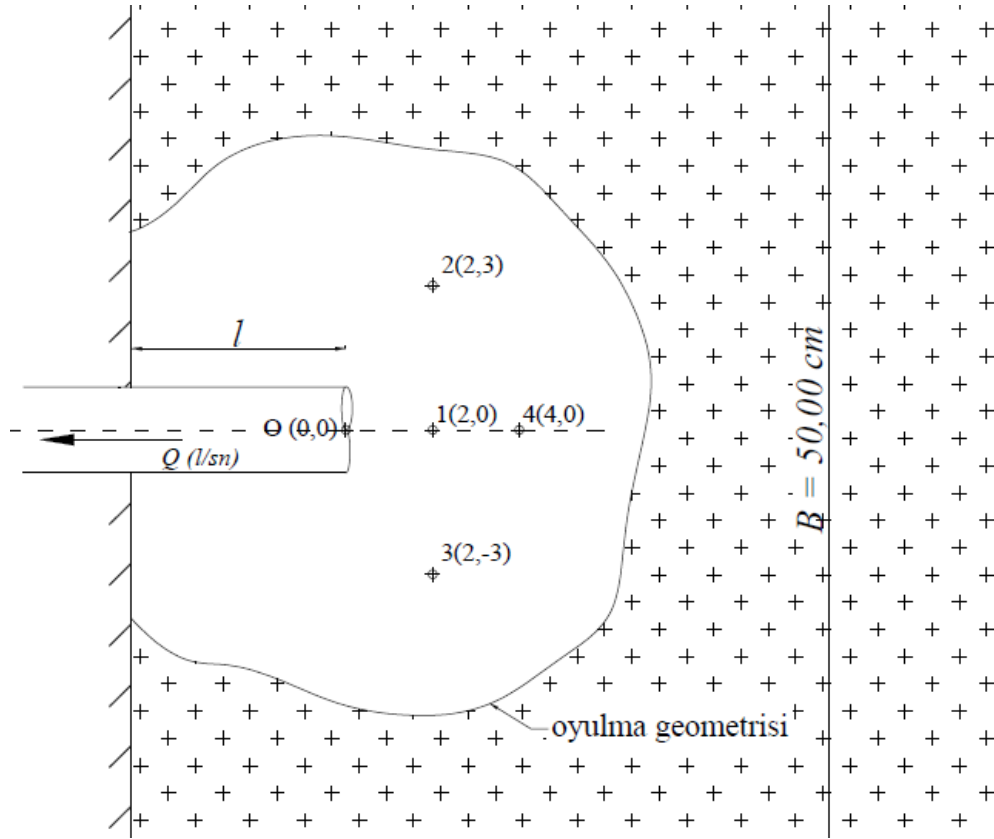
Şekil 5.12. Numune 2 için incelenmiş olan çözüm ağ bloğu sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1,00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması



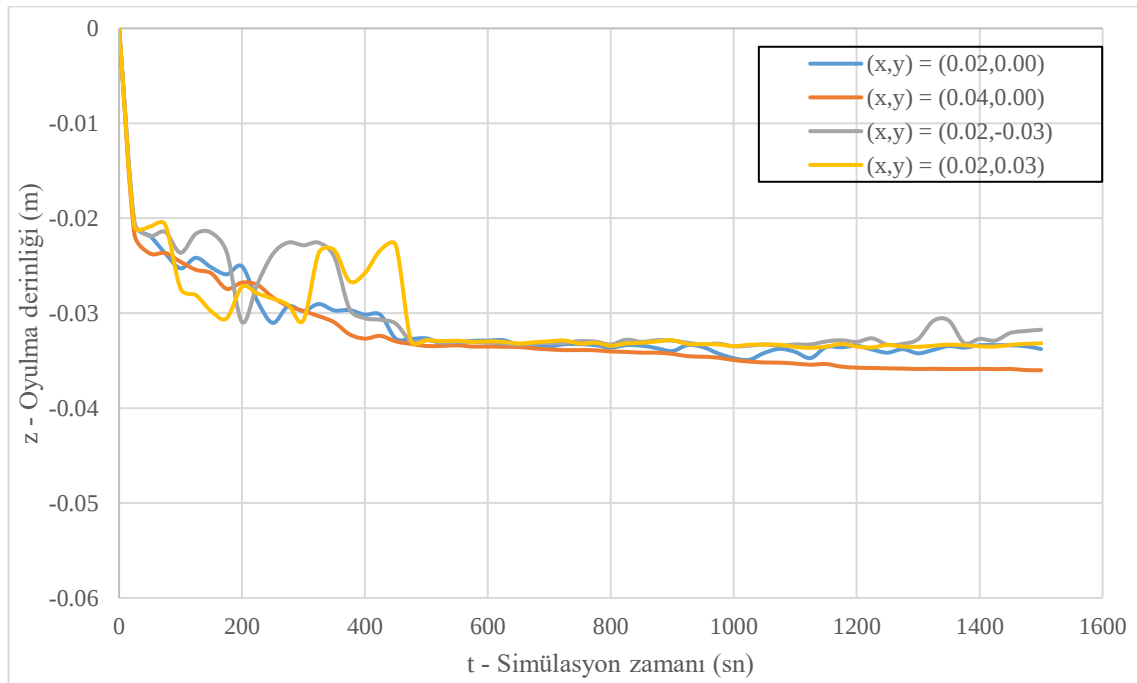
Şekil 5.13. Numune 1 ve Numune 2 için (a) $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$ ve (b) $c/D = 0,50$; $l/D > 0,00$ modellerinde kullanılan 1,25 cm inceliğe sahip çözüm ağı bloğu profil görüntüsü

5.3. Simülasyon Süresinin Belirlenmesi

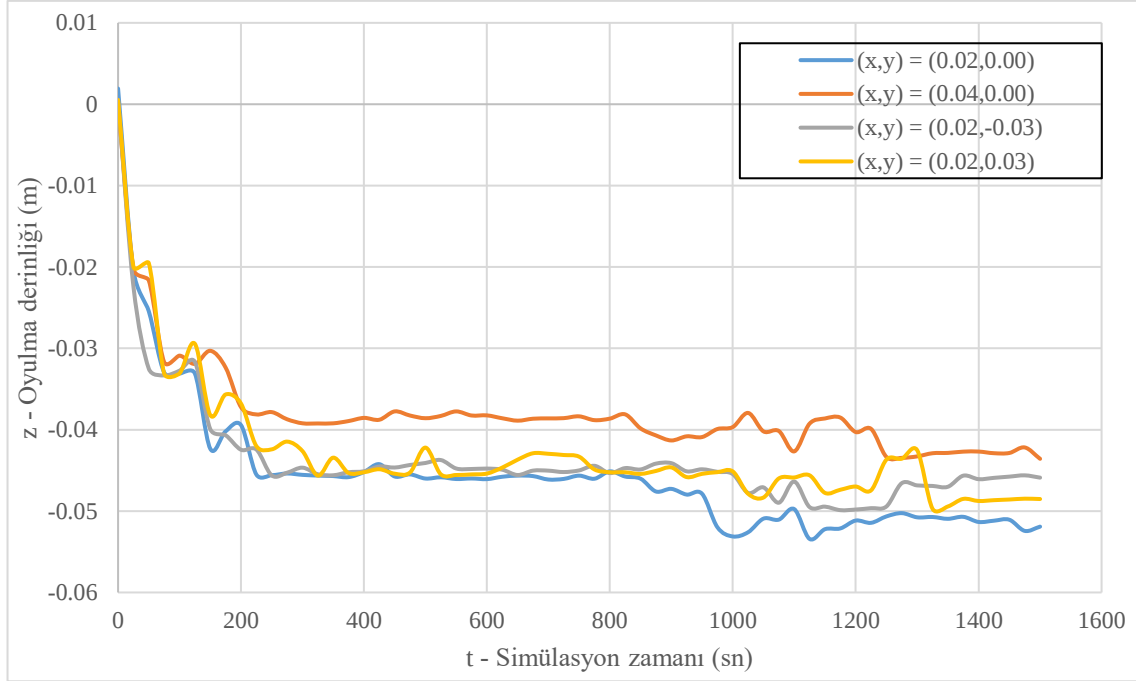
Model oluşturulma aşamasında simülasyon süresinin belirlenmesinde ortalama oyulma derinliğinin deneysel modelde de olduğu gibi, görece değişiminin 2 mm'den az olması denge durumuna geldiği zaman olarak kabul edilmiştir. Denge durumuna gelen oyulma geometrisi üzerindeki değişimin sonucu etkilemeyecek kadar düşük olduğu kabul edilmektedir. Her deney düzeneği için zamana göre oyulma geometrisindeki değişim kıyaslanarak, sonuçların zamandan bağımsız olacağı optimum simülasyon süreleri tespit edilmiştir. Simülasyon süreleri incelenirken oyulma geometrisi üzerinde Şekil 5.14'de verilen dört farklı noktanın oyulma derinlikleri, $c/D = 0,50 - l/D = 0,00$, $c/D = 0,50 - l/D = 0,50$ ve $c/D = 1,00 - l/D = 0,50$ deney modelleri için incelenmiştir. Oyulma derinliğinin, verilen dört nokta ve üç model için zamana bağlı değişimleri Şekil 5.15 – Şekil 5.17'te verilmiştir. Ayrıca kalibrasyon aşamasında kritik Shields sayısı 0,05 olarak yapılan ilk çözümlemelerde tüm modeller $t = 2000$ sn süresine kadar çözümlenmiş ve oyulma geometrileri 250 sn aralıklar için incelendiğinde 1500 sn'de 10 x 10 cm'lik oyulma bölgesinin ortalama değişiminin 2 mm'den daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda optimum çözüm süresi olarak 1500 sn tercihinin tüm modeller için uygulanmasına karar verilmiştir.



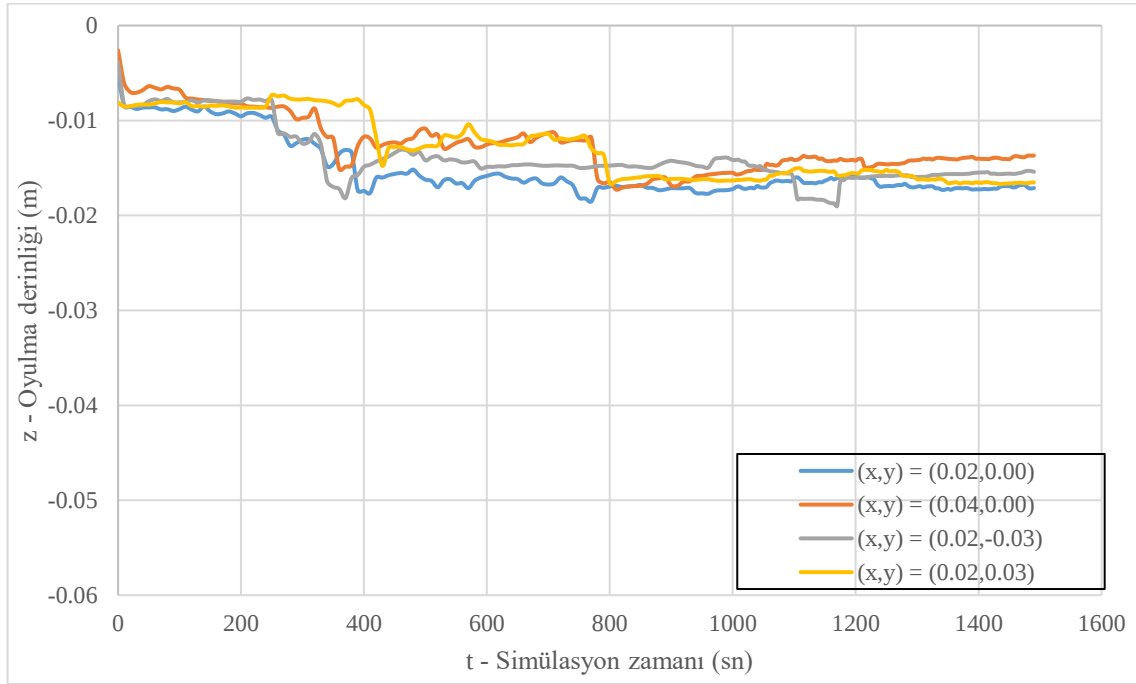
Şekil 5.14. Zamana bağlı oyulmanın incelendiği noktalar (koordinatlar cm cinsindedir)



Şekil 5.15. Seçilen noktalarda oyulmanın zamana bağlı değişimi ($c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,06$)



Şekil 5.16. Seçilen noktalarda oyulmanın zamana bağlı değişimi ($c/D = 0,50$; $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,05$)



Şekil 5.17. Seçilen noktalarda oyulmanın zamana bağlı değişimi ($c/D = 1,00$; $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,05$)

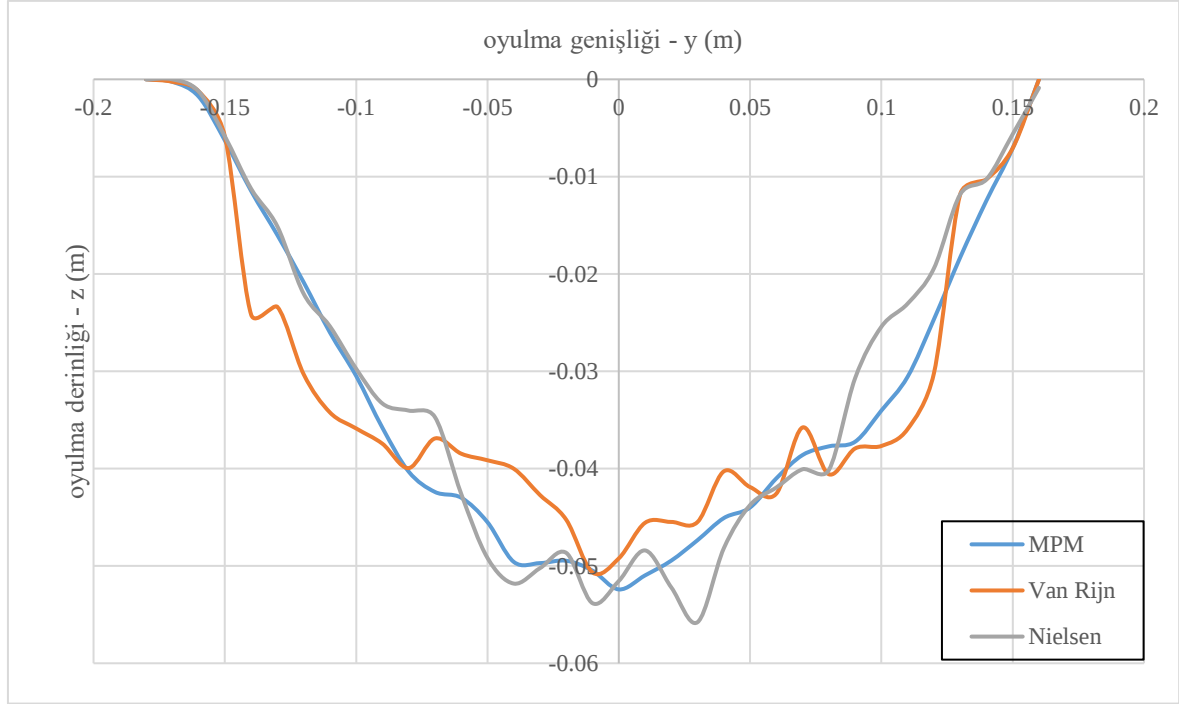
5.4. Sediment Yatak Taşınım Modelinin Belirlenmesi ve Oyulma Modeli

Deneysel modelde kullanılan sediment numunelerinin fiziksel nitelikleri 3. bölümünde verilmiştir. Sayısal modellemede, kullanılan numune özellikleri için verilen bu değerler kullanılmıştır. Dey ve Sarkar (2006), $\sigma_g \leq 1,4$ olması durumunda sedimentin üniform kabul edilebileceğini ifade etmişlerdir. Kullanılan iki numunenin de üniformluk derecelerinin 1,17 ve 1,18 olmasından ötürü modelleme çalışmasında bu numuneler üniform kabul edilmiştir. Yatak yükü taşınım modeli olarak Meyer, Peter ve Muller (1948) taşınım yaklaşımı kullanımına karar verilmiş, yatak taşınım katsayısı ise varsayılan değer olan 8 kabul edilmiştir.

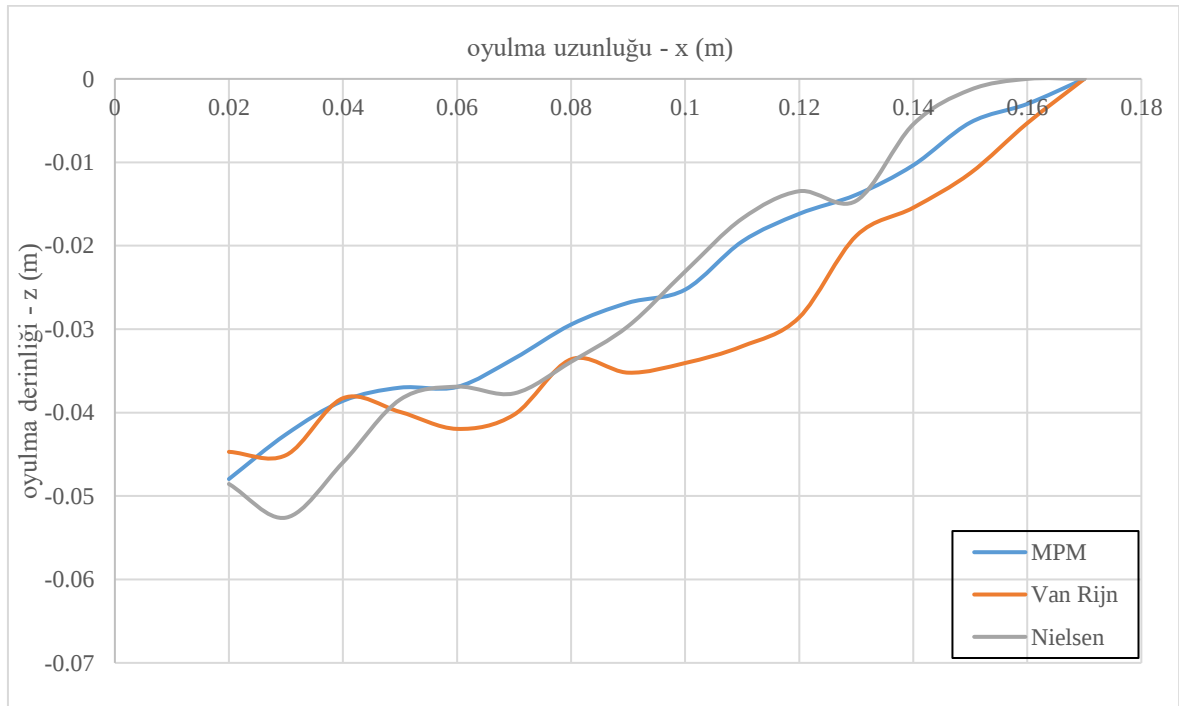
Önceki çalışmalar bölümünde verilmiş olan; Apsley ve Stansby (2008), yatak morfolojisi ve eğimin sediment taşınım denklemlerindeki etkisinin HAD incelemesinde, Wei, Brethour, Grünzner ve Burnham (2014) ve Aydın ve Karaduman (2018) ise kapak altı jet akımlarında oyulma karakteristiğinin HAD incelemesinde yatak taşınım modeli olarak Meyer, Peter ve Muller (1948) taşınım yaklaşımını tercih etmişlerdir. Ayrıca An, Ku ve Julien (2015), kapak altı jet akımından kaynaklı oyulmayı inceledikleri çalışmalarında Meyer, Peter ve Muller (1948) taşınım yaklaşımını da içeren üç farklı yaklaşım incelemişler ve kullanılan tüm yaklaşımların deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Literatürde mevcut çalışmalar incelenmiş ve yatak taşınım modeli olarak büyük çoğunlukla Meyer, Peter ve Muller (1948) yaklaşımının kullanılmasından ötürü bu çalışmada da kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca mevcut çalışmada hazırlanan HAD modeli üzerinde, yazılım içerisinde bulunan üç farklı yatak taşınım yaklaşımı, $c/D = 0.50$, $l/D = 1.00$, $Q = 6,00$ l/s model kurgusu için kıyaslanmış ve kıyaslama modellerinde 1 numaralı sediment numunesi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.18 ile verilmiştir. İncelenen oyulma geometrilerinde, önemli farklar görülmemesi ve Meyer, Peter ve Muller (1948) modelinin yukarıda literatürden verilen çalışmalarla da ifade edildiği üzere sıklıkla kullanılması, modelin tercih edilmesinde esas etken olmuştur.

Son olarak kritik Shields sayısının sediment yüzeyinde oluşan yerel eğim değişikliklerine göre ayarlanabilmesi için Eşitlik 4.6 ile verilen ve Apsley ve Stansby (2008) tarafından önerilen yaklaşım seçeneği aktive edilmiştir.



(a)



(b)

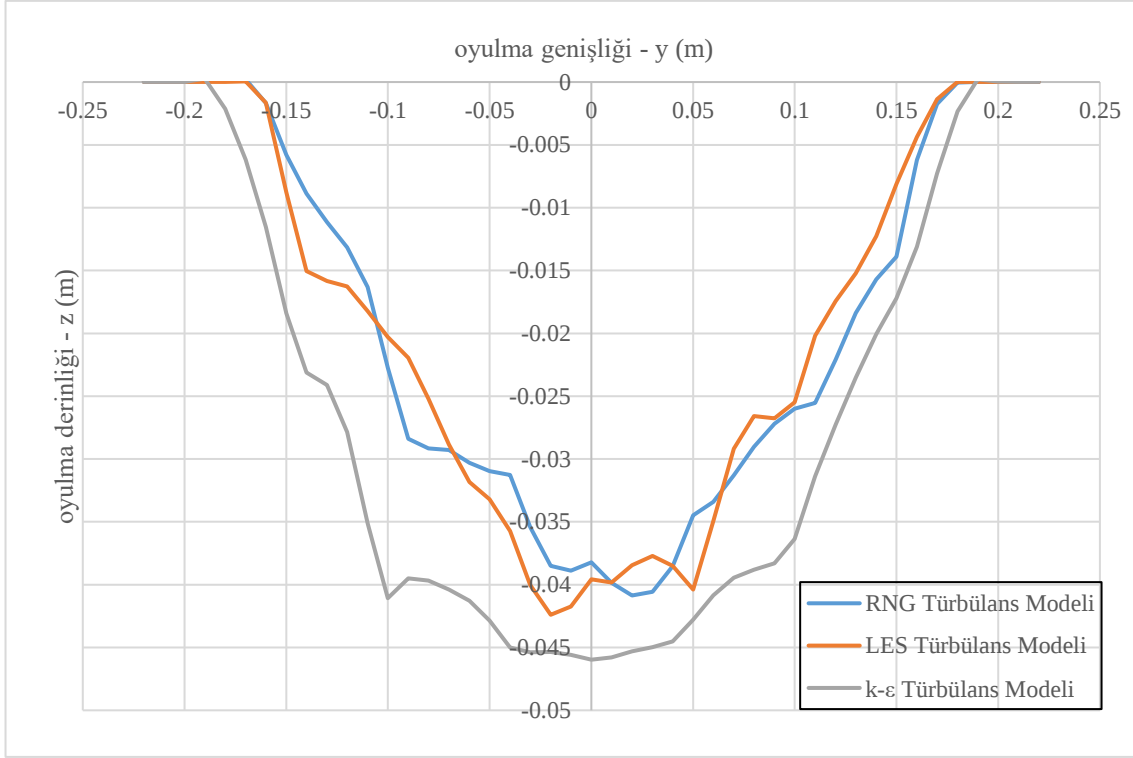
Şekil 5.18. Mevcut üç farklı yatak taşınım yaklaşımının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1,00$; $Q = 6,00$ l/s durumu için karşılaştırılması

5.5. Türbülans Modeli Belirlenmesi

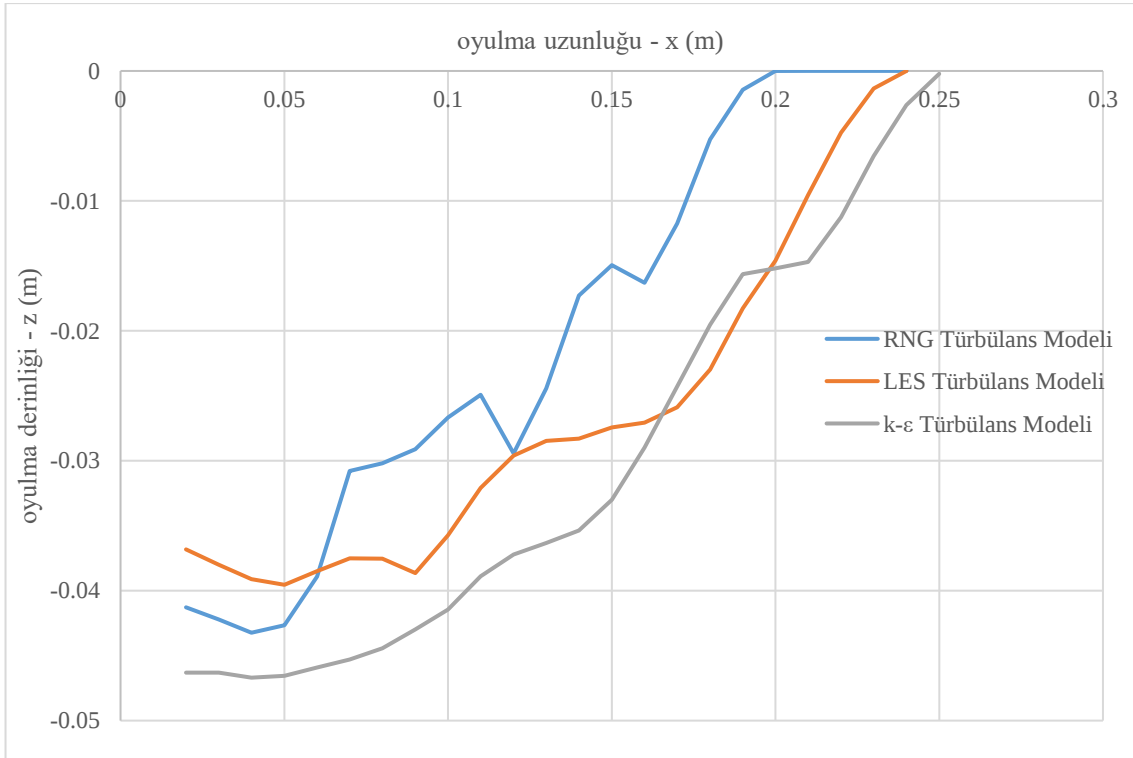
İncelenen oyulma olayının büyük bir kısmının akımın türbülanslı karakterinden kaynaklandığını deneysel gözlemler işaret etmektedir. Bu nedenle seçilecek olan modelin, deneyde gerçekleşen türbülans davranışını mümkün olan minimum hata ile ifade etmesi önemlidir. Literatürde oyulma ile ilgili yapılan çalışmalarda büyük çoğunlukla RNG $k - \varepsilon$ türbülans modelinin kullanıldığı görülmüştür. LES türbülans modeli çözüm yoğunluğu ve metodu gereği RANS tabanlı türbülans modellerinden daha gerçekçi sonuçlar veren bir modeldir. Buna karşın LES türbülans modeli kullanılarak elde edilen sonuçların çözüm ağı inceliği ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür.

Literatürde HAD modellemesi kullanılarak oyulmanın modellendiği çalışmalarda büyük çoğunlukla düşük hesaplama süresi ve isabetli sonuç verme yeteneği öne sürülerek RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu çalışmalar kapak altı akıştan kaynaklı oyulmalar, köprü ayağı oyulması, nehirlerde gözlemlenen oyulmalar gibi farklı durumların modellenmesini içermektedir. Ghasemi ve Soltani-Gerdefaramarzi (2017), dairesel tekli köprü ayağı etrafında farklı debili akışlardan kaynaklı oluşan oyulmayı RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanarak modellemişlerdir. Nisar, Sarwar ve Nabi (2015), halihazırda çalışan bir barajın dolu savağının farklı işletme koşulları için modellenmesinde yine RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanmışlardır. Tang ve Puspari (2021), dairesel köprü ayağı çevresinde meydana gelen oyulmayı Flow 3D yazılımı kullanarak modellemişlerdir. Çalışmalarında RNG $k - \varepsilon$ türbülans modelinin görece ince olmayan çözüm ağı kullanıldığında isabetli sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Mevcut çalışma kapsamında RNG $k - \varepsilon$, LES ve standart $k - \varepsilon$ türbülans modelleri kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’te kıyaslanmış ve oyulma geometrilerinde önemli farklar gözlemlenmemiştir. Fakat Flow 3D (2008) kullanıcı el kitabında belirtildiği üzere LES modelinin doğru çözüm yapabilmesi için çok daha ince bir çözüm ağı oluşturulması gerekmektedir. Bu durum hesap sürelerini optimum durumdan uzaklaştırmakta ve HAD çözümlemesinin temel hedefi olan, mühendislik uygulamalarında hızlı karar verebilme yetkinliğini ortadan kaldırmaktadır. LES modelinin yaygın olarak kullanılabilmesi için kişisel bilgisayarların donanımsal olarak yüksek performansa sahip olması gerekmektedir.

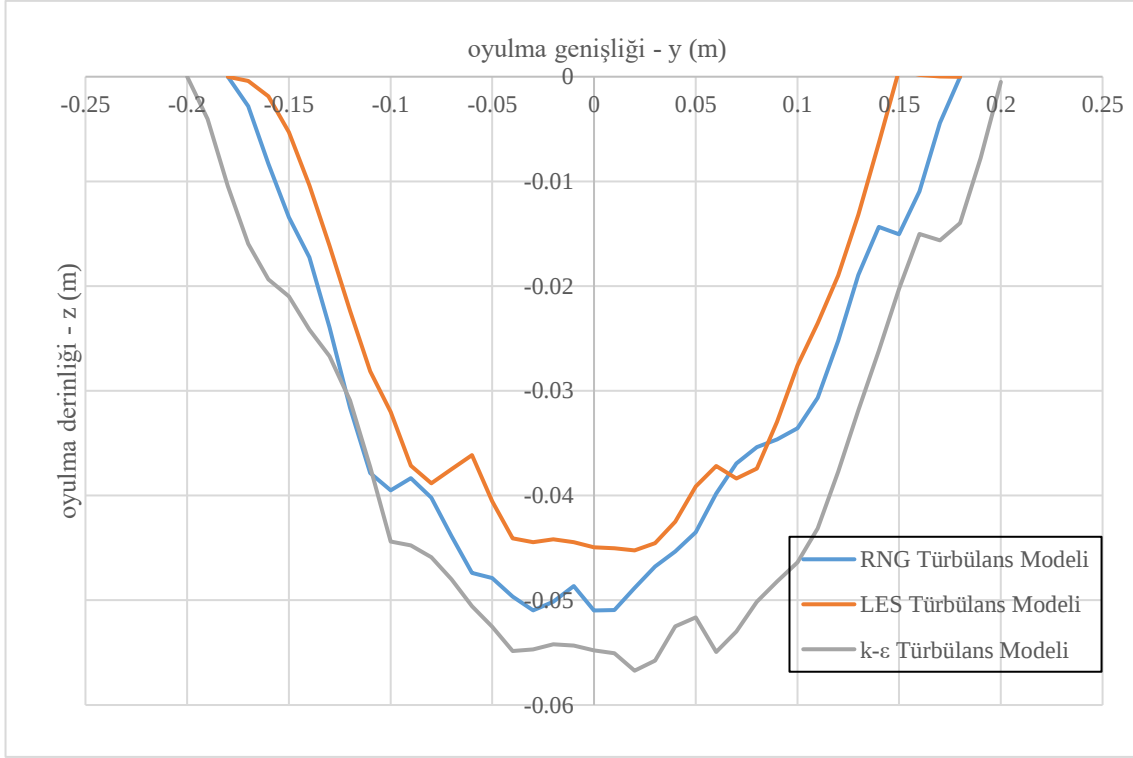


(a)

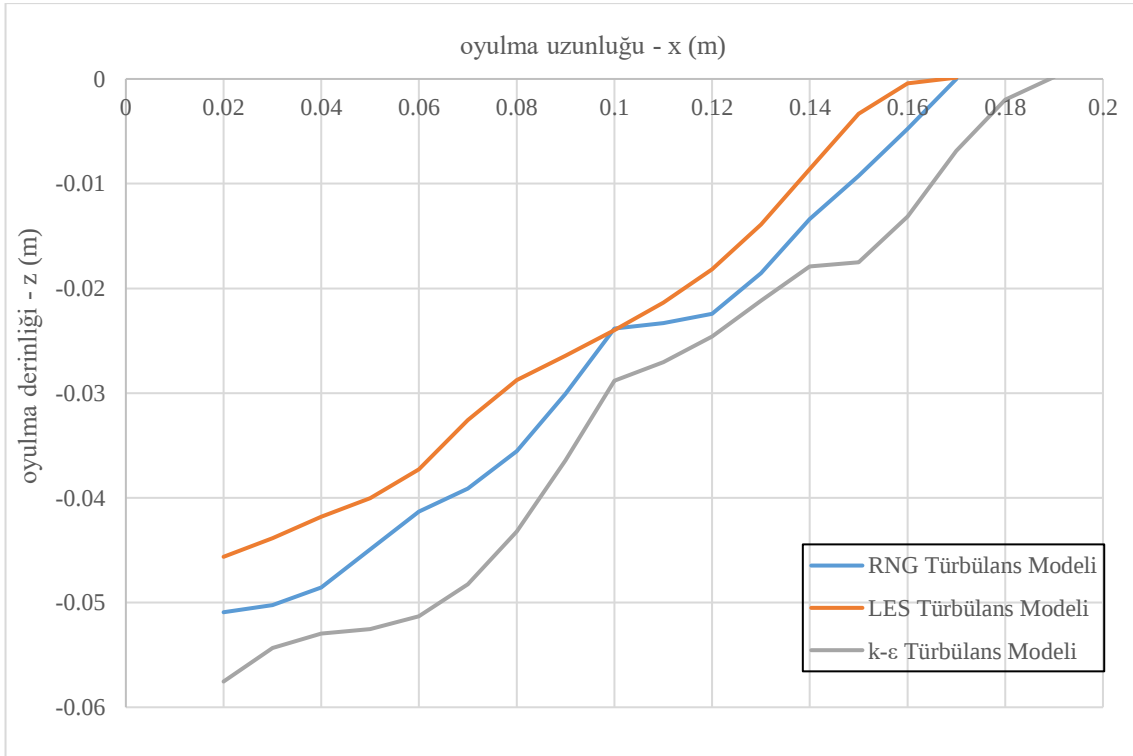


(b)

Şekil 5.19. 3 farklı türbülans modelinin (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$; $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması



(a)

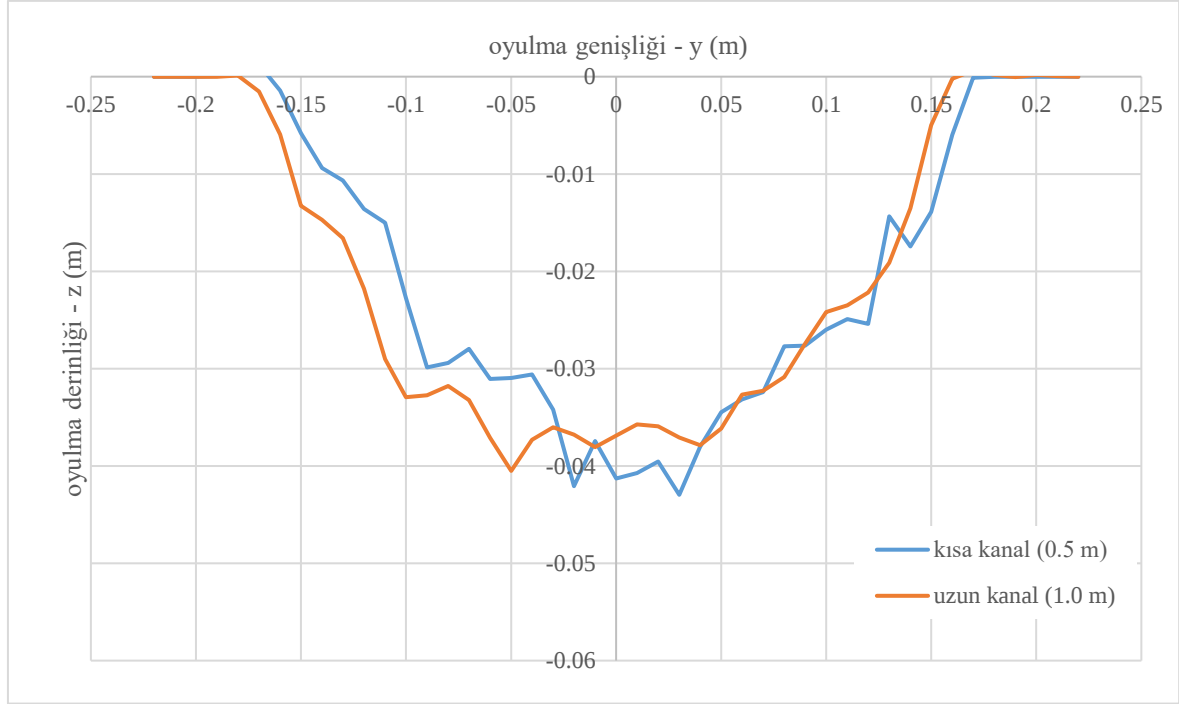


(b)

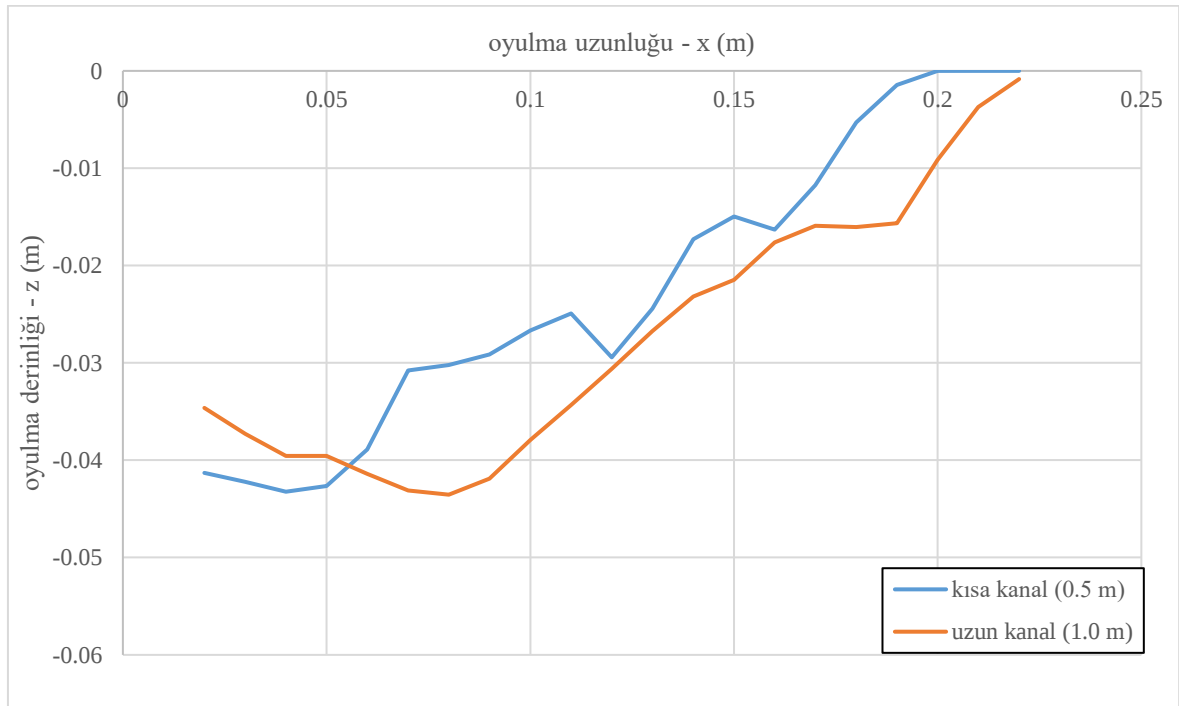
Şekil 5.20. 3 farklı türbülans modelinin (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,50$; $Q = 6$ l/s durumu için durumu için karşılaştırılması

5.6. Kanalin Modellenen Kısımının Uzunluğunun Belirlenmesi

Model geometrisi oluşturulması aşamasında deneysel model geometrileri genel olarak esas alınmış olup gerçekte 7,5 m olan deney kanalının 0,5 m'si modellenmiştir. Bu uzunluk çözüm süresinin optimize edilmesi amacıyla olabildiğince kısa seçilmeli, elde edilen sonuçların doğruluğunun bu değişkenden bağımsız olması için ise yeterince uzun olmalıdır. Model kanal uzunluğunu belirlenmesinde, $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$ ve $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$ düzenekleri üzerinde 0,5 m ve 1,0 m kanal uzunlukları kıyaslanmıştır. Bu düzenekler l değerleri için maksimum ve minimum değerler olduğundan tercih edilmiştir. Kıyas sonuçları Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de verilmekte olup 0,5 m kanal uzunluğu seçilmesinin çözüme etkisinin ihmal edilecek düzeyde olduğu görülmüştür.

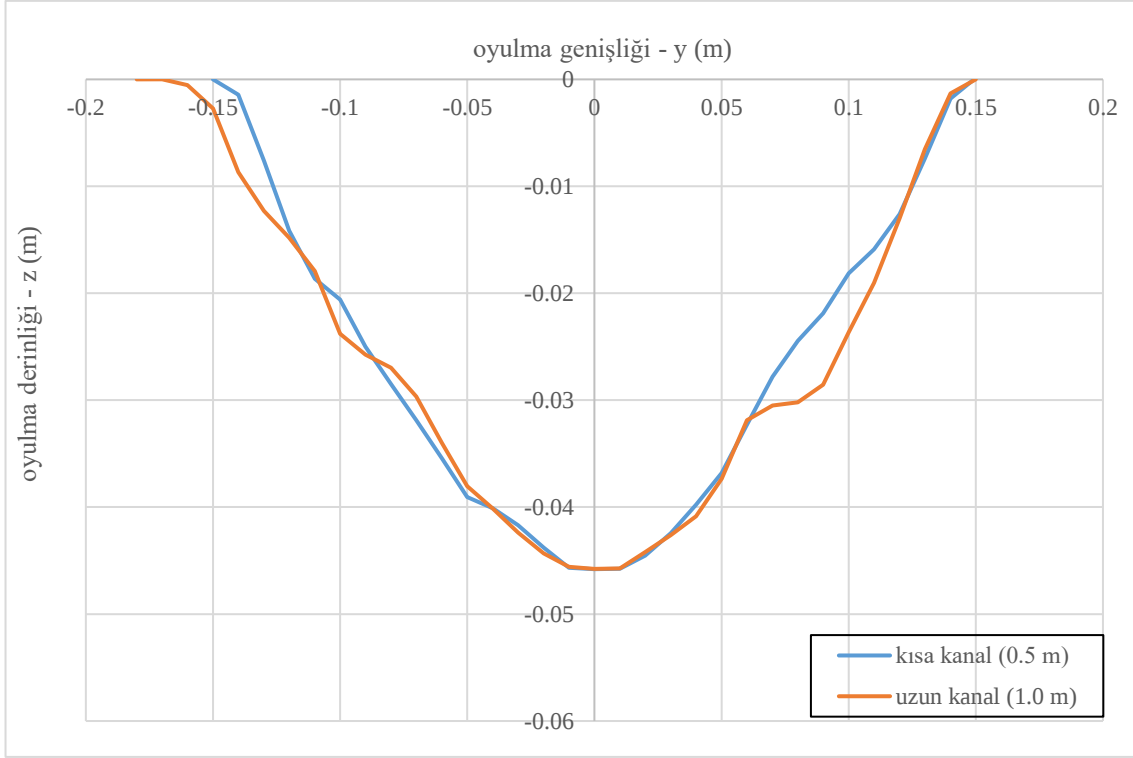


(a)

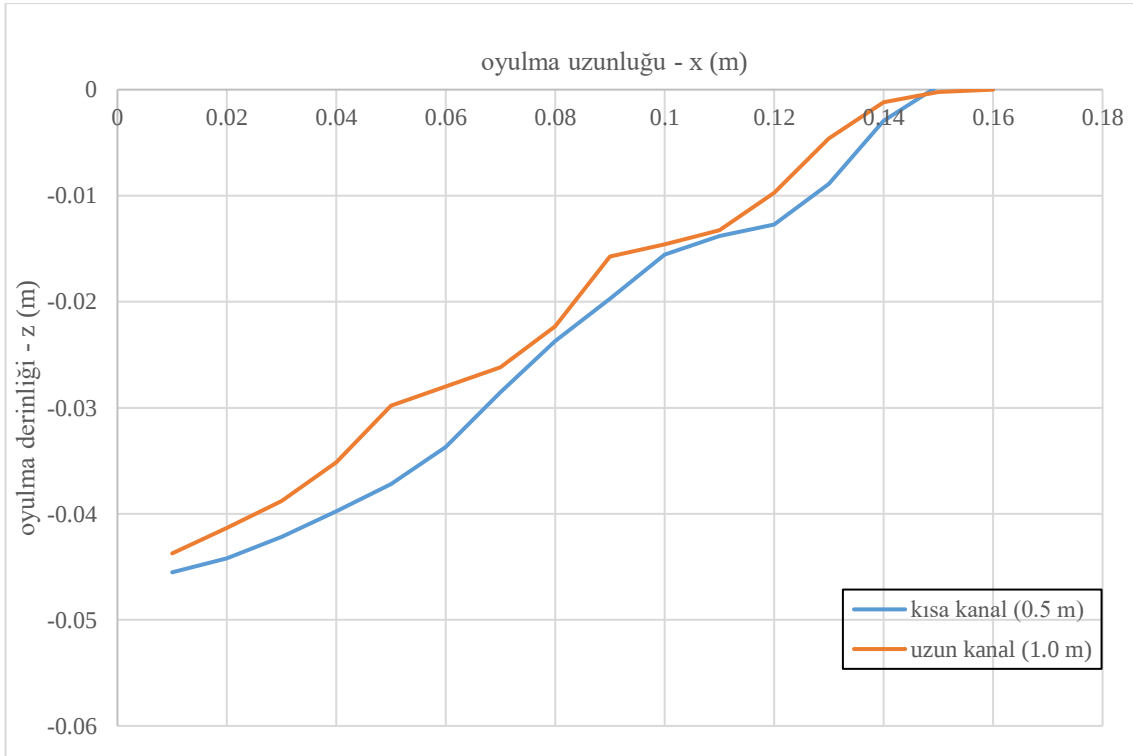


(b)

Şekil 5.21. Kısa kanal (0,5 m) ve uzun kanal (1,0 m) modellenmesinde (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$, $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması



(a)



(b)

Şekil 5.22. Kısa kanal (0,5 m) ve uzun kanal (1,0 m) modellenmesinde (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$, $Q = 6$ l/s durumu için karşılaştırılması

5.7. Modellemede Yapılan Diğer Fiziksel Girdiler

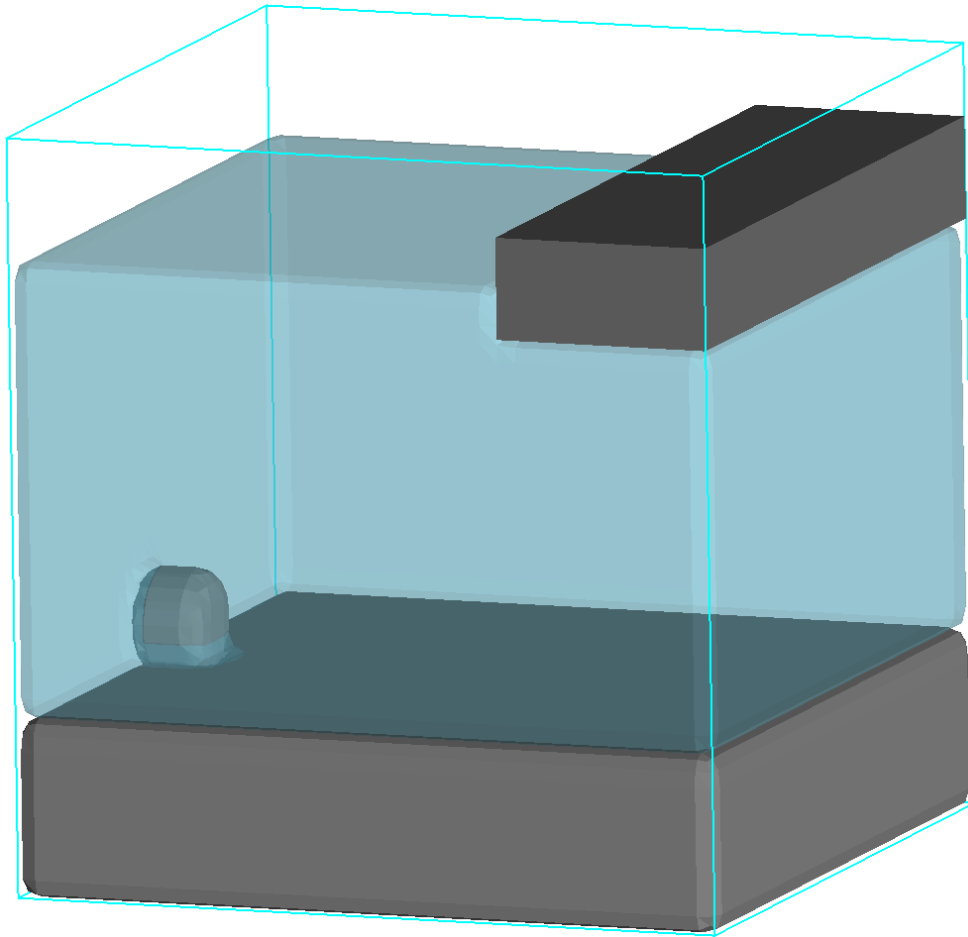
Modele girilen sediment kalınlığı, oyulma derinliğini etkilemeyecek kadar derin olmalı, aynı zamanda model çözüm süresi düşünülerek gereğinden fazla derin olmamalıdır. Bu nedenle deneylerde 17 cm kalınlığında sediment serilmesine karşın deney sonuçlarında elde edilen en büyük oyulma değerinin yeterince üzerinde olacak bir kalınlık olan 12 cm sediment katmanı modellenmiştir. Aynı şekilde deneysel model ile sayısal modeli yeterince benzetebilmek için su derinliği deneylerdeki gibi 25 cm alınmıştır. Kanalin yalnızca 50 cm'lik kesimi modellenmiş, deneylerde olduğu gibi 7 m uzunluğundaki kanalın çözümlenmeyen kısmında da sabit su yüksekliği olduğundan memba sınır koşulu için de bu su yüksekliği hidrostatik basınç olarak tanıtılmıştır.

Daha önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi su alma ağzındaki akış, dairesel kütle / momentum kaynağı ile sağlanmaktadır. Kütle / momentum kaynağı çözüm hacmi sınırı ile bitişik olması durumunda kaynaktan çekilen debi hatalı olmaktadır. Bu nedenle ölü-son duvarı $L/D = 0,00$ olan modellerde 4,8 cm kalınlığında katı cidar olarak tanımlanmıştır. $L/D > 0,00$ olan modellerde su alma ağzının kanal içerisine giren kısmı, yarıçapı su alma ağzı yarıçapından 1 cm daha geniş olan bir katı silindir ile sağlanmıştır. Su alma ağzının et kalınlığı veya su alma ağzını oluşturan katı silindir yarıçapı küçüldükçe çözüm süresi artmaktadır. Bu durum modelin verimliliğini düşürdüğünden deneme yanılma ile en uygun su alma ağzı et kalınlığı olarak 1 cm belirlenmiştir. Ölü-son duvarı ise duvar sınır koşulu verilerek modele tanımlanmıştır (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4). $L/D > 0,00$ durumu için su alma ağzını oluşturan katı silindir çözüm ağı hassasiyetinden kaynaklı bir miktar bozulmaya uğramaktadır. Su alma ağzı yapısının modelin çözümlenmesi esnasındaki görünümü Şekil 5.23'da verilmektedir.

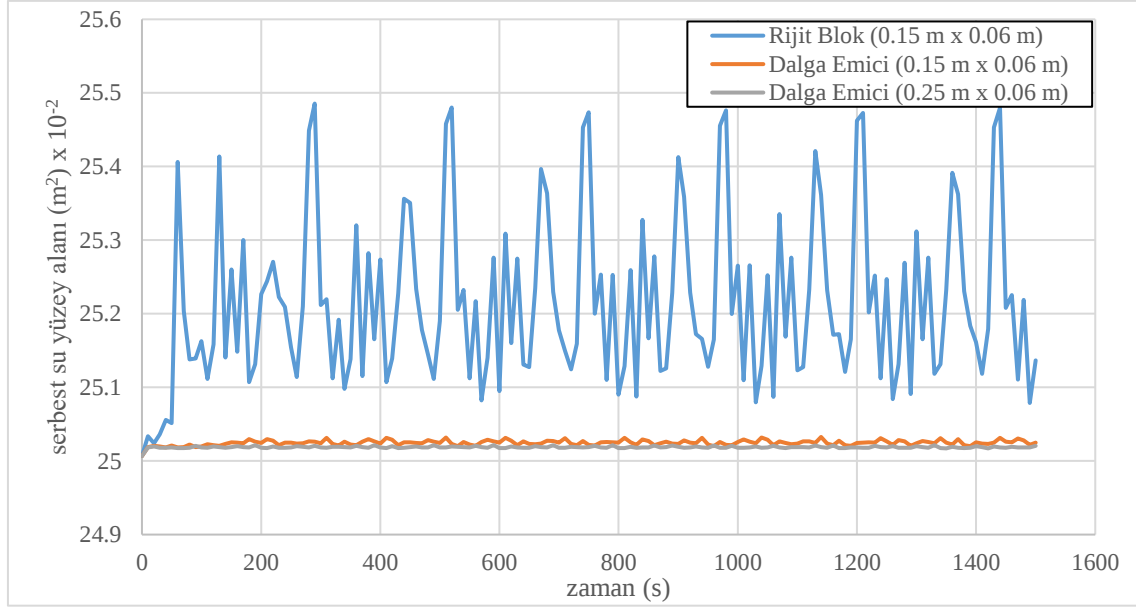
Wei (2015) yayınlamış olduğu raporda memba sınır koşulunda tanımlanan veya oluşan dalgalanmanın mansap sınır koşulundan yansıyacağını, uzun süreli çözümlemede bunun toplanarak serbest su yüzeyi profilini ve çözüm hacmi içerisindeki su hacmini gerçekte oluşması gereken değerlerden saptıracağını bildirmektedir. Wei (2015)'in yapmış olduğu bu çalışma dikkate alınarak kanal membası için 15 ve 25 cm olmak üzere iki farklı dalga sönümleyici blok ve 15 cm uzunluğunda rijit blok denenmiş ve sonuçlar Şekil 5.24'de kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda dalga sönümleyici bloğun sınır koşulları etkisinden kaynaklı dalgalanmayı çok yüksek oranda sönümlediği görülmekte olup deneysel çalışma

ile uyumluluk açısından HAD modelinde kullanılmasına karar verilmiştir. Dalga sönümleyici blokların sönümleme katsayısı blok boyunca lineer olacak şekilde sünger başlangıcı için 0, bitişi için ise 1 olarak tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında deneysel modelin fiziksel yapısından uzaklaşmamak adına 15 cm uzunluğunda dalga sönümleyici blok yeterli görülmüştür.

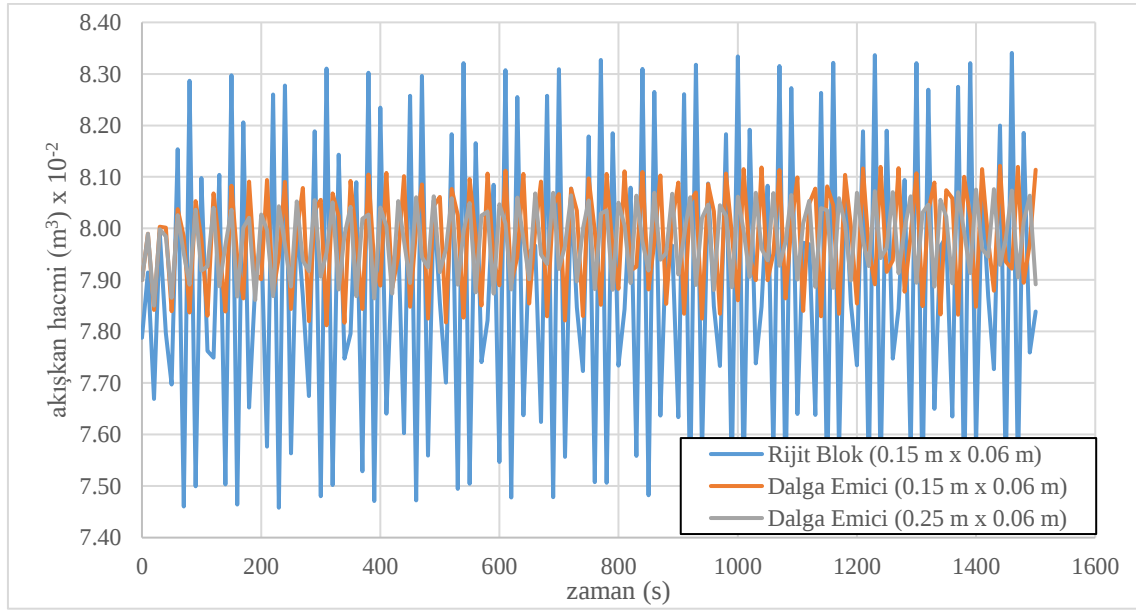
Model kurulumu sekmesinde nümerik seçenekler sekmesinde çözümün daha isabetli olacağı ve sediment taşınım miktarını etkileyebileceği düşünülerek ikinci derece momentum taşınım denklemleri seçeneği tercih edilmiştir. Nümerik seçenekler sekmesinde diğer tüm seçeneklerin varsayılan halleri korunmuştur.



Şekil 5.23. $l/D > 0,00$ durumu için HAD modelinin çözülme esnasında görünümü



(a)



(b)

Şekil 5.24. Membada kullanılan üç farklı fiziksel özelliğe sahip dalga kırıcı blok için (a) serbest yüzey alanının ve (b) akışkan hacminin zamana bağlı değişimlerinin kıyaslanması

Deneysel çalışmanın $l/D = 0,00$, $l/D > 0,00$ durumları için oluşturulmuş olan HAD model dosyaları, yapılan akademik çalışmanın tekrarlanabilirliği için metin formatında $l/D = 0,00$ ve $l/D = 1,00$ için sırasıyla EK-3 ve EK-4 ile verilmektedir. Verilen metin .prepin formatında kaydedilerek ilgili modeller için aynı çözümler elde edilebilir.

6. HAD MODELİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Flow 3D yazılımı kullanılarak farklı durumlar için oyulmanın modellendiği mevcut çalışmalarda, gerek 2. Bölüm içerisinde, gerekse bu çalışmada yürütülen metodolojinin anlatıldığı 5. Bölümün başlangıç kısmında ifade edildiği üzere genellikle oyulma profillerinin deneysel sonuçlardan %20 – %30 mertebelerinde farklılık gösterdiği belirtilmişti. Benzer durum bu çalışma kapsamında yapılmış deneylerin HAD modellerinin oluşturulmasında da gözlemlenmiştir.

Wei, Brethour, Grünzner ve Burnham (2014), Flow Science 03-14 raporunda kapak altı akışlarında oyulma olayını $\theta_{kr} = 0,05$ değerini kullanarak modellemişler ve sonuçların deney sonuçları ile uygunluğunu araştırmışlardır. Oyulmayı etkileyebilecek parametrelerin girilmesinde varsayılan değerlerin korunduğunu ifade etmişlerdir. Modelin doğruluğunu incelemek için S. Chatterjee, Ghosh ve M. Chatterjee (1994) tarafından yapılmış olan deneysel çalışmada kullanılan numune özellikleri $d_{50} = 0,76$ mm $\rho_s = 2650$ kg/m³ olup Soulsby – Whitehouse denklemi kullanılarak $\theta_{kr} = 0,030$ bulunmaktadır. Bunlara ek olarak çalışmada dairesel köprü ayağı oyulması, dolu savak akışı kaynaklı baraj mansabında meydana gelen oyulma ve sığ akış modeli ile menderesli nehirde meydana gelen oyulma olayını, parametrelerde herhangi bir değişiklik yapmadan ve herhangi bir saha okuması veya deney sonucu ile kıyasa tabi tutmadan modellemişlerdir.

Ayrıca EK-2 ile verilen literatür taraması tablosunda görüleceği üzere sediment oyulmasının HAD ile incelenmesinde literatürde çoğunlukla yazılımın varsayılan kritik Shields değeri olan 0,05 değeri alınmış veya değer Soulsby – Whitehouse denklemi ile tayin edilmiştir. Tüm bunlar dikkate alınarak modelleme ve kritik Shields sayısı ayarlanması çalışmasına her bir deney modelinin $\theta_{kr} = 0,05$ sayısı kullanılarak çözümlenmesi ile başlanmıştır.

Modelleme sonuçları MSE, RMSE ve R^2 istatistiksel parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Bu parametrelerden MSE ve RMSE sırasıyla ortalama hataların kareleri toplamı ve ortalama hataların kareleri toplamının kareköküdür. Bu parametreler Eşitlik 6.1 ve Eşitlik 6.2 ile verilmekte olup HAD sonucunun hata miktarının ifade edilmesinde kullanılmaktadır. R^2 parametresi ise belirli bir parametrenin HAD ile hesaplanan değeri ile deneysel sonuçlar ile uygunluğunun bir ölçüsü olup Eşitlik 6.3 ile ifade edilmektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 \quad (6.1)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2} \quad (6.2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.3)$$

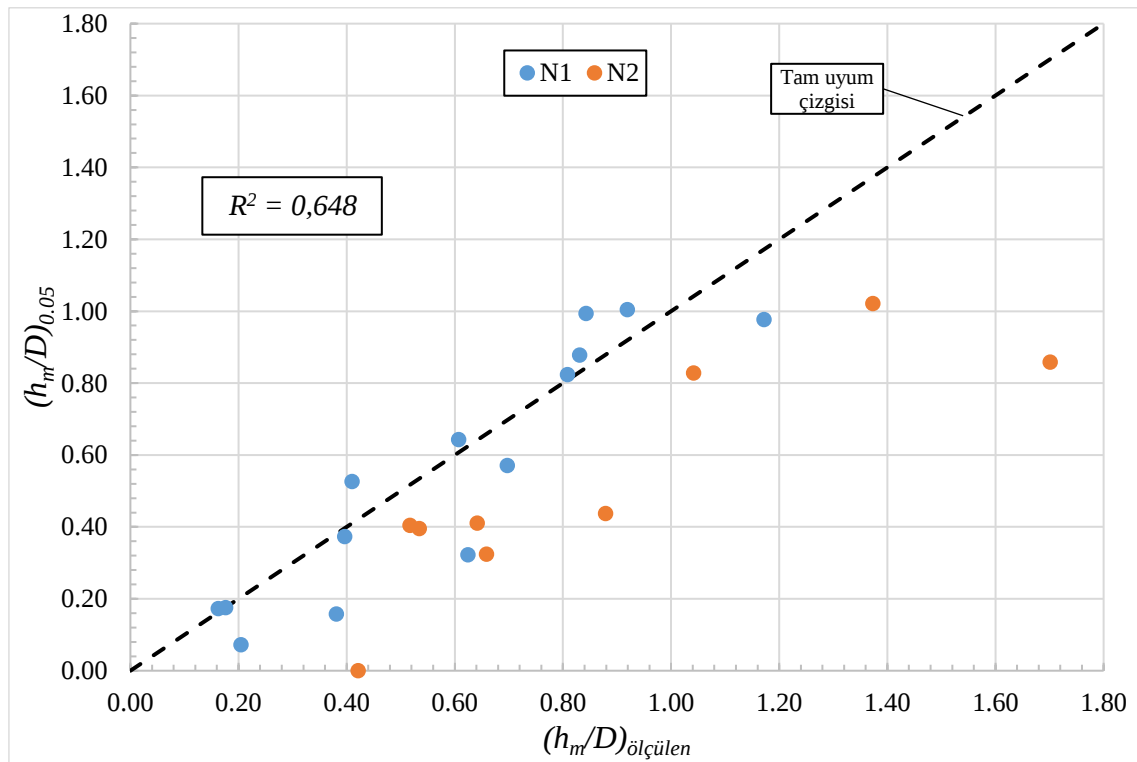
Yukarıdaki eşitliklerde verilen parametrelerin açıklamaları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- MSE (Mean Square Error) hataların karelerinin toplamını ifade etmektedir. Hataların kareleri alındığından sayısal modelde görülen hataları daha fazla cezalandırmaktadır. MSE değerinin karekökünün alınması ile RMSE (Root Mean Square Error), ortalama hataların kareleri toplamının karekökü elde edilir. Bu değerler ne kadar düşük olursa modelin deney sonuçları ile uyumluluğu o kadar yüksektir.
- R^2 Pearson'un korelasyon katsayısının karesi olup 0 – 1 arasında değer almaktadır.
- N, uygunluğu sınanan verinin büyüklüğü veya bu çalışma için HAD / deney sonucu kıyaslanması için incelenen oyulma geometrisi noktası sayısıdır.
- i , kıyas için değerlendirilen deney verilerinin her birini ifade eden alt indis değeridir.
- $\hat{y}$, i 'inci deney verisine karşılık gelen HAD modeli sonucudur.
- Son olarak y ve $\bar{y}$, sırasıyla referans olarak alınan deney sonuçları ve bu deney sonuçlarının ortalamasıdır.

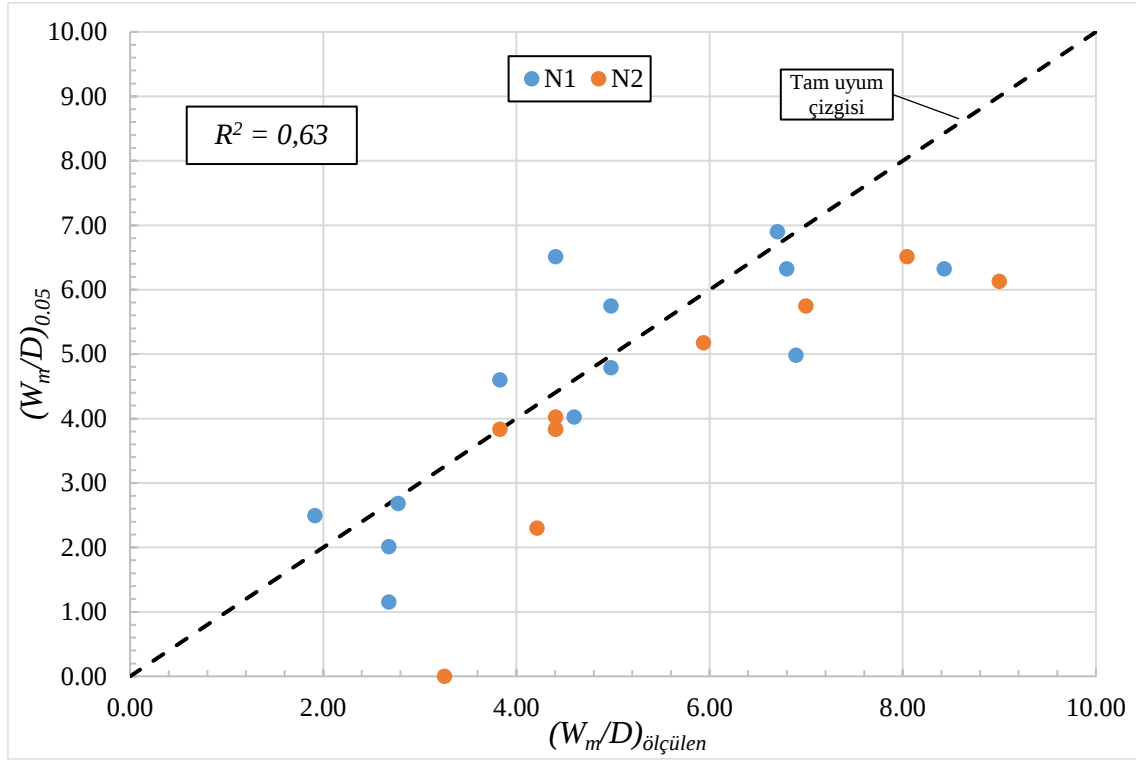
6.1. Kritik Shields Sayısı $\theta_{kr} = 0,05$ Değeri Kullanılarak Oluşturulan HAD Modeli

Bu bölümde kritik Shields sayısı 0,05 değeri kullanılarak oluşturulan HAD modeli hesap sonuçları ile deney sonuçlarından elde edilen ölçümlerin kıyaslanması verilmiş, deney sonuçları *ölçülen* alt indisi ile ve $\theta_{kr} = 0,05$ değeri kullanılarak hesaplanan sonuçlar *0,05 alt indisi* ile gösterilmiştir.

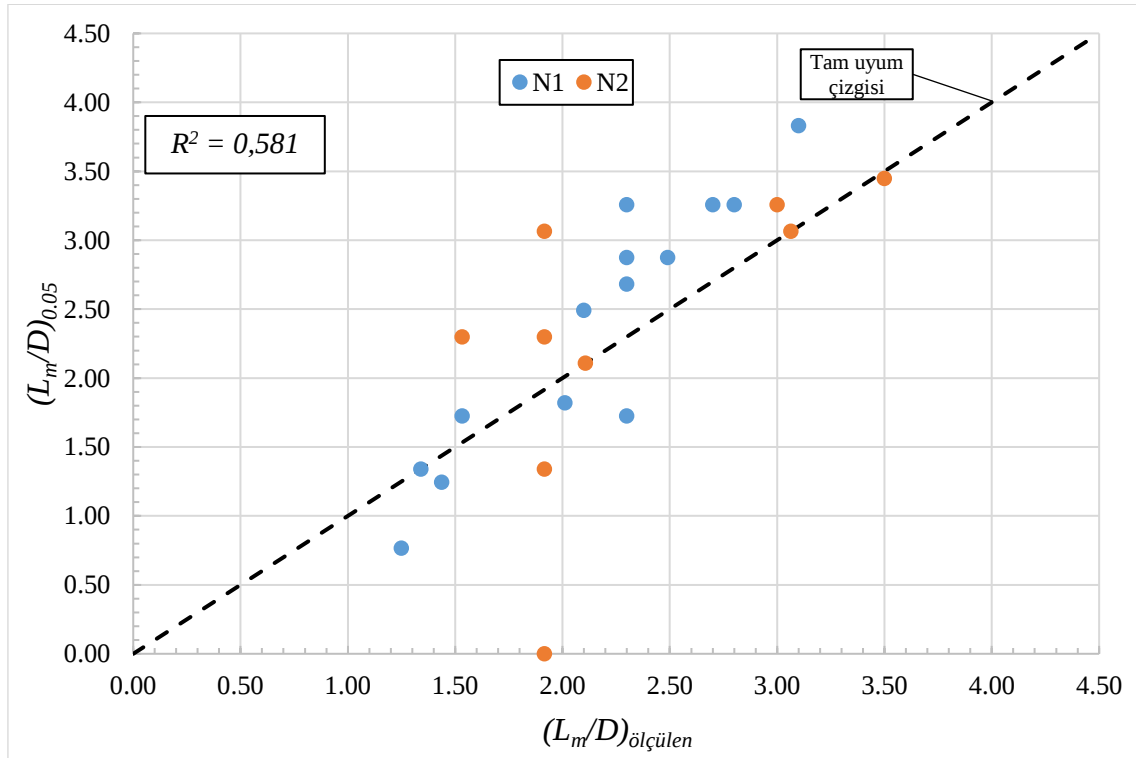
Deney sonuçları ile model sonuçlarının kıyaslanması, deneylerde kullanılan dane çapı 1,25 mm (N1) ve 0,62 mm (N2) olan iki numune için maksimum oyulma derinliği, genişliği ve uzunluğu olarak sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de verilmektedir. Kritik Shields sayısı 0,05 olarak çözümlenen modellerin toplu sonuçları son olarak Çizelge 6.1’de verilmiştir. Son olarak Powell ve Khan (2015) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile $\theta_{kr} = 0,05$ değeri kullanılarak oluşturulan HAD modeli sonuçları kıyaslanmıştır.



Şekil 6.1. HAD modelinin ($\theta_{kr} = 0,05$) deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma derinliği değerlerine göre incelenmesi



Şekil 6.2. HAD modelinin ($\theta_{kr} = 0,05$) deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma genişliği değerlerine göre incelenmesi

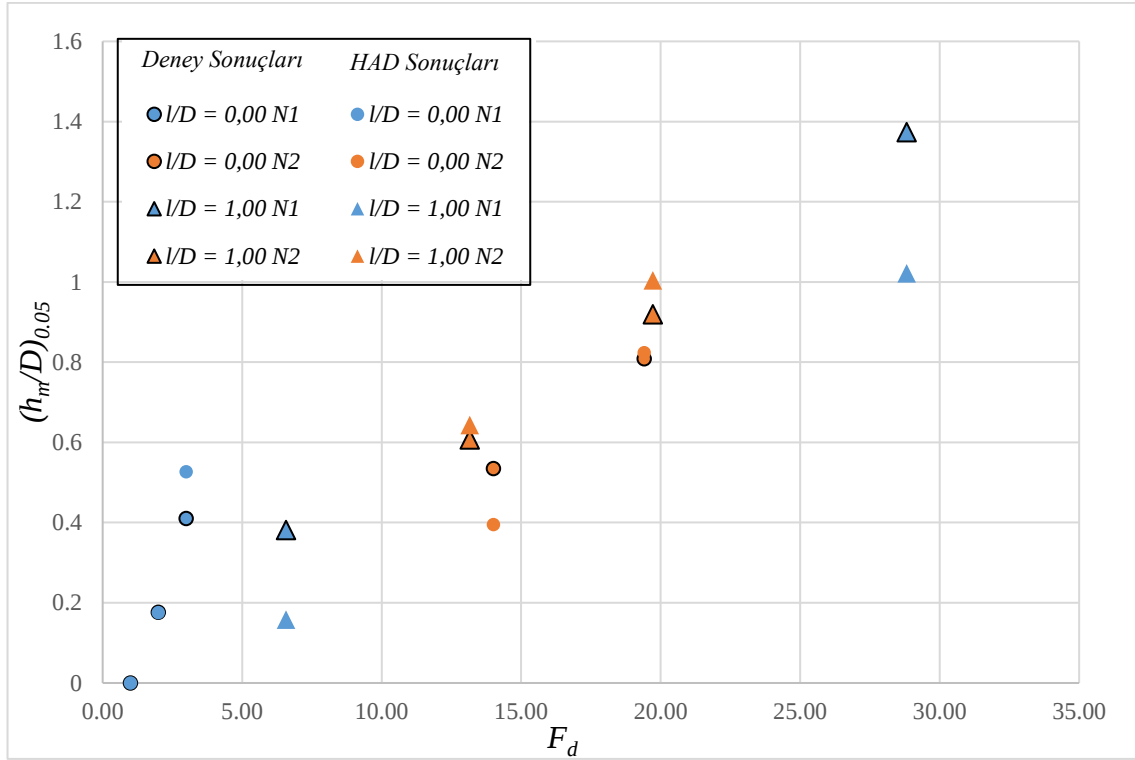


Şekil 6.3. HAD modelinin ($\theta_{kr} = 0,05$) deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma uzunluğu değerlerine göre incelenmesi

Çizelge 6.1. Deney sonuçları ve kritik Shields sayısı $\theta_{kr} = 0,05$ kullanılarak oluşturulan HAD modeli karşılaştırmalı sonuçları

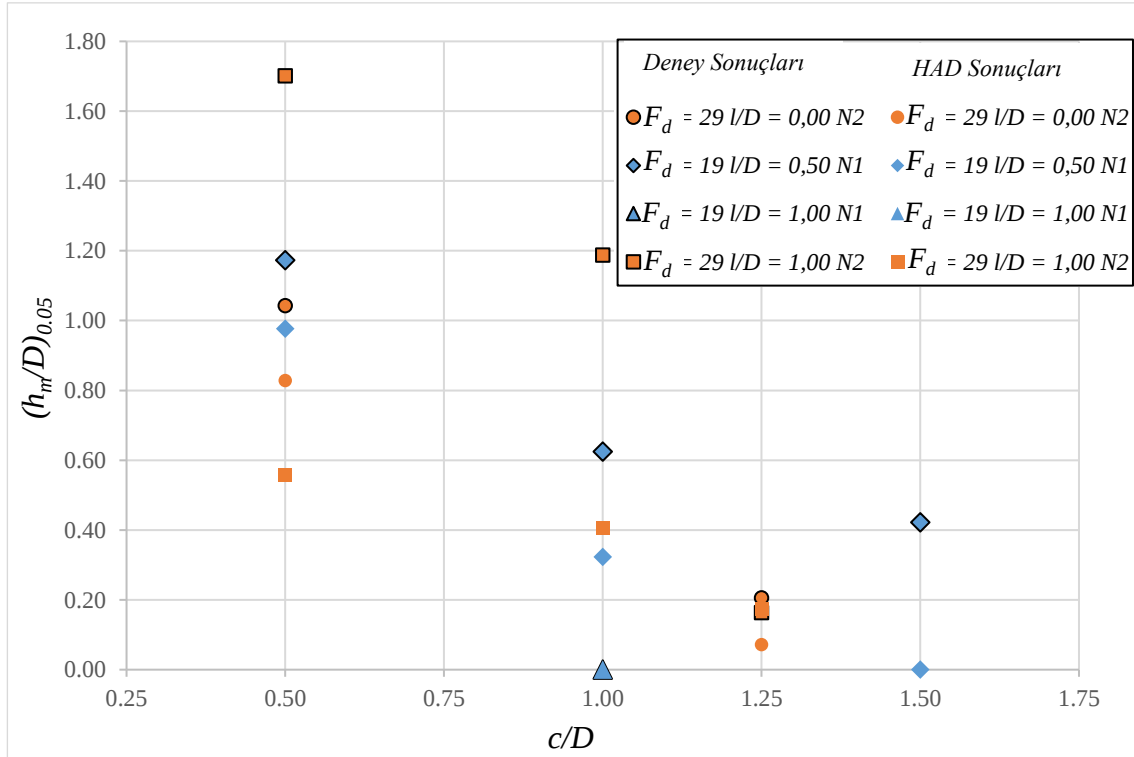
	DENEYLER			DENEY SONUÇLARI			HAD SONUÇLARI ($\theta_{kr} = 0,05$)		
	c/D	l/D	F_d	h_m/D	W_m/D	L_m/D	$(h_m)_{0,05/D}$	$(W_m)_{0,05/D}$	$(L_m)_{0,05/D}$
NUMUNE 1	0,50	0,00	6,95	0,18	2,78	1,53	0,17	2,68	1,72
	0,50	0,00	13,61	0,41	6,90	2,30	0,53	4,98	3,26
	0,50	0,00	19,41	0,81	8,43	3,64	0,82	6,32	3,83
	0,50	1,00	6,57	0,38	2,68	1,44	0,16	2,01	1,25
	0,50	1,00	13,16	0,61	4,98	2,30	0,64	4,79	2,68
	0,50	1,00	19,72	0,92	6,51	2,87	1,00	6,32	3,26
	1,00	1,00	19,50	0,40	4,60	2,30	0,37	4,02	1,72
	1,25	1,00	19,63	0,16	1,92	1,34	0,17	2,49	1,34
	0,50	1,50	19,63	0,84	4,41	2,30	0,99	6,51	2,87
	0,50	0,50	19,42	1,17	6,51	3,26	0,98	6,90	3,26
	0,50	2,00	19,42	0,83	4,79	2,49	0,88	5,75	2,87
	0,50	2,00	13,16	0,83	4,60	2,30	0,57	4,60	2,49
	1,00	0,50	19,42	0,62	4,41	2,01	0,32	3,83	1,82
	1,25	0,50	19,59	0,20	2,68	1,34	0,07	1,15	0,77
NUMUNE 2	0,50	0,00	14,01	0,53	4,41	1,53	0,39	4,02	2,30
	0,50	0,00	29,52	1,04	7,28	2,87	0,83	6,13	3,45
	1,00	0,00	29,97	0,64	5,94	1,92	0,41	5,17	3,07
	0,50	0,50	14,30	0,88	4,41	2,11	0,44	3,83	2,11
	0,50	0,50	28,82	1,37	8,05	3,07	1,02	6,51	3,07
	0,50	1,00	13,97	0,66	4,21	1,92	0,32	2,30	1,34
	0,50	1,00	28,88	1,70	9,20	3,83	0,86	5,75	3,26
	1,00	1,00	29,65	1,19	6,90	3,07	0,41	4,60	2,30
	1,50	1,00	29,78	0,42	3,26	1,92	0,00	0,00	0,00
	1,00	1,50	29,01	0,52	3,83	1,92	0,40	3,83	2,30
	0,50	2,00	14,26	0,73	4,41	2,30	0,43	4,02	2,30
	0,50	2,00	28,44	1,12	5,94	2,87	0,75	5,94	3,07

Deney sonuçları ile kritik Shields sayısı literatürde çoğunlukla kullanılan ve yazılımda varsayılan değer olarak ifade edilen 0,05 değeri kullanılarak oluşturulan HAD modeli; oyulma derinliği, genişliği ve uzunluğu değerleri kullanılarak kıyaslandığında HAD modeli ile deney sonuçları arasında ciddi farklılıklar görülmektedir. Özellikle küçük dane çapına sahip numune ile yapılan deneylerde gözlemlenen oyulma geometrisinin HAD modeli tarafından çok daha küçük hesaplandığı gözlemlenmiştir. Aşağıdaki şekillerde bu durum daha detaylı açıklanmıştır.



Şekil 6.4. $c/D = 0,50$ düzeneği ve $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin F_d değişimine göre kıyaslanması

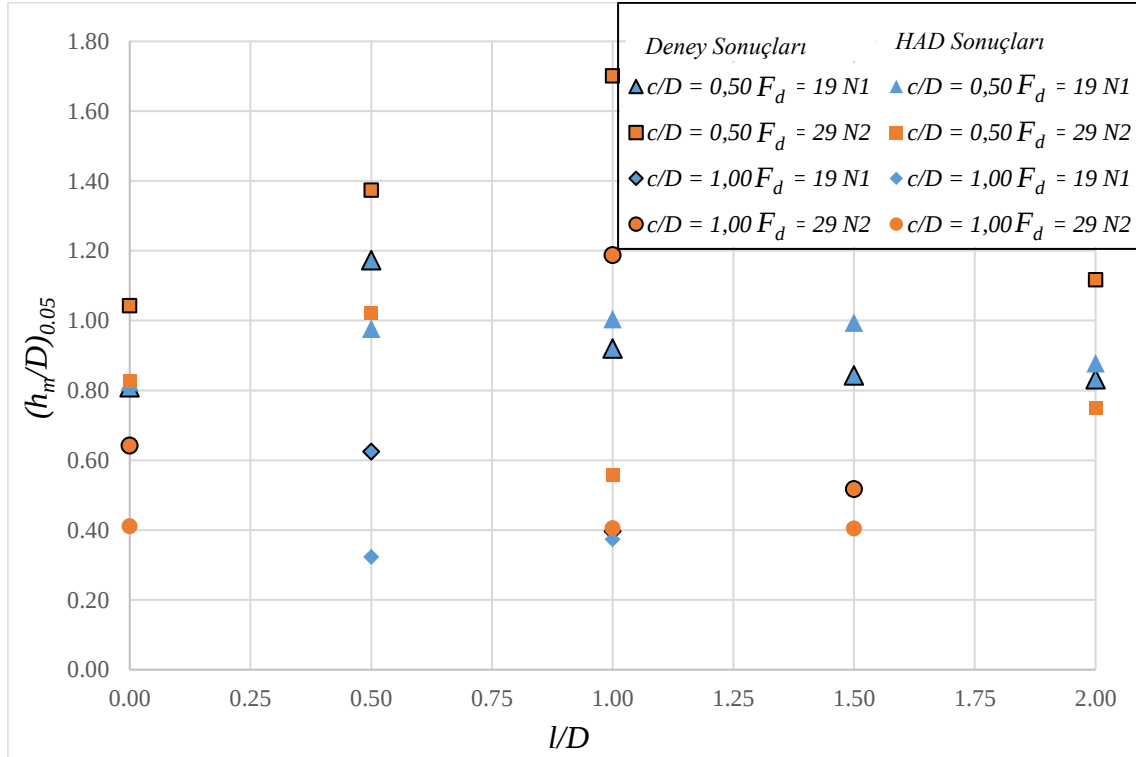
Şekil 6.4 incelendiğinde dane çapının azalması, dolayısıyla densimetrik Froude sayısının artması modelin maksimum oyulma derinliği değerini olması gerektiğinden çok daha düşük hesapladığını göstermektedir. Bu sapmanın densimetrik Froude sayısı değeri düştükçe azaldığı görülmektedir. Bunun dışında HAD modelinden elde edilen sonuçların eğiliminin (F_d arttıkça h_m/D değerinin artması) deneysel sonuçlar ile uygunluk gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.5. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin c/D değerine göre değişiminin kıyaslanması

Şekil 6.5 incelendiğinde büyük çoğunlukla, maksimum oyulma derinliği değerinin sayısal model sonuçlarında her iki numune için de olması gerektiğinden çok daha düşük hesaplandığı görülmektedir. Bir diğer yandan deneysel sonuçlarda görülen eğilim (c/D arttıkça h_m/D değerinin azalması) sayısal model sonuçlarında da benzer şekilde görülmektedir.

Son olarak deney sonuçları ile HAD hesaplamalarının kıyaslamasının, maksimum oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişimi üzerinden verildiği Şekil 6.6 incelenmiştir. Kritik Shields sayısı 0,05 değerinde sabit tutulduğunda maksimum oyulma değerlerinin l/D değerine göre değişiminin diğer incelenen iki şekilden farklı olarak deney sonuçları ile uyumlu olmadığı görülmüştür. Ayrıca sayısal modelin oyulma derinliğini olduğundan daha düşük öngörmesi bu şekilde de gözlemlenmiştir.



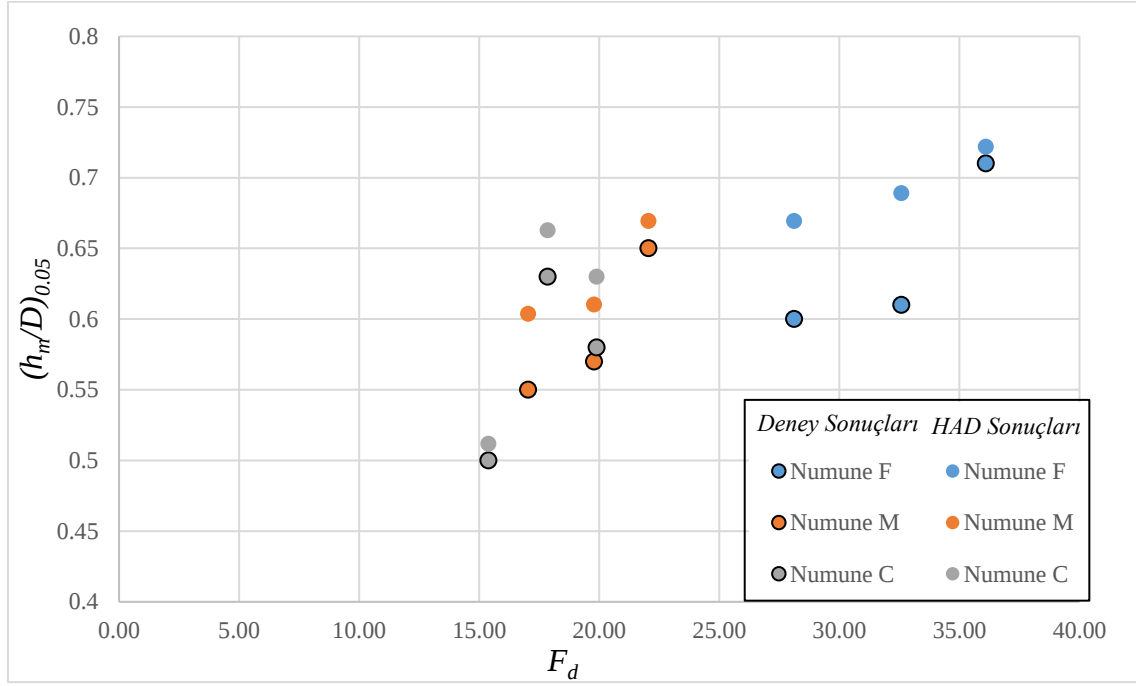
Şekil 6.6. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişiminin kıyaslanması

Aynı yaklaşım ile yine $\theta_{kr} = 0,05$ değeri kullanılarak Powell ve Khan (2015) tarafından yapılmış olan, dairesel su alma ağızları membasında oluşan oyulmanın deneysel olarak incelendiği çalışma sonuçları HAD modeli ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan üç farklı numune için kritik Shields sayısı, Soulsby – Whitehouse denklemi ile hesaplandığında ise 0,030 – 0,038 aralığında bulunmaktadır.

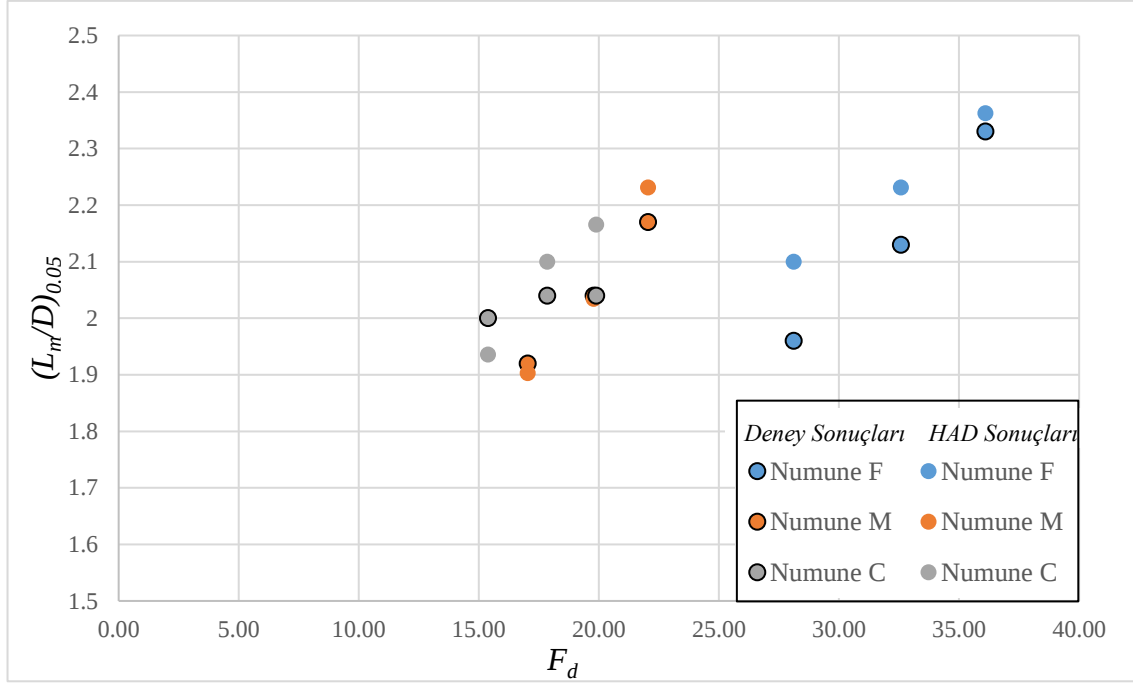
Çalışmada mevcut çalışmadan farklı olarak yalnızca $l/D = 0,00$ ve $c/D = 0,05$ değeri alışılmıştır. Ayrıca $d_{50} = 0,29$ cm (F), $d_{50} = 0,73$ cm (M) ve $d_{50} = 0,89$ cm (C) olacak şekilde üç farklı incelikte numune ile üç farklı rezervuar su yüksekliği, dolayısı ile üç farklı debi değişkeni olacak şekilde dokuz farklı deney yapılmıştır. Bu çalışmada $\theta_{kr} = 0,05$ değeri kullanılarak yapılan modelleme sonuçları ve Powell ve Khan (2015) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da verilmiştir.

Powell ve Khan (2015) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile HAD modeli sonuçları oyulma geometrisi özellikleri yönünden kıyaslandığında, HAD modeli sonuçlarının deney sonuçlarından ortalama %15 mertebesinde daha fazla oyulma hesapladığı görülmektedir. Kritik Shields sayısı için Soulsby – Whitehouse denklemi ile elde

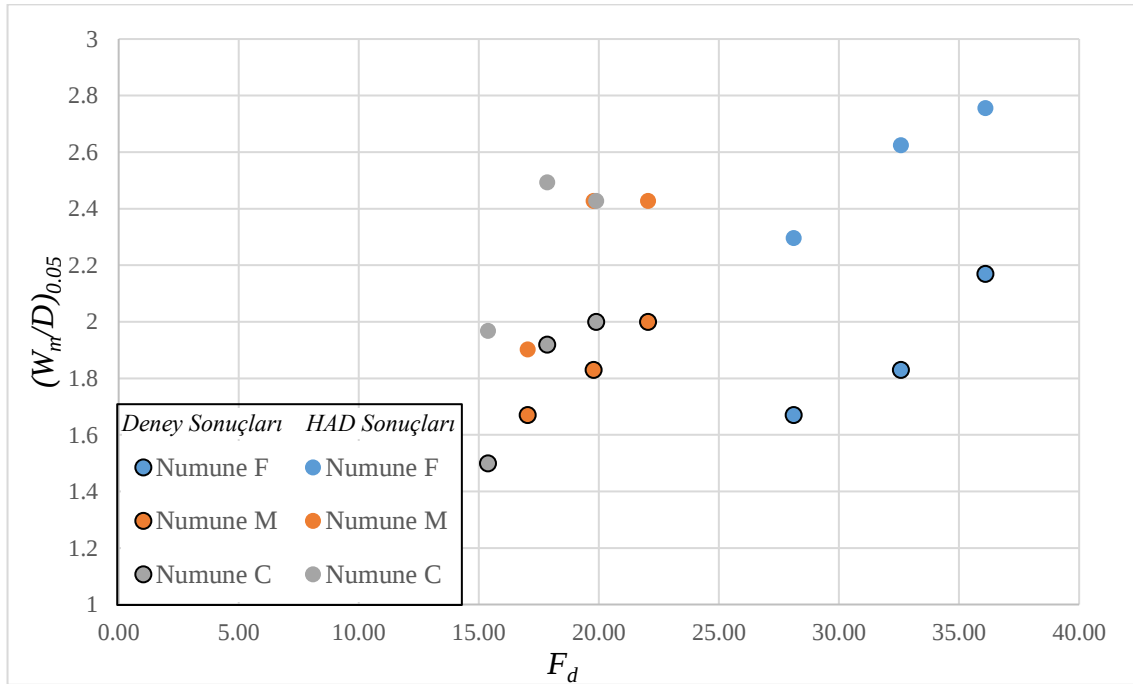
edilen değerin kullanılması durumunda, bu değerin 0,05'ten daha küçük olmasından ötürü model tarafından hesaplanan oyulmanın artacağı ve model sonuçlarının daha hatalı sonuç vereceği çıkarımı yapılabilir.



Şekil 6.7. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile Powell ve Khan (2015) deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin F_d değerine göre değişiminin kıyaslanması



Şekil 6.8. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile Powell ve Khan (2015) deney sonuçlarının maksimum oyulma uzunluğunun F_d değerine göre değişiminin kıyaslanması



Şekil 6.9. $\theta_{kr} = 0,05$ parametresi için HAD analizi ile Powell ve Khan (2015) deney sonuçlarının maksimum oyulma genişliğinin F_d değerine göre değişiminin kıyaslanması

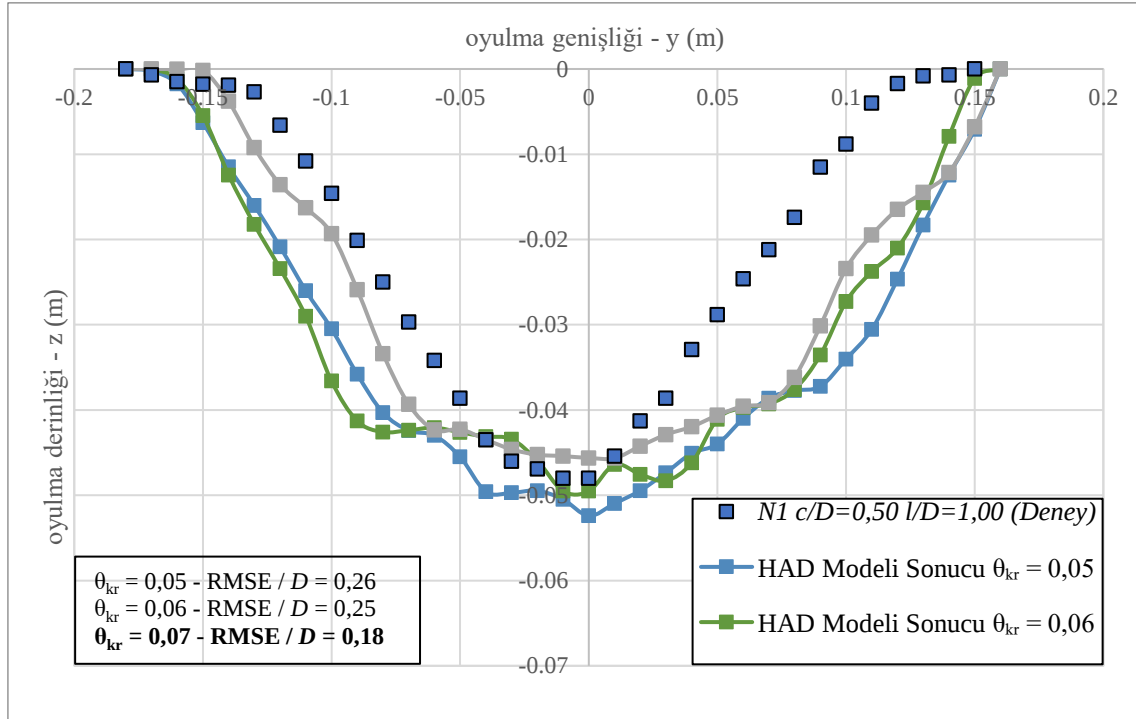
Literatürde yapılan çalışmaların incelenmesi ve deneysel çalışmalar üzerinden HAD modeli sonuçlarının kıyaslanması sonucunda Flow 3D ile yapılan HAD modelinin su alma ağzı membasında oluşan oyulma çukuru özelliklerini öngörmedeki yüksek hata oranı, kritik Shields değerinin tüm akım ve geometri şartları için aynı alınması ile açıklanabilir. Oysaki kritik Shields sayısı akım ve geometrik koşullara göre değişmelidir. Çünkü daha önce de belirtildiği gibi Shields diyagramı üniform açık kanal akımı içerisindeki üniform daneler üzerine yapılan deneylere dayanarak elde edilmiş olup hızlanan (veya yavaşlayan) akımları ve kaldırma kuvvetlerini dikkate almamaktadır.

Tüm bu çıkarımlar göz önüne alındığında yukarıda ifade edildiği gibi hidrolik probleme yönelik kritik Shields değerlerinin önerilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda maksimum oyulma derinliği (h_m), oyulma genişliği (W_m) ve oyulma uzunluğu (L_m) değerleri deney sonuçları ile uyumlu olacak şekilde kritik Shields sayısı her deney modeli için değiştirilerek HAD modeli modifiye edilmiş, elde edilen bulgular bu bölümde verilmiştir.

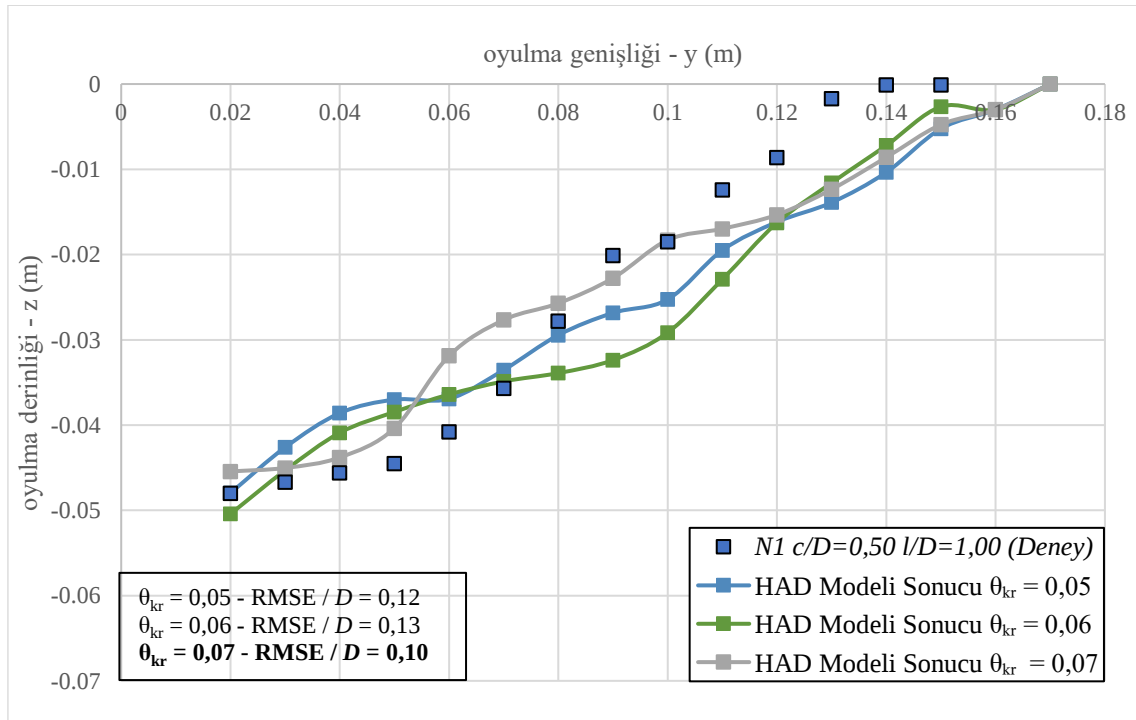
6.2. Kritik Shields Sayısı Düzeltilmiş HAD Modeli

Bu bölümde kritik Shields sayısı deney sonuçlarına göre düzeltilmiş HAD modeli sonuçları ile deney sonuçlarının kıyaslaması gösterilmiştir. Verilen grafiklerde deney sonuçları *ölçülen* alt indisi ile ve kritik Shields sayısı deney ölçümlerine göre düzeltilmiş HAD modelinden elde edilen hesaplama sonuçları ise *hesaplanan* alt indisi ile gösterilmiştir.

Deney sonuçları doğrultusunda her bir model için birçok farklı kritik Shields sayısı denenmiştir. Yapılan denemelerden elde edilen HAD sonuçları, deney okumaları ile kıyaslanmış, bu kıyaslama su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve kanalın boyuna eksenindeki profilleri ile yapılmıştır. Her bir kritik Shields katsayısı denemesi ile deney okumaları arasında RMSE / D değeri hesaplanmış ve HAD modeli için boyutsuz bir hata miktarı elde edilmiştir. RMSE / D değerlerinden en küçük olan kritik Shields katsayısı, ilgili deney modeli için düzeltilmiş katsayı olarak not edilmiş ve her bir model için aynı çalışma tekrarlanmıştır. Şekil 6.10'de $c/D = 0.50$; $l/D = 1,00$ deney modeli için yapılmış olan HAD modeli düzeltme çalışması örnek olarak gösterilmiştir. Bu düzeltme HAD modellemesi yapılan tüm deney düzenekleri için uygulanmıştır.



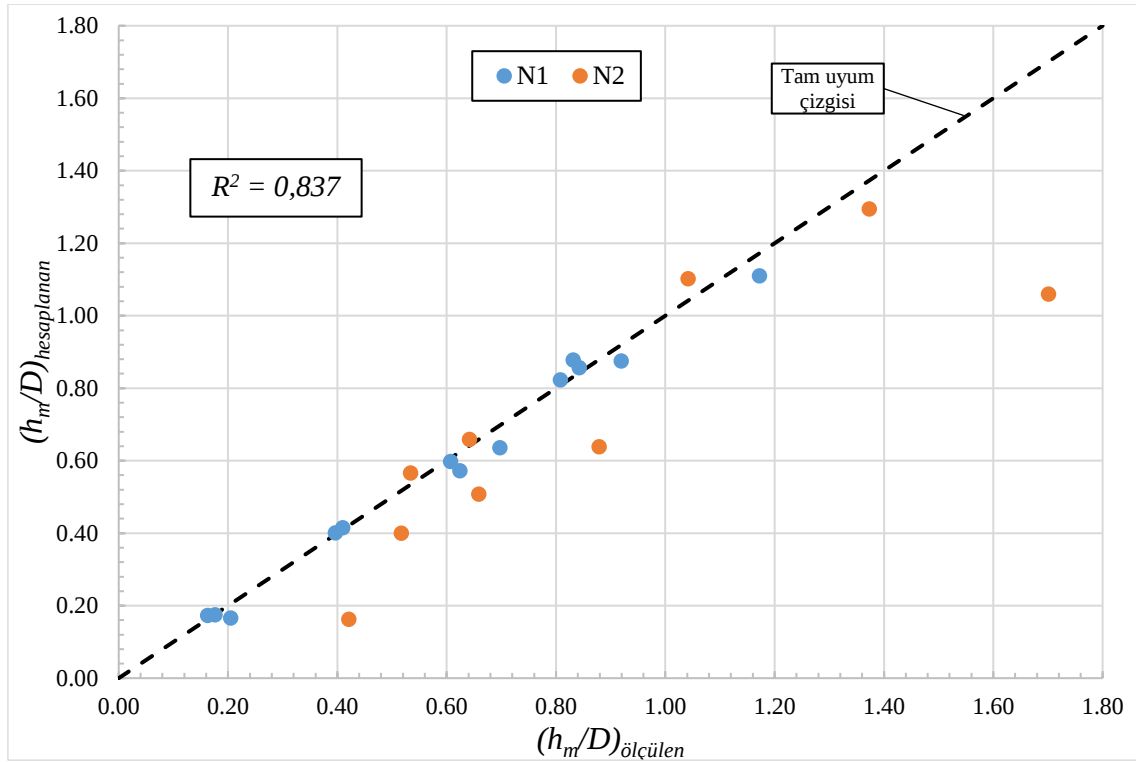
(a)



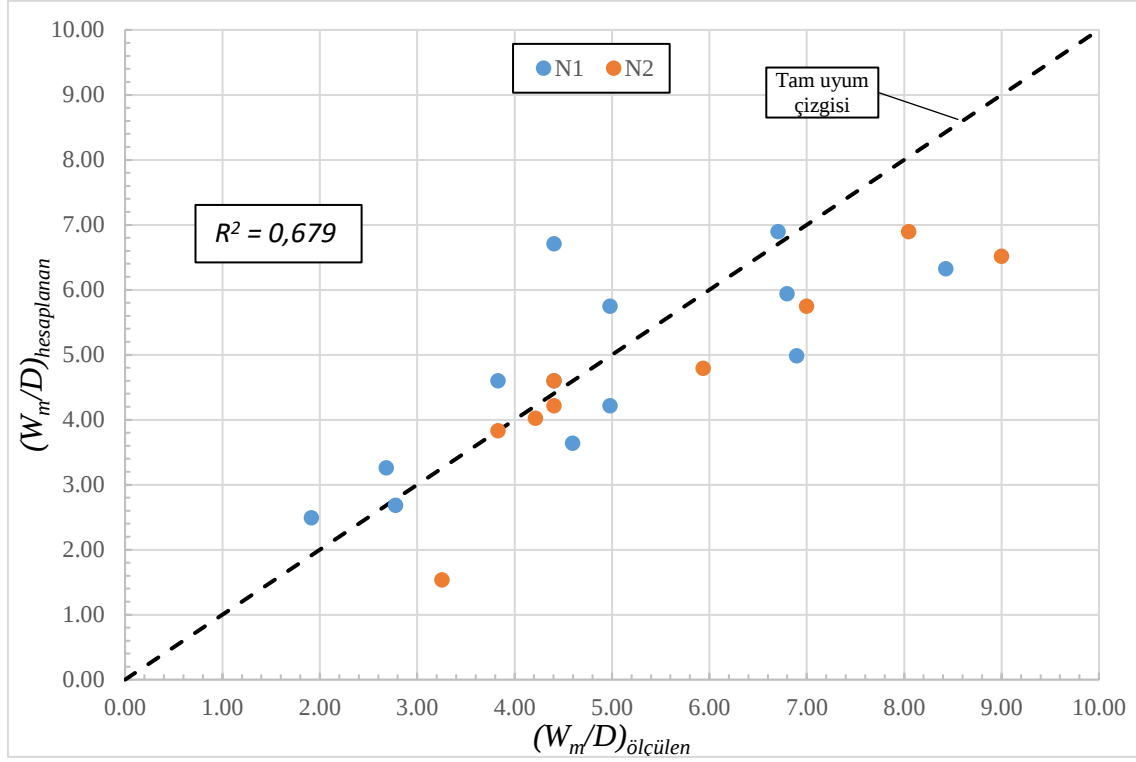
(b)

Şekil 6.10. Numune 1 için farklı kritik Shields sayıları ile yapılan HAD model denemelerinin (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1,00$; $Q = 6$ l/s durumu için değerlendirilmesi

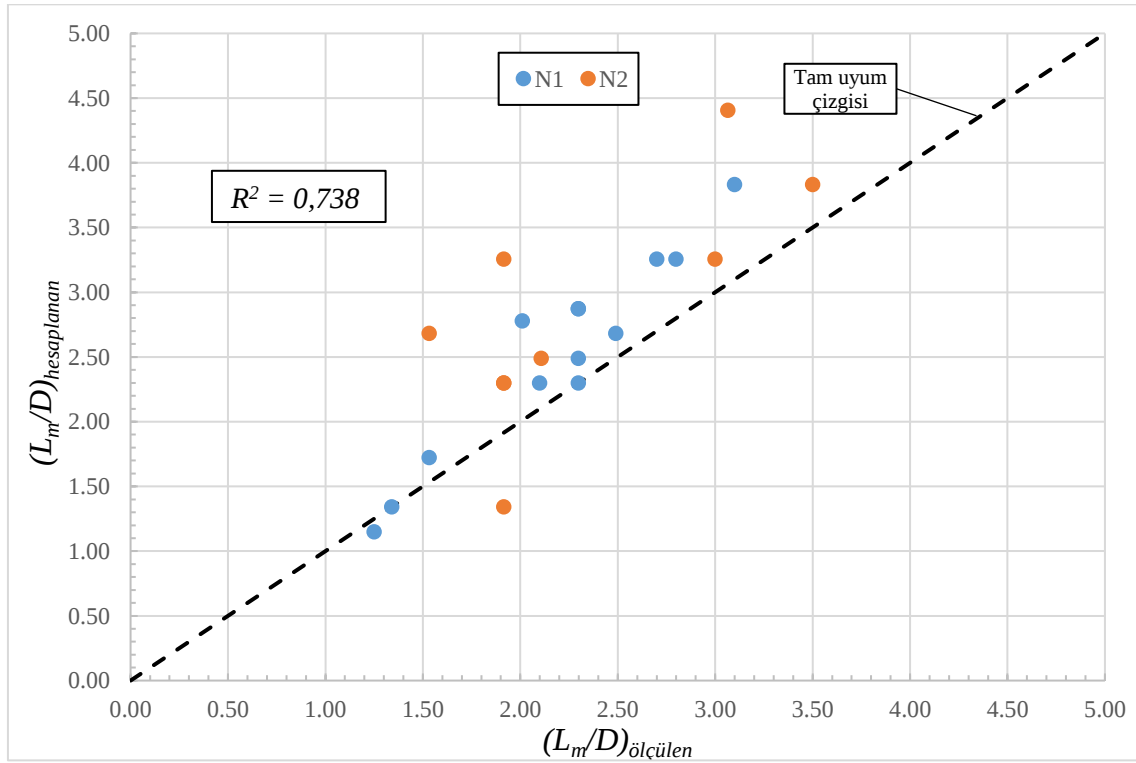
Deney sonuçları ile kritik Shields sayısı deney sonuçlarına göre düzeltilmiş HAD modeli sonuçlarının kıyaslanması, deneylerde kullanılan dane çapı 1,25 mm (N1) ve 0,62 mm (N2) olan iki numune için maksimum oyulma derinliği, genişliği ve uzunluğu olarak sırasıyla Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’de verilmektedir. Kritik Shields sayısı deney sonuçlarına göre düzeltilmiş HAD modelinin toplu sonuçları son olarak Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.11. HAD modelinin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma derinliği değerlerine göre incelenmesi



Şekil 6.12. HAD modelinin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma genişliği değerlerine göre incelenmesi

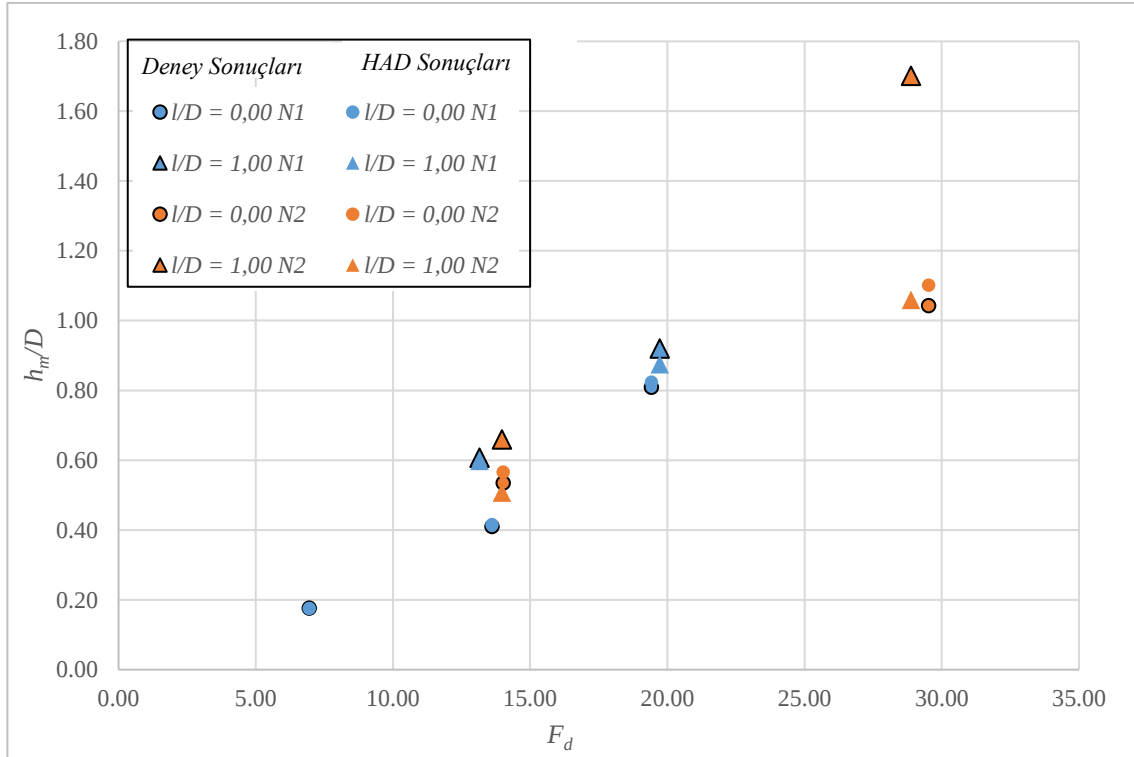


Şekil 6.13. HAD modelinin deney sonuçları ile uygunluğunun oyulma uzunluğu değerlerine göre incelenmesi

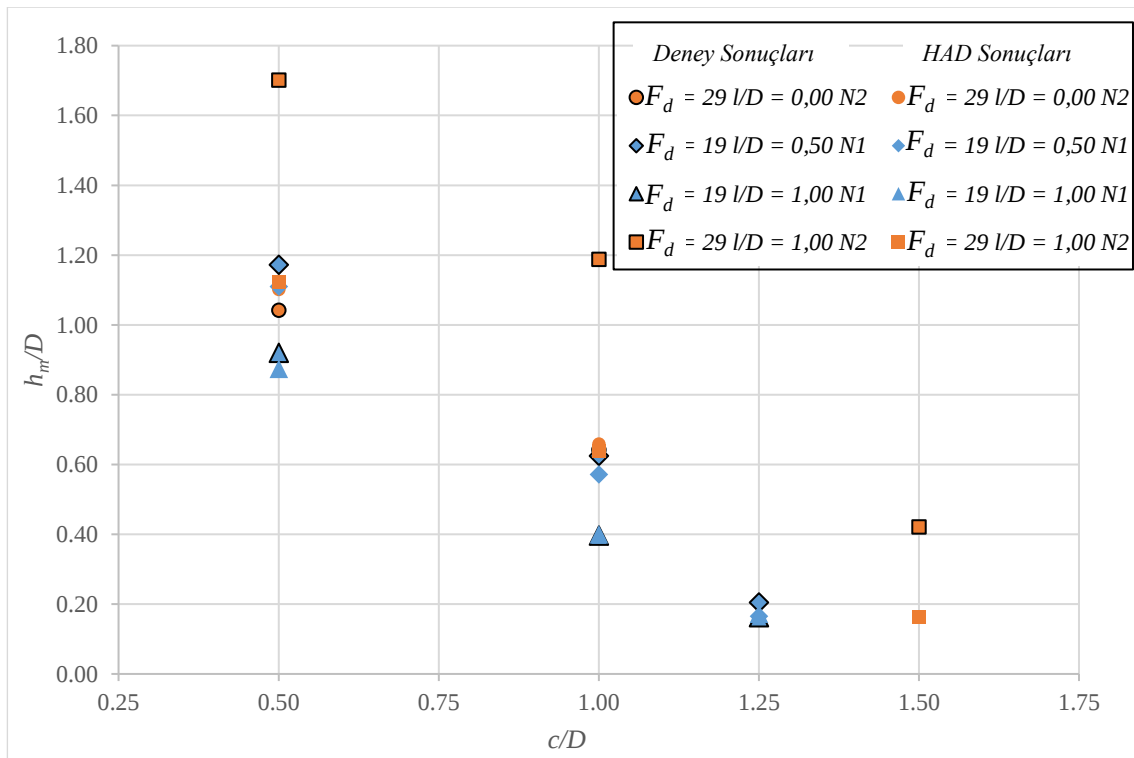
Çizelge 6.2. Deney sonuçları ve kritik Shields sayısı deney sonuçlarına göre düzeltilerek oluşturulan HAD modeli karşılaştırmalı sonuçları

	DENEYLER			DENEY SONUÇLARI			θ_{kr} DÜZELTMESİ SONUCU HAD BULGULARI			
	c/D	l/D	F_d	h_m/D	W_m/D	L_m/D	$(\theta_{kr})_{hesaplanan}$	$(h_m)_{hesaplanan}/D$	$(W_m)_{hesaplanan}/D$	$(L_m)_{hesaplanan}/D$
NUMUNE 1	0,50	0,00	6,95	0,18	2,78	1,53	0,050	0,17	2,68	1,72
	0,50	0,00	13,61	0,41	6,90	2,30	0,065	0,42	4,98	2,87
	0,50	0,00	19,41	0,81	8,43	3,64	0,050	0,82	6,32	3,83
	0,50	1,00	6,57	0,38	2,68	1,44	0,050	0,16	2,01	1,25
	0,50	1,00	13,16	0,61	4,98	2,30	0,080	0,60	4,21	2,49
	0,50	1,00	19,72	0,92	6,51	2,87	0,070	0,87	5,94	3,26
	1,00	1,00	19,50	0,40	4,60	2,30	0,040	0,40	3,64	2,30
	1,25	1,00	19,63	0,16	1,92	1,34	0,050	0,17	2,49	1,34
	0,50	1,50	19,63	0,84	4,41	2,30	0,065	0,86	6,70	2,68
	0,50	0,50	19,42	1,17	6,51	3,26	0,030	1,11	6,90	3,26
	0,50	2,00	19,42	0,83	4,79	2,49	0,065	0,78	5,94	3,07
	0,50	2,00	13,16	0,83	4,60	2,30	0,020	0,81	5,56	2,49
	1,00	0,50	19,42	0,62	4,41	2,01	0,020	0,57	4,60	2,78
	1,25	0,50	19,59	0,20	2,68	1,34	0,030	0,17	3,26	1,15
NUMUNE 2	0,50	0,00	14,01	0,53	4,41	1,53	0,025	0,57	4,21	2,68
	0,50	0,00	29,52	1,04	7,28	2,87	0,020	1,10	6,51	3,83
	1,00	0,00	29,97	0,64	5,94	1,92	0,035	0,66	4,79	3,26
	0,50	0,50	14,30	0,88	4,41	2,11	0,010	0,64	4,60	2,49
	0,50	0,50	28,82	1,37	8,05	3,07	0,010	1,29	6,90	4,41
	0,50	1,00	13,97	0,66	4,21	1,92	0,010	0,51	4,02	2,30
	0,50	1,00	28,88	1,70	9,20	3,83	0,020	1,06	5,75	3,26
	1,00	1,00	29,65	1,19	6,90	3,07	0,005	0,64	6,51	4,60
	1,50	1,00	29,78	0,42	3,26	1,92	0,010	0,16	1,53	1,34
	1,00	1,50	29,01	0,52	3,83	1,92	0,030	0,40	3,83	2,30
	0,50	2,00	14,26	0,73	4,41	2,30	0,005	0,64	5,17	3,07
	0,50	2,00	28,44	1,12	5,94	2,87	0,020	0,96	5,94	3,26

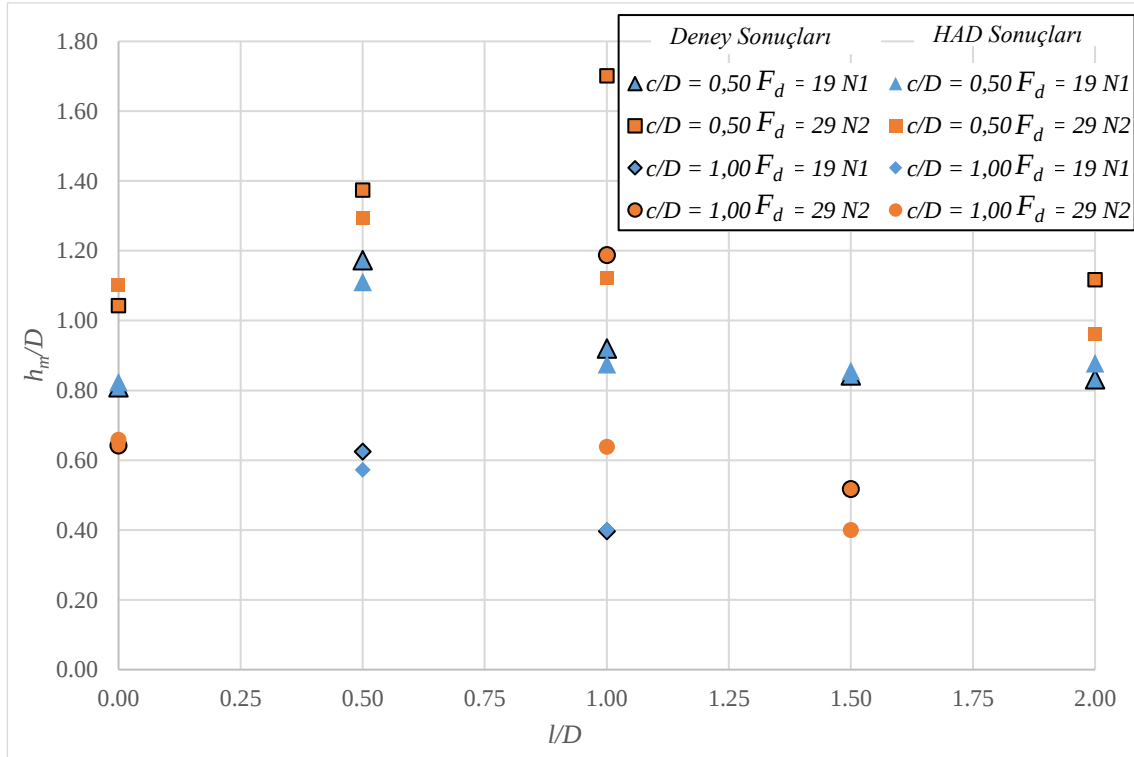
Kritik Shields sayısı üzerinde yapılan düzeltmelerden elde edilen hesaplama sonuçları ile deney sonuçları kıyaslandığında, HAD modelinin deney sonuçları ile uyumunun gözle görülür seviyede arttığı görülmüştür. Korelasyon katsayısı R^2 değerinin kritik Shields değeri düzeltmeleri sonucu artmış olduğu, Şekil 6.1 – Şekil 6.3 ile Şekil 6.11 – Şekil 6.13 kıyaslandığında görülebilmektedir. Kritik Shields sayısı düzeltmeleri sonucu elde edilen hesaplamalar ile deneysel okumalar kıyaslandığında R^2 değerinin h_m , W_m ve L_m değerleri için sırasıyla 0,65; 0,63 ve 0,58 değerlerinden 0,84; 0,68 ve 0,74 değerlerine yükseldiği görülmektedir.



Şekil 6.14. $c/D = 0,50$ düzeneği ve düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin F_d değişimine göre kıyaslanması



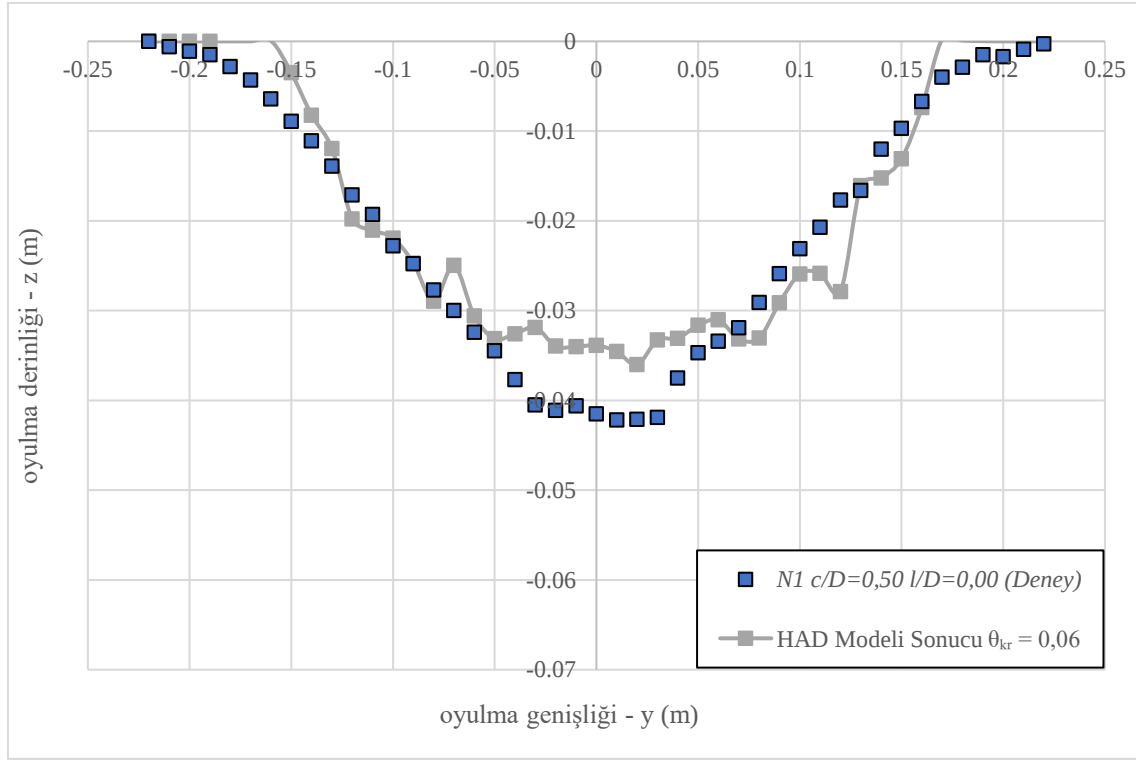
Şekil 6.15. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin c/D değerine göre değişiminin kıyaslanması



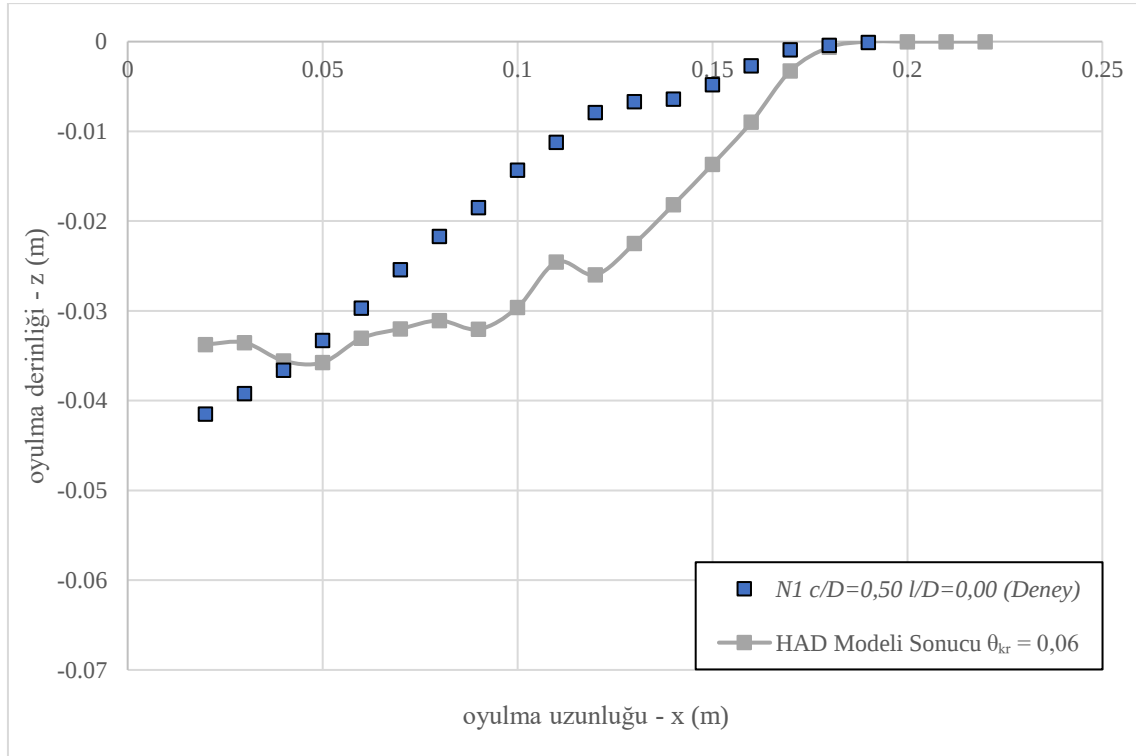
Şekil 6.16. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının maksimum oyulma derinliğinin l/D değerine göre değişiminin kıyaslanması

Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da görüldüğü üzere maksimum oyulmaların görüldüğü $F_d = 29$, $l/D = 1,00$ durumunda $c/D = 0,50$ ve $1,00$ değerleri için, düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD model sonuçları ile deney sonuçları arasında uyumsuzluk, çok daha düşük kritik Shields sayıları denenmesine karşın giderilememiştir. Oluşturulan HAD modeli hesaplamaları sonucu, su alma ağzının $l/D = 1,00$ pozisyonu için, deneysel çalışmalar ile elde edilen maksimum oyulma derinliğinden çok daha düşük oyulmalar elde edilmiştir.

Deney sonuçları ile HAD modeli sonuçları arasındaki uyumsuzluğun giderilmesi ve Shields yaklaşımının geliştirilmesi için yapılan kritik Shields sayısı düzeltmesi çalışmasında, oyulma çukurlarının su alma ağzı önündeki ve kanalın boyuna eksenindeki profillerinin deney sonuçları ile uyumluluğu dikkate alınmıştır. Numune 1, $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$ ve $l/D = 0,50$ ile Numune 2, $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$ ve $l/D = 2,00$ modelleri için kritik Shields sayısı düzeltilmiş HAD sonuçlarının deney sonuçları ile kıyaslanması, oyulma çukurlarının su alma ağzının önündeki ve kanalın boyuna eksenindeki profilinin gösterildiği Şekil 6.17 – Şekil 6.20'de verilmiştir. Geri kalan 22 deney seti üzerinde yapılan uygun kritik Shields sayısının araştırılması sonuçları EK-5 ile verilmektedir.

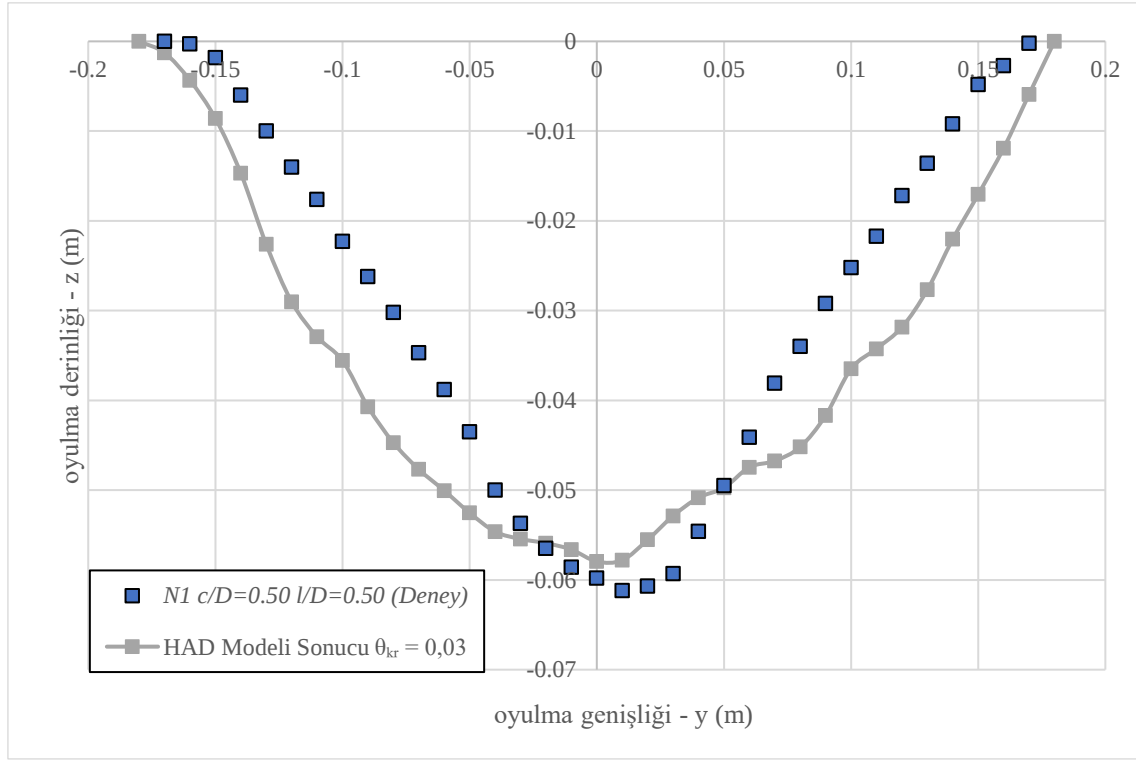


(a)

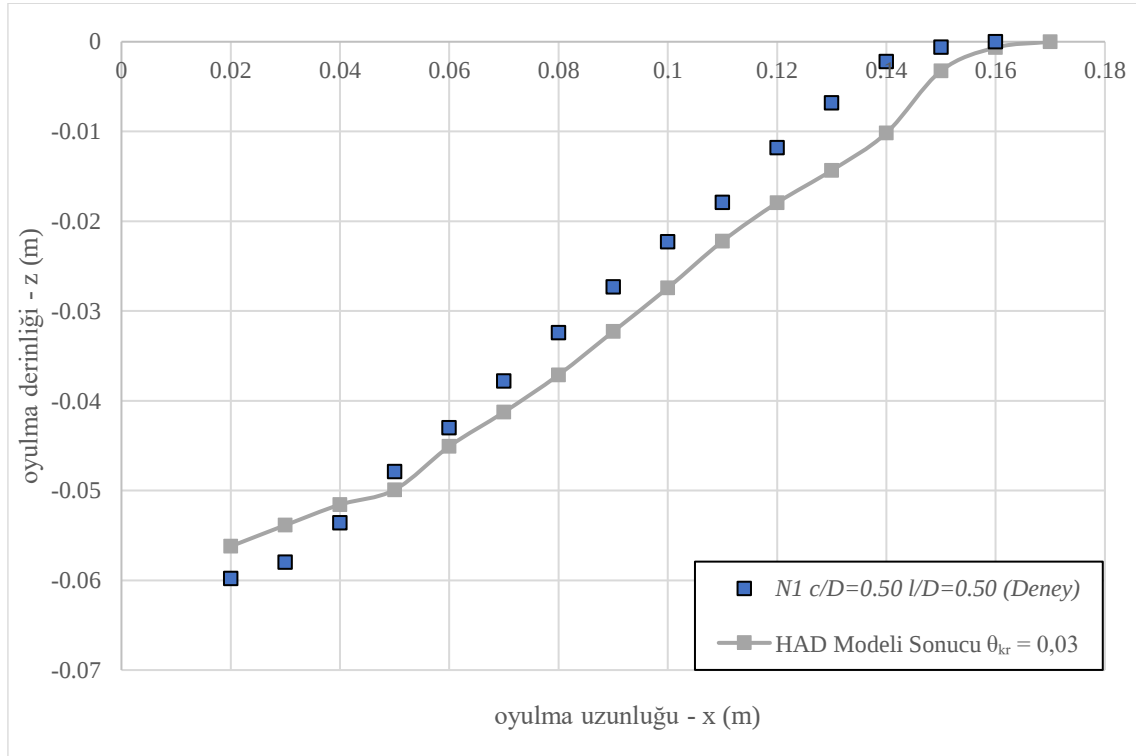


(b)

Şekil 6.17. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

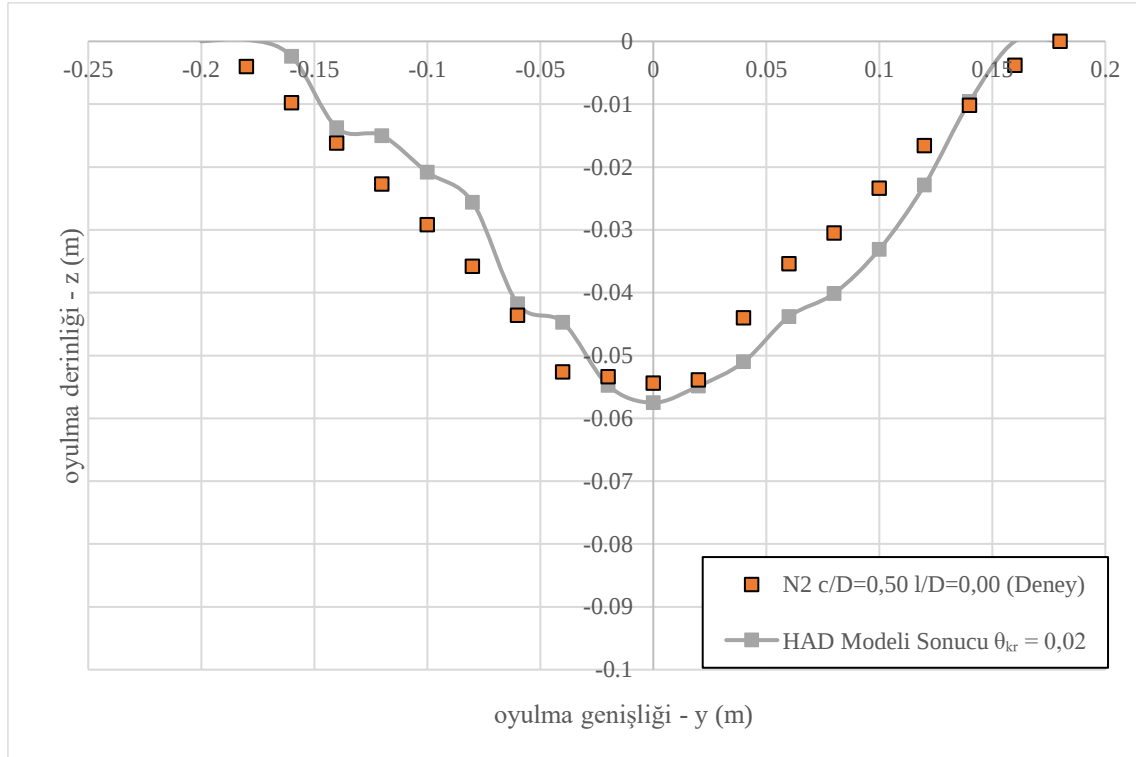


(a)

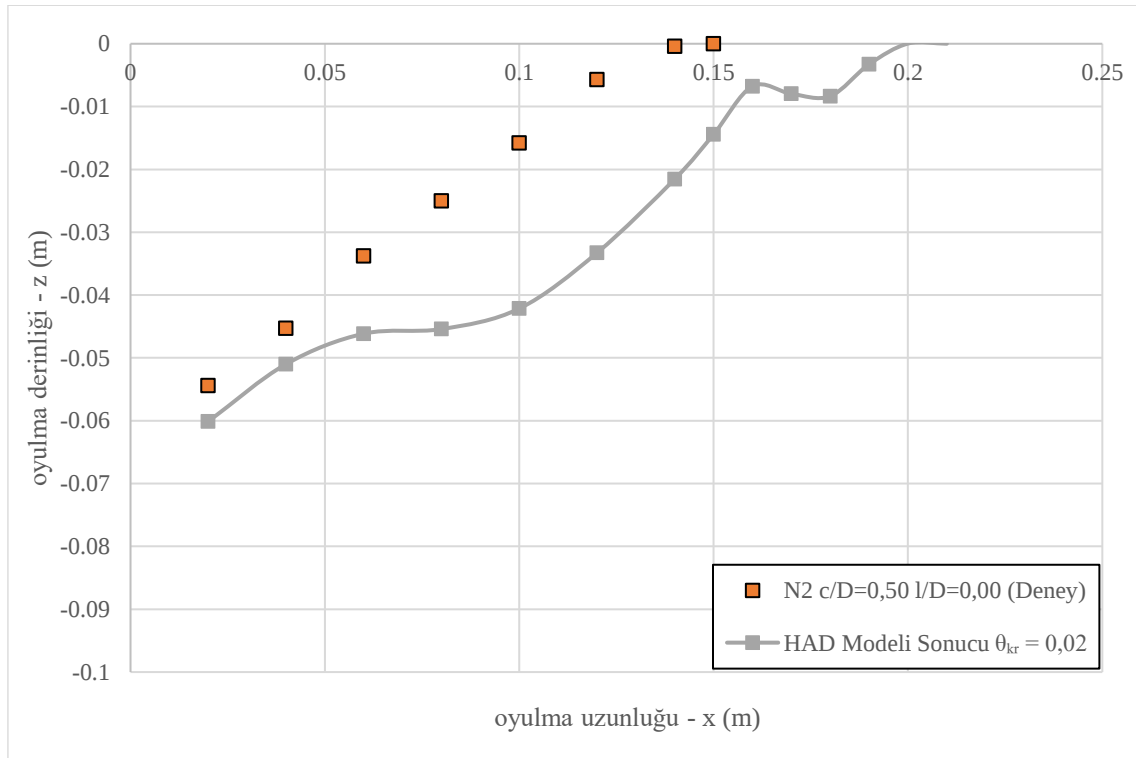


(b)

Şekil 6.18. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.50$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

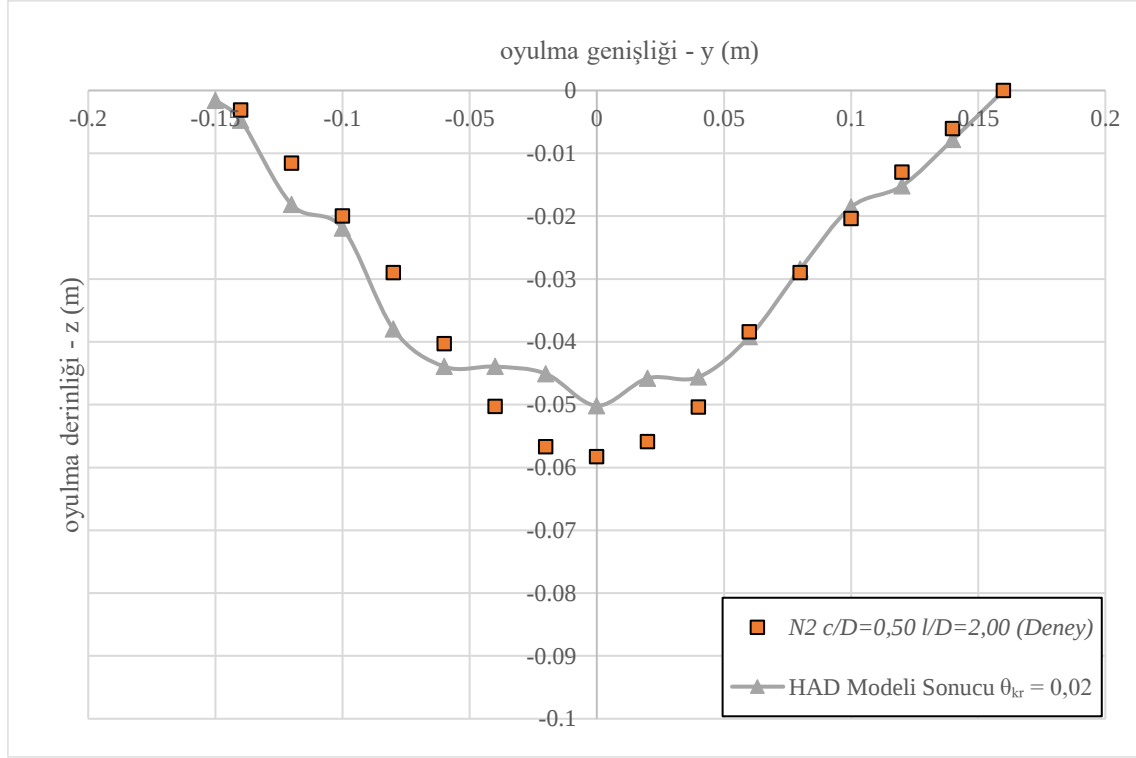


(a)

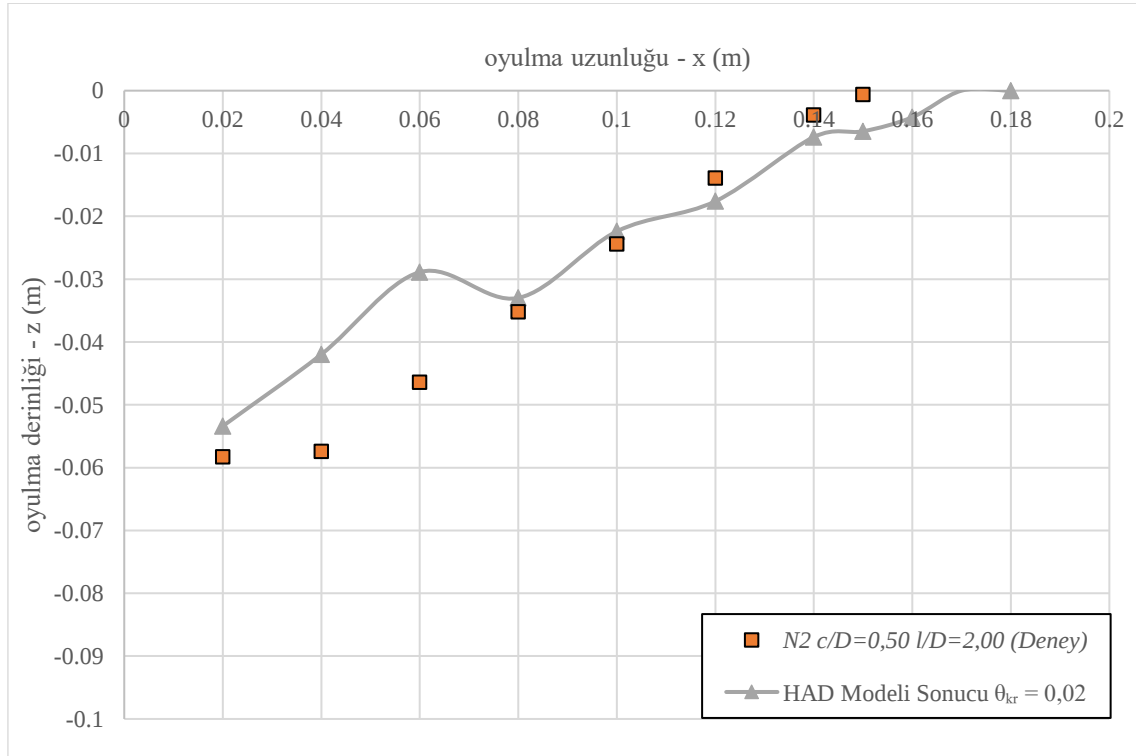


(b)

Şekil 6.19. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0,00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması



(a)



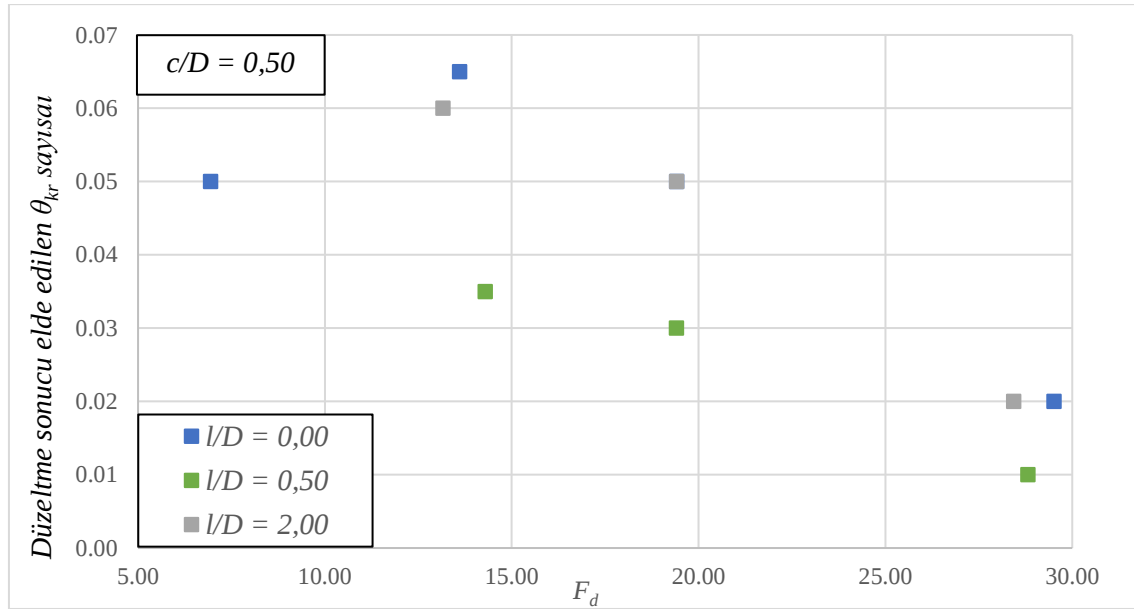
(b)

Şekil 6.20. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması

Yapılan deneysel çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda su alma ağız konumu ve densimetrik Froude sayısına bağlı olarak kritik Shields sayısı düzeltmesi sonuçları incelenmiştir. Kritik Shields sayısının sırasıyla F_d , c/D değerine ve l/D değerine bağlı olarak değişimi ayrıntıları ile irdelenmiştir.

6.2.1. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı değerlerinin F_d ile değişimi

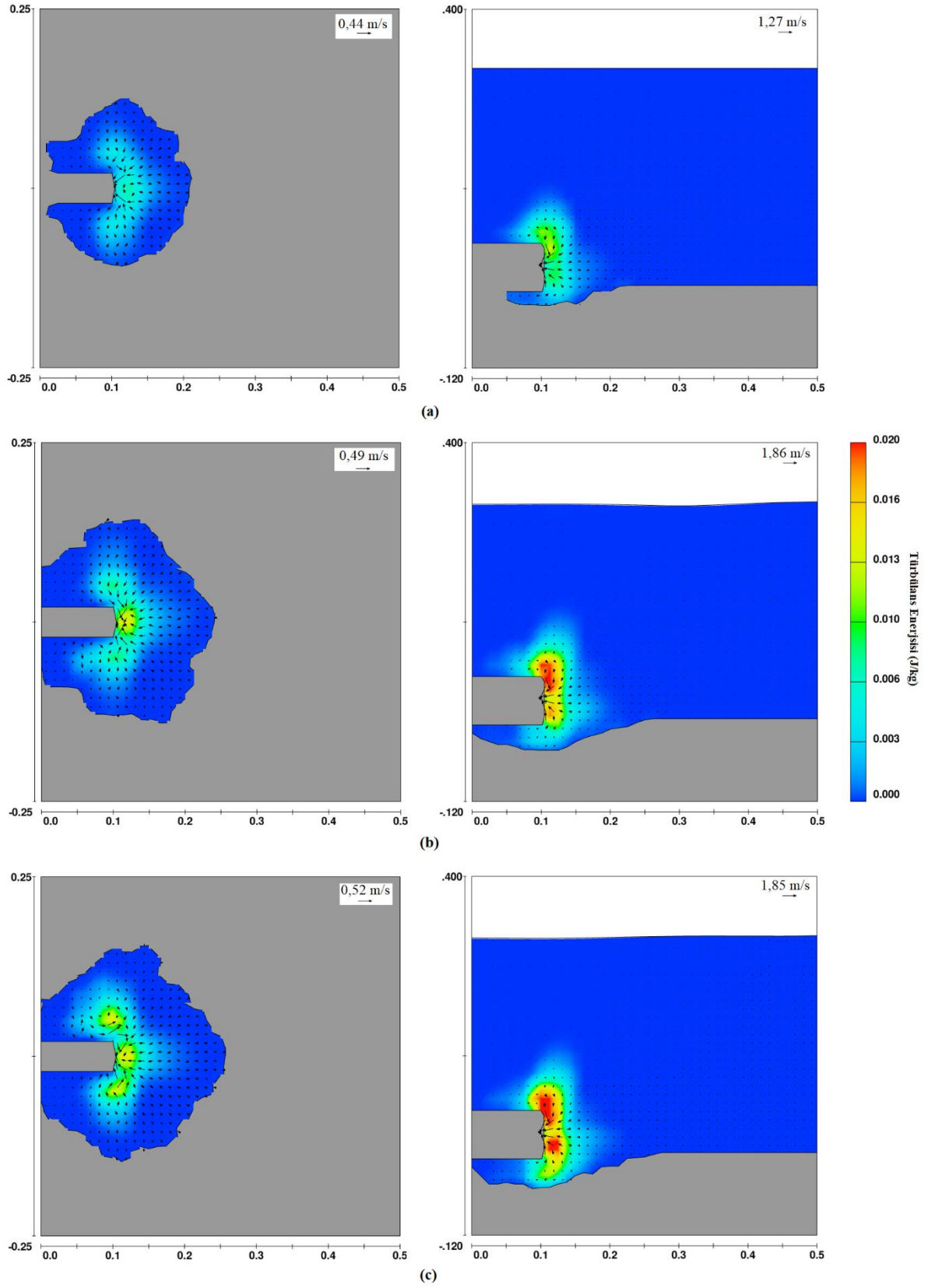
Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, farklı hidrolik koşullara göre kritik Shields sayıları bulunmuş olup F_d parametresine göre θ_{kr} değişimi Şekil 6.21’de verilmektedir.



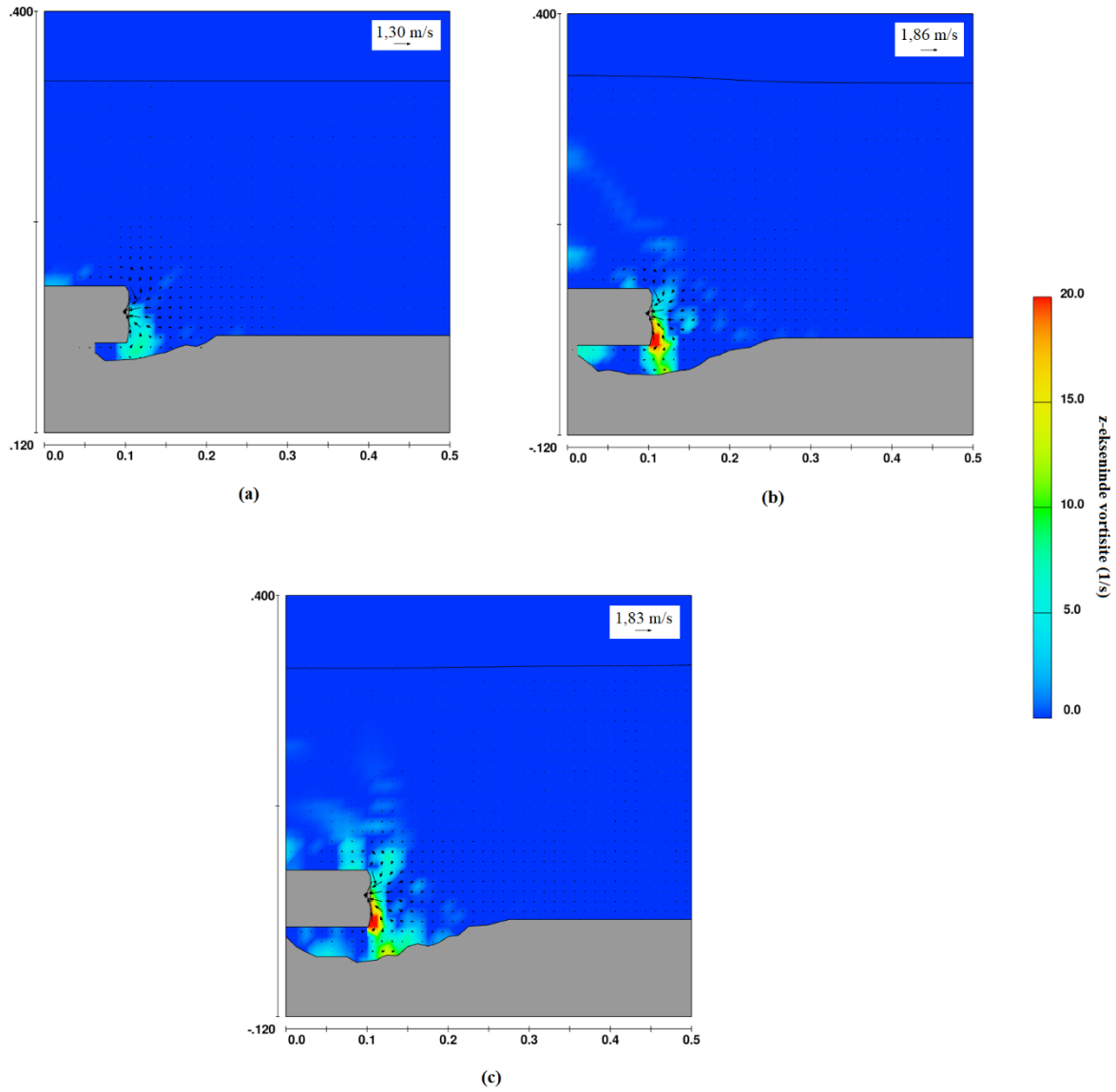
Şekil 6.21. Deney sonuçlarına göre düzeltilmiş kritik Shields sayısının F_d parametresine göre değişimi

Şekil 6.21 incelendiğinde θ_{kr} değerinin, F_d değeri arttıkça azaldığı gözlemlenmektedir. F_d değeri arttıkça çevrintilerin gücü, dolayısıyla sediment taşınım miktarı artmaktadır. Çevrinti gücündeki bu artıştan dolayı artan sediment taşınımının modele yansımaları, θ_{kr} değerinin azalması şeklindedir. F_d değeri 10’un altında olduğu durumlarda ise θ_{kr} değerinin azaldığı görülmüş olup bu durumun oluşma nedeni $F_d < 10$ için tam oyulma çukuru oluşumunun gerçekleşmemesi olarak açıklanmaktadır. $F_d < 10$ deneylerinde oyulma derinliği ölçümleri 1 cm değerinin altındadır. Bu denli düşük deneysel oyulma derinliklerinin, sayısal modelin doğasında bulunan hatalar nedeniyle istenilen isabetle elde edilmesi mümkün olamamıştır.

Sediment danesine etki eden ve sediment taşınım mekanizmasının büyük bir kısmını oluşturulan türbülans enerjisinin, F_d değeri arttıkça oyulma çukuru içerisinde daha geniş alanlara yayılması ve şiddetinin artması su alma ağzı etrafındaki hızların artması ile açıklanabilir. Bu durum HAD modelinden elde edilen, su alma ağzı çevresinde türbülans enerjilerinin farklı fiziksel koşullar altında verildiği Şekil 6.22’de görülebilir. Türbülans enerjilerinin yoğun olarak görüldüğü bölgelerin aynı zamanda oyulma derinliğinin maksimum olduğu bölgeler olması türbülanslı akımdan kaynaklı sediment taşınımının etkinliğini göstermektedir.



Şekil 6.22. Su alma ağızı etrafında türbülans kinetik enerjisinin $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$ su alma ağızı konumu için (a) $F_d = 14$; $\theta_{kr} = 0,060$ (b) $F_d = 19$; $\theta_{kr} = 0,050$ ve (c) $F_d = 29$; $\theta_{kr} = 0,020$ plan ve profil bakılarından görüntüsü



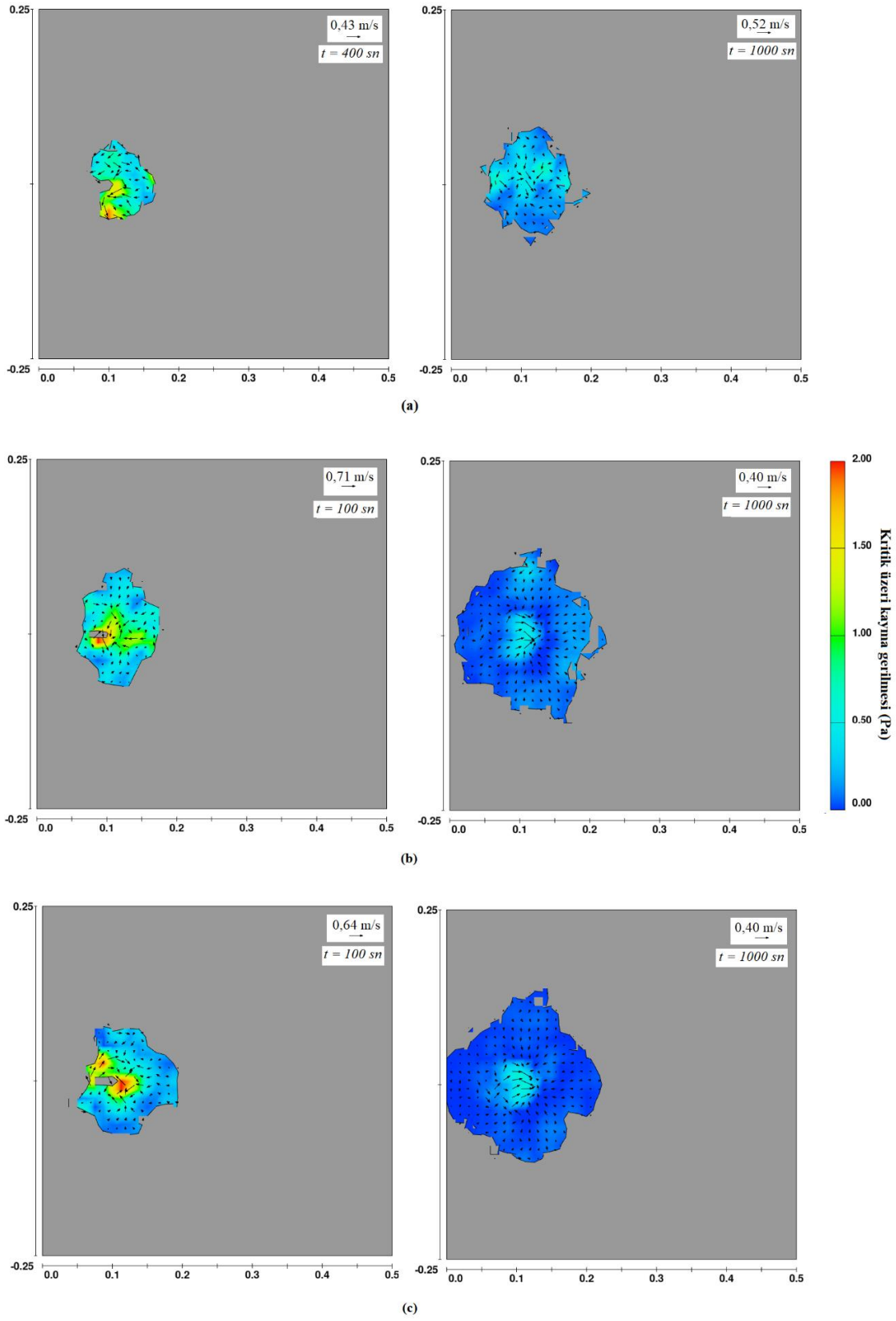
Şekil 6.23. Su alma ağızı etrafında z yönündeki vortisite değerlerinin $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$ su alma ağızı konumu için (a) $F_d = 14$; $\theta_{kr} = 0,060$ (b) $F_d = 19$; $\theta_{kr} = 0,050$ ve (c) $F_d = 29$; $\theta_{kr} = 0,020$ profil görüntüsü

Şekil 6.23’de su alma ağızı çevresindeki z yönünde oluşan vortisite (Ω) değerlerinin farklı F_d değerleri için kıyaslanması verilmiştir. Vortisite, akışkan parçacığının dönmesinin bir ölçüsüdür ve Eş. 6.4 ile verilmektedir.

$$\Omega = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (6.4)$$

Şekil 6.23’de görüldüğü üzere oyulma yüzeyinde oluşan z yönündeki vortisite yoğunluğu, F_d değeri arttıkça artmaktadır. Bu durum rastgele oluşan çevrinti kuvvetlerinin F_d değeri arttıkça artması ve z yönünde, su alma ağzına doğru çevrintiler ile taşınan parçacıkların su alma ağzından içeri girmesi olasılığını arttırmaktadır. Çevrinti kuvvetinin artması, sediment taşınımının artmasına, dolayısıyla maksimum oyulma derinliğinin artmasına ve kritik Shields sayısının Shields (1936) yaklaşımında öngörülenin dışında, daha düşük değerler almasına neden olmaktadır. Sediment dane çapı azaldıkça ve su alma ağzı çevresindeki türbülans kuvvetlerinin etkisi arttıkça bu etkilerden kaynaklı taşınımın artacağı düşünülmektedir.

Son olarak Şekil 6.24 ile farklı simülasyon zamanları ve farklı F_d değerleri için su alma ağzı altında oluşan oyulma çukuru üzerindeki kritik üzeri kayma gerilmesi değerleri gösterilmiştir. Kritik üzeri kayma gerilmesi, sediment danesini harekete geçirecek olan sürüklenme kuvvetlerini ifade etmektedir. Radyal akımın etkin olduğu simülasyon başlarında, tüm farklı F_d değerleri için bu değer yüksek değerlerdedir. Oyulma derinliği arttığında ve radyal akımın taşınım üzerindeki etkisi azaldığında sediment danesinin hareketinde çevrintiler etkin rol oynamaktadır. Şekil 6.24’de simülasyonun sonlarındaki kritik üzeri kayma gerilmesi, çoğunlukla su alma ağzı altında yoğunlaşarak, değeri başlangıçtan daha az olmak üzere gözlemlenmeye devam etmektedir. Bu kayma gerilmesi çevrintilerden kaynaklanmakta olup sedimentin deney sonuna kadar hareket etmesini sağlamaktadır. Bu durum deneysel çalışmalarda da gözlemlenmiş olup çevrintiler sediment danelerini su alma ağzından geçiremeyecek kadar oyulma derinliği arttığında, su alma ağzı çevresinde sadece sediment daneleri sıçrama ve yer değiştirme hareketi yapmaya başlamaktadırlar.

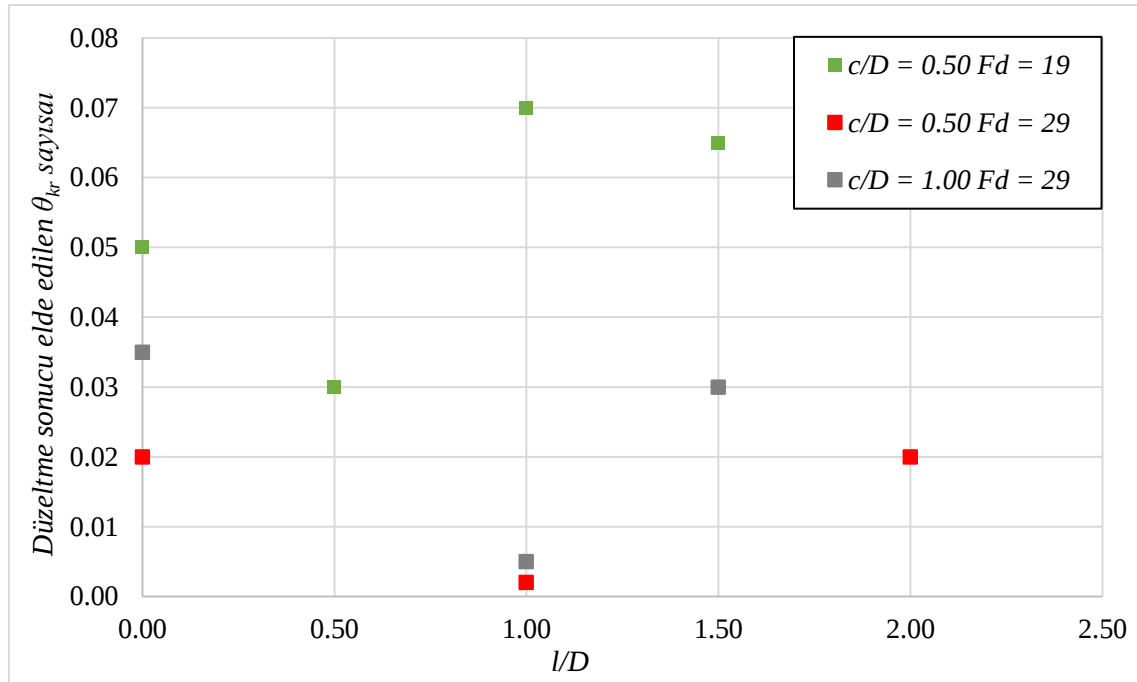


Şekil 6.24. Su alma ağzı altında oluşan oyulma üzerindeki farklı simülasyon zamanlarına ait kritik üzeri kayma gerilmelerinin $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$ su alma ağzı konumu için (a) $F_d = 14$; $\theta_{kr} = 0,060$ (b) $F_d = 19$; $\theta_{kr} = 0,050$ ve (c) $F_d = 29$; $\theta_{kr} = 0,020$ plan görüntüsü

Simülasyon sonlarına doğru $F_d = 14$ modeli için kayma gerilmelerinin diğer modellerden daha geniş alana yayılmaktadır. Düşük F_d değerlerinde oluşan çvrıntiler sediment danelerini su alma ağzına taşımak için yeterli enerjiye sahip değildir. Bu durum sediment hareketinin oluşmasına, ancak danelerin su alma ağzı altında başka bir noktaya çökmesine neden olmaktadır. Su alma ağzı altında oluşan bu çvrıntiler türbülans enerjisinin yayılımında da görülmektedir. Ancak çvrinti kuvvetleri sediment danelerini su alma ağzına taşımaya yetmediğinden oyulma denge durumuna erişmiştir.

6.2.2. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı değerlerinin l/D ile değişimi

Deneyel çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, farklı hidrolik koşullara göre kritik Shields sayıları bulunmuş olup l/D parametresine göre kritik Shields sayısı değişimi Şekil 6.25’de verilmektedir.



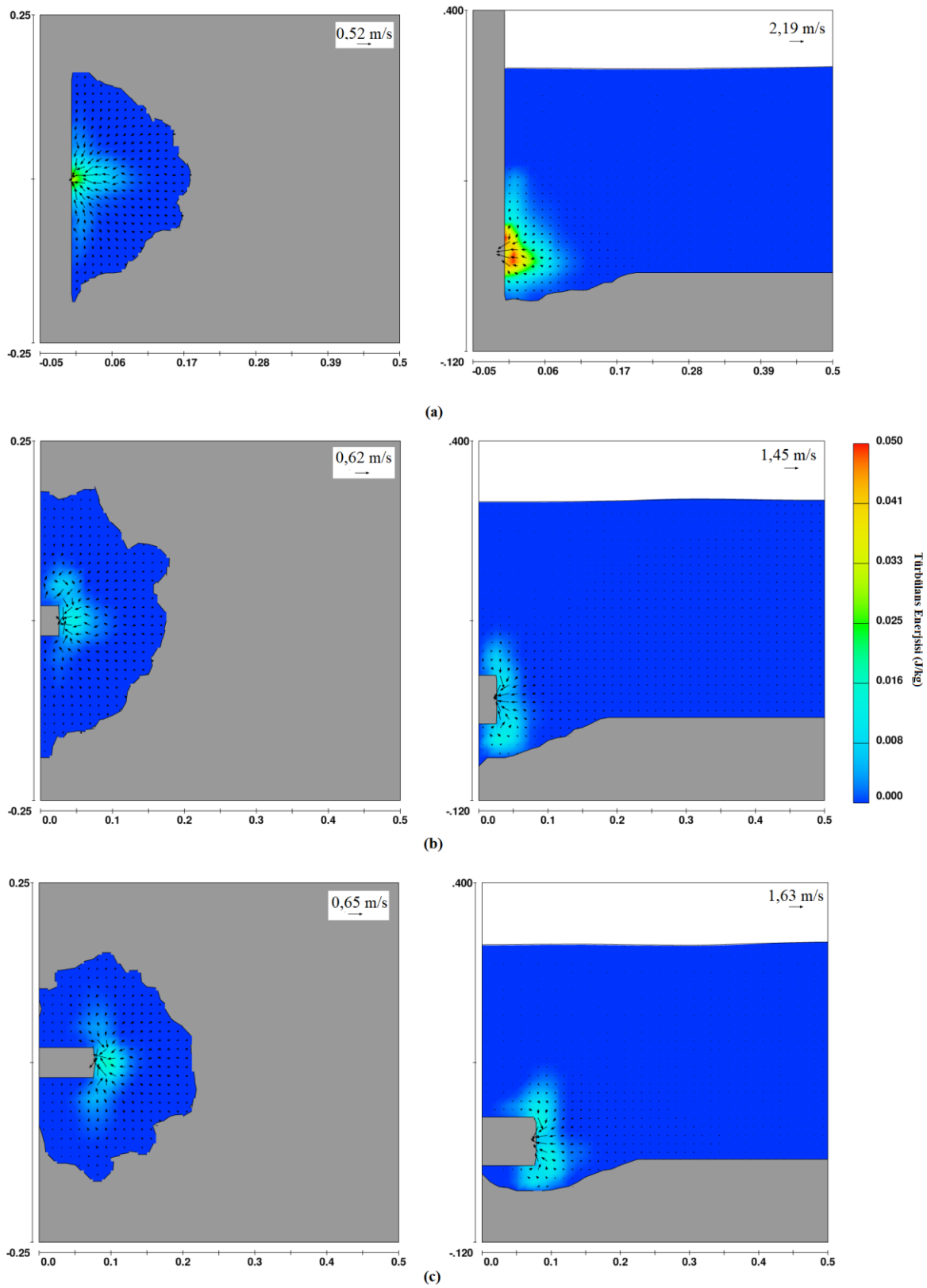
Şekil 6.25. Deney sonuçlarına göre düzeltilmiş kritik Shields sayısının l/D parametresine göre değişimi

Şekil 6.25 incelendiğinde, tıpkı deney sonuçlarından elde edilen $h_m - l/D$ ilişkisine benzer bir sonuç elde edilmiştir. Yüksek F_d değerlerinde minimum θ_{kr} sayısı, $l/D = 1,00$ değerinde görünmekte olup daha düşük F_d değerlerinde minimum θ_{kr} sayısı $l/D = 0,50$ değerinde

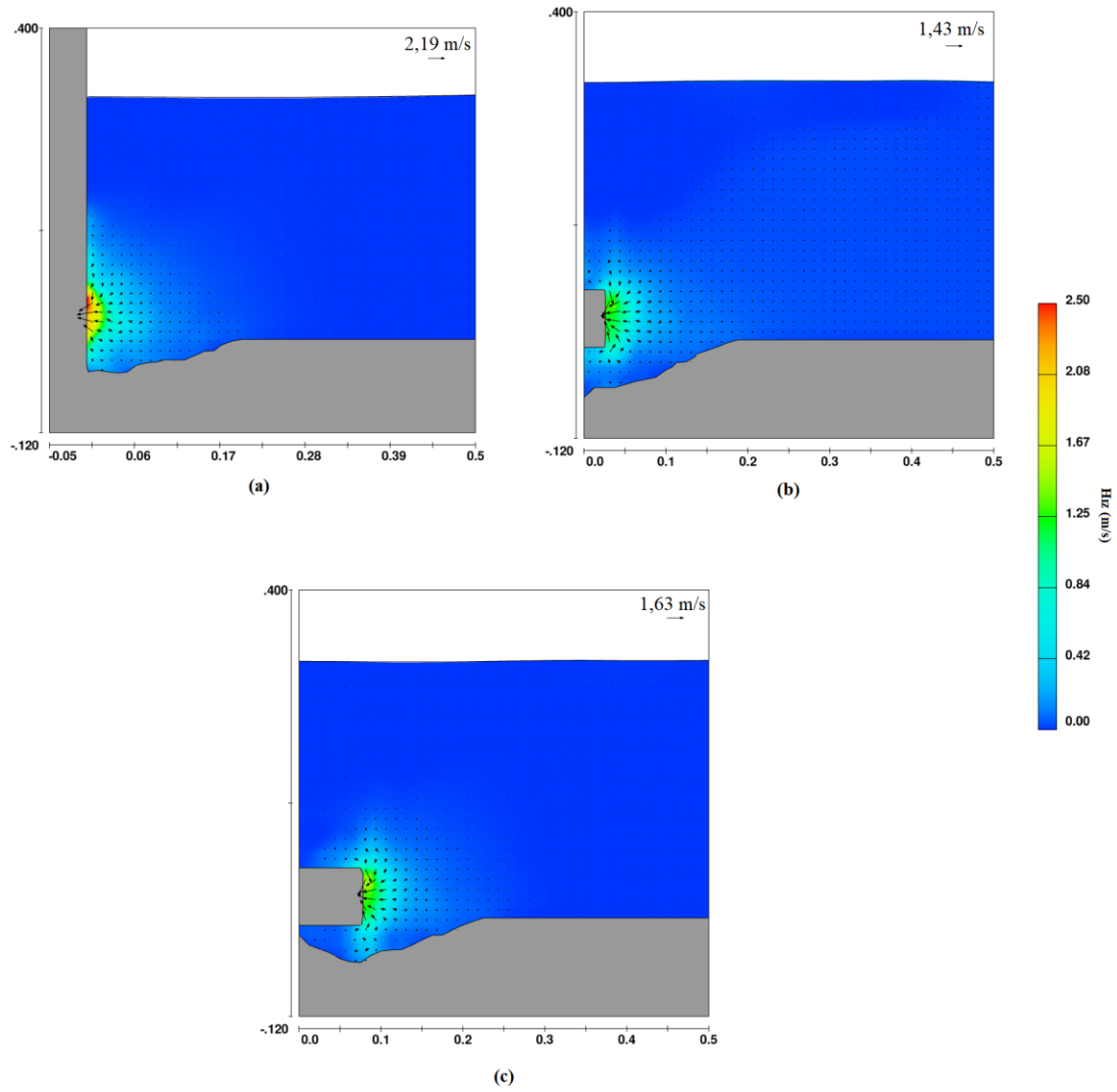
olduğu hesaplanmıştır. Bu durum, l/D değeri arttıkça su alma ağzı altında oluşan çevrintilerin sınır koşullarından kaynaklı sürtünme etkilerinden daha az etkilenmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.26 ile verilen türbülans enerjisinin l/D değişimine göre kıyaslanmasında; $l/D = 0,00$ durumunda su alma ağzı çevresinde türbülans enerjisinin en yüksek değerlerde olduğu, $l/D = 0,50$ durumunda ise en küçük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Ancak türbülans enerjisinin oyulma alanı çevresindeki dağılımı gözlemlendiğinde $l/D = 0,00$ durumunda enerjinin büyük bir bölümünün su alma ağzı üzerinde yoğunlaştığı ve taban üzerinde türbülans enerjisinin düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.

Türbülans enerjilerinin $l/D = 0,00$ durumunda en yüksek olmasının bir diğer sebebi de deneysel çalışma sonuçlarının ve sediment taşınım kuvvetlerinin anlatıldığı kısımda açıklandığı üzere, Eş. 3.2 ile verilen süreklilik denkleminde ötürü $l/D = 0,00$ durumunda en yüksek hızların görülmesidir. Türbülans enerjisi akış hızının artması ile artış göstermektedir. Su alma ağzı çevresindeki akış hızları Şekil 6.27 ile verilmiştir. Su alma ağzı ölü son ile bitişik olduğu durum için hızların çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

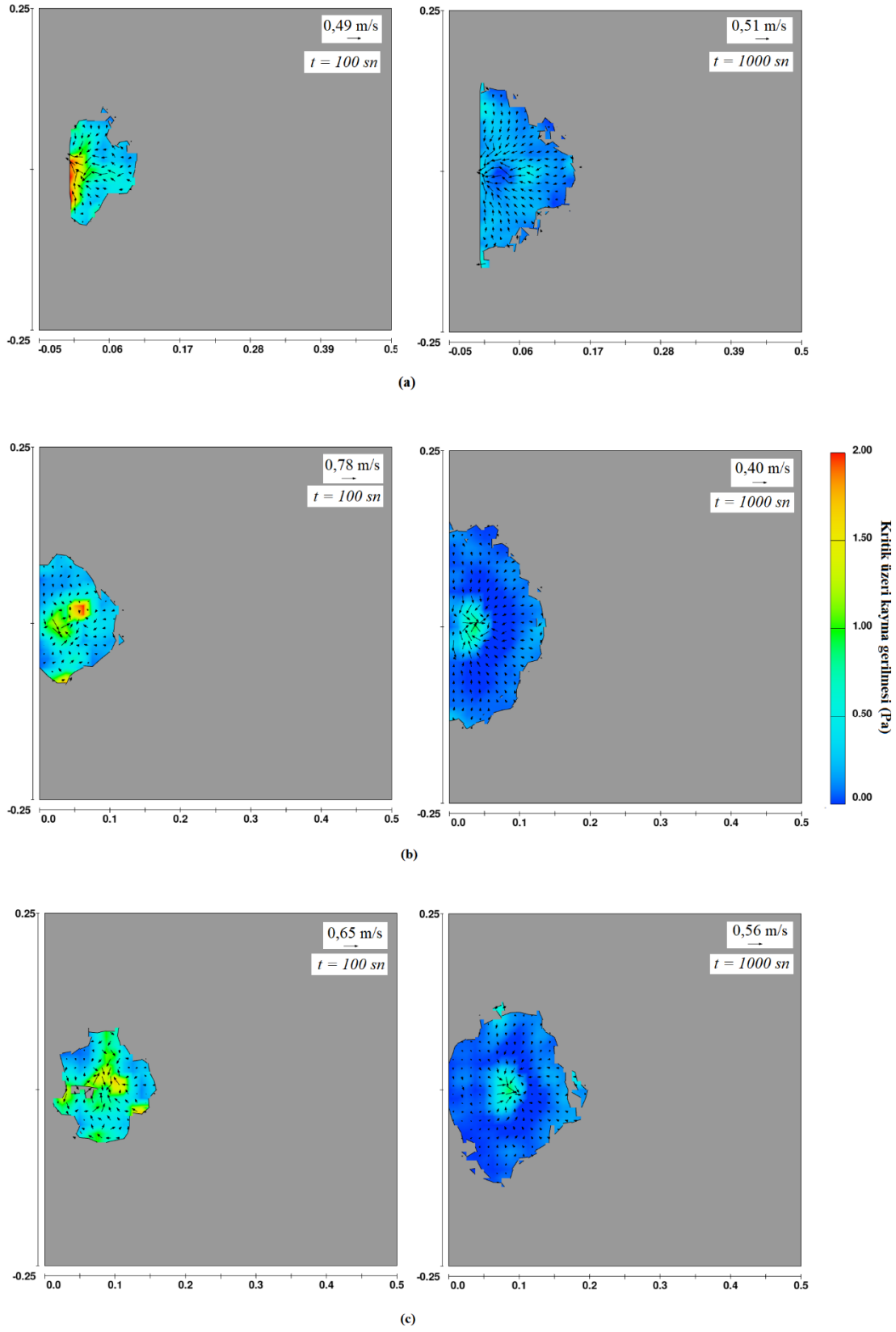


Şekil 6.26. Su alma ağzı etrafında türbülans kinetik enerjisinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ plan ve profil görüntüsü

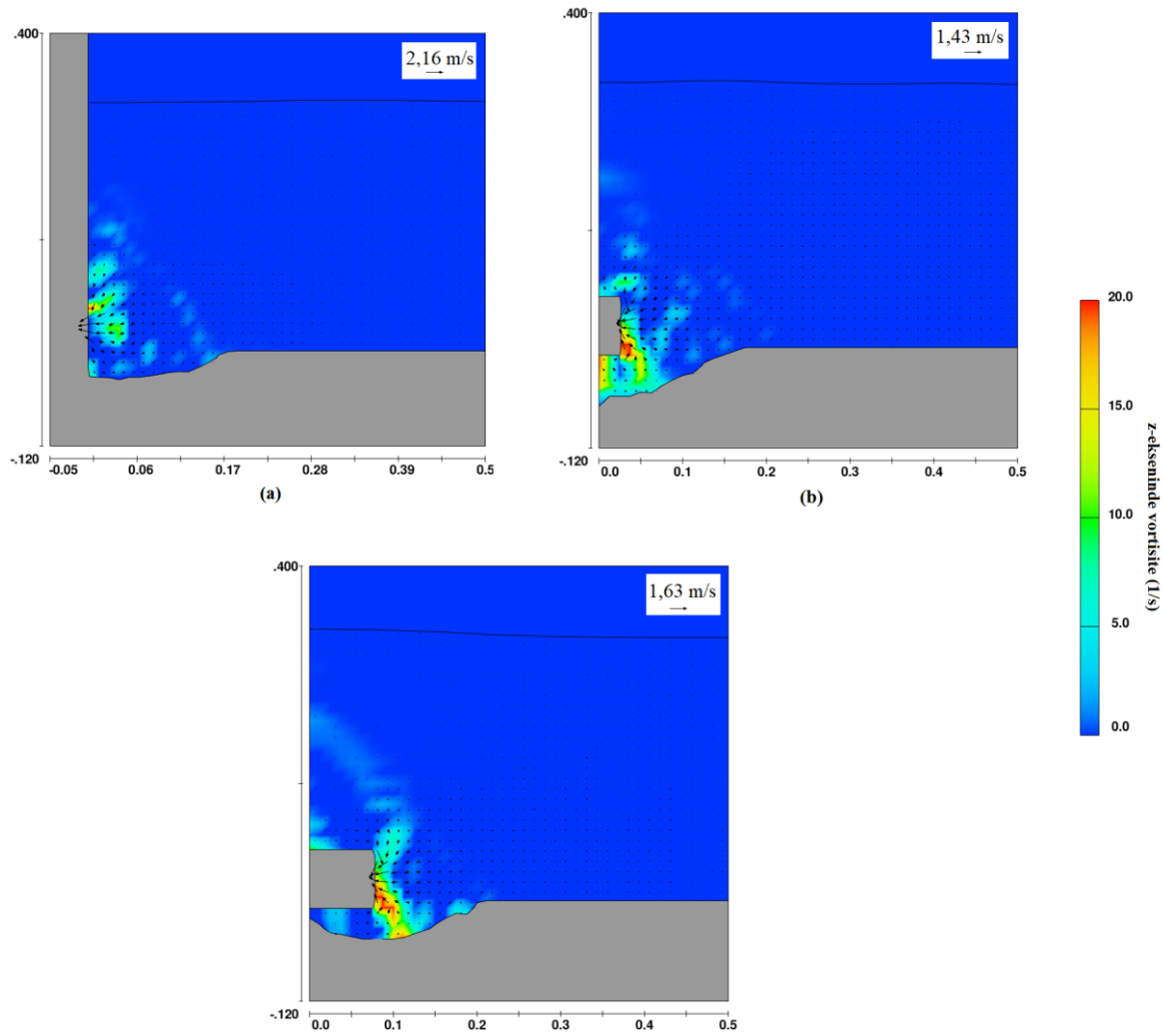


Şekil 6.27. Su alma ağızı etrafındaki hızı değerlerinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ profil görüntüsü

Su alma ağızı altında oluşan oyulma çukuru üzerindeki kritik üzeri kayma gerilmesi değerleri incelendiğinde simülasyon başlarında, radyal akımın da etkisi ile tüm su alma ağızı konumları için yüksek değerler gözlemlenmektedir. Ancak simülasyon sonlarına yaklaşıldığında çevrinti etkilerinin $l/D = 0,00$ durumu için daha az olmasından ötürü, su alma ağızının ölü sonla bitişik olmadığı durumlardan daha düşük kayma gerilmeleri gözlemlenmiştir. Ayrıca $l/D > 0,00$ durumlarında su alma ağızı çevresinde gözlemlenen, kritik üzeri kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel olarak yoğunlaşması durumu, $l/D = 0,00$ durumunda çevrintilerin daha az oluşmasından ötürü görülmemektedir.



Şekil 6.28. Su alma ağızı altında oluşan oyulma üzerindeki farklı simülasyon zamanlarına ait kritik üzeri kayma gerilmelerinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ plan görüntüsü



Şekil 6.29. Su alma ağızı etrafında z yönündeki vortisite değerlerinin, $c/D = 0,50$ ve $F_d = 19$ hidrolik özellikleri için (a) $l/D = 0,00$; $\theta_{kr} = 0,050$ (b) $l/D = 0,50$; $\theta_{kr} = 0,030$ ve (c) $l/D = 1,50$; $\theta_{kr} = 0,065$ profil görüntüsü

Son olarak Şekil 6.29’da su alma ağızı etrafında z yönündeki vortisite değerleri verilmiştir. Verilen şekilde görüldüğü üzere; $l/D = 0,00$ durumu için yüksek hızlar ve türbülans enerji değerleri gözlemlenmiş olmasına karşın, deney sonuçları kısmında ifade edildiği gibi ölü-son cidarı kaynaklı sürtünme etkilerinden ötürü çevrıntilerde bozulmalar ve çevrinti kuvvetlerinde ciddi azalmalar oluşmuştur. En yoğun ve oyulma çukuruna geniş yayılım gösteren vortisite değerleri $l/D = 0,50$ için bulunmuş olup bu durum deneysel sonuçları ve bu sonuçlara yönelik yapılan yorumları doğrular niteliktedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında ağzın kanal sınırlarına göre konumunun, ağız debisinin ve sediment dane çapının dairesel su alma ağzı membasında oluşan sediment taşınımına etkileri hem deneysel hem de sayısal modelleme ile incelenmiştir. Sediment taşınımında etkili iki farklı mekanizma olan radyal akım ve su yüzeyi altı çevrintiler tanıtılmış ve bu mekanizmaların akım sınırları ile etkileşimi deneysel çalışma sonuçları ile gösterilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yapılan çalışmada sediment taşınımına etkiyen iki farklı faktör olduğu görülmüştür. Bu faktörlerden birincisi ağız membasındaki akım hızı, ikincisi ise yüzey altı çevrintiler olup bu iki mekanizmanın da akım sınırlarından etkilendiği gösterilmiştir.
- Su alma ağzının akım sınırlarına göre konumu ve ortalama dane çapı etkilerinden bağımsız olarak su alma ağzından çekilen debinin artması densimetrik Froude sayısı değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum ile oyulma geometrisinin genişliğinin, uzunluğunun ve derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Ortalama dane çapı değerinin artması ise densimetrik Froude sayısının azalmasına dolayısıyla oyulma çukuru genişliğinin, uzunluğunun ve derinliğinin azalmasına sebep olmaktadır.
- Su alma ağzı – kanal yatağı arası mesafe (c) arttıkça yatakta oluşan kayma gerilmeleri ve yüzey altında oluşan çevrintilerin kuvvetlerinin azaldığı ve dolayısıyla çukurun küçüldüğü gözlemlenmiştir.
- Ölü-son duvarın yarattığı sınır sürtünme etkisinden ötürü $l/D = 0$ durumunda maksimum oyulma derinliğinin iki sediment numunesi için de en düşük değerde olduğu gözlemlenmiştir. Ölü-son duvarı ve su alma ağzı arası mesafe artırıldığında ($l/D = 0,5 \sim 1,0$) ölü-son duvarı sürtünme etkisinin azalmasından dolayı, oyulma derinliğinin en yüksek değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Oyulma derinliği, $l/D > 0,5 \sim 1,0$ durumunda maksimum derinlikten daha düşük bir değere düşer, $l/D > 1,5 \sim 2,0$ değerlerine gelindiğinde ise aynı c/D ve densimetrik Froude sayıları için sabit kalmaktadır. Bu durum yüzey altı çevrintiler ile radyal hız etkilerinin denge durumuna gelmesi olarak açıklanmıştır. $l/D < 0,5$ durumunda daha düşük oyulma derinliklerinin gözlemlenmesi ise yüzey altı çevrintilerin üzerinde ölü-son duvarının sürtünme etkilerinin radyal hız etkilerinden daha kuvvetli olması nedeniyledir.
- Yüzey altı çevrintilerin büyük oranda su alma ağzı altında oluşmasından ötürü, oluşan

oyulma çukuru genişliği ve uzunluğu üzerindeki etkileri, oyulma derinliğinde olduğu kadar fazla değildir. Maksimum uzunluk ve genişlik parametrelerinde etkin taşınım mekaniği radyal hız dağılımı olup çevrıntiler su alma ağzı altında olduğundan, su alma ağzından uzak noktalarda çevrıntilerin taşınımına etkisi düşüktür.

- Maksimum oyulma derinliğinin L/D değeri ile değişimi için yapılan çıkarımlar, sediment danesinin su alma ağzına ilk girişi durumunu tanımlayan kritik Froude sayısı için de geçerlidir. Sediment danesinin su alma ağzına girişinin başladığı kritik Froude sayısı, oyulma derinliğinin maksimum olduğu L/D değerinde minimum olmaktadır ve L/D arttıkça bu değerden bağımsızlaşır.
- Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen oyulma ölçümleri ile maksimum oyulma derinliğinin, genişliğinin ve uzunluğunun tahmin edilmesini sağlayan ampirik denklemler türetilmiştir.

Çalışmanın sayısal modellenmesi kısmında ise ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan Flow 3D kullanılmıştır. Bu yazılım özellikle serbest yüzeyli akışların modellenmesi için geliştirilmiştir. Hücrelerin tamamen akışkanla dolu, kısmen dolu veya tamamen boş olup olmadığını belirlemek için akışkan hacmi yöntemi (VOF) kullanılmıştır. 3 boyutlu momentum, kütle ve enerji korunum denklemleri sonlu hacim yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Sediment taşınımının öngörülmesi için genellikle kullanımda olan Shields (1936) yaklaşımının; çevrıntilerin baskın olduğu köprü ayağı oyulmaları, kapak altı akım nedeniyle oluşan oyulmalar ve bu çalışmanın kapsamı olan su alma ağzı membasında gerçekleşen oyulmaları doğru tahmin etme konusunda yetersiz kaldığı, literatürde daha önceden yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. HAD modeli kullanılarak deneysel sonuçlar doğrultusunda kritik Shields sayısı düzeltmeleri yapılmıştır.

Son olarak kritik Shields sayısı düzeltilmiş model üzerinden, su alma ağzı ve oyulma çukuru çevresindeki akışın; hız değerleri, türbülans enerjisi, z eksenindeki vortisitesi ve kritik üzeri kayma gerilmesi parametreleri incelenmiştir. İncelemeler deneysel sonuçların açıklanmasında verilen sediment taşınım mekanizmalarını doğrulamaktadır. İncelemeler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- θ_{kr} değeri, F_d değeri arttıkça azalmaktadır. F_d değeri 10'un altına düştüğünde ise θ_{kr} değerinin azaldığı görülmüş olup bu durumun oluşma nedeni $F_d < 10$ için tam oyulma çukuru oluşumunun gerçekleşmemesi ve net bir HAD çözümü alınamamış olması olarak açıklanmıştır.
- Oyulma çukuru yüzeyinde oluşan z yönündeki vortisite yoğunluğu, F_d değeri arttıkça artmaktadır. Bu durum, oluşan çevrinti kuvvetlerinin F_d değeri arttıkça artması ve z yönünde, su alma ağzına doğru çevrıntiler ile taşınan parçacıkların su alma ağzından içeri girmesi olasılığını arttırmaktadır.
- Radyal akımın etkin olduğu simülasyon başlarında, kritik üzeri kayma gerilmesi yüksektir. Oyulma derinliği arttığında ve radyal akımın taşınım üzerindeki etkisi azaldığında sediment danelerinin hareketinde çevrıntiler etkin rol oynamaktadır. Simülasyonun sonlarındaki kritik üzeri kayma gerilmesi, çoğunlukla su alma ağzı altında yoğunlaşarak, değeri başlangıçtan daha az olmak üzere gözlemlenmeye devam etmektedir.
- Deney sonuçlarından elde edilen $h_m - l/D$ ilişkisine benzer bir sonuç θ_{kr} ile l/D için de elde edilmiştir. $F_d = 29$ değerlerinde minimum θ_{kr} sayısı, $l/D = 1,00$ değerinde olup $F_d = 19$ değerlerinde minimum θ_{kr} sayısı $l/D = 0,50$ değerinde olduğu hesaplanmıştır.
- Türbülans enerjisinin l/D değişimine göre kıyaslanmasında; $l/D = 0,00$ durumunda su alma ağzı çevresinde türbülans enerjisinin en yüksek değerlerde olduğu, $l/D = 0,50$ durumunda ise en küçük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum $l/D = 0,00$ durumunda radyal hızların çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca $l/D = 0,00$ durumunda türbülans enerjisi, oyulma çukuru yüzeyinde çok daha düşük olup su alma ağzına yakın yerlerde yoğunlaşmıştır.
- Vortisite değerleri l/D değişimine göre incelendiğinde $l/D = 0,00$ ölü-son cidarı kaynaklı sürtünme etkilerinden ötürü çevrıntilerde bozulmalar ve çevrinti kuvvetlerinde ciddi azalmalar görülmüştür. En yoğun ve oyulma çukuruna geniş yayılım gösteren vortisite değerleri $l/D = 0,50$ için bulunmuş olup bu durum deneysel sonuçları ve bu sonuçlara yönelik yapılan yorumları doğrular niteliktedir.

Yapılan bu çalışmanın geliştirilebilmesi ve devam ettirilebilmesi için deneysel olarak, dane çapı ve su alma ağzından çekilen debi değiştirilerek F_d sayısı aralığı genişletilebilir. Su alma ağzı çapının ölçek etkisi araştırılabilir ve farklı ağız şekilleri incelenebilir. Sayısal çözümleme ve HAD modeli çalışmaları ile ilgili ise daha ince çözüm ağları ile çözümleme yapılabilir. Gelecekte yapılması önerilen HAD modellerinin çözüm ağı inceliğinin artması, ince çözüm ağı gerektiren LES türbülans modelini kullanılabilir hale getirecektir. Bu durum türbülans etkilerinin sediment taşınımında etkin rol oynadığı akım koşulları için fazlasıyla önemlidir.

KAYNAKLAR

- Aghajani, N., Karami, H., Sarkardeh, H., & Mousavi, S. F. (2020). Experimental and numerical investigation on effect of trash rack on flow properties at power intakes. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 100(9), e202000017.
- An, S., Ku, H., & Julien, P. Y. (2015). Numerical modelling of local scour caused by submerged jets. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 9(3), 328.
- Apsley, D. D., & Stansby, P. K. (2008). Bed-load sediment transport on large slopes: model formulation and implementation within a RANS solver. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(10), 1440-1451.
- Aydın, M. C., & Karaduman, Ç. (2018). Kapak altı batmış akım mansabında meydana gelen oyulmaların sayısal simülasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 439-443.
- Baykal, C., Sumer, B. M., Fuhrman, D. R., Jacobsen, N. G., & Fredsøe, J. (2017). Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves. *Coastal Engineering*, 122, 87-107.
- Bryant, D. B., Khan, A. A., & Aziz, N. M. (2008). Investigation of flow upstream of orifices. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 98-104.
- Castillo, L. G., & Carrillo, J. M. (2017). Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 92, 171-180.
- Choufu, L., Abbasi, S., Pourshahbaz, H., Taghvaei, P., & Tfwala, S. (2019). Investigation of flow, erosion, and sedimentation pattern around varied groynes under different hydraulic and geometric conditions: a numerical study. *Water*, 11(2), 235.
- Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Sattariyan, M., Alinejad, B., Asl, M. M., & Di Francesco, S. (2021). Investigation of local scouring around hydrodynamic and circular pile groups under the influence of river material harvesting pits. *Water*, 13(16), 2192.
- Ghaderi, A., & Abbasi, S. (2019). CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar. *Sādhanā*, 44(10), 1-12.
- Ghasemi, M., & Soltani-Gerdefaramarzi, S. (2017). The scour bridge simulation around a cylindrical pier using Flow-3D. *Journal of Hydrosiences and Environment*, 1(2), 46-54.
- Hager, W. H., & Oliveto, G. (2002). Shields' entrainment criterion in bridge hydraulics. *Journal of hydraulic engineering*, 128(5), 538-542.
- Hoffmans, G. J. (1998). Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(4), 430-437.

- Ibrahim, A., Karim, A., & Günal, M. (2017). Simulation of local scour development downstream of broad-crested weir with inclined apron. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı-Special Issue), 57-61.
- Jalal, H. K., & Hassan, W. H. (2020, March). Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745, 012150
- Karim, O. A., & Ali, K. H. M. (2000). Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets. *Journal of Hydraulic Research*, 38(4), 279-287.
- İnternet: Kaya, N., Göğüş, M., Aydın, M. C., Dursun, Ö. F., Tunç, M., & İkinciogulları, E (2019). Serbest Düşülü Savakların Mansabında Oluşan Yerel Oyulmanın Deneysel ve Sayısal Araştırılması. *OpenMETU*, Web: <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/95859>, son erişim tarihi: 09.02.2023.
- Kayser, M., & Gabr, M. A. (2013). Assessment of scour on bridge foundations by means of in situ erosion evaluation probe. *Transportation research record*, 2335(1), 72-78.
- Keshavarzi, A., Mohammadi, G. R., & Hamidifar, H. (2022). Time evolution of scour hole and flow characteristics upstream of a flushing orifice. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(sup1), 199-206.
- Knauss, W. G., & Emri, I. (1987). Volume change and the nonlinearly thermo-viscoelastic constitution of polymers. *Polymer Engineering & Science*, 27(1), 86-100.
- Madadi, M. R., Rahimpour, M., & Qaderi, K. (2016). Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 180-189.
- Man, C., Zhang, G., Hong, V., Zhou, S., & Feng, Y. (2019). Assessment of turbulence models on bridge-pier scour using Flow-3D. *World Journal of Engineering and Technology*, 7(2), 241-255.
- Mehdifard, M., Dalfardi, S., Baghdadi, H., & Seirfar, Z. (2015). Simulation of local scour caused by submerged horizontal jets with Flow-3D numerical model. *Desert*, 20(1), 47-55.
- Mendonça, I. S. P., Canilho, H. D. L., & Fael, C. M. S. (2019). *Flow-3D Modelling of the Debris Effect on Maximum Scour Hole Depth at Bridge Piers*. Paper presented at 38th IAHR World Congress.
- Miedema, S. A. (2008). *An analytical method to determine scour*. Paper presented at WEDA XXVIII & Texas A&M.
- Movahedi, A., Kavianpour, M. R., & Aminoroayaie Yamini, O. (2018). Evaluation and modeling scouring and sedimentation around downstream of large dams. *Environmental Earth Sciences*, 77(8), 1-17.

- Nazari-Sharabian, M., Nazari-Sharabian, A., Karakouzan, M., & Karami, M. (2020). Sacrificial piles as scour countermeasures in river bridges a numerical study using flow-3D. *Civil Engineering Journal*, 6(6), 1091.
- Omara, H., & Tawfik, A. (2018, May). *Numerical study of local scour around bridge piers*. In IOP conference series: earth and environmental science, 151(1), 012013.
- Ömer, K. Ö. S. E., & Yanmaz, A. M. (2010). Scouring reliability of bridge abutments. *Teknik Dergi*, 21(105), 1387-1402.
- Pourshahbaz, H., & Abbasi, S. (2017). Numerical scour modeling around parallel spur dikes in FLOW-3D. *Drinking Water Engineering and Science Discussions*, 1-16.
- Powell, D. N., & Khan, A. A. (2011). Sediment transport mechanics upstream of an orifice. *Journal of visualization*, 14(4), 315-320.
- Powell, D. N., & Khan, A. A. (2012). Scour upstream of a circular orifice under constant head. *Journal of hydraulic research*, 50(1), 28-34.
- Powell, D. N., & Khan, A. A. (2015). Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014076.
- Rajaratnam, N., & Mazurek K. A. (2002). Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 709-716.
- Roberts, P. J., & Matthews, P. R. (1984). Dynamics of jets in two-layer stratified fluids. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9), 1201-1217.
- Samma, H., Khosrojerdi, A., Rostam-Abadi, M., Mehraein, M., & Cataño-Lopera, Y. (2020). Numerical simulation of scour and flow field over movable bed induced by a submerged wall jet. *Journal of Hydroinformatics*, 22(2), 385-401.
- Sarkardeh, H., Reza Zarrati, A., Jabbari, E., & Marosi, M. (2014). Numerical simulation and analysis of flow in a reservoir in the presence of vortex. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4), 598-608.
- Shammaa, Y., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N. (2005). Flow upstream of orifices and sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 127-133.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*, PhD Thesis, Technical University Berlin.
- Sungur, A. (2018). *Numerical investigation of vortex formation at asymmetric horizontal intakes*, Master's thesis, Middle East Technical University.
- Taha, N., El-Feky, M. M., El-Saiad, A. A., & Fathy, I. (2020). Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. *Alexandria Engineering Journal*, 59(5), 3503-3513.

- Tang, J. H., & Puspasari, A. D. (2021). Numerical Simulation of Local Scour around Three Cylindrical Piles in a Tandem Arrangement. *Water*, 13(24), 3623.
- Tataroğlu, R. M. (2014). *Numerical investigation of vortex formation at intake structures using flow-3d software*, Master's thesis, Middle East Technical University.
- Wang, C., Liang, F., & Yu, X. (2017). Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups. *Natural Hazards*, 85(3), 1417-1435.
- Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M., & Burnham, J. (2014). The sedimentation scour model in FLOW-3D®. *Flow Science Report*, 3, 1-29.
- Yildirim, N., & Kocabaş, F. (1995). Critical submergence for intakes in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12), 900-905.
- Yu, P., Hu, R., Yang, J., & Liu, H. (2020). Numerical investigation of local scour around USAF with different hydraulic conditions under currents and waves. *Ocean Engineering*, 213, 107696.
- Zhang, Q., Zhou, X. L., & Wang, J. H. (2017). Numerical investigation of local scour around three adjacent piles with different arrangements under current. *Ocean Engineering*, 142, 625-638.
- Zhu, Z. W., & Liu, Z. Q. (2012). CFD prediction of local scour hole around bridge piers. *Journal of Central South University*, 19(1), 273-281.

EKLER

EK-1. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar

NUMUNE	c/D	l/D	Q (l/s)	F_d	h_m/D	W_m/D	L_m/D
NUMUNE 1	0,50	0,00	1,07	3,51	0,07	1,63	1,44
			2,11	6,95	0,17	2,78	1,44
			3,14	10,33	0,25	5,75	2,30
			4,14	13,61	0,35	6,90	2,30
			5,15	16,92	0,68	8,05	2,49
			5,91	19,41	0,80	8,43	3,64
		0,50	1,12	3,69	0,11	2,20	0,86
			2,05	6,74	0,40	2,59	1,34
			3,03	9,97	0,79	4,79	2,11
			3,98	13,09	0,89	5,36	2,30
			5,01	16,45	1,08	5,94	2,68
			5,91	19,42	1,15	6,51	3,07
		1,00	1,00	3,30	0,08	2,30	0,86
			2,12	6,97	0,38	2,68	1,44
			3,07	10,10	0,48	3,45	1,72
			4,00	13,16	0,61	4,98	2,30
			4,96	16,29	0,82	6,32	2,68
			6,00	19,72	0,92	6,32	2,87
		1,50	1,01	3,31	0,05	1,53	0,57
			2,00	6,58	0,29	1,92	0,77
			3,16	10,39	0,43	2,87	1,53
			3,99	13,12	0,65	3,26	1,92
			5,14	16,88	0,72	4,21	2,30
			5,98	19,63	0,84	4,41	2,49
		2,00	1,01	3,31	0,11	1,92	1,15
			2,02	6,63	0,38	2,87	1,34
			3,02	9,93	0,56	3,45	1,72
			4,00	13,16	0,70	3,83	1,92
			5,00	16,41	0,83	4,41	2,11
			5,91	19,42	0,83	4,79	2,30
	0,75	0,00	3,51	11,52	0,05	4,21	1,34
			4,04	13,26	0,16	6,03	1,44
			4,57	15,01	0,22	4,02	1,34
			5,01	16,45	0,40	4,98	1,72
			5,51	18,10	0,49	4,98	1,92
			6,10	20,03	0,50	4,98	1,92
		0,50	3,00	9,87	0,42	2,78	0,67
			3,51	11,52	0,56	4,41	2,01
			4,03	13,23	0,59	4,41	2,01
			4,49	14,75	0,67	4,60	2,20

EK-1. (devam) Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar

NUMUNE	c/D	l/D	Q (l/s)	F_d	h_m/D	W_m/D	L_m/D
NUMUNE 1	0,75	0,50	5,01	16,45	0,74	5,17	2,39
			5,51	18,10	0,80	5,56	2,59
			6,00	19,71	0,86	5,56	2,39
		1,00	3,00	9,87	0,25	1,92	1,05
			3,51	11,52	0,36	2,87	1,53
			4,00	13,16	0,42	3,07	1,72
			4,52	14,86	0,52	3,64	1,92
			5,08	16,69	0,54	3,83	2,11
			5,59	18,35	0,57	4,21	2,11
			5,95	19,55	0,71	4,60	2,49
	1,00	0,00	5,47	17,98	0,09	4,69	1,15
			6,04	19,85	0,37	4,12	2,49
		0,50	3,00	9,86	0,14	1,53	0,86
			3,53	11,58	0,19	2,49	1,25
			4,03	13,23	0,25	2,68	1,25
			4,50	14,78	0,45	3,26	1,63
			5,00	16,41	0,51	3,64	1,82
			5,56	18,27	0,58	4,21	1,82
			5,91	19,42	0,62	4,41	2,01
		1,00	5,01	16,45	0,26	2,39	1,25
			5,50	18,06	0,34	3,26	1,72
			5,94	19,50	0,40	4,60	2,11
		1,50	5,01	16,45	0,24	2,30	1,15
			5,51	18,10	0,28	2,39	1,34
			5,92	19,46	0,35	2,78	1,44
	1,25	0,50	5,48	18,02	0,12	1,72	0,86
			5,96	19,59	0,19	2,68	1,05
		1,00	5,01	16,45	0,09	1,34	1,05
			5,50	18,06	0,13	1,63	1,25
			5,98	19,63	0,16	1,92	1,34
NUMUNE 2	0,50	0,00	1,01	4,72	0,13	2,11	0,96
			2,00	9,35	0,33	3,45	1,25
			3,00	14,01	0,52	4,41	1,53
			4,00	18,68	0,65	7,66	2,49
			5,01	23,36	0,83	8,05	2,78
			6,33	29,52	1,04	7,28	2,87
		0,50	1,06	4,94	0,10	2,30	0,86
			3,06	14,30	0,88	4,79	2,11
			5,01	23,36	0,99	7,66	2,78
			6,18	28,82	1,37	8,05	3,07

EK-1. (devam) Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar

NUMUNE	c/D	l/D	Q (l/s)	F_d	h_m/D	W_m/D	L_m/D
NUMUNE 2	0,50	1,00	1,04	4,87	0,10	2,01	1,05
			2,99	13,97	0,66	4,60	1,92
			5,01	23,36	0,99	6,13	2,49
			6,19	28,88	1,70	9,20	3,83
		1,50	1,23	5,75	0,18	2,87	1,05
			3,07	14,34	0,65	4,21	1,92
			5,03	23,47	0,78	5,36	2,30
			6,18	28,82	0,95	6,13	2,87
		2,00	1,10	5,11	0,33	2,87	1,15
			3,06	14,26	0,72	4,41	2,11
			5,01	23,36	1,02	5,56	2,68
			6,10	28,44	1,11	5,94	2,87
		3,00	1,10	5,11	0,35	3,07	1,15
			2,98	13,89	0,75	4,60	2,11
			4,98	23,25	1,01	5,17	2,68
			6,06	28,25	1,10	5,94	2,87
	1,00	0,00	5,01	23,36	0,34	4,98	1,53
			5,51	25,70	0,42	5,17	1,53
			6,42	29,97	0,64	5,94	1,92
		0,50	4,06	18,93	0,48	3,45	1,53
			5,01	23,36	0,59	5,17	1,92
			6,34	29,58	0,84	5,75	2,30
		1,00	4,03	18,78	0,38	2,87	1,53
			5,01	23,36	0,44	3,83	1,82
			6,35	29,65	1,17	6,90	3,26
		1,50	4,04	18,83	0,34	2,49	1,34
			5,01	23,36	0,39	3,26	1,72
			6,18	28,82	0,52	3,83	1,92
		2,00	4,00	18,68	0,46	2,87	1,63
			5,19	24,20	0,59	3,83	2,30
			6,20	28,94	0,72	4,60	2,30
		3,00	4,17	19,47	0,45	3,83	1,82
			5,01	23,36	0,58	4,02	2,11
			6,11	28,50	0,72	4,41	2,49
	1,50	0,00	6,22	29,01	0,01	1,53	0,48
		0,50	6,42	29,97	0,14	2,11	0,77
		1,00	6,38	29,78	0,40	3,26	1,92
		1,50	6,15	28,69	0,22	2,49	1,53
		2,00	6,18	28,82	0,25	2,49	1,53

EK-2. Literatürde sediment taşınımının HAD modeli oluşturularak incelendiği çalışmalar ve oluşturulan modelin yapısı ile ilgili genel bilgiler

Yazar (lar)	Çalışma başlığı	Sediment dane çapı (mm)	Sediment yoğunluğu (kg/m ³)	İçsel sürtünme açısı (°)	İlgili çalışmada kullanılan kritik Shields sayısı	Kritik Shields sayısı (Soulsby - Whitehouse denklemi sonucu değeri) ¹	Türbülans modeli	Maksimum doluluk oranı (max packing fraction)	Yatak pürüzlülük / d ₅₀ oranı	Karışma katsayısı (entrainment coefficient)	Yatak yükü taşınım katsayısı	Yatak yükü taşınım katsayısı
Kayser ve Gabr (2013)	Assessment of Scour on Bridge Foundations by Means of In Situ Erosion Evaluation Probe	0,33	1500	31	0,05	0,045	RNG k-ε	*	*	0,009 ve 0,036	4 ve 8	Meyer - Peter ve Muller (1948)
Wei, Brethour, Grünzner ve Burnham (2014)	The Sedimentation Scour Model in FLOW-3D	0,76	2650	32	0,05	0,030	*	0,64	2,5	0,018	8	Meyer - Peter ve Muller (1948)
Ghasemi ve Soltani-Gerdefaramarzi (2017)	The scour bridge simulation around a cylindrical pier using Flow-3D	0,72	2650	*	0,031	0,030	RNG k-ε	*	*	*	*	*
Baykal, Sumer, Fuhrman, Jacobsen ve Fredsøe (2017)	Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves	0,17	2650	32	0,05	0,053	k-ω	*	2,5	*	*	Engelund and Fredsøe (1976, 1982)
Pourshahbaz, Abbasi ve Taghvaei (2017)	Numerical scour modeling around parallel spur dikes in FLOW-3D	0,91	2650	*	0,033	0,031	RNG k-ε	*	5,014	0,036	0,053	Van Rijn (1984)
Castillo ve Carrillo (2017)	Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump	1020,00	*	36	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,055	RNG k-ε	0,7	1	*	7	0.048
Wang, Liang ve Yu (2017)	Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups	0,15	1990	*	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,065	Standart k-ε	*	2,5	0,018	*	*
Zhang, Zhou ve Wang (2017)	Numerical investigation of local scour around three adjacent piles with different arrangements under current	0,85	2650	32	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,030	RNG k-ε	*	*	0,018	8	Meyer - Peter ve Muller (1948)
İbrahim, Karim ve Günal (2018)	Simulation of local scour development downstream of broad crested weir with inclined apron	1,80	2650	45	0,05	0,038	RNG k-ε	0,64	*	0,018	8	Meyer - Peter ve Muller (1948)
Omara ve Tawfik (2018)	Numerical study of local scour around bridge piers	1,80	*	*	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,038	RNG k-ε	*	2,5	0,005	0,0053	Van Rijn (1984)
Man, Zhang, Hong, Zhou ve Feng (2019)	Assessment of Turbulence Models on Bridge-Pier Scour Using Flow-3D	0,385	2650	32	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,033	RNG k-ε LES	*	2	*	*	Meyer - Peter ve Muller (1948)
İkinciogulları (2019)	Serbest düşümlü savakların mansabında oluşan yerel oyulmanın sayısal analizi (Doktora Tezi)	2,00	*	*	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,040	Standart k-ε	*	0,80; 0,40 ve 0,05	0,005	3 ve 1	Meyer - Peter ve Muller (1948)
Ghaderi ve Abbasi (2019)	CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar	0,56	2600	*	*	0,030	RNG k-ε	*	*	*	*	*
Samma, Khosrojerdi, Rostam-Abadi, Mehraein ve Cataño-Lopera (2020)	Numerical simulation of scour and flow field over movable bed induced by a submerged wall jet	2,46	2650	*	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,043	RNG k-ε Standart k-ε k-ω	*	2,5	*	*	Meyer - Peter ve Muller (1948) Van Rijn (1984) Nielsen (1992)
Taha, El-Feky, El-Saiad ve Fathy (2020)	Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts	2,75	1600	*	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,040	RNG k-ε	*	*	0,05	*	Van Rijn (1984)
Jalal ve Hasan (2020)	Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software	0,385	2650	32	0,05	0,033	RNG k-ε	0,64	1	0,018	12	Meyer - Peter ve Muller (1948)
M. Nazari-Sharabian, Nazari-Sharabian, Karakouzian ve Karimi (2020)	Sacrificial piles as scour countermeasures in river bridges a numerical study using FLOW-3D	0,72	2650	45	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,030	RNG k-ε	0,64	*	0,018	8	Meyer - Peter ve Muller (1948)
Yu, Hu, Yang ve Liu (2020)	Numerical investigation of local scour around USAF with different hydraulic conditions under currents and waves	0,275	1903	*	Soulsby - Whitehouse (1997)	0,044	RNG k-ε	*	*	*	8	Meyer - Peter ve Muller (1948)
Tang ve Puspasari (2021)	Numerical simulation of local scour around three cylindrical piles in a tandem arrangement	0,85	1602	32	0,05	0,030	RNG k-ε	0,64	2,5	0,005	0,053	Van Rijn (1984)
Daneshfaraz, Ghaderi, Sattariyan, Alinejad, Asl ve Di Francesco (2021)	Investigation of Local Scouring around Hydrodynamic and Circular Pile Groups under the Influence of River Material Harvesting Pits	0,86	2650	32	0,03	0,030	LES	*	*	*	0,5	Van Rijn (1984)

* Yayın içerisinde ilgili değere ait bilgi mevcut değildir.

¹ Yayın içerisinde sediment yoğunluğu bilgisi verilmemiş ise Soulsby – Whitehouse denkleminde bu değer 2650 kg/m³ kabul edilerek hesaplanmıştır.

EK-3. Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 0,00$ su alma ağzı konumu için)

```

Title
This is a sample input file

&xput
  remark='!! Remarks beginning with "!! " are automatically added and
removed by FLOW-3D.',
  remark='!! Do not begin any user added remarks with with "!! ". They
will be removed',
  twfin=2500,
  itb=1,
  ifvisc=1,
  ifvis=4,
  imphtc=0,
  ifdynconv=1,
  trest=610,
  ifrho=1,
  gz=-9.81,
  ipdis=1,
  ivort=1,
  idpth=1,
  iorder=2,
  iscour=1,
  tedit(1)=0,
  tpltd(1)=10,
  thpltd(1)=10,
/

&limits
/

&props
  units='si',
  tunits='c',
  pcav=0,
  mul=0.001,
  cangle=-90,
  fluid1='Water at 20 C',
  muctst=0,
  cv1=4182,
  tl1=0,
  ts1=0,
  cvs1=2100,
  thcs1=2,
  rhofs=917,
  tsdrg=1,
  fscr=1,
  fsco=0,
  rhof=1000,
  yieldt1=0,
  mus=0,
  yield1=-1.0011215,
/

&scalar

```

EK-3. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 0,00$ su alma ağzı konumu için)

```

nsspc=1,

remark='!! Sediment 1',
ssname(1)='Coarse',
ssdia(1)=0.00125,
rhfss(1)=2650,
sscr(1)=0.05,
ssbdlf2(1)=12,
ssang(1)=35,
isscr=0,
isslp=1,
crough=3,
ibedload=1,
asqr=0,
pgasmp=0,
rmscr=1,
/

&PCAP
/

&BCDATA
    remark='!! Boundary condition X Min',
    ibct(1)=2,
    flrbct(1, 1)=0.006,
    ihpbct(1)=1,
    flhtbct(1, 1)=0.315,
    fnx(1)=-1,
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ibct(2)=5,
    flrbct(1, 2)=0.004,
    ihpbct(2)=1,
    flhtbct(1, 2)=0.315,
    fnx(2)=-1,
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Max',
    ibct(4)=2,
    ihtbct(4)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Min',
    ibct(5)=2,
    ihtbct(5)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Max',
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='Block 1',
    ntotal=1000,

```

EK-3. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 0,00$ su alma ağız konumu için)

```

size=0.0125,

px(1)=-0.048,
px(2)=0.5,

py(1)=-0.25,
py(2)=0.25,

pz(1)=-0.12,
pz(2)=0.4,
/

&obs
nobs=3,

remark='!! Component 1',
obsid(1)='kanal',

remark='!! Subcomponent 1',
iob(1)=1,
subcmpid(1)='engel',
ifSubcompEnabled(1)=1,
xl(1)=-0.048,
xh(1)=0,
yl(1)=-0.25,
yh(1)=0.25,
zl(1)=-0.2286,
zh(1)=0.4,

remark='!! Subcomponent 2',
iob(2)=1,
subcmpid(2)='orfs',
ifSubcompEnabled(2)=0,
rah(2)=0.0361,
zl(2)=0,
zh(2)=0.0261,
roty(2)=90,
trnz(2)=0.0261,

remark='!! Subcomponent 3',
iob(3)=1,
subcmpid(3)='delik',
ioh(3)=0,
ifSubcompEnabled(3)=0,
rah(3)=0.0261,
zl(3)=-0.12,
zh(3)=0.0261,
roty(3)=90,
trnz(3)=0.0261,

remark='!! Subcomponent 4',
iob(4)=1,
subcmpid(4)='dalga_onleyici',
ifSubcompEnabled(4)=0,
xl(4)=0.35,
xh(4)=0.5,

```

EK-3. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 0,00$ su alma ağzı konumu için)

```

yl(4)=-0.25,
yh(4)=0.25,
zl(4)=0.3,
zh(4)=0.36,

remark='!! Component 1 properties',
ilthobs(1)=0,

remark='!! Component 2',

ifob(2)=3,
obsid(2)='sand',

remark='!! Subcomponent 5',
iob(5)=2,
subcmpid(5)='sediment bed',
svfsub(5, 1)=100,
xl(5)=-0.048,
xh(5)=1,
yl(5)=-0.25,
yh(5)=0.25,
zl(5)=-0.2286,
zh(5)=0,

remark='!! Component 2 properties',
ilthobs(2)=0,

remark='!! Component 3',
ifob(3)=10,
obsid(3)='wave_reducer',

remark='!! Subcomponent 6',
iob(6)=3,
subcmpid(6)='sponge',
xl(6)=0.35,
xh(6)=0.5,
yl(6)=-0.25,
yh(6)=0.25,
zl(6)=0.28,
zh(6)=0.35,

remark='!! Component 3 properties',
ilthobs(3)=0,
ifvspng(3)=0,
xspng(3)=0.5,
xdspng(3)=-1,
yvspng(3)=0,
zdspng(3)=0,

remark='!! Component common parameters',
avrck=-3.1,
/

&f1
nfls=1,

```

EK-3. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 0,00$ su alma ağzı konumu için)

```

    remark='!! FluidRegion 1',
    fzh(1)=0.315,
    if_flreg_enabled(1)=1,

    remark='!! Region Pointer common parameters',
    iflinittyp=1,
/

&bf
/

&motn
/

&grafic

    anmtyp(1)='dpth',
    anmtyp(2)='vel',
    anmtyp(3)='vort',
/

&RENDERSPACE
    iff3d(1)=1,
    iff3d(2)=1,
    iff3d(3)=1,
/

&HEADER
    project='DSET1_6L_RNG_3.0shields0.05_MPM8_2deg_1.25_spng_MMS',
    version='double',
    nprocs=0,
/

&parts
    remark='!! MassMomentumSource 1',
    iaqsrp(1)=1,
    nvtyp(1)=3,
    xsize(1)=0.0522,
    xv(1)=0,
    zv(1)=0.0261,
    vny(1)=90,
    ivqsrp(1)=1,
    tvfr(1, 1)=-0.006,
    nvnts=1,
/

    Documentation: general comments, background, expectations, etc.

```

EK-4. Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 1,00$ su alma ağız konumu için)

```

Title
This is a sample input file

&xput
  remark='!! Remarks beginning with "!! " are automatically added and
removed by FLOW-3D.',
  remark='!! Do not begin any user added remarks with with "!! ". They
will be removed',
  twfin=1500,
  itb=1,
  ifvisc=1,
  ifvis=4,
  imphtc=0,
  ifdynconv=1,
  trest=610,
  ifrho=1,
  gz=-9.81,
  ipdis=1,
  ivort=1,
  idpth=1,
  iorder=2,
  iscour=1,
  tedit(1)=0,
  tpltd(1)=10,
  thpltd(1)=10,
/

&limits
/

&props
  units='si',
  tunits='c',
  pcav=0,
  mul=0.001,
  cangle=-90,
  fluid1='Water at 20 C',
  muctst=0,
  cv1=4182,
  t11=0,
  ts1=0,
  cvs1=2100,
  thcs1=2,
  rhofs=917,
  tsdrg=1,
  fscr=1,
  fsco=0,
  rhof=1000,
  yieldt1=0,
  mus=0,
  yield1=-1.0011215,
/

&scalar
  nsspc=1,

  remark='!! Sediment 1',

```

EK-4. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 1,00$ su alma ağzı konumu için)

```

ssname(1)='Coarse',
ssdia(1)=0.00125,
rhfss(1)=2650,
sscr(1)=0.05,
ssbdlf2(1)=12,
ssang(1)=35,
isscr=0,
issslp=1,
crough=3,
ibedload=1,
asqr=0,
pgasmp=0,
rmscr=1,
/

&PCAP
/

&BCDATA
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ibct(1)=2,
  ihtbct(1)=0,

  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=5,
  ihpbct(2)=1,
  flhtbct(1, 2)=0.315,
  ihtbct(2)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=2,
  ihtbct(3)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=2,
  ihtbct(4)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ihtbct(5)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Max',
  ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  ntotal=1000,
  size=0.0125,

  px(1)=0,
  px(2)=0.5,

  py(1)=-0.25,
  py(2)=0.25,

  pz(1)=-0.12,
  pz(2)=0.4,
/
```

EK-4. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 1,00$ su alma ağzı konumu için)

```
&obs
  nobs=3,

  remark='!! Component 1',
  obsid(1)='kanal',

  remark='!! Subcomponent 1',
  iob(1)=1,
  subcmpid(1)='engel',
  ifSubcompEnabled(1)=0,
  xl(1)=-0.12,
  xh(1)=0,
  yl(1)=-0.25,
  yh(1)=0.25,
  zl(1)=-0.2286,
  zh(1)=0.4,

  remark='!! Subcomponent 2',
  iob(2)=1,
  subcmpid(2)='orfs',
  rah(2)=0.0361,
  zl(2)=0,
  zh(2)=0.0522,
  roty(2)=90,
  trnz(2)=0.0261,

  remark='!! Subcomponent 3',
  iob(3)=1,
  subcmpid(3)='delik',
  ioh(3)=0,
  ifSubcompEnabled(3)=0,
  rah(3)=0.0261,
  zl(3)=-0.12,
  zh(3)=0.0522,
  roty(3)=90,
  trnz(3)=0.0261,

  remark='!! Subcomponent 4',
  iob(4)=1,
  subcmpid(4)='dalga_onleyici',
  ifSubcompEnabled(4)=0,
  xl(4)=0.35,
  xh(4)=0.5,
  yl(4)=-0.25,
  yh(4)=0.25,
  zl(4)=0.3,
  zh(4)=0.36,

  remark='!! Component 1 properties',
  ilthobs(1)=0,

  remark='!! Component 2',
  ifob(2)=3,
  obsid(2)='sand',

  remark='!! Subcomponent 5',
```

EK-4. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 1,00$ su alma ağzı konumu için)

```

iob(5)=2,
subcmpid(5)='sediment bed',
svfsub(5, 1)=100,
xl(5)=0,
xh(5)=0.5,
yl(5)=-0.25,
yh(5)=0.25,
zl(5)=-0.2286,
zh(5)=0,

remark='!! Component 2 properties',
ilthobs(2)=0,

remark='!! Component 3',
ifob(3)=10,
obsid(3)='wave_reducer',

remark='!! Subcomponent 6',
iob(6)=3,
subcmpid(6)='sponge',
xl(6)=0.35,
xh(6)=0.5,
yl(6)=-0.25,
yh(6)=0.25,
zl(6)=0.28,
zh(6)=0.35,

remark='!! Component 3 properties',
ilthobs(3)=0,
ifvspng(3)=0,
xspng(3)=0.5,
xdspng(3)=-1,
ydspng(3)=0,
zdspng(3)=0,

remark='!! Component common parameters',
avrck=-3.1,
/

&fl
  nfls=1,

  remark='!! FluidRegion 1',
  fzh(1)=0.315,

  remark='!! Region Pointer common parameters',
  iflinittyp=1,
/

&bf
/

&motn
/

&grafic
  anmtyp(1)='dpth',

```

EK-4. (devam) Flow 3D kullanılarak oluşturulan örnek HAD modeli .prepin dosyası ($c/D = 0,50$, $l/D = 1,00$ su alma ağzı konumu için)

```

    anmtyp(2)='vel',
    anmtyp(3)='vort',
/

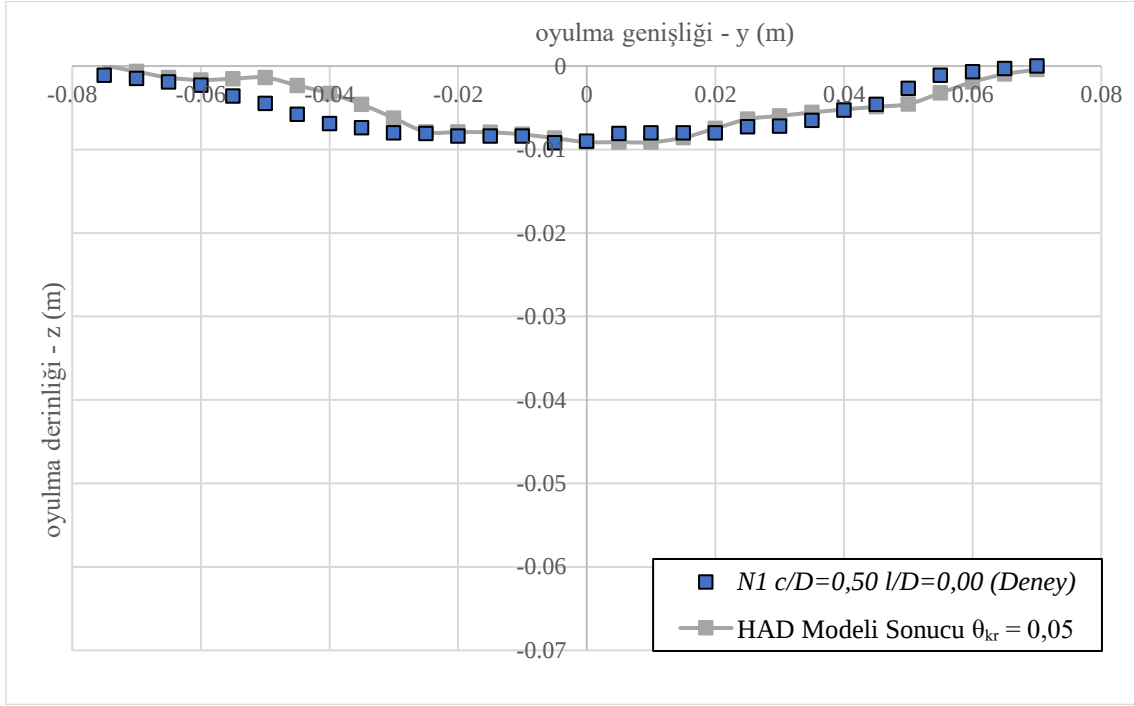
&RENDERSPACE
    iff3d(1)=1,
    iff3d(2)=1,
    iff3d(3)=1,
/

&HEADER
    project='DSET4_6L_RNG_3.0shields0.05_MPM8_2deg_1.25_spng_MMS',
    version='double',
    nprocs=0,
/

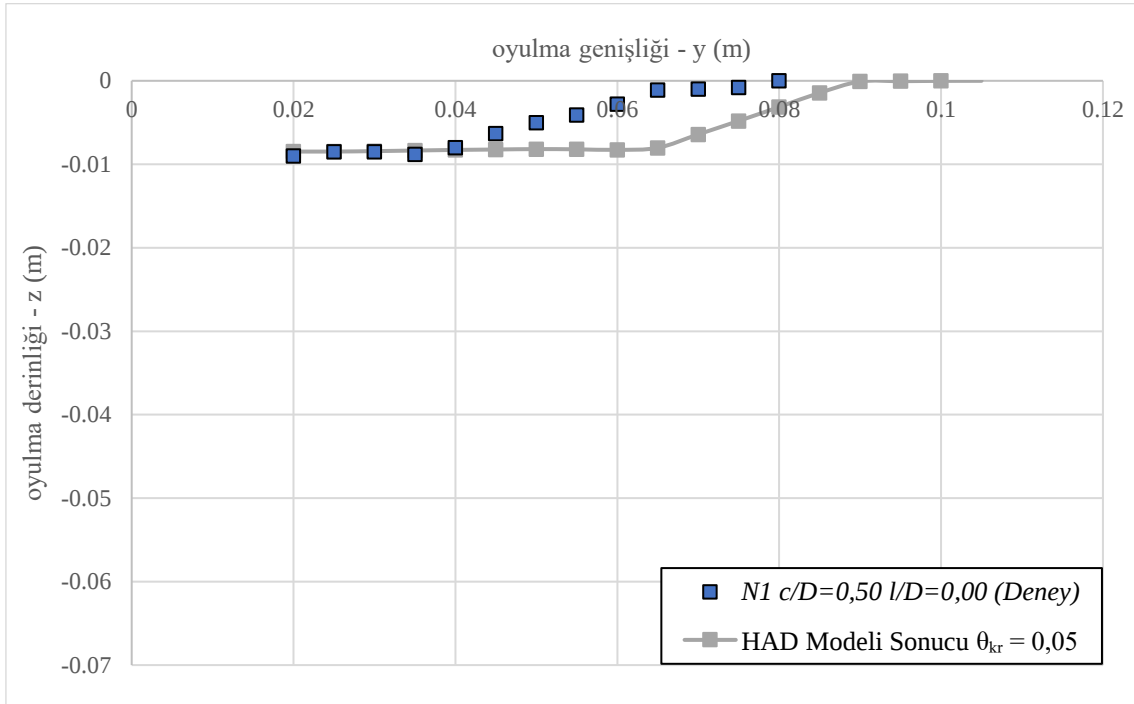
&parts
    remark='!! MassMomentumSource 1',
    iaqsrp(1)=1,
    nvtyp(1)=3,
    xsize(1)=0.0522,
    xv(1)=0.0522,
    zv(1)=0.0261,
    vny(1)=90,
    ivqsrp(1)=1,
    tvfr(1, 1)=-0.006,
    nvnts=1,
/
    Documentation: general comments, background, expectations, etc.

```

EK-5. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



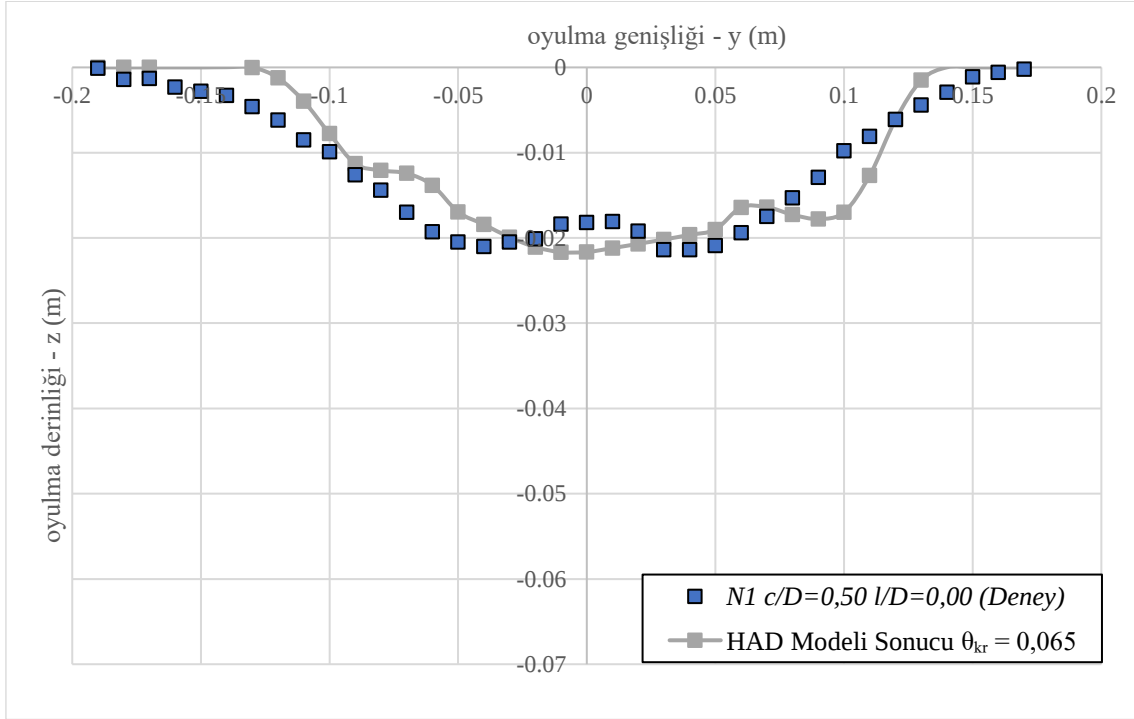
(a)



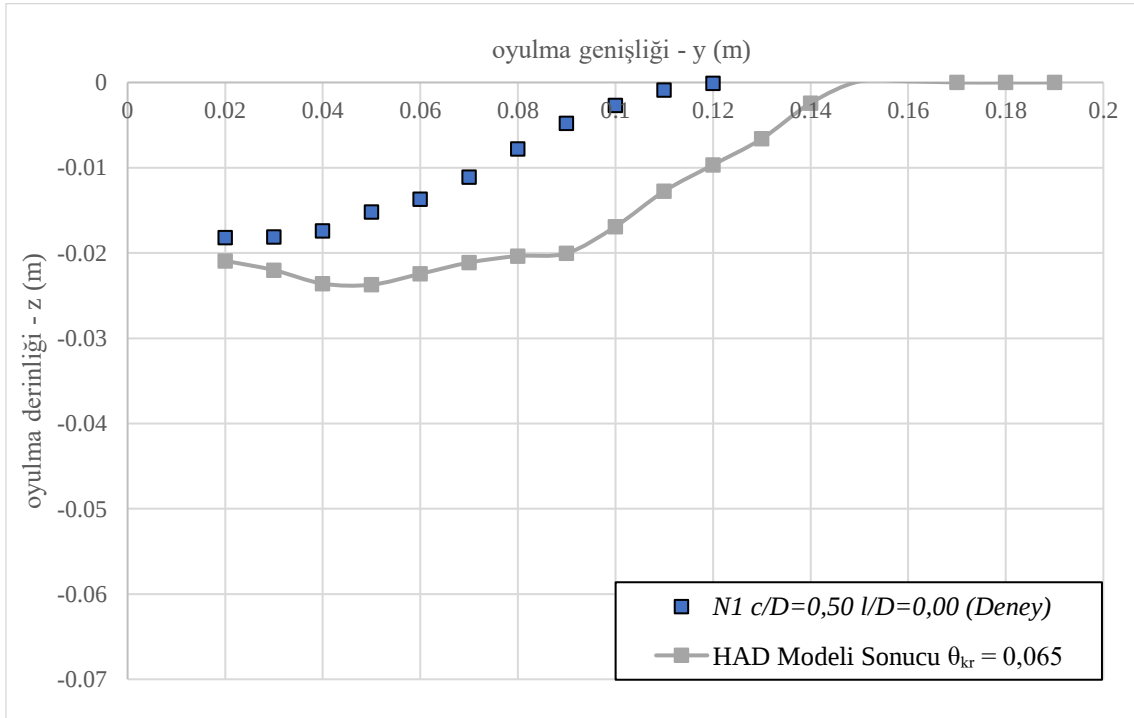
(b)

Şekil 5.1. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0.00$; $F_d = 7$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



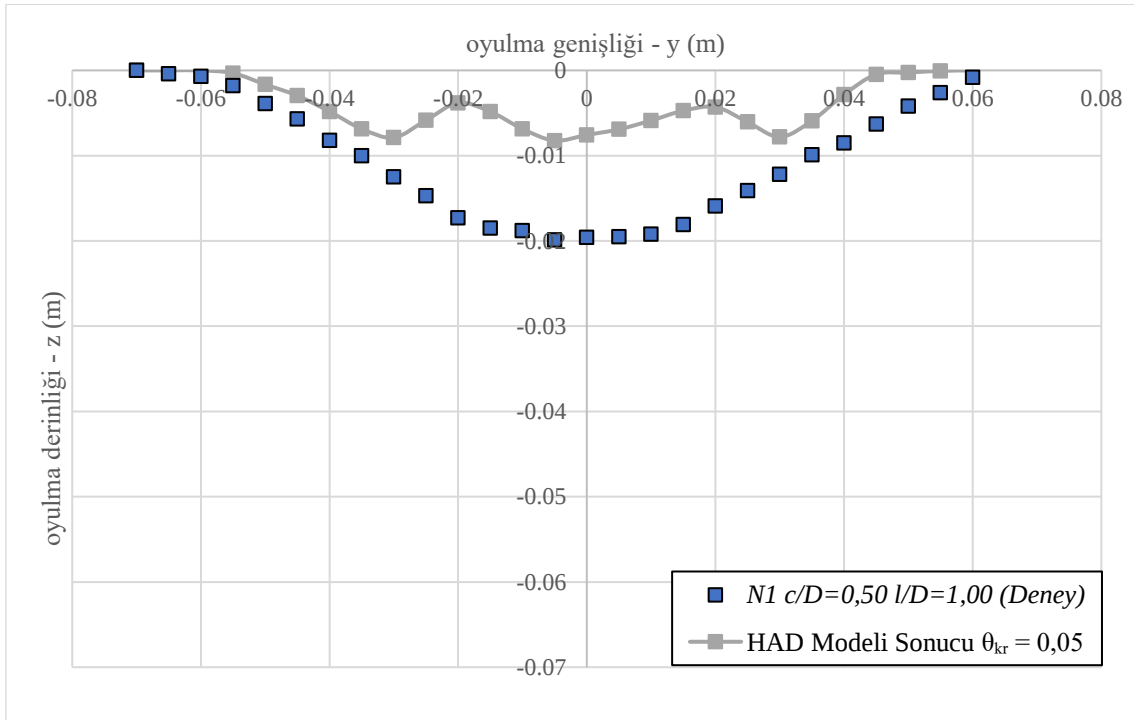
(a)



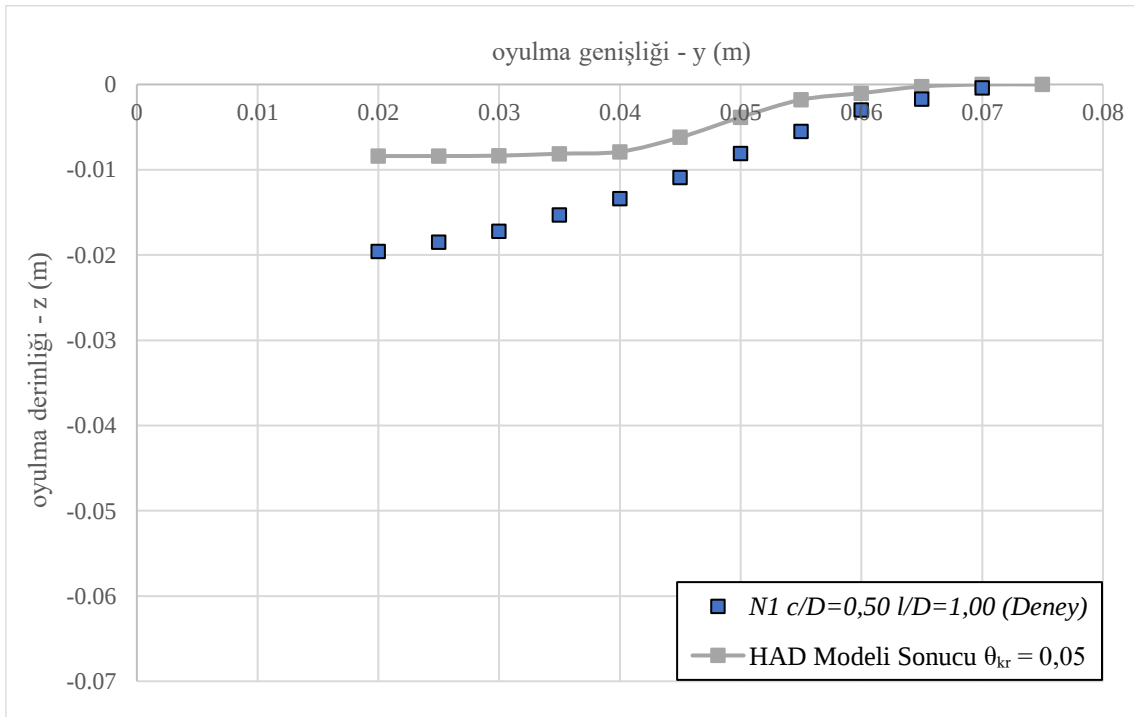
(b)

Şekil 5.2. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 0,00$; $F_d = 14$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



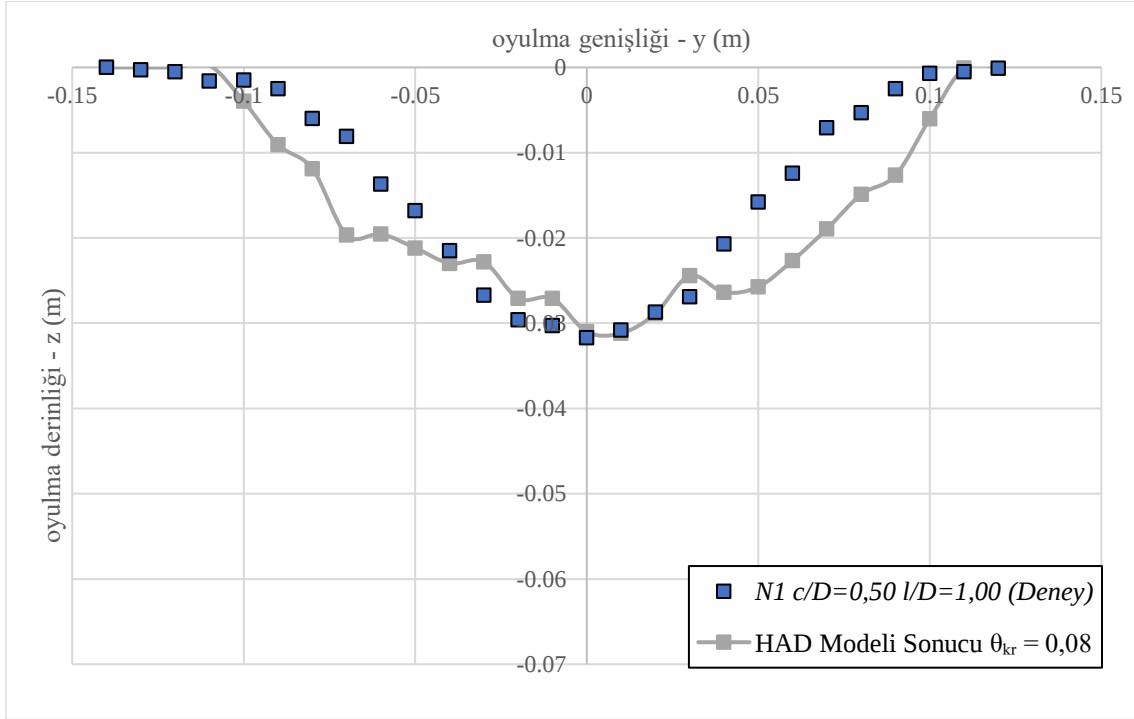
(a)



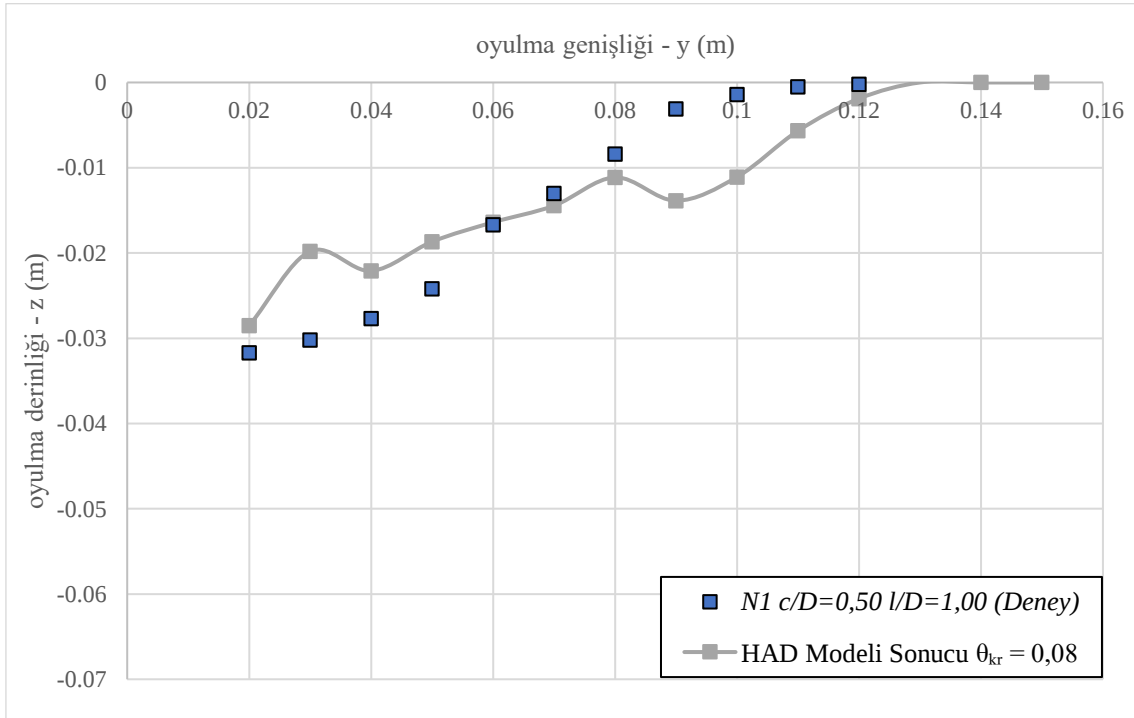
(b)

Şekil 5.3. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1.00$; $F_d = 7$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



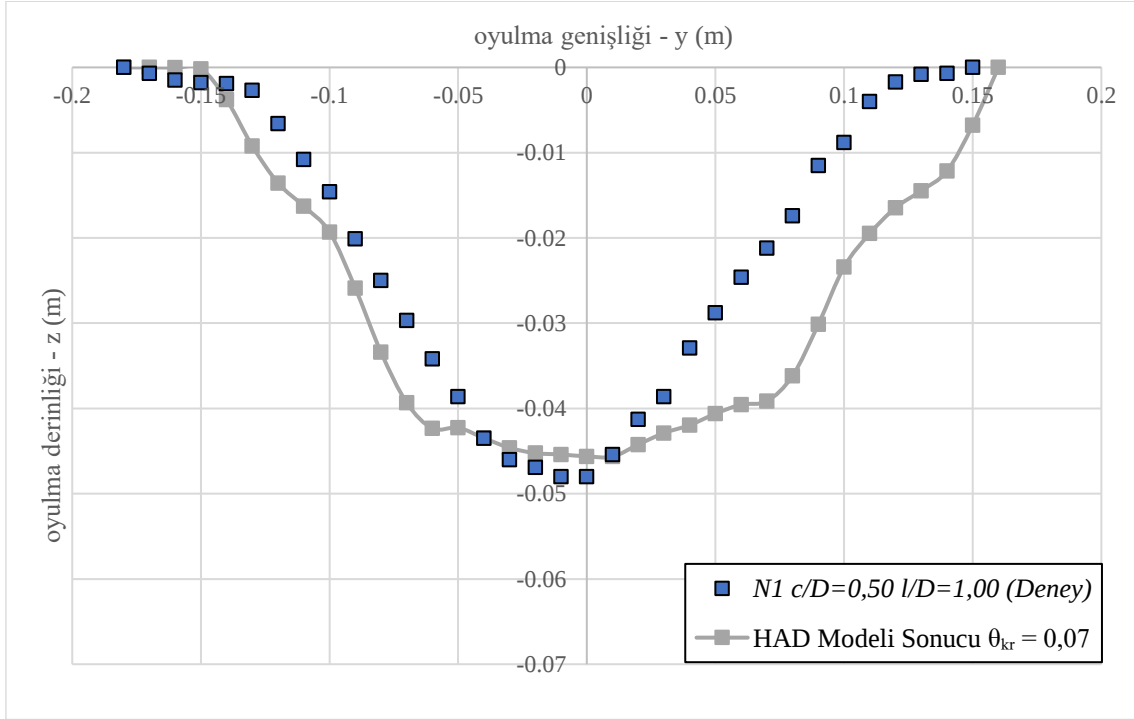
(a)



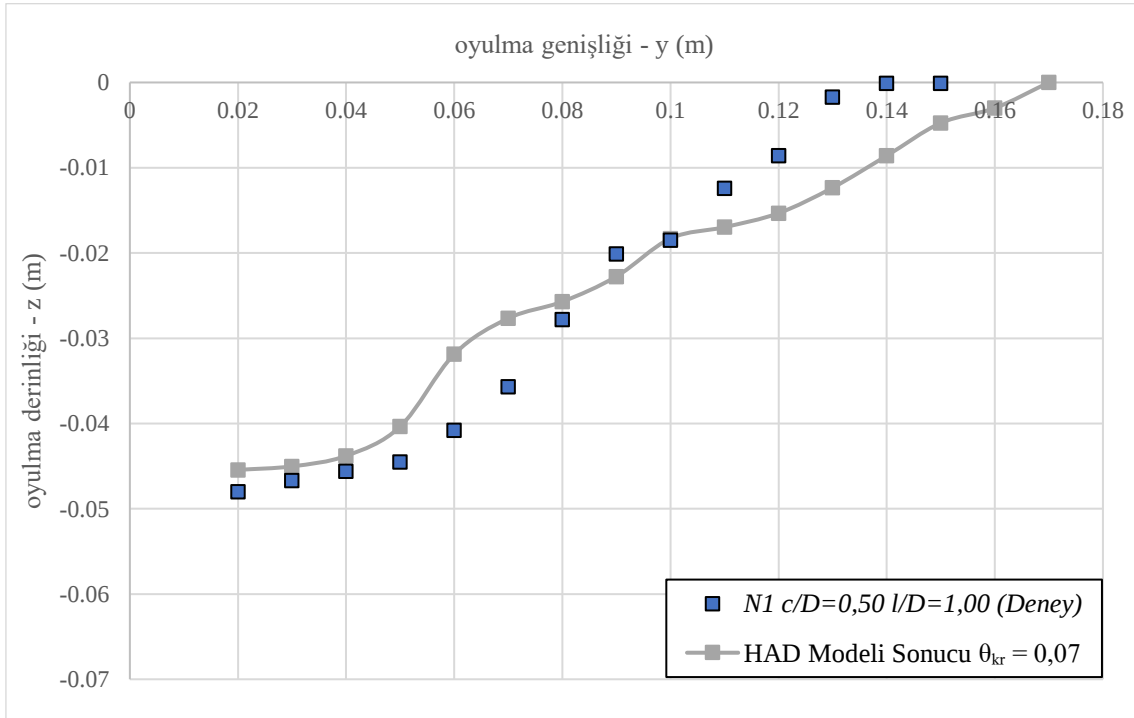
(b)

Şekil 5.4. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1.00$; $F_d = 14$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



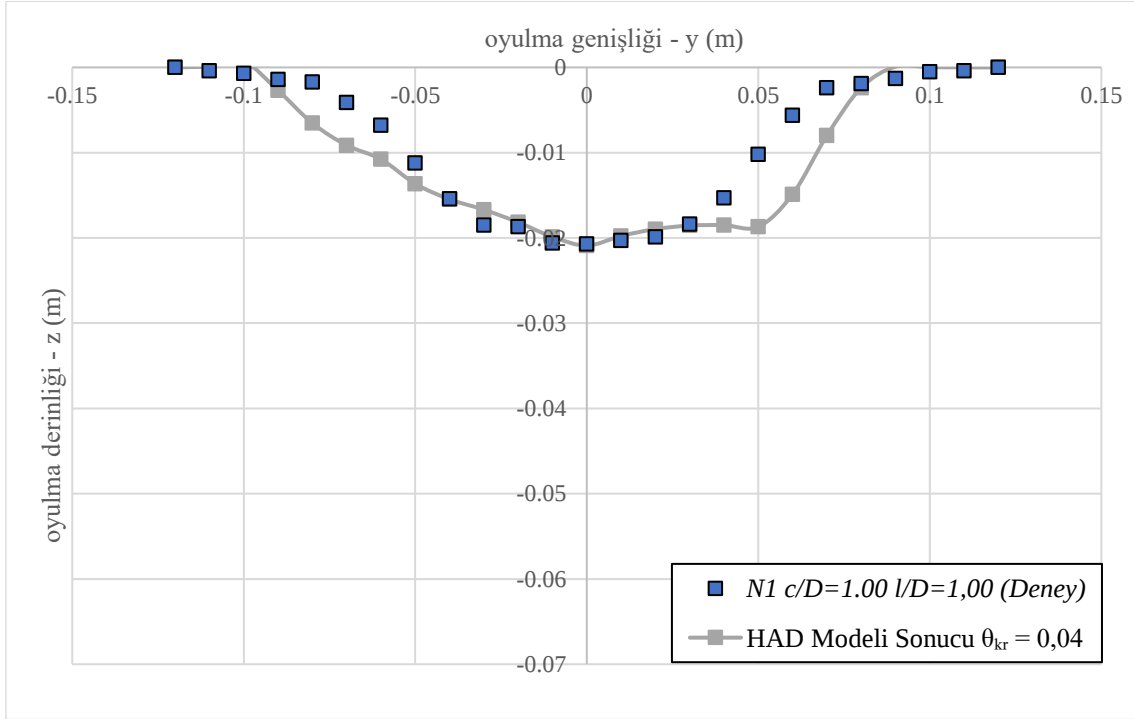
(a)



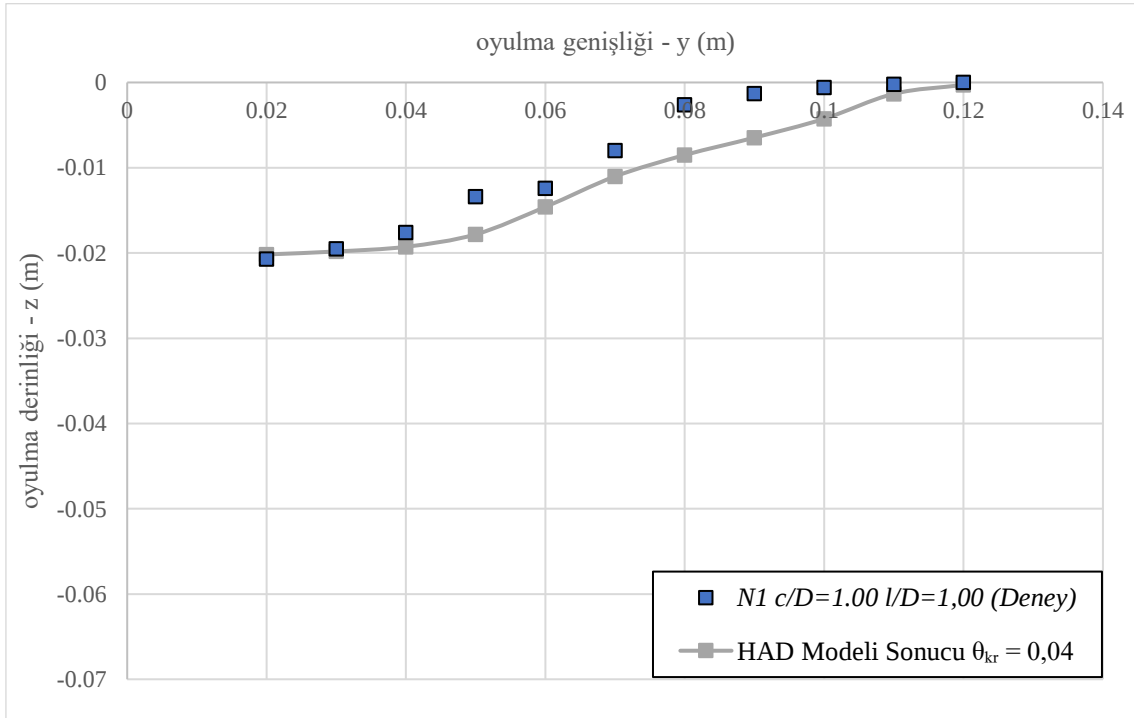
(b)

Şekil 5.5. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1.00$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



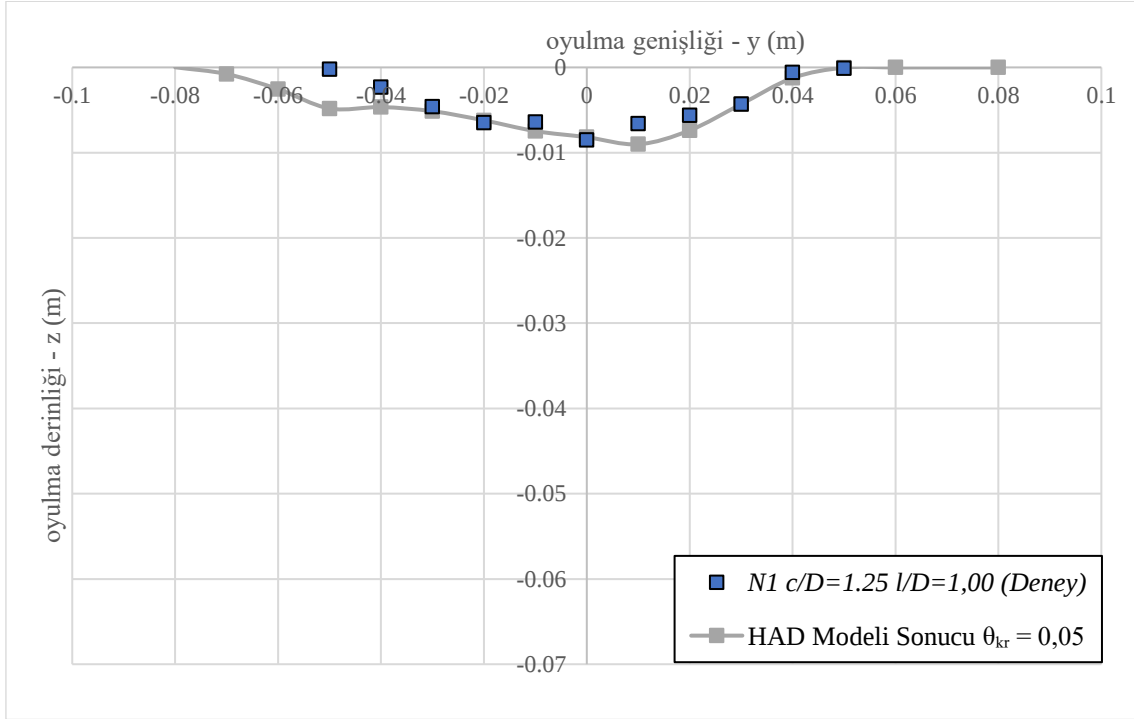
(a)



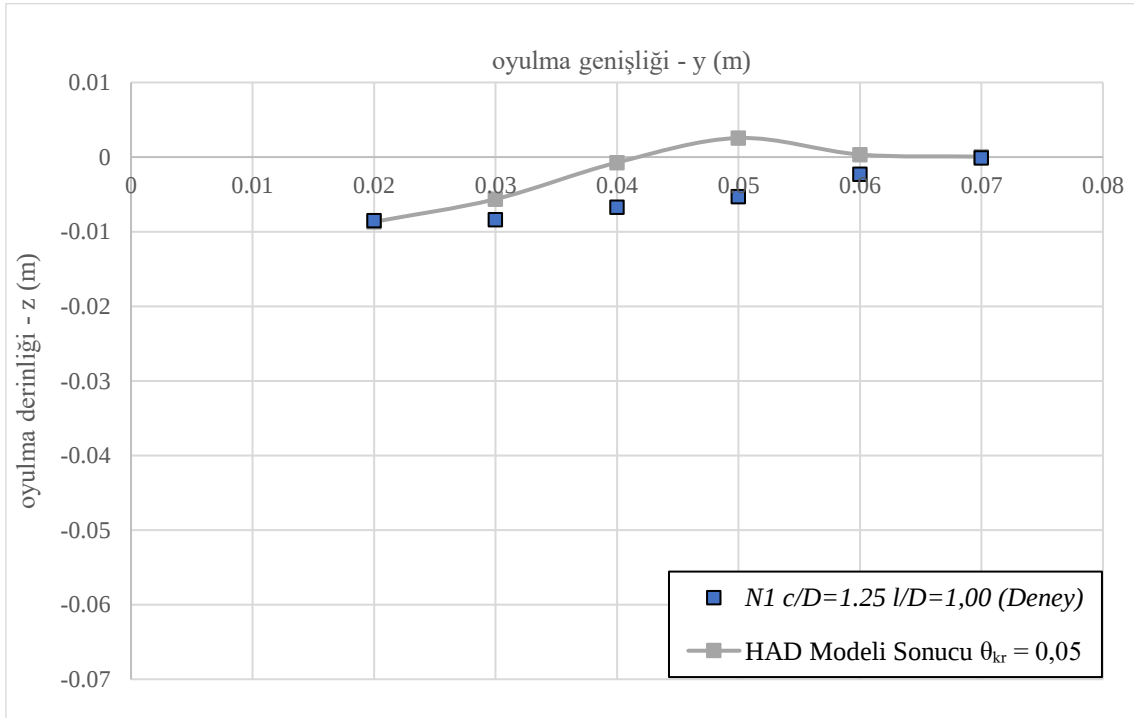
(b)

Şekil 5.6. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,00$; $l/D = 1,00$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



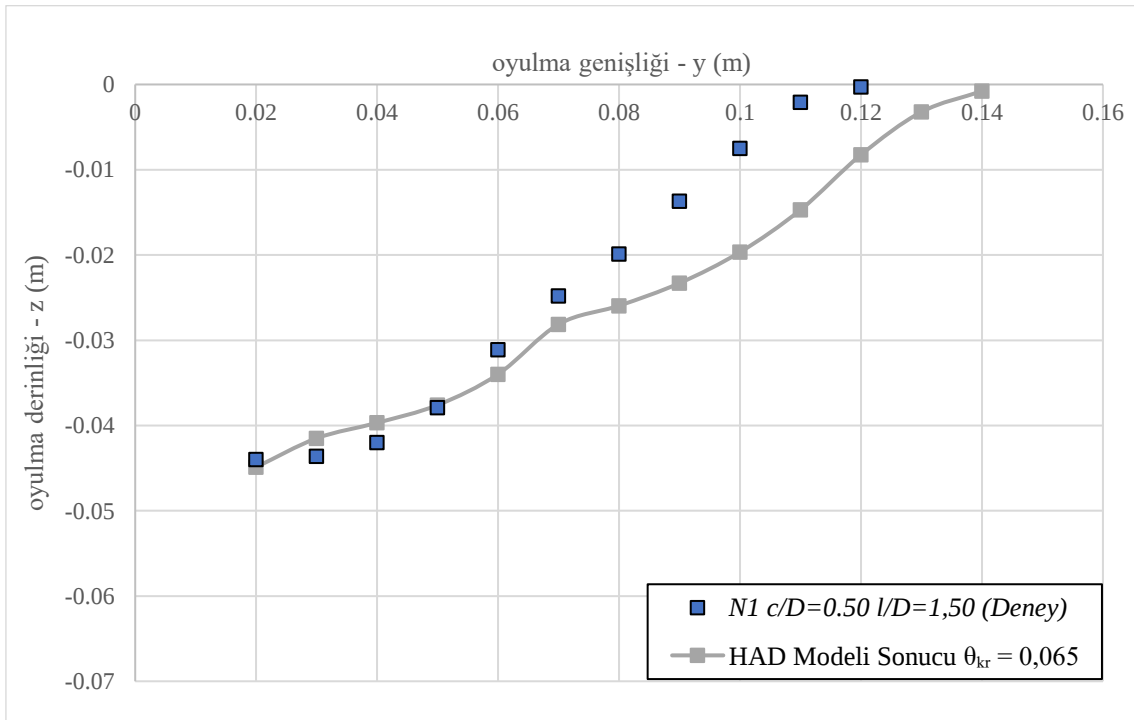
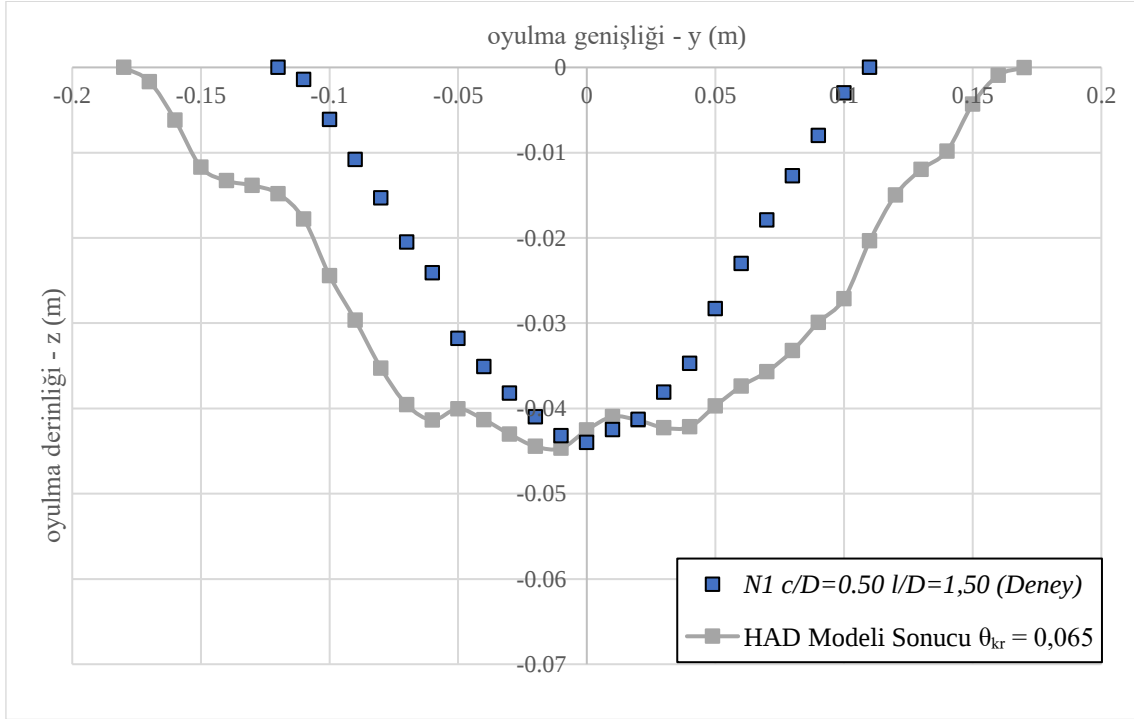
(a)



(b)

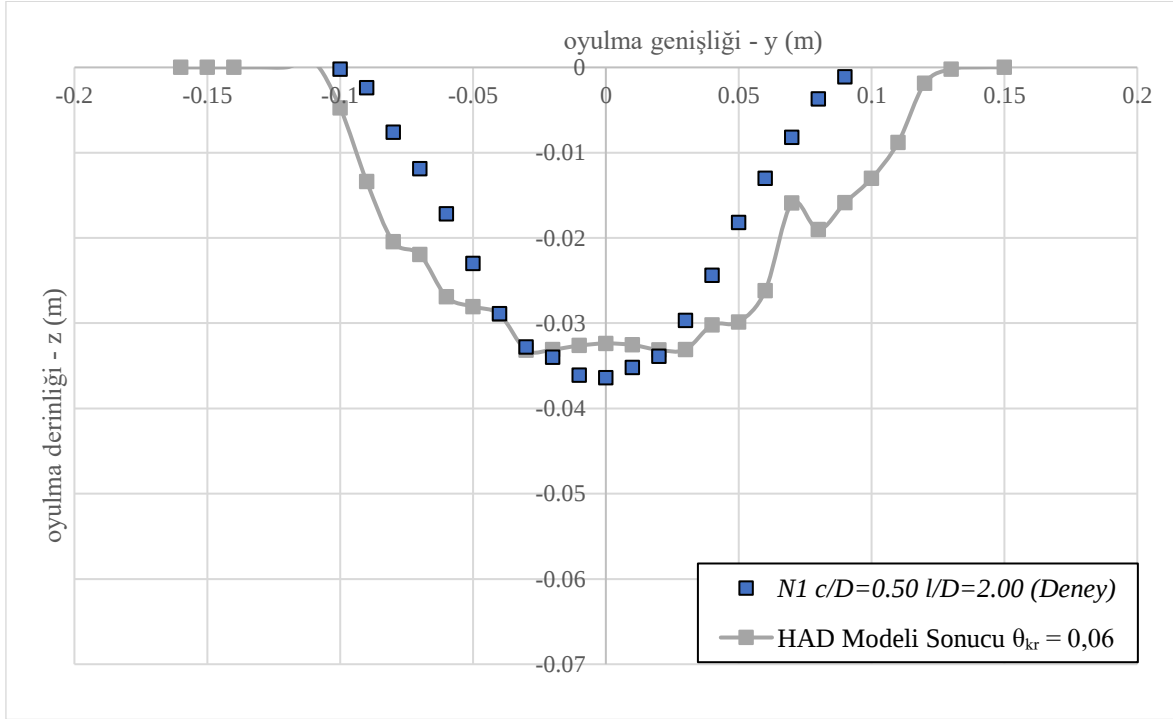
Şekil 5.7. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,25$; $l/D = 1,00$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

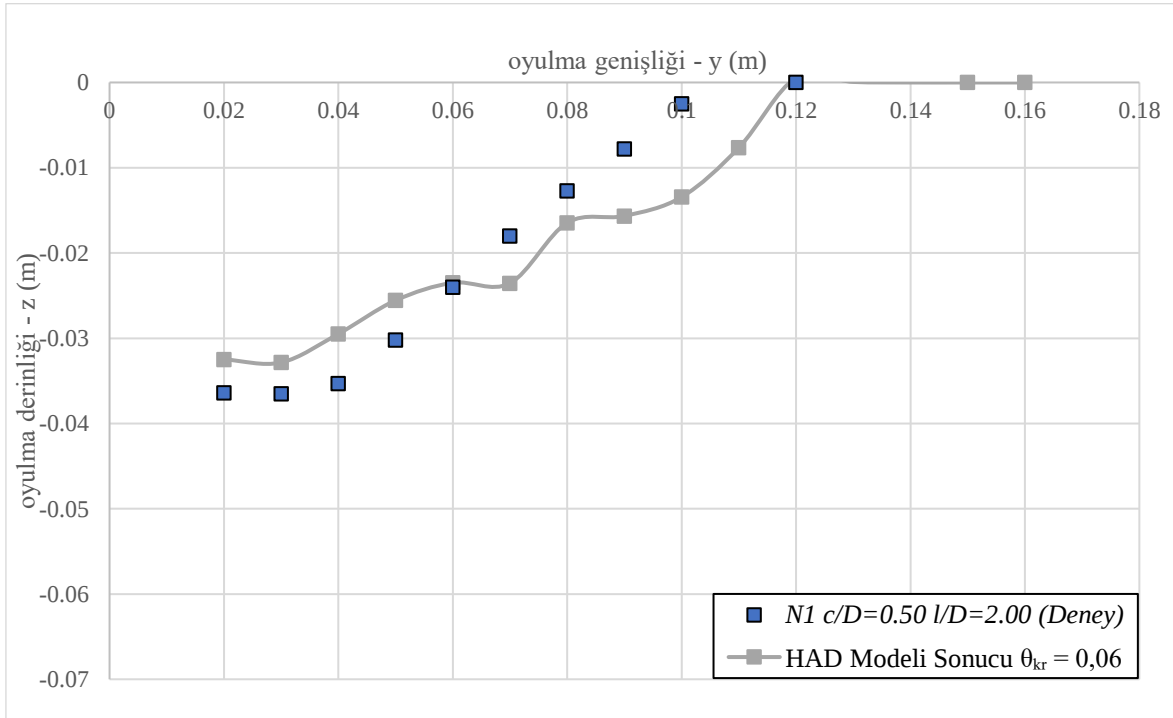


Şekil 5.8. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 1,50$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



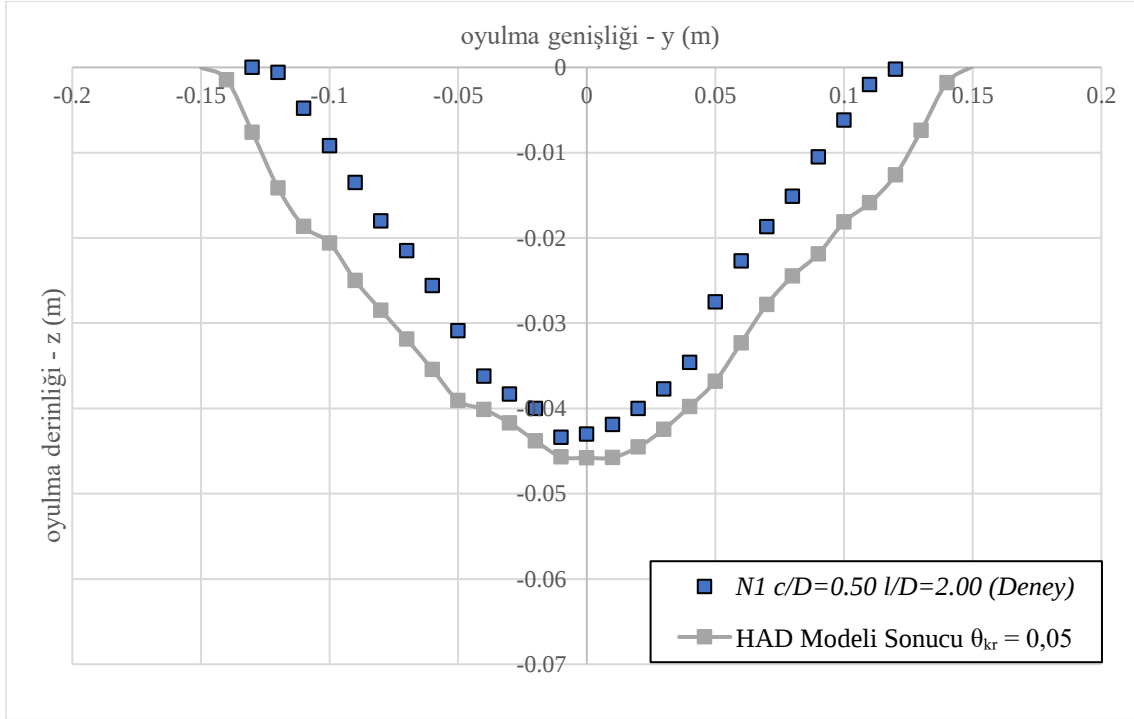
(a)



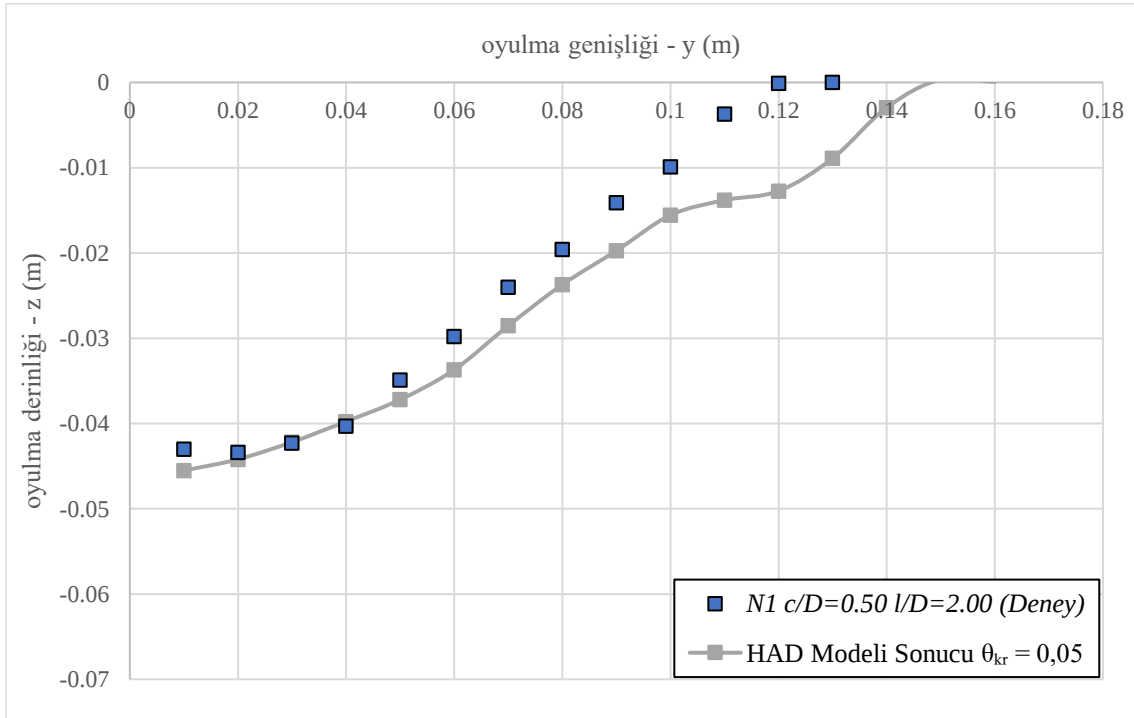
(b)

Şekil 5.9. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağızı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$; $F_d = 14$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



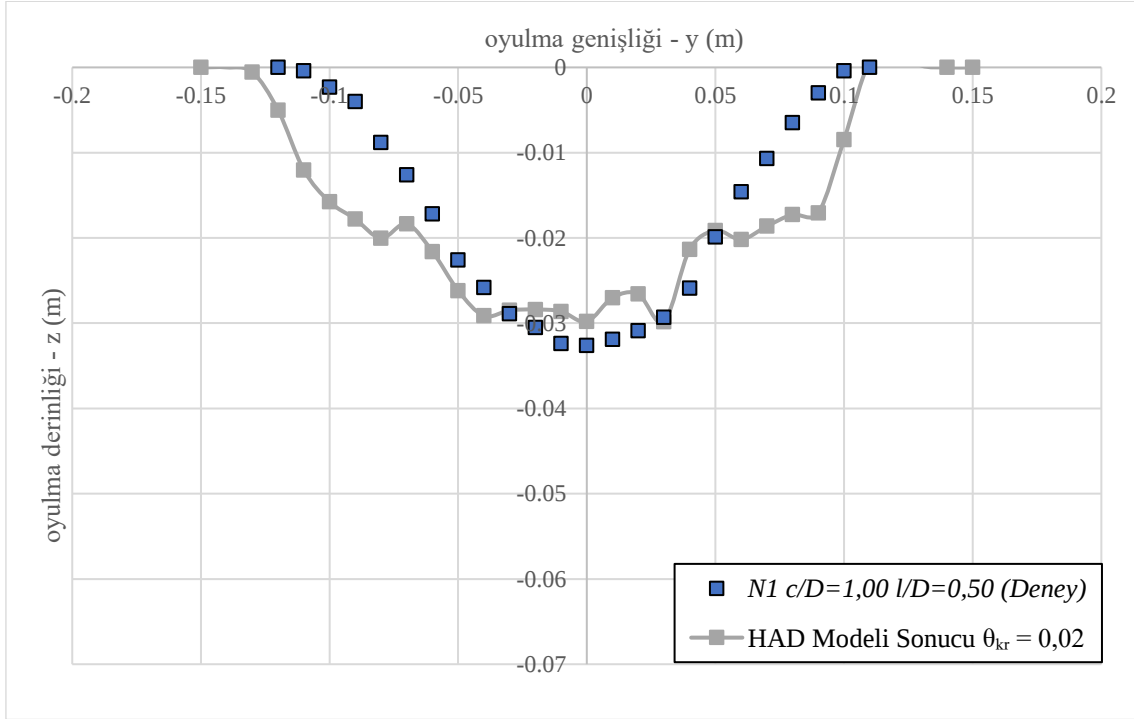
(a)



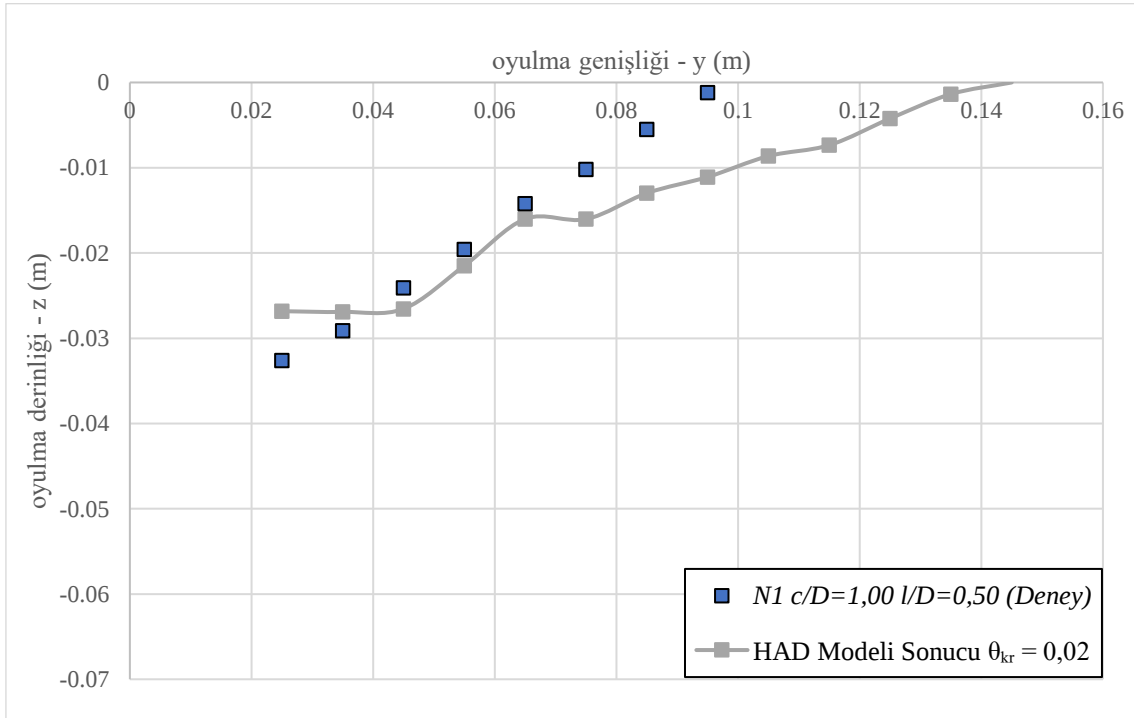
(b)

Şekil 5.10. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



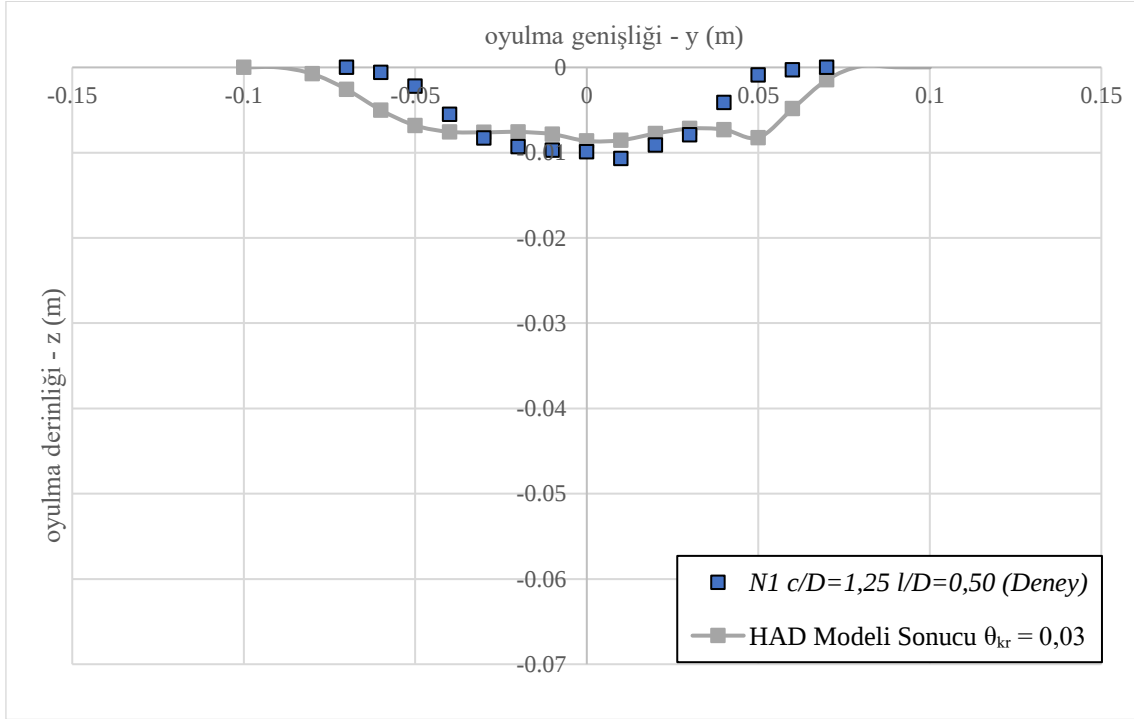
(a)



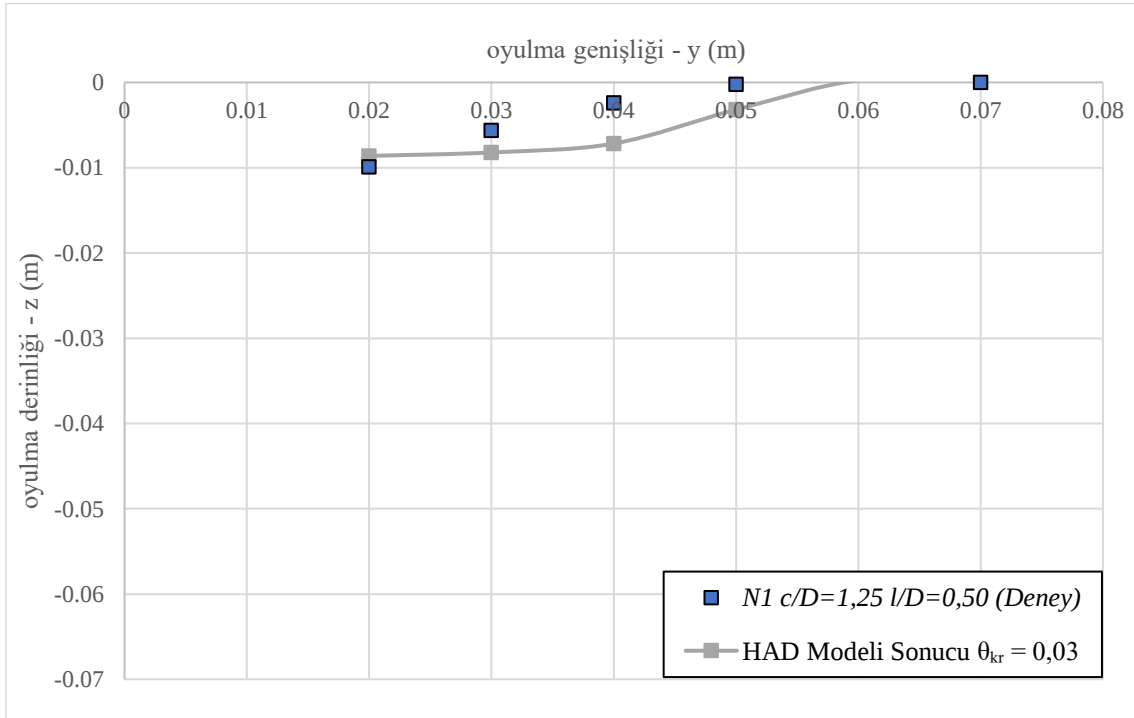
(b)

Şekil 5.11. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,00$; $l/D = 0,50$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



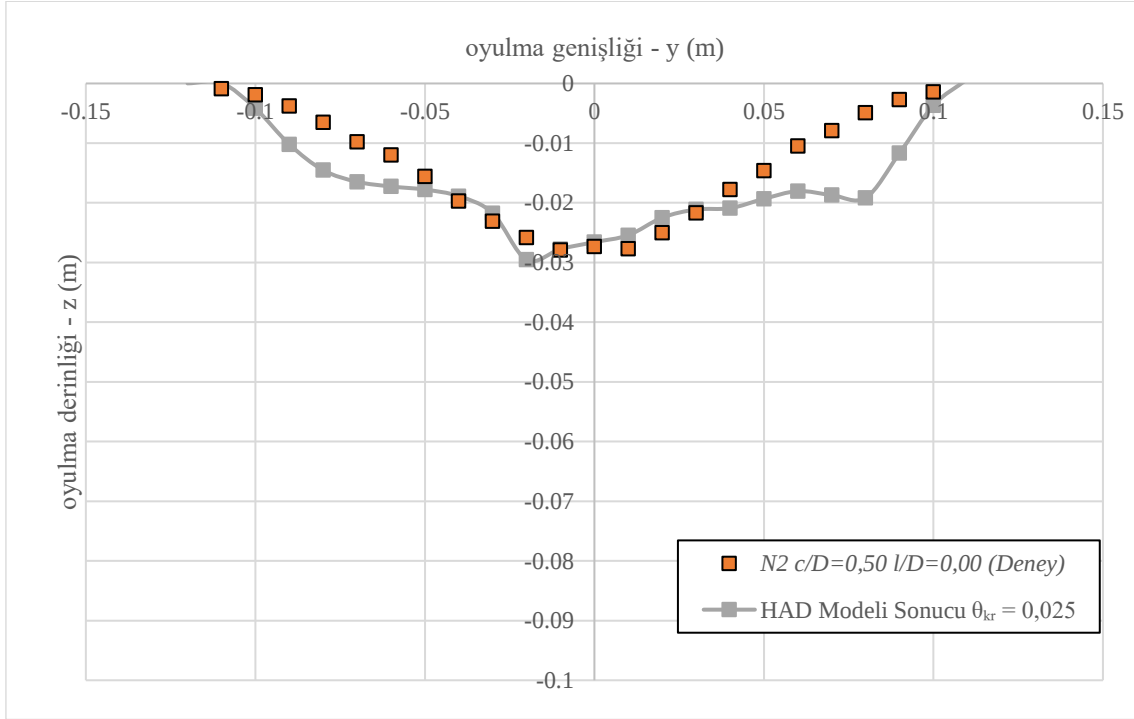
(a)



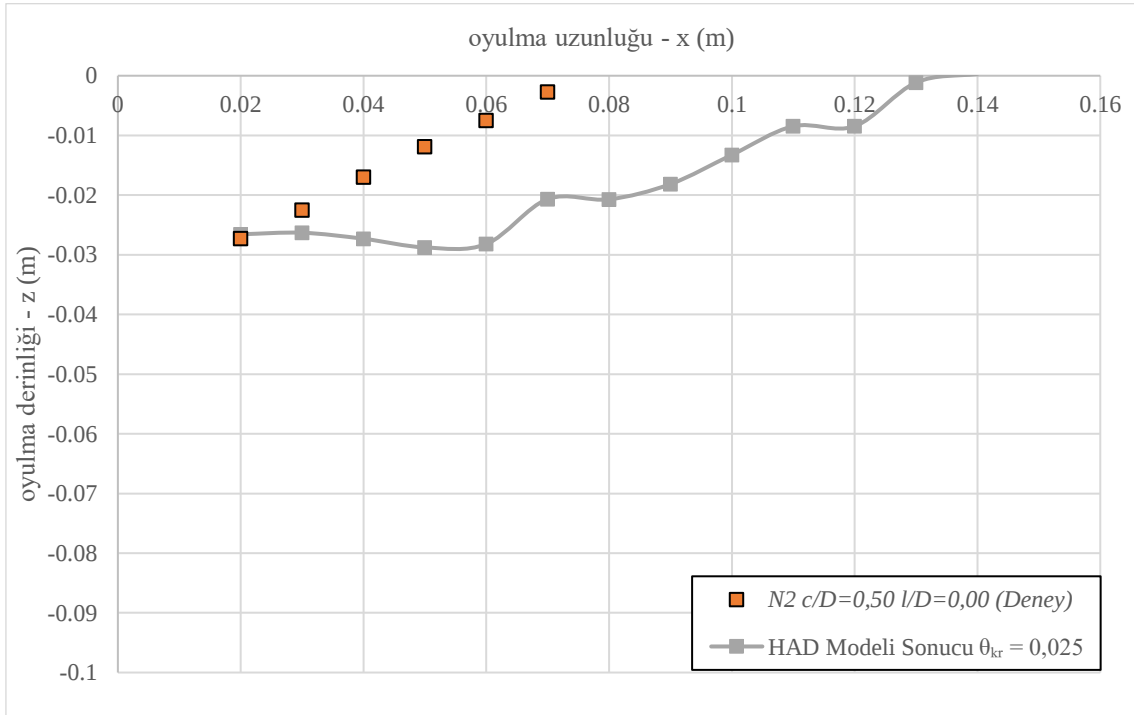
(b)

Şekil 5.12. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,25$; $l/D = 0,50$; $F_d = 19$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



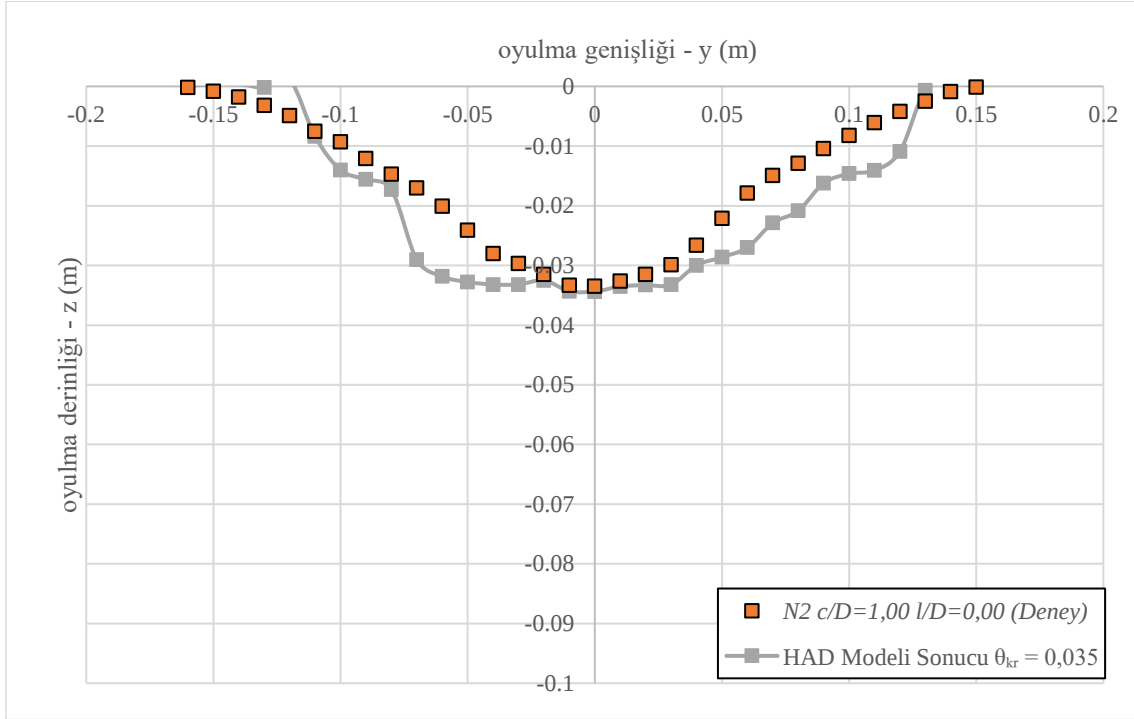
(a)



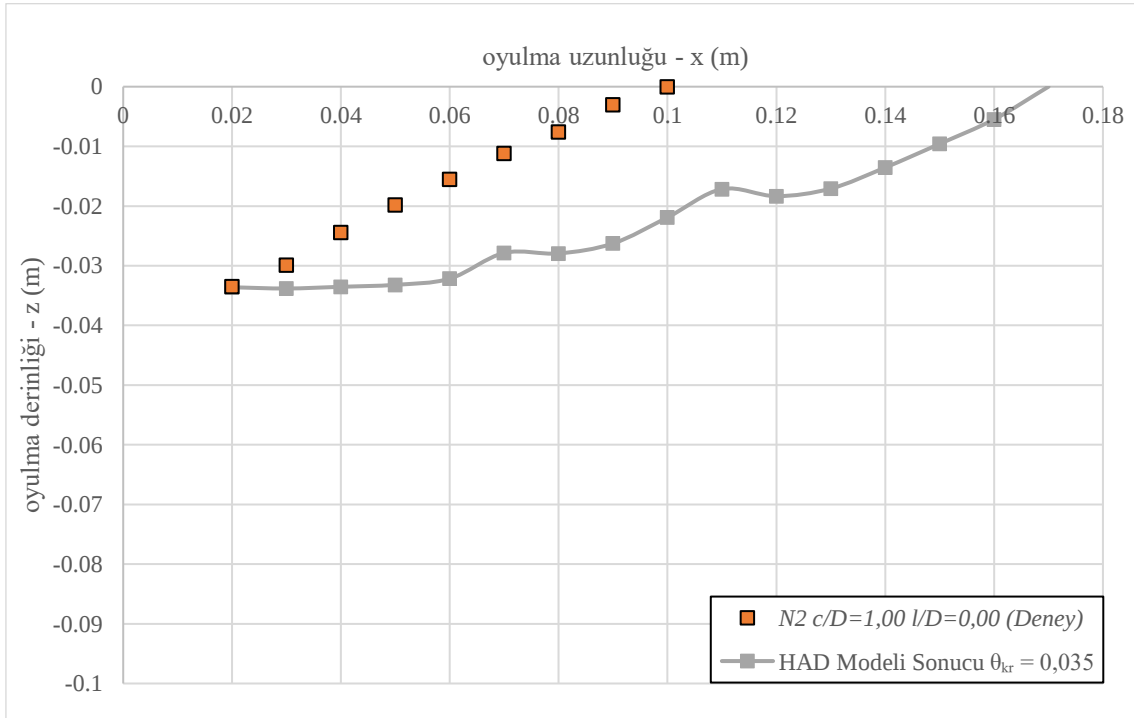
(b)

Şekil 5.13. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,00$; $F_d = 14$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



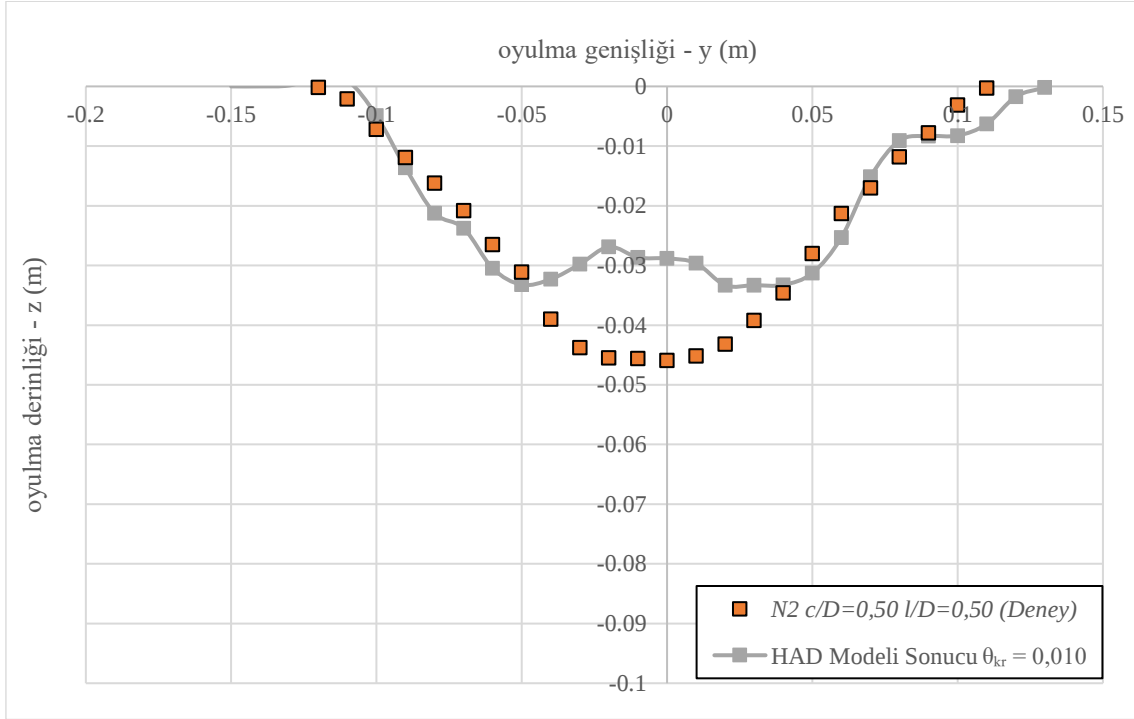
(a)



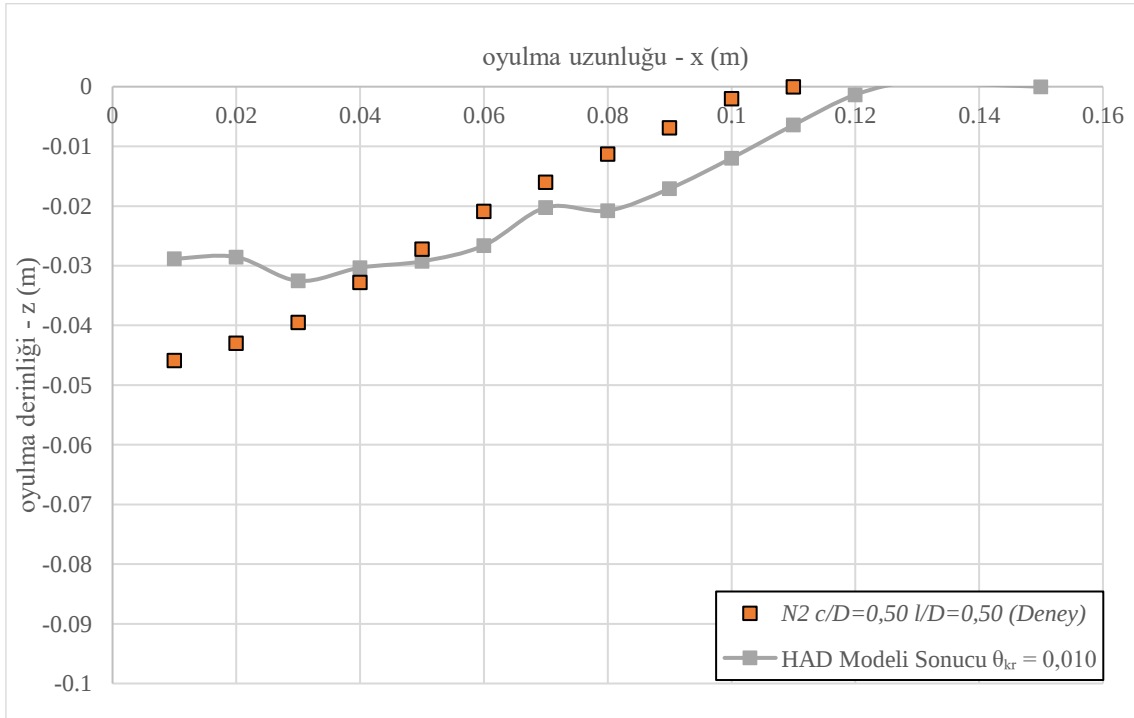
(b)

Şekil 5.14. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,00$; $l/D = 0,00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



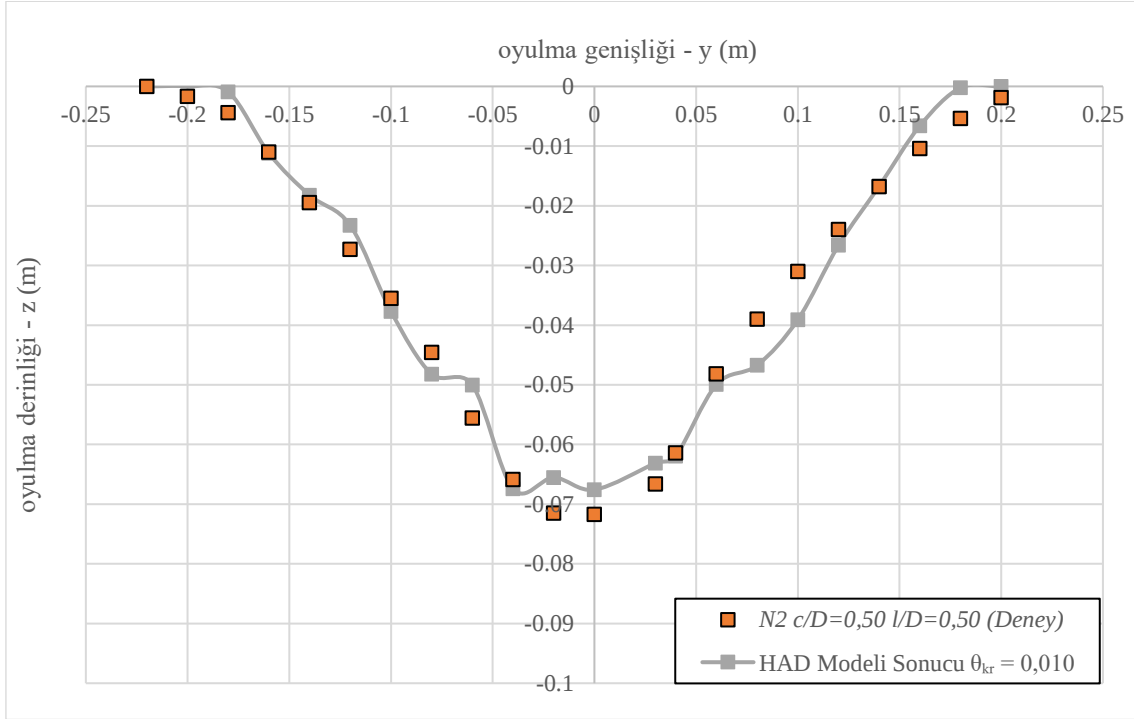
(a)



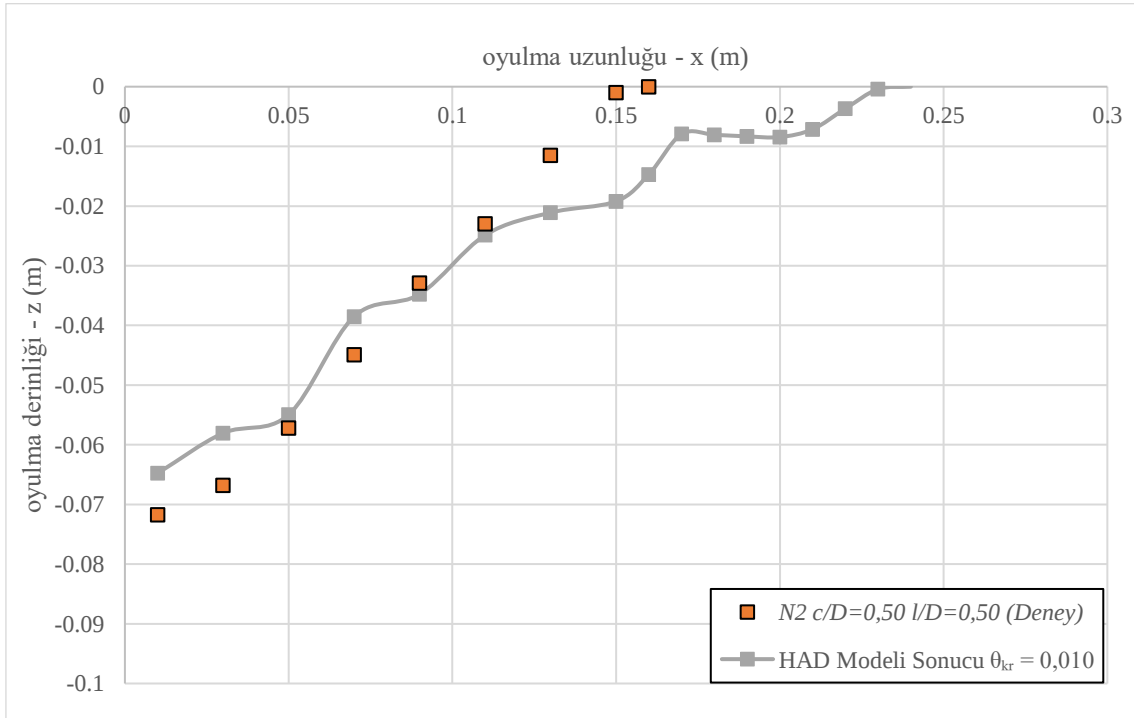
(b)

Şekil 5.15. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,50$; $F_d = 14$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



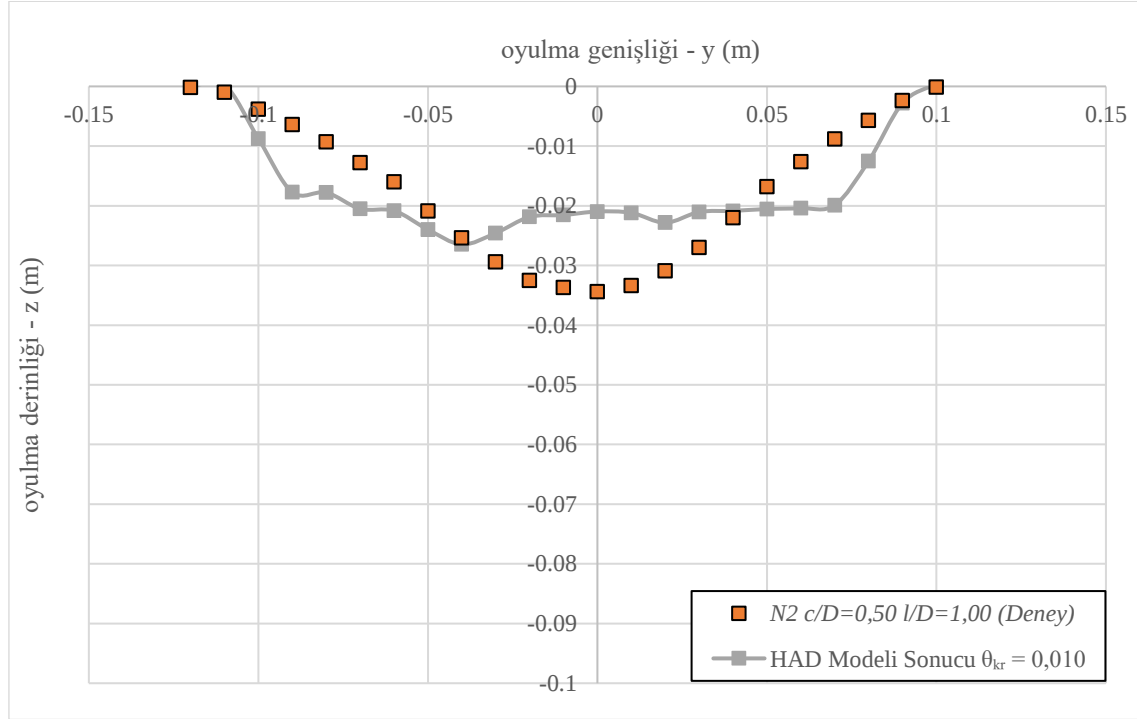
(a)



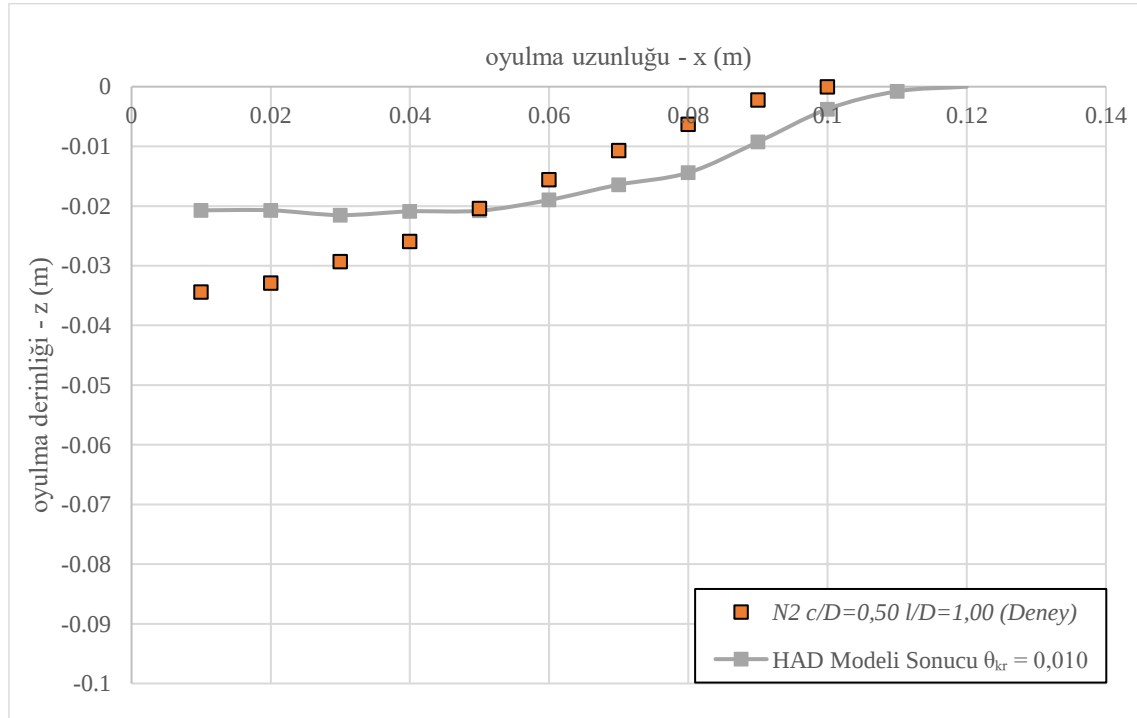
(b)

Şekil 5.16. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 0,50$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



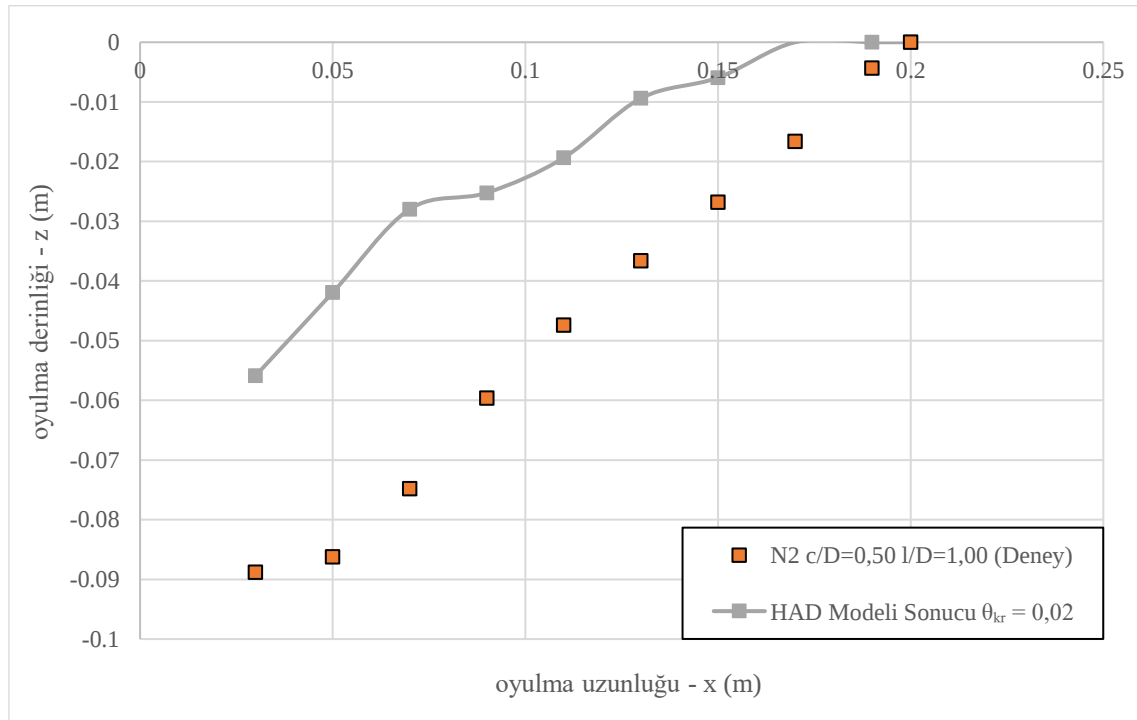
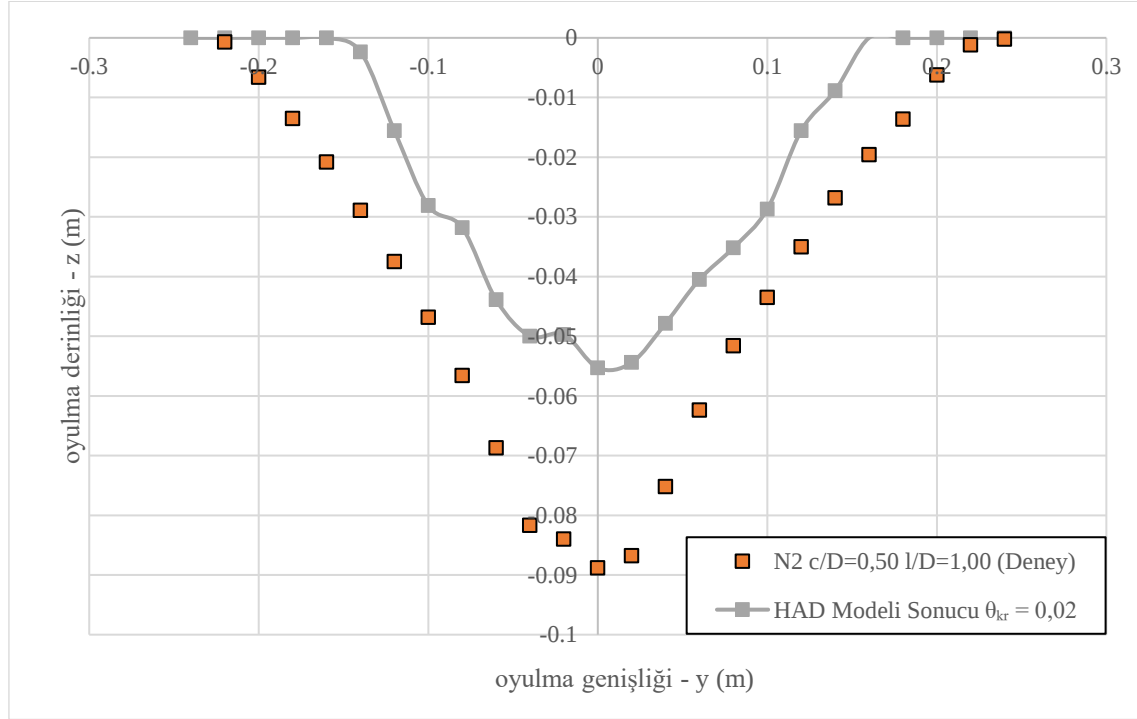
(a)



(b)

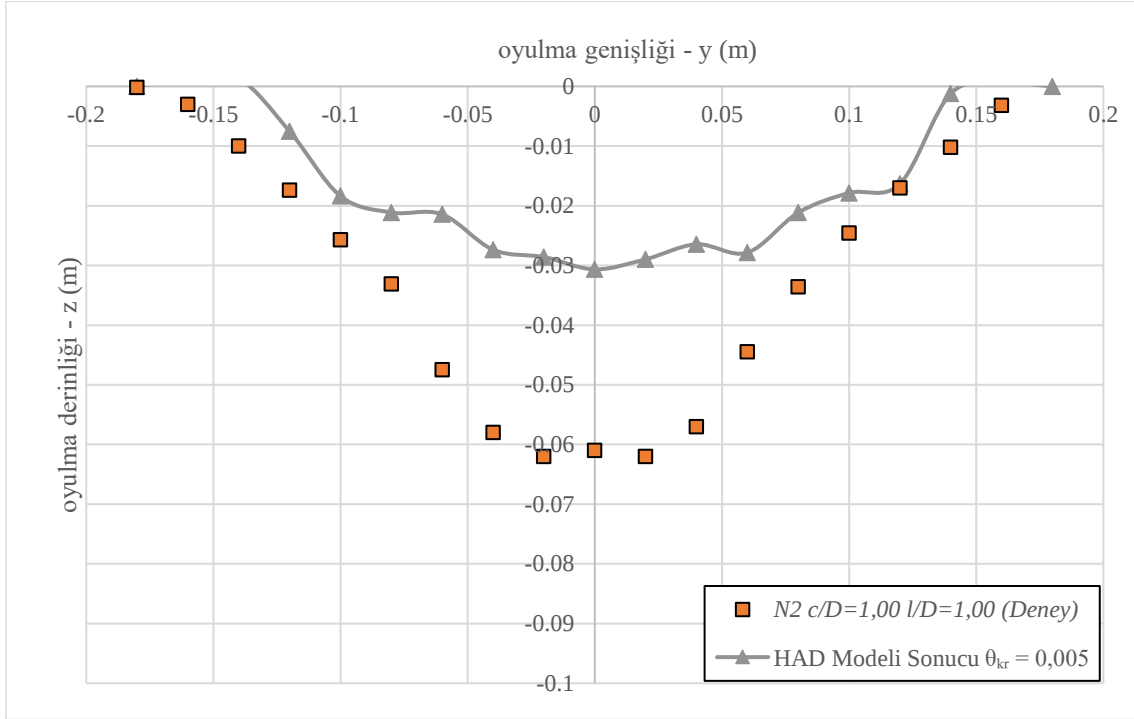
Şekil 5.17. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 1,00$; $F_d = 14$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

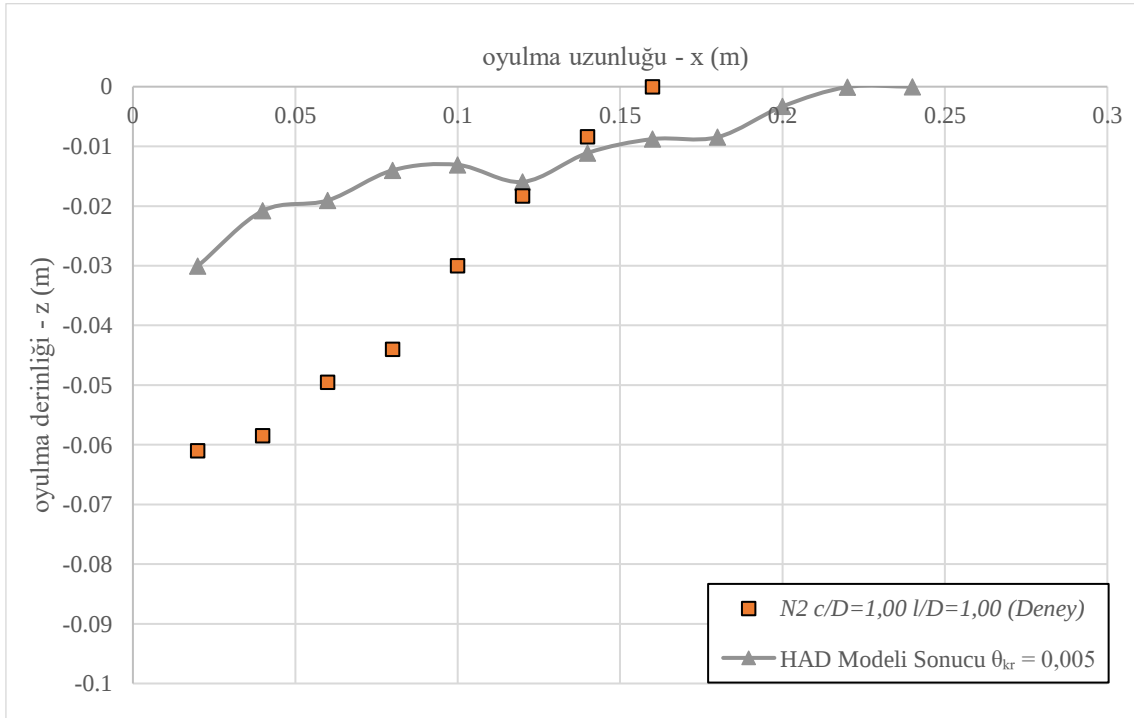


Şekil 5.18. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0.50$; $l/D = 1.00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



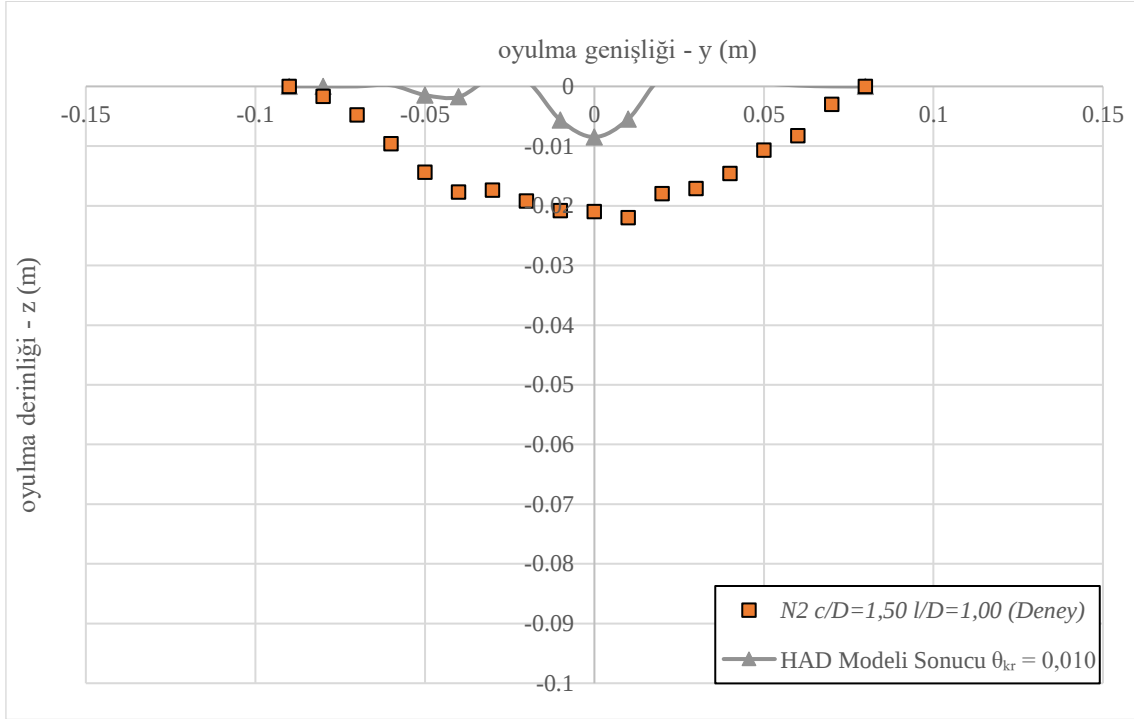
(a)



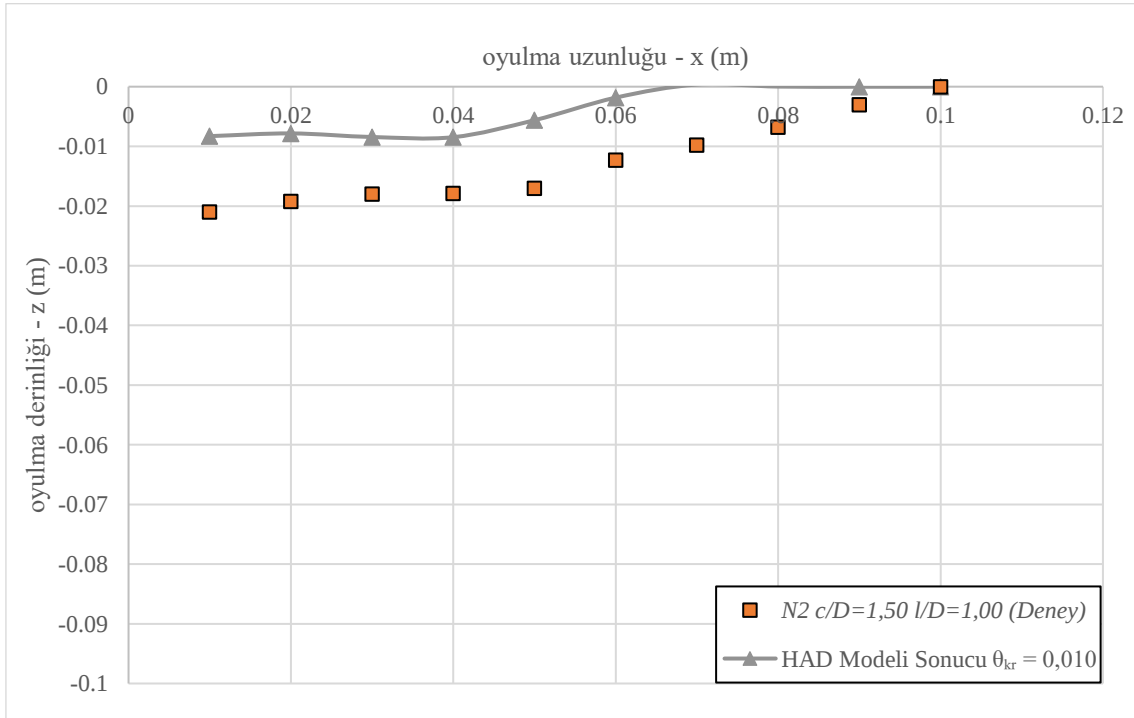
(b)

Şekil 5.19. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,00$; $l/D = 1,00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



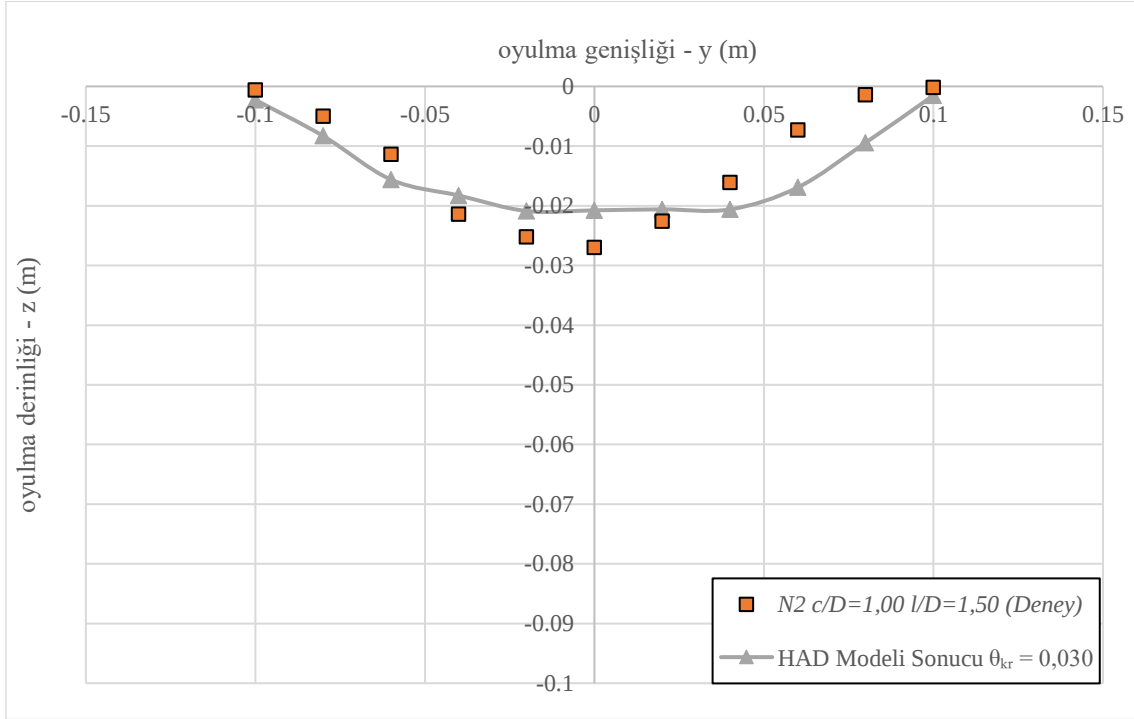
(a)



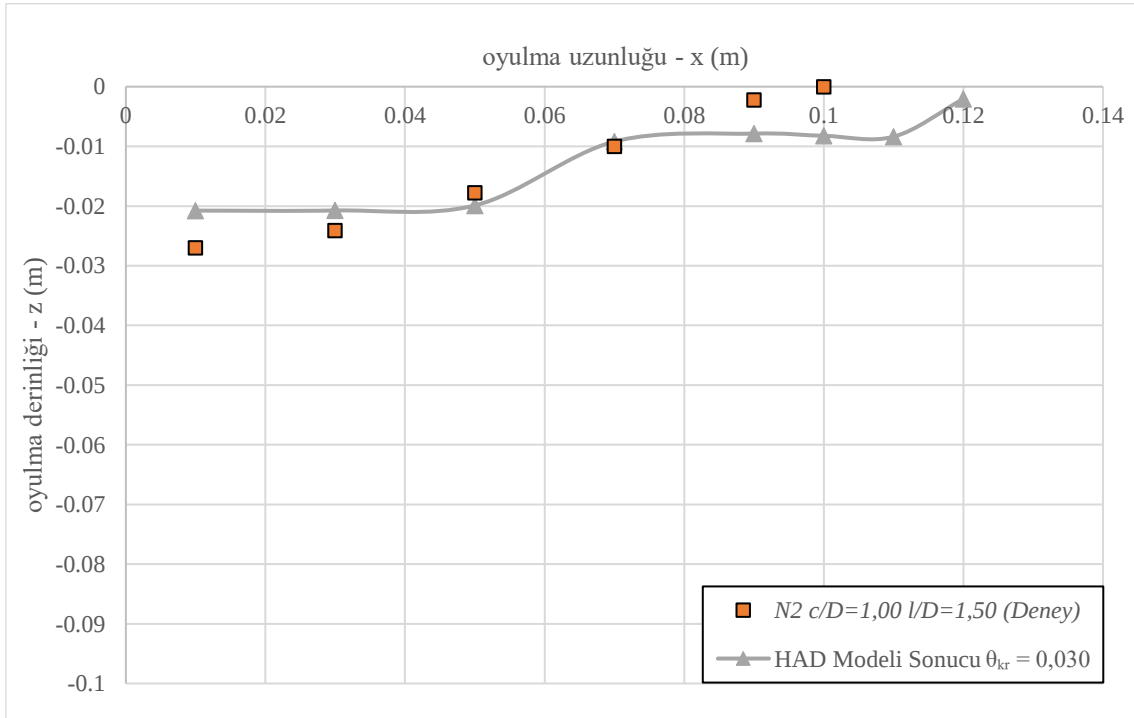
(b)

Şekil 5.20. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,50$; $l/D = 1,00$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



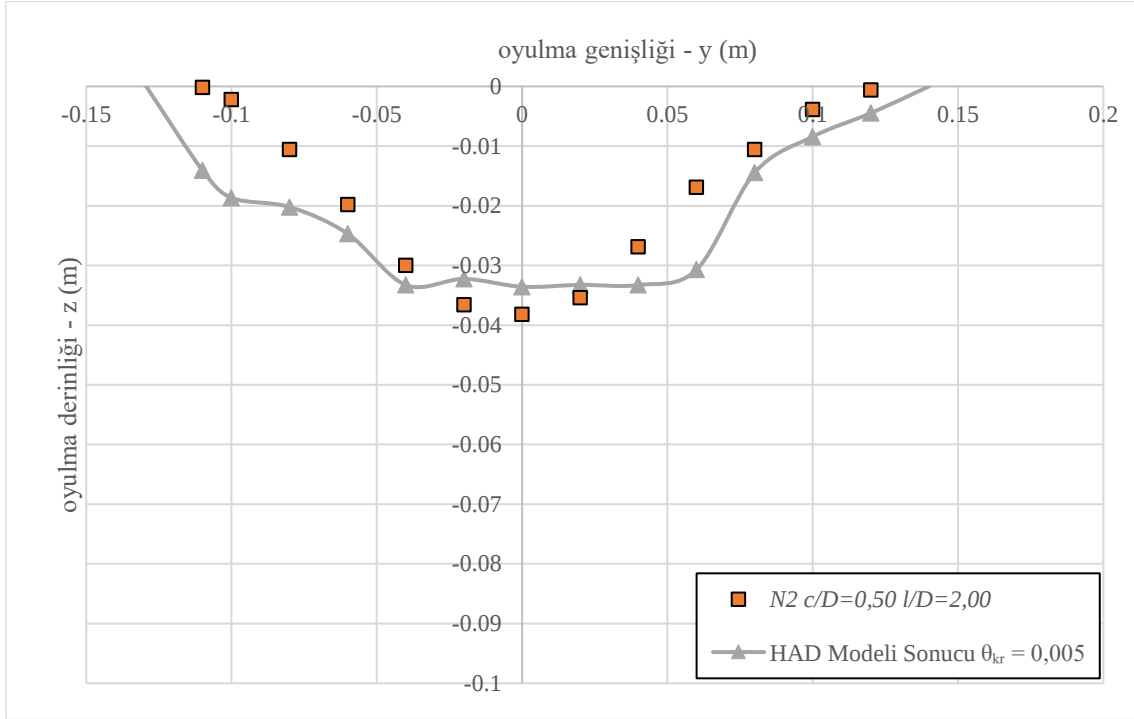
(a)



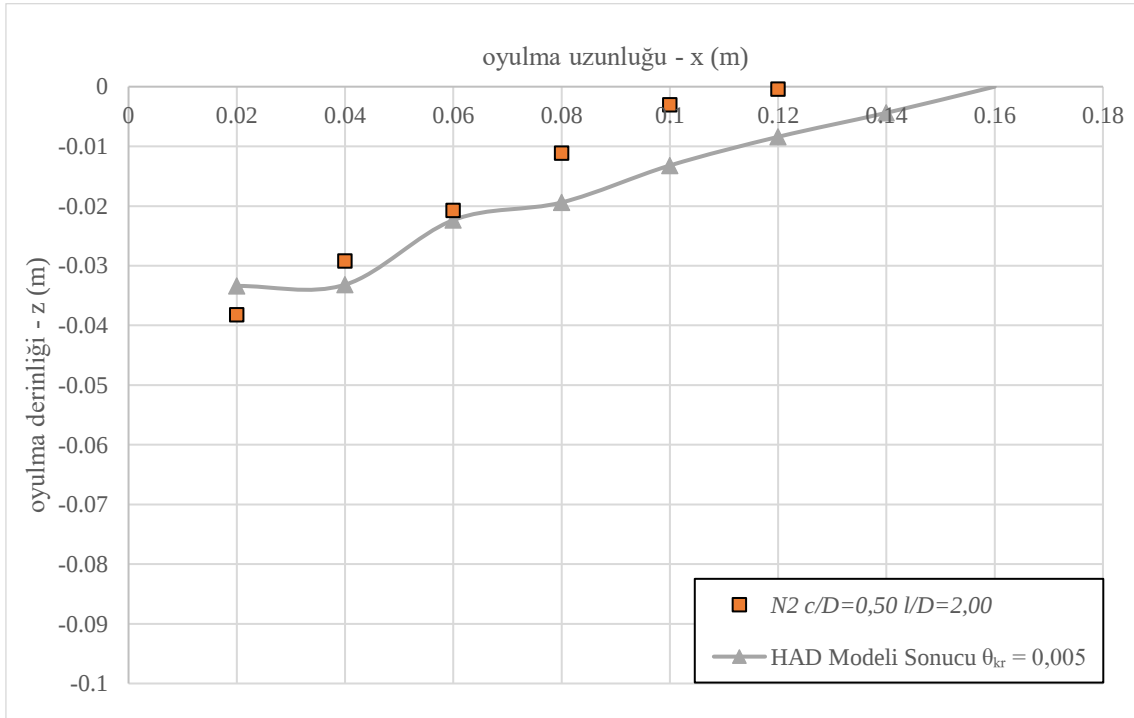
(b)

Şekil 4.21. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 1,00$; $l/D = 1,50$; $F_d = 29$ durumu için karşılaştırılması

EK-5. (devam) Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



(a)



(b)

Şekil 5.22. Düzeltilmiş kritik Shields sayısı kullanılan HAD analizi ile deney sonuçlarının (a) su alma ağzı önündeki oyulma kesiti ve (b) kanalın boyuna eksenindeki profili değerlendirilerek $c/D = 0,50$; $l/D = 2,00$; $F_d = 14$ durumu için karşılaştırılması



Gazili olmak ayrıcalıktır