



**REZERVUARLARIN BASINÇLI YIKANMASI SONUCU OLUŞAN
OYULMA ÇUKURU GEOMETRİSİNİN İNCELENMESİ**

Ahmed Batuhan EROĞLU

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2024

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.

Ahmed Batuhan EROĞLU

23 / 01 / 2024

REZERVUARLARIN BASINÇLI YIKANMASI SONUCU OLUŞAN OYULMA ÇUKURU GEOMETRİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmed Batuhan EROĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2024

ÖZET

Baraj göllerinin sedimentle dolması sonucu depolama kapasitelerinin azalması, barajların işletilmesi konusunda yaşanabilecek problemlerin başında gelmektedir. Bu sebeple, baraj gölüne girecek sedimenti azaltmak veya birikmiş sedimenti uzaklaştırmak başlıca hedeflerdendir. Baraj gölünde biriken sedimentin, dipsavaklar vasıtasıyla mansaba bırakılması yöntemiyle (sediment yıkama/sediment flushing) baraj gölünden uzaklaştırılması alınabilecek tedbirlerden birisidir. Sediment yıkama yöntemlerinden biri olan basınçlı yıkamada (pressurized flushing) su seviyesi yüksek bir kotta sabit tutularak dipsavak çevresindeki bölge sedimentten arındırılır. Bu yöntemde dipsavak çevresinde bir oyulma konisi gözlenir. Oyulma konisinin oluşumunun zamanla değişimi, uzunluğu, genişliği ve uzaklaştırılan sedimentin toplam hacmi gibi konuları inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, barajın memba eğiminin, dipsavağın tabana ve baraj duvarına göre konumunun oyulma çukurunun geometrik karakteristikleri üzerinde etkisi detaylı olarak incelenmemiştir. Bu çalışma kapsamında ise oyulma çukuru geometrisi ve çukur hacmi üzerinde çıkış yapısı merkezinin tabana ve baraj duvarına olan mesafelerinin ve baraj memba eğiminin etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, densimetrik Froude sayısının, çıkış yapısı merkezi ile ölü son duvarı arasındaki mesafenin ve ölü son duvarının düşeyle yaptığı açının artışının oyulma çukuru hacmini ve dolayısıyla uzaklaştırılan sediment miktarını arttırdığını göstermiştir. Öte yandan çıkış yapısının tabana olan mesafesinin azalmasının uzaklaştırılan sediment miktarını arttırdığı, çıkış yapısı boşluk oranının ise pompa ile sabit debi çekilen deneylerde incelenen duruma olumlu bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Elde edilen ampirik denklemlerden hesaplanan değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki uyum da deneylerin uygulama sınırları içinde tatmin edici ölçüdedir. Yapılan deneyler, ayrıca bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile sayısal olarak da modellenmiştir. Shields sayısının kalibrasyon parametresi olarak kullanılması ile yapılan nümerik analizlerde, deneylerde elde edilen oyulma çukuru karakteristiklerine yakın değerler elde edilebildiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91101

Anahtar Kelimeler : Basınçlı yıkama, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, oyulma, sediment yıkama

Sayfa Adedi : 99

Danışman : Prof. Dr. Kerem TAŞTAN

INVESTIGATION OF SCOUR HOLE GEOMETRY DUE TO PRESSURIZED FLUSHING OF RESERVOIRS

(M. Sc. Thesis)

Ahmed Batuhan EROĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2024

ABSTRACT

One of the main problems that can occur when operating a dam is that the reservoir fills with sediment over time. Preventing the sediment accumulation within the reservoirs is one of the main objectives in operating the dams. Sediment flushing is one of the measures that can be taken in order to remove the accumulated sediment from the dam reservoir. In pressurized flushing, the water level is kept constant at a high elevation and the area around the bottom outlet is cleared of sediment. A scour cone is observed around the bottom outlet in this method. There are many studies that examine the variations in the formation of the scour cone over time, its length, width and the total volume of the removed sediment. In these studies, the effects of dam upstream slope and the position of the bottom outlet relative to the bottom and dam wall on the geometric characteristics of the scour hole were not investigated in detail. Within the scope of the thesis, the effects of the distance of the center of the outlet structure to the bottom and the dam wall and the upstream slope of the dam on the scour hole geometry and scour volume were investigated experimentally and numerically. The results obtained from the experimental study showed that the increase in the densimetric Froude number, the distance between the center of the outlet structure and the dead-end wall along with the angle of the upstream wall with the vertical increase the scour volume and thus the amount of removed sediment. On the other hand, it was observed that the decrease in the distance between the outlet structure and the bottom increases the removed sediment volume, while the void ratio of the outlet structure does not have a positive effect for the pumped discharging at a constant flow rate. The consistency of the values calculated from the obtained empirical equations and the experimental results is also satisfactory. The experiments were also numerically modeled with a computational fluid dynamics software. By using the Shields number as a calibration parameter, it has been observed that good agreement for scour hole characteristics was obtained between numerical and experimental results.

Science Code : 91101

Key Words : Pressurized flushing, computational fluid dynamics, scour,
sediment flushing

Page Number : 99

Supervisor : Prof. Dr. Kerem TAŞTAN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında büyük emeği olan, çalışma süresince bana desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimini benden asla sakınmayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Kerem TAŞTAN'a; her zaman yanımda olan, bana her zaman güvenen, fikirleriyle yoluma ışık olan, en büyük destekçim, babam ve saygıdeğer hocam Doç. Dr. Nihat EROĞLU'na, çalışma süresince uzun süren laboratuvar deneylerinin yapılmasında, deney sonuçlarının alınmasında ve deney düzeneklerinin kurulumunda her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Öğr. Gör. Levent BÜTÜN'e ve Arş. Gör. Efe BARBAROS'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisansımın laboratuvar çalışmaları süresince bana her zaman müsamaha gösteren, gerektiği yerde işlerini aksatma uğruna benim işlerimi toparlayan başta can dostum Ahmet Cevat BİRİCİK olmak üzere tüm değerli İnpro Mühendislik & Müşavirlik'teki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da bu süreçte beni destekleriyle her zaman motive tutan başta ailem olmak üzere tüm dostlarıma ve bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde uygulamaya koyduğu "1002 - Hızlı Destek Programı" kapsamında bu çalışmayı 221M011 proje numarası ile kabul ederek onaylayan TÜBİTAK'a bir teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
3. BOYUT ANALİZİ	11
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	15
5. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ	27
5.1. Densimetrik Froude Sayısının Etkisi.....	27
5.2 Çıkış Yapısı Merkezi ile Taban Arasındaki Mesafenin Etkisi.....	31
5.3 Çıkış Yapısı Merkezi Ölü Son Duvarı Arasındaki Mesafenin Etkisi	38
5.4 Çıkış Yapısı Boşluk Oranının Etkisi	43
5.5 Ölü Son Duvarının Düşeyle Yaptığı Açının Etkisi	45
5.6 Oyulma Çukuru Geometrisi	48
5.7 Oyulma Çukur Hacmi İçin Elde Edilen Ampirik Denklemler.....	57

Sayfa

6. SAYISAL MODELLEME	61
6.1. HAD Modellemesinde Çözülen Temel Denklemler	62
6.1.1. Kütle ve momentum korunumu denklemleri	62
6.1.2. Türbülans modelleri	63
6.1.3. Sediment taşınım denklemleri.....	66
6.2. Program Arayüzü	70
6.2.1. Simülasyon yöneticisi (simulation manager)	72
6.2.2. Model kurulu (model setup)	72
6.3. Sayısal Modelin Oluşturulması	74
6.4. Sayısal Modelin Sonuçları	84
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deney parametrelerine ait büyüklükler.....	22
Çizelge 5.1. Çukur şev açıları	52
Çizelge 5.2. Düzeltilmiş çukur şev açıları	54
Çizelge 6.1. En uygun çözüm ağı bulunmasında kullanılan alternatifler	78
Çizelge 6.2. Kanal boyunca kullanılan çözüm ağı için sınır koşulları.....	79
Çizelge 6.3. Çıkış yapısı için kurulan çözüm ağı sınır koşulları.....	80
Çizelge 6.4. Çözümü gerçekleştirilen simülasyonlar	84
Çizelge 6.5. $c/D=1$, $l/D=0$ ve $Q=5$ lt/sn debi için simülasyon ve deney karşılaştırması	85
Çizelge 6.6. Simülasyon sonuçları ile laboratuvar sonuçlarının kıyası	87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Çıkış yapısı ve oyulma çukuru ile ilgili değişkenler	12
Şekil 4.1. Deney düzeneği (ölçeksizdir) a) Plan b) Yan Görünüş	15
Şekil 4.2. Kullanılan sediment örneklerine ait gradasyon eğrileri: a) Kum1 b) Kum 2 .	20
Şekil 5.1. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde densimetrik Froude sayısının etkisi.....	28
Şekil 5.2. Boyutsuz oyulma çukuru uzunluğu üzerinde densimetrik Froude sayısının etkisi.....	29
Şekil 5.4. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde c/D 'nin etkisi.....	32
Şekil 5.5. İki farklı çıkış yapısı konumu için c/D 'nin radyal hız üzerindeki etkisi	33
Şekil 5.6. Boyutsuz oyulma çukuru uzunluğu üzerinde c/D 'nin etkisi.....	35
Şekil 5.7. Boyutsuz oyulma çukuru derinliği üzerinde c/D 'nin etkisi.....	37
Şekil 5.8. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde l/D 'nin etkisi	39
Şekil 5.9. Boyutsuz oyulma çukuru uzunluğu üzerinde l/D 'nin etkisi	39
Şekil 5.10. Boyutsuz oyulma çukuru derinliği üzerinde l/D 'nin etkisi.....	40
Şekil 5.11. Yüzey altı çevrintisinin oluşumu	41
Şekil 5.12. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi, uzunluğu ve derinliği üzerinde boşluk oranının etkisi.....	44
Şekil 5.13. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi, uzunluğu ve derinliği üzerinde ölü son duvarının düşeyle yaptığı açının etkisi ($l/D=0$)	46
Şekil 5.14. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi, uzunluğu ve derinliği üzerinde ölü son duvarının düşeyle yaptığı açının etkisi ($l/D=1$)	47
Şekil 5.15. Sabit l/D için oyulma çukuru kesitinin değişimi	48
Şekil 5.16. $l/D=0$ için oyulma çukuru uzunluğunun debiye göre değişimi	49

Şekil	Sayfa
Şekil 5.17. $c/D=2,5$ için oyulma çukuru genişliği ve uzunluğunun boşluk oranına göre değişimi.....	49
Şekil 5.18. $l/D=1$ için oyulma çukuru uzunluğunun c/D 'ye göre değişimi	50
Şekil 5.19. $c/D=3,5$ için ağız ekseninden itibaren oyulma uzunluğunun l/D 'ye göre değişimi.....	50
Şekil 5.20. $c/D=2,5$ ve $l/D=0$ parametreleri sabit tutularak oyulma çukurunun şev açısının incelenmesi	51
Şekil 5.21. $c/D=2,5$ ve $Q=5$ lt/sn parametreleri sabit tutularak oyulma şev açısının l/D 'ye göre değişimi	52
Şekil 5.22. Şekil 5.21'de verilen grafiklerin boru ağzından çizilmiş halleri	53
Şekil 5.23. $c/D=2,5$, $l/D=0$ parametreleri sabit tutularak sırasıyla; a) 3 lt/sn b) 5 lt/sn c) 7 lt/sn d) 9 lt/sn debi değerleri için çukur geometrisi	55
Şekil 5.24. $c/D=2,5$, $Q=7$ lt/sn parametreleri sabit tutularak sırasıyla; a) $l/D=0$ b) $l/D=0.5$ c) $l/D=1$ d) $l/D=2$ parametresi için çukur geometrisi	57
Şekil 5.25. Denklemler 5.2-5.5'e göre hesaplanan ve ölçülen oyulma karakteristiklerinin karşılaştırması.....	59
Şekil 6.1. Akım içindeki sediment danesine etkiyen kuvvetler. (Apsley ve Stansby, 2008)	67
Şekil 6.2. Flow3D program arayüzü	71
Şekil 6.3. Sayısal modelleme ve HAD modeli kalibrasyonu akış şeması	75
Şekil 6.4. Oluşturulan model ve çözüm ağları.....	77
Şekil 6.5. Oluşturulan çözüm ağları özellikleri	78
Şekil 6.6. Sınır koşulları.....	80

Şekil	Sayfa
Şekil 6.7. İki farklı yatak taşınım yaklaşımı kıyaslaması boykesit ve enkesit.....	81
Şekil 6.8. Simülasyon süresi	82
Şekil 6.9. Türbülans modelleri kıyaslaması	83
Şekil 6.10. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=1$, $l/D=0$ ve $Q=5$ lt/sn.....	86
Şekil 6.11. $c/D=1$, $l/D=0$, $Q=5$ lt/sn için oyulma çukuru görünümü	87
Şekil 6.12. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=2,5$, $l/D=0$, $Q=5$ lt/sn	88
Şekil 6.13. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=2,5$, $l/D=0$, $Q=7$ lt/sn	88
Şekil 6.14. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=3,5$, $l/D=0$, $Q=5$ lt/sn	89
Şekil 6.15. Kritik Shields Katsayısının debiye ve c/D 'ye göre değişimi.....	89
Şekil 6.16. Akım çizgileri a) x-y düzlemi (plan) b) x-z düzlemi (yan görünüş)	91
Şekil 6.17. Eş hız eğrileri ve hız vektörleri a) x-y düzlemi (plan) b) x-z düzlemi (yan görünüş)	92

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Deney düzeneği fotoğrafı: a) Kanal membasından görünüm, b) Kanal mansabından görünüm	16
Resim 4.2. Atık su pompası	17
Resim 4.3. Uçtan emişli merkezkaç pompası	18
Resim 4.4. Ultrasonik debimetre	19
Resim 4.5. İki sediment numunesi için de yapılan deneylere ait oyulma konisi fotoğrafları	26
Resim 5.1. Üzerinde delikler oluşturulan bir çıkış yapısı	43
Resim 5.2. Açılı ölü son duvarı	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A_c	Küresel bir kuyu yüzeyinin net etkin yüzey alanı
A_x, A_y, A_z	x, y ve z yönlerinde akışkanın alanını
B	Kanal genişliği
c	Çıkış yapısının merkezi ile kanal tabanı arası mesafe
$c_{b,i}$	“i” numunesinin toplam malzemedeki hacimsel oranı
c_s	Askı sediment hacminin total sediment hacmine oranı
D	Çıkış yapısının iç çapı
$d^{*,i}$	Boyutsuz bir parametre
d_{50}	Sedimentin medyan çapı
d_i	i numunesine ait ortalama dane çapını
F_d	Densimetrik Froude sayısı
f_x, f_y, f_z	x, y ve z yönlerinde viskoz ivmeleri
g	Yerçekimi ivmesi
G_x, G_y, G_z	x, y ve z yönlerinde yer çekimi ivmeleri
h_m	Oyulma konisinin en büyük derinliği
H_s	Çıkış yapısının üstündeki sediment tabakası kalınlığı
H_w	Su derinliği
l	Çıkış yapısı merkezi ile duvar arasındaki mesafe
L	Oyulma konisinin en büyük uzunluğu
n_s	Sediment paketinin normal vektörü
p	Boşluk oranı
p^*	Basınç
Q	Debi

Simgeler

Açıklamalar

R	Reynolds sayısı
R_{SOR}	Yoğunluk kaynak terimini
SG	Bağıl yoğunluk
t	Zaman
U_{∞}	Çıkış yapısına yaklaşan ortalama akım hızı
$u_{\text{çökme},i}^*$	Çökelme hızı
$u_{\text{lift},i}$	Sedimenti askı durumuna geçiren sürüklenme hızı
V	Çıkış yapısından geçen ortalama akım hızı
V_c	Küresel bir kuyu yüzeyinin üzerindeki radyal hız
V_F	Akışkanın hacim oranı
V_x, V_y, V_z	x, y ve z yönlerindeki hız bileşenleri
W	Oyulma konisinin en büyük genişliği
B	Kanal eğimi
ε	Türbülans sönmleme oranı
ω	Türbülans frekansı
$q_{b,i}$	Birim genişlikte hacimsel yatak yükü taşıma oranı
ζ	Richardson – Zaki katsayısı
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
α	Çıkış yapısının bulunduğu duvarın düşeyle yaptığı açı
φ	Sedimentin içsel sürtünme açısı
θ	Shields sayısı
ν	Suyun kinematik viskozitesi
θ_{cr}	Kritik Shields parametresi
ρ	Akışkanın yoğunluğu
∇	Toplam oyulma hacmi
σ_g	Sedimentin üniformaluk katsayısı
ϕ	Birim genişlikten geçen sediment debisi
α_i	Sedimentin sürüklenme parametresi

Simgeler**Açıklamalar** $\beta_{MPM,i}$, $\beta_{NIE,i}$ ve $\beta_{VR,i}$

Yatak yükü katsayısı

 ρ_s

Sedimentin yoğunluğu

 ρ_{si}

i numaralı sediment numunesine ait yoğunluğu

 ρ_w

Suyun yoğunluğu

Kısaltmalar**Açıklamalar****CFD**

Computational fluid dynamics

CPU

Merkezî işlem birimi

HAD

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

KKY

Küresel kuyu yüzeyi

LES

Büyük girdap simülasyonu

RAM

Rastgele erişimli hafıza

RANS

Reynolds-ortalımalı Navier-Stokes

RNG

Yeniden normalleştirme modeli

1. GİRİŞ

Barajların işletilmesinde oluşabilecek temel sorunlardan biri, baraj göllerinin ekonomik ömürleri bitmeden sedimentle dolması sonucu baraj rezervuarlarının kapasitesinin azalmasıdır. Bu nedenle dünya çapında inşa edilen birçok baraj etkin bir şekilde çalışmamaktadır. Ülkemizde; Çubuk 1, Seyhan, Demirköprü, Kemer ve Kartalkaya barajlarının kapasitesinin önemli bir kısmının sedimentle dolduğu bilinmektedir (Pekmezci ve Buttanrı, 2011).

Mevcut barajlarda yitirilen kapasitenin geri kazanılabilmesi için yapılması gereken yeni barajların sayısı her geçen gün artmaya devam etmektedir. Ancak depolama kapasitesi azalmış mevcut bir barajın yerine yeni bir baraj inşa edilmesi, inşaat maliyetlerinin yüksek olması, çevresel etkiler ve uygun baraj yerinin kolaylıkla bulunamaması gibi nedenlerden dolayı oldukça zordur. Bunun yerine, baraj havzasına gelen sedimenti mümkün olduğunca baraj gölüne girmesini engellemek veya baraj gölüne girmiş sedimenti baraj gölünden uzaklaştırmak için gerekli tedbirleri almak maliyet ve uygulanabilirlik açısından daha makul olmaktadır. Baraj göllerinde sediment birikimini önlemek için kullanılabilecek yöntemler üç ana gruba ayrılabilir:

- (a) Sedimentin havzadan baraj gölüne girmesini önleme yöntemleri: Sedimentin havzaya girmesini önlemek için kontrol barajları inşa etmek, dik eğimli alanları daha az eğimli bölümlere ayırmak, bitki örtüsünü arttırmak.
- b) Baraj gölüne giren sedimentin çökmesini önleyici tedbirler: Sediment yolunun değiştirilmesi (sedimentin bypass edilmesi). Taşkınlarla rezervuara giren sedimenti mansaba taşıyacak ve rezervuarda mevcuttaki sızıya göre yoğunluğu fazla olan akımın rezervuarın tabanından ilerlemesini sağlamak (density current).
- c) Baraj gölüne giren ve tabana çöken sedimentin rezervuardan uzaklaştırılmasına yönelik tedbirler: Tabanın sedimentten mekanik yollarla temizlenmesi (dredging) veya serbest yüzeyli veya basınçlı yıkama gibi yöntemler kullanılarak rezervuar gölü tabanındaki sedimentin mansaba aktarılması.

Bu çalışmanın konusu yıkama yöntemlerinden biri olan basınçlı yıkama olduğundan yıkama yöntemleri hakkında daha detaylı bilgi vermekte fayda vardır. Sediment yıkama işlemi, baraj gölünde biriken sedimentin, baraj gövdesinde bulunan dip savaklar kullanılarak mansaba aktarılması işlemidir. Baraj gölünün yıkanarak temizlenmesi yeni bir yöntem değildir ve İspanya'da 16. yüzyıldan beri zaten kullanılmaktadır (Hager ve diğerleri 2019). Bu yöntem, rezervuarın tabanındaki sedimentin tarama (dredging) yoluyla çıkarılmasını içeren yöntemlere göre daha ekonomiktir.

Dip savaklar aracılığıyla taban sedimentinin yıkanması iki şekilde yapılabilir. Bunlardan biri olan serbest yüzeyli yıkamada (free-surface flushing) rezervuar tamamen boşaltılır ve tüm nehrin akışı dip savaklara doğru yönlendirilir. Yıkama sırasında nehrin doğal akışına benzer şekilde, yıkama işlemi devam ettikçe genişleyen bir kanal akıntısı oluşturulur. Bu yöntemde yan sırtlarda ve vadi taşkın yataklarında sediment taşınımı meydana gelmemektedir (Pekmezci ve Buttanrı, 2011). Bu yöntem, rezervuarın tamamen boşaltılması nedeniyle küçük hacimli rezervuarlar için daha uygundur. Büyük hacimli rezervuarlarda genelde tercih edilmemektedir.

Basınçlı yıkamada ise su seviyesi yüksek bir kotta sabit tutulur ve dip savağın etrafındaki alan sedimentten arındırılır. Basınçlı yıkama, büyük hacimli rezervuarlar için daha uygun olmasına rağmen, sadece baraj gölü tabanında çıkış yapısının yakınındaki alanda sediment mansaba taşınmaktadır. Bu işlem çıkış yapısına yakın belirli bir bölgede etkili olsa da kaba sedimentin su alma yapılarına ve türbinlere girmesini önlemektedir (Fang ve Cao 1996). Basınçlı yıkamanın bu özelliği çok önemlidir, çünkü türbinlerin zarar görmeden çalışabilmesi için su alma ağızlarından çekilen suyun belirli bir miktar ve büyüklüğün üzerinde sediment içermesi istenmemektedir. Basınçlı yıkama işlemi hızlıdır ve gerektiğinde periyodik olarak tekrarlanabilir. Bu konu hakkında dikkate alınması gereken bir diğer başlık ise, çevresel etki değerlendirme çalışmalarının önceden yapılarak yıkama sonucu mansaba bırakılan sedimentin çevre sorunlarına neden olup olmayacağının tahmin edilmesidir. Yıkama işlemi sonrasında uzun süre suda kalan sedimentin, barajın mansap kısmında ekosistem değişikliklerine neden olabileceği, tarım alanları ve doğal yaşam için tehdit oluşturabileceği unutulmamalıdır.

Japonya'daki Dashidaira Barajında 1991 senesinde rezervuar hacminin büyük bir kısmının dolması sonucu dip savaklar açılmış ve yıkama işlemine başlanmıştır. Ancak yıkama işlemi yapılırken baraj mansabına bırakılan kötü kokulu suyun o bölgede yaşayan halkı rahatsız etmesinden ötürü yapılan yıkama işlemi yarıda kalmıştır (Pekmezci ve Buttanrı 2011, Masahire ve Yumi 2005, Kokubo ve diğerleri 1997).

Basınçlı yıkama sırasında dip savak çevresinde bir oyulma konisi (çukuru) gözlenmektedir. Bu çalışmada, basınçlı yıkama sonrasında oluşan oyulma konisinin veya çukurunun karakteristiklerinin (derinliği, uzunluğu, hacmi), dip savak merkezinin; talveg kotuna göre düşey ve baraj duvarına göre yatay mesafeleri ile nasıl değiştiği deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca baraj duvarının düşeyle yaptığı açının etkisi de araştırılmıştır. Araştırmanın amacı, basınçlı yıkama sonrası oluşan oyulma konisinin özelliklerini ve mansap kısmına aktarılan sedimentin hacminin, dip savağın konumu ve barajın memba duvarı eğimine bağlı olarak değişimin incelemek ve daha etkili yıkama için dip savağın nasıl konumlandırılması gerektiğini değerlendirmektir.

Bu tez kapsamında sırasıyla 2. bölümde literatürde basınçlı yıkama ile ilgili yapılmış çalışmalardan, 3. bölümde basınçlı yıkama üzerinde etkili olan boyutsuz büyüklüklerden, 4. bölümde laboratuvar deneylerinden bahsedilecek ve 5. Bölümde bu deneylerin sonuçları verilecektir. 6. bölümde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı program ile yapılan deneylerin modellenmesi anlatılacak ve model sonuçları verilecek, son kısımda ise sonuçlar ve öneriler sunulacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Deneysel çalışmalar, basınçlı yıkama sırasında dip savağın etrafındaki oyulma konisinin oluşumu tamamlandıktan sonra koni geometrisinin oldukça stabil kaldığını göstermiştir. (Fathi-Moghadam ve diğerleri, 2010). Oyulma konilerinin oluşumunun zamanla değişimini ve oyulma konisinin uzunluğu, genişliği, uzaklaştırılan toplam sediment miktarı gibi konuları inceleyen deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Fathi-Moghadam ve diğerleri (2010), deneysel sonuçlardan elde edilen ampirik denklemler yardımıyla kohezyonsuz sedimentin basınçlı yıkanması sırasında oluşan oyulma konisinin hacmini ve uzunluğunu bulmak için çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışmada; kanaldaki su derinliği, sedimentin ortalama büyüklüğü ve çıkış yapısından mansaba aktarılan su debisinin oyulma konisinin geometrik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Deneyde ortalama çapları 0,27 mm, 0,42 mm ve 1,2 mm olan üç tip kum numunesi kullanmışlar ve dip savak borusunun iç çapı olarak 2 inçlik bir boru (iç çapı 5,08 cm) seçmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda debi arttıkça (debi değerleri 1; 3; 4,5; 6; 8 lt/sn), su derinliği azaldıkça ve kullanılan sediment çapı küçüldükçe oyulma çukurunun hacminin arttığı gözlenmiştir.

Kamble ve diğerleri (2018) oyulma konileri için daha önce yapılmış olan çalışmalardan elde edilen deneysel denklemleri birbirleriyle ve kendi deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Kamble ve diğerleri çalışmalarında 39 m uzunluğunda, 90 cm genişliğinde ve 1,2 m derinliğinde dikdörtgen bir kanalda ortalama tane boyutu 0,25 mm olan kum numuneleri kullanmışlardır. Çalışma sonucunda debi arttıkça, çıkış yapısının alanı arttıkça ve su derinliği azaldıkça oyulma konisinin uzunluğu ve derinliğinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Emamgholizadeh ve Fathi-Moghadam (2014), rezervuar tabanında kohezyonlu sedimentin olması durumunda oyulma konisi geometrisinin nasıl değiştiğini incelemek için deneyler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmayla, oyulma geometrisini değiştiren en önemli parametrelerden birinin sediment yığınının yoğunluğu (bulk density) olduğunu göstermişlerdir. Oyulma oluşumunun erken aşamalarında su yüksekliğinin oluşturduğu basınçların önemli olduğunu, daha sonraki aşamalarda ise su altı girdaplarının önemli hale geldiğini göstermişlerdir.

White ve Bettess (1984) oyulmanın etkin olduğu uzunluğun sınırı ile rezervuar su seviyesi ve çıkış yapısındaki akış hızı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışma sonucunda su derinliği azaldıkça oyulma konisinin uzunluğu ve derinliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Fang ve Cao (1996) oyulma çukurunun eğim açısının sedimentin su altındaki içsel sürtünme açısına yakın olduğunu belirtmişlerdir. Shahmirzadi ve diğerleri (2010), çıkış yapısının çapının, çukurun geometrisi ve uzaklaştırılan toplam sediment hacmi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneylerinde 1, 2 ve 3 inç (2,54 cm, 5,08 cm, 7,62 cm) çapındaki çıkış boruları ve ortalama çapı 1 mm olan sediment numuneleri kullanmıştır. Çalışma sonucunda çıkış yapısının alanı arttıkça oyulma konisinin uzunluğu ve derinliğinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Sediment yıkama olayını incelemek için sayısal yöntemler kullanan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalara ait bazı örnekler bu kısımda verilmiştir. Pringle ve diğerleri (2013), 3 boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerini sayısal olarak çözen bir model geliştirerek basınçlı yıkama sonucu oluşan oyulma çukuru geometrisini tahmin etmeye çalışmıştır. Çıkış yapısının hız dağılımının deneysel verilerle tutarlı bulunmasına rağmen, sediment yıkama sürecini daha iyi tahmin etmek için geliştirilmiş modellere ihtiyaç olduğu ifade edilmiştir. Chaudry ve diğerleri (2014), oyulma yöntemleri kullanılarak temizlenmeye çalışılan altı baraj gölünde yıkama olayı üzerine sayısal bir çalışma yapmış ve oyulma başarısı için gerekli kıstasları oluşturmaya çalışmıştır. Sawadoga ve Basson (2019), 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli kullanarak oyulma çukurlarını tahmin etmeye çalışmış ve simülasyonlar yoluyla elde ettikleri oyulma çukuru geometrilerinin fiziksel modellerden elde edilenlere yakın olduğunu göstermiştir.

Su alma ağzlarının yakınındaki tabanda oluşan oyulmaya ilişkin çalışmalar ise aşağıda verilmektedir. Powell ve Khan (2011), sabit hidrolik yük altında, üç farklı kalınlıktaki sediment örneklerinin orifis akışı kaynaklı taşınmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmada oyulmanın iki aşamada gerçekleştiği gözlemlenmiştir. İlk aşamada kritik üzeri kayma gerilmesinden dolayı 1,5-2 dakika boyunca radyal taşınım gözlenmiştir. Daha sonra, radyal taşınım yatak geometrisini değiştirdikçe akış düzeni de değişeceğinden dolayı rastgele girdaplar ve girdap kaynaklı oyulma gözlemlenmiştir. Önceki deneysel çalışmalara benzer şekilde Powell ve Khan (2012), üç farklı sediment örneği ve üç farklı hidrolik yük altında toplam dokuz farklı deney grubu üzerinde su alma ağzı önündeki oyulma ve hız dağılımını incelemişlerdir. Hidrolik yük arttığında girişteki akış hızının arttığını ve dolayısıyla oyulma geometrisinin genişlediği görülmüştür. Ayrıca önceki çalışmalara paralel

olarak sediment tane boyutu arttıkça oyulma geometrisinin küçüldüğü ve oyulma hacminin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca oyulmasız sabit yatak durumunda kanal eksen boyunca akış hızındaki değişimi ifade etmek için denklemler de önermişlerdir. Khanarmuei vd. (2016), ikili su alma ağzı olması durumunda tabandaki sediment oyulmasını incelemiş ve girdap oluşumu durumunda oyulmanın arttığını gözlemlemişlerdir

Powell ve Khan (2015), deneysel çalışmalarının yanı sıra Flow-3D yazılımını kullanarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellemesi de yapmışlardır. Modelde, sediment oyulması modeli çalışılmamış, deney sonuçlarından elde edilen denge durumundaki oyulma geometrisi ayrıca yazılıma tanıtılmıştır. Çalışmada hareketli yatak ve sabit yatak durumunda deneysel sonuçlardan elde edilen hız değerleri ile HAD modeliyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma, sayısal bir modelin sabit yatak ve hareketli yatak durumları için orifisin membasındaki akış alanını simüle etmede tatmin edici sonuçlar sağlayabileceğini göstermiştir. Mevcut tez çalışmasında incelenmemiş olsa da serbest yüzeyli yıkama ile ilgili yayınlar da mevcuttur. Scheuerlein ve diğerleri (2004) serbest yüzeyli yıkama koşullarıyla ilgili belirli varsayımlara dayanan analitik çalışmaları analiz etmiş ve su seviyesi önemli ölçüde azaltılmadıkça oyulma çukurlarının boyutunun belirli bir eşik değeri geçemeyeceğini göstermiştir. Lai ve Shen (1996), serbest yüzeyli oyulma koşulları altında mansaba aktarılan sediment miktarını etkileyen parametreleri incelemişlerdir.

Su alma ağızlarının membasında oluşan hız dağılımlarını bulmaya yönelik çalışmalardan da tez konusu ile ilgili olduğundan bahsetmek yerinde olacaktır.

Shammaa ve diğerleri (2005), yatay dairesel su alma ağzı ve kapak altı akımlarına ait hız dağılımını potansiyel akım yaklaşımı ile elde etmişlerdir. Farklı debiler için dairesel su alma ağzı membasında oluşan yarı eliptik eş hız eğrilerini, literatürdeki diğer çalışmalara yakın bir şekilde hesaplamışlardır. Çalışmada kapak altı akımlar için çizgisel kuyu yaklaşımı önerilmektedir. Ayrıca yaptıkları çalışma sonucunda hesaplanan hız değerlerinin, literatürdeki diğer deneysel ve nümerik çalışmalar ile uyumlu olduğundan bahsetmişlerdir.

Bryant ve diğerleri (2008), yatay dairesel su alma ağzı membasında oluşacak hız profillerini, basınç değişkeninin etkili olduğu tekil büyük orifis ve çoklu orifislerden oluşan fiziksel bir model hazırlayarak incelemişlerdir. Orifisin memba kısmında oluşan akım hızlarının tespiti

için basınç değişkeninin de dâhil edildiği yeni bir potansiyel akım yaklaşımı önermişlerdir. Yeni yaklaşımın fiziksel modelden alınan ölçümlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Yeni potansiyel akım yaklaşımının Shammaa ve diğerleri (2005) tarafından öne sürülmüş potansiyel akım çözümünden daha üstün olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca literatürde bu çalışmanın sayısal analiz kısmında da kullanılan Flow-3D yazılımı ile açık kanal akışlarında yerel oyulmanın incelendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Ghasemi ve Soltani-Gerdefaramarzi (2017), dairesel tek köprü ayağı çevresinde farklı akış hızlarına sahip su akışının neden olduğu oyulmanın modellenmesi için Flow-3D yazılımını kullanmıştır. Sayısal modellerin sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştıran çalışmada, HAD modelinin oyulma derinliğini %20-30 oranında eksik tahmin ettiği belirlenmiş, benzer çalışmalarda da bu düzeyde hatayla karşılaşıldığına dikkat çekilmiştir. Ghaderi ve Abbasi (2019), HAD modellemesi yoluyla kanat profilili köprü ayaklarının oyulma üzerindeki etkisini incelemiştir. Sayısal modelleme için Flow-3D yazılımı kullanılmış ve oyulma sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Wei ve diğerleri (2014), kapak altı akımlarda oyulma olayını, Flow-3D yazılımı kullanılarak oluşturulan HAD modeli ile incelemişlerdir. Modelde kritik Shields parametresi 0,050 kabul edilmiş, diğer tüm değişkenler ise varsayılan değerinde bırakılmıştır. HAD modeli, literatürde mevcut olan kapak altı oyulma deneyi sonuçları ile doğrulanmıştır. An ve diğerleri (2015), kapak altı oyulma olayını Flow-3D yazılımını kullanarak modellemişlerdir. Çalışmada iki ve üç boyutlu HAD modelleri, yatak yükü taşınım yaklaşımları (Meyer-Peter-Müller 1948, Engelund ve Fredsøe 1976, Nielsen 1992) ve türbülans modelleri (RNG, k- ϵ ve Büyük Girdap Simülasyonu LES) incelenmiştir. Sonuçlar kontrol edildiğinde, 2 boyutlu modelde genişlik yönündeki hızları hesapta dikkate almadığından, 2 boyutlu modelin doğru sonuçlar vermediği görülmüştür. İncelenen tüm yatak taşınım yöntemlerinin deneylerle tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Son olarak LES türbülans modelinin oyulma / biriktirme profilini, RNG k- ϵ modelinden çok daha yüksek isabetle öngördüğü sonucuna varılmıştır. Ancak LES modelinin, çözüm süresi ve hesap yükü açısından ele alındığında, pratikte uygulanabilirliğinin düşük olduğu ifade edilmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda, basınçlı yıkama ile ilgili mevcut çalışmalarda, aşağıdaki belirtilen konular üzerinde yeterli bir inceleme bulunmadığı görülmüştür.

- Baraj memba yüzü eğiminin, oyulma konisinden mansaba aktarılan toplam sediment miktarı ve oyulma çukurunun geometrisi üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. Ancak barajın memba yüzünün eğimi oyulma çukurunun geometrisi üzerinde etkiye sahip olabilir.
- Yapılmış olan çalışmalarda dip savağın (veya çıkış yapısının) talveg kotuna göre yüksekliğinin oyulma derinliği ve oyulma hacmi üzerindeki etkileri incelenmemiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda çıkış yapısı genelde kanal tabanına çok yakın olarak yerleştirilmiştir. Dolayısıyla bu zamana kadar yapılmış olan çalışmalarda kanal tabanının basınçlı yıkama üzerinde etkisi vardır. Çünkü çıkış yapısının yakınlarındaki hız dağılımı, çıkış yapısının kanal tabanına olan mesafesinden etkilenmektedir. Hız dağılımının değişmesi, özellikle oyulma çukuru oluşumunun ilerleyen safhalarında çukurdan yukarı kaldırılarak atılan sediment daneleri üzerindeki hidrodinamik kuvvetleri etkileyeceğinden çukur geometrisi üzerinde etkileri olduğu düşünülmektedir.
- Birçok çalışmada basınçlı yıkamanın çıkış yapısına yakın bir bölgede sınırlı kaldığı belirtilmiştir. Dip savağın (veya çıkış yapısının), sedimentin birikmiş olduğu memba tarafına doğru uzatılması durumunun mansaba gönderilecek sediment hacmini artırıp artırmadığı üzerine yeteri kadar çalışma yapılmamıştır.
- Basınçlı yıkama durumunda, çıkış yapısının farklı konumları için oyulma çukuru geometrisinin tahmini, hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli ile (HAD/CFD) yapılmamıştır.

Bu çalışmada oyulma çukuru geometrisi ve çukur hacmi üzerinde çıkış yapısı merkezinin tabana ve baraj duvarına olan mesafelerinin ve baraj memba yüzü eğiminin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda oyulma çukurunun uzunluğu, derinliği ve hacmini veren ampirik eşitlikler elde edilmiştir. Mevcut deneyler ile bu çalışmada kullanılan Flow-3D programı sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylece basınçlı yıkama durumunda kullanılan HAD modelinin hangi koşullar altında deneysel neticelere yakın sonuçlar verdiği veya veremediği test edilmiştir.

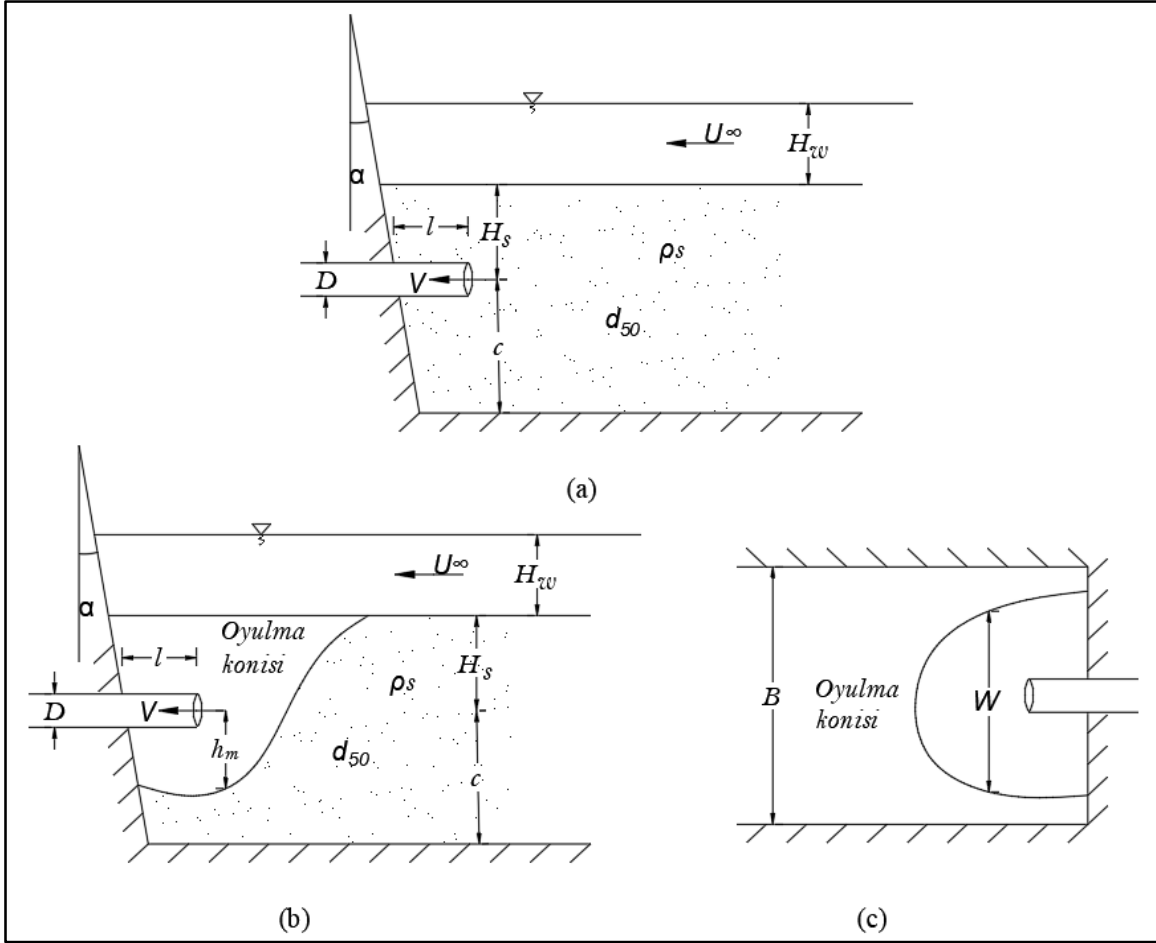
3. BOYUT ANALİZİ

Sediment taşınımı ve oyulma çalışmalarında, konunun doğası gereği analitik çözüm oldukça zordur. Bu nedenle bu çalışmada deneysel yöntem izlenmiş ve etkisi araştırılacak boyutsuz parametreler boyut analiz yoluyla elde edilmiştir.

Yapılacak deneylerde bağımlı değişken olarak dört farklı alternatif göz önüne alınabilir. Bunlar oyulma konisinin (veya çukurunun) en büyük derinliği (h_m), oyulma konisinin akım doğrultusundaki en büyük uzunluğu (L) ve oyulma konisinin akıma dik yöndeki en büyük genişliğidir (W). Bu üç parametrenin yardımıyla oyulma çukurunun toplam hacmi de (∇) elde edilebilir. Oyulma çukuru hacmi üzerinde etkili olabilecek parametreler Eş. (3.1)'de verilmiştir.

$$\nabla = f(\rho_w, \nu, U_\infty, D, V, c, l, \rho_s - \rho_w, g, H_s, H_w, B, d_{50}, \alpha, \sigma_g, p) \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de ρ_w = suyun yoğunluğunu, ν = suyun kinematik viskozitesini, U_∞ = çıkış yapısına yaklaşan ortalama akım hızını, D = çıkış yapısının iç çapını, V = çıkış yapısından geçen ortalama akım hızını, c = çıkış yapısının merkezi ile kanal tabanı arasındaki mesafeyi, l = çıkış yapısı merkezi ile duvar arasındaki mesafeyi, ρ_s = sedimentin yoğunluğunu, g = yerçekimi ivmesini, H_s = çıkış yapısının üstünde kalan sediment tabakası kalınlığını, H_w = su derinliğini, B = kanal genişliğini, d_{50} = sedimentin medyan çapını, α = çıkış yapısının bulunduğu duvarın düşeyle yaptığı açığı, σ_g = sedimentin üniformaluk katsayısını, p = çıkış yapısı merkezinin duvardan uzakta olduğu durumlarda ($l \neq 0$) çıkış yapısının yan yüzey alanına açılan deliklerin çıkış yapısının toplam yanal alanına oranını (boşluk oranı) gösterir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çıkış yapısı ve oyulma çukuru ile ilgili değişkenler

Eşitlik (3.1)'de sıralanan değişkenlere boyut analizi uygulandığında aşağıdaki fonksiyonel ilişki elde edilir.

$$\frac{\nabla}{D^3} = f_2 \left(\frac{VD}{\nu}, \frac{V}{U_\infty}, \frac{c}{D}, \frac{l}{D}, \frac{V}{\sqrt{g \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_{50}}}, \frac{B}{D}, \alpha, \frac{H_s}{D}, \frac{H_w}{D}, \sigma_g, p \right) \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de;

$$R = \frac{VD}{\nu} = \text{Reynolds sayısı} \quad (3.3a)$$

$$F_d = \frac{V}{\sqrt{g \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_{50}}} = \text{Densimetrik Froude sayısı} \quad (3.3b)$$

Deneylerdeki minimum Reynolds sayısı yaklaşık 24000'dir (5,32 cm çaplı bir çıkış yapısından 1 lt/sn akış olması durumunda). Bu değerin de türbülanslı akım koşullarını sağladığı ve oyulma çukurunun gelişiminde Reynolds sayısının etkisinin ihmal edilebileceği Fathi-Moghadam ve diğerleri (2010) çalışmasında belirtilmiştir.

Kanaldaki yaklaşım akımının hızı (U_∞) çıkış yapısından geçen akım hızına kıyasla oldukça küçük olduğundan ve kanalın tabanındaki sediment danelerini yerinden oynatmaya yetecek büyüklüğe ulaşmadığından dolayı V/U_∞ değerinin oyulma konisi oluşumu üzerindeki etkisi de göz ardı edilebilir (kanal akımı temiz su koşullarındadır).

Daha sonra deneyler kısmında bahsedileceği üzere taban sedimenti olarak kullanılan sediment örneklerine ait σ_g katsayısı 1.4 değerinden küçüktür ($\sigma_{g1} = 1,17$ $\sigma_{g2} = 1,18$). Bu durum için sedimentin üniform olarak kabul edilebileceği Dey ve Sarkar (2006) tarafından gösterilmiştir. Bu yüzden σ_g büyüklüğü de Eş. (3.2)'den çıkartılabilir.

Çıkış yapısının konumunun kanal yan duvarlarına mesafesi sabit tutulduğundan (çıkış yapısı kanal merkezine yerleştirilmiştir) Eşitlik (3.2)'deki B/D değerinin de etkisi ihmal edilebilir.

Bu çalışmada çıkış yapısının konumunun oyulma konisi özellikleri ve uzaklaştırılan toplam sediment hacmi üzerinde etkilerini inceleyebilmek adına kanaldaki su yüksekliği (H_w) ve çıkış yapısının üzerindeki sediment kalınlığı (H_s) sabit tutulmuştur. Dolayısıyla, H_w/D ve H_s/D büyüklükleri de Eşitlik (3.2)'den çıkartılabilir.

Bu kabuller ışığında Eşitlik (3.2) aşağıdaki hali alır.

$$\frac{\forall}{D^3} = f_2\left(\frac{c}{D}, \frac{l}{D}, F_d, \alpha, p\right) \quad (3.4)$$

Bağımlı değişken olarak oyulma çukurunun derinliği, genişliği ve uzunluğu alınırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{h_m}{D} = f_2\left(\frac{c}{D}, \frac{l}{D}, F_d, \alpha, p\right) \quad (3.5a)$$

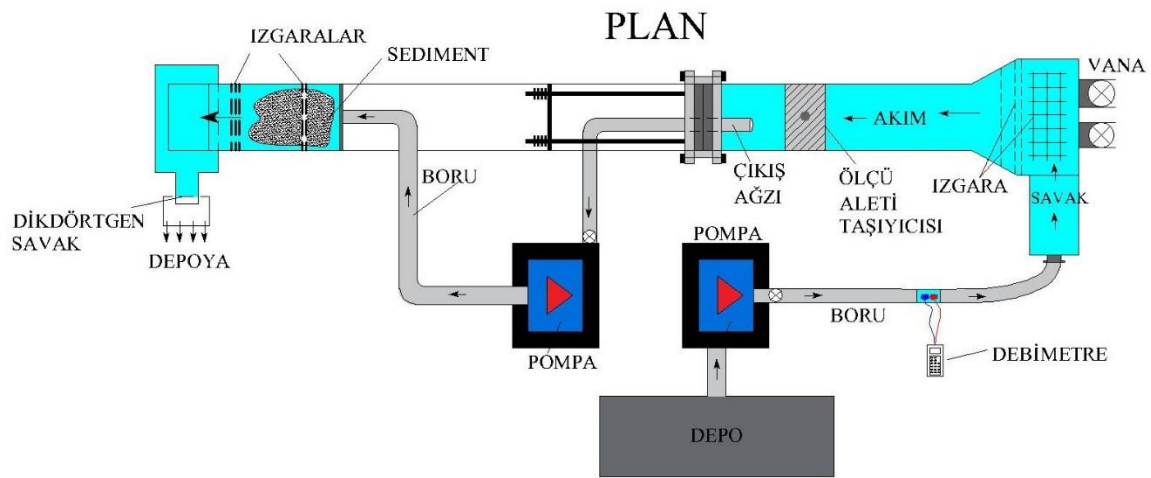
$$\frac{L}{D} = f_2\left(\frac{c}{D}, \frac{l}{D}, F_d, \alpha, p\right) \quad (3.5b)$$

$$\frac{W}{D} = f_2\left(\frac{c}{D}, \frac{l}{D}, F_d, \alpha, p\right) \quad (3.5c)$$

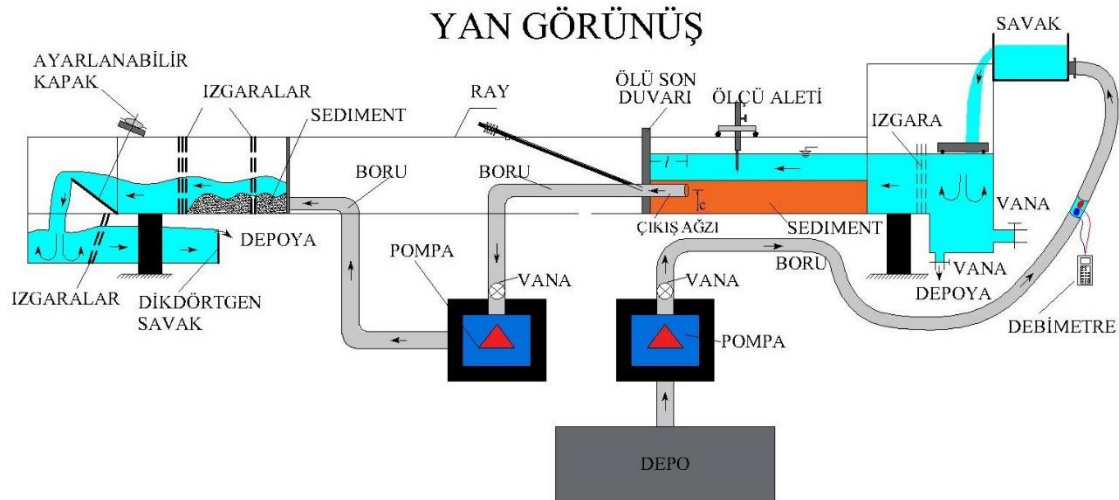
Eşitlik (3.4) ve (3.5)'teki ilişkileri incelemek için 4. bölümde anlatılan deneyler gerçekleştirilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada yapılan deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler derinliği ve genişliği 50 cm, toplam gözlem uzunluğu 10 m, gözlem yapılabilir ve çalışılabilir kısmı 7,5 m olan, alt ve yan duvarları camdan yapılmış bir dikdörtgen yatay açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1 ve Resim 4.1'de deney düzeneğinin ölçeysiz hali ve laboratuvar görünümü verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Deney düzeneği (ölçeysizdir) a) Plan b) Yan Görünüş



(a)



(b)

Resim 4.1. Deney düzeneği fotoğrafı: a) Kanal membasından görünüm
b) Kanal mansabından görünüm

Deneylerde kanalın sonuna yakın bir bölgeye barajın memba tarafındaki duvarı temsil etmesi için ölü son duvarı olarak adlandırılacak pleksiglastan üretilmiş bir dikdörtgen plaka yerleştirilmiştir. Çıkış yapılarının farklı yüksekliklerde olmasını ve kanala yerleştirilen mekanizmalar yardımıyla açılı olarak yerleştirilebilmesini sağlamak amacıyla bu ölü son duvarlarından birkaç adet üretilmiştir. Çıkış yapısı olarak görev yapan 5,32 cm çapında bir boru, ölü son duvarındaki delikten yatay olarak geçmektedir. Çıkış yapısı borusu atık su pompasına bağlanmaktadır. (Resim 4.2). Kanat yapısı, içerisinde yoğun miktarda sediment içeren sıvı karışımlarını pompalayacak nitelikte olan bu pompa sayesinde kanaldaki su seviyesini değiştirmeden çıkış yapısından hem farklı debiler çekilebilmiş hem de yer çekimli orifis akışı koşulları altında mevcut kanalın yüksekliği düşünüldüğünde elde edilemeyecek genişlikte bir debi aralığı elde edilebilmiştir. Bu çalışmanın amacı, daha önce de belirtildiği gibi, baraj yapısı konumu ve baraj memba yüzü eğiminin oyulma üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Gerçek bir barajda dip savaklardan alınan akım, yerçekimi etkisi altında oluşmasına rağmen sabit debi için (zamandan bağımsız koşullar altında) debinin pompa ile veya yerçekimi etkisi altında alınması ulaşılmak istenen amaç özelinde herhangi bir fark oluşturmayacaktır.



Resim 4.2. Atık su pompası

Pompa basma borusundan çıkan su ve sediment birleşimi, ölü son duvarı ile kanal ucundaki ayarlanabilir kapak arasına yerleştirilmiş ızgaralar kullanılarak çökeltilmiş, sedimentin tekrar sisteme girmesi engellenmiştir.

Ayarlanabilir kapaktan geçen akımın debisi dikdörtgen bir savak aracılığıyla ölçülmüş ve daha sonra yer altı rezervuarına geri gönderilmiştir. Kanala sağlanan su, uçtan emişli bir merkezkaç pompası (Resim 4.3) kullanılarak laboratuvar tabanının altında bulunan bir yer altı deposundan alınmıştır. Ayrıca kanala giren suyun olabildiğince çevrintisiz ve sakin olmasını sağlamak için kanal girişinde ızgaralar bulunmaktadır.



Resim 4.3. Uçtan emişli merkezkaç pompası

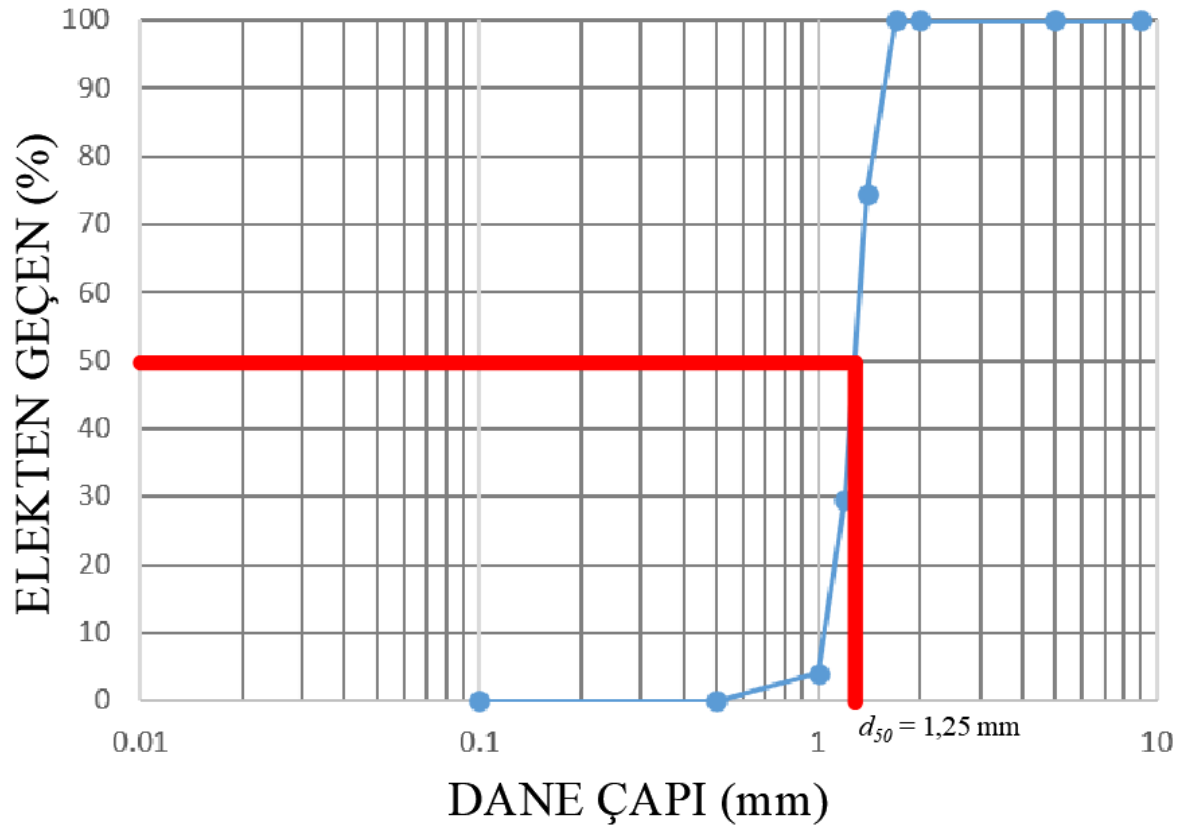
Kanala verilen suyun debisi ultrasonik debimetre ile ölçülmüştür (Resim 4.4). Bu debimetre, kanala su veren merkezkaç pompanın basma hattı üzerine vana ve dirseklerden yeterince uzak bir kesitte boru çevresine bağlanmıştır. Debimetrenin önce kalibrasyonu yapılmış daha sonra ise tüm debi ölçümleri bu debimetre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



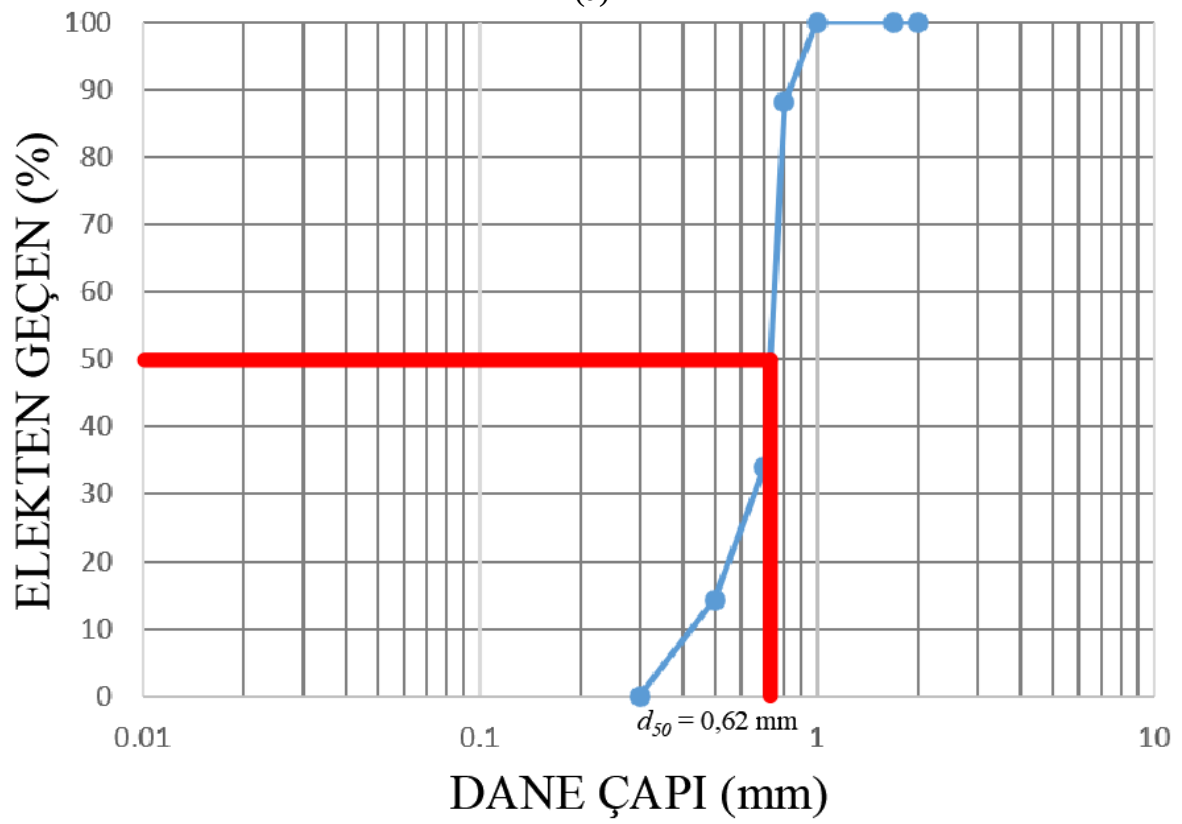
Resim 4.4. Ultrasonik debimetre

Deney düzeneği kurulduktan sonra, kanalın tabanına sediment tabakası doğal olarak (herhangi bir sıkıştırma yapılmadan) serilmiştir. Sediment tabakasının kalınlığı çıkış yapısı merkezinden itibaren tüm deneylerde $H_s/D = 3$ olarak alınmıştır. Kanala serilen sedimentin gradasyonu, deneyler öncesinde elde edilmiş olup kullanılan her iki sediment örneği için de σ_g katsayısı 1,4'den küçük olması sağlanmıştır (daha önce de belirtildiği gibi $\sigma_g < 1,4$ olduğu durumda sediment üniform kabul edilebilmektedir).

Kullanılan her iki sediment örneği için elde edilmiş olan gradasyon eğrileri Şekil 4.2'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.2. Kullanılan sediment örneklerine ait gradasyon eğrileri: a) Kum 1, b) Kum 2

Sediment örneklerinin medyan çapları (d_{50}) 1,25 mm (kum 1) ve 0,62 mm (kum 2) olup kullanılan kuvarz kumun bağıl yoğunluğu 2,65'tir. Sediment yerleşimi tamamlandıktan sonra yer altı su deposundan pompa yardımıyla istenilen debide alınan su, kanalın başındaki yapıya aktarılmıştır. Bu yapıdan kanala giren suyun enerjisi kanal başında bulunan ızgaralar yardımıyla kırılarak akımın kanala mümkün olduğu kadar az çalkantılı girmesi sağlanmıştır. Kanaldaki su, ölü son duvarının önünde yükselirken istenilen seviyeye geldiğinde çıkış yapısına bağlı olan pompanın vanası açılarak basınçlı yıkama işlemi başlatılmıştır.

Zamandan bağımsız akım koşullarının elde edilmesi için kanala verilen su debisi ile çıkış yapısından çıkan su debisinin aynı olması gerekmektedir. Bu durum, hem kanala su veren pompanın mansabında bulunan hem de çıkış yapısına bağlı pompanın mansabında bulunan vanalar yardımıyla ayarlanarak sağlanmıştır. Bu sayede kanaldaki su seviyesi zamanla değişmemektedir. Kanaldaki su derinliği sediment tabakasının üst kotundan itibaren tüm deneylerde $H_w/D=3$ olarak alınmıştır.

Yıkama işlemi sonlanana kadar oyulma çukurunun oluşumu kanal yanındaki camlardan yapılan gözlemlerle takip edilmiştir. Oyulma sürecinin sonlanması yani dip savaktan çıkan sudaki sediment miktarının ihmal edilebilecek kadar az olması veya bir başka deyişle oluşan oyulma çukuru boyutlarının zamanla değişmeyen bir seviyeye gelmesidir.

Çukur geometrisinin zamana bağlı olarak değişmediği duruma geldiğinde kanala akım veren ve ölü son duvarında çıkış yapısına bağlı pompaların vanaları kapatılmış, ardından pompaların gücü devreden kesilmiştir. Denge durumu, oyulma çukurunun boyutlarının zamanla değişmediği seviye gelmesi durumu olarak tanımlanmış olup mevcut çalışmalarda bu sürenin 15 dakika civarı olduğu belirtilmektedir (Fathi-Moghadam ve diğerleri, 2010).

Bu çalışmada, oyulma çukuru içinde seçilen birden fazla noktada deneyin başlamasından sonra deney devam ederken 5 dakikada bir limnimetre ile ölçümler alınmış, oyulma çukurunun denge durumuna gelip gelmediğinin kontrolü sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında yapılmış olan tüm deneylerde 30 dakikada oyulma çukurunun dengeye geldiği görülmüş, dolayısıyla deney süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir.

Deney sonucu kanalda kalan su, boru yardımıyla kanaldan sifonlanarak veya kanal girişinde bulunan su alma yapısının altındaki drenaj vanası yardımıyla yavaşça boşaltılmıştır. Bu işlemten sonra oyulma çukurunu oluşturan sediment taneleri kurumadan çukur geometrisi hata payı ± 0.1 mm olan bir limnimetre ile kanal genişliği ve uzunluğu boyunca ağız bölgesine yakın yerlerde 2,5 santimetrede bir, ağızdan uzaklaştıkça 5 santimetrede ölçülmüştür. Bu işlemler farklı çıkış yapısı debileri, farklı çıkış yapısı konumları, farklı ölü son duvarı açıları ve farklı sediment çapları için tekrarlanmıştır. Bu çalışmada bahsedilen parametreler için öngörülen sınır değerler, laboratuvardaki kanalın büyüklüğü ve laboratuvar imkânları göz önüne alınarak seçilmiştir. Tez kapsamında toplamda 124 farklı deney yapılmış ve kullanılan parametrelerin büyüklüklerine ait özet tablo aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmiştir. Literatürde memba yüzü eğimi, çıkış yapısının memba duvarına ve kanal tabanına olan konumunu inceleyen bir çalışma olmadığından bu değerler için herhangi bir sınır değer verilememiştir.

Çizelge 4.1. Deney parametrelerine ait büyüklükler

NUMUNE	c/D	l/D	$Q(\text{lt/s})$	F_d
KUM 1 ($d_{50} = 1,25$ mm)	1,0	0,0	3,007	9,744
			4,999	15,929
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		0,5	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		1,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		2,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
	2,5	0,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		0,5	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189

Çizelge 4.1. (devamı) Deney parametrelerine ait büyüklükler

NUMUNE	c/D	l/D	$Q(\text{lt/s})$	F_d
KUM 1 ($d_{50} = 1,25 \text{ mm}$)	2,5	1,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		2,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
	3,5	0,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		0,5	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		1,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189
		2,0	3,007	9,744
			4,999	16,198
			7,007	22,705
			9,008	29,189

NUMUNE	c/D	l/D	$Q(\text{lt/s})$	p	F_d
KUM 1 ($d_{50} = 1,25 \text{ mm}$)	2,5	0,5	3,007	0,300	9,744
			4,999	0,300	16,198
			7,007	0,300	22,705
			9,008	0,300	29,189
		1,0	3,007	0,300	9,744
			4,999	0,300	16,198
			7,007	0,300	22,705
			9,008	0,300	29,189
		2,0	3,007	0,300	9,744
			4,999	0,300	16,198
			7,007	0,300	22,705
			9,008	0,300	29,189

Çizelge 4.1. (devamı) Deney parametrelerine ait büyüklükler

NUMUNE	c/D	l/D	$Q(\text{lt/s})$	α	F_d
KUM 1 ($d_{50} = 1,25$ mm)	2,5	0,0	3,007	15°	9,744
			4,999		16,198
			7,007		22,705
			9,008		29,189
		1,0	3,007		9,744
			4,999		16,198
			7,007		22,705
			9,008		29,189
		0,0	3,007	30°	9,744
			4,999		16,198
			7,007		22,705
			9,008		29,189
		1,0	3,007		9,744
			4,999		16,198
			7,007		22,705
			9,008		29,189

NUMUNE	c/D	l/D	$Q(\text{lt/s})$	F_d
KUM 2 ($d_{50} = 0,62 \text{ mm}$)	2,5	0,0	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445
		0,5	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445
		1,0	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445
		2,0	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445
	3,5	0,0	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445
		0,5	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445

Çizelge 4.1. (devamı) Deney parametrelerine ait büyüklükler

NUMUNE	c/D	l/D	$Q(\text{lt/s})$	F_d
KUM 2 ($d_{50} = 0,62 \text{ mm}$)	3,5	1,0	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445
		2,0	3.007	13.835
			4.916	23.000
			7.007	32.239
			9.008	41.445

NUMUNE	c/D	l/D	$Q(\text{lt/s})$	α	F_d
KUM 2 ($d_{50} = 0,62 \text{ mm}$)	2,5	0,0	3.007	15°	13.835
			4.916		23.000
			7.007		32.239
			9.008		41.445
		1,0	3.007		13.835
			4.916		23.000
			7.007		32.239
			9.008		41.445
		0,0	3.007	30°	13.835
			4.916		23.000
			7.007		32.239
			9.008		41.445
		1,0	3.007		13.835
			4.916		23.000
			7.007		32.239
			9.008		41.445

Yapılan deney sonucunda elde edilen çukur geometrilerini gösterir örnek fotoğraflar Resim 4.5’de verilmiştir.



(a)



(b)

Resim 4.5. İki sediment numunesi için de yapılan deneylere ait oyulma konisi fotoğrafları

Deney sonuçları ile ilgili yorumlar ise 5. bölümde sunulmuştur.

5. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

Boyut analizi bölümünde, oyulma çukuru geometrisinin ve uzaklaştırılan sediment hacminin; çıkış yapısının talveg kotuna göre konumuna (c/D), çıkış yapısının ölü son duvarına olan boyutsuz uzaklığına (l/D), densimetrik Froude sayısına (F_d), ölü son duvarının düşeyle yaptığı açıya (α) ve çıkış yapısı merkezinin ölü son duvarından uzakta olduğu durum için ($l/D > 0$) çıkış yapısının boşluk oranına (p) bağlı olduğu ifade edilmiştir.

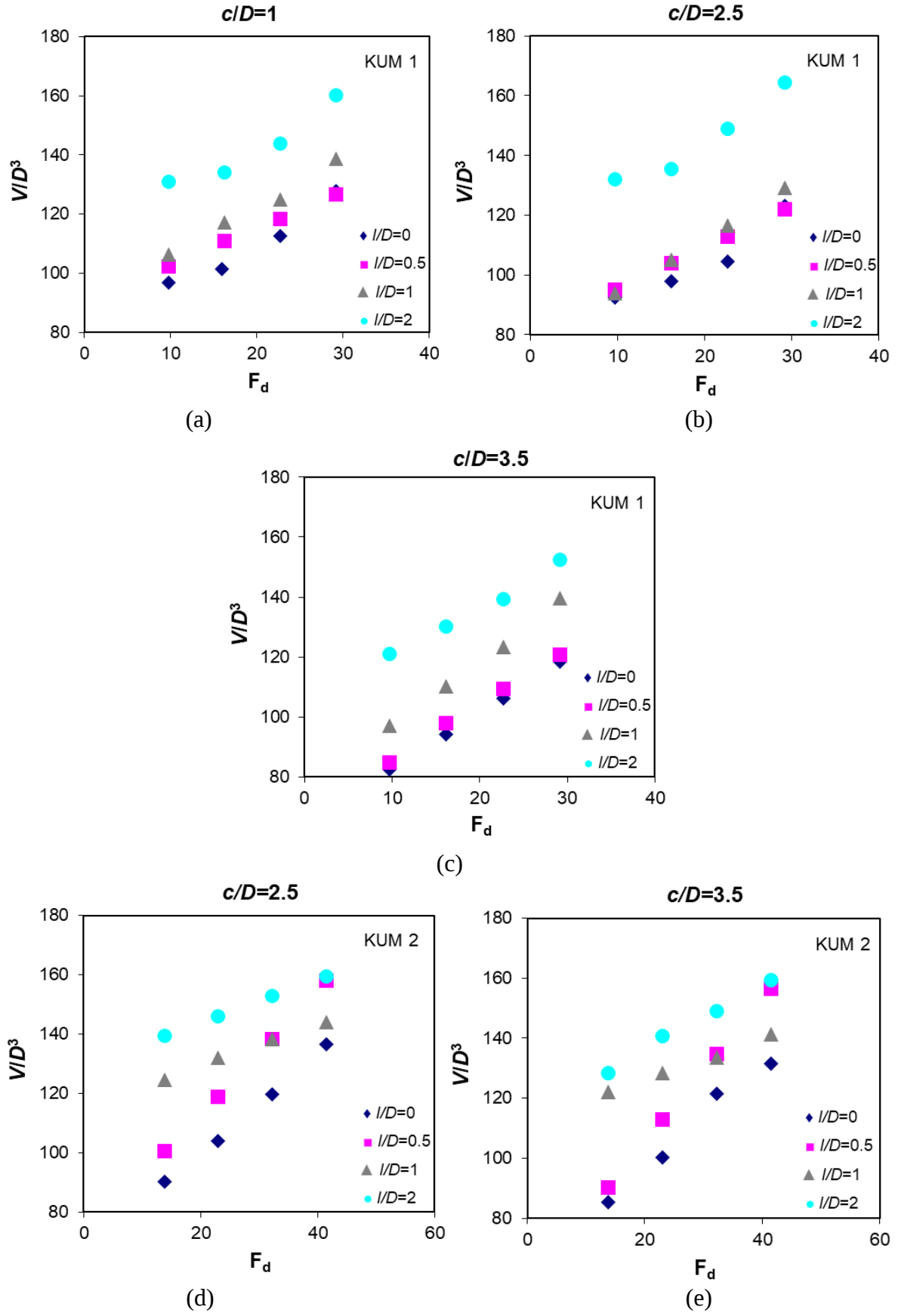
Bu bölümde, uzaklaştırılan sediment hacminin ve oyulma çukuru karakteristiklerinin sayılan boyutsuz parametrelerle nasıl değiştiği ayrı ayrı irdelenmiştir. Bu noktada, sunulan tüm grafiklerdeki oyulma karakteristiklerinin oyulma çukurunun başlangıcından (yani ölü-son duvarının önünden itibaren) ölçüldüğüne dikkat edilmelidir.

5.1. Densimetrik Froude Sayısının Etkisi

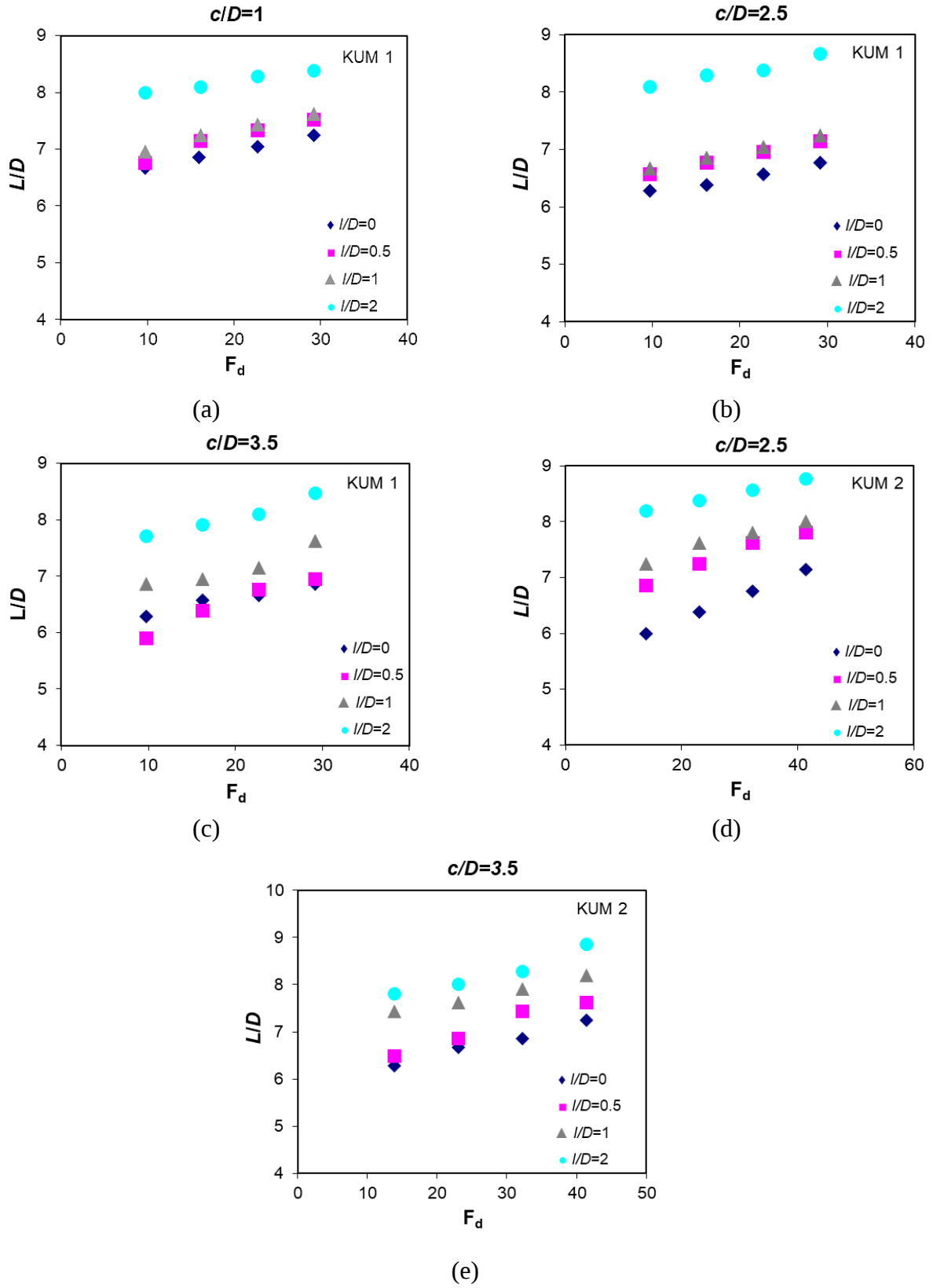
Aşağıda verilen Şekil 5.1-5.3'te sırasıyla oyulma çukuru hacminin, oyulma çukurunun uzunluğunun ve oyulma çukurunun en büyük derinliğinin densimetrik Froude sayısı ile değişimi gösterilmektedir. Kanal genişliği, tüm deneylerde sabit ve maksimum oyulma genişliğine eşit olduğundan verilen grafiklerde maksimum oyulma genişliği irdelenmemiştir.

Densimetrik Froude sayısı, F_d , arttıkça, tabandaki sediment danelerine uygulanan hem sürüklenme hem de kaldırma kuvvetleri ve yüzey altı çevrintilerinin gücü artar. Bu nedenle h_m/D , L/D ve ∇/D^3 oranları da artar. Ayrıca sediment dane çapı büyüdükçe, sediment danelerinin ağırlığı ve bu daneler arasındaki sürtünme kuvvetleri arttığından h_m/D , L/D ve ∇/D^3 oranları azalır.

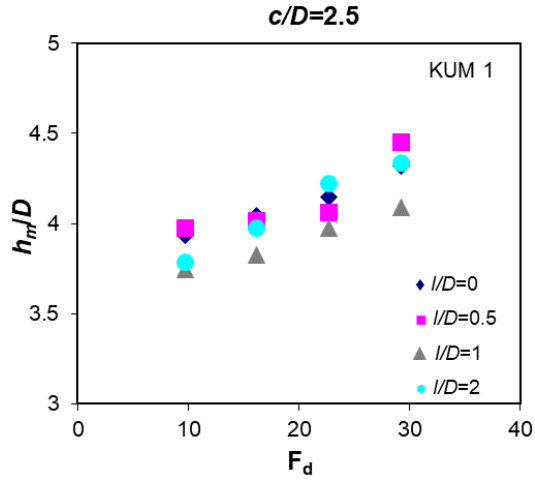
Bu çalışmada tanımlanan F_d , Shields sayısına benzerdir ve hem çıkış yapısı debisini hem de sediment çapını içerir. Densimetrik Froude sayısı, F_d , sediment taşınımı ile ilgili mevcut çalışmalarda sıklıkla kullanılmıştır (Aguirre-Pe ve diğerleri 2003, Oertel ve Bung 2015). Verilen grafiklerde $c/D=1$ değerinde h_m/D değerine ait grafiğinin gösterilmemesinin nedeni oyulma çukuruna ait maksimum derinliğinin kanal tabanına ulaşmasından ötürüdür.



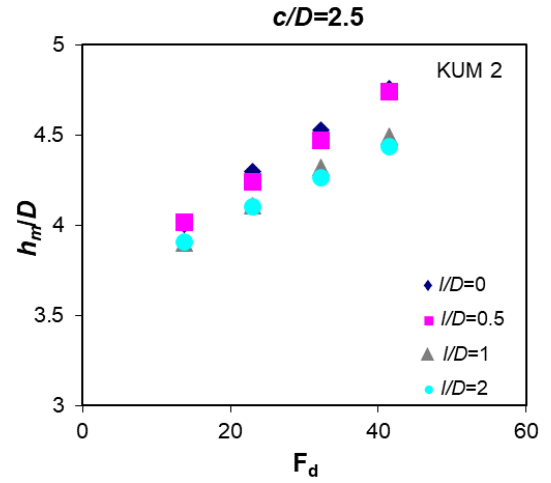
Şekil 5.1. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde densimetrik Froude sayısının etkisi



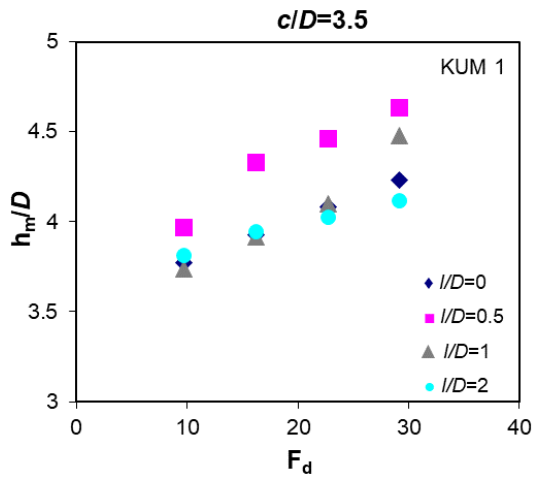
Şekil 5.2. Boyutsuz oyulma çukuru uzunluğu üzerinde densimetrik Froude sayısının etkisi



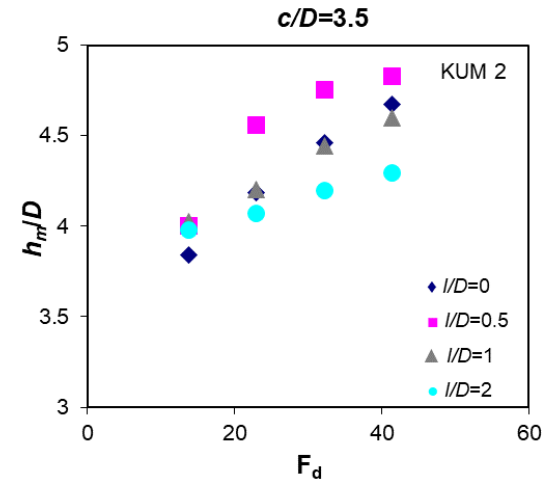
(a)



(b)



(c)

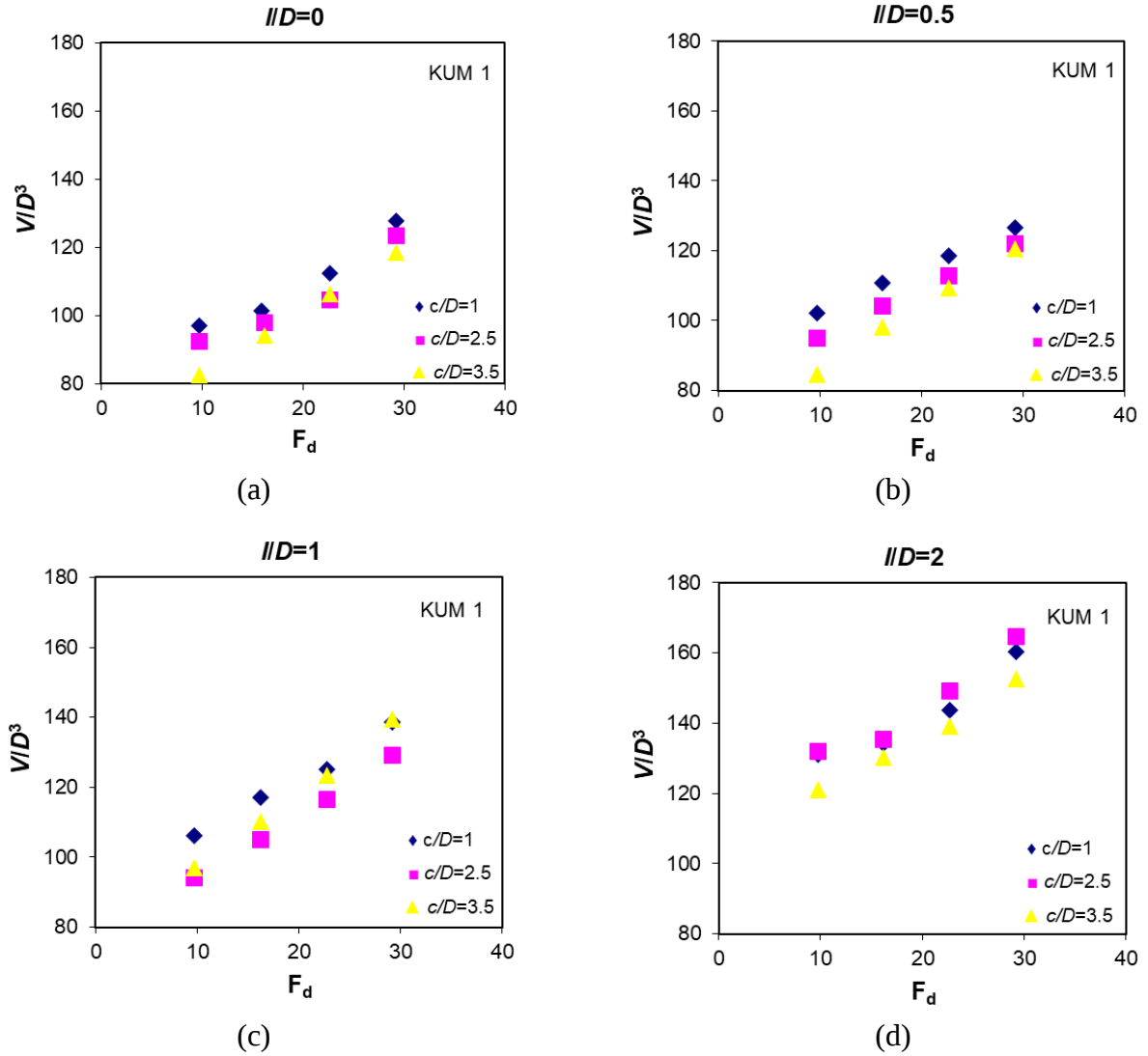


(d)

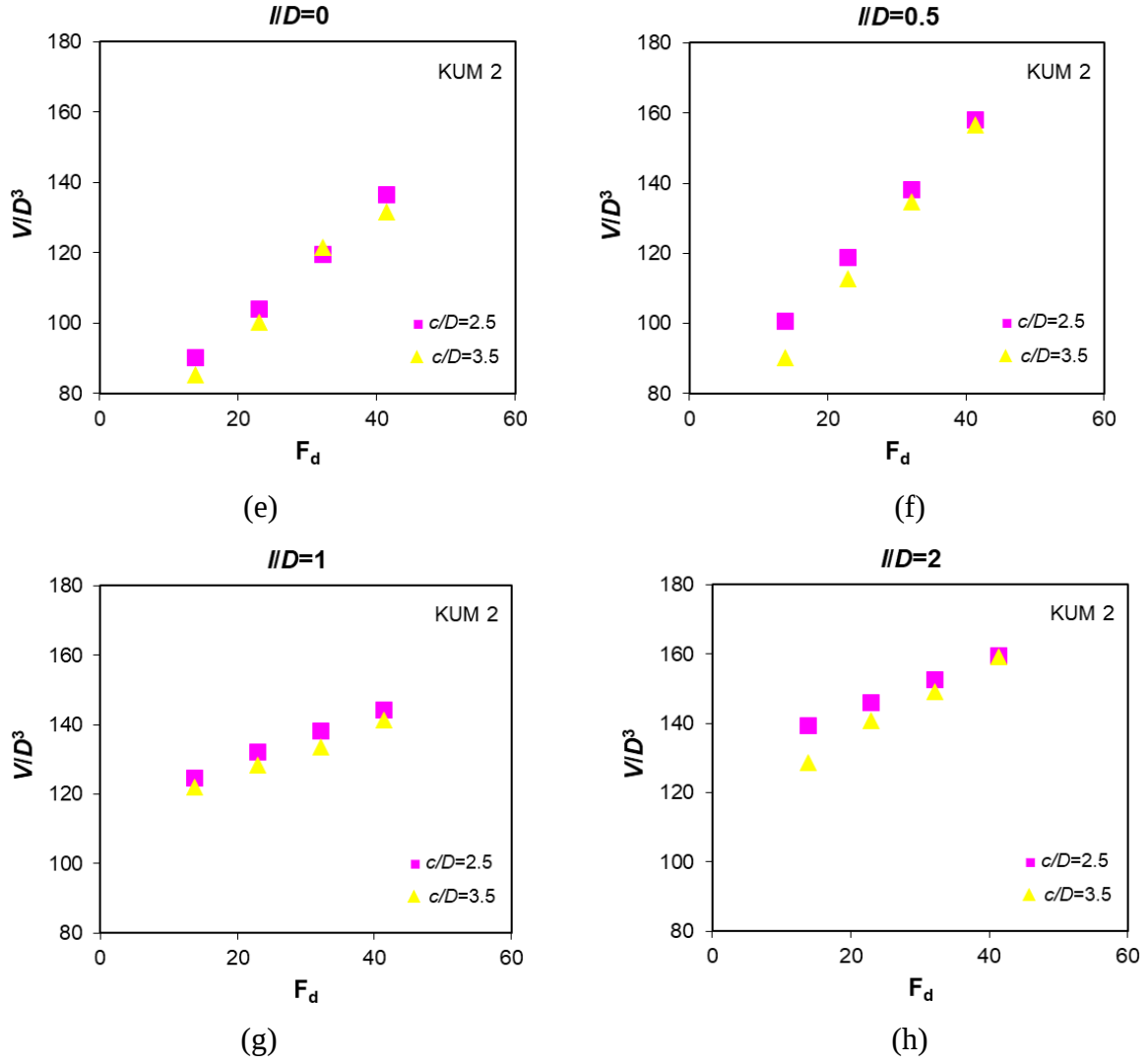
Şekil 5.3. Boyutsuz oyulma derinliği üzerinde densimetrik Froude sayısının etkisi

5.2. Çıkış Yapısı Merkezi ile Taban Arasındaki Mesafenin Etkisi

Aşağıda verilen Şekil 5.4 ve Şekil 5.6-5.7’de sırasıyla oyulma çukuru hacminin, oyulma çukurunun uzunluğunun ve oyulma çukurunun en büyük derinliğinin densimetrik Froude sayısı ile değişimi gösterilirken c/D ’nin etkisi araştırılmıştır. Tüm deneylerde maksimum oyulma genişliği kanal genişliği ile aynı olduğu için verilen grafiklerde maksimum oyulma genişliği irdelenememiştir.



Şekil 5.4. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde c/D ’nin etkisi



Şekil 5.4. (devamı) Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde c/D 'nin etkisi

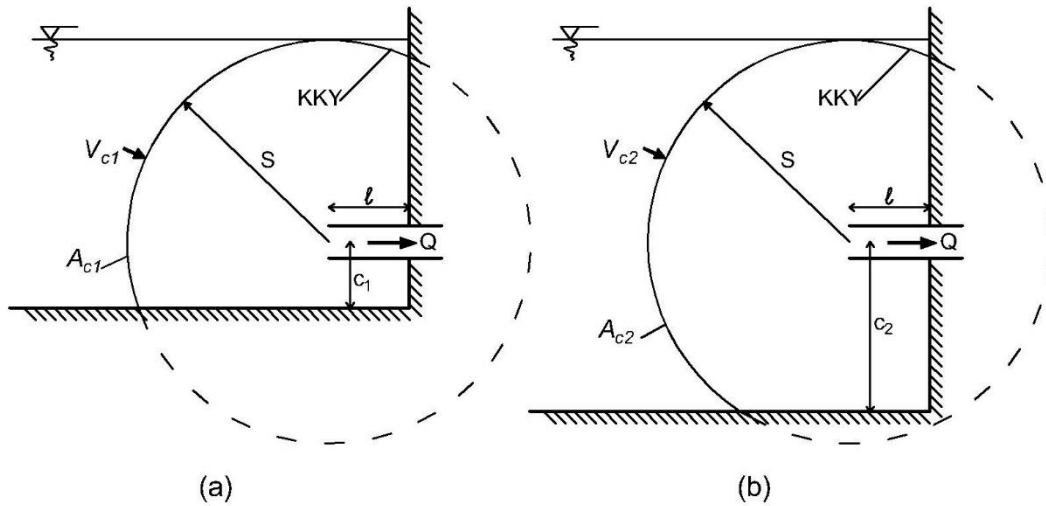
Şekil 5.4 incelendiğinde c/D değeri azaldıkça yani çıkış yapısı tabana yaklaştıkça oyulma çukuru hacminin arttığı görülmektedir. Özellikle, ilk kumda yapılan deneylerde, $c/D=1$ değerinde oyulma çukuru kanal tabanına ulaşmasına rağmen yani mevcut potansiyel taşınabilecek sediment miktarı daha az olmasına rağmen $l/D=0, 0.5$ ve 1 değerlerinde toplam oyulma çukuru hacmi diğer c/D değerlerine göre en büyük olmuştur. l/D arttıkça oyulma hacimleri birbirine yaklaşmaktadır.

Deneysel çalışma kısmında da anlatıldığı gibi oyulma çukuru, çıkış yapısından çekilen debi ve buna bağlı olarak akım alanında basınç farkından dolayı oluşan hız ile çok çabuk bir şekilde oluşup nihai şeklini almaktadır. Dolayısıyla akım alanında çıkış yapısına doğru oluşan hız değerleri arttıkça oyulma çukuru hacmi ve uzunluğunun da artması gerekir.

Bu noktada çıkış yapısı konumunun akım alanında oluşan hız dağılımını nasıl etkilediğinin açıklanması gerekmektedir. Yıldırım ve Kocabaş (1995), potansiyel akım varsayımı sonucunda dairesel bir su alma ağzı durumunda akış alanı içinde ağız ile aynı merkeze ve debiye sahip hayali küresel kuyu yüzeylerinin oluştuğunu göstermiştir. Potansiyel akım çözümüne göre, ağız debisi, Q , şu şekilde yazılabilir:

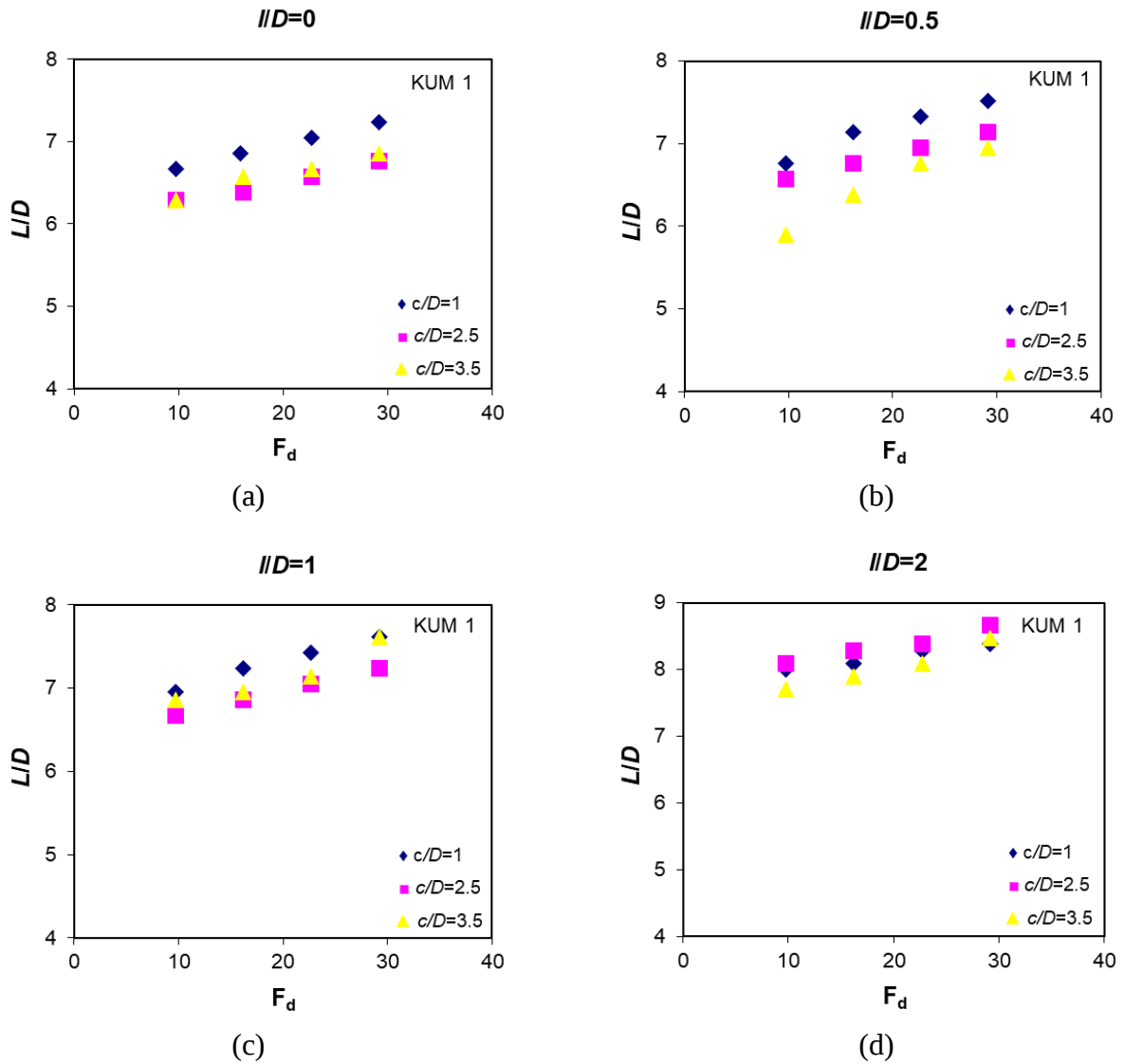
$$Q = A_c V_c \quad (5.1)$$

Eşitlik (5.1)'de, A_c , küresel bir kuyu yüzeyinin (KKY) net etkin yüzey alanıdır ve V_c , KKY üzerindeki radyal hızdır. A_c , KKY'yi kesen sınırların engel etkilerinden dolayı tam bir KKY'den yüzey alanı kaybının çıkarılmasından sonra hesaplanır. Şekil 5.5'te verilen iki farklı durum göz önüne alınsın. Her iki çıkış yapısı da aynı debiye ve ölü son duvarından aynı uzaklığa sahip olsun.

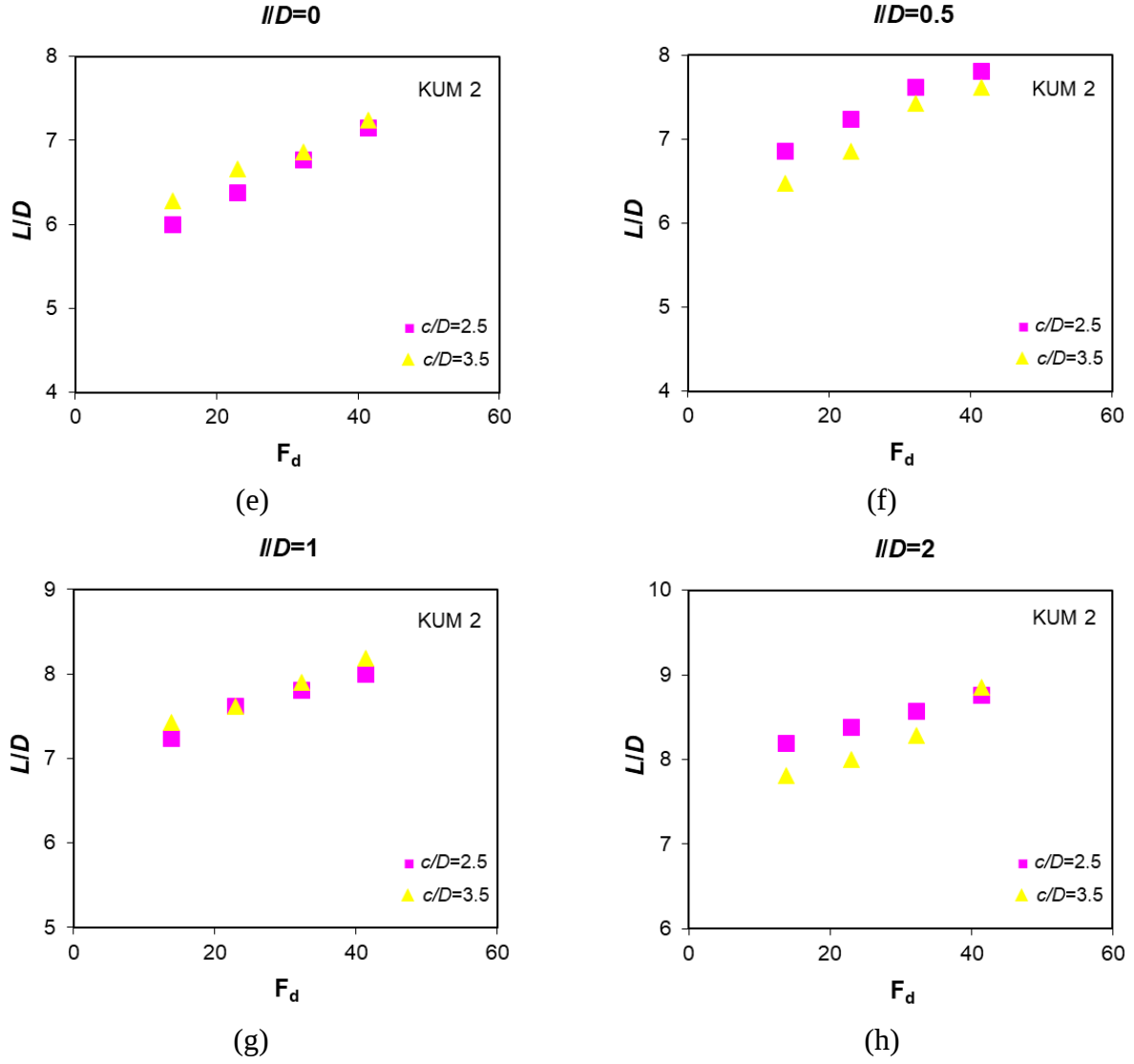


Şekil 5.5. İki farklı çıkış yapısı konumu için c/D 'nin radyal hız üzerindeki etkisi

Şekil 5.5 (a)'da, çıkış yapısının tabana olan mesafesi (c_1) Şekil 5.5 (b)'deki çıkış yapısının tabana olan mesafesinden (c_2) küçüktür. Çıkış yapısı merkezinden sabit bir S mesafesi uzaklıkta, (a) durumunda KKY'ye ait net etkin yüzey alanı (b) durumundan daha küçük olur. Bu nedenle Eşitlik (5.1)'de verilen süreklilik koşulunu sağlamak için, (a) durumunda KKY üzerindeki ortalama radyal hız (V_{c1}), (b) durumuna (V_{c2}) kıyasla daha büyük olmalıdır. Dolayısıyla, sediment daneleri üzerindeki sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin (a) durumunda (b) durumuna kıyasla çok daha büyük olması, daha fazla sediment parçacığının hareket etmeye başlaması ve çıkış yapısına girmesiyle sonuçlanmaktadır.

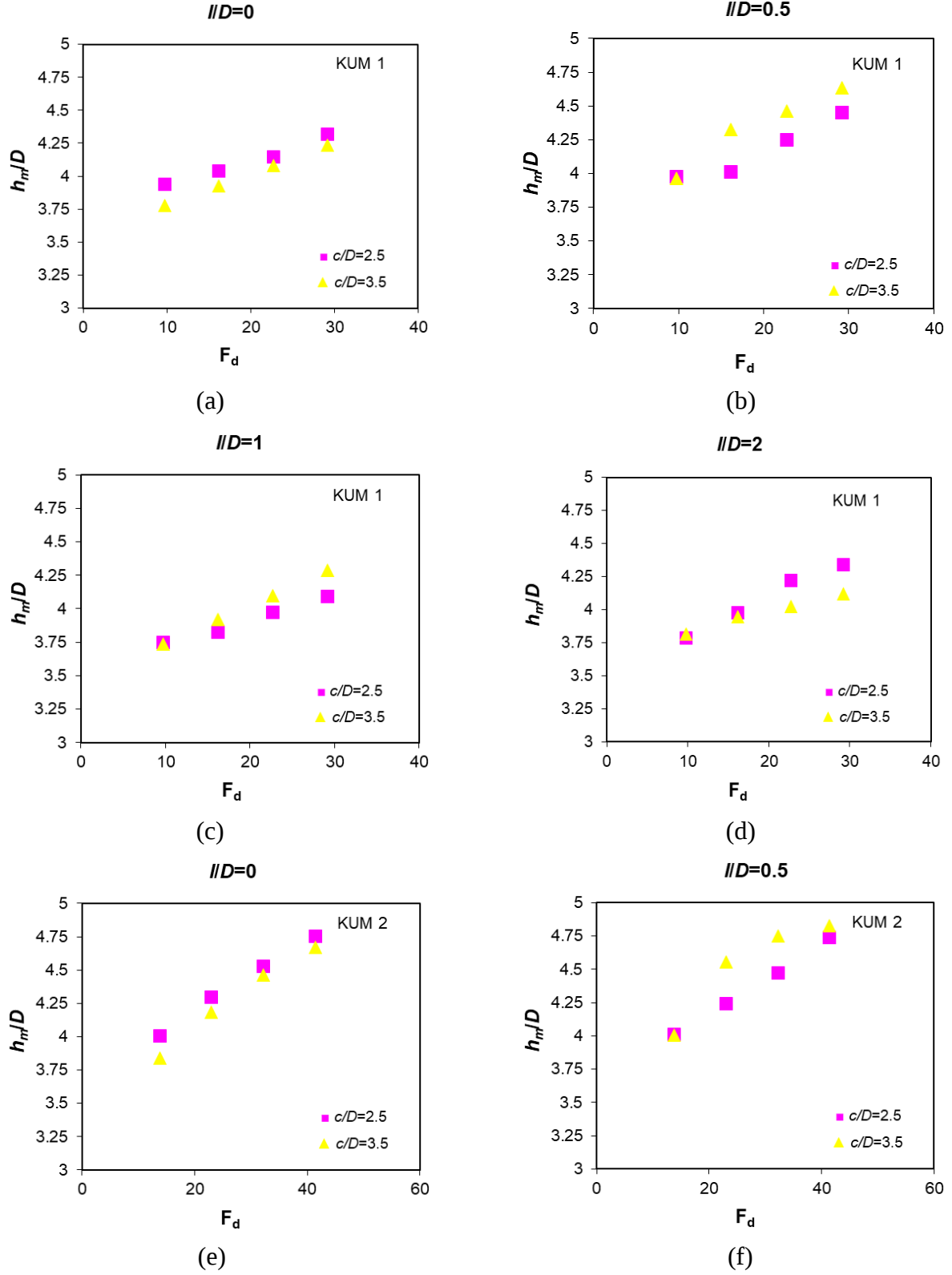


Şekil 5.6. Boyutsuz oyulma çukuru uzunluğu üzerinde c/D 'nin etkisi

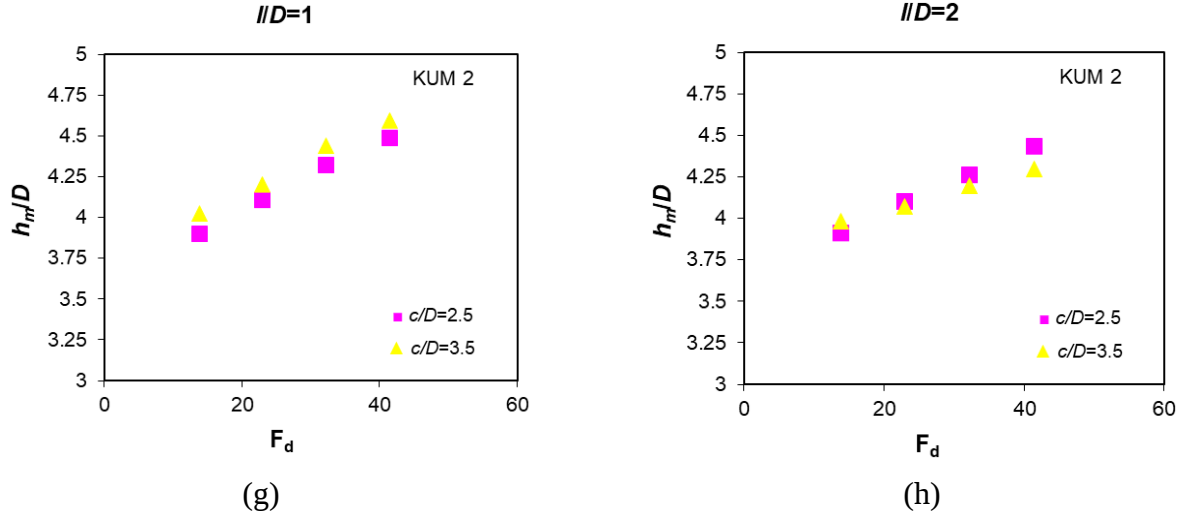


Şekil 5.6. (devamı) Boyutsuz oyulma çukuru uzunluğu üzerinde c/D 'nin etkisi

Şekil 5.6'da oyulma çukuru uzunluğu üzerinde c/D 'nin etkisi görülmektedir. Oyulma çukuru hacminde olduğu gibi oyulma çukuru uzunluğu da, yukarıda anlatılan durumdan dolayı özellikle $l/D=0$ ve 0.5 olduğu durumlarda c/D büyüdükçe oyulma çukuru uzunluğu azalmaktadır.



Şekil 5.7. Boyutsuz oyulma çukuru derinliği üzerinde c/D 'nin etkisi



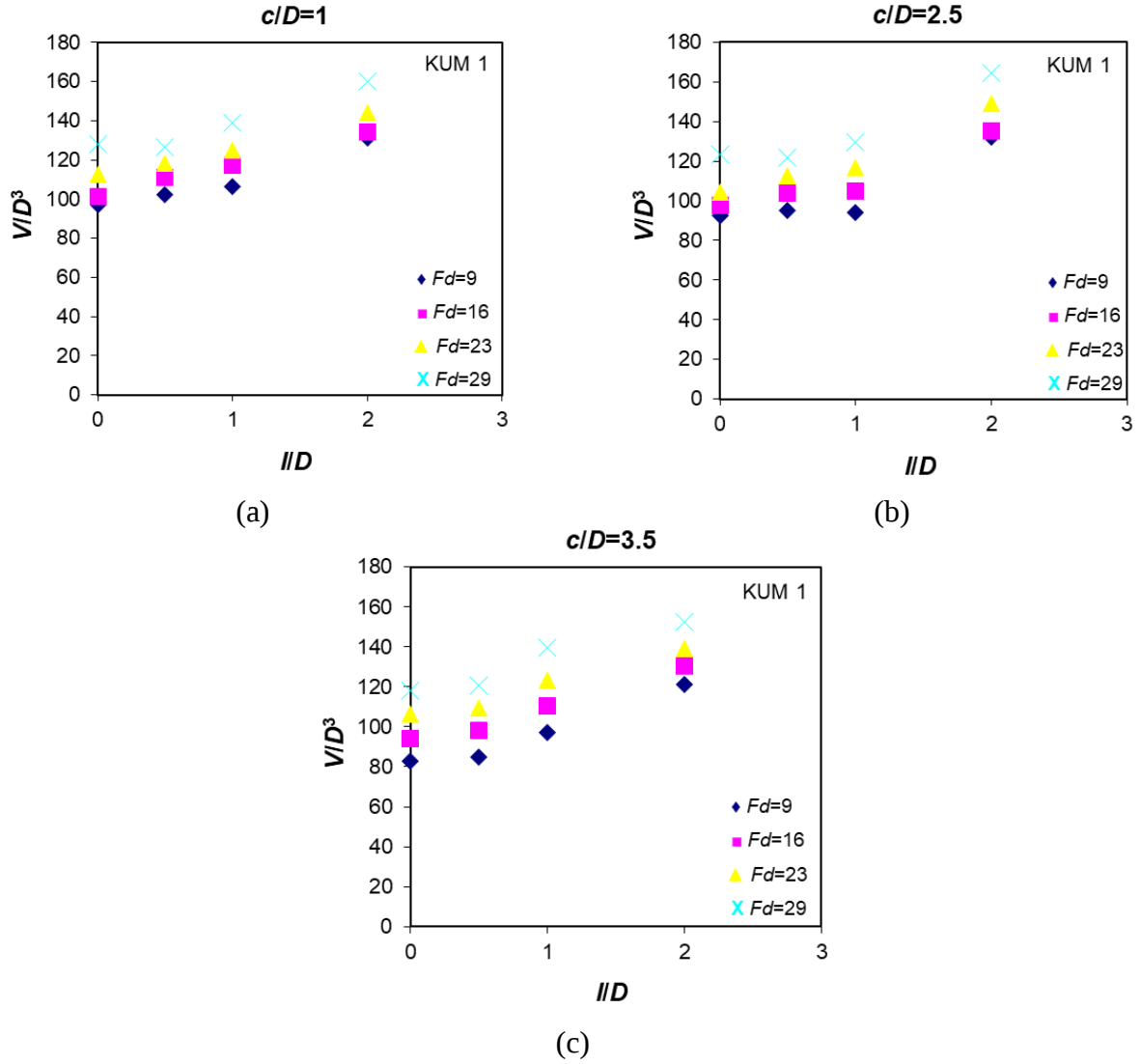
Şekil 5.7. (devamı) Boyutsuz oyulma çukuru derinliği üzerinde c/D 'nin etkisi

Şekil 5.7'de ise oyulma çukurunun en büyük derinliğinin c/D ile değişimi gösterilmiştir. İlk kumda yapılan ve c/D değerinin 1'e eşit olduğu durumda oyulma çukuru kanal tabanına ulaştığından bu veriler gösterilmemiştir.

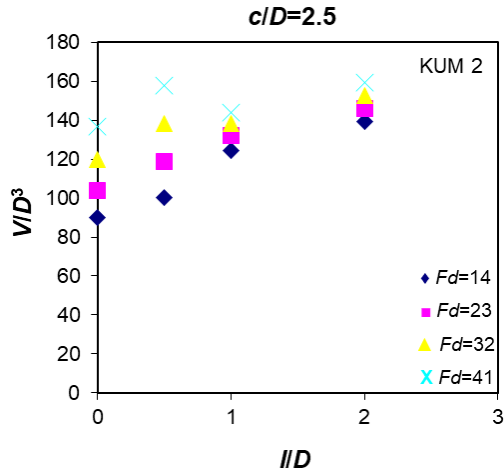
Oyulma çukuru derinliğindeki değişimin, çukur hacmi ve uzunluğuna göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü oyulma çukuru derinliği üzerinde ileride anlatılacak olan yüzey altı çevrintileri önemli rol oynamaktadır. Bu çevrintilerin şiddeti de c/D 'den daha çok l/D boyutsuz uzunluğundan etkilenmektedir.

5.3. Çıkış Yapısı Merkezi Ölü Son Duvarı Arasındaki Mesafenin Etkisi

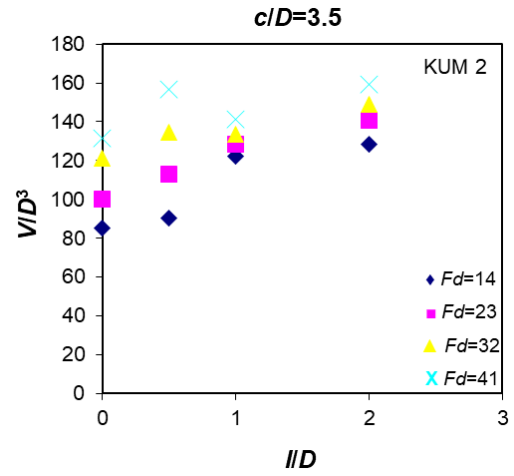
Aşağıda verilen Şekil 5.8-5.10'da sırasıyla; oyulma çukuru hacminin, oyulma çukurunun uzunluğunun ve oyulma çukurunun en büyük derinliğinin l/D ile değişimi araştırılmıştır. Tüm deneylerde maksimum oyulma genişliği kanal genişliği ile aynı olduğu için verilen grafiklerde maksimum oyulma genişliği irdelenmemiştir.



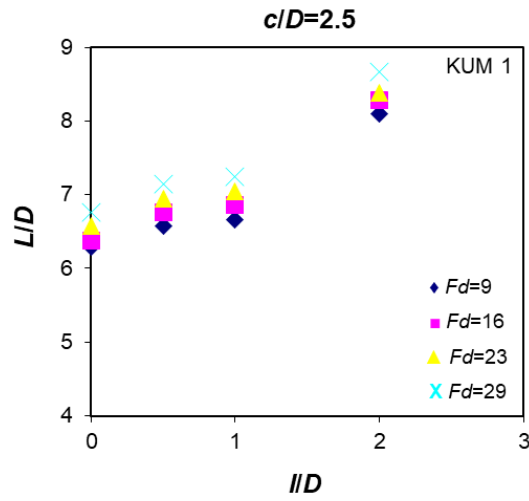
Şekil 5.8. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde l/D 'nin etkisi



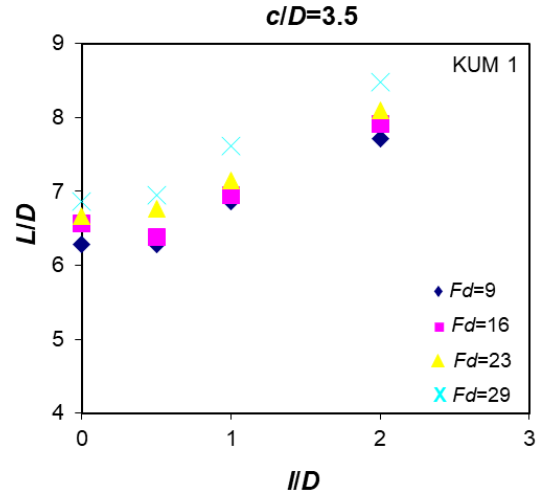
(d)



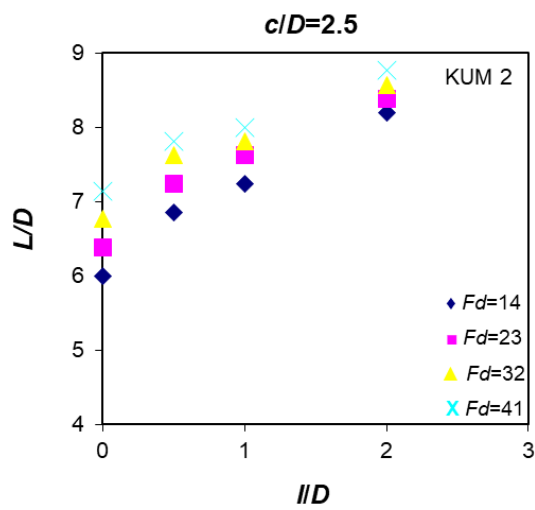
(e)

Şekil 5.8. (devamı) Boyutsuz oyulma çukuru hacmi üzerinde l/D 'nin etkisi

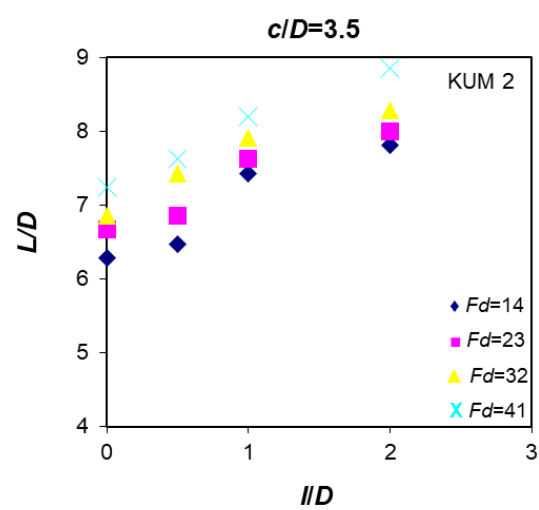
(a)



(b)

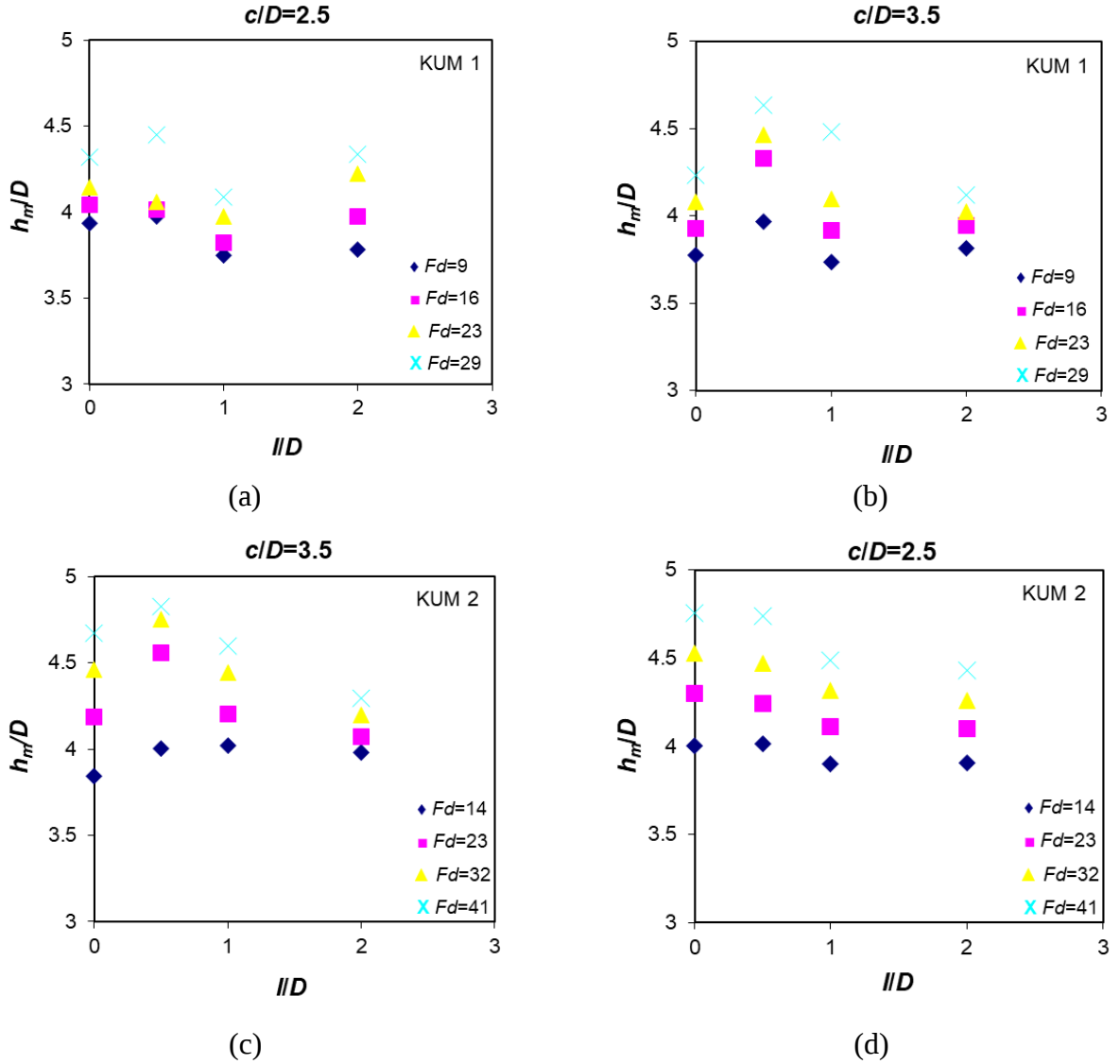


(c)



(d)

Şekil 5.9. Boyutsuz oyulma çukuru uzunluğu üzerinde l/D 'nin etkisi



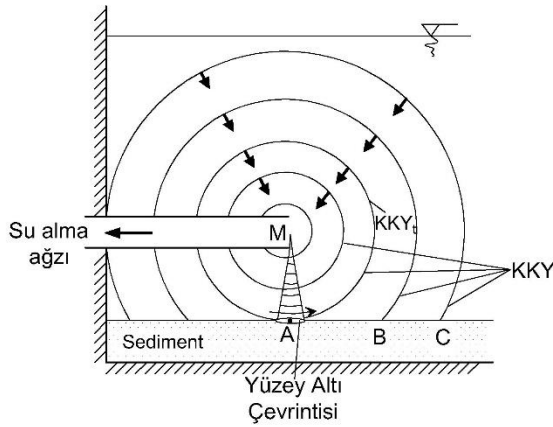
Şekil 5.10. Boyutsuz oyulma çukuru derinliği üzerinde l/D 'nin etkisi

Çıkış yapısı merkezi ile ölü son duvarı arasındaki yatay mesafenin oyulma çukuru parametreleri üzerinde iki farklı etkisi bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi çıkış yapısı merkezi ile taban arasındaki mesafede anlatıldığı gibi KKY'nin net alanı azaldığında üzerindeki radyal hızın artarak daha çok sedimentin taşınmasına neden olması olayıdır. Dolayısıyla l/D azaldıkça KKY üzerindeki ortalama radyal hız arttığından oyulma hacminde de bir artış olması beklenebilir.

Fakat çıkış yapısı merkezi ile ölü son duvarı arasındaki mesafenin çıkış yapısı ile taban arasında oluşan su altı çevrintileri üzerinde de önemli bir etkisi vardır. Bu su altı çevrintileri özellikle oyulmanın ilerleyen aşamalarında (çıkış yapısından debi alınmaya başladıktan ve çöküntünün su alma yapısı seviyesine ulaştığı andan sonra) önemini artırır.

Dolayısıyla oyulma çukuru oluşumunun büyük bölümü debi ve neticesinde oluşan hızlar neticesinde gerçekleşirken oyulma çukurunun ilerleyen safhalarında çıkış yapısı ile kanal tabanı arasında gerçekleşen su altı çevrintilerinin de etkisi görülür. Bu konu aşağıda daha detaylı anlatılmıştır.

Bu çalışmada yapılan deneylerde, tabandaki sediment danelerinin oyulma çukuru belirginleştikten sonra taban ile çıkış yapısının en alt noktası arasında oluşan bir yüzey altı çevrintisi ile çıkış yapısına girdiği gözlemlenmiştir. Bu durum Powell ve Khan'ın (2012) su alma ağızlarının önündeki oyulmayı incelediği çalışmada da gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bir yüzey altı çevrintisinin oluşumu aşağıdaki gibi açıklanmıştır.



Şekil 5.11. Yüzey altı çevrintisinin oluşumu

Şekil 5.11'deki durumda oluşan KKY'leri ele alınsın. Taban üzerinde bulunan akışkan taneleri (yani, Şekil 5.11'deki A, B, C) düşük hızlara sahip olduğundan bu nedenle tabana yakın küresel kuyu yüzeyi (KKY) bölümleri, KKY'nin sınırdan uzak bölümlerine kıyasla daha küçük büzülme hızlarına sahiptir.

Bu durum, büyük hız gradyanlarının gelişmesine ve dolayısıyla tabanda güçlü bir vortisite oluşmasına yol açar. Yüksek vortisiteli akışın tamamı KKY_t üzerinde bulunan A noktasından geçmelidir (Yıldırım ve diğerleri, 2012). Çevrintinin gücü yeterince artarsa, yataktaki sediment daneleri kaldırılır ve yüzey altı çevrintileri vasıtasıyla çıkış yapısına girer.

Yüzey altı çevrintileri, çevrinti merkezine yakın bir sınırın neden olduğu sürtünme etkilerine karşı çok hassastır. Yüzey altı çevrintisine yakın bir sınır (örneğin ölü son duvarı), sınır sürtünme etkisinden dolayı bir yüzey altı çevrintisinin oluşmasını önleyebilir veya gücünü azaltabilir. Bu etki, genel olarak, çevrinti ile katı sınır arasındaki mesafeye bağlıdır. Taştan (2017), katı bir sınırın sürtünmesinin serbest yüzey çevrintisi oluşumu üzerindeki etkisini araştırmıştır.

Serbest yüzey ve yüzey altı çevrintileri şekil itibariyle farklı görünse de oluşum mekanizmaları Yıldırım ve diğerleri (2012) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği gibi aynıdır. Taştan (2017), çevrinti merkezi ile katı sınır arasında belirli bir mesafe bırakıldıktan sonra, serbest yüzey çevrintisi oluşumunda katı sınırın sürtünme etkisinin ihmal edilebileceğini ve maksimum sürtünme etkisinin katı sınırın çevrintinin merkezine yerleştirildiği durumda olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada da, katı bir sınırın (yani ölü-son duvarının) yüzey altı çevrintilerinin gelişimi üzerindeki sürtünme etkileri açısından benzer sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla, L/D mesafesinin azalışı yüzey altı çevrintilerinin şiddetini azaltırken, KKY'deki radyal hızların büyüklüğünü arttırmaktadır. Bu durum da oyulma parametreleri üzerinde birbirine zıt iki sonuç oluşturur. L/D arttıkça sürtünme etkisi azalıp çukur boyutları bir taraftan genişlemeye çalışırken KKY üzerindeki radyal hız azaldığından bu büyüme yeteri kadar olamamaktadır.

Hatta bu iki etkinin göreceli büyüklüğüne bağlı olarak özellikle oyulma çukuru derinliğinin L/D 'nin küçük değerlerinde (örneğin $L/D = 0$) yüzey altı çevrintiler üzerinde sürtünme etkisinden dolayı önce küçük bir değer aldığı, sürtünme etkisini yitirmeye başladığında da bir miktar arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.10).

5.4. Çıkış Yapısı Boşluk Oranının Etkisi

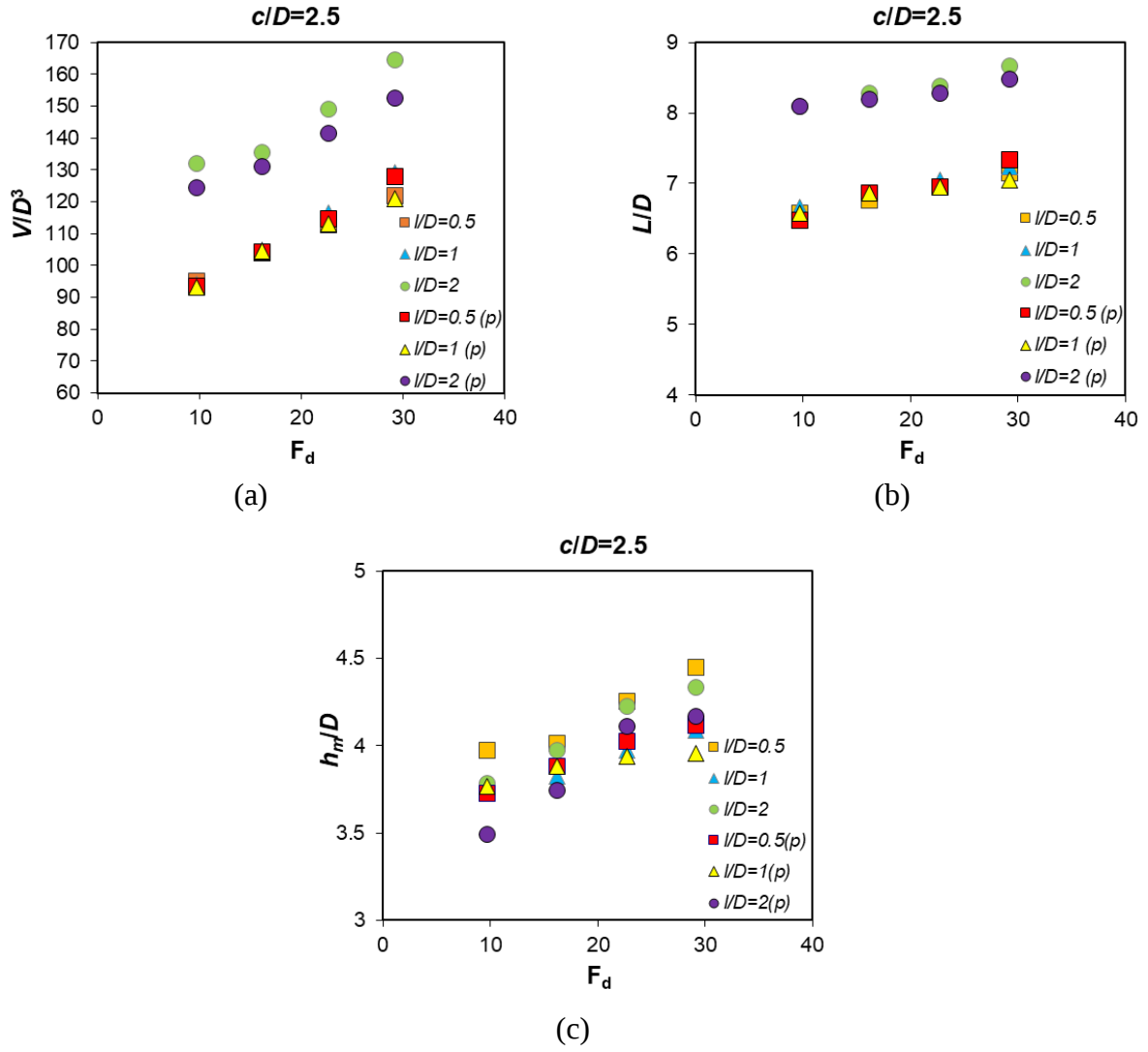
Çıkış yapısının ölü son duvarına bitişik olmadığı durumlarda çıkış yapısı üzerine açılan delikler vasıtasıyla gözenekli bir yüzey oluşturulmuştur (Resim 5.1). Bu yüzeye ait boşluk oranının değeri, delikler yardımıyla oluşturulan boşluk alanının çıkış yapısının tüm yanal alanına oranı %30 olarak tüm deneylerde belirlenmiştir.



Resim 5.1. Üzerinde delikler oluşturulan bir çıkış yapısı

Aşağıda verilen Şekil 5.12’de sırasıyla 1 numaralı sediment numunesi için oyulma çukuru hacminin, oyulma çukurunun uzunluğunun ve oyulma çukurunun en büyük derinliğinin üzerinde çıkış yapısının yanal yüzeyindeki boşluk oranının etkisi gösterilmiştir.

Tüm deneylerde maksimum oyulma genişliği kanal genişliği ile aynı olduğu için verilen grafiklerde maksimum oyulma genişliği irdelenmemiştir. Bu şekillerde (p) ile gösterilen deney verileri boşluk oranlı durumu göstermektedir.



Şekil 5.12. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi, uzunluğu ve derinliği üzerinde boşluk oranının etkisi

Yapılan deneyler sonucunda çıkış yapısı üzerinde yapılan bu değişikliğin oyulma çukuru hacminin arttırması yönünde önemli bir katkı yapmadığı görülmüştür. Bu sebeple ikinci sediment örneği ($d_{50}=0,62$ mm) ile ilk sediment örneğinde yapılan tüm deneyler tekrarlanmamıştır. Çıkış yapısı boşluk oranının olumlu etkisinin olmayışının sebebi aşağıda açıklanmıştır. Deneysel çalışma kısmında açıklandığı gibi, bu çalışmada laboratuvar imkânlarındaki kısıtlar da düşünülerek çıkış yapısından alınan debi pompa yardımıyla çekilmiştir. Böylece su seviyesinin çok yükselmesine gerek kalmadan daha büyük bir debi aralığında çalışılabilmektedir. Gerçek rezervuarlarda ise bu akım sadece yerçekiminin etkisiyle oluşmaktadır.

Laboratuvarda pompa ile yapılan su alımında, sabit bir debi için, çıkış yapısında bulunan delikler ilave yerel kayıplara neden olduğundan ağza doğru gelişen hız değerlerinde de azalmaya neden olmuştur. Bu durum da oyulma çukuru hacmi ve diğer parametreleri üzerinde negatif bir etki yaratmıştır. Ancak gerçek bir baraj durumunda (yerçekimi etkisi altında orifis akımı olması durumunda) çıkış yapısı üzerinde bulunan delikler çıkış yapısından alınacak debiyi arttıracak tahmin edilmektedir. Bunun da çukur hacmini arttıracakı olasıdır. Ancak mevcut çalışmada laboratuvar imkânları düşünüldüğünde pompa ile çalışıldığından bu durum incelenememiştir.

5.5. Ölü Son Duvarının Düşeyle Yaptığı Açının Etkisi

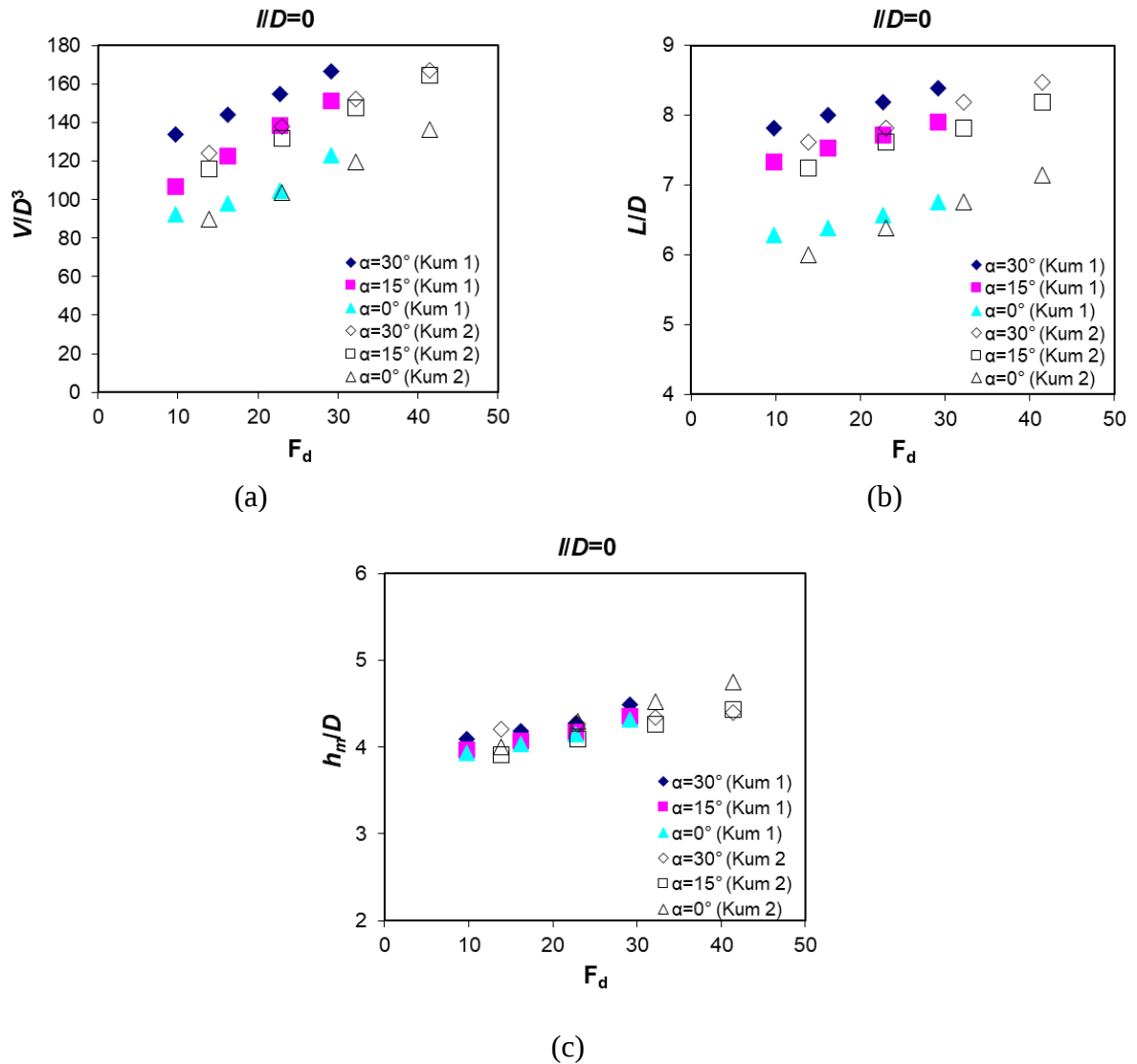
Aşağıda verilen Şekil 5.13 ve 5.14'te sırasıyla oyulma çukuru hacminin, oyulma çukurunun uzunluğunun ve oyulma çukurunun en büyük derinliğinin üzerinde ölü son duvarının düşeyle yaptığı açının (Resim 5.2) etkisi araştırılmıştır.



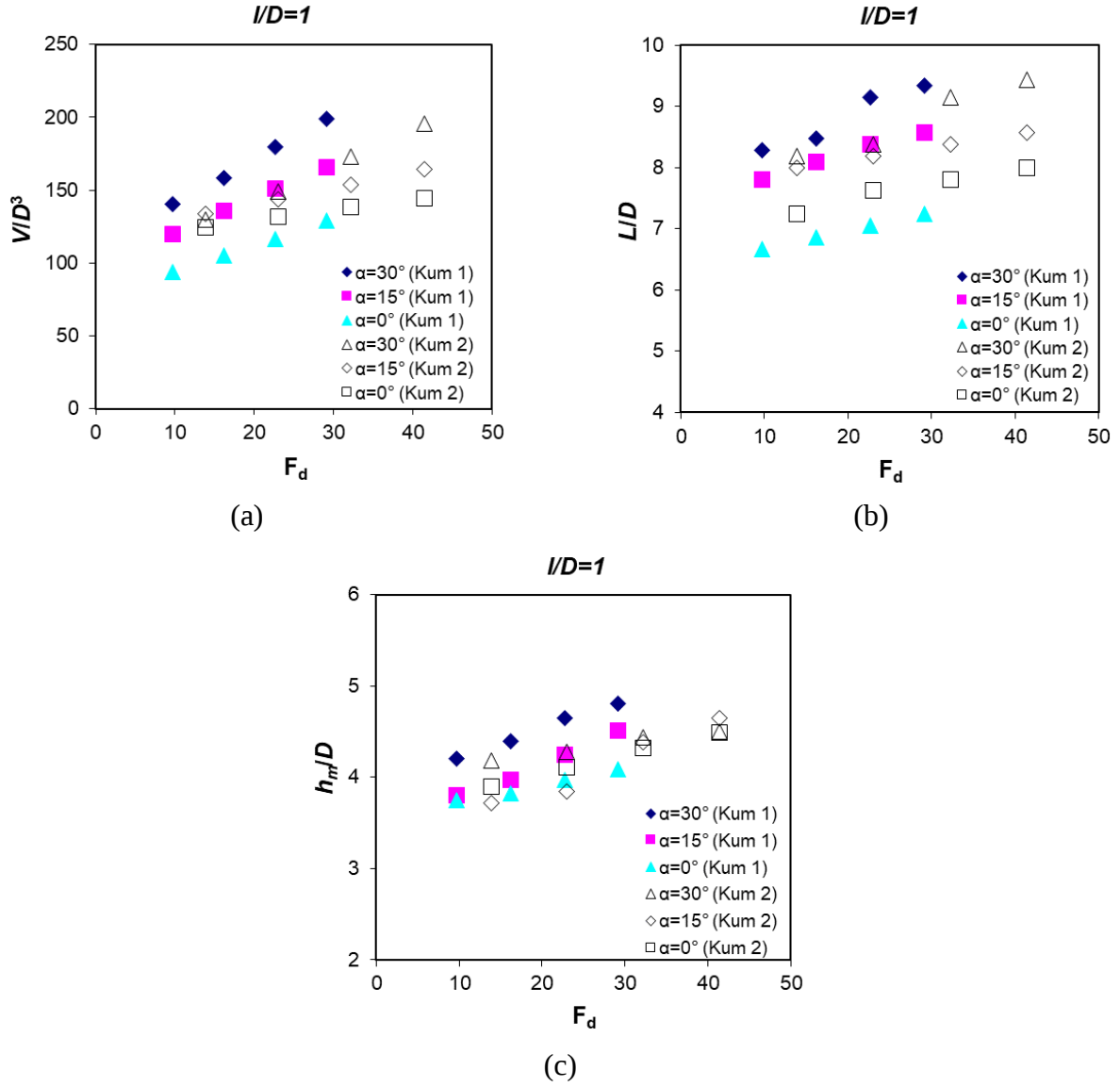
Resim 5.2. Açılı ölü son duvarı

Deneyle, çıkış yapısı merkezinin ölü son duvarıyla arasındaki mesafenin (l/D) 0 ve 1 olduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde $c/D=2,5$ olarak sabit tutulmuş ve maksimum oyulma genişliği kanal genişliği ile aynı olduğu için verilen grafiklerde maksimum oyulma genişliği irdelenmemiştir.

Şekil 5.13 ve 5.14'ten de görülebileceği gibi ölü son duvarının düşeyle yaptığı açı arttıkça oyulma çukurunun hacmi ve uzunluğu artarken derinliğinde önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Düşeyle yapılan açı arttıkça oyulma potansiyeli bulunan sediment hacmi artacağından uzaklaştırılan toplam sediment hacminin artması beklenen bir durumdur.



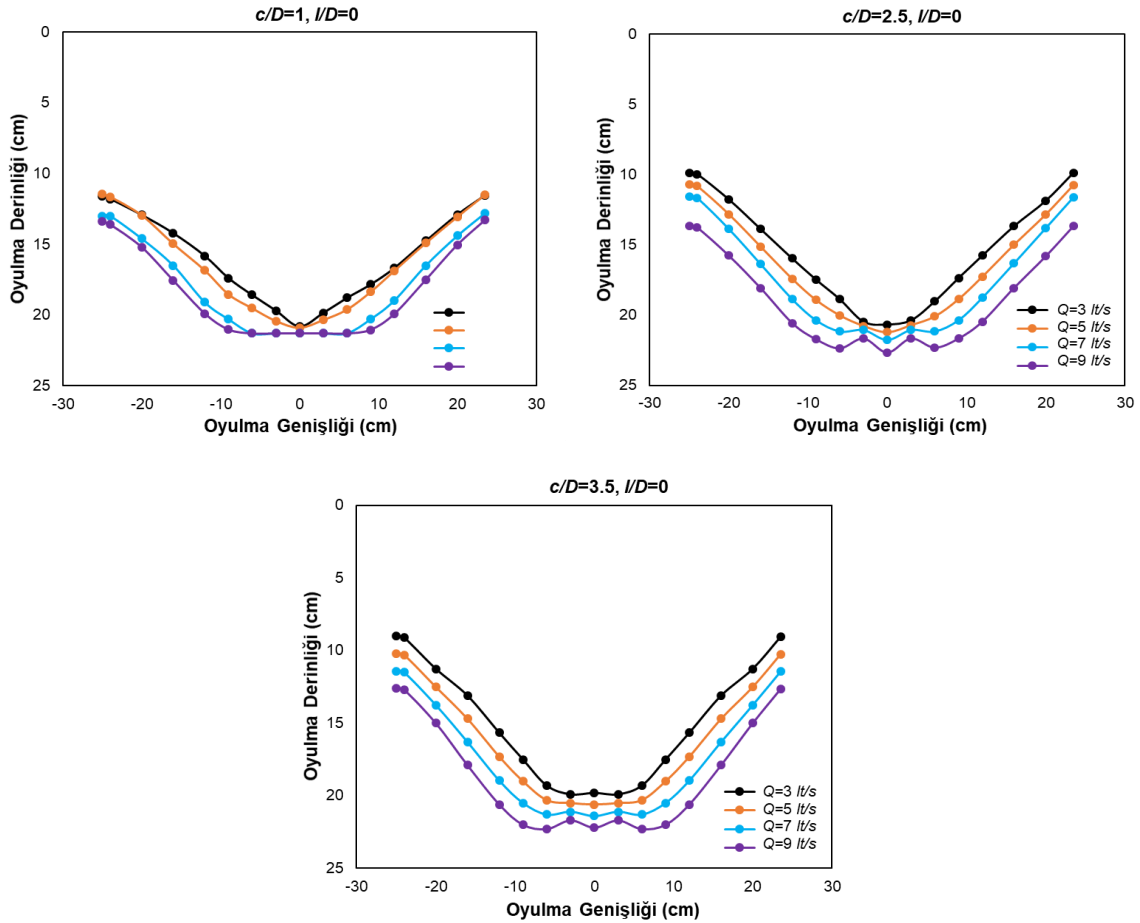
Şekil 5.13. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi, uzunluğu ve derinliği üzerinde ölü son duvarının düşeyle yaptığı açının etkisi ($l/D=0$)



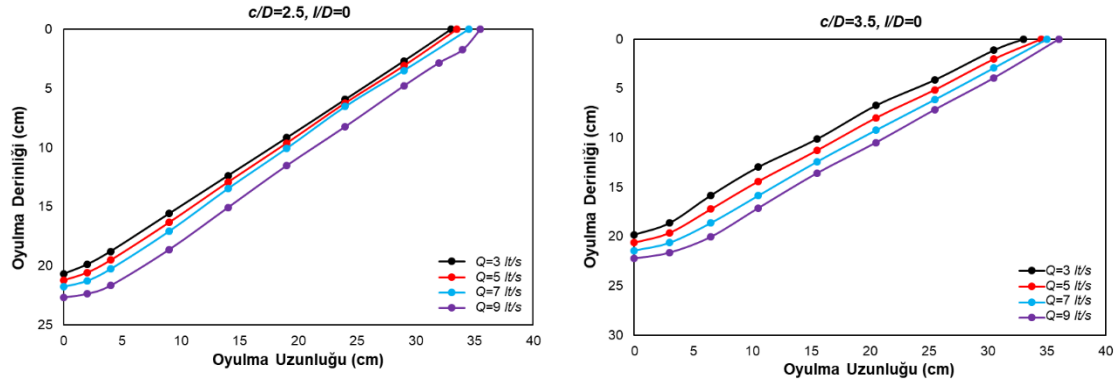
Şekil 5.14. Boyutsuz oyulma çukuru hacmi, uzunluğu ve derinliği üzerinde ölü son duvarının düşeyle yaptığı açının etkisi ($l/D=1$)

5.6. Oyulma Çukuru Geometrisi

Bu başlık altında deneylerden elde edilen oyulma çukurunun yapısı incelenmektedir. Su alma ağzı ekseninden alınan boy profil ile ölü son duvarı önünden alınan enine kesitler karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı deney düzeneği ve akım koşulları için tipik oyulma çukuru geometrilerinin şev açıları incelenmiş ve kullanılan sediment numunesinin içsel sürtünme açısı ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafikler ve yorumları aşağıda verilmiştir. Bu grafiklerin tüm deney sonuçlarını yansıtmadığına, sadece fiziksel davranışı ortaya koymak adına kum 1 olarak isimlendirilen sediment numunesi ($d_{50}=1,25$ mm) ile gerçekleştirilmiş deneylerden seçilen bazı örneklerle ait olduğuna dikkat edilmelidir. Çizilen grafiklerde düşey eksenin sıfırı olarak deney öncesi sediment üst kotu, yatay eksen sıfırı ise boru eksen alınmıştır.

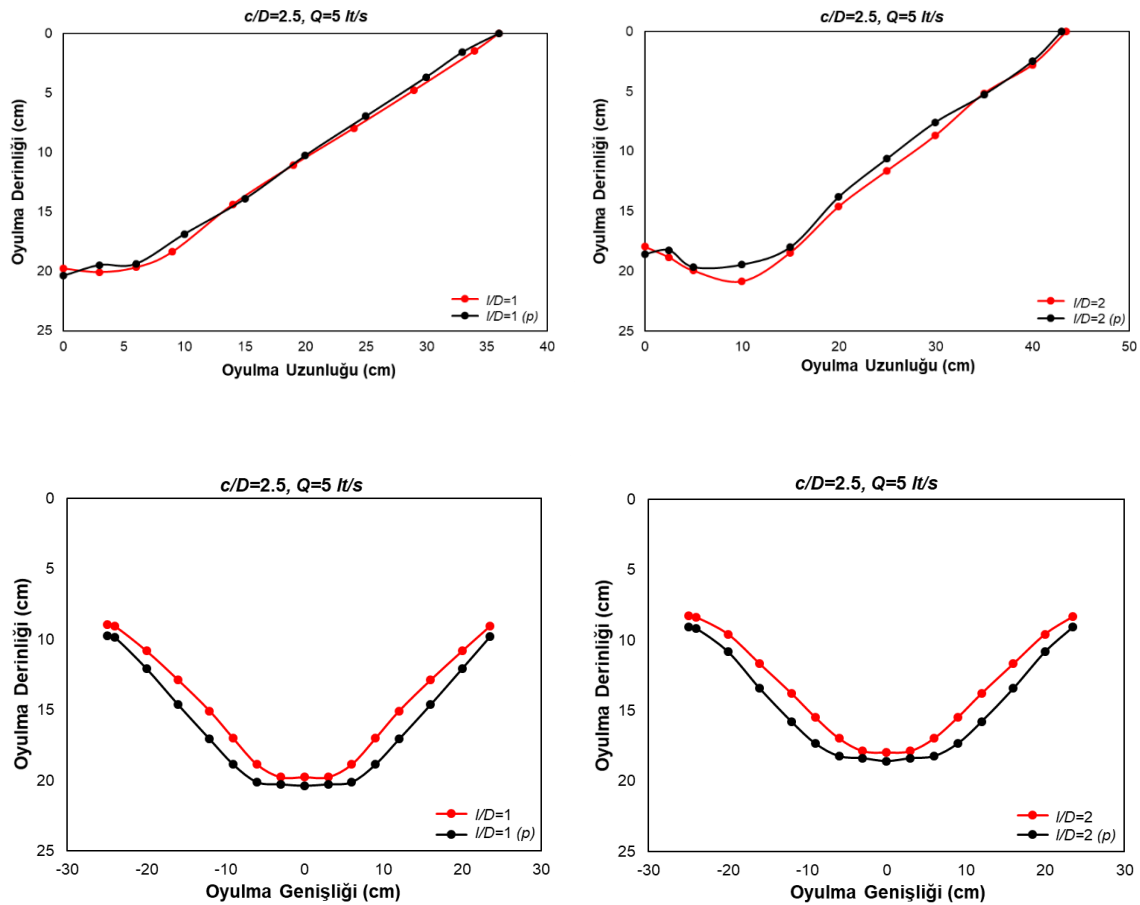


Şekil 5.15. Sabit I/D için oyulma çukuru kesitinin değişimi



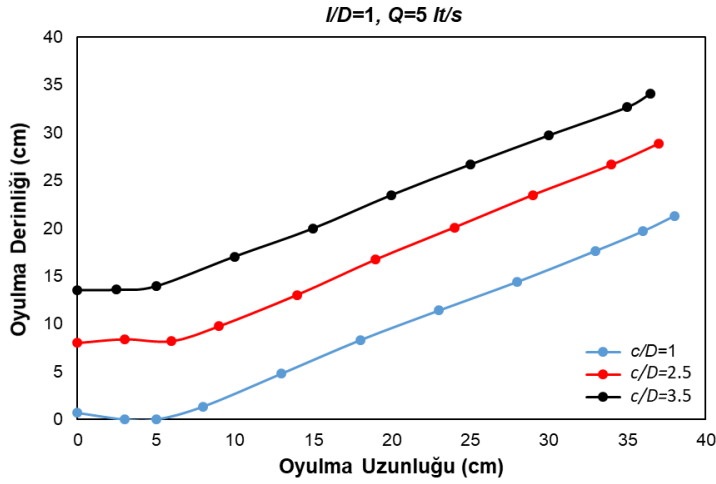
Şekil 5.16. $l/D=0$ için oyulma çukuru uzunluğunun debiye göre değişimi

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'dan görüleceği üzere, sabit l/D ve c/D parametreleri altında, debi miktarı arttıkça (bir başka ifade ile densimetrik Froude sayısı arttıkça) oyulma çukurunun maksimum derinliği ve uzunluğu artmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, oyulma çukurunun genişliği kanal genişliği ile aynı olduğundan, verilen grafiklerde maksimum oyulma genişliği incelenmemiştir.



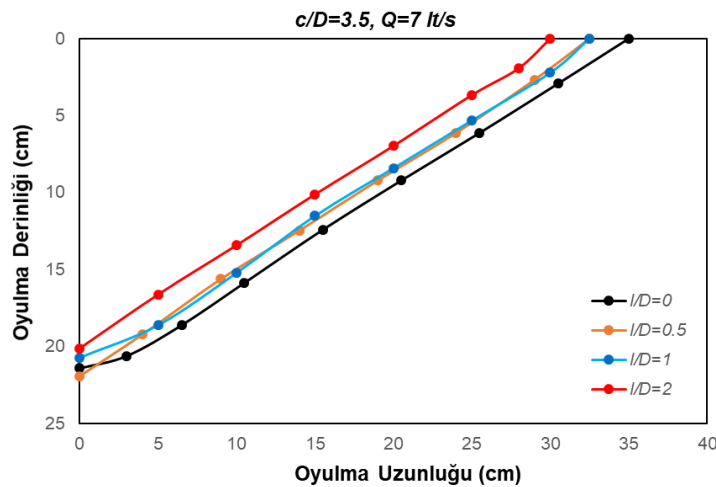
Şekil 5.17. $c/D=2.5$ için oyulma çukuru genişliği ve uzunluğunun boşluk oranına göre değişimi

Şekil 5.17'deki grafikler; $c/D=2,5$ ve $Q=5$ lt/sn sabit değerleri altında $l/D=1$ ve 2 değerleri için çıkış yapısının gözenekli ve gözeneksiz olduğu durumlarda oyulma uzunluğu ve genişliğinin mukayesesini göstermektedir. Çıkış yapısı üzerindeki ilave delikler, ağız ekseninden geçen kesit göz önüne alındığında oyulma çukuru derinliği ve uzunluğu üzerinde daha önce açıklanan sebeplerden ötürü olumlu bir etki yaratmamaktadır.



Şekil 5.18. $l/D=1$ için oyulma çukuru uzunluğunun c/D 'ye göre değişimi

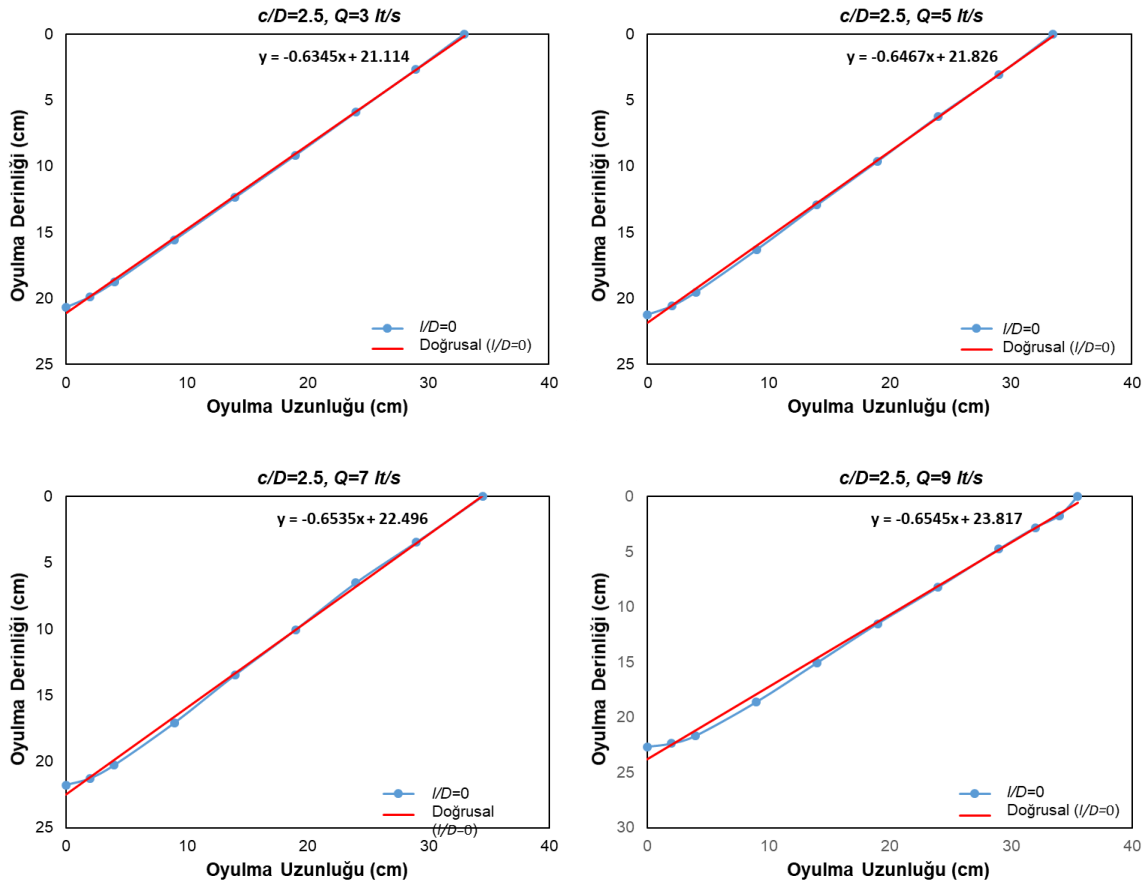
Şekil 5.18 ise sabit $l/D=1$ ve $Q=5$ lt/s durumunda çıkış yapısı merkezinin kanal tabanı ile farklı mesafelerindeki oyulma çukuru uzunluğunun değişimini göstermektedir. Grafikten görülebileceği üzere c/D değeri arttıkça meydana gelen radyal hızlar azalmakta ve oyulma çukuru derinliği azalmaktadır. Şekil 5.19 ise $c/D=3,5$ için sabit $Q=7$ lt/sn koşulunda ağız merkezinden itibaren oyulma uzunluğunun l/D 'ye göre değişimini göstermektedir.



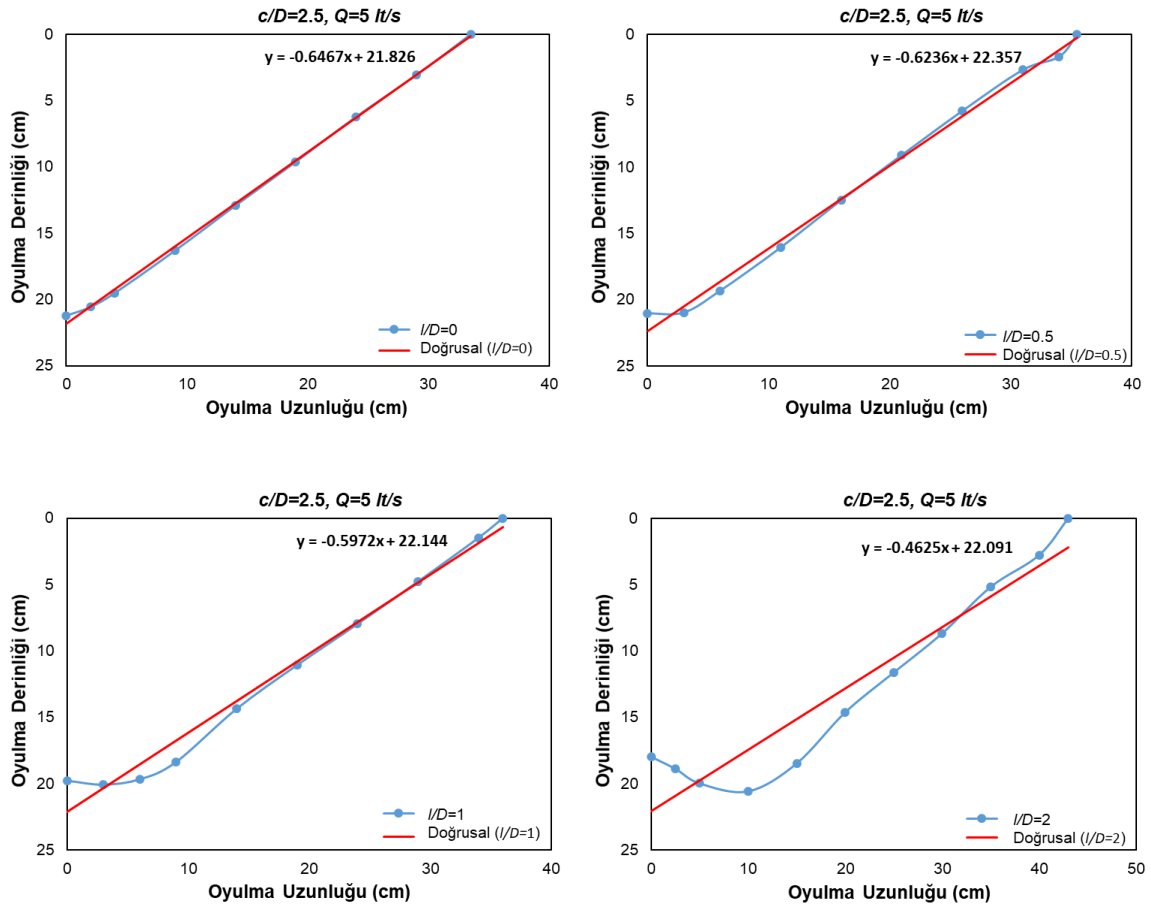
Şekil 5.19. $c/D=3,5$ için ağız ekseninden itibaren oyulma uzunluğunun l/D 'ye göre değişimi

Yapılan çalışmalardan biri de, yıkama sonucu oluşan oyulma çukurunun, su alma ağzı ekseninde yatay ile yaptığı açığı araştırmaktır. Bunun için $c/D = 2,5$ parametresi sabit tutularak debi ve l/D değiştirilmiş, elde edilen sonuçlar sedimentin içsel sürtünme açısı ile karşılaştırılmıştır. Açı hesabı yapılırken, deneylerden elde edilen veriler lineer şekilde birleştirildiğinde elde edilen doğrunun eğimi kullanılmıştır.

Çizelge 5.1 ise Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’den yararlanılarak hesaplanan açı değerlerini detaylı olarak göstermektedir. Çizelge 5.1, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de “x” ifadesi ile ölü sondan itibaren olan oyulma uzunluğu, “h” ifadesiyle ise oyulma derinliği ifade edilmektedir.



Şekil 5.20. $c/D=2,5$ ve $l/D=0$ parametreleri sabit tutularak oyulma çukurunun şev açısının incelenmesi

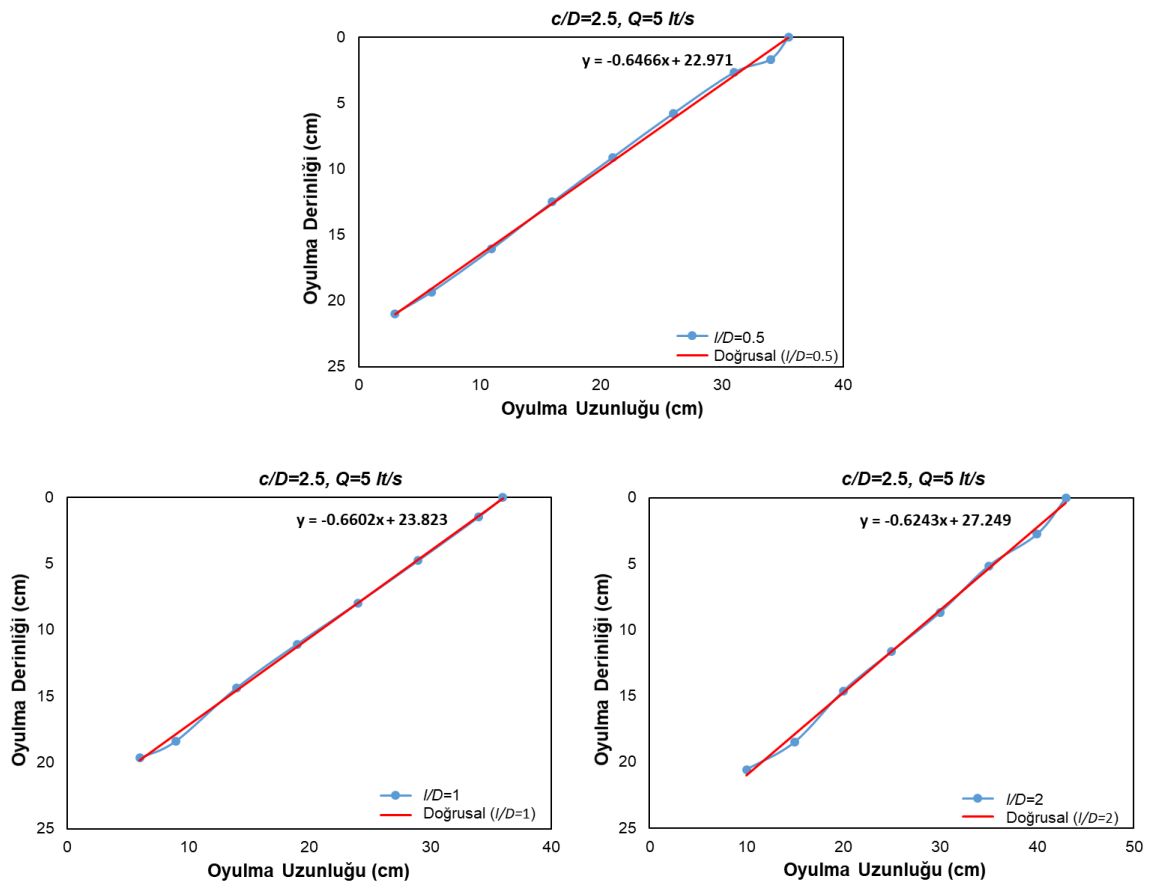


Şekil 5.21. $c/D=2,5$ ve $Q=5$ lt/sn parametreleri sabit tutularak oyulma şev açısının l/D 'ye göre değişimi

Çizelge 5.1. Çukur şev açıları

c/D	Q (lt/sn)	l/D	Doğru Denklemi	Açı (derece)
2.5	3	0	$y = -0.6345x + 21.114$	32.395
2.5	5	0	$y = -0.6467x + 21.826$	32.890
2.5	7	0	$y = -0.6535x + 22.496$	33.164
2.5	9	0	$y = -0.6545x + 23.817$	33.204
2.5	5	0.5	$y = -0.6236x + 22.357$	31.947
2.5	5	1	$y = -0.5972x + 22.144$	30.845
2.5	5	2	$y = -0.4625x + 22.091$	24.820

Çizelge 5.1’den görüleceği üzere, $l/D=0$ olduğu durumda debi miktarı artsa bile açı değeri çok fazla değişmemektedir. Ayrıca hesaplanan açı değerlerinin, sedimentin içsel sürtünme açısı olan 35 dereceye yakın olduğu görülmektedir. Ancak l/D parametresi artmaya başladıkça, x eksenini ölü sondan başlatmak hatalı sonuçlara yol açmaktadır. Bu sebeple Şekil 5.22’den görüleceği üzere, $l/D=0,5$, $l/D=1$ ve $l/D=2$ için x eksen başlangıcı olarak su alma ağzı merkezi seçilmiştir. Bu iki grafiğe ait tablo altta verilmektedir. Çizelge 5.2 ve Şekil 5.22’de “x” ifadesi ile ağız merkezinden itibaren olan oyulma uzunluğu, “h” ifadesiyle ise oyulma derinliği ifade edilmektedir.



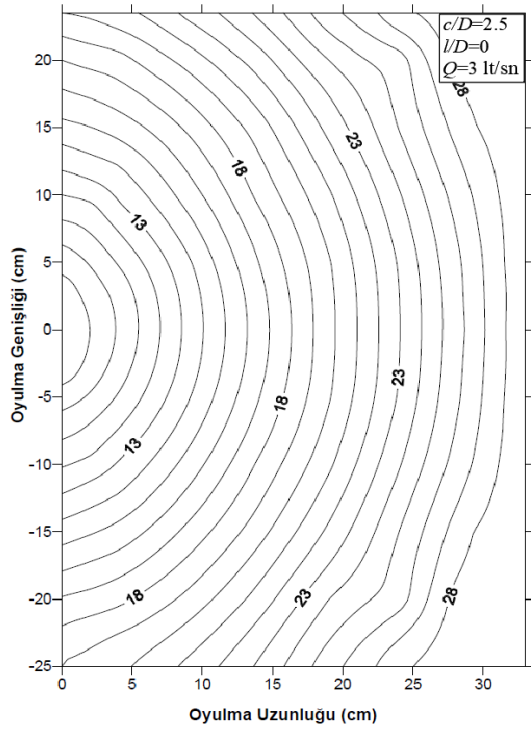
Şekil 5.22. Şekil 5.21’de verilen grafiklerin boru ağzından çizilmiş halleri

Çizelge 5.2. Düzeltilmiş çukur şev açıları

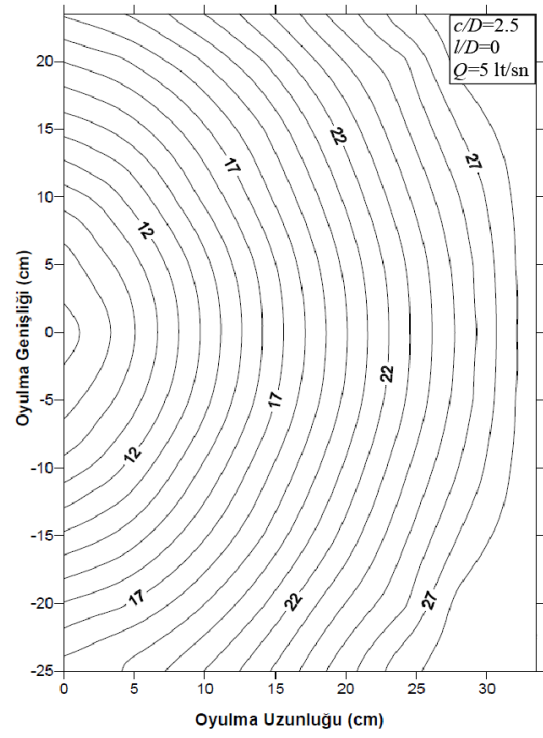
c/D	Debi (lt/sn)	l/D	Doğru Denklemi	Açı(derece)
2.5	5	0.5	$y = -0.6466x + 22.971$	32.886
2.5	5	1	$y = -0.6602x + 23.823$	33.432
2.5	5	2	$y = -0.6243x + 27.249$	31.976

Çizelge 5.2'den de görüleceği üzere, $l/D=0,5, 1$ ve 2 değerlerinde x eksenini ağızdan itibaren alındığı takdirde hesaplanan açı değerleri, hem birbirine hem de sedimentin içsel sürtünme açısına yakın gelmektedir. Elde edilen sonuçlar oyulma çukuru şev açısıyla sedimentin içsel sürtünme açısı arasında yakın bir bağ olduğunu göstermektedir. Yapılan bir diğer inceleme ise çukur geometrisinin yapısı ile ilgilidir.

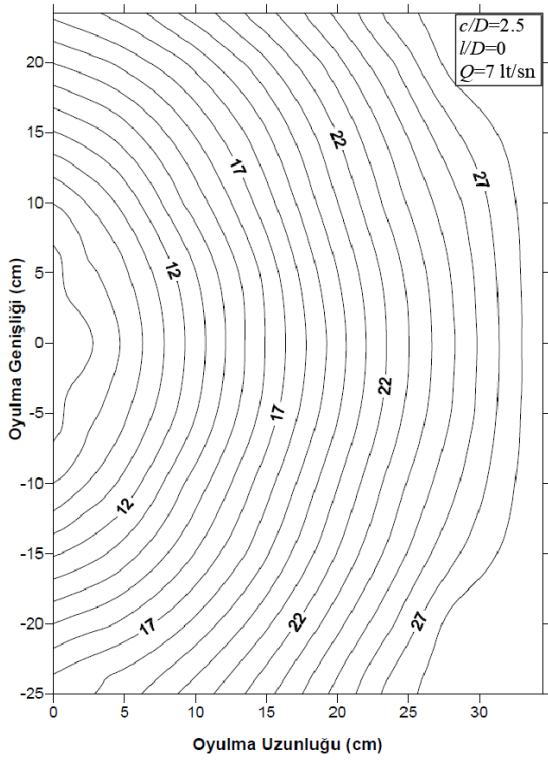
Literatür çalışması bölümünde de bahsedildiği üzere, yıkama sonrası oluşan oyulma çukuru konik şekle sahip olmaktadır. Deney sonrası yapılan okumalardan elde edilen veriler kullanılarak $c/D=2,5$, $l/D=0$ parametrelerinde 4 farklı debi değeri için yüzey modeli çıkarılarak eş yükselti eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen grafikler Şekil 5.23'te verilmektedir.



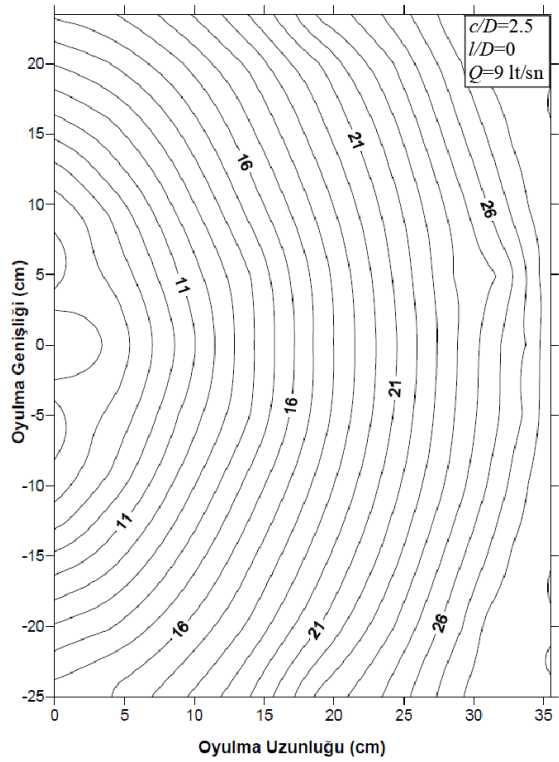
(a)



(b)



(c)

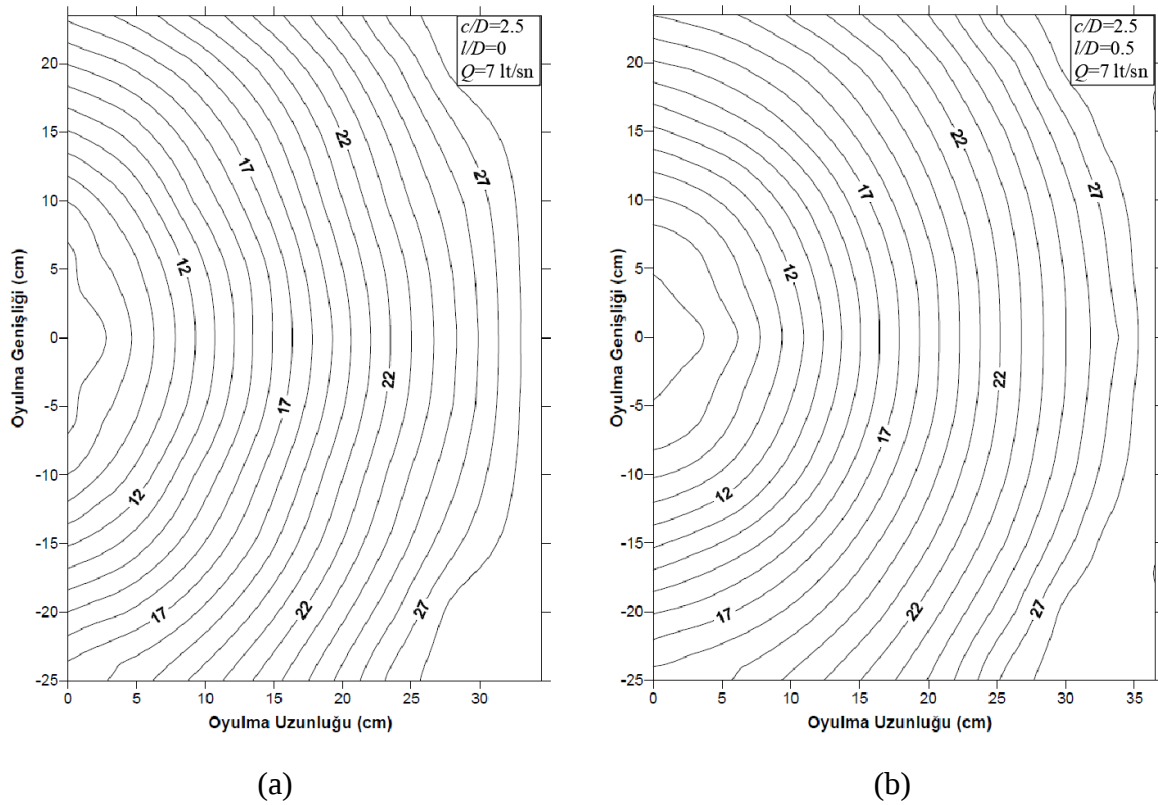


(d)

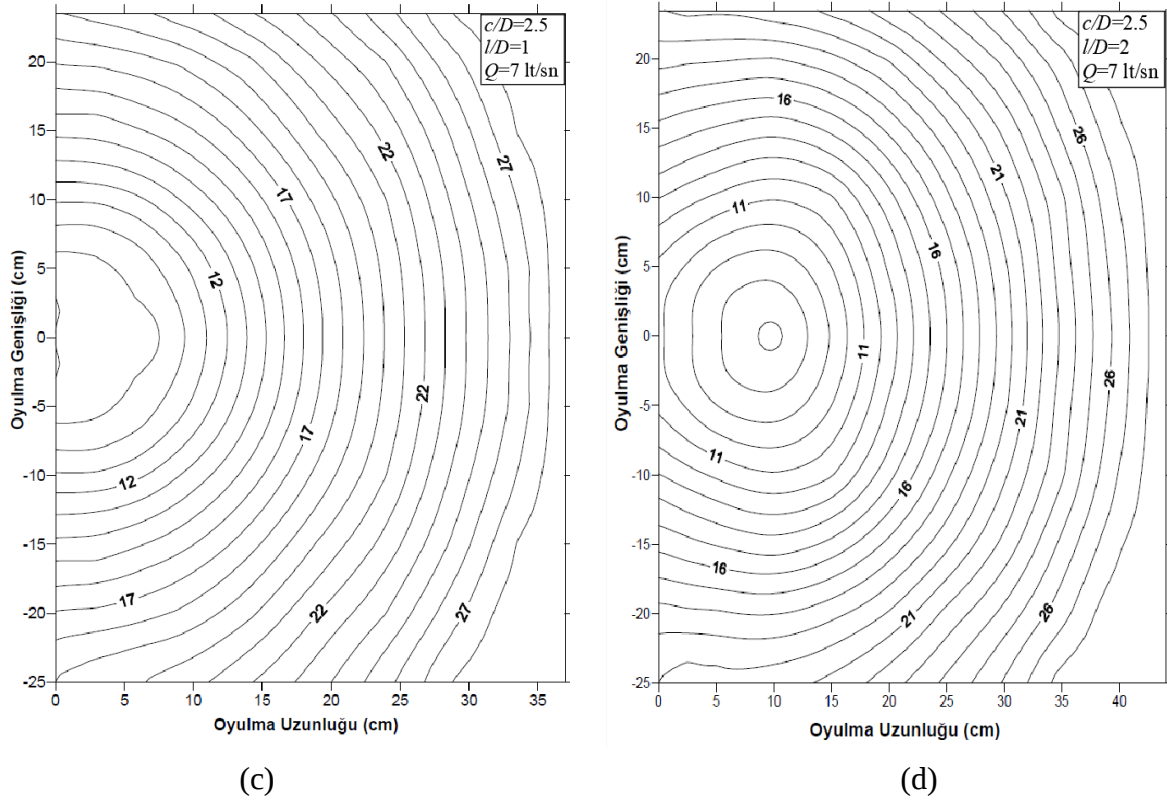
Şekil 5.23. $c/D=2,5$, $l/D=0$ parametreleri sabit tutularak sırasıyla; a) 3 lt/sn b) 5 lt/sn c) 7 lt/sn d) 9 lt/sn debi değerleri için çukur geometrisi

Şekil 5.23'ten de görüleceği üzere, sadece oyulma çukurun bittiği sediment sıfır kotuna ulaşılan yerlerde ufak bozulmalar görülmektedir. Bunun dışında eş yükselti eğrilerinin çıkış yapısına ulaşana kadar düzenli oldukları görülmektedir. Ancak, yapılan deneylerde gözlemlendiği üzere, $l/D=0$ parametresi sabit tutularak debi miktarı arttırıldığında, su alma ağzının iki yanında da oyulmalar gözlemlenmiştir. Bu durumun asıl sebebi, meydana gelen su altı çevrintilerinin su alma ağzı merkezinde ve kimi durumlar için buna ek olarak ağzın iki yanında da oluşmasıdır. Maksimum oyulma miktarı ağız önünde gerçekleşse de, bu ikincil oyulmalar da bu maksimum değere yakın gelmektedir.

Ayrıca, c/D ve debi değeri sabit tutularak, l/D parametresindeki değişimin oyulma çukuruna etkisi de araştırılmıştır. $c/D=2,5$ ve $Q=7$ lt/sn debi değeri için 4 farklı l/D değerlerinden elde edilen eş yükselti eğrileri Şekil 5.24'te gösterilmiştir



Şekil 5.24. $c/D=2,5$, $Q=7$ lt/sn parametreleri sabit tutularak sırasıyla;
a) $l/D=0$ b) $l/D=0.5$ c) $l/D=1$ d) $l/D=2$ parametresi için çukur geometrisi



şekil 5.24. (devamı) $c/D=2,5$, $Q=7$ lt/sn parametreleri sabit tutularak sırasıyla;
a) $l/D=0$ b) $l/D=0,5$ c) $l/D=1$ d) $l/D=2$ parametresi için çukur geometrisi

şekil 5.24'ten de görüleceği üzere, bir önceki şekilde olduğu gibi sadece çukurun bittiği, sediment kotunun başlangıç kotuna geldiği yerlerde ufak bozulmalar görülmektedir. Oluşan oyulma konisinde herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir. Maksimum oyulma miktarı ağız önünde gerçekleşmiş olup, su alma ağızı merkezinden l son duvarına ilerledikçe sediment yüksekliği artmıştır.

5.7. Oyulma ukur Hacmi İçin Elde Edilen Ampirik Denklemler

Deneysel veriler kullanılarak h_m/D , l/D , V/D^3 ve E için denklemler elde edilebilir. Denklemler 5.2-5.5; $c/D= 2,5 - 3,5$, $l/D= 0 - 2$, $\alpha= 0 - 15^\circ - 30^\circ$ ve $F_d= 9 - 42$ aralıkları ve $t=30$ dakika için geçerlidir. ıkış yapısı boşluk oranının oyulma çukuru hacmini arttırıcı bir etkisinin olmayışı ve $c/D=1$ için oyulma çukuru derinliği üzerinde kanal tabanının sınırlayıcı etkisi sebebiyle bu iki durum denklemlerde yer almamıştır.

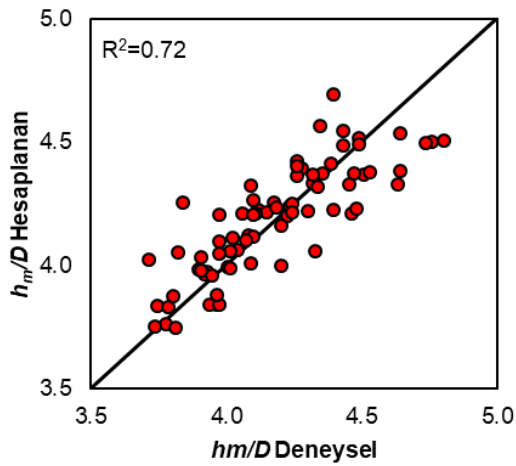
Ölçülen ve hesaplanan oyulma özelliklerinin karşılaştırması Şekil 5.25'te sunulmuştur. Bu denklemler, istatistiksel analiz yazılımı olan SPSS ile çok değişkenli regresyon analizi yapılarak elde edilmiştir. İlk olarak, birçok denemeden sonra fiziksel duruma uygun denklem tipi bulunmuş, ardından seçilen denklem tipine en uygun katsayılar elde edilmiştir.

$$\frac{h_m}{D} = 3.183(F_d)^{0.109} \left(\frac{c}{D}\right)^{-0.065} \left(1 + \frac{l}{D}\right)^{-0.003} (\cos\alpha)^{-0.29} \quad (5.2)$$

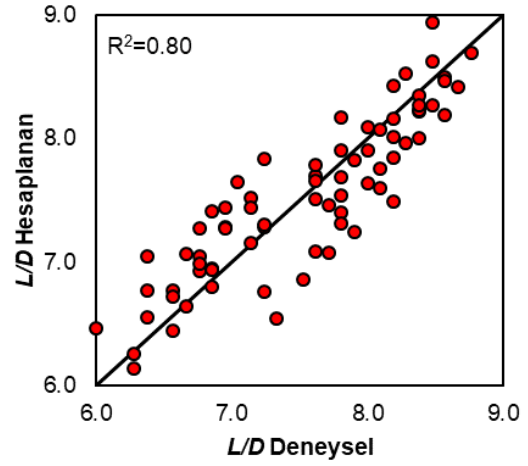
$$\frac{L}{D} = 5.313(F_d)^{0.093} \left(\frac{c}{D}\right)^{-0.053} \left(1 + \frac{l}{D}\right)^{0.177} (\cos\alpha)^{-1.299} \quad (5.3)$$

$$\frac{\nabla}{D^3} = 54.965(F_d)^{0.26} \left(\frac{c}{D}\right)^{-0.107} \left(1 + \frac{l}{D}\right)^{-0.231} (\cos\alpha)^{-2.14} \quad (5.4)$$

$$E = 0.017(F_d)^{-0.628} \left(\frac{c}{D}\right)^{-0.494} \left(1 + \frac{l}{D}\right)^{0.23} (\cos\alpha)^{-1.812} \quad (5.5)$$

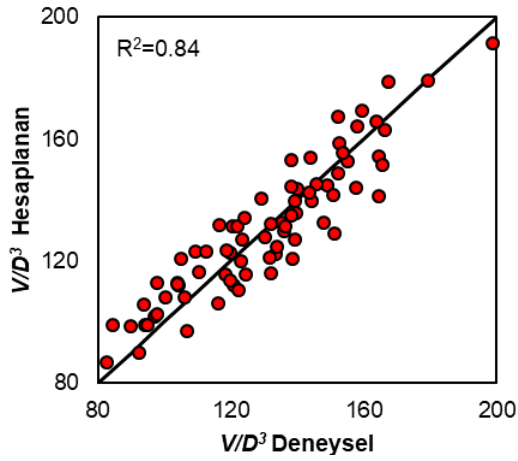


(a)

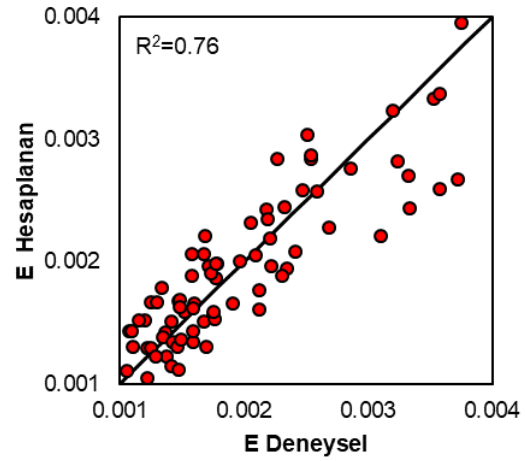


(b)

Şekil 5.25. Denklemler 5.2-5.5'e göre hesaplanan ve ölçülen oyulma karakteristiklerinin karşılaştırması



(c)



(d)

Şekil 5.25. (devamı) Denklemler 5.2-5.5'e göre hesaplanan ve ölçülen oyulma karakteristiklerinin karşılaştırması

Sediment hareketinin üç boyutlu karmaşık yapısı ve sediment yıkama işlemine etki eden parametre sayısının fazlalığı, meydana gelen oyulma çukurunun geometrik yapısını analitik olarak tahmin etmeyi oldukça güçleştirmektedir. Karmacharya ve diğerleri (2021) çalışmasında, farklı araştırmacılar tarafından oyulma çukuru özelliklerini tahmin etmek için geliştirilen çeşitli deneylere dayalı ilişkileri ortaya koymuştur. Bu çalışmadan da görülebileceği üzere üzerinde mutabık olunabilecek tek bir eşitlik bulunmamaktadır. Bu durumun, araştırmacıların H_s , H_w , d_{50} gibi parametrelerden hangilerini sabit veya değişken aldıklarına oldukça bağlı olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, sedimentin basınçlı yıkanması işlemine, çıkış yapısının baraj yapısına ve tabana olan mesafesi ile baraj eğriliğinin etkilerinin incelenmesi asıl amaç olduğu ve literatürde benzer bir çalışma bulunmadığı için, elde edilen denklemlerin doğrudan karşılaştırılması mümkün olmamaktadır. Ancak çalışma kendi içerisinde değerlendirildiğinde, deneysel ve hesaplanan değerler arasındaki uyum, probleminin karmaşık doğası göz önüne alındığında makuldür.

6. SAYISAL MODELLEME

Bir önceki bölümde, laboratuvar ortamında yapılan deneylerden bahsedilmiş olup, bu tez çalışması kapsamında basınçlı yıkama ile sediment uzaklaştırılmasının bilgisayar ortamında sayısal olarak incelenmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) destekli yazılım kullanılmıştır.

Flow3D programı, süreklilik denklemleri ile Navier-Stokes yani momentum denklemlerini sayısal olarak çözebilmektedir. Bu denklemlerin yanı sıra programda farklı fiziksel durumlar da tanımlanabilmektedir. Örnek vermek gerekirse; ısı transferi, difüzyon, farklı akışkanların etkileşimleri vb. tanımlar programa yapılabilmektedir. Program serbest yüzey akışlarını modellemek için özel olarak geliştirilmiş programlardan biridir ve serbest su yüzeyinin çözümü ve takibini Akışkanın Hacmi (Volume of the Fluid) yöntemiyle yapmaktadır. Hirt ve Nichols (1981) tarafından geliştirilmiş olan bu yöntemde, iki veya daha fazla akışkan ara yüzeyinin bulunduğu durumlarda bu yüzeyin takibi yapılmaktadır.

Yöntemin genel çalışma prensibi birkaç cümle ile açıklanacak olursa, çözüm hücrelerinin her birine V_F hacim değeri atanır. V_F değeri, tamamen su dolu bir hücre ise bire, tamamen hava dolu bir hücre ise sıfıra eşittir. Bu değerın sıfır ile bir arasında kaldığı durumlarda, çözüm hücresine ait bağımlı değişkenlerin hesabı ise hücredeki ortalama dolu hacmin oran değerine göre hesaplanmaktadır. Hesaplar sonucunda ortaya çıkan sonucun, kabul edilebilir hata aralığında olduğundan emin olunması gerekmektedir. Bunun için model çözümünden elde edilecek sonuçların, laboratuvar ortamında yapılmış olan deneyler ile kıyası yapılmalıdır.

6.1. HAD Modellemesinde Çözülen Temel Denklemler

Flow3D yazılımı, kullanıcının çözmek istediği problemi, kullanıcının istediği çözüm yöntemlerine uygun şekilde çözen bir programdır. Programın içinde Meyer-Peter ve Müller, Nielsen ve Van Rijn gibi sediment yatak taşınım denklemleri; Prandtl karışım uzunluğu modeli, tek denklemlili türbülans enerji modeli, iki denklemlili $k-\varepsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modeli, RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeli ve LES türbülans modeli gibi birbirinden farklı çözüm yöntemleri tanımlıdır.

Sonraki başlıklarda, bir dip savağın etrafındaki oyulmayı etkileyen türbülans modelleri ile sediment taşınımına ait denklemler ile harekete ilişkin temel kütle ve momentum korunumu denklemleri açıklanmaktadır.

6.1.1. Kütle ve momentum korunumu denklemleri

Kartezyen koordinat sisteminde (yönler x, y, z olacak şekilde), kütlenin korunumu denklemi Eşitlik 6.1’de, hareket denklemleri ise (Navier-Stokes) Eşitlik 6.2a-c’de verilmiştir. Flow-3D programı, sonlu hacimler yöntemini kullanarak Eşitlik 6.1 ve 6.2a-c’de verilen bu denklemleri çözmektedir (Aghajani ve diğerleri 2020).

$$V_F \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(V_x A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(V_y A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(V_z A_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(V_x A_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y A_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z A_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} + G_x + f_x \quad (6.2a)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(V_x A_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y A_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z A_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} + G_y + f_y \quad (6.2b)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(V_x A_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y A_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z A_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial z} + G_z + f_z \quad (6.2c)$$

Bu eşitliklerde, ρ = akışkanın yoğunluğu, $V_x, V_y, V_z = x, y$ ve z yönlerindeki hız bileşenlerini, p^* = basıncı, R_{SOR} = yoğunluk kaynak terimini (source density term), $A_x, A_y, A_z = x, y$ ve z yönlerinde akışkanın alanını, t = zamanı, $G_x, G_y, G_z = x, y$ ve z yönlerinde yer çekimi ivmeleri, $f_x, f_y, f_z = x, y$ ve z yönlerinde viskoz ivmeleri, ve V_F ise akışkanın hacim oranı ile ilgili olan büyüklüğü temsil etmekte olup aşağıdaki Eş. (6.3) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(\frac{\partial}{\partial x} (FA_x V_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y V_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z V_z) \right) = 0 \quad (6.3)$$

Bu eşitlikteki F , daha önce Akışkanın Hacmi yönteminde bahsedildiği gibi, çözüm hücresinin su ile doluluk oranıdır ve 0 ile 1 arasında değerler alır. Flow-3D programı bu denklemler dışında, mevcut problemlerin gereksinimlerine göre, gözenekli ortam akımı, farklı fazlardaki akışkanların birbirleri ile etkileşimleri, ısı transferi ve difüzyon denklemleri gibi ek çözümleri HAD modeline ilave edilebilmektedir.

6.1.2. Türbülans modelleri

Türbülans, yüksek Reynolds sayılarında meydana gelen kaotik-karasız bir davranış olup çeşitli uzunluk ölçeklerinde girdapların oluşmasıyla kendini gösterir. Bu tez çalışmasının konusu olan dip savak veya çıkış yapısı çevresinde de güçlü çevrıntiler ve yüksek Reynolds sayıları içeren akışlar gözlemlenir. Bundan dolayı, çözümü yapılacak olan modelde, seçilecek olan türbülans modeli önem arz etmektedir.

Flow-3D programı, kullanıcıya beş türbülans modeli sunmaktadır. Bunlar; Prandtl karışım uzunluğu, tek denklemlili model, iki denklemlili model ($k-\epsilon$ ve $k-\omega$), yeniden normalleştirme modeli (Re-normalized Group, RNG) ve büyük girdap simülasyonu (Large Eddy Simulation, LES) modelidir. Bu bölümde hidrolik model çözümleri için kullanılabilecek bu beş türbülans modelinin teorik özellikleri kısaca tanıtılmaktadır.

Akış hızı arttıkça Reynolds sayısı artar ve akışın laminar akıştan türbülanslı akışa geçişine neden olur. Türbülanslı akışta, düzensiz ve rastgele dalgalanmalar meydana gelir. Türbülanslı akımda oluşan bu girdapların ve düzensiz hız dalgalanmalarının sayısal olarak temsil edilebilmesi için Navier-Stokes denkleminin Reynolds-ortalı Navier-Stokes (Reynolds-averaged Navier–Stokes, RANS) denklemi olarak düzenlenmesi gerekmektedir.

Reynolds ortalı Navier-Stokes denklemleri akışkan için zaman ortalı hareket denklemleridir. Denklemlerin ardındaki fikir, Reynolds ayrışımıdır. Bu ayrışım, akışkanda anlık bir miktarın, zaman ortalı ve dalgalanan miktarlara ayrıştırılmasıdır. Fikir ilk olarak Osborne Reynolds (1895) tarafından ortaya atılmıştır. RANS denklemleri öncelikle türbülanslı akışları tanımlamak için kullanılır. Bu denklemler, Navier-Stokes denklemlerine yaklaşık zaman ortalı çözümler vermek için akış türbülansının özelliklerine ilişkin bilgiye dayanan yaklaşımlarla birlikte kullanılabilir. RANS denklemlerinin çözümü sürecinde türbülans salınımlarından kaynaklanan Reynolds gerilmeleri ile karşılaşmaktadır.

Bu yeni bilinmeyenin çözümü için RANS destekli farklı türbülans modelleri türetilmiştir. Türetilen modellerin en basiti olan Prandtl karışım uzunluğu modeli, akışkan viskozitesinin, örneğin katı sınırlara yakın yüksek kesme bölgelerinde türbülanslı karışım ile arttırıldığını varsayar. Fakat bu yalnızca tam gelişmiş, neredeyse kararlı akışlar için geçerlidir. Genel olarak bakılması gerekirse, türbülans yoğunluğunun yer ve zaman dağılımlarını daha iyi modellemek için bazı taşıma süreçlerini yani konveksiyon ve difüzyonları da hesaba katmak gerekmektedir.

Tek eşitlik modeli ise, Reynolds gerilmelerinin çözümlenmesinde 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 - ϵ türbülans modeli ise türbülans kinetik enerjisinin yanında türbülans sönümlenme oranı (ϵ) parametresini de model içerisine dahil etmiştir. (Harlow ve Nakayama, 1967)

Tek denklemlili türbülans modelinin, RNG metodu kullanılarak yeniden düzenlenmesi ve istatistiksel yaklaşımlardan yararlanılarak daha verimli hale getirilmesi ile oluşturulan hali ise RNG $k-\epsilon$ türbülans modelidir. Bu model HAD çalışmalarında çok daha yaygın kullanılmaktadır. RNG modeli, $k-\epsilon$ modelinin denklemlerine benzer denklemler kullanır. Ancak standart $k-\epsilon$ modelinde ampirik olarak bulunan denklem sabitleri, RNG modelinde açıkça türetilir. Genel olarak RNG modeli standart $k-\epsilon$ modelinden daha geniş uygulanabilirliğe sahiptir. Özellikle, RNG modelinin düşük yoğunluklu türbülanslı akışları ve güçlü kayma bölgelerine sahip akışları daha doğru bir şekilde tanımladığı bilinmektedir (Flow 3D Kullanım Kılavuzu 9.3, 2008; 113).

Programın veri tabanındaki RANS tabanlı türbülans modelleri arasındaki son model ise $k-\omega$ modelidir. Bu $k-\omega$ türbülans modelinde, türbülans frekansı “ ω ” kullanılır ve bu değişken ϵ / k parametresine eşittir. Bu yöntemde türbülans frekansının kullanılması, sınır bölgelerinde $k-\epsilon$ türbülans modeline göre avantajlar sağlamaktadır. Menter (1997), $k-\epsilon$ türbülans modelinin serbest akışta duvar yakınında istenmeyen basınç değişiklikleri verdiğini ve sınır tabakası çözümlerinde zayıf performans gösterdiğini belirtmiştir.

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. Büyük Girdap Simülasyonu (LES) modeli, türbülansın atmosferik modelleme çalışmalarından ortaya çıkmıştır (Smagorinsky, 1963).

LES modelini kullanırken modelin doğası gereği üç boyutlu ve zamana bağlı olduğunu unutmamak önemlidir. Ayrıca dalgalanmaların başlatılması ve giriş sınırlarında girilmesi gerekir. Her ne kadar bu daha fazla çaba gerektirse ve hesaplamalar daha ince ağlar nedeniyle oldukça bilgisayar CPU'larını daha yoğun olarak kullansa da, LES sonuçları genellikle Reynolds ortalamasını temel alan modellerin (yani yukarıda belirtilen modellerin) ürettiğinden daha fazla bilgi sağlar.

Örneğin, LES modelleri büyük binaların etrafındaki türbülanslı akışı hesaplamak için kullanıldığında, yalnızca ortalama rüzgâr gerilimi değil, aynı zamanda türbülanslı akışla ilişkili kuvvet dalgalanmalarının büyüklüğü ve standart sapması hakkında da bir tahmin elde edilir. Mevzubahis LES modeli RANS tabanlı türbülans modellerine oranla detaylı bir

türbülanslı akım çözümü sağlamasına rağmen çözüm süreleri açısından bahsedilen diğer türbülans modellerine göre daha uzun vakit almaktadır. Bu durumdan kaynaklı olarak kullanıcıların bu çözüm yöntemine yönelimini azaltmaktadır.

6.1.3. Sediment taşınım denklemleri

Sediment taşınım modeli, sediment numunesini kohezyonsuz kabul ederek, içsel sürtünme açısı, dane çapı, yoğunluk, ağırlık vb. fiziksel özelliklerine göre farklı akım durumlarındaki hareketlerini incelemektedir. Bu hareketler; sedimentin askı halinde taşınımı, yatak yükü taşınımı ve çökelme hareketidir. Bu hareketlere ait hesaplamalar yapılırken, sediment taneciğinin harekete başlayacağı sınır koşulunun net olarak bilinmesi önemlidir. Tabanda hareketin başlamasıyla ilgili literatürde en sık kullanılan Shields sayısı, θ , Eş. (6.4a)'da verilmiştir. Shields sayısı tabandaki sediment danelerine etkiyen kayma gerilmesinin daneleri yerinde tutmaya çalışan sürtünme gerilmelerine oranıdır.

$$\theta = \frac{\tau_0}{(SG-1)\gamma d} \quad (6.4a)$$

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(SG-1)\gamma d} \quad (6.4b)$$

$$\theta_{cr,i} = \frac{0.3}{1+1.2d_{*i}} + 0.055[1 - \exp(-0.02d_{*i})] \quad (6.4c)$$

Eşitlik (6.4a)'da SG sediment danesine ait bağıl yoğunluk değerini göstermektedir. Boyutsuz bir ifade olan kritik Shields parametresi (θ_{cr}) programa kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. (Eşitlik (6.4b)). Ek olarak Eş. (6.4c)'de verilen Soulsby – Whitehouse denklemi de kritik Shields parametresinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bahsedilen eşitliklerde verilen, i alt indisi olası sediment numunesini simgeler. Deneysel çalışma sırasında kullanılan numuneler için kritik Shields parametresi; Kum 1 ve Kum 2 için yaklaşık 0,03 olarak hesaplanmıştır. Aynı model içinde incelenme ihtimali olan farklı sediment numuneleri için Shields parametreleri farklılık gösterebilir.

Verilen bu denklemde d_{*i} değeri i sediment numunesi yoğunluğuna, dane çapına, akışkan viskozitesine bağlı boyutsuz bir parametredir ve Eş. (6.5) ile aşağıda verilmiştir.

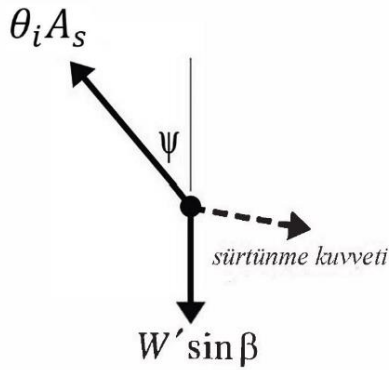
$$d_{*i} = d_i \left[\frac{\rho(\rho_{si} - \rho)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (6.5)$$

Eşitlik 6.5'te verilen denklemde, sırasıyla ρ_{si} i numaralı sediment numunesine ait yoğunluğu, ve ρ değeri akışkana ait yoğunluğu, d_i i numunesine ait ortalama dane çapını, μ akışkanın dinamik viskozitesini g ise yerçekimi ivmesini temsil eder.

Kanalın boyuna eğiminin yüksek olması durumunda kritik Shields parametresinin ($\theta'_{cr,i}$) kanal eğimi (β) ve i sedimenti içsel sürtünme açısına bağlı olarak (φ) değişimi, literatürde Apsley ve Stansby (2008) tarafından yatak taşınımı denklemleri olarak öne sürülmüş olup bu denklem ve Eş. (6.6)'da verilmiştir.

$$\theta'_{cr,i} = \theta_{cr,i} \frac{\cos\psi \sin\beta + \sqrt{\cos^2\beta \tan^2\varphi_i - \sin^2\psi \sin^2\beta}}{\tan\varphi_i} \quad (6.6)$$

Eşitlikte ψ , sediment danesine akım koşullarından dolayı etki edecek kuvvet yönü ile yer çekiminden dolayı etki eden kuvvetin yönü arasındaki açı olarak tanımlanır. (Şekil 6.1)



Şekil 6.1 Akım içindeki sediment danesine etkiyen kuvvetler. (Apsley ve Stansby, 2008)

Şekil 6.1'de, $\theta_i A_s$ ifadesi, yatak kayma gerilmesi ile efektif sediment kesit alanının çarpımıdır ve tam tanımıyla akımdan dolayı sediment danesine etkiyen kuvvettir. $W' \sin\beta$ ise sedimentin su içindeki ağırlığının düşey yöndeki bileşenidir. Akışkan içerisindeki sedimentin, askı durumuna geçmesini sağlayan sürüklenme hızı, $u_{lift,i}$, Eş. (6.7)'de verilmektedir.

$$u_{lift,i} = \alpha_i n_s d_{*i}^{0.3} (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1.5} \sqrt{\frac{g d_{si} (\rho_{si} - \rho)}{\rho}} \quad (6.7)$$

Eşitlikteki α_i parametresi, sedimentin sürüklenme parametresini ifade eder. Flow3D yazılımında bu değer için varsayılan ve kullanıcılara önerilen değer 0,018'dir. n_s , sediment paketinin normal vektörüdür ve serbest yüzeye bakan tarafı pozitif yön olarak kabul edilmektedir. Eşitlik 6.7'de verilen denklem yardımıyla hesaplanan $u_{lift,i}$ değeri, paket halden askı haline geçecek sedimentin miktarının bulunmasını sağlar. Askı durumuna geçmiş olan sediment, akışın yardımıyla taşınır. Taşınan sediment danesi, aynı akım şartlarında genelde ağırlığından kaynaklı olarak çöker. Bu çökme durumu, Soulsby (1997) tarafından önerilmiş olan Eşitlik 6.8'deki denklemde tanımlanmıştır. Bu denklem, bir sediment danesinin çökme hızını veren formüldür. Bu işlemde sedimentin, kanal tabanı eğimli de olsa yerçekimi ivmesinin yönünde çökeleceği kabul edilmektedir.

$$u_{\text{çökme},i} = \frac{\nu}{d_{si}} \left[\left(10.36^2 + 1.049 d_{*,i}^3 \right)^{0.5} - 10.36 \right] \quad (6.8)$$

Askı haldeki sediment daneleri, çökme işlemi sırasında akım şartları değişmese de birbirini etkilemektedir. Bu etkileşim, Richardson – Zaki (1954) korelasyonunun çökme hızına uygulanması ile ifade edilebilir. Eşitlik 5.9'da sediment danelerinin birbirleri ile etkileşimlerinin hesaba katıldığı çökme hızı $u_{\text{çökme},i}^*$ verilmiştir.

$$u_{\text{çökme},i}^* = u_{\text{çökme},i} (1 - \min(0.5; c_s))^\zeta \quad (6.9)$$

Yukarıda verilen eşitlikte c_s askı haldeki sedimentin hacminin toplam sediment hacmine oranıdır. ζ değeri katsayı olup Eşitlik 6.9'da $\zeta = \zeta_{\text{user}} \zeta_0$ şeklinde tanımlanabilir. ζ_{user} katsayı çarpanıdır ve varsayılan değeri 1,0'dır. ζ_0 ise Richardson – Zaki katsayısıdır ve Reynolds sayısına göre değişmektedir.

Sleath (1984) bir akıştaki toplam sediment taşınımı, normal şartlar altında yatak yükü taşınımı ve askı yük taşınımı olarak iki bileşene ayırır. Bagnold (1956) yatak yükünü, toplam yükün akışkan sürüklenmesinden ziyade tanecikler arası kuvvetler tarafından desteklenen kısmı olarak tanımlamaktadır; ancak uygulamada yatak yükünün tanımı genellikle daha keyfi olmaktadır. Örnek olarak toplam yükün sediment kapanları tarafından yakalanan kısmı verilebilir (Nielsen, 1992). Genel olarak yatak yükü taşınımı, akıştaki bir sediment danesinin tabanda sürüklenme ve sekme hareketleri ile tanımlanmaktadır.

Flow3D programı, yatak yükü taşınımını üç farklı yöntem ile inceleyebilmektedir. Bu yöntemler sırasıyla Meyer – Peter, Müller (1948), Nielsen (1992) ve Van Rijn (1984) yöntemleridir. “i” sediment türü için yatak yükü taşıma oranının boyutsuz formu Eş. 6.10a’da şu şekilde tanımlanır;

$$q_{b,i} = \phi_i \left[g \left(\frac{\rho_{si} - \rho}{\rho_{si}} \right) d_i^3 \right]^{1/2} \quad (6.10a)$$

Burada $q_{b,i}$ birim yatak genişliği başına hacimsel yatak yükü taşıma oranıdır (birim zamanda birim genişlik başına geçen hacim). Eşitlik (6.10a)’da verilen ϕ değeri tanım olarak birim genişlikten geçen sediment debisi yani sediment danesinin akım içinde tabanda yuvarlanma veya sekme hareketlerinden kaynaklı taşınım miktarını ifade etmektedir. Bu değer Meyer - Peter, Müller denklemi (1948) kullanılarak Eş. 6.10b’deki gibi hesaplanır.

$$\phi_i = \beta_{MPM,i} (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1.5} c_{b,i} \quad (6.10b)$$

Nielsen (1992) ve Van Rijn (1984) yatak yükü taşınım (ϕ) denklemleri sırasıyla Eş. (6.10c ve 6.10d)’de ifade edilmektedir.

$$\phi_i = \beta_{NIE,i} \theta_i^{0.5} (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1.5} c_{b,i} \quad (6.10c)$$

$$\phi_i = \beta_{VR,i} d_{*,i}^{-0.3} \left(\frac{\theta_i}{\theta'_{cr,i}} - 1 \right)^{2.1} c_{b,i} \quad (6.10d)$$

Üstte sırasıyla verilen yatak yükü taşınım denklemlerinde, $\beta_{MPM,i}$, $\beta_{NIE,i}$ ve $\beta_{VR,i}$ değerleri yatak yükü katsayısı olup ampirik değerlerdir. Meyer – Peter, Müller denkleminde bu katsayı genellikle taşınmanın düşük olduğu durumlar için 5.0 ila 5.7, orta seviyeli taşınmalar için yaklaşık 8.0 ve çok yüksek taşıma için 13.0 değerleridir. Taşınmanın yüksek olduğu duruma örnek olarak dalga ve akıntı etkisi altındaki kum tabakasındaki taşınım verilebilir. Flow3D’de bahsi geçen denklemler için kullanılan varsayılan değer, literatürde en yaygın kullanılan değerlerdir ve sırasıyla $\beta_{MPM,i} = 8$, $\beta_{NIE,i} = 12$ ve $\beta_{VR,i} = 0,053$ olarak tanımlanmaktadır.

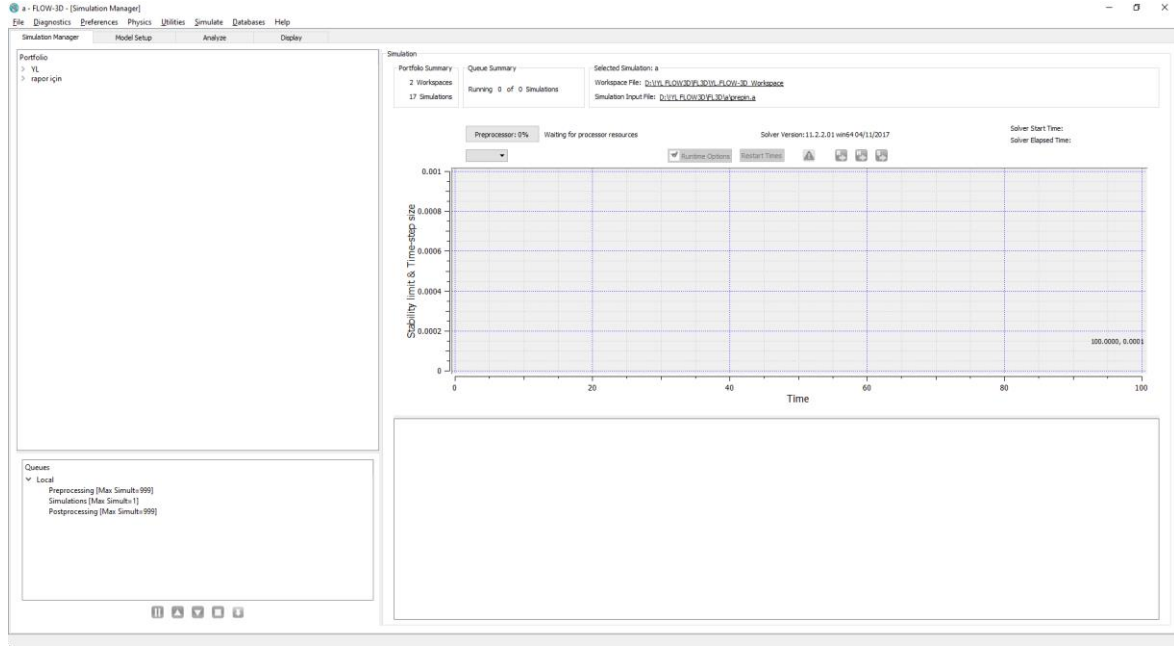
Kullanıcı tarafından kurulacak modelde, birden fazla sediment numunesi tanımlanması gibi durumlarda ortaya çıkabilecek sorunlara çözüm olması için denklemlere ek olarak $C_{b,i}$ çarpanı eklenmiştir. Bu çarpan “i” numunesinin toplam yatak malzemesi içerisinde hacimsel oranını ifade etmektedir. Kurulan modelde kullanıcı tarafından tek bir sediment numunesi tanımlanması durumunda bu katsayı 1’e eşit olmaktadır.

An ve diğerleri (2015) yılında yaptıkları kapak altı akımlarda oluşacak oyulma modeli çalışmalarında, program içerisinde yer alan üç farklı yaklaşımı kullanarak oyulmayı modellemiş, çalışma sonucunda üç yaklaşımın da gerçekçi sonuçlar elde ettiğini, dikkate değer farklılıklar gözlemlenmediğini göstermişlerdir.

Kullanıcı tarafından programda kurulacak modelin sonuçları her zaman laboratuvar sonuçları ile desteklenmeli, bu sonuçların gerçeğe yakınlığı araştırılmalıdır. HAD modellemelerinde, çözümü aranan probleme göre belirlenmiş ve kullanıcı tarafından kabul edilebilir hata aralığında sonuç verdiğiinden emin olunan modeller çözüm için kullanılmalıdır. Bu çalışmada daha önceki bölümde bahsedilmiş olan, laboratuvar ortamında yapılmış deneysel çalışmalardan bazıları modellenerek çözüm alınmış ve deney sonuçları kıyaslanmıştır. Programda model kurulumu yapılırken, laboratuvar şartlarını en iyi şekilde betimleyecek sınır koşulları, madde fiziksel özellikleri ve başlangıç koşulları tanımlanmıştır. Bu işlemten sonra en ideal çözüm süresi ve çözüm ağı belirlenmiştir. Bir sonraki başlıkta, model kurulumuna geçilmeden önce program ile ilgili genel hatlarıyla bilgiler verilmektedir.

6.2. Program Arayüzü

Flow3D programı, zorlu serbest yüzeyli akış problemlerini doğru ve hızlı çözebilen bir HAD yazılımıdır. HAD endüstrisinde öncü ve güvenilir programlardan biri olan Flow3D, serbest yüzeyli akış problemleri için yüksek verimli, kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Kapsamlı HAD simülasyonlarını çözmek için kapasitesi yüksek bilgisayarlar kullanılması gerektiği unutulmamalıdır. Kullanıcı tarafından tanımlanan problemin girişi programın arayüzü kullanılarak yapılır. Kullanıcılar bu arayüz aracılığıyla simülasyon sonuçlarını da inceleyebilir ve analiz edebilir. Program arayüzleri; Simülasyon Yöneticisi, Model Kurulumu, Analiz ve Görüntüleme olmak üzere dört başlığa ayrılır. Arayüzün genel görünümü Şekil 6.2'de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Flow3D program arayüzü

Menü çubuğunda bulunan dosya(file) kısmında simülasyon dosyalarının açılıp, oluşturulup kaydedilebildiği yerdir.

Tanılama (diagnostics) menüsü, kullanıcının Flow3D tarafından oluşturulan tanılama dosyalarını görüntülemesine olanak tanır. Genellikle bu dosyaların incelenmesine gerek yoktur. Ancak sorun gidermede faydalı olabilirler.

Çözümü aranan modelin çözüm işlemi başlamadan kontrolü için bu menü kullanılabilir. Ön işlem raporu, rapor dosyası, ön işlem hataları, ön işlem özeti, çözücü hataları, çözücü mesajları ve çözücü özeti, tanımlama menüsünün alt birimleridir. Bu menüler kullanarak kullanıcılar, belirli bir yönde kullanılan hesaplama hücrelerinin sayısını, modeldeki toplam hücre sayısını (sınır hücreleri dahil), sınırlardaki açık alanları, modelin başlangıçtaki sıvı miktarını vb. hızlı bir şekilde belirleyebilir. Bu dosya, modele eklenir. Çözücü başlatıldığında dosya raporlanır ve ardından silinir.

Tercihler (preferences) menüsü program ayarlarının tanımlandığı kısımdır. Fizik (physics) alt sekmesi kullanıcının simülasyonunda kullanılacak fiziksel modelleri tanımladığı yerdir. Her bir alt menü, kullanıcının kurduğu modelle ilgili bilgileri girdiği veya seçilen fiziksel modelle ilişkili seçenekleri değiştirdiği bir iletişim kutusu veya kutulara erişim sağlar.

Simülasyon (simulate) menüsü, kullanıcının Flow3D simülasyonları için ön işlemciyi veya çözücüü başlattığı yerdir. Kullanıcı tarafından model kurulumu tamamlandıktan sonra, çözüm aşamasına geçmeden programdaki ön analiz (preprocess simulation) özelliği yardımıyla simülasyondaki olası bir hata, kısa sürede sistemdeki uyarılara bakarak önceden kontrol edilebilir.

6.2.1. Simülasyon yöneticisi (simulation manager)

Bu sekme altında kullanıcı tarafından modellenecek, modellemesi tamamlanmış veya çözümlenmesi devam etmekte olan simülasyonlar görülebilmektedir. Simülasyon yöneticisi sekmesinde, daha önce çalışılmış simülasyonların sonuçlarına erişilebilir, hali hazırda hangi simülasyonun çözümlendiği görülebilir. Başlatılan simülasyonda sonucu aranan modelin dengeye gelme durumu ve simülasyon ile ilgili zamana bağlı değişkenler, kullanıcı tarafından model çalıştırılması öncesinde belirlenen zaman aralığında (time interval) bu ekrandan kontrol edilebilmektedir.

6.2.2. Model kurulu (model setup)

Kullanıcı tarafından kurulacak modelin tüm parametrelerinin tanımlandığı yerdir. Üç boyutlu kurulan modelin, çözüm ağı, fiziksel ve sayısal parametreleri bu kısımda tanımlanır. Model kurulumu sekmesi “Genel, Fizik, Akışkanlar, Çözüm Ağı ve Geometri, Çıktı ve Sayısal Seçenekler” gibi alt başlıklara ayrılabilir.

Genel sekmesi altında simülasyon süresi, modellenen akışkan miktarı, akışkan modeli (sıkıştırılabilir/sıkıştırılamaz akışkan çözümü), modelde kullanılan birim sistemi ve kullanıcı yorumları gibi genel giriş alanları bulunmaktadır. Hidrolik model kurulumu yaparken öncelikle bu sekme altındaki bilgilerin doldurulması gerekmektedir.

Fizik sekmesi, hidrolik modelin çözümünde kullanılabilecek fiziksel modellerin bulunduğu sekmedir. Yerçekimi ivmesi ve yönü, viskozite / türbülans tercihleri, sediment özellikleri, yoğunluk değişimleri, yüzey gerilimi, ısı transferi modellemesi ve bunlar gibi 27 farklı fiziksel özellik, çözümlenecek simülasyona buradan tanıtılmaktadır.

Akışkanlar sekmesinde simülasyonda kullanılmak üzere kullanıcı tarafından akışkanın tanımı ve fiziksel özellikleri (yoğunluk, viskozite vb.) girilmektedir. Sıklıkla kullanıldığı görülen bazı sıvıların fiziksel özellikleri yazılım içerisinde kayıtlı olup (örn. 20°C sıcaklığındaki su) kullanıcının ayrıca tanım yapmasına gerek kalmadan da seçilerek kullanılabilir.

Çözüm ağı ve geometri sekmesi, HAD modelinin fiziksel kurulumunu içermektedir. Modelin çözülmesi için gerekli olan modelin geometrisi, çözüm ağı, sınır ve başlangıç koşulları bu kısımda tanımlanmaktadır. Oluşturulacak modelde kullanılabilecek 10 farklı sınır koşulu mevcuttur. Bu sınır koşullarından çalışma kapsamında Simetri (S), Duvar (W), Basınç (P) ve Debi (Q) sınır koşulları kullanılmıştır.

Duvar sınır koşulu, katı yüzeylerdeki sıvı davranışını tanımlamak için kullanılır. Program bu tanımlamayı, duvarda her yöndeki akış hızını sıfır kabul ederek yapmaktadır. Simetri sınır koşulu; basınç, hız ve benzeri hidrolik parametrelerde herhangi bir değişiklik olmaksızın sınırdaki çözüm alanının dışında da aynı şekilde devam ettiği düşünülen sınır koşuludur.

Simetri sınır koşulu temas ettiği akımın davranışına etki etmemektedir. Basınç sınır koşulu, seçilen çözüm ağı yüzeyinin belli bir basınç altında olduğunu tanımlamak için kullanılır. Son olarak, debi sınır koşulu, çözüm ağı sınırı yüzeyinden kullanıcı tarafından belirtilen debiyi tanımlamak için kullanılmaktadır.

Çıktı sekmesi, simülasyon sonuçlarından elde edilen hidrolik verilerin ve bu verilerin kaydedilme zaman aralığının seçiminin yapıldığı bölümdür. Bu sekmedeki veriler, çözülecek problemin fiziksel modeline bağlı olarak değişmekte olup kullanıcı tarafından seçilen çıktı verisi arttıkça da sonuç dosyasının boyutu artmaktadır.

Nümerik sekmesinde ise genelde kullanıcının varsayılan ayarları koruması yeterli olmaktadır. Zaman adımları, basınç çözüm seçenekleri, akışkan – katı cisim etkileşiminin sonlu eleman yaklaşımı olan akışkan yapı etkileşimi - termal gerilim çözüm seçenekleri, viskoz gerilim çözüm seçenekleri, su hacmi adveksiyonu ve momentum adveksiyon seçenekleri kullanıcı tarafından bu sekmeden değiştirilebilir.

Analiz sekmesi kullanıcının simülasyon sonuçlarını bir, iki veya üç boyutlu olarak incelemesine olanak tanır. Kullanıcının kontrol etmek istediği fiziksel parametreler (basınç, hız, su yüksekliği vb.) bu başlık altında seçilir. Model Ayarları başlığı altındaki Çıktı sekmesinde seçilen seçenekler, Analiz başlığında incelenebilecek fiziksel parametre seçeneklerini etkiler.

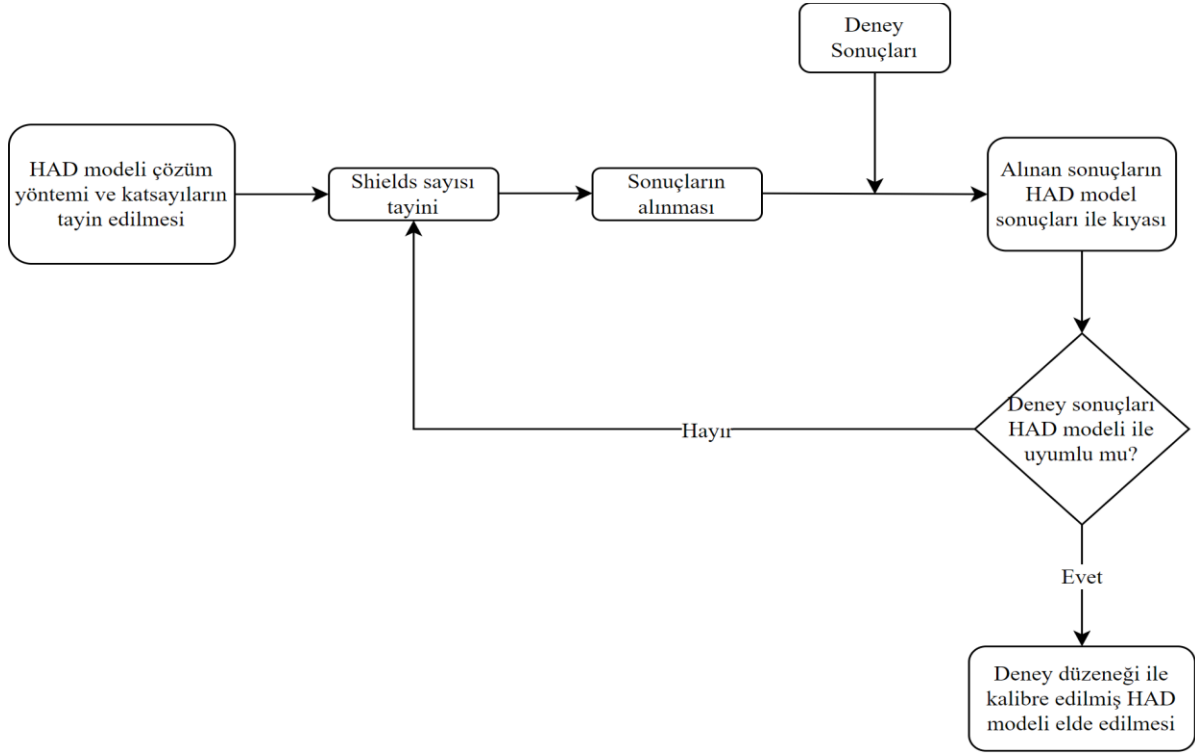
Görüntü sekmesi, analiz başlığında tercih edilen simülasyona ait nihai sonuçların yazdırıldığı ve kullanıcının inceleyebileceği görsellerin elde edildiği kısımdır. Analiz başlığında, kullanıcı tarafından gerekli tercihler yapıldıktan sonra işleme (render) butonuna basıldığında program kullanıcıyı otomatik olarak bu sekmeyle göndermektedir.

6.3. Sayısal Modelin Oluşturulması

Bu kısımda, Flow3D programında kurulacak modelin özellikleri ve model kurulumu sırasında girilen parametreler, dikkat edilen kısımlar anlatılmaktadır. Sayısal model kurulumu yapılırken, laboratuvar ortamında yapılan deneyler ve literatürde bulunan çalışmalar referans alınmıştır.

Laboratuvar ortamında yapılan deneylerin sonuçları kullanılarak sayısal modelde gerekli ayarlamalar yapılmış, hata oranı olabildiğince azaltılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak deney sonuçları ile teyit edilen bir HAD modeli elde edilmiştir. Çalışmaya referans olan deneysel çalışmaların sayısallaştırılmasında ve modelin kalibrasyonunda Şekil 6.3'te verilen akış diyagramı kullanılmıştır. Akış diyagramının başlangıcında verilen, "HAD modeli çözüm yöntemi ve kullanılan katsayıların tayin edilmesi" kısmı bu bölümde detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Verilen şemadan da görüleceği üzere kurulan modelde kritik Shields sayısı değiştirilerek, HAD modelinin deneylerde elde edilen oyulma geometrisi ile uyumlu hale getirilmesi amaçlanmıştır. Kritik Shields sayısının tayini Soulsby – Whitehouse yaklaşımı ile tayin edilmemiş, kullanıcı tarafından el ile girilerek deney sonuçlarıyla uyumlu hale getirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 6.3. Sayısal modelleme ve HAD modeli kalibrasyonu akış şeması

Kritik Shields sayısının kurulacak modelde bir parametre olarak belirlenmesinin sebebi, varsayılan Shields yaklaşımının üniform akım koşulları incelenerek elde edilmiş olması dolayısıyla bu tip bir çalışmada su alma ağzı çevresinde meydana gelen çevrıntilerden kaynaklı sediment taşınma kuvvetlerinin dikkate alınmaması olarak tanımlanabilir.

Bu duruma örnek vermek gerekirse, Hager ve Oliveto (2002), farklı sediment dane çapları kullanarak dikdörtgen ve dairesel şeklindeki köprü ayaklarının oyulmasını incelemiş ve Shields (1936) tarafından sediment taşınım yaklaşımı ile öngördüğü sonuçlarla kıyaslamışlardır. Yapılan çalışmada Shields yaklaşımının en basit tanımıyla mevcutta kabul gören bir yaklaşım olduğunu ancak kayma hızının doğrudan belirlenememesi sebebiyle sediment taşınımının başlangıcının kestirilmesinde problemler yaşandığını belirtmişlerdir. Ayrıca harekete geçen ilk sediment danesinin Shields (1936) tarafından tanımlanan yaklaşımda öngörülenden daha düşük densimetrik Froude sayılarında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

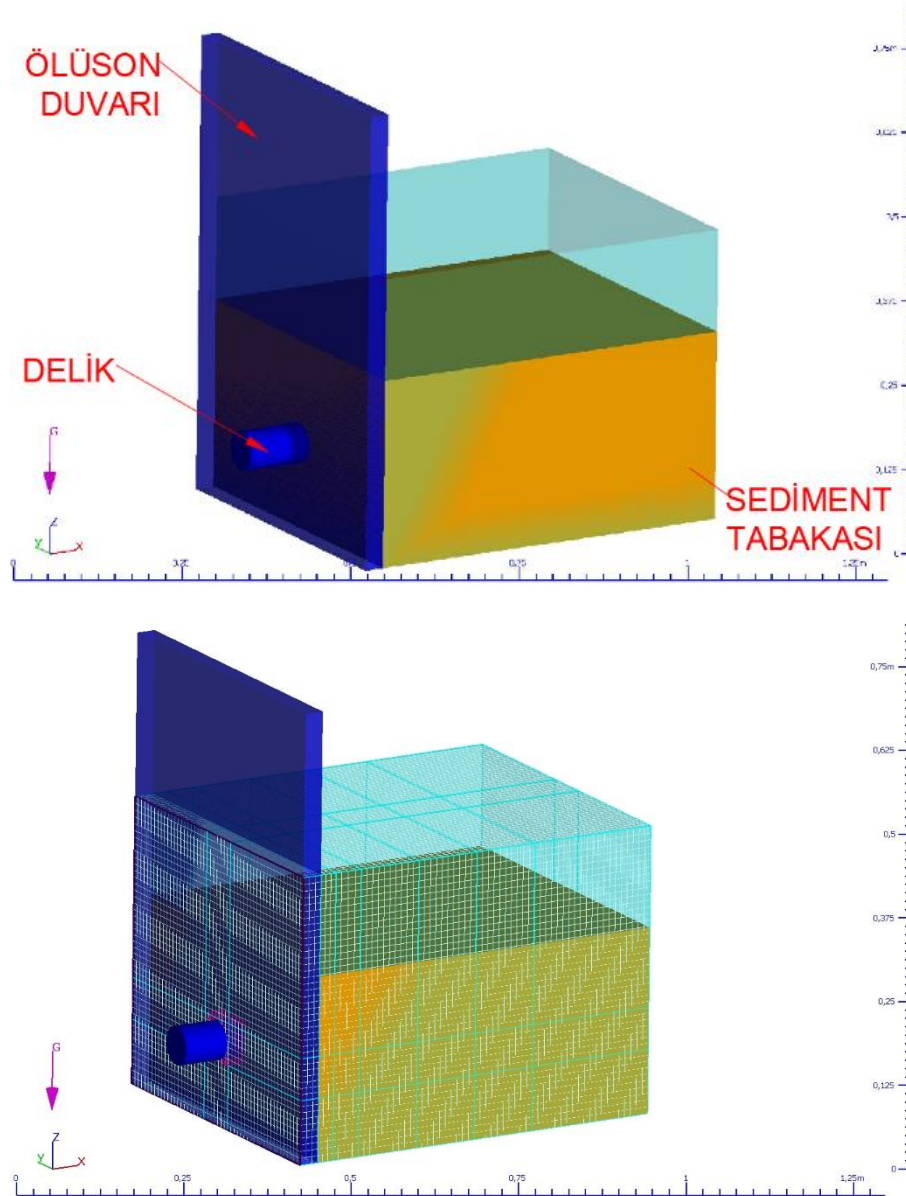
Baykal, Sümer, Fuhrman, Jacobsen ve Fredsøe (2017) tarafından çalışılmış olan sayısal modelde, dairesel köprü ayağına etki eden dalgaların yaratacağı kuvvetlerden dolayı oluşacak oyulmayı incelenmiştir. Model kurulumlarını Sümer, Petersen, Locatelli, Fredsøe, Musumeci ve Foti (2013) tarafından çalışılmış olan deney sonuçlarına göre kalibre etmiş ve doğruluğunun teyit edilmesinde bu çalışmayı referans almışlardır. Yaptıkları çalışmada, deney sonuçları ile kurulan modelin kalibrasyonunu farklı deney koşulları için kritik Shields sayısını değiştirerek sağlamışlardır.

Bundan sonraki kısımda laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalara ait sayısal modelin Flow-3D programında nasıl oluşturulduğu anlatılmaktadır. Modelin geometrisi, programın çizim modülü yardımıyla oluşturulmuştur. İki dikdörtgen prizma olmak üzere toplamda 3 adet bileşen tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla, ölü son duvarı, sediment ve çıkış borusudur. Çıkış borusu programa delik olarak tanımlanmıştır. Model geometrisi oluşturulması aşamasında, 10 m uzunluğa sahip olan kanalın ölü son dan itibaren 0,6 m olan kısmı modellenmiştir.

Deneyler sonucunda, meydana gelen oyulma çukurunun dip savak çevresinde olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısıyla model uzunluğu çözüm süresinin optimize edilmesi amacıyla olabildiğince kısa, sonuçların doğruluğunun bu değişkenden bağımsız olması için ise yeterince uzun olacak şekilde seçilmiştir. Ölü son için 50 cm genişliğe, 70 cm yüksekliğe ve 3 cm kalınlığa sahip dikdörtgen prizma şeklinde tek bir katı bileşen tanımlanmıştır. Su alma ağı için 5,32 cm iç çapa sahip silindirik boşluk eklenmiştir.

Modele girilen sediment üst kotu ve su yüzeyi üst kotu deneylerdeki değerlerle aynı alınmıştır. Sınır koşulları ve başlangıç koşulları değerlerine de gerektiğinde bu su yüksekliği tanıtılmıştır. Başlangıç koşulu olarak verilmiş olan su kütlesi için basınç tercihi hidrostatik olarak yapılmıştır. Geometrik bileşenlerden sonra çözüm ağı blokları oluşturulmuştur. Çözüm ağı aralığının küçültülmesi daha hassas sonuçlara ulaşılmasını sağlamakla birlikte çözüm süresini ve dosya boyutlarını arttırmaktadır. Çözüm ağı aralığının büyütülmesi ise modelin geometrik yapısının gerektiği kadar hassas yansıtılamaması sorununu doğurmaktadır.

Dolayısıyla en uygun çözüm ağı boyutlarının seçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla yazılıma iki tane çözüm ağı bloğu girilmiştir. Bunlardan bir tanesi tüm kanal boyunca daha geniş ağ aralığına sahip olarak tanımlanmışken diğeri ise çıkış yapısı ve çevresindeki durumu daha iyi analiz edebilmek için çıkış yapısının çevresine ve daha sık aralığa sahip olarak tanımlanmıştır. Şekil 6.4'te oluşturulan model ve çözüm ağları, Şekil 6.5'te ise çözüm ağlarının özellikleri gösterilmektedir



Şekil 6.4 Oluşturulan model ve çözüm ağları

▼ ☒ Mesh block 1: Block 1

Name: Block 1

Mesh Type: Non-conforming

Overlap length: m

Components: Conform To

Meshing component: No meshing components

Mesh Cells: Use cell size

Size of Cells: 0.01 m

Total Cells: 1000

▼ X direction

Total Cells:

> Mesh Plane 1: 0 m

> Mesh Plane 2: 0.6 m

▼ Y direction

Total Cells:

> Mesh Plane 1: -0.25 m

> Mesh Plane 2: 0.25 m

▼ Z direction

Total Cells:

> Mesh Plane 1: 0 m

> Mesh Plane 2: 0.5 m

▼ ☒ Mesh block 2: Block 2

Name: Block 2

Mesh Type: Non-conforming

Overlap length: m

Components: Conform To

Meshing component: No meshing components

Mesh Cells: Use cell size

Size of Cells: 0.005 m

Total Cells: 1000

▼ X direction

Total Cells:

> Mesh Plane 1: 0 m

> Mesh Plane 2: 0.03 m

▼ Y direction

Total Cells:

> Mesh Plane 1: -0.03 m

> Mesh Plane 2: 0.03 m

▼ Z direction

Total Cells:

> Mesh Plane 1: 0.027 m

> Mesh Plane 2: 0.083 m

☐ Shallow water mesh block

Şekil 6.5. Oluşturulan çözüm ağları özellikleri

Sayısal modelin kurulumunda önemi yüksek olan çözüm ağı tercihi için üç farklı yoğunlukta çözüm ağı denenmiştir. Denenen çözüm ağlarında çıkış yapısı için ve kanalın tümü için farklı inceliğe sahip iki ayrı üniform ağ bloğu kullanılmıştır. (Çizelge 6.1)

Çizelge 6.1. En uygun çözüm ağı bulunmasında kullanılan alternatifler

Deney Düzenegi			Çözüm Ağ Bloğu İnceliği		Oyulma Geometrisi Parametreleri					
l/D	c/D	Debi	Çıkış yapısı (cm)	Tüm Kanal (cm)	h_m (cm)	Görece Değişim (%)	∇ (cm ³)	Görece Değişim (%)	L_m (cm)	Görece Değişim (%)
0	1	5 lt/sn	0.5	1	20.72		14578.1		35.01	
						1.61%		2.29%		0.31%
		5 lt/sn	1	1	21.06		14920.0		35.12	
						1.12%		2.19%		2.85%
		5 lt/sn	2	1	21.3		15254.3		36.15	

Çizelge 6.1’den de görüldüğü gibi, çıkış yapısı ve çevresi için kullanılan 0,5 cm ve 1 cm’lik çözüm ağı aralığına ait sonuçlar incelendiğinde oyulma çukuru uzunluğu ve hacmi için elde edilen değerler bakımından çok ciddi farkların oluşmadığı anlaşılmaktadır. Ancak çıkış yapısına tanımlanan çözüm ağının genişliğinin fazla olması durumunda, çıkış yapısı modellenmesi istenilen düzeyde gerçekleşmediği görülmüştür (çıkış yapısının alanı olması gerektiğinden daha az tanımlandığından kesit ortalama hızı artmaktadır bu da oyulmanın büyümesine sebep olmaktadır) Bundan dolayı, kurulan tüm çözüm ağları incelendiğinde oyulmanın etkin olduğu çıkış yapısı ve çevresindeki üniform çözüm ağı için 0,5 cm, tüm kanalı içeren üniform çözüm ağı için ise 1 cm ağ aralığı kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca Flow 3D yazılımı sediment taşınımı modellemelerinde kullanılacak en küçük çözüm ağının sediment ortalama çapından yaklaşık 10 kat daha büyük olmasını önermektedir. Bu yüzden sediment tabanla temas halinde olan ağ bloğuna ait hücre büyüklüğü 1 cm olarak sabit tutulmuştur.

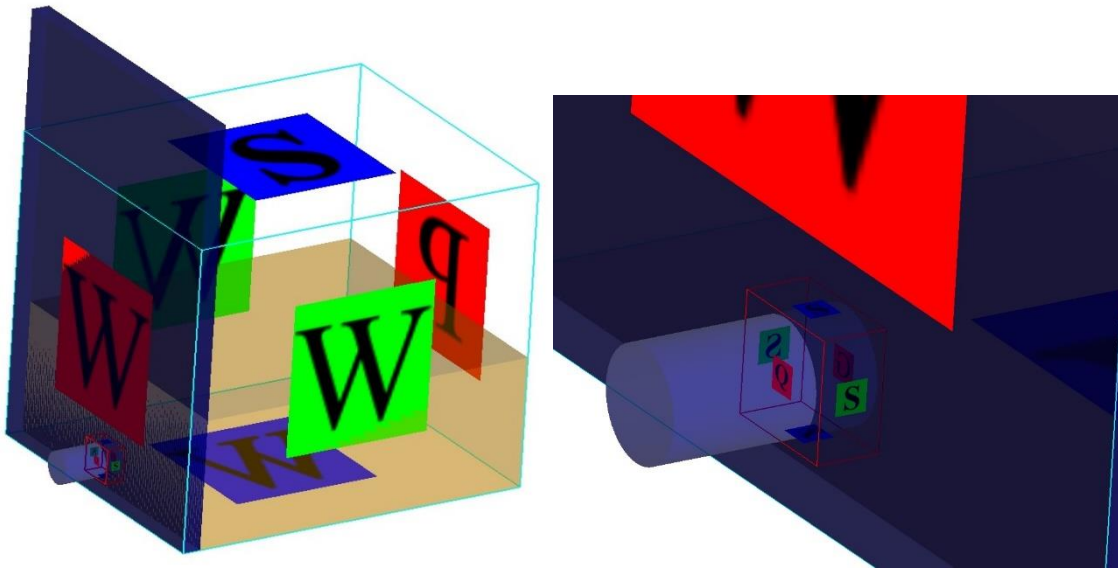
Kanal için oluşturulan çözüm ağında, kanal duvarlarının, tabanının ve ölü son duvarının tanıtılması için, sınır koşulları duvar (W) olarak tanımlanmıştır. Çıkış yapısının modellenmesi için kurulan çözüm ağında, Xmin sınır koşulu, debi (Q) sınır koşulu olarak tanımlanmıştır (Çizelge 6.2). Yapılan deneylerdeki farklı debiler, bu sınır koşuluna tanımlanarak sağlanmıştır. Çıkış yapısı y ve z yüzeyleri simetri (S) ve çıkış yapısı iki çözüm ağı arasında olduğu için grid overlay (G) olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.6) (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.2. Kanal boyunca kullanılan çözüm ağı için sınır koşulları

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

Çizelge 6.3. Çıkış yapısı için kurulan çözüm ağı sınır koşulları

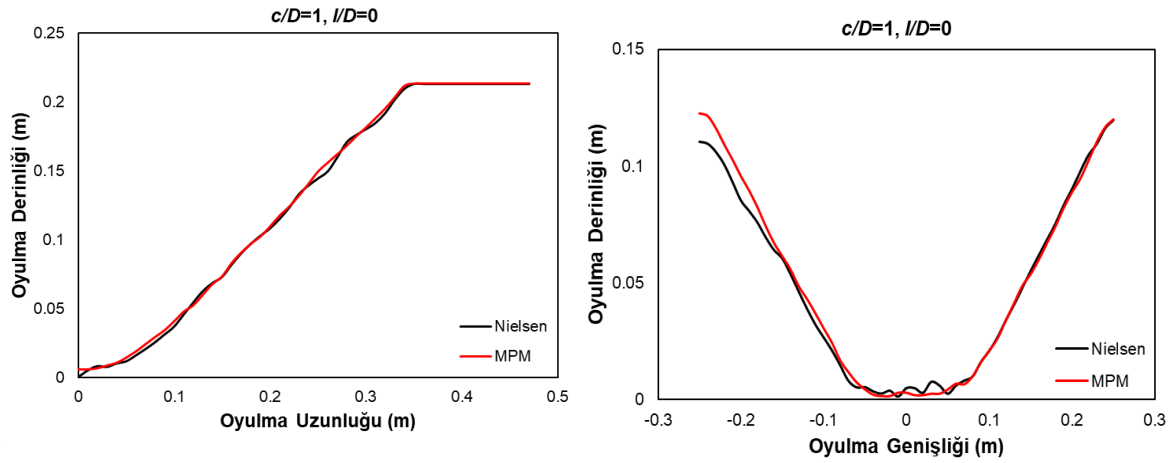
Çıkış yapısının modellenmesi için kurulan çözüm ağı yüzeyi	Sınır Koşulu (Kısaltması)
+X yüzeyi (sedimentle temas eden yer)	Grid Overlay (G)
-X yüzeyi (ölü son duvarı)	Hacimsel Debi (Q)
$\pm Z$ ve $\pm Y$	Simetri (S)



Şekil 6.6. Sınır koşulları

Deneysel modelde kullanılan sediment numunelerinin fiziksel nitelikleri deneysel çalışma bölümünde verilmiştir. Yatak yükü taşınım modeli olarak Meyer-Peter- Müller (1948) taşınım yaklaşımı kullanımına karar verilmiş, yatak taşınım katsayısı ise 8 kabul edilmiş ve sediment içsel sürtünme açısı ise deneylerde kullanılan kum numuneye ait içsel sürtünme açısı değeri olan 35° alınmıştır. Literatürde mevcut olan çalışmalar incelendiğinde Meyer-Peter-Müller yaklaşımının jet akımından kaynaklı oyulmalarda deneysel modellere yeterince yaklaşan sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Wei ve diğerleri 2014, An ve diğerleri 2015).

Ayrıca hazırlanan HAD modeli üzerinde, $Q=5$ lt/sn debi değeri için, $c/D=1$ $l/D=0$ parametrelerinde medyan çapı (d_{50}) 1.25 mm olan sediment numunesi için mevcut olan üç farklı yatak taşınımı yaklaşımından ikisi, dip savağın ölü son duvarı ve ile bitişik olduğu model kullanılarak kıyaslanmıştır. Van Rijn taşınım modeli ile sonuç alınamadığı için grafiklerde verilmemiştir. Çözüm ağı yapısı kanal modellemesi için 1 cm, çıkış ağı için 0.5 cm incelikte üniform seçilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7. İki farklı yatak taşınım yaklaşımı kıyaslaması boykesit ve enkesit

Elde edilen çözümler incelendiğinde Meyer-Peter-Müller ile Nielsen yaklaşımlarının birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Literatürde Meyer-Peter-Müller yaklaşımının oyulmanın incelendiği çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı görülmekte ve deneysel sonuçlara yakın sayısal çözümler elde edildiği belirtilmektedir.

Örneğin An ve diğerleri (2015), kapak altı jet akımının oluşturduğu oyulmayı inceledikleri çalışmalarında Meyer-Peter-Müller modelini de içeren üç yaklaşımı kıyaslamışlar ve tüm yaklaşımların deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Apsley ve Stansby (2008) yatak yapısı ve taban eğiminin taşınım yaklaşımlara olan etkisini, Wei ve diğerleri (2014) ile Aydın ve Karaduman (2018) ise kapak altı jet akımlarından kaynaklı oyulmaları inceledikleri çalışmalarında Meyer-Peter-Müller modelini kullanmışlardır. Bu sebepler dolayısıyla mevcut çalışmada da bahsi geçen model tercih edilmiştir.

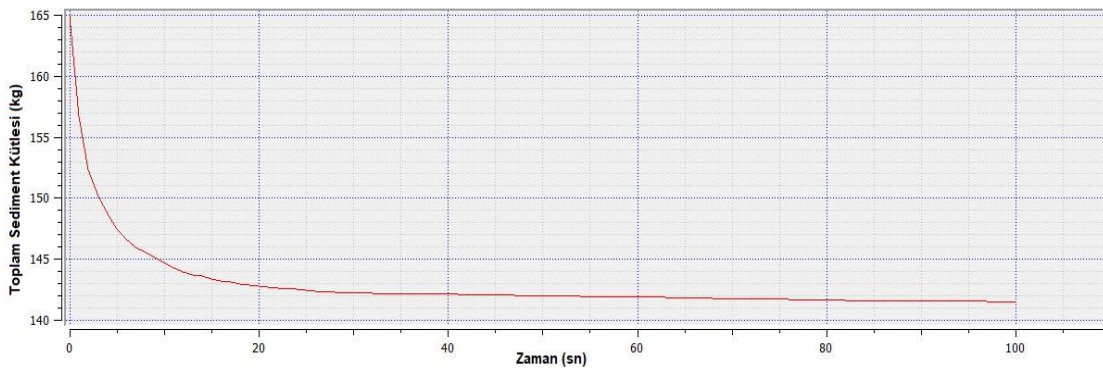
Programa girilmiş sediment özelliklerinden bir tanesi de kritik Shields katsayısıdır. Bu katsayı, deneyde oluşan oyulma çukuruna direkt etki eden ve sayısal modelin deneysel sonuçlar ile uyumlu olması için kalibre edilebilir bir parametredir.

Programın kendisi, başlangıçta bu değeri 0,05 olarak sedimente tanımlar. Mevcut çalışmada ise bu değer farklı akım ve geometrik koşullar için farklılık gösterecek şekilde tayin edilmiş olup sabit olarak düşünülmemiştir. Çünkü Shields diyagramı, tabandaki üniform sediment danelerinin sabit hızlı bir kanal akımı etkisindeki harekete başlamasını sadece sedimente etkileyen sürüklenme kuvvetleri altında incelemektedir. Oysa mevcut çalışmadaki akım sabit hızlı olmayıp çıkış yapısına doğru hızlanmaktadır.

Ayrıca sediment hareketi üzerinde kaldırma kuvvetleri ve Shields diyagramında ele alınmayan çevrintiler (vorteksler) de etkilidir. Miedama (2010) da Shields diyagramını açıklayan yeni bir model sunduğu çalışmasında, kritik Shields sayısının öngörülen değerlerden çok farklı değerler alabileceğini belirtmiştir. Ayrıca Baykal ve diğerleri (2017) ve Yu ve diğerleri (2020) oyulma konusunu sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında kalibrasyon parametrelerinden biri olarak Shields sayısını kullanmışlardır. Bu çalışmada da kritik Shields değeri kalibrasyon parametresi olarak seçilmiş ve sabit alınmamıştır.

Model oluşturulurken bir diğer konu, simülasyon süresinin belirlenmesidir. Bu süre, oyulma geometrisinin denge durumuna geldiği zaman olarak kabul edilmiştir. Denge durumu, yapılan simülasyonda belirli bir zamanda hacimsel değişimin olmaması veya çok az olması olarak tanımlanabilir. Her deney düzeneği için zamana göre oyulma geometrisindeki değişim kıyaslanarak, sonuçların zamandan bağımsız olacağı optimum simülasyon süreleri tespit edilmiştir.

Uzaklaştırılan sediment miktarı değişiminin, 100 saniyelik bir süreden sonra ihmal edilebilir seviyede olması sebebiyle, çözüm süresi en uygunu olarak her bir simülasyon için 100 sn seçilmiştir (Şekil 6.8).



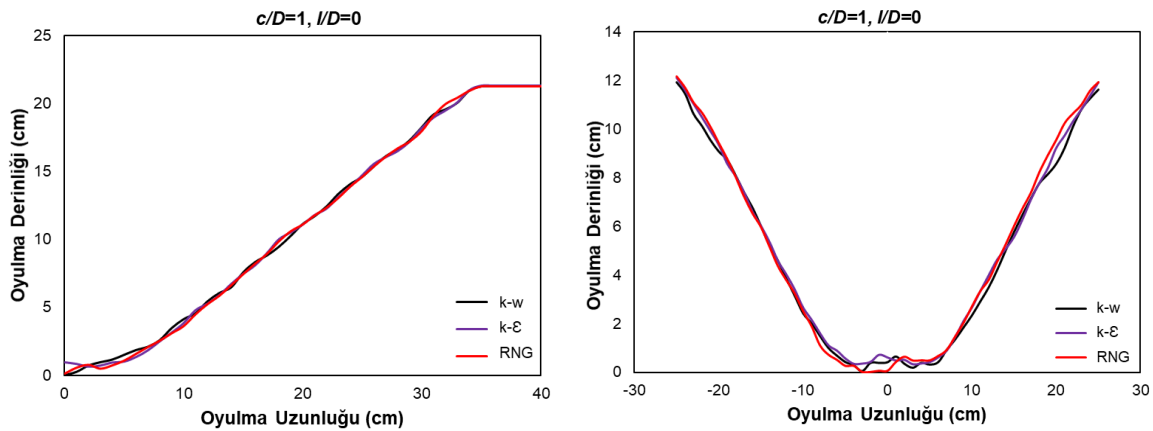
Şekil 6.8. Simülasyon süresi

Ayrıca fizik sekmesinde, yerçekimi ve ataletsiz referans çerçeve modeli (Gravity and Non-inertial Reference Frame), viskozite ve türbülans modeli (Viscosity and Turbulence Model) ve yoğunluk hesaplama modeli (Density Evaluation) kullanılmıştır. Literatürde oyulma ile ilgili yapılan çalışmalarda büyük çoğunlukla RNG k- ϵ türbülans modelinin kullanıldığı görülmüştür.

Bu durumu Lee ve Abd Wahab (2019), su alma ağızlarındaki akımın türbülans modellerinin performansı konulu çalışmasında, sahadaki ölçümlerle en çok uyuşan modelin RNG k- ϵ türbülans modelinin olduğunu göstermişlerdir.

Ayrıca, Demirci ve diğerleri (2012), köprü ayaklarının modellenmesi ile ilgili yaptıkları sayısal çalışmada RNG ve k- ϵ yöntemleri ile yapılan çözümlerde, 1 cm ağ aralığında logaritmik hız dağılımını veren ve deney verileri ile uyumlu yeterli hassasiyette sonuçlar alınabildiğini, ancak LES türbülans yönteminde hassas bir çözüm için aralıkların sıklaştırılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında da, türbülans modellerinden k- ϵ modeli, RNG modeli ve k-w modeli üzerinden karşılaştırma amaçlı simülasyonlar yapılmıştır. $c/D=1$, $l/D=0$ parametreleri için, 5 lt/sn debide, kritik Shields sayısı 0.0148, simülasyon süresi 100 sn olarak belirlenen simülasyonlarda, 3 farklı türbülans modeline ait oyulma çukurlarının boykesit ve enkesitleri aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Türbülans modelleri kıyaslaması

Sonuçlara bakıldığında 3 farklı türbülans modelinin de birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Literatür araştırmaları sonucu daha çok kullanılan ve çözüm süresi bakımından daha uygun olan ve de yapılan deney sonuçları ile daha çok örtüşen RNG türbülans modeli tercih edilmiştir.

6.4. Sayısal Modelin Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan HAD yazılımının, rezervuarların basınçlı yıkanması olayını ne derecede tahmin edebildiğini araştırmak için deneysel olarak incelenen farklı durumların sayısal modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarını özetler tablo aşağıda verilmiştir. (Çizelge 6.4) Tüm simülasyonlar Numune 1 ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.4. Çözümü gerçekleştirilen simülasyonlar

c/D	l/D	Q (lt/sn)
1	0	5
2,5	0	3
2,5	0	5
2,5	0	7
2,5	0	9
3,5	0	5

Tez kapsamındaki nümerik çalışmalarda Intel® Core™ i5–6200U işlemcisine ve 12 Gb 2300 Mhz RAM sistemine sahip kişisel masaüstü bilgisayar kullanılmıştır. Tüm deneylere ait simülasyonlarının yapılmadığı sadece bazı örneklerin sunulduğu unutulmamalıdır. Çünkü yapılan simülasyonlar, Shileds sayılarına bağlı olarak deneme yanılma gerektirdiğinden çözüm süreleri uzun olmaktadır. Bu durum da deneylerde incelenen tüm verilerin simülasyonlarının yapılmasını tez süresi içerisinde olanaksız kılmaktadır.

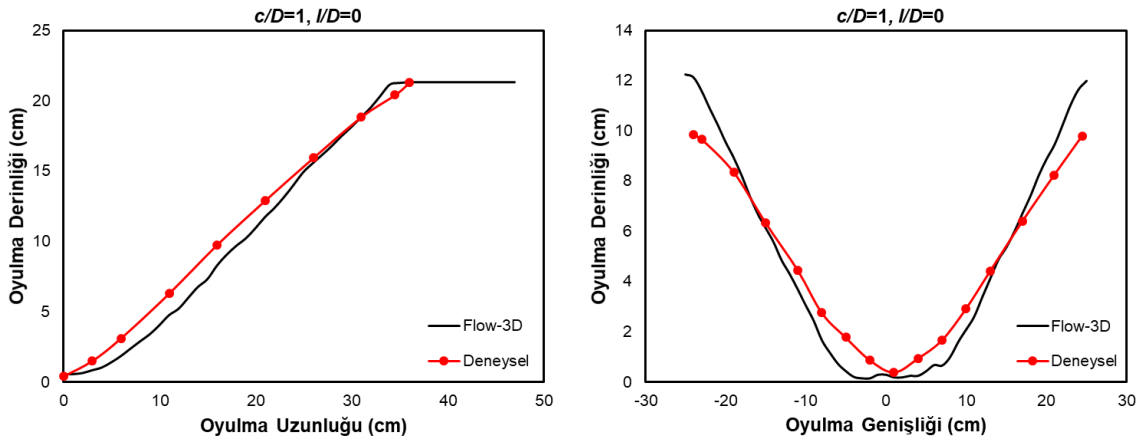
Flow-3D programı yardımıyla oluşturulan sayısal model ile ilgili genel bilgiler daha önce modelin kurulması alt başlığında verilmiştir. 50 cm genişlikte modellenmiş kanalda, debi miktarı 5 lt/sn olacak şekilde gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Sediment taşınım yöntemi olarak Meyer-Peter-Müller yaklaşımı seçilmiş, sürüklenme katsayısı 0.018, taban yük katsayısı 8, sedimentin içsel sürtünme açısı 35 derece ve türbülans modeli RNG olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım ve katsayılar ilerleyen simülasyonlarda aynen kullanılmıştır. Ayrıca bu değerler gerek literatürde oyulma ile ilgili çalışmalarda kullanılan değerler olması gerekse deney neticelerine en yakın sonuçları vermesi nedeniyle seçilmiştir. $c/D=1$, $l/D=0$ olarak ayarlanmış, simülasyon süresi 100 sn seçilmiştir.

Kritik Shields sayısı için birden fazla deneme yapılmış olup, simülasyon sonuçlarının laboratuvarda yapılan deney sonuçlarına en yakın değeri verdiği görülen 0,015 değeri kullanılmıştır. Bu değer değiştirilmesindeki amaç, harekete geçecek sediment miktarını ayarlamaktır (simülasyonlardaki farklı denemelerin deney sonuçları ile ne kadar uyumlu olduğu, en küçük kareler yöntemi ile kontrol edilmiştir). Daha önce de açıklandığı üzere, Shields diyagramının sediment tanesinin harekete başlamasını sabit hız altında inceleyip, kaldırma kuvvetlerini ve yüzey altı çevrintilerini dikkate almamaktadır. Mevcut çalışmada ise akım hızı su alma ağzına doğru hızlanmaktadır. Hem bu sebeple hem de literatürde Shields sayısının sayısal çalışmalarda kalibrasyon parametresi olarak kullanıldığı görüldüğü için, deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu hale getirilmesi amacıyla mevcut çalışmada da Shields sayısı tercih edilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerin laboratuvarda yapılan deney ile karşılaştırması aşağıdaki tabloda detaylı olarak verilmiştir. Yapılan simülasyona ait sonuçlar ile laboratuvar deney kıyası Çizelge 6.5’de ve Şekil 6.10’da verilmiştir.

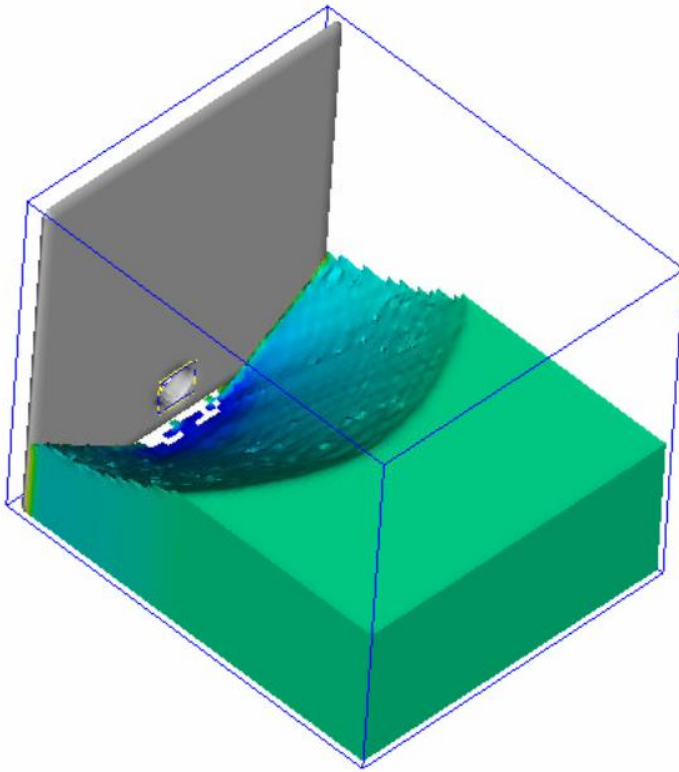
Çizelge 6.5. $c/D=1$, $l/D=0$ ve $Q=5$ lt/sn debi için simülasyon ve deney karşılaştırması

	c/D	l/D	Q (lt/sn)	L (cm)	h_m (cm)	∇ (cm ³)
Simülasyon	1	0	5	36	21.15	14578.11
Deney	1	0	5	36	20.90	14654.92

Şekil 6.10'da, çıkış ağzı ekseninden alınan bir boykesit ile ölü son önünden alınan enkesit verilmiştir. Grafikler kıyaslandığında deney sonucu ile simülasyon sonucunun maksimum oyulma uzunluğu ve maksimum oyulma derinliği açısından tutarlı olduğu görülmüştür. Simülasyon ve deney sonucu elde edilen oyulma uzunluğu çok yakın ölçülmüştür. Benzer şekilde maksimum oyulma derinliği açısından da fark sadece 2,5 mm'dir. Oyulma derinliğine hata payı %1.19'dur. Hacimler arası fark 76.81 cm^3 olup hata payı %0.52'dir. Ancak çıkış ağzı ekseninden kanal yan duvarlarına ve çıkış ağzı ekseninde kot okuması alınan noktalarda ufak farklar olduğu görülmüştür. Hadisenin doğası gereği, sediment taşınımı konusunda nümerik sonuçlar ile deneysel veriler arasında %40-50'lere varan hataların olduğu da önceki çalışmalarda vurgulanmaktadır (Ghasemi ve Soltani-Gerdefaramarzi 2017, Abdelaziz ve diğerleri 2010).



Şekil 6.10. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=1, l/D=0$ ve $Q=5 \text{ lt/sn}$



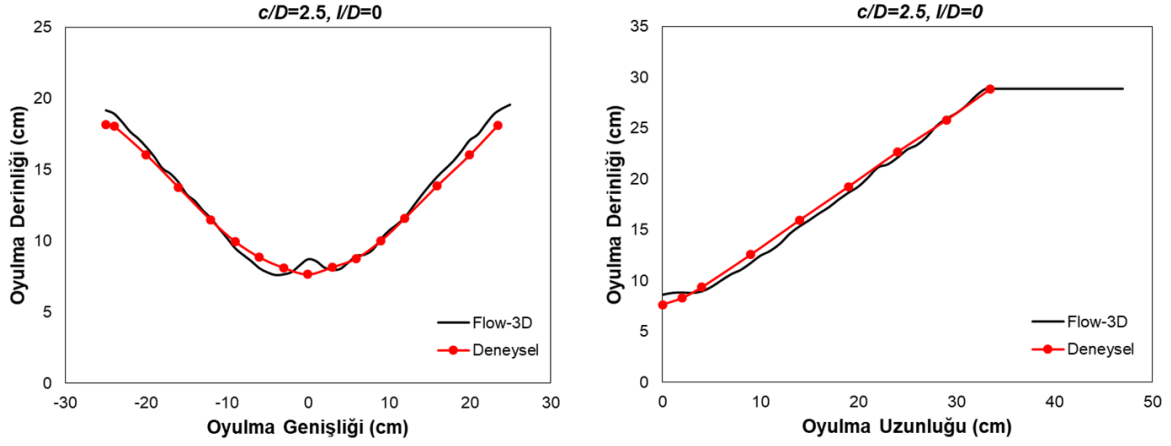
Şekil 6.11. $c/D=1$, $l/D=0$, $Q=5$ lt/sn için oyulma çukuru görünümü

Diğer yapılan simülasyon sonuçlarını gösterir çizelge aşağıda verilmiştir.(Çizelge 6.6)

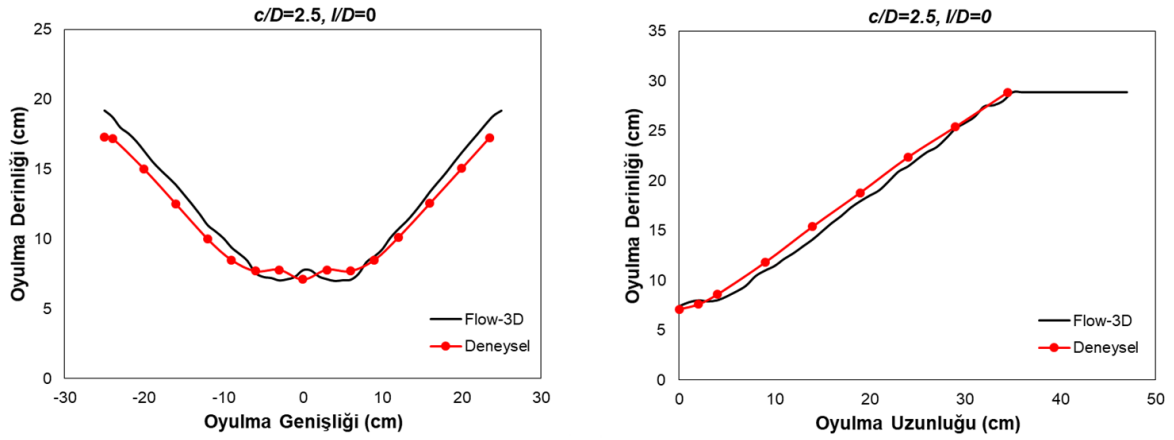
Çizelge 6.6. Simülasyon sonuçları ile laboratuvar sonuçlarının kıyası

Düzenek	Sonuç	c/D	l/D	Q (lt/sn)	L (cm)	Hata (%) L	h_m (cm)	Hata (%) h_m	∇ (cm ³)	Hata (%) ∇
1	Sim.	1	0	5	36	0,00	21,15	1,20	14578,11	0,52
	Deney	1	0	5	36		20,9		14654,92	
2	Sim.	2,5	0	3	34	3,03	20,81	0,68	13420,73	0,27
	Deney	2,5	0	3	33		20,67		13385,23	
3	Sim.	2,5	0	5	34	1,49	21,26	0,19	13974,17	1,34
	Deney	2,5	0	5	33,5		21,22		14163,97	
4	Sim.	2,5	0	7	35	1,45	21,87	0,46	15044,43	0,54
	Deney	2,5	0	7	34,5		21,77		15125,88	
5	Sim.	2,5	0	9	36,5	2,82	22,1	2,51	17659,71	1,01
	Deney	2,5	0	9	35,5		22,67		17839,51	
6	Sim.	3,5	0	5	34	1,45	21,38	3,69	13654,08	0,13
	Deney	3,5	0	5	34,5		20,62		13636,41	

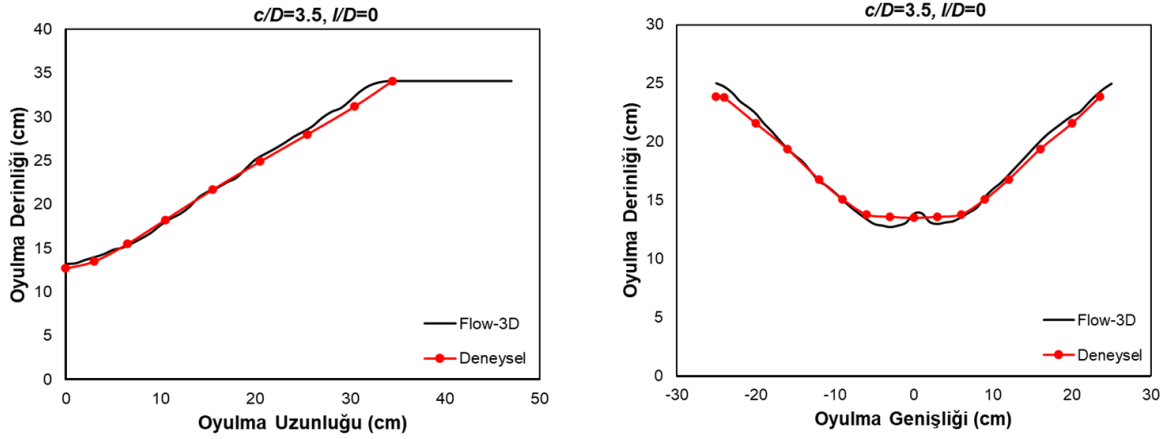
Çizelge 6.6'dan da görülebileceği üzere, HAD tabanlı Flow-3D programı, basınçlı yıkama konusunda incelenen simülasyonlar için laboratuvar sonuçlarına yakın sonuçlara kabul edilebilir hata payı içinde ulaşabilmektedir. Şekil 6.12-6.14'deki boy kesit ve en kesitlerden de görülebileceği üzere oyulma çukurunun geometrik özelliklerini tahmin etmede kurulan sayısal modeller başarılı olmuştur.



Şekil 6.12. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=2,5$, $l/D=0$, $Q=5$ lt/sn

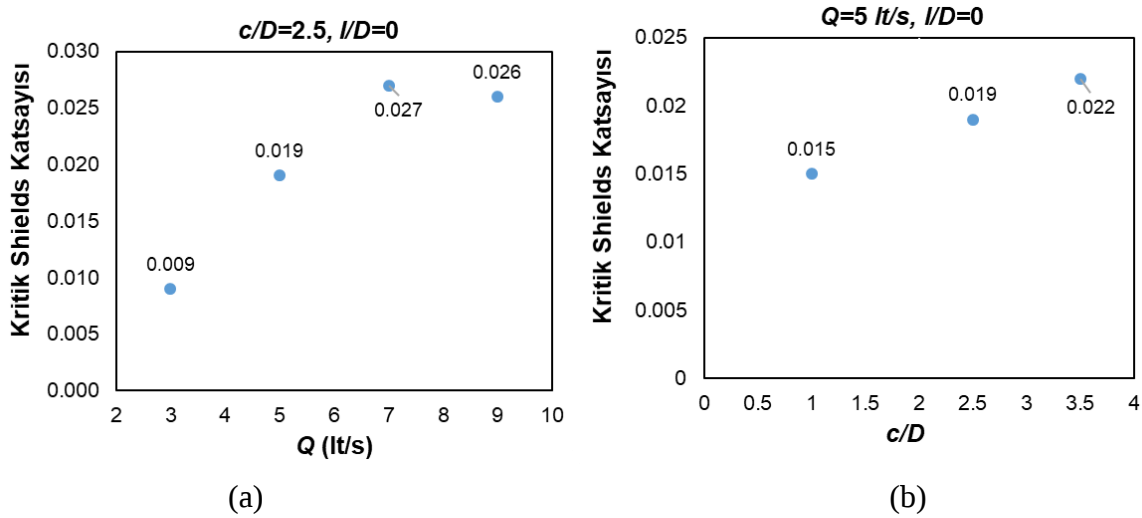


Şekil 6.13. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=2,5$, $l/D=0$, $Q=7$ lt/sn



Şekil 6.14. Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırmaları: $c/D=3,5$, $l/D=0$, $Q=5$ lt/sn

Yapılan bu simülasyon çalışmalarında, kritik Shields Katsayısının değişimi de incelenmiştir. Aynı c/D ve l/D koşulu altında 3, 5, 7 ve 9 lt/sn için yapılan 4 simülasyonun her birinde farklı kritik Shields katsayısı kullanılmıştır. Şekil 6.15'te bu katsayının debiye ve c/D 'ye göre değişimini gösterir grafik verilmiştir.

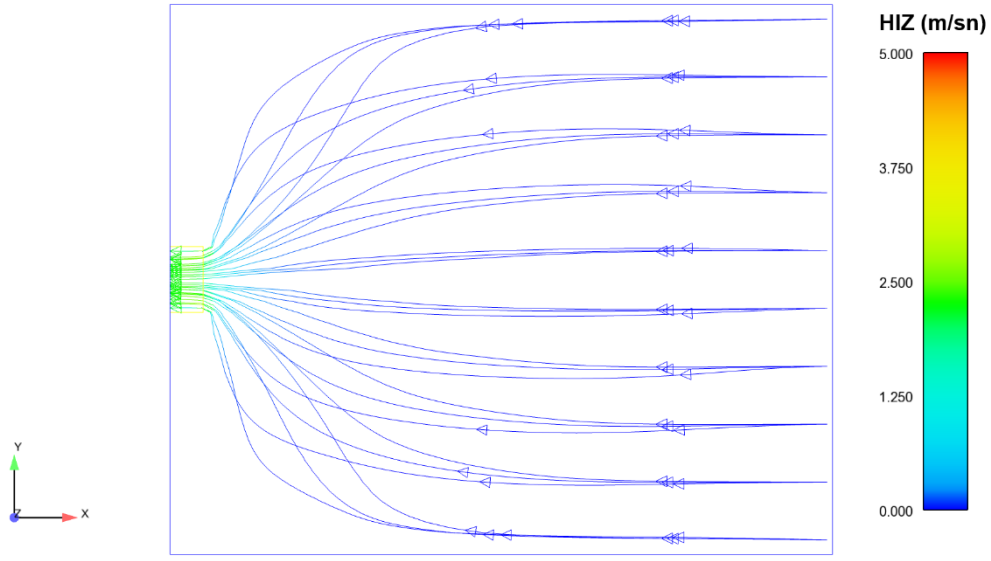


Şekil 6.15. Kritik Shields Katsayısının debiye ve c/D 'ye göre değişimi

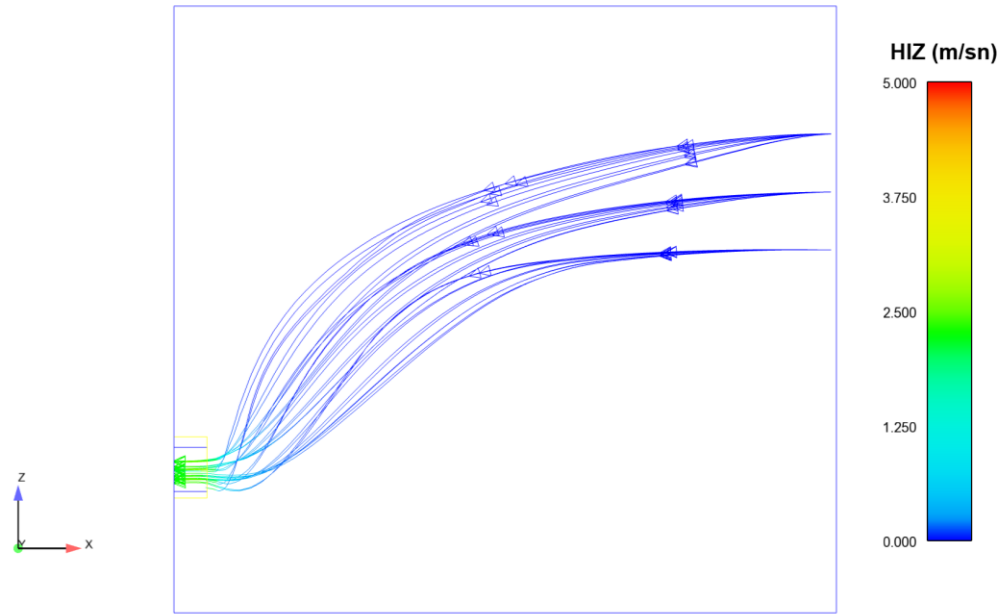
Bilindiği üzere, Shields sayısı tabandaki sediment danelerine etkileyen kayma gerilmesinin daneleri yerinde tutmaya çalışan sürtünme gerilmelerine oranıdır. Kritik Shields katsayısı, deneyde oluşan oyulma çukuruna direkt etki eden ve sayısal modelin deneysel sonuçlar ile uyumlu olması için kalibre edilebilir bir parametredir. Şekil 6.15 (a)'dan ve daha önce verilen simülasyon sonuçlarından görüleceği üzere, aynı c/D ve l/D parametreleri kullanılarak farklı debilerle yapılan simülasyonlarda, debi değeri arttıkça kritik Shields katsayısı da artmaktadır.

Benzer şekilde, sabit debi ve l/D için 3 farklı c/D 'nin kritik Shields katsayısı ile değişimini gösterir grafik Şekil 6.15 (b)'de verilmiştir. Grafikten ve daha önce verilmiş olan simülasyon sonuçlarından görülebileceği üzere, c/D değeri arttıkça Shields katsayı artmaktadır.

Flow-3D yazılımı yardımıyla akım çizgileri de elde edilebilmektedir. Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 sırasıyla $c/D=2,5$, $l/D=0$ ve $Q=5$ lt/sn koşullarında, su alma ağzı membasında oluşan akım çizgilerini ve eş hız eğrileri ile hız vektörlerini göstermektedir. Şekillerde x-y düzlemi olarak kanal genişliği ve uzunluğu boyunca plan görünümü, x-z düzlemi olarak ise kanal uzunluğu ve yüksekliği boyunca yan görünüş verilmektedir. Şekil 6.17 (a)'da gösterilen eş hız eğrileri sediment üst kotunun referans alındığı durumu yansıtmaktadır.

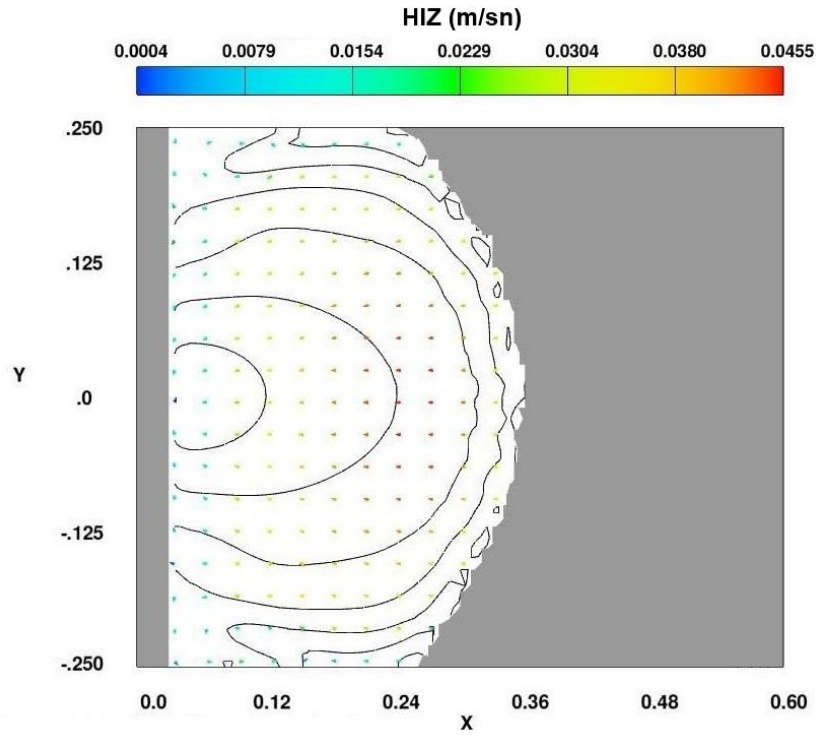


(a)

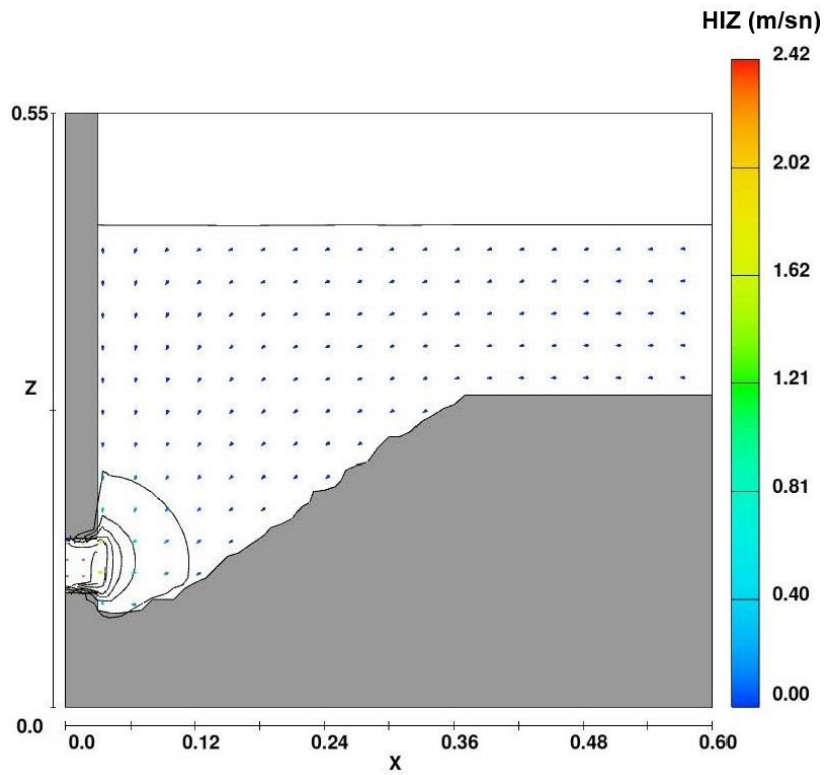


(b)

Şekil 6.16. Akım çizgileri a) x-y düzlemi (plan) b) x-z düzlemi (yan görünüş)



(a)



(b)

Şekil 6.17 Eş hız eğrileri ve hız vektörleri a) x-y düzlemi (plan) b) x-z düzlemi (yan görünüş)

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Baraj rezervuarlarının sedimentle dolması, depolama kapasitesinin ve dolayısıyla ekonomik ömürlerinin azalmasına sebep olabilmektedir. Yeni bir baraj inşa etmenin mevcut zorlukları düşünüldüğünde, sedimentin baraj gölüne girişinin mümkün olduğunca engellenmesi, girdiği takdirde de rezervuardan temizlenmesinin sağlanması oldukça önem kazanmaktadır. Bu amaçla geliştirilen çeşitli yöntemler içerisinde ise en etkili ve ekonomik olanın seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, baraj gölünde biriken sedimentin dipsavaklar aracılığıyla temizlenmesi yöntemlerinden biri olan basınçlı yıkama uygulaması deneysel ve sayısal modellenmiştir. Çalışmanın ana amacı olan baraj eğrilığının, dipsavak yapısının baraj memba duvarına ve talveg kotuna olan uzaklığının meydana gelecek oyulma çukurunun geometrik özelliklerine olan etkileri deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Densimetrik Froude sayısının artması sediment tanelerine etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin artmasına dolayısıyla da oyulma çukurunun derinlik, uzunluk ve hacim değerlerinin büyümesine yol açmaktadır.
- Dipsavak konumunun baraj talveg kotuna olan uzaklığının, bir başka ifade ile tabana olan mesafesinin azalması, oluşan radyal hızların dolayısıyla da sediment tanesini harekete geçiren kuvvetlerin büyümesine yol açmaktadır. Bu sayede dipsavak yapısının tabana olan mesafesinin azalması oyulma çukuru geometrik özelliklerini ve uzaklaştırılacak sediment miktarını arttırmaktadır.
- Dipsavağın baraj duvarıyla arasındaki mesafenin artması, çıkış yapısının altında oluşan ve sediment tanelerini çıkış yapısına taşıyan yüzey altı çevrintilerinin kuvvetinin artmasına yol açmakta, bu sebeple de oyulma çukurunu büyütecek bir etki yaratmaktadır.
- Baraj memba eğrilığının, diğer bir deyişle baraj duvarının düşeyle yaptığı açının artması da oyulma çukurunu büyütecek bir etki yaratmaktadır.
- Daha büyük bir oyulma hacmi için çıkış yapısı tabana yakın olmalı ve baraj duvarıyla arasındaki yatay mesafe de arttırılmalıdır.

- Deneysel veriler kullanılarak elde edilen ampirik ilişkiler, sediment taşınımı gibi karmaşık bir fiziksel hadise düşünüldüğünde ve verilen aralıklarda kullanılmak kaydıyla, tatmin edici olarak nitelendirilebilir.
- Yapılan sayısal çalışmanın sonuçları göstermektedir ki, HAD tabanlı Flow-3D programı, basınçlı yıkanmanın modellenmesinde etkili şekilde kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda kalibrasyon parametresi olarak kritik Shields sayısı kullanılmış ve çıkış yapısının baraj duvarına mesafesinin sıfır olduğu durumlarda gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Fakat sayısal modelden çıkış yapısının duvardan uzak olduğu durumlar için sonuç alınamamıştır. Bunun sebebinin çözüm ağı (mesh) tanımlaması ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Yapılan araştırmalarda önerilen çözüm ağı aralıkları sıkılaştırılması ve belirlenen zaman aralığının düşürülerek çözüm alınmaya çalışıldığı durumlarda ise iterasyon problemleri ile karşılaşmıştır.

KAYNAKLAR

- Abdelaziz, S., Bui, M. D., Rutschmann, P. (2010). Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet. *River Flow 2010*, 1597-1604.
- Abdolahpour, M., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. (2015). Application of pile and submerged vanes to remove sediments from dam reservoirs in pressurized flushing. *Iranian Water Research Journal*, 9(4), 165-169.
- 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*, 100(9), e202000017.
- Aguirre-Pe, J., Olivero, M. I. A. L., Moncada, A. T. (2003). Particle densimetric Froude number for estimating sediment transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), 428-437.
- Althaus, J. M. I. J., Cesare, G. D., Schleiss, A. J. (2015). Sediment Evacuation from Reservoirs through Intakes by Jet-Induced Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 127-133
- 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.
- Bagnold, R. A. (1956). The flow of cohesionless grains in fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*. 235–297.
- Baykal, C., Sumer, B. M., Fuhrman, D. R., Jacobsen, N. G., Fredsøe, J. 2(017). Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves. *Coastal Engineering*, 122, 87-107.
- Beiramipour, S., Qaderi, K., Rahimpour, M., Ahmadi, M. M., Kantoush, S. A. (2020). Investigation of the impacts of submerged vanes on pressurized flushing in reservoirs. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(9), 2187-2201.
- Bryant, D. B., Khan, A. A., Aziz, N. M. (2008). Investigation of flow upstream of orifices. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 98-104.
- Chaudhry, M. A., Habib-ur-Rehman, M., Akhtar, M. N., Hashmi, H. N. (2014). Modeling sediment deposition and sediment flushing through reservoirs using 1-D numerical model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(2), 647-658.
- Demirci, M., Kocaman, S., Varlı, B. (2012). Farklı geometrilerdeki köprü kenar ayakları etrafındaki hız dağılımının sayısal incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(3), 161-173.
- Dey, S., Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 246-257.

- Emamgholizadeh, S., Fathi-Moghadam, M. (2014). Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 674-681.
- Engelund, F., Fredsøe, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Hydrology Research*, 7(5), 293-306.
- Fan, J., Morris, G. L. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook* (1. Basım). New York: McGraw-Hill, 448-485
- Fang, D., Cao, S. (1996). *An experimental study on scour funnel in front of sediment flushing outlet of a reservoir*. Proceedings of 6th Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, NV, 78-84.
- Fathi-Moghadam, M., Emamgholizadeh, S., Mahmoud, B., Mehdi, G. (2010). Physical modeling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 509-514.
- Flow Science, Inc.. (2008) “*FLOW-3D® User Manual Version 9.3*” Santa Fe, NM, USA.
- 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., Schleiss, A.J., Boes, R.M., Pfister, M. (2019). *Hydraulic Engineering of Dams* (1. Basım). Hollanda: CRC Press, 737-816
- Hager, W. H., & Oliveto, G. (2002). Shields’ entrainment criterion in bridge hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 538-542.
- Haghjoei, H., Rahimpour, M., Qaderi, K., Kantoush, S. A. (2021). Experimental study on the effect of bottomless structure in front of a bottom outlet on a sediment flushing cone. *International Journal of Sediment Research*, 36(3), 335-347.
- Harlow, F. H., Nakayama, P.I. (1967). *Turbulence Transport Equations*. Volume 10, 2323-2332
- Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39(2), 201-225.
- Kamble, S.A., Kunjeer, P.S., Sureshkumar, B., Neena, I. (2018). Hydraulic model studies for estimating scour cone development during pressure flushing of reservoirs. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(3), 337-344.
- Karmacharya, S. K., Ruther, N., Aberle, J., Shrestha, S. M., Bishwakarma, M. B. (2021). Physical modelling of pressure flushing of sediment using lightweight materials. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(3), 251-263.
- Khanarmuei, M. R., Rahimzadeh, H., Kakuei, A. R., Sarkardeh, H. (2016). Effect of vortex formation on sediment transport at dual pipe intakes, *Sādhanā*, 41(9), 1055-1061.
- Kokubo, T., Itakura, M., Harada, M. (1997). Predicting method and actual results on flushing of accumulated deposits from Dashidaira Reservoir. *ICOLD 19th*, Florence, Italy.

- Lai, J.S., Shen, H.W. (1996). Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), 237-255.
- Lee, H. C., Wahab, A. K. A. (2019). Performance of different turbulence models in predicting flow kinematics around an open offshore intake. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1-14.
- Madadi, M. R., Rahimpour, M., Qaderi, K. (2016). Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 180-189.
- Madadi, M. R., Rahimpour, M., Qaderi, K. (2017). Improving the pressurized flushing efficiency in reservoirs: an experimental study. *Water Resources Management*, 31(14), 4633-4647.
- Mahtabi, G., Karimi, S., Mohamadiun, M. (2018). Effect of the number of rows, height and arrangement of submerged vanes in flushing of dam reservoir. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 285-296.
- Masahire, T., Yumi, S. (2005). *Numerical simulation of an assessment of the environmental impact on a river ecosystem of sediment flushing from a dam*. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation, 53,139-144, Japonya.
- Menter, F. R. (1997). Eddy Viscosity Transport Equations and Their Relation to the k- ϵ Model. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 119(4), 876-884.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). *Formulas for bed-load transport*, IAHR 2nd meeting, Stockholm, Sweden.
- Miedema, S.A., (2010). *Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications*. WODCON XIX, Beijing, China.
- Nielsen, P. (1992). *Coastal bottom boundary layers and sediment transport* (1. Basım). Singapur: World Scientific, 201-258.
- Oertel, M., Bung, D. B. (2015). Stability and scour development of bed material on crossbar block ramps. *International Journal of Sediment Research*, 30(4), 344-350.
- Pekmezci, S., Buttanrı, B. (2011). *Baraj göllerinde sediment birikimi ve sediment yıkama (flushing) metodu*, II. Su Yapıları Sempozyumu, Diyarbakır, Türkiye.
- 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.
- Pringle, W.J., Shahmirzadi, M.E.M., Yoneyama, N., Sumi, T., Emamgholizadeh, S. (2013). *Advances in River Sediment Research*. (Editör: Fukuoka vd.) Londra: Taylor and Francis, 1249
- Reynolds, O. (1895). On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. 186: 123-164

- Richardson, J. F., Zaki, W. N. (1954). The sedimentation of a suspension of uniform spheres under conditions of viscous flow. *Chemical Engineering Science*, 3(2), 65-73.
- Sawadogo, O., Basson, G. R. (2019). *3D CFD modelling of reservoir sedimentation pressure flushing at hydropower dams*. SANCOLD 2019 Conference, Johannesburg, Güney Afrika.
- Scheuerlein, H., Tritthart, M., Gonzalez, F.N. (2004). Numerical and physical modeling concerning the removal of sediment deposits from reservoirs, *Hydraulics of Dams and River Structures*, (Editörler: Yazdandoost ve Attari, Londra: Taylor and Francis), 328.
- Shahmirzadi, M.E.M., Deghhani, A.A., Sumi, T., Mosaedi, A., Meftah, M.H. (2010). Experimental investigation of pressure flushing technique in reservoir storages. *Water and Geoscience*, 132-137.
- 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.
- Sleath, J. F. A. (1984). Sea bed mechanics. *Journal of Fluid Mechanics*, United States, 335.
- Smagorinsky, J., (1963). General Circulation Experiments with the Primitive Equation. *Monthly Weather Review*, 99-164.
- Soulsby, R., (1997). *Dynamics of Marine Sands* (1st edition). Londra: Thomas Telford Publications, 201-211.
- Sümer, B. M., Petersen, T. U., Locatelli, L., Fredsøe, J., Musumeci, R. E., & Foti, E. (2013). Backfilling of a Scour Hole around a Pile in Waves and Current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139(1), 9-23.
- Taştan, K. (2017). Scale and flow boundary effects for air entraining vortice., *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 170(4), 198-206.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.
- Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M., Burnham, J. (2014). The sedimentation scour model in FLOW-3D®. *Flow Science Report*, 3, 1-29.
- White, W.R, Bettess, R. (1984). The feasibility of flushing sediments through reservoirs. *Challenges in African Hydrology and Water Resources*, 577-587.
- Yıldırım, N., Eroğlu, N., Taştan, K. (2012). Occurrences of vortices at an intake of point sink character. *Teknik Dergi*, 23(1), 5799-5812.
- Yıldırım, 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.



Gazili olmak ayrıcalıktır