

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**SERBEST DÜŞÜLÜ SAVAKLARIN MANSABINDA OLUŞAN
YEREL OYULMANIN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Mustafa TUNÇ

Doktora Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Hidrolik Bilim Dalı

OCAK 2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**SERBEST DÜŞÜLÜ SAVAKLARIN MANSABINDA OLUŞAN YEREL
OYULMANIN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Tez Yazarı
Mustafa TUNÇ

Danışman
Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU

OCAK 2020
ELAZIĞ

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı: Serbest Düşülü Savakların Mansabında Oluşan Yerel Oyulmanın Deneysel İncelenmesi

Yazarı: Mustafa TUNÇ

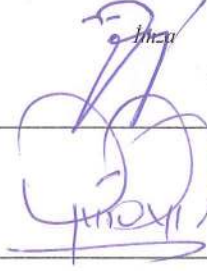
İlk Teslim Tarihi: 10.12.2019

Savunma Tarihi: 13.1.2020

TEZ ONAYI

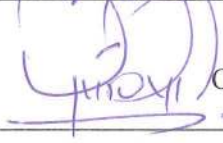
Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Onayladım

Başkan: Prof. Dr. Gürol YILDIRIM
Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Onayladım

Üye: Prof. Dr. Ömer KÖSE
Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Onayladım

Üye: Doç. Dr. Ö. Faruk DURSUN
İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Onayladım

Üye: Doç. Dr. Nihat KAYA
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Serbest Düşölü Savakların Mansabında Oluşan Yerel Oyulmanın Deneysel İncelenmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteğı olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

13/1/2020

Mustafa TUNÇ



ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışması kapsamında mevcut hidrolik laboratuvarında hacimsel olarak oldukça büyük deney setleri inşa edilmiş olup, çok sayıda deney cihazı satın alınmıştır. Mevcut çalışma kapsamında serbest düşümlü savakların mansabındaki oyulma, farklı savak türleri ve farklı akım şartları dikkate alınarak deneysel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm, sadece hocalığıyla değil insani yönüyle de her zaman örnek alacağım, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, gerçek bir ağabeyim gibi gördüğüm, kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU'na teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Deneylerin yapımındaki yardımlarından dolayı laboratuvar teknisyeni Muhammet KARTAL'a ve İnşaat Mühendisliği Bölümü lisans öğrencisi Onur ÇINAR'a gönülden teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmam boyunca bir an olsun yardımlarını esirgemeyen, tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve her zaman bana destek olan, bu hayattaki en büyük şansım sevgili eşim Arş. Gör. Esra TUĞRUL TUNÇ'a gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, doktora bursiyeri olarak görev yaptığım MAG115M478 protokol numaralı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK-1001) projesi ile desteklenmiştir.

Mustafa TUNÇ
ELAZIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xvi
EKLER LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
2.1. Oyulma Türleri.....	5
2.2. Serbest Düşülü Yapılarda Yerel Oyulma.....	7
2.2.1. Serbest Düşen Jet.....	7
2.2.2. Serbest Düşen Su Jeti için Sınır Koşulları.....	9
2.2.3. Oyulma Mekanizması.....	11
2.2.4. Jetin Kırılması	12
2.2.5. Mansap Havuzunda Jet	13
2.2.6. Taban Malzemesinin Oyulmaya Etkisi	18
2.2.7. Prototip için Oyulmanın İncelenmesi	21
2.2.8. Oyulmanın Önlenmesi için Alınacak Olası Önlemler.....	25
2.3. Literatürde Yerel Oyulmanın Tahmin için Sunulan Denklemler ve Konuyla ilgili Literatür Özeti	28
2.3.1. Laboratuvar Modelleri	28
2.3.2. Ampirik Formüller.....	29
3. MATERYAL VE METOT	44
3.1. Boyut Analizi.....	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	57
4.1. Maksimum Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi	57
4.2. Jet Yörüngesinin Düşü Yüksekliği ile Değişimi	58
4.3. Jet genişliğinin Düşü Yüksekliği ve Debi ile Değişimi	60

4.4. Denge Oyulma Derinliğinin Debi, Kuyruksuyu Derinliği, Düşü Yüksekliği ve Sedimentin Medyan Dane Çapı ile Değişimi.....	59
4.5. Yatak malzemesinin deney sonundaki boykesitleri	72
4.6. Taban topografyaları.....	76
4.7. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin densimetrik Froude sayısı ile değişimi	95
4.8. Model deney düzeneği ile prototip deney düzeneği arasındaki ilişki	99
4.9. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin hesaplanması için mevcut çalışma kapsamında türetilen denklemler	107
4.9.1. Dikdörtgen savak için boyutsuz denge oyulma derinliğinin tahmini	107
4.9.2. Trapez savak için boyutsuz denge oyulma derinliğinin tahmini	110
4.9.3. Labirent savak için boyutsuz denge oyulma derinliğinin tahmini	111
4.10. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlarla literatürdeki çalışmalardan elde edilen ilgili sonuçların karşılaştırılması.....	113
5. SONUÇLAR.....	121
ÖNERİLER	123
KAYNAKLAR.....	124
EKLER	132
ÖZGEÇMİş	

ÖZET

Serbest Düşülü Savakların Mansabında Oluşan Yerel Oyulmanın Deneysel İncelenmesi

Mustafa TUNÇ

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2020, Sayfa: xix + 131

Oyulma problemi, hidrolik yapıların emniyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Serbest düşülü savakların mansabında oluşan yerel oyulma, hidrolik yapının ağır hasar görmesine sebep olabilmektedir. Her savak türünün ve şeklinin akım karakteristikleri birbirinden farklı olmaktadır. Serbest düşen jetin mansap havuzunda oluşturduğu jet genişliği, jet kalınlığı, jet çarpma hızı ve açısı, penetrasyon derinliği, akım içerisine sokulan hava kabarcıkları miktarı, savağın havalandırma performansı ve jet yörüngesi gibi akım karakteristikleri oyulma geometrisi üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Bu çalışmada; dikdörtgen, üçgen, trapez ve labirent savakların mansap havuzunda oluşturdukları yerel oyulmalar, deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, hidrolik laboratuvarında iki adet deney düzeneği inşa edilmiştir. Birinci deney düzeneği, ikinci deney düzeneğinin prototipi olacak şekilde tasarlanmış ve model ölçeği 1/2.4 olarak alınmıştır. Deneyler, her iki deney düzeneğinde de eş zamanlı yürütülmüştür. Yerel oyulmanın zamanla değişimi, maksimum oyulma derinliği ve oyulma geometrisi; farklı savak türleri (dört adet), farklı düşü yükseklikleri (dört adet), farklı kuyruksuyu derinlikleri (iki adet), farklı medyan dane çapları (üç adet), farklı birim debi değerleri (dört adet) dikkate alınarak deneyler yapılmıştır. Jet genişliği, jet yörüngesi ve jet çarpma hızı da çalışma kapsamında belirlenmiştir. Her bir savak türü için maksimum oyulma derinliğini veren doğrusal olmayan denklemler elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin prototipte güvenle kullanılabilmesi için model ile prototip arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçları literatür ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Savak türünün oyulma geometrisi üzerinde çok önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Üçgen ve labirent savaklardan çıkan jetin mansap havuzunda oluşturduğu maksimum oyulma derinliği, test edilen diğer savak türlerine göre çok daha az olmuştur. Labirent savaklardan düşen serbest jet, diğer savak türlerine göre hidrolik yapıya daha yakın mesafede mansap havuzuna çarptığı ve oyulmanın daha geniş alana yayıldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik yapı, Serbest düşülü savak, Yerel oyulma, Jet yörüngesi, Taban topografyası.

ABSTRACT

Experimental Investigation of Local Scour Occurring on Downstream Bed by Free Overfall Weirs

Mustafa TUNÇ

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

January 2020, Pages: xix + 131

The scour problem is of great importance for the safety of hydraulic structures. Local scouring in the downstream of free overfall weirs can cause severe damage to the hydraulic structure. The flow characteristics of each weir type and shape are different from each other. Flow characteristics such as jet expansion, jet thickness, jet impact velocity and angle, penetration depth, the amount of air bubbles entrained into the plunge pool, the aeration performance of the weir, and the jet trajectory have a significant effect on the scour geometry.

In this study; the local scour in the downstream pool of rectangular, triangular, trapezoidal and labyrinth weirs were investigated experimentally. In this context, two experimental setups were made in the hydraulic laboratory. The first experimental setup was designed as the prototype of the second experimental setup, and the model scale was taken as 1/2.4. The experiments were carried out simultaneously in both experimental setups. Variation in time of local scour, maximum scour depth and scour geometry; different weir types (four items), different head heights (four items), different tailwater depths (two items), different median grain diameters (three items), different unit discharge values (four items) were taken into consideration. Water jet expansion, jet trajectory and jet impact velocity were also determined in the current study. The non-linear equations giving the maximum scour depth for each wier type were obtained. The relationship between the model and the prototype was determined in order to use the obtained equations safely in the prototype. Experimental results were compared with the literature and numerical results. It is concluded that weir type is a very important parameter on scouring geometry. The maximum scour depth occurred by the jet from the triangular and labyrinth weirs was much less than the other weir types tested. It was shown that the free overfall jet from the labyrinth weirs impacts the downstream pool at a closer distance to the hydraulic structure than the tested weirs. Moreover, the scouring geometry in the downstream pool for the labyrinth weirs covers wider area than that of the other weirs tested.

Keywords: Hydraulic structure, Free overfall weir, Local scour, Jet trajectory, Bed topography.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Zamanla oyulma derinliğinin hareketli taban oyulması ve temiz su oyulması durumları için değişimi	5
Şekil 2.2.	Barajlarda görülen serbest düşen jet çeşitleri.....	6
Şekil 2.3.	Su jeti: a) bitişik olmayan jetler, b) bitişik jetler.....	7
Şekil 2.4.	Havadaki serbest düşen jet davranışı	8
Şekil 2.5.	Mansap havuzu içindeki su jeti davranışı	13
Şekil 2.6.	a) Sediment yatağa çarpma anında gelişmemiş dairesel jet, $h_p/d_j < 4-6$; b) Dairesel jet etkisi, $h_p/d_j > 6$	14
Şekil 2.7.	Dikdörtgen jet çarpması.....	15
Şekil 2.8.	Dairesel jet çarpması.....	15
Şekil 2.9.	Derin ve sığ mansap havuzunu etkileyen jetin görsel gösterimi	17
Şekil 2.10.	Farklı sediment tipleri için kırılma tokluğu parametresi	19
Şekil 2.11.	Oyulma çukuru geometrileri	20
Şekil 2.12.	Kariba Barajı mansabında oluşan oyulmanın yıllara göre şematik gösterimi	21
Şekil 2.13.	Farklı deşarjlarda Ricobayo Barajı'nın oyulma ilerlemesi	22
Şekil 2.14.	Ricobayo Barajı'nın oyulmaya karşı iyileştirilmesi.....	22
Şekil 2.15.	Dicle Barajında 2018 yılında serbest düşüden kaynaklanan hasarlar	23
Şekil 2.16.	Mansap tabanının beton kaplanması, şematik gösterim.....	25
Şekil 2.17.	Akarsu tabanına uygulanan ankraj	25
Şekil 2.18.	Literatürdeki çalışmaya ait deney düzeneği taslağı	28
Şekil 2.19.	Serbest düşülü jet oyulması	29
Şekil 2.20.	Serbest düşen jetin mansabındaki oyulmanın şematik gösterimi	33
Şekil 2.21.	Jet genişliğinin düşü yüksekliği ile değişimi	35
Şekil 2.22.	Kabarcık penetrasyon derinliğinin düşü yüksekliği ile değişimi	36
Şekil 2.23.	Jet yörüngesinin düşü yüksekliği ile değişimi	36
Şekil 3.1.	Bu çalışma kapsamında test edilen savak türlerinin şematik gösterimi	42
Şekil 3.2.	a) I. deney düzeneği (prototip) kesitsel görünüm, b) II. deney düzeneği (model) kesitsel görünüm, c) plan	43
Şekil 3.3.	Deney düzeneklerinin inşasına ait resimler	45
Şekil 3.4.	Deneylerde kullanılan cihazlardan resimler.....	47
Şekil 3.5.	Deneylere ait resimler	48
Şekil 3.6.	Bu çalışmada test edilen savakların boyutları.....	51

Şekil 3.7.	Bu çalışmada test edilen labirent savağın şematik gösterimi	52
Şekil 3.8.	Mansap havuzuna yerleştirilen taban malzemesi kuvars kumun granülometri eğrileri	53
Şekil 4.1.	Serbest düşümlü savaklarda $h=25$ cm, $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi	56
Şekil 4.2.	Dikdörtgen savakta jeot yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi	57
Şekil 4.3.	Trapez savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi	57
Şekil 4.4.	Üçgen savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi	57
Şekil 4.5.	Labirent savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi	58
Şekil 4.6.	Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm	60
Şekil 4.7.	Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm	61
Şekil 4.8.	Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm	61
Şekil 4.9.	Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm	62
Şekil 4.10.	Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm	62
Şekil 4.11.	Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm	63
Şekil 4.12.	Dikdörtgen savaklarda farklı medyan dane çapları için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=60$ cm, $h=400$ cm	63
Şekil 4.13.	Dikdörtgen savaklarda farklı medyan dane çapları için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=120$ cm, $h=400$ cm	64
Şekil 4.14.	Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm	65
Şekil 4.15.	Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm	65
Şekil 4.16.	Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm	66
Şekil 4.17.	Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm	66
Şekil 4.18.	Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm	67
Şekil 4.19.	Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm.	67
Şekil 4.20.	Labirent savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=120$ cm, $h=400$ cm, $h_t=60$ cm..	68
Şekil 4.21.	Labirent savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=120$ cm, $h=400$ cm, $h_t=120$ cm	68

Şekil 4.22.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ...	69
Şekil 4.23.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ...	69
Şekil 4.24.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm ...	70
Şekil 4.25.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ...	70
Şekil 4.26.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ...	71
Şekil 4.27.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $\alpha_t=45^\circ$, $L=17$ cm, $h_t=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm	71
Şekil 4.28.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=41$ cm, $h=400$ cm, $h_t=60$ cm	72
Şekil 4.29.	Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=41$ cm, $h=400$ cm, $h_t=120$ cm	72
Şekil 4.30.	Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatak malzemesinin boykesiti	73
Şekil 4.31.	Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti	73
Şekil 4.32.	Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti	74
Şekil 4.33.	Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti	74
Şekil 4.34.	Serbest düşülü üçgen savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti	75
Şekil 4.35.	Serbest düşülü üçgen savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti	75
Şekil 4.36.	Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatak malzemesinin boykesiti	76
Şekil 4.37.	Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti	76
Şekil 4.38.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	77
Şekil 4.39.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	78
Şekil 4.40.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	78
Şekil 4.41.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	79
Şekil 4.42.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	79
Şekil 4.43.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	80

Şekil 4.44.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	81
Şekil 4.45.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	81
Şekil 4.46.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	82
Şekil 4.47.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	82
Şekil 4.48.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	83
Şekil 4.49.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	83
Şekil 4.50.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	84
Şekil 4.51.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	84
Şekil 4.52.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	85
Şekil 4.53.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	85
Şekil 4.54.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	86
Şekil 4.55.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	86
Şekil 4.56.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	87
Şekil 4.57.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	87
Şekil 4.58.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	88
Şekil 4.59.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	88
Şekil 4.60.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	89
Şekil 4.61.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	89
Şekil 4.62.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	90

Şekil 4.63.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	90
Şekil 4.64.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 12 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	91
Şekil 4.65.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 8 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	91
Şekil 4.66.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 5 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	92
Şekil 4.67.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 5 L/s'lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası.....	92
Şekil 4.68.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 8 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	93
Şekil 4.69.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	93
Şekil 4.70.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	94
Şekil 4.71.	17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 5 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	94
Şekil 4.72.	$\alpha=45^\circ$ açılı üçgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası	95
Şekil 4.73.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=25$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	96
Şekil 4.74.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=50$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	96
Şekil 4.75.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=100$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	97
Şekil 4.76.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=167$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	97
Şekil 4.77.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=25$ cm ve $h_t=50$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	98
Şekil 4.78.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=50$ cm ve $h_t=50$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	98
Şekil 4.79.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=100$ cm ve $h_t=50$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	99
Şekil 4.80.	Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=167$ cm ve $h_t=50$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi	99
Şekil 4.81.	I. Deney seti ile II. Deney setinden elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırılması	100
Şekil 4.82.	Dikdörtgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=25$ cm ve $h_t=60$ cm için karşılaştırılması	101

Şekil 4.83.	Dikdörtgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.84.	Trapez savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=25$ cm ve $h_t=60$ cm için karşılaştırılması.....	103
Şekil 4.85.	Trapez savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.86.	Üçgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=25$ cm ve $h_t=60$ cm için karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.87.	Üçgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması.....	106
Şekil 4.88.	Labirent savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=25$ cm ve $h_t=60$ cm için karşılaştırılması.....	106
Şekil 4.89.	Labirent savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması.....	107
Şekil 4.90.	Deneyssel ölçülen ve Denklem (4.1) ile tahmin edilen değerlerin dikdörtgen savak ve $h_t=25$ cm için karşılaştırılması.....	108
Şekil 4.91.	Deneyssel ölçülen ve Denklem (4.2) ile tahmin edilen değerlerin dikdörtgen savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması.....	108
Şekil 4.93.	Deneyssel ölçülen ve Denklem (4.4) ile tahmin edilen değerlerin üçgen savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması.....	109
Şekil 4.94.	Deneyssel ölçülen ve Denklem (4.5) ile tahmin edilen değerlerin trapez savak ve $h_t=25$ cm için karşılaştırılması.....	110
Şekil 4.95.	Deneyssel ölçülen ve Denklem (4.6) ile tahmin edilen değerlerin trapez savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması.....	111
Şekil 4.96.	Deneyssel ölçülen ve Denklem (4.7) ile tahmin edilen değerlerin labirent savak ve $h_t=25$ cm için karşılaştırılması.....	112
Şekil 4.97.	Deneyssel ölçülen ve Denklem (4.8) ile tahmin edilen değerlerin labirent savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması.....	113
Şekil 4.98.	Mevcut çalışma ile geliştirilen önceki denklemlerden elde edilen d_{se}/y_o değerlerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 4.99.	Mevcut çalışmadan ve literatürdeki ilgili çalışmalardan elde edilen denge oyulma derinliklerinin (d_{se}) karşılaştırılması	115
Şekil 4.100.	Veronese (1937)'de sunulan Denklem (2.57)'nin mevcut çalışma verileri ile uyarlanması ..	115
Şekil 4.101.	Kotoulas (1967)'de sunulan Denklem (2.64)'ün mevcut çalışma verileri ile uyarlanması	116
Şekil 4.102.	Schoklitsch (1932)'te sunulan Denklem (2.56)'nın mevcut çalışma verileri ile uyarlanması	117
Şekil 4.103.	Martins (1975)'te sunulan Denklem (2.70)'in mevcut çalışma verileri ile uyarlanması.....	117
Şekil 4.104.	Dikdörtgen savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkinciogulları, 2019) karşılatırılması	118

Şekil 4.105. Üçgen savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkinciogulları, 2019) karşılaştırılması.....	118
Şekil 4.106. Trapez savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkinciogulları, 2019) karşılaştırılması.....	119
Şekil 4.107. Labirent savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkinciogulları, 2019) karşılaştırılması.....	120



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Serbest düşen jetlerin mansabında oluşan oyulma için sınır koşulları	9
Tablo 2.2. Dikdörtgen jetler için geliştirilmiş kopma uzunluğu (L_b) denklemleri	11
Tablo 2.3. Dairesel jetler için geliştirilmiş kopma uzunluğu (L_b) denklemleri	11
Tablo 2.4. Mansap havuzunda çekirdek büzülme açısı ve jet genişlemesi (Calitz, 2016)	16
Tablo 2.5. Yaygın taban malzemesi türleri	17
Tablo 2.6. Kariba Barajı'nın özellikleri	20
Tablo 2.7. Serbest düşülü savakların mansabında oluşan yerel oyulma derinlikleri ile ilgili literatürde geliştirilen denklemler	40
Tablo 3.1. II. deney düzeneğinde test edilen savak tipleri ile değişken akım parametreleri	50
Tablo 4.1. Dikdörtgen savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u)..	58
Tablo 4.2. Trapez savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u) .	59
Tablo 4.3. Üçgen savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u)..	59
Tablo 4.4. Labirent savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u)	59

EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek- 1: Maksimum Oyulma Derinliği-Zaman Grafikleri	132
Ek- 2: Dikdörtgen, Trapez, Üçgen ve Labirent Savaklarda Jet Yörüngesine ait Grafikler	143
Ek- 3: Mansap Havuzunda Oluşan Oyulma Geometrisine ait Boykesitler	145



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

a, b	: Labirent savak kenar uzunlukları (L)
A	: Danenin akıma dik alanı (L^2)
B	: Kanal genişliği (L)
B_j	: Jetin çarpma kalınlığı (L)
B_m	: Mansap kanalının genişliği (L)
b_u	: Jetin genişliği (L)
C_L	: Kaldırma katsayısı (-)
C_D	: Sürüklenme katsayısı (-)
C_d	: Hidrodinamik savaklanma durumunda debi katsayısı (-)
d	: Dairesel su jeti çapı (L)
d_j	: Mansap havuzuna çarpma anındaki jet çapı (L)
d_i	: Membadan çıkıştaki jet çapı (L)
d_s	: Oyulma derinliği (L)
d_{sm}	: Maksimum oyulma bölgesindeki oyulma derinliği (L)
d_{se}	: Denge zamanındaki oyulma derinliği (L)
d_{50}	: Taban malzemesinin %50'sini geçiren elek çapı, medyan dane çapı (L)
d_{90}	: Taban malzemesinin %90'ını geçiren elek çapı (L)
F_o	: Densimetrik Froude sayısı (-)
F_j	: Mansap havuzuna çarpma anındaki Froude sayısı (-)
F	: Danenin etkileşiminden doğan reaksiyon kuvveti ($M^1L^1T^{-2}$)
F_D	: Hidrodinamik sürüklenme kuvveti ($M^1L^1T^{-2}$)
F_L	: Hidrodinamik kaldırma kuvveti ($M^1L^1T^{-2}$)
g	: Yerçekim ivmesi (LT^{-2})
h	: Düşü yüksekliği (L)
h_s	: Sediment tabakası yüksekliği (L)
h_t	: Kuyruksuyu derinliği (L)
j	: Hidrolik eğim (-)
K	: Su jeti kopma uzunluğu için oransal katsayı (-)
K_{lc}	: Kırılma tokluğu parametresi (-)
L	: Savak açıklığı (L)
L_{ef}	: Labirent savaklarda etkili kret uzunluğu (L)
L'	: Apron uzunluğu (L)
L_b	: Jet kopma uzunluğu (L)
L_r	: Uzunluk model ölçeği (-)
N_d	: Düşü sayısı (-)
p	: Kret yüksekliği (L)
s	: Eşik yüksekliği (L)
Q	: Debi (L^3T^{-1})
q	: Birim debi (L^2T^{-1})
q_b	: Hareket eden sediment miktarı (L^3T^{-1})
R	: Hidrolik yarıçap (L)
R^2	: Belirginlik katsayısı (-)
Re	: Reynolds sayısı (-)
Re^*	: Danenin Reynolds sayısı (-)
t	: Süre (T)
t_e	: Denge oyulması durumundaki süre (T)
T_u^*	: Bir savak napından dökülen akımın başlangıç türbülans yoğunluğu (-)
U	: Üniformluk katsayısı (-)
UCS	: Sedimentin tek eksenli basınç dayanımı ($ML^{-1}T^{-2}$)
u^*	: Kayma hızı (LT^{-1})
V	: Su jetinin kuyruksuyu kanalına çarpma hızı (LT^{-1})
V_i	: Membadan çıkıştaki uniform jet hızı (m/s)
W	: Danenin su altındaki ağırlığı ($M^1L^1T^{-2}$)

We	: Weber sayısı (-)
x_1	: Maksimum oyulma noktasının hidrolik yapıya olan yatay mesafesi (L)
y_o	: Membadan savaklanma durumunda savak üzerindeki nap kalınlığı (L)
α	: Üçgen savak tepe açısı ($^{\circ}$)
α_T	: Trapez savak yan duvar açısı ($^{\circ}$)
β	: Su jeti çarpma açısı ($^{\circ}$)
θ	: Labirent savak yan duvar açısı ($^{\circ}$)
ρ	: Suyun özgül kütlesi (M^1L^{-3})
ρ_s	: Sedimentin özgül kütlesi (M^1L^{-3})
γ	: Suyun özgül ağırlığı ($M^1L^{-2}T^{-2}$)
γ_s	: Dane özgül ağırlığı ($M^1L^{-2}T^{-2}$)
Γ	: Yatak hareketi oranı (-)
τ_k	: Kayma gerilmesi ($M^1L^{-1}T^{-2}$)
μ	: Suyun dinamik viskozitesi ($M^1L^{-1}T^{-1}$)
ν	: Suyun kinematik viskozitesi ($M^1L^{-1}T^{-1}$)
ψ	: Shields katsayısı (-)
δ	: Sediment tabakasının kalınlığı (L)
σ	: Suyun yüzey gerilimi ($M^1L^{-1}T^{-2}$)
σ_c	: Sedimentin yüzey gerilimi ($M^1L^{-1}T^{-2}$)
σ_g	: Dane dağılımının geometrik standart sapması (-)

Kısaltmalar

DSİ	: Devlet Su İşleri
GP	: Genetik Programlama
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ISS	: Noksan Öz Benzerlik Teorisi
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
USBR	: Amerika Birleşik Devletleri Sular İdaresi
VOF	: Akışkan Hacim Oranları

1. GİRİŞ

Yerel oyulmalar, akım özelliklerine bağlı olarak farklı boyutlarda ve şekillerde oluşan yerel erozyon olayı olarak ifade edilmektedir. Yerel oyulmalar bir su yapısının inşasıyla akımda oluşabilecek çevrıntı ve akım hızı değişimlerine bağlı olarak oluşabilmektedir. Yerel oyulmanın örneklerine köprü ayakları, bağlama kapakları, düşü yapıları, enerji kırıcı yapılar, yanal su alma yapılarında sıklıkla rastlanmaktadır. Su yapıları için büyük bir risk doğuran yerel oyulmaların önlenmesi için oluşabilecek oyulma derinliğinin ve geometrisinin önceden tayin edilmesi gerekir. Bu durum, su yapısının proje ve işletme çalışmaları açısından oldukça önemlidir. Birçok tarihi su yapılarının büyük hasarlar görmesinin en temel sebeplerinden biri de yerel oyulmalardır. Günümüzde de yerel oyulma nedeni ile hidrolik yapılarda yıkılma ve ağır hasar görülebilmektedir. Bu nedenle hidrolik yapılardaki oyulma probleminin, güncelliğini koruyan ve birçok ayrıntısıyla detaylı bir şekilde incelenmesi gereken bir araştırma konusu olduğu düşünülmektedir.

Günümüzde gelişen teknoloji ile artan enerji ihtiyacına bağlı olarak yüksek düşümlü barajlar inşa edilebilmektedir. Örneğin; Çoruh Nehri üzerine inşa edilen Yusufeli Barajı'nın düşü yüksekliği yaklaşık 200 m'dir. Yüksek düşümlü bir su yapısından savaklanan serbest su jeti hız kazanacağından dolayı mansapta oluşan oyulma ile büyük hasarlara yol açabilmektedir. Mansapta oluşan yerel oyulmalar; birim debi, serbest jetin mansap havuzuna çarpma hızı, jetin genişliği, havalandırma performansı, düşü yüksekliği, kuyruksuyu derinliği, taban malzemesinin fiziksel özellikleri gibi parametrelere bağlıdır. Burada mambadan mansaba doğru gelen su jetinin sahip olduğu potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesiyle, mansap havuzunda oluşturacağı etkilere dikkat etmek gerekir. Gerekli tedbirler alınmadığı takdirde, oluşan bu yerel oyulmaların barajın güvenliğini ciddi şekilde riske atabileceği açıktır. Gerektiğinden daha fazla önlem alınması durumunda da maliyet çok fazla artmaktadır.

Akarsular üzerine herhangi bir su yapısının inşa edilmesiyle akarsu akımında değişiklik meydana geleceğinden dolayı mevcut dengenin bozulacağı aşıkârdır. Akarsudaki bu dengenin tekrar sağlanması, yer yer oyulma ve sediment birikintilerinin oluşması ile mümkündür. Yani akarsuyun doğal akışı engellendiğinden dolayı akımın biriktirdiği potansiyel enerji sebebiyle mansap tabanında yerel oyulmalar oluşabilmektedir. Bu yerel oyulmalar zamanla artıp su yapısının temelini zayıflatarak söz konusu hidrolik yapının hasar görmesine hatta yıkılmasına sebep olabilmektedir. Akarsu akımına bağlı olarak yerel oyulma çukurlarından taşınan taban malzemesi akarsu yatağında birikmelere neden olacaktır. Bu sediment birikintileri de yapıdan istenen verimin alınmamasına sebep olabilmektedir. Çünkü baraj mansabında oluşan bu birikmeler, kuyruksuyu derinliğini dipsavağı ve santral işletmesini doğrudan etkilemektedir.

Özellikle dar vadili nehir yataklarında baraj mansabında şiddetli su jeti etkisiyle oluşabilecek derin oyulma derinliklerinin önlenmesi için genel olarak derin ve geniş bir mansap havuzu

oluşturulması yoluna gidilmektedir. Bununla birlikte oyulmayı azaltmak için su jetinin parçalanmasının sağlanabilmesi ve birim debinin azaltılması yoluna da gidilebilmektedir. Böyle bir uygulamanın yapılabilmesi için enerji santralının etek santrali olmaması gerektiği açıktır. Bir başka deyişle; derin bir mansap havuzu yapılması durumunda, kurulu güç ve elde edilecek enerji değerlerinde çok önemli azalma olacağından santralin etek santrali olmaması gerekmektedir.

Hidrolik yapıların mansabında oluşan oyulmalar hakkında gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunu, köprü ayakları etrafında oluşan oyulmalar ve barajlarda dipsavak ve düşüm yataklarından çıkan akım nedeni ile oluşan oyulmalar oluşturmaktadır. Oyulma olayı; akım, savak ve taban malzemesi gibi daha birçok özelliklere bağlı olarak büyük bir oranda değişebilen çok karmaşık bir konudur. Bu nedenle, bu problemin deneysel olarak incelenmesi önemli avantajlar sağlamaktadır. Oyulmadan dolayı yıkılan birçok hidrolik yapının olması ile bu konu her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Haklı olarak her tasarımcı, tasarım kriterini ve maksimum yerel oyulma derinliğini veren emin olacağı denklemleri güvenle kullanmak istemektedir.

Söz konusu serbest düşülü su yapılarının mansabında oluşan yerel oyulmaların tamamen ortadan kaldırılması, ciddi maliyet gerektireceğinden dolayı bu konu hakkında daha ekonomik yolların araştırılması gerekmektedir.

Savaklar, su mühendisliğinde farklı amaçlar için yaygın olarak kullanılan önemli bir hidrolik yapıdır. Örneğin; su seviyesinin kontrolü, debi ölçümü, yanal su alma yapısı gibi amaçlar için sık kullanılmaktadır. Bir başka deyişle, savaklar hidrolik mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. Bu kapsamda serbest düşülü hidrolik yapılarda feyezan debisi mansaba savak yardımı ile aktarılmaktadır.

Bu çalışmada, serbest düşüler için farklı savak türlerinin mansabında oluşan yerel oyulma çukurunun geometrisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmanın amaçları aşağıda sunulmuştur.

- İnce kenarlı dikdörtgen, üçgen ve trapez büzülmeli savakların mansabında oluşan oyulmayı incelenmesi,
- Trapez labirent büzülmeli savakların mansabında oluşan oyulmayı detaylı bir şekilde incelenmesi,
- Savak türünün, taban malzemesi medyan dane çapının, düşü yüksekliğinin, birim debinin, kuyruksuyu derinliğinin mansap havuzu taban topografyasına ve maksimum oyulma derinliğine etkisini araştırılması,
- Her bir savak türünün farklı akım karakteristikleri için mansap havuzunda oluşturduğu denge oyulma derinliğini hesaplamak için kullanışlı bir denklem geliştirilmesi,
- Test edilen büyük ölçekli deney düzeneği prototip, küçük ölçekli deney düzeneği de onun modeli olarak alınıp, model-prototip arasındaki ölçek etkisini belirlenmesi,
- Hidrolik mühendislerine ve literatüre katkı sağlayacak yararlı bilgiler sunulmasıdır.

Bu çalışmada büzülmeli savaklardan çıkan serbest su jetinin mansap taban oyulmaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Savak türünün dikdörtgen, üçgen, trapez şekilli klasik savak ve trapez labirent savak olmasının olaya etkisi araştırılmıştır. Mansap kanalına çarpan su jetinin şekli ve çarpma hızı, savak türü ve şekli ile yakından ilgilidir. Bu nedenle farklı savak türlerinin mansap kanalında oluşturacağı oyulma geometrisi, jetin karakteristikleri açısından da incelenmiştir. Deneyler, büzülmeli savaklar için yürütülmüştür.

Bu çalışma kapsamında; söz konusu savakların mansap havuzunda oluşan maksimum oyulma derinlikleri, maksimum oyulma çukuru geometrileri, mansap havuzunun taban topografyaları, jet yörüngeleri ve jet genişlikleri deneysel olarak incelenmiştir. Mevcut çalışma sonuçları, önceki çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Uygulamada güvenle kullanılabileceği düşünülen denklemler sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamında; serbest düşümlü klasik dikdörtgen, üçgen, trapez şekilli savakların yanı sıra $\theta=14^\circ$ yan duvar açısına sahip trapez labirent savaklar kullanılarak mansap kanalında oluşan yerel oyulma çukurunun geometrisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; farklı akım koşulları ve farklı savak türleri için maksimum oyulma derinlikleri, jet yörüngeleri, taban topografyaları, kanal tabanı boykesitleri, jet genişlikleri gibi birçok veri elde edilmiştir. En düşük oyulma derinliğine sahip savak türü belirlenerek uygulamadaki mühendisler için yararlı bulgular elde edilmiştir. Bu çalışmada büzülmeli savakların mansabında oluşacak taban şeklinin büyük ölçeklerde incelenmesinin yanı sıra farklı savak tipleri de dikkate alınmış, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, yukarıda da bahsedildiği üzere, serbest düşümlü savakların mansabında oluşan oyulmaların hidrolik yapının stabilitesini bozması, olası yıkımlarda can ve mal güvenliğini tehdit etmesi ve oyulma olayının tamamen ortadan kaldırılmasının ekonomik olmaması nedenleriyle farklı savak çeşitleri kullanılarak oyulma derinliğinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Test edilecek her savak türü için, maksimum oyulma derinliği, oyulma çukurunun yatay düzlemdeki izdüşümü, oyulmanın memba, mansap şev eğimi ve oyulma derinliğinin maksimum olduğu nokta ile serbest düşümlü su jeti çıkış noktası arasındaki mesafeler belirlenerek bu savakların uygulamada kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Serbest düşümlü büzülmeli dikdörtgen, üçgen, trapez şekilli ve özellikle de labirent şekilli savakların mansabında oluşan oyulmaların araştırılmasıyla ilgili literatürde önemli bir eksiklik vardır. Labirent savakların kret uzunlukları, doğrusal savakların kret uzunluklarının 3-5 katı kadardır. Bu sebeple mansap kanalına çarpan su jetinin genişliği de dikdörtgen ve trapez şekilli savakların jet genişliğinden büyük olmaktadır. Jet genişliği, jet yörüngesi ve penetrasyon derinliğinin oyulma derinliğine olan etkisinin doğrudan incelenmesi açısından da literatürde yapılan çalışmalar açısından önemli eksiklik vardır. Bu nedenle, labirent savaklar, bu çalışmanın önemli bir ayağını oluşturmaktadır. Bu çalışma ile literatürdeki bu boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yerel oyulma, insan tarafından inşa edilen hidrolik yapıların (baraj, tersip bendi gibi serbest düşü yapılar) mansabında doğal akış ile serbest düşülü su jetlerinin etkisiyle oluşmaktadır. Bu bölümde yerel oyulmalar hakkında literatürden bilgiler sunulmaktadır.

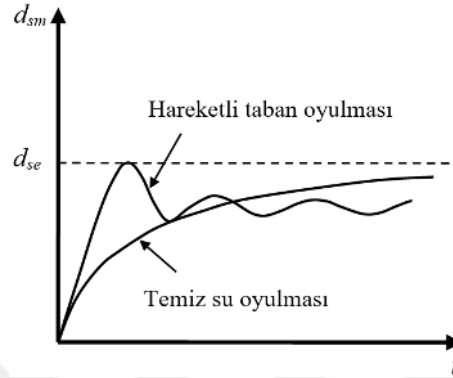
2.1. Oyulma Türleri

Yaygın oyulma türleri, genel ve yerel oyulma olarak ikiye ayrılabilir (Hoffmans ve Verheij, 1997; Armitage vd., 2007). Genel oyulma, doğal akıştaki değişikliklerden dolayı oluşmaktadır. Bunlara; sediment yükünün değişimi ya da taşkınlar örnek olarak verilebilir (Lu vd., 2012). Genel oyulma, genellikle uzun vadeli tek yönlü akım hızı değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Genel oyulma, tipik olarak yerel oyulma işleminden daha uzun bir zaman ölçeğine sahip olmasıyla farklıdır. Özellikle büyük mesafelerdeki uzun nehir yatağı değişikliklerini etkiler ve çoğunlukla doğal işlemlerin bir sonucudur. Bununla birlikte, taşkın gibi durumlarda kısa bir süre içinde de oluşabilir. Bütün kanal boyunca oyulma, daralmalı kanal kısmında oyulma, kıvrımlı kanal kısmında oyulma ve birleşmiş kanalda oyulma olmak üzere birçok genel oyulma türleri mevcuttur.

Yapıların etkisine bağlı olarak ortaya çıkan girdap oluşumu ve yayılması, yerel oyulmaya neden olabilmektedir. Yerel oyulma genellikle akışı etkileyen yapı tipinden kaynaklanır. Yerel oyulma, ilgili yapıya bağlı olarak genellikle kısa bir mesafede gerçekleşir (Lu vd., 2012). Dolayısıyla baraj gibi serbest düşülü yapılardan çıkan su jetlerinin mansap havuzunda oluşturduğu oyulma yerel oyulma olarak adlandırılabilir.

Temel olarak sediment yatağındaki yerel oyulma işlemi, sırasıyla temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması olmak üzere iki ana sediment taşınımı rejimine ayrılabilir. Bu rejimler, daha küçük kırık kaya parçacıklarının taşındığı ya da kaya külesinden taşınacağı durumlarda uygulanabilir hale gelmektedir (Hoffmans ve Verheij, 1997; Armitage vd., 2007; Lewis vd., 1999). Temiz su oyulması, genel oyulma olmadan mambadan mansaba hiç sediment taşınımı olmadığına ya da yok denecek kadar az olduğunda meydana gelmektedir. Temiz su oyulması koşullarında sediment konsantrasyonu sıfıra eşittir (Huai vd., 2011). Temiz su oyulmasında, sediment taneleri hareket etmediğinden dolayı statik bir denge akımı durumu oluşmaktadır. Akımın taşıma kapasitesi fazla ise belirgin oyulma derinliklerinin oluşacağı hareketli taban oyulması durumu meydana gelir. Askıya alınan tanelerin etkisi, oyulma çukurunun analizini zorlaştırdığından, hareketli taban oyulması durumunda oyulma derinliğinin analizi edilmesi daha zordur. Mamba akımında sediment hareketi yokken, örneğin bir baraj yapısında, temiz su oyulması oluşabilir. Hareketli taban oyulması, yerel oyulma üzerine eklenen genel bir oyulmadır. Hareketli taban oyulması, mambadan mansaba sediment taşınımı olduğunda meydana gelir ve sediment tanelerinin sürekli taşınması

olarak tanımlanabilir. Giriş akışının sediment konsantrasyonu bire eşittir (Huai vd., 2011). Membada taşınan sediment debisinin, oyulma çukurundan taşınan sediment debisine eşit olduğunda oyulma çukurunun dinamik denge durumuna ulaşılır. Sediment taşınımı suyun aşındırıcı kapasitesini azaltır. Çünkü taşıma kapasitesinin bir kısmı zaten harcanmıştır. Hareketli taban oyulması, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi temiz su oyulma işlemine kıyasla zamanla daha değişkendir.



Şekil 2.1. Zamanla oyulma derinliğinin hareketli taban oyulması ve temiz su oyulması durumları için değişimi (Melville ve Sutherland, 1988)

Yatak yükü ve asılı yük, genel olarak hareketli taban oyulması sırasında meydana gelebilir. Asılı yük, çoğunlukla ince parçacıklar akışa sürüklendiğinde gözlenmektedir. Yatak yükü, daha büyük parçacıklar yatak boyunca sürüklendiğinde ya da yuvarlandığında gözlenmektedir. Çözünmüş yük ise bazı kaya türleri için gözlenebilir ve çözelti içindeki kimyasal maddeler akış tarafından taşındığında meydana gelmektedir (Ghodsian vd., 2012a).

Oyulma derinliğinin durumu, temiz su ve hareketli taban oyulması için yukarıda tartışılan koşullara benzer olarak, dinamik veya statik olmak üzere iki durumda olabilir. Dinamik bir oyulma derinliği genellikle bir taşkın meydana geldiğinde ve taneler oyulma çukurunda süspansiyon halinde olduğunda ve sonuç olarak taban malzemesi mansaba taşınmadığında ya da oyulma çukurunun dışına sediment taşınımı olmadığında gerçekleşir. Taşkın koşulları sırasında askıda bırakılan partiküller artık askıya alınmadığında ve oyulma çukuruna yerleştiğinde statik bir oyulma derinliği meydana gelir. Bu oyulma çukuru koşulları sediment yataklarında belirgin bir şekilde gözlenebilmektedir. Statik oyulma derinliği genellikle dinamik oyulma derinliğinden daha düşüktür ve maksimum denge oyulma derinliği ölçümünde, dinamik durum dikkate alınmalıdır (Pagliara vd., 2004).

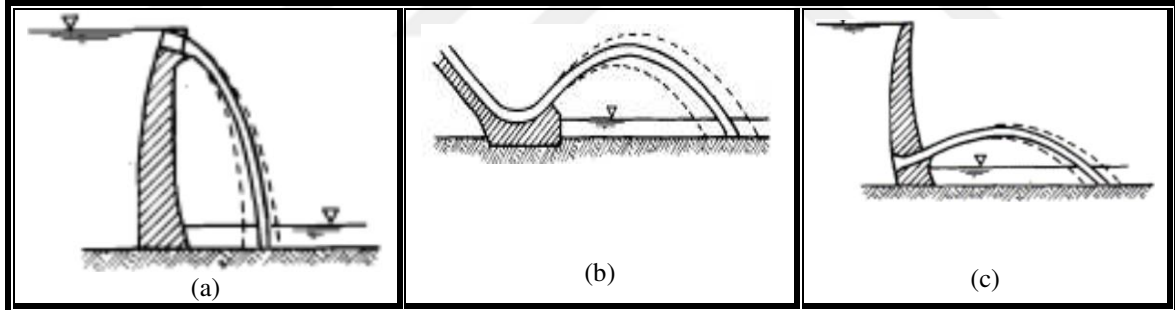
Oyulma çukuru gelişimi; başlama, gelişme, stabilizasyon ve denge fazı olmak üzere dört genel aşama ile karakterize edilebilmektedir. Maksimum oyulma derinliğine genellikle denge fazında ulaşılır, çünkü bu faz yerel akışın parçacıkları taşıyamayacağı veya aşındıramadığı aşamayı temsil etmektedir (CUR, 1995).

2.2. Serbest Düşülü Yapılarda Yerel Oyulma

Serbest düşme veya su jetleri, genellikle mambadan fazla gelen suyun baraj veya tersip bendi gibi su yapılarının mansabına iletilmesi sonucu oluşmaktadır. Bu da kaçınılmaz olarak söz konusu hidrolik yapının mansabındaki düşüm yatağında veya havuzunda oyulma oluşumuna yol açabilmektedir. Bir düşüm havuzu, akış hızlarını azaltan ve yüksek türbülansa neden olan bir yavaşlama bölgesi olarak hareket ettiğinden ekonomik bir enerji dağıtıcısıdır. Ancak yapıya zarar vermemek için oyulma çukurunun hidrolik yapıdan yeterli bir mesafede meydana gelmesi sağlanmalıdır. Bununla birlikte, oyulma derinliği yapıyı tehlikeye sokacağı için aşırı olmamalıdır (Pagliara vd., 2004). Aşağıda akarsu yatağındaki oyulmanın temeli kısaca açıklanmıştır ve serbest düşülü jetlerin oyulmaya etkisi tartışılmıştır.

2.2.1. Serbest Düşen Jet

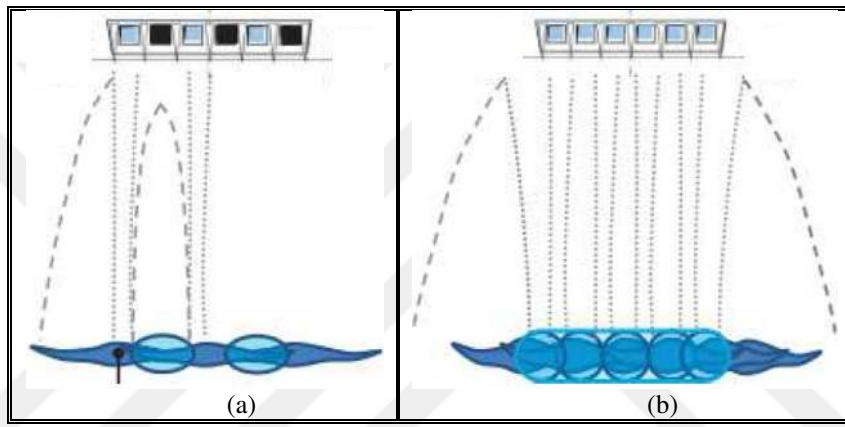
Serbest düşen veya mansap havuzuna çarpan jetler, hava gibi sınırsız bir ortamdan barajlar gibi kontrol yapılarından çıkan su jetleri olarak tanımlanabilir. Farklı savak türlerinde savaklanma neticesinde serbest düşen jetler oluşabilir (Van Aswegen vd., 2001; Monfette, 2004). Serbest düşen jet çeşitlerinden, özellikle barajlarda görülenler Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Barajlarda görülen serbest düşen jet çeşitleri: (a) Taşma dolusavağı, Baserca Barajı (İspanya) örneği (Ervine vd., 1997); (b) Sıçratma eşikli dolusavak, Tarbela Barajı (Pakistan) örneği(Whittaker ve Schleiss, 1984); (c) Basınçlı dolusavak, Cahora-Bassa Barajı (Mozambik) örneği (Whittaker ve Schleiss, 1984)

Serbest düşen jetler; akım koşullarına, savak geometrisine, özelliklerine vb. bağlı olarak dikdörtgen şekilli (düzlemsel) veya dairesel şekilli olabilmektedir (Hoffmans ve Verheij, 1997; Huai vd., 2011). Mansap havuzu tabanındaki düzlemsel dikdörtgen jetlerden doğan basınç dalgalanmalarının, dairesel jetlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çünkü dairesel jetler daha simetrik veya radyal olarak karşılıklı yayılırken, dikdörtgen şeklindeki jetler yanal ya da tek yönlü olarak yayılmaktadırlar (Borghei ve Zarnani, 2008;). Bununla birlikte, farklı jet geometrileri için enine kesit ortalama hız dikkate alındığında, hangi jet tiplerinin farklı enine kesit etkilerinin nispeten küçük olduğu tespit edilmelidir (Pagliara vd., 2004). Fazla su kapasitesine sahip

barajlardan fazla taşkın suyunun savaklanması için yüksek düşüklü barajlardan çok sayıda jet deşarj edilebilir (Bollaert vd., 2012). Farklı jet aralığı konfigürasyonları, mansap üzerinde farklı etkilere sahip olabilir. Jetler arasındaki boşluk birbirine bitişik olabilir veya bitişik olmayabilir. Bitişik olmayan jetler, iki veya daha fazla sayıda jetin, bir veya daha fazla kapaktan aralıklı olarak tahliye edildiğinde meydana gelir. Şekil 2.3(a)'da görüldüğü gibi su jetinin mansap havuzu serbest yüzeyine çarpma anı, oyulma için göz önünde bulundurulması gereken en kritik kısımdır (Bollaert vd., 2012). Bitişik jetler, iki veya daha fazla sayıda jetin yan yana kapaklardan boşaltıldığı zaman meydana gelir. Bitişik jetlerin havada büyük bir jet çekirdeği oluşturduğu görülmüştür. Şekil 2.3(b)'de gösterildiği gibi, birbirlerine bitişik olmalarından dolayı jetlerin difüzyonu gerçekleşmez.

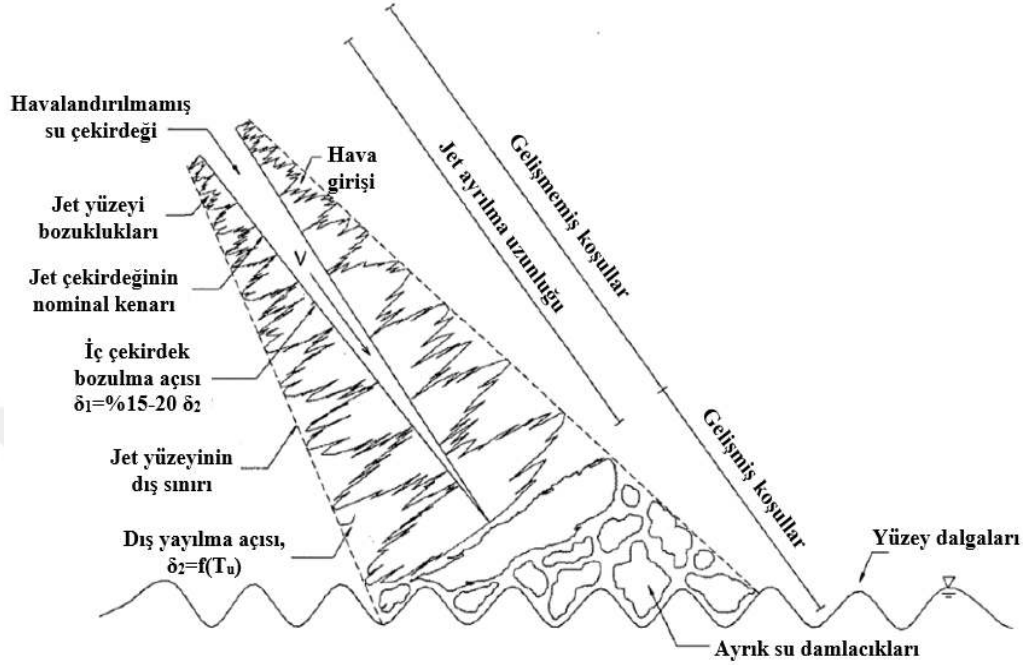


Şekil 2.3. Su jeti: a) bitişik olmayan jetler, b) bitişik jetler (Bollaert vd., 2012)

Görüldüğü üzere literatürde farklı jet şekilleri için çalışmalar yapılmış ve farklı jet kombinasyonları test edilmiştir (Dey ve Eldho, 2009; Mehraein vd., 2012).

Su jeti havada ve suda (mansap havuzu) hareket ederken gelişmemiş ve gelişmiş jet bölgesi olmak üzere, farklı özelliklere sahip iki farklı jet bölgesi tanımlanmıştır (Hoffmans ve Verheij, 1997; Lewis vd., 1999; Mehraein vd., 2012). Gelişmemiş jet bölgesi, havalandırılmayan ve yüksek bir erozyon potansiyeline sahip olduğu tespit edilen bir çekirdek bölgesi ile karakterize edilir. Bu çekirdek, jetin aşındırıcı gücünü oluşturur. Havalandırılmış bir su kütlesi, genellikle bu çekirdeği çevreler. Püskürtme durumunda, su jetinin hava emmesi durumunda veya yatak malzemesi üzerindeki kuyruksuyunda ilerlerken çekirdek bölge genişliğine göre büzüşür ve hız bu bölgedeki (potansiyel çekirdek) akışa eşit olarak kabul edilir. Gelişmiş jet bölgesi, su jetinin yeterince yüksek bir düşüye sahip olduğunda veya yeterince derin kuyruksuyuna sahip bir mansap havuzuna girip hareket ettiği durumda meydana gelir. Bu durumda, jet çekirdeği tamamen daralır. Gelişmemiş jet bölgesi parçalanıp tutarlılığını yitirdiğinde gelişmiş jet bölgesi olarak tanımlanabilir. Serbest düşen jet durumunda, basınç dalgalanmalarının gelişmemiş jet çekirdeğinin içine girmesi gibi dış etkenler, jet çekirdeğinin tutarlılığını yitirmesine sebep olur ve gelişmiş jet bölgesi oluşur

(Monfette, 2004). Gelişmiş jet bölgesinde gelişmiş koşullar, gelişmemiş jet bölgesinde gelişmemiş koşullar geçerlidir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Havadaki serbest düşen jet davranışı (Monfette, 2004)

2.2.2. Serbest Düşen Su Jeti için Sınır Koşulları

Bir problemi fiziksel laboratuvar modelleri, bilgisayar modelleri veya matematiksel formüllerle doğru bir şekilde modellemek ve analiz etmek için sınır koşullarının, prototip veya gerçeklik koşullarının doğru bir şekilde temsil edilmesinin sağlanması gerekir. Bu nedenle olayın doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Oylmayı değerlendirmek için, etki eden parametreler belirtilmelidir. İlgili parametreler hidrolik sınır koşulları tarafından tanımlanırken, bazı parametreler geoteknik ve morfolojik sınır koşulları tarafından tanımlanabilmektedir. Oylmanın en önemli etki parametrelerinden olan akış olayının iyi analiz edilmesi, tanımlanacak doğru sınır koşulları için oldukça önemlidir (Hoffmans ve Verheij, 1997). Hidrolik, geoteknik ve morfolojik yönleriyle ilgili en önemli sınır koşulu faktörlerinden bazıları, literatür araştırması göz önünde tutularak Tablo 2.1’de özetlenmiştir (Annandale ve George, 2011).

Herhangi bir taban malzemesinin özellikleri genel olarak fiziksel ve kimyasal olarak tanımlanabilir. Fiziksel özellik bakımından taban malzemesi, birbirine yapışmayan tortu ve yüksek oranda kırılmış veya yıpranmış kaya gibi birbirine temas eden ayrı elemanlar olarak değerlendirilir. Öte yandan kimyasal özellikler ile sediment ve kaya parçacıkları veya blokları; yapışkan sediment, semente toprak ve sağlam kaya gibi sabit bağlarla bağlanmaktadır (Annandale, 2006).

Tablo 2.1. Serbest düşen jetlerin mansabında oluşan oyulma için sınır koşulları

Serbest düşülü savakların mansap oyulmasında sınır koşulları	
Hidrolik sınır koşulları	Akım hızları, su seviyeleri (kuyruksuyu seviyesi, memba akım derinliği), yayılma ve türbülans yoğunluğu, çarpma anındaki jet geometrisi, düşü yüksekliği, mansap havuzundaki çarpma hızı (Ghodsian vd., 2012). Sıvı yoğunluğu ve kinematik viskozite (Hoffmans ve Verheij, 1997).
Morfolojik ve geoteknik sınır koşulları	Taban malzemesi tipi (tortul, magmatik ve metamorfik) Malzeme yoğunluğu Taban malzemesi yapısı Taban malzemesinin kalınlığı Taban malzemesi kalitesi Taban malzemesinin tek eksenli basınç ve çekme dayanımı Young'ın esneklik modülü Taban malzemesi süreksizlikleri (çatlaklar ve kırılma koşulu, derece ve yönelme) Çatlak sayısı Çatlak sayısı: eğim açısı ve eğim yönü, kalıcılık, tipik uzunluk, aralık, genişlik, sürtünme açısı Hata ve yatak düzlemi aralığı Taban malzemesi boyutu Aşınma özellikleri ve taban malzemesi kırılma tokluğu Taban malzemesinin ve derz dolgu malzemesinin ayrışması (Van Aswegen, vd., 2001). Taban malzemesinin yapışma kuvveti - ikincil akımların kesme kuvvetlerine ve oyulma çukurunun çevresine ve blokların arasına. Genel olarak bir oyulma çukuru su jeti ile sınırlanmalıdır (Monfette, 2004).

Prototip koşullarının doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak için çalışma alanının coğrafi ve geoteknik koşulları her zaman dikkate alınmalı ve araştırılmalıdır. Örneğin, bir akarsuyun mansap kanalının bir tarafındaki daha güçlü bir taban malzemesi bölümü, yanal hidrolik kuvvetlerin yansıtılmasına ve daha sonra diğer alanlardaki oyulmaların arttırılmasına neden olabilir ve maksimum oyulma derinliğinin konumunu değiştirebilir (Heng vd., 2012). Diğer bir durum ise, kaya ve tortu yapısı gibi zemin koşullarının derinlik olarak değiştiği ve bu nedenle de oyulma direncinin derinlikle değiştiği için oyulma derinliğini net bir şekilde belirleyebilme zorluğunun artmasıdır (Hawkswood vd., 2013). Ayrıca, mansap kanalın genişliği de dikkate alınması gereken önemli bir faktördür (Ghodsian vd., 2012). Kariba Barajı, taban malzemesi dayanımının yer yer farklılık gösterdiği ve maksimum oyulma derinliğinin konumunun değişmesi yönüyle bu duruma bir örnektir (Bollaert vd., 2012).

Bu nedenle sınır koşullarının (hidrolik, geoteknik ve morfolojik), oyulma potansiyelini ve kapsamını etkiledikleri için doğru tanımlanmaları gerekmektedir. Yukarıda belirtilen sınır koşullarından bazıları, daha sonraki bölümlerde daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

2.2.3. Oyulma Mekanizması

Oyulma mekanizması; havadaki ve mansap havuzundaki su jetinin hidroliği ve taban malzemesinin direnci olmak üzere iki temel faktör açısından incelenmiştir. Burada literatür araştırmasına bağlı olarak belirlenen oyulma mekanizması özetle ifade edilmektedir.

Jetin hava ve mansap havuzundaki parçalanmasının yanı sıra, mansap havuzundaki jet davranışının etkileri de dâhil olmak üzere jetin tabanı aşındırıcı özelliğini analiz etmek büyük önem taşımaktadır. Jetin aşındırma potansiyeli, havadan mansap havuzuna çarpma sırasında bırakılan enerji ve mansap havuzundaki difüzyon ile yakından ilgilidir. Eğer jetin enerjisi çarpışma sırasında tamamen tükenirse, artık oyulma gerçekleşmez (Van Aswegen vd., 2001). Bu bağlamda, serbest düşen jet davranışını ve çarpma havuzundaki jet davranışını ayrı ayrı incelemek gerekir.

Serbest düşen bir jet akışında dikkat edilmesi gereken en önemli konu türbülanstır. Türbülanslı akış, Reynolds sayısı genellikle 2300'den yüksek olduğunda gerçekleşir (Karim ve Ali, 2000; Versteeg ve Malalasekera, 2007). Akış hareketindeki değişiklikleri belirleyen eylemsizlik kuvvetleri, türbülanslı akışta laminar akışa göre viskoz kuvvetlerden daha belirgindir (Hickin, 2004). Türbülans çok karmaşık ve değişkendir, olayın analiz edilmesini zorlaştırır.

Jetin havadaki davranışının; düşme yüksekliği, çıkış hızı, jetin membadan çıkışındaki türbülans, sürüklenen hava ve çıkıştaki jet şekli (jet geometrisi) gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu bilinmektedir. Yörünge ve çarpma enerjisi; jet hızına, havanın sürüklenmesine ve ilk jet geometrisine bağlıdır. Jetin parçalanması ve difüzyonu ise, jetin membadan çıkışındaki türbülans yoğunluğuna bağlıdır. Bazı araştırmacılar, su jetinin yüksek düşülü barajların çoğunda düşme yüksekliğinin tamamında her zaman kırılmadığını veya gelişmemiş jet durumunun da gözlenebildiğini öne sürmüşlerdir (Hausler, 1983; Van Aswegen vd., 2001; Manso vd., 2008; Annandale ve George, 2011). Su jeti havadayken genellikle iki bölgeden oluşur: genişleyen bir dış havalandırılmalı kabuk ve çürüten bir çekirdek (Şekil 2.5).

Serbest düşen jetin parçalanması ve havanın su jetine karışması, yüzey gerilimi ve türbülans etkisiyle ilgilidir. Yüzey gerilimi, yüzey bozukluklarının büyümesine direnç gösterir ve jeti bir arada tutar. Yüzey gerilimi, Weber sayısından etkilenir (Bollaert, 2010c). Öte yandan türbülans, düzensiz hız dalgalanmaları olarak tanımlanabilir. Serbest düşen bir jet genellikle serbest yüzeyinde güçlü bir türbülansa sahiptir (Wu vd., 2012). Jetin parçalanması ve havanın sürüklenmesi, mansap havuzundaki basınçlar gibi jet erozyon kapasitesinin büyüklüğünü ve miktarını belirler (Ervine vd., 1997).

Mansap havuzuna serbest düşen jet çekirdeği çoğu durumda bozulmadan kaldığı (gelişmemiş jet) için bazı araştırmacılar serbest düşen jetlerde hava konsantrasyonun ihmal edilebileceğini ifade etmişlerdir (Häusler, 1983; Ervine ve Falvey, 1987). Aksi takdirde, serbest düşme sırasında jetin genişliği bunu hesaba katacak şekilde azaltılmalıdır (Häusler, 1983). Bununla birlikte, jetin içeriğine karışan hava jet çekirdeğinin parçalanmasına ve jetin kuyruksuyu içinde hareket ederken potansiyel enerjinin yayılmasını arttırmaya neden olabilmektedir (Pagliara vd., 2005). Oyulma değerlendirmesinde havalandırmanın etkisi vardır, çünkü hava/su oranı arttıkça oyulma miktarı azalabilmektedir (Van Aswegen vd., 2001; Pagliara vd., 2006).

Jet havalandırması genellikle türbülans yoğunluğu yeterince yüksek olduğunda ve yerçekimi ivmesi nedeniyle oluşur. Yüzey vorteksleri (kinetik enerjiden kaynaklanan) yüzey geriliminden daha büyükse ve akış tamamen türbülanslı ise havalandırma oluşabilir (Tokyay, 2008). Hava sürüklenmesi jet hızındaki yavaşlama üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir (Monfette, 2004).

Literatürde oyulma oluşumunun sebepleri hakkında net ifadelere rastlanmamıştır. Ervine vd., 1997, düşme yüksekliğindeki artışın, jet hızını (yüksek kinetik enerji) arttırdığını ve oyulma derinliğini arttırdığını, oyulma genişliğini ve uzunluğunu azalttığını gözlemlemişlerdir. Ancak, Stratford vd., (2013) ise oyulma olayının taşkınlardan dolayı uzun süreli büyük debilere bağlı olduğunu, düşme hızı ve düşü yüksekliğine bağlı olmadığını belirlemişlerdir. Fiziksel testler debideki artışın, mansap havuzundaki darbede serbest düşen jetin dış genişliğini ve kalınlığını azalttığını göstermektedir. Bunun nedeni, düşük debilerde hava sürüklenmesi nedeniyle jetin daha hızlı kırılmasıdır (Heng vd., 2012).

2.2.4. Jetin Kırılması

Jetin kırılması ile ilgili denklemler Tablo 2.2 ve 2.3'te verilmiştir. Su jetleri kullanılarak suların havalandırılması ve oksijen transferi işleminde jetin kırılması istenmeyen bir durumdur. Performans azalmasına neden olmaktadır. Tablo 2.2 ve 2.3'teki denklemler kullanılarak jetin kırılma (kopma) uzunluğu bulunabilmektedir.

Tablo 2.2. Dikdörtgen jetler için geliştirilmiş kopma uzunluğu (L_b) denklemleri

Dikdörtgen veya naph jetler		
Literatür	Araştırmacılar tarafından geliştirilen jet kopma uzunluğu (L_b) denklemleri	Denklemler numarası
Horeni (1956)	$L_b = 6q^{0.32} \left(Q > 0.25 \frac{m^3}{s} \text{ için} \right)$	(2.5)
Castillo (2007)	$L_b = \frac{0.85B_i Fr_i^2}{(1.07T_u^* Fr_i^2)^{0.82}}$	(2.6)
	$T_u^* = \frac{q^{0.43}}{IC}$	(2.7)
	$IC = \frac{14.95g^{0.5}}{K^{1.22} C_d^{0.19}}$ Burada: $C_d=2.1$ ve $K=0.85$ 'tir.	(2.8)

burada: d_i = Membadan çıkıştaki jet çapını (m), Q = Debi (m^3/s), q = Mansap havuzuna çarpma anındaki birim debiyi ($q= Q/b$), b = memba kanalı genişliğini ($m^3/s/m$), V_i = Membadan çıkıştaki uniform jet hızını (m/s), σ = Suyun yüzey gerilimini ($=0.0728$ N/m) [Engineeringtoolbox, 2015], F_j = Mansap havuzuna çarpma anındaki Froude sayısını [bkz. Denklem (2.9)], L_b = Jet kopma uzunluğunu (m), T_u^* = Bir savak napından dökülen akımın başlangıç türbülans yoğunluğunu, IC =

Mansap havuzuna çarpma anındaki akım koşullarını, We = Weber sayısını, d_j = Mansap havuzuna çarpma anındaki jet çapı (m), K = Dikdörtgen jet veya nap akışının kopma uzunluğu için oransal katsayısı, yaklaşık 0.85'tir (Castillo, 2006), C_d = Hidrodinamik savaklanma durumunda debi katsayısını yaklaşık 2.1 (Castillo, 2006), veya keskin kretli savak için debi katsayısı yaklaşık 1.85 (Castillo vd., 2014), B_i = Membadan savaklanma durumunda savak üzerindeki nap kalınlığını (literatürde h_o veya y_o olarak gösterilebilmektedir) (m) ifade etmektedir.

Tablo 2.3. Dairesel jetler için geliştirilmiş kopma uzunluğu (L_b) denklemleri

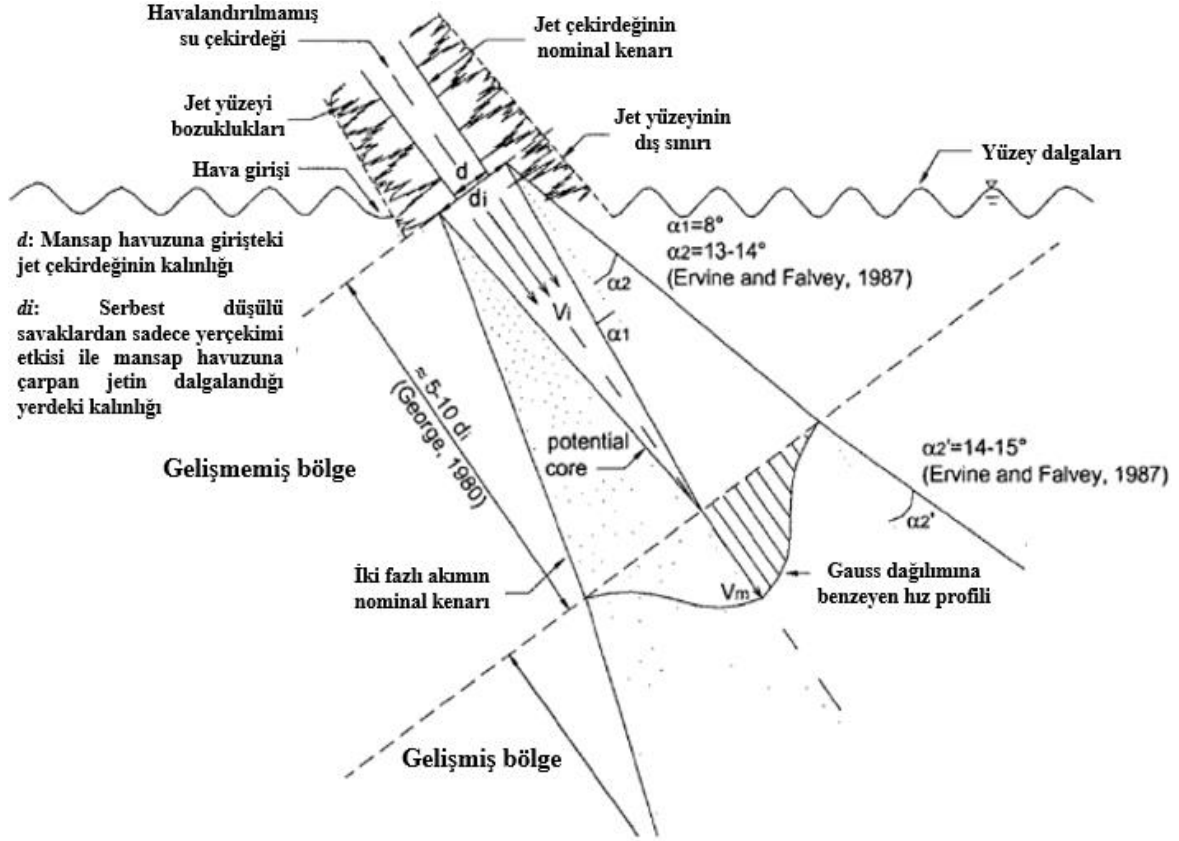
Dairesel jetler			
Literatür	Araştırmacılar tarafından geliştirilen jet kopma uzunluğu (L_b) denklemleri	Ortalama türbülans yoğunluğu	Denklem numarası
Baron (1949)	$L_b = 60Q^{0.39}$	%0.3	(2.9)
	$L_b = 1.7 \frac{We}{(10^{-4}Re)^{5/8}}$	%3	(2.10)
	$We = \frac{\rho V_i^2 D_i}{\sigma}$		(2.11)
Ervine vd. (1997)	$L_b = \frac{1.05 D_i F_i^2}{C^{0.85}}$		(2.12)
	$C = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2L_b}{D_i F_i^2} + 1} \right) \left(\sqrt{\frac{2L_b}{D_i F_i^2} + 1} - 1 \right)}$		(2.13)
	or $C = 1.14 T_u F_i^2$		(2.14)
Ervine vd. (1980)	$L_b = 17.4Q^{0.31}$	%3	(2.15)
	$L_b = 4.1Q^{0.2}$	%8	(2.16)
Ervine ve Falvey (1987)	$L_b = 50D_j - 100D_j$	%3-8	(2.17)

2.2.5. Mansap Havuzunda Jet

Mansap havuzundaki jetin durumu, jet çekirdeğinin tutarlılığı bozulmaması durumunda havadaki jete benzer şekilde değerlendirilebilmektedir. Benzer şekilde, jetin mansap havuzundaki yapısı burada da gelişmiş bölge ve gelişmemiş bölge olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.6).

- Gelişmemiş jet bölgesi, çekirdeğin parçalanmadığı ve çekirdek genişliğinin kuyruksuyu seviyesine göre nispeten küçük olduğu bölgedir (Hoffmans, 1998). Gelişmemiş jetin dış sınırlarında akım hızı azalmaktadır, ancak jet çekirdeği için mansap havuzuna çarpma anındaki akım hızı ile mansap havuzu yüzeyindeki akım hızı aynıdır. Jet çekirdeği mansap havuzu içinde, türbülans penetrasyonuna bağlı olarak, ucu sivri bir şekil almaktadır (Şekil 2.5).
- Gelişmiş jet bölgesi, jetin tamamen dağıldığı bölgedir (Şekil 2.5). Bu bölgedeki hız profili Gaussian dağılımına yakındır (merkezde hız maksimum, sınırlarda hız minimum). Ayrıca,

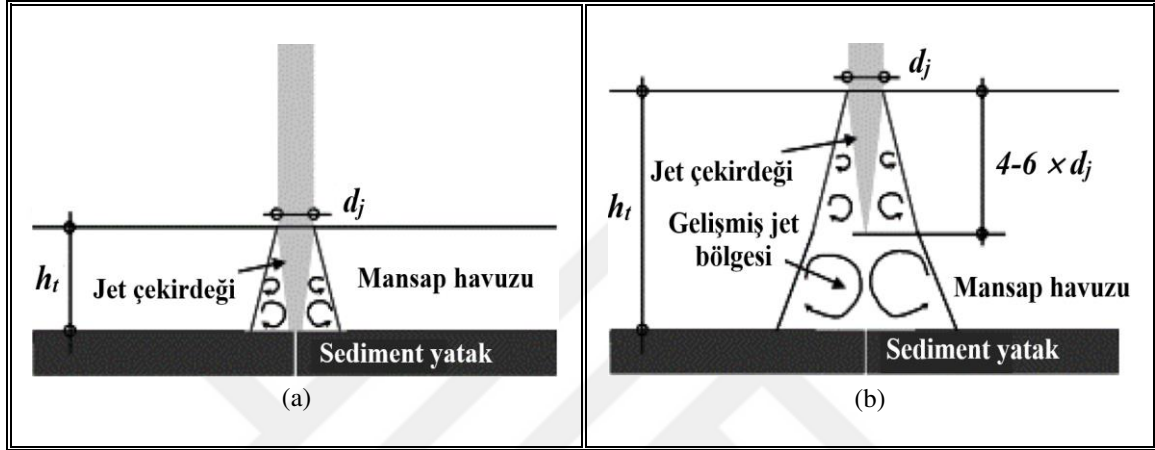
mansap havuzu içinde hem dairesel ve hem de düz su jetlerinin genişlikleri için doğrusal bir artış gözlenmiştir (Monfette, 2004; Hoffmans, 1998; Breusers ve Raudkivi, 1991). Jetin gelişmesi için, türbülanslı yüzey dalgalanmalarının çekirdeği parçalayabilecek kadar büyük olması gerekmektedir (Ervin vd., 1997).



Şekil 2.5. Mansap havuzu içindeki su jeti davranışı (Monfette, 2004)

Su jetinin etkisi genellikle düşü yüksekliği, kuyruksuyu derinliği ve jetin çarpma hızına bağlıdır. Jetin mansap havuzuna çarpması anında yüksek türbülans meydana gelirse, jet kırılır ve hızlıca yayılır (Van Aswegen vd., 2001; Manso vd., 2008). Jetin dağılması, başlangıçtaki tüm enerji dağılına kadar veya akarsu yatağı gibi bir çarpma bölgesi ile karşılaşınca kadar devam eder (Heng vd., 2012). Jetin sediment yatağına çarptığı bölge, en ciddi hidrokinamik etkinin gerçekleştiği yerdir. Bu bölgede hidrostatik basınçlar kademeli olarak dalgalı basınçlara ve kayma gerilmelerine dönüşür (Monfette, 2004). Sediment yatağına çarpma sırasında, jet çıkış şartlarına bağlı olan bir " K " değeri jetin çarpışmadaki çekirdek durumunu tanımlamak için kullanılmıştır. Çeşitli " K " değerleri, birkaç araştırmacı tarafından deneysel ve teorik olarak hesaplanmıştır (Bollaert, 2002). " K " değerleri 4.8 ile 9 arasında değişmektedir ve çekirdek uzunluğunu belirlemek için dairesel jetlerde çap (d) ve dikdörtgen jetlerde ise kalınlık (b) ile çarpılmaktadır (Bollaert, 2002).

Dairesel bir jetin gelişmiş ve gelişmemiş bölgedeki çekirdek durumu araştırılmıştır (Bollaert, 2002). Dairesel jetlerde $h_t/d_j < 4$ olduğu zaman jetin çekirdeğinin parçalanmadığı ifade edilmiştir. $4 < h_t/d_j < 6$ olduğu durum geçiş bölgesi olarak ifade edilmektedir. $h_t/d_j > 6$ olduğunda ise jet çekirdeğinin görünmediği ve tamamen parçalandığı belirtilmektedir (Asadollahi vd., 2011; Asadollahi ve Tonon, 2010). Burada; h_t , kuyruksuyu derinliğini ve d_j ise mansap havuzuna çarpma anındaki su jeti çapını ifade etmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. a) Sediment yatağa çarpma anında gelişmemiş dairese jet, $h_t/d_j < 4-6$; b) Dairesel jet etkisi, $h_t/d_j > 6$ (Bollaert ve Schleiss, 2005)

Literatürde dikdörtgen uçlu jetler için d_j değeri yerine jetin çarpma kalınlığı B_j 'nin dikkate alınması gerektiği önerilmiştir (Castillo, 2006). Ayrıca, gelişmemiş bir jetin oluşması için $h_t/B_j < 4-5.5$ olması önerilmiştir (Castillo, 2015; Castillo, 2006). Dikdörtgen jetler için jetin yanal yayılımını da içeren B_j değeri dikkate alınmaktadır (Şekil 2.7). Dairesel jetler için ise, jetin yanal yayılımını içermeyen d_j değeri dikkate alınmaktadır (Şekil 2.8).

Jet çekirdeğinin uzunluğu, çekirdek daralmasına veya çekirdek difüzyonunun iç açısına bağlıdır. Mansap havuzunda farklı akım koşulları için çekirdek büzülmesinin ve jet genişlemesinin ortalama yaklaşık açıları Tablo 2.4'te sunulmaktadır. Bu durum türbülanslı jet için görsel olarak Şekil 2.5'te sunulmaktadır (Ervine ve Falvey, 1987; Bollaert, 2002).

Mansap havuzunda ve sediment yataktaki hidrodinamik olay, jet türüne ve mansap havuzu geometrisi değişimine bağlıdır. Bu durum gelişmiş ve gelişmemiş jetler için aşağıda tartışılmaktadır (Van Aswegen vd., 2001; Manso vd., 2008).

- Gelişmemiş bir jet için, çekirdek hala sağlam durumdayken, çarpma anında radyal olarak dışa doğru türbülanslı bir kesme tabakası tarafından yarı kararlı basınç üretilir. Bu tabaka basınç dalgalanmalarına neden olur (Manso vd. 2008). Mansap havuzuna çarpma anında düşük basınç dalgalanmalarına sahip çekirdek jet, yüksek ortalama basıncın göstergesidir.

Şekil 2.8. Dairesel jet çarpması (Bollaert, 2002)

15

Tablo 2.4. Mansap havuzunda çekirdek büzülme açısı ve jet genişlemesi (Calitz, 2016)

Akım koşulu	Jet yayılma açısı veya çekirdek büzülme açısı
Laminer yuvarlak kabul edilen jetler	• Çekirdek büzülme açısı (4-5°) • Dış sınır genişleme açısı (6-7°) - mansap havuzu yüzeyinde • Dış sınır genişleme açısı (10-12°) - mansap havuzu derinliklerinde (jet parçalandığında)
Pürüzsüz türbülanslı jet (az miktarda hava sürüklenmiş)	• Çekirdek büzülme açısı (7-8°) • Dış sınır genişleme açısı (10-11°) • Dış sınır genişleme açısı (14°) - mansap havuzu derinliklerinde (jet parçalandığında)
Yüksek türbülanslı jet	• Çekirdek büzülme açısı (8°) • Dış sınır genişleme açısı (13-14°) • Dış sınır genişleme açısı (14-15°) - mansap havuzu derinliklerinde (jet parçalandığında)

Su jetinin mansap havuzuna çarpma bölgesinde oluşan basınçlar diğer parametrelerden genellikle daha yüksektir. Maksimum basınçlar genellikle jet ekseninde meydana gelir ve dışa doğru azalır. Geniş bir oyulma çukurunda basınç dalgalanmalarının, jet darbesinden kısa bir mesafe sonra ihmal edilebileceği bulunmuştur ve böylece basınç dalgalanmalarının, oyulma çukuru geometrisinden etkilendiği söylenebilmektedir (Borghei ve Zarnani, 2008).

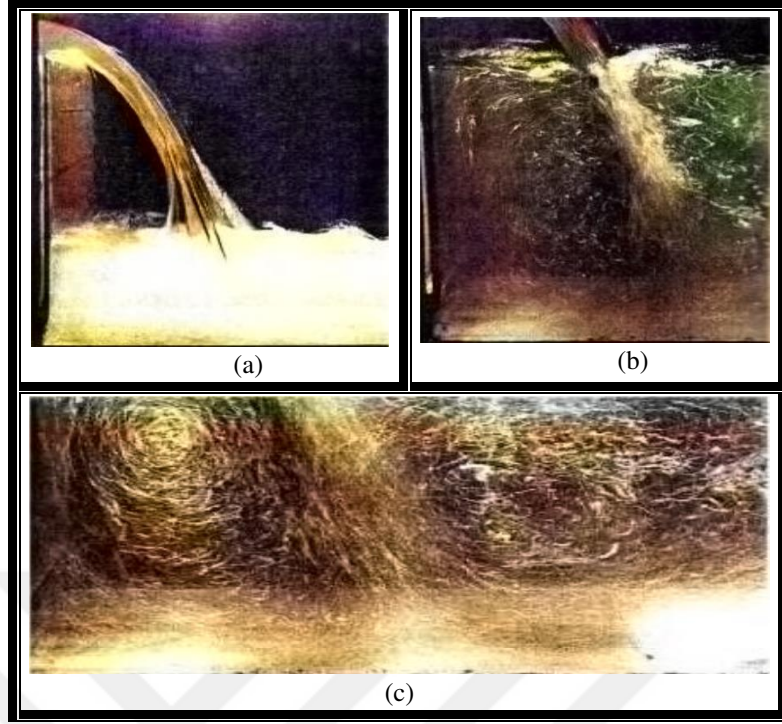
Oyulma çukuru derinliğinin; kuyruksuyu seviyesindeki artış, jet hızında azalma ve debideki azalma ile azaldığı belirlenmiştir (Hoffmans ve Verheij, 1997; Pagliara vd., 2006). Bununla birlikte, kritik kuyruksuyu seviyesinin maksimum oyulma derinliğini verdiği ve maksimum oyulma derinliğinin düşü yüksekliği ile kuyruksuyu seviyesine bağlı olduğu bulunmuştur (Van Aswegen vd., 2001; Balachandar ve Reddy, 2013). Şekil 2.9’da sığ ve derin bir kuyruksuyu seviyesine sahip mansap havuzundaki davranışı etkilenen jetin, görsel bir gösterimi sunulmaktadır (Tokyay, 2015).

Mansap havuzu tabanındaki toplam su yükü veya basınç üç bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler, oyulma çukuru gelişimi ve geometrisine göre aşağıdaki gibi değişmektedir (Monfette, 2004):

- ❖ Ortalama dinamik su basınçları (jet etkisi);
- ❖ Basınç dalgalanmaları (zamana bağlı dinamik basınçlar);
- ❖ Reynolds kayma gerilmeleri.

Mansap havuzuna yüksek hızda jetler çarptığında, genellikle yüksek bir hava konsantrasyonu mevcuttur. Ancak mansap havuzu tabanında ve sediment çatlakları içinde jetin çarpması ile oluşacak hava konsantrasyonu daha düşüktür. Sediment çatlaklarda %1 ile %10 arasında hava konsantrasyonu bulunduğu belirlenmiştir (Monfette, 2004; Annandale ve George, 2011). Hava içeriği serbest ya da çözünmüş olabilir (Annandale, 2006).

Mansap havuzu tabanındaki su jetinin çarpma noktasından yayılan akıştan oluşan türbülanslı jet, sabit yatak boyunca kayma ve dalgalanma basınçlarına neden olmaktadır (Younkins, 2008).



Şekil 2.9. Derin ve sığ mansap havuzunu etkileyen jetin görsel gösterimi: a) düşük kuyruksuyu seviyesi için, b) yüksek kuyruksuyu seviyesi için, c) tabana yakın oluşan vorteksler (Tokyay, 2015)

2.2.6. Taban Malzemesinin Oyulmaya Etkisi

Akarsu yatağının oluşturduğu taban malzemesi türü, göz önünde bulundurulması gereken en önemli sınır koşullarından biridir. Tablo 2.5'te en yaygın taban malzemesi türleri tanımlanmaktadır (CUR, 1995).

Taban malzemesinin oyulma mekanizması, taban malzemesinin su jetinin dinamik hareketi altındaki tepkisine bağlıdır (Van Aswegen vd., 2001). Taban malzemesi genellikle kohezyonlu veya kohezyonsuz olmaktadır. Bu çalışmanın kapsamında, çarpan su jetleri nedeniyle sediment yataklarında meydana gelen hidrodinamik olayların literatürü incelenmiştir (bkz. Mazurek ve Rajaratnam, 2005; Mehta, 1991; Mazurek ve Hossain, 2007; Paaswell, 1973; Hickin, 2004; Zhu ve Liu, 2012; Aderibigbe ve Rajaratnam, 1996; Termini, 2010).

Tablo 2.5. Yaygın taban malzemesi türleri

Taban malzemesi türü	Oluşumun tanımı ve şekli	Taban malzemesi kökeni
Magmatik	Erimiş silikat magmanın katılaştırılması ve kristalleşmesinden oluşur. Yıpranmış ve veziküler ise dikkat edilmelidir.	Granit, diorit, gabro, riyoit, andezit, bazalt, serpantin.
Metamorfik	Magmatik ve metamorfik kayalar üzerindeki ısı ve basınç etkileri ile oluşur. Hava şartlarında dikkatli olunmalıdır.	Arduvaz, filit, şist, gnays, mermer.
Tortul	Mineral tanelerin tortullaşması ve litiflenmesi ile oluşur. Şekli ve aşınma direncine dikkat edilmeli.	Kuvarsit, kumtaşı, silttaşı, şeyl, kireçtaşı, tebeşirler.

Belirli bir hızla mansap havuzuna çarpan su jeti, sediment taneleri üzerinde akışa geçerek vorteks ve türbülans oluşturmaktadır. Böylece, hidrostatik basınçlar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda, sediment taneleri üzerinde dinamik ve dalgalı olmak üzere diferansiyel basınç farklılıkları oluşmaktadır (Annandale, 2006). Sediment tanelerinin aşamalı olarak yer değiştirmesi, suyun çekilmesiyle ortaya çıkmaktadır (Annandale vd., 1996). Akışın başladığı ilk andan itibaren oyulmanın başladığı ve oyulmanın büyük bir kısmının kısa bir sürede gerçekleştiği gözlenmiştir. Zaman ilerledikçe nispeten oyulmada değişikliğin azaldığı belirlenmiştir (Tunç, 2014; Tunç ve Emiroğlu, 2018).

Büyük ölçekli vorteksler düşük frekanslı ve yüksek büyüklükte basınç dalgalanmaları üretirken, küçük ölçekli vorteksler yüksek frekanslı ve düşük büyüklükte basınç dalgalanmalarına neden olmaktadır. Daha büyük ölçekli vortekslerin oyulma işleminde büyük rol oynadığı belirlenmiştir (Emiroğlu vd., 2017; Peiqing ve Aihua, 2007). Küçük boyutlu taban malzemesindeki akış, kohezyonsuz sedimentten oluşan taban malzemesindeki akışa göre daha baskınken, daha büyük ve daha düzensiz sediment taneleri için şekil, boyutlar ve çıkıntılar oyulma mekanizmasını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Bollaert, 2010a; Bollaert, 2010b).

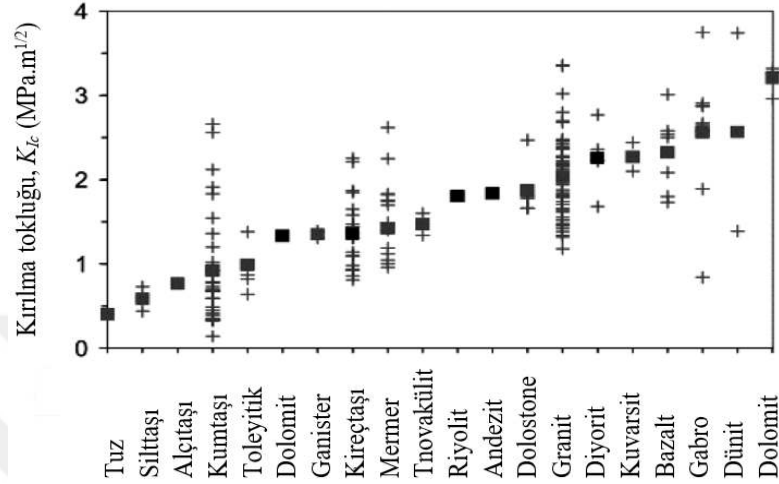
Sediment taneleri türüne göre suyun aşındırıcı özelliğine direnç gösterebilmektedir. Ancak bu durum mansap havuzundaki su derinliğine göre ve düşü yüksekliğine göre farklılık göstermektedir. Özellikle mansap havuzundaki kuyruk suyu derinliğinin az, düşü yüksekliğinin ise fazla olduğu durumlarda oyulma olayı belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Oyulma meydana geldiğinde, sediment taneleri çeşitli şekillerde aşınmış olabilir. Literatür araştırması göz önünde tutularak sedimente bağlı olarak oyulma mekanizmaları özetlenmiştir (Van Aswegen, 2001; George ve Sitar, 2012; Aswegen vd., 2001; Kieffer ve Goodman, 2012; Annandale, 2015). Hem ortalama ve hem de değişken baskılar ve çatlaklar, sediment tanelerinde çatlakların yayılmasına ve sonrasında hidrolik kırılmaya sebep olmaktadır. Hidrolik kırılma, su jetinin sediment tanelerine dinamik etkisi ile sediment bloğun ayrılmasına veya parçalanmasına sebep olan mekanik bir yıkım olarak tanımlanmaktadır (Peiqing ve Aihua, 2007; Liu vd., 1998). Hidrolik kırılma, gevrek kırılma ve aşınmadan kaynaklanan kırılma olarak ayrılabilir.

Sediment taneleri kenarlarında oluşan basınçların neden olduğu gerilme değeri, sediment tanesinin kırılma tokluğunu aşarsa, kırılmaya neden olan çatlaklar büyüyerek sediment tanesinin ani kırılması söz konusu olabilmektedir. Bu durum mevcut sediment blokların daha küçük parçalara bölünmesine neden olmaktadır. Ortaya çıkan gerilmeler kırılma geometrisi tarafından yönetilir ve bitişik sediment blokları gibi çevredeki sediment kütlesi tarafından desteklenmektedir (Bollaert, 2010b). Gevrek kırılma genellikle su jetinin yüksek hızlarda çarpmasıyla oluşmaktadır ve esas olarak önceden mevcut kırıklarda meydana gelmektedir (Bollaert, 2010c). Kırılma tokluğu gevrek kırılmayı belirlemek için önemli bir parametredir. Kırılma tokluğu (K_{lc}), sedimentin tek eksenli basınç dayanımına (UCS), sedimentin kimyasal içeriğine (mineral bakımdan) ve mevcut yerindeki

gerilme alanına (σ_c) bağlıdır. Şekil 2.10'da, farklı sediment türleri için kırılma tokluğu aralığı görülmektedir. Kırılma tokluğu (K_{Ic}), Denklem (2.18) kullanılarak hesaplanabilmektedir. (Bollaert, 2010a; Bollaert, 2010b).

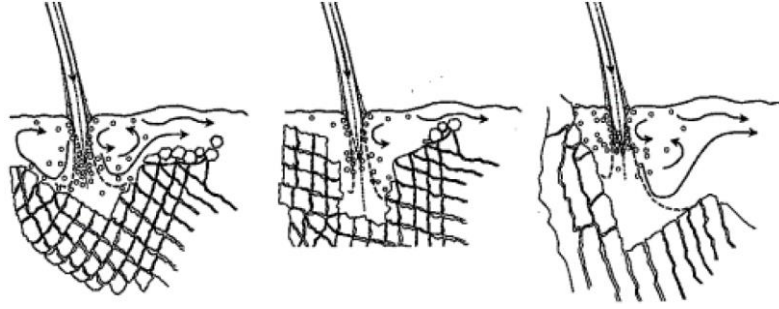
$$K_{Ic} = (0.008 \text{ ile } 0.01 \text{ arası}) \times UCS + (0.054 \times \sigma_c) + 0.4 \quad (2.18)$$



Şekil 2.10. Farklı sediment tipleri için kırılma tokluğu parametresi (Bollaert, 2002)

Oyulma çukuru derinleştikçe, aşınan sediment parçasının sıkıştığı yerden sökülmesi için daha fazla enerji gerekir. Aşınma, ancak akışkanın sediment tanesi direncine kıyasla daha aşındırıcı olması durumunda ortaya çıkar ve maruz kalan sediment tanesinde yüzey yıpranması meydana getirir (Bollaert, 2010a). Aşınmış sediment malzemesi yeterince küçükse, oyulma çukurundan taşınır (Monfette, 2004). Tutulan parçacıklar enerjinin dağılmasına yardımcı olabilir (Hoffmans, 1998). Bununla birlikte, oyulma çukurundan taşınan malzeme, taban malzemesi boyutuna ve akım şekline bağlı olarak farklı şekillerde tepe oluşturabilmektedirler. Başlangıçta yatak yükü olan taban malzemesi, yüksek türbülanslı akımdan dolayı askı halinde hareket edebilir. Dolayısıyla taban malzemesinin taşınma şekli sadece taşınan tanelerin boyutuna değil, aynı zamanda akış şekline de bağlıdır (Hickin, 2004). Böylece, taşınan taban malzemesi oyulma çukurunun mansabında farklı boyutlara sahip birikintiler oluşturabilmektedir. (Ghodsian vd., 2012). Laboratuvar model testleri ile mansap havuzunda maksimum taşınan malzemenin, maksimum oyulma derinliğinin, minimum kuyruksuyu derinliği ile oluştuğu belirlenmiştir (Pagliara vd., 2006b).

Serbest düşen su jetine bağlı olarak mansap havuzunda farklı oyulma şekilleri gözlenebilmektedir (Şekil 2.11). Özetle, bazı hidrolik koşullar, akım koşulları, mansap havuzunda oluşan basınç farklılıkları, sediment tanelerindeki rezonans, yatak boyunca akıştaki değişiklikler farklı oyulma geometrilerine yol açabilmektedir. Böylece, taban malzemesinin aşınması, kırılması, yerinden taşınması gibi durumlar gözlenebilmektedir (Annandale, 2015).



Şekil 2.11. Oyulma çukuru geometrileri (Bollaert vd., 2004)

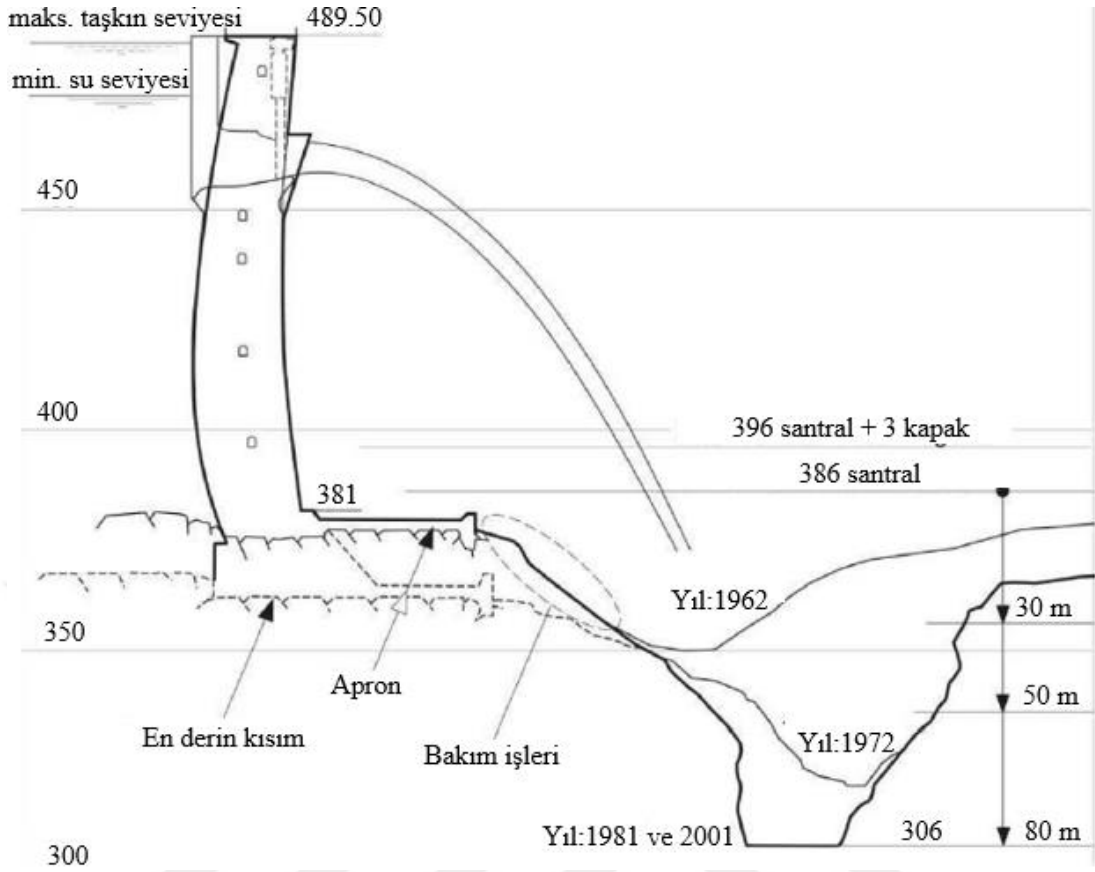
2.2.7. Prototip için Oyulmanın İncelenmesi

Hidrolik yapıların mansabında farklı şekilli su jetleri nedeniyle akarsu yataklarının oyulması özellikle yüksek düşümlü su yapıları için önemli bir çalışma alanıdır. Eğer oyulma kontrol edilmeden bırakılırsa, ciddi problemler çıkabilir ve oyulmanın büyük yıkıcı etkisi ile karşı kaşıya kalınabilir. Kariba Barajı ve Ricobayo Barajı, oyulmanın büyük sorunlara sebep olduğunun açık örnekleridir. Bu nedenle, oyulmanın incelenmesi ve oyulmayı önleme yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Kariba Barajı, dünyadaki yapay olarak oluşturulmuş en büyük mansap havuzuna sahip, literatürde bulunan kontrolsüz izlemenin en iyi bilinen ve belgelenmiş örneklerinden biridir. Kariba Barajı, Zambezi Nehri üzerindeki Zambiya ve Zimbabve arasındaki sınırda yer almaktadır. Baraj, 1950’lerde inşa edilen çift eğimli bir kemer barajdır. Barajın sınır koşullarına ilişkin en önemli bilgilerin bir kısmı literatürde olduğu gibi Tablo 2.6’da sunulmaktadır (Bollaert vd., 2012a; Noret vd., 2012; Bollaert vd., 2012b; Dasgupta vd., 2011).

Kariba Barajı mansabında özellikle 1962-1982 yılları arasında ciddi oyulma derinlikleri ölçülmüştür. Bunun nedeni, artan yağıştan dolayı fazla sayıda kapağın uzun süre açık bırakılmasıdır (Bollaert vd., 2012). Şekil 2.12’de Kariba Barajı mansap oyulmasının zamana göre değişimi şematik olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.6. Kariba Barajı’nın özellikleri

Kariba Barajı	
Baraj yüksekliği	128 m
Dolusavak kapağı	Baraj kretinden 33 m aşağısında
Kapak sayısı	6
Kapak boyutu	Yükseklik: 9.1 m; Genişlik: 8.8 m
Her kapaktan savaklanan debi	$Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ($q=159.1 \text{ m}^3/\text{s.m}$)
Toplam debi	$Q_T=9000 \text{ m}^3/\text{s}$
Oyulma çukuru derinliği	Kuyruksuyu seviyesinin 80 m aşağısı
Kuyruksuyu seviyesi	20 m (Castillo, 2006) ve 40.5 m (Whittaker ve Schleiss, 1984)
Taban malzemesi tipi	Granit kökenli malzeme (nispeten sert)
Mansap havuzu boyutları	Genişlik: 220m; Uzunluk: 190m
Su jetininin masap havuzuna çarpma hızı	20 m/s
Düşü yüksekliği	Yaklaşık 57 m (Castillo, 2006)

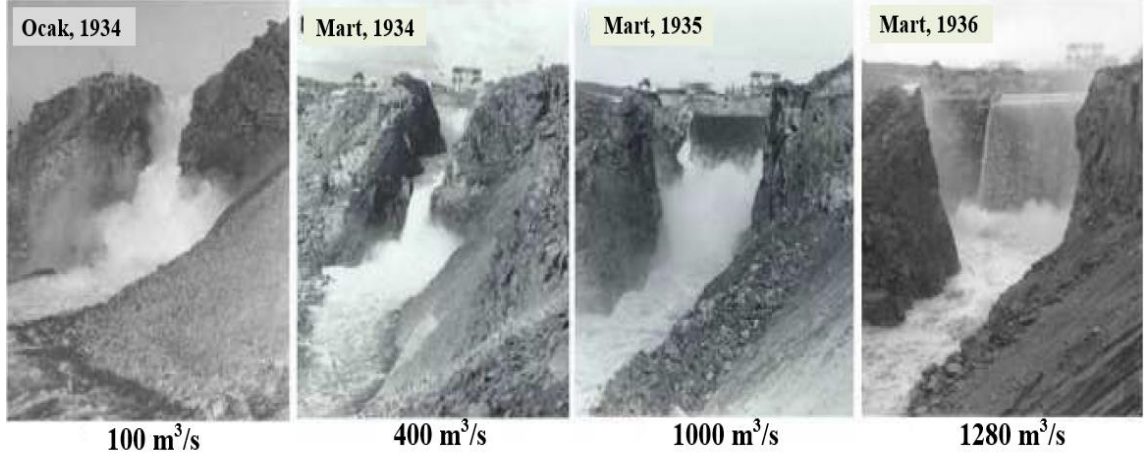


Şekil 2.12. Kariba Barajı mansabında oluşan oyulmanın yıllara göre şematik gösterimi (Noret vd., 2012)

Kariba Barajı kapaklardan çıkan su jetleri baraj temelini ciddi anlamda oyarak, yıkılma riskini arttırmıştır. Baraj mansabının güney kıyılarında orta kuvvetli granit malzeme (UCS= 50-100 MPa) bulunurken kuzey kıyılarında daha kuvvetli granit malzeme (UCS=150-200 MPa) bulunması, akarsu yatağı boyunca farklı oyulma derinlikleri oluşacağını işaret etmektedir (Bollaert vd., 2012).

Kariba Barajı'nda gözlenen bu durumun büyük felaketlere yol açmaması için bazı bakım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, burada uygulama mühendislerini tedirgin eden asıl durum, ileride olası bir taşkın gelmesi durumunda baraj kapaklarından fazla miktarda su tahliye edilmesi durumudur. Böyle bir durumda barajın bütünlüğünün tehlikeye girebileceği düşünülmektedir (Bollaert vd., 2012). Bu nedenle Kariba Barajı için yoğun çalışmalar sürdürülmüştür.

İspanya'da bulunan Ricobayo Barajı, 4650 m³/s'lik deşarj kapasitesine sahip olan bir kaya dolgu barajdır. İnşasından sonraki ilk yıllarda 100-400 m³/s debi deşarjında bile oyulmalar gözlenmiştir. Tasarım kapasitesinin doğru belirlenmediği düşünülen bu barajın mansabında, azami kapasitenin çok altındaki debi deşarjları için bile oyulmalar gerçekleştiği gözlenmiştir. Şekil 2.13'te Ricobayo Barajı'nın mansabındaki oyulmanın aşamaları görsel olarak sunulmaktadır (George ve Sitar, 2012).



Şekil 2.13. Farklı deşarjlarda Ricobayo Barajı'nın oyulma ilerlemesi (George ve Sitar, 2012)

1936 yılında gerçekleşen taşkın neticesinde Ricobayo Barajı'nda oyulmanın hasarını azaltmak için çeşitli teknikler uygulanmıştır. Şekil 2.14'te görüldüğü üzere mansap havuzuna betondan koruma yapılarak oyulmanın önlenmesine çalışılmıştır (USBR, 2012).

Türkiye'de Diyarbakır'ın Eğil ilçesindeki Dicle Barajı'nda son zamanlarda etkili olan yağış nedeniyle fazla suyun Dicle Nehri'ne tahliyesi amacıyla dolusavaşın üç adet radyal kapağından biri açılmaya çalışılırken kopmuştur. 1200 m³/s'lik debi kontrolsüz olarak mansaba boşalmıştır. Mansapta su seviyesinin yükselme ihtimali bulunan Dicle Nehri kıyısına yakın Eğil, Yenişehir, Sur, Çınar ve Bismil ilçelerinde yaşayanlar uyarılmıştır. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi membada yükselen su seviyesi sonucu mansaba düşen su jeti baraj mansabında ciddi oyulmalara neden olmuştur.



Şekil 2.14. Ricobayo Barajı'nın oyulmaya karşı iyileştirilmesi (George ve Sitar, 2012)



Şekil 2.15. Dicle Barajında 2018 yılında serbest düşüden kaynaklanan hasarlar: (a) Mansapta sol yamaçta ve dere yatağında oyulma, (b) Mansap tarafında sağ sahilde oyulma, (c) Kapak koştuktan sonra dolusavaktan görünüm (d) Kopan kapakın parçası

2.2.8. Oyulmanın Önlenmesi için Alınacak Olası Önlemler

Mansapta oluşan oyulmanın ilgili su yapısına hasar verecek seviyeye ulaşmasını önlemek için özellikle yüksek düşürlü barajların mansap tabanının korunması önerilmektedir. Taban koruma teknikleri, genellikle taban malzemesinin dayanımını arttırmak ve tabanın korunmasını sağlamak için uygulanır. Bununla birlikte, akarsu tabanını koruma yöntemleri genel olarak şunlardır:

- Oyulma çukurunun ilgili su yapısından daha uzakta oluşmasının sağlanması,
- Akışın geometrisinin değiştirilmesi,
- Su yükünün azaltılması şeklindedir (Hoffmans ve Verheij, 1997; Annandale, 2006).

Ayrıca, oyulmayı önlemek için seçilecek yöntemin hem nesnel ve hem de öznel olarak uygulanabilir olmasına, etkisine, uzun ömürlü olmasına ve ekonomik olmasına dikkat edilmelidir (Whittaker ve Schleiss, 1984; Annandale, 2006; Karim ve Ali, 2000). Oyulmanın önlenmesi için uygulanabilecek başlıca yöntemler aşağıda sunulmaktadır.

Yerleşim yerlerinin korunması

Yerleşim yerlerinin güvenliğinin sağlanması için ilgili su yapısından ve akarsu yatağından yeteri kadar uzakta yerleşim sağlanarak gerçekleştirilen bir yöntemidir.

Akışın değiştirilmesi

Akışın, enerji dağıtımını arttırmak için havada iken veya mansap havuzunda iken değiştirilmesi mümkündür. Su jetinin enerji yayılımı, hava sürüklenmesi ve mansap havuzundaki sapma gibi nedenler den kaynaklanmaktadır (Castillo, 2007). Su jetinin havalandırılması jetin sahip olduğu enerji dağıtılarak mansap havuzundaki etki azaltılabilir (Whittaker ve Schleiss, 1984). Havada jet parçalanması ile enerji yayılımı olmasına rağmen, enerjinin büyük bir kısmının mansap havuzunda yayıldığı belirlenmiştir.

Havadaki havalandırma ve jet parçalanması bazı enerji dağıtımlarından sorumludur, ancak enerjinin çoğunun darbe ve dalma havuzunda yayıldığı bulunmuştur (Van Aswegen vd., 2001). İlgili su yapısına sıçratma eşiği gibi ek yapılar yapılarak serbes düşen jetin enerjisi kırılabilir.

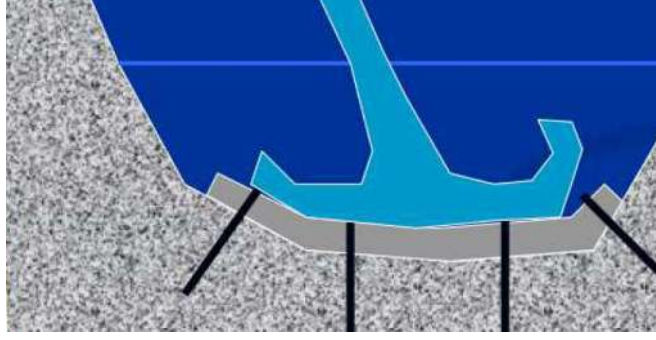
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, kuyruksuyu seviyesinin, düşü yüksekliğinin, debinin yanı sıra savak yapısının ve boyutlarının da mansap havuzundaki basınçları önemli ölçüde azalttığı görülmektedir (Berchtold ve Pfister, 2011). Dolayısıyla, savak yapısının oyulma üzerine etkisi oldukça önemlidir. Savak yapısının değiştirilmesi ya da ilgili su yapısına ek yapı elemanlarının monte edilmesiyle akışın değiştirilmesi mümkündür.

Mansap havuzunu şekillendirme

Mansap havuzu kazılarak kuyruksuyu seviyesinin artırılması sağlanır. Böylece, oyulma potansiyeli azaltılmış olur (Bollaert vd., 2012a). Bu da türbülansın ve basınç dalgalarının azalmasını sağlar. Kuyruksuyu seviyesi mansap havuzuna çarpan jetin enerjisini dağıtmada önemli rol oynamaktadır. Enerjinin verimli bir şekilde dağıtılması için havalandırma gibi yöntemlerle kullanılmasının daha faydalı olacağı düşünülmektedir (Whittaker ve Schleiss, 1984).

Mansap tabanın betonla kaplanması

İlgili su yapısının mansap kısmındaki tabana beton kaplama yapılarak olası aşınma ve yırtılmaların büyük oranda azaltılması sağlanabilir. Düşük dayanımlı taban malzemeleri, oyulmanın yüksek derinlikte meydana geleceği malzemelerdir. Bu yöntemle, mansap tabanın güçlendirilmesi sağlanmış olunacaktır. Ayrıca beton kaplama sayesinde basınç dalgalanmaları da azaltılmış olur. Bununla birlikte, beton kaplama yapılması uygun görünen durumda, beton kaplamanın yeterince ağır, sağlam, sert olması ve kırılman olmaması gerekmektedir (Kieffer ve Goodman, 2012). Şekil 2.16'da oyulmayı önleme yöntemlerinden biri olan beton kaplamanın uygulama düzeneği şematik olarak gösterilmektedir.



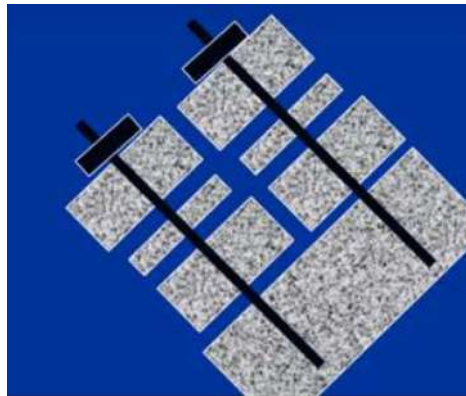
Şekil 2.16. Mansap tabanının beton kaplanması, şematik gösterim (Annandale, 2015)

Taban malzemesinin güçlendirilmesi

Taban malzemesinin güçlendirilmesi, ilgili malzemenin aşınma direncinin iyileştirilmesiyle mümkündür. Akarsu yataklarında, sağlamlaştırma için ankraj uygulanabilmektedir (Şekil 2.17).

Taban malzemesine ankraj durumunda, malzemenin dayanımının ankrajı kaldırabilecek kadar yüksek olması gerekir. Ankrajda kullanılan çapalar, sediment tanelerin boyutunu artırarak tanelerin direncini arttırmaya yarar. Ancak, bu yöntem uygulanırken yorulma ve kırılma arızası olduğunda dikkatli olunmalıdır. Ayrıca, taban malzemelerinin derzlenmesi yöntemi de uygulanabilir. Ancak, bu yöntem için de akışın çok şiddetli olmaması önerilmektedir (Hawkswood vd., 2013).

Yukarıda belirtilen akarsu mansap tabanını koruma önlemlerinden iki veya daha fazlası birleştirilebilmektedir. Oyulma çukuru derinliği önceden tahmin edilebilirse, gelecekteki oyulmalara karşı koruma için beton kaplama ya da ankraj yöntemi kullanılabilir. Mansap havuzunun derin ya da sığ olabilme seçenekleri, ekonomik etki göz önüne alınarak planlanmalıdır (Ervine ve Falvey, 1987). Bazı durumlarda, barajın inşası sırasında taşkın suların baraj inşaatı bitmeden tahliye edilmesi gerekebilir. Örneğin, ABD’de Calderwood Barajı inşaatında böyle bir durum ortaya çıkmıştır. Bu nedenle tasarım aşamalarında bu tarz hususların da dikkate alınması gerekmektedir (Whittaker ve Schleiss, 1984).



Şekil 2.17. Akarsu tabanına uygulanan ankraj (Annandale, 2015)

2.3. Literatürde Yerel Oyulmanın Tahmin için Sunulan Denklemler ve Konuyla ilgili Literatür Özeti

Bu çalışma alanının sınır koşullarındaki (hidrolik, geoteknik ve morfolojik) değişkenlik nedeniyle, özellikle türbülanslı koşullar altında konuyu teorik olarak değerlendirmek, oyulma çukuru geometrisini tahmin etmek zordur. Önceki çalışmalarda oyulma çukuru geometrisini değerlendirmek için laboratuvar modelleri ile çalışma yürütülerek deneysel, yarı ampirik ve tahmin yöntemleri geliştirilmiştir. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ve diğer bilgisayar yazılımları da alternatif olarak kullanılabilir. Ancak, laboratuvar modelleriyle birlikte kullanılmaları gerekir.

2.3.1. Laboratuvar Modelleri

Laboratuvar modelleri karmaşık üç boyutlu akış durumlarının gözlemlenebilmesiyle oyulma çukuru oluşumunu göstermek için güvenilir bir yöntemdir (Heng vd., 2012). Bu modeller genellikle sediment taşınımı, Froude kanunu ve geometrik ölçeğe uygunluk gibi parametreler ile ilgili prototip koşullarına karşılık gelmelidir (Hoffmans, 1998). Atalet kuvvetlerinin baskın olduğu serbest yüzey akışları (serbest düşen jetler) gibi modeller, genellikle Froude benzerliğine göre modellenmektedir.

Serbest düşen jetin davranışı Froude benzerliği ile doğrudan modellenebilirken Reynolds ve Weber benzerliklerinin de olaya etkisi vardır (Whittaker ve Schleiss, 1984). Ancak, bu üç benzerliğin laboratuvar modelleri için aynı anda kullanılması önerilmemektedir (Cheng vd., 2006).

Konunun laboratuvar modelleriyle incelenmesi literatür açısından en uygun olanıdır. Ancak söz konusu deneysel çalışmalar için gerekli laboratuvar modelleri fiziksel kaynaklar açısından değerlendirildiğinde hem zor ve hem de maliyetlidir. Çünkü modelin oluşturulabilmesi için laboratuvarın büyüklüğünün yeterli olması, pompa kapasitesinin yeterli olması, taban malzemesinin amacına uygun olması ve yeterli işgücüne sahip olunması gibi hususlara dikkat edilmelidir (Van Aswegen vd., 2001; Heng vd., 2012). Taban topografyasının ve oyulma mekanizmasının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için deney setinin doğru modellenmesi gerekmektedir. Taban malzemesi olarak doğru sediment tipinin seçilmesi oldukça önemlidir.

Bollaert (2002), yatak malzemesini etkileyen serbest düşen su jetinin basınç dalgalanmalarını ve türbülanslı davranışlarını doğru şekilde analiz etmek için yaklaşık 1/10 ölçeğinin gerekli olduğunu belirtmiştir. Diğer benzeri çalışmalarda ise genellikle 1/20 ölçeği kullanırken mansap havuzundaki havalandırma, jet hızı, türbülans ve dinamik basınç üzerinde ölçek etkisi olmadığı ifade edilmiştir (Boushaba vd., 2013).

2.3.2. Ampirik Formüller

Literatürde, sediment kaplı yataklarda serbest düşen su jetinden kaynaklanan oyulma derinliğini tahmin etmek ve oyulma çukuru geometrisini etkileyen parametreleri belirlemek için

deneysel formüller mevcuttur. Literatürde geliştirilen bu ampirik formüller çoğunlukla, ideal koşullar altında gerçekleştirilen küçük çaplı laboratuvar testlerine dayanmaktadır. Bu nedenle bu formüller prototip koşullarına uygulanırken ölçekleme komplikasyonlarına bağlı olarak, oyulma derinliğinin yanlış tahmin edilmesi söz konusu olacağından bu durumun büyük bir özenle incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, literatürdeki formüllerin büyük bir çoğunluğu, tüm prototip parametrelerini de dikkate almamaktadır. Bununla birlikte gerçek hayatta hem hidrolik ve hem de jeolojik/morfolojik koşulların değişkenliği nedeniyle deneysel sonuçlar ile her uygulamadaki oyulma derinliğini doğru bir şekilde tahmin etmek mümkün değildir (Van Aswegen vd., 2001; Neyshabouri vd., 2003; Güven, 2010; Whittaker ve Schleiss, 1984). Formüller türetilirken denge durumunun göz önüne alındığına dikkat edilmelidir. Bu, oyulma derinliğinin zamanla hiç değişmediği ya da çok az değiştiği anlamına gelmektedir (Jia vd., 2001).

Literatürde hidrolik yapıların mansap kanalında veya havuzunda oluşturdukları oyulma ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların çoğunda dolusavakların, dipsavakların, dairesel ağızlıklı su jetlerinin ve enerji kırıcı havuzların mansabında oluşan maksimum oyulma derinliği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla çeşitli denklemler türetilmiştir.

Serbest düşen su jetinin mansabında oluşan oyulma derinliğini belirleyebilmek için ampirik formül veren ilk çalışmalardan olan Schoklitsch (1932)'de geliştirilen Denklem (2.19) aşağıda verilmiştir.

$$d_s = K_o \times \frac{q^{0.57} \times h^{0.20}}{d_{90}^{0.32}} - h_t \quad (2.19)$$

burada; d_s = mansap oyulma derinliğini (m), q = birim debiyi (m^2/s), h = düşü yüksekliğini, memba ve mansap arasındaki su kotu farkını (m), d_{90} = taban malzemesinin %90'ını geçiren elek çapını ve h_t = kuyruksuyu derinliğini (m) ifade etmektedir. d_{90} 'nın biriminin milimetre olarak alınması durumunda $K_o = 4.75$ ve metre olarak alınması durumunda $K_o = 0.52$ 'dir. Schoklitsch (1932) tarafından verilen formülde savak tipi dikkate alınmamıştır. Ayrıca, sunulan denklem boyutsuz parametrelerle türetilmemiştir.

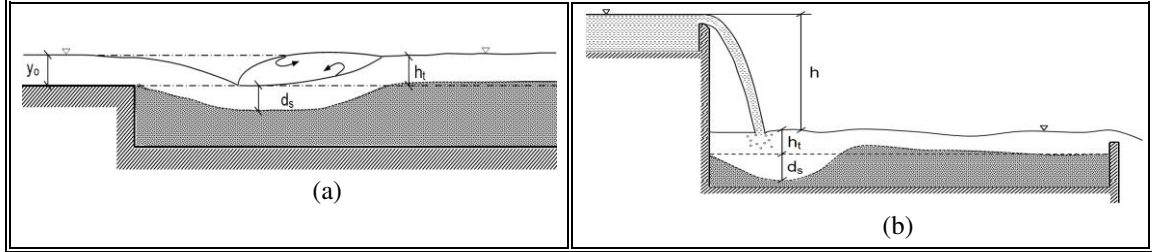
Serbest düşülerin mansabındaki oyulma derinliğinin hesaplanması için dane çapını da dikkate alarak geliştirilen Denklem (2.20), Veronese (1937) çalışmasında verilmiştir.

$$d_s = 3.68 \times \frac{h^{0.225}}{d_{50}^{0.42}} \times q^{0.54} - h_t \quad (2.20)$$

burada; d_{50} = taban malzemesinin %50'sini geçiren elek çapını, medyan dane çapını ifade etmektedir.

Veronese (1937)'de büzülmesiz dikdörtgen savaklar için iki ayrı deney düzeneğinde deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.18a,b). Elde edilen denklem boyutlu parametreler

içermektedir. Ayrıca, oyulma derinliğini en çok etkileyen parametrenin birim debi olduğu ileri sürülmüştür. Veronese (1937), 5 mm'den küçük boyutlu malzemeler için modeldeki oyulma derinliğinin malzeme boyutundan bağımsız olduğunu ifade etmiştir. Gerçekleştirilen deneylerle 0.055 ile 0.22 m arasında maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiştir.



Şekil 2.18. Literatürdeki çalışmaya ait deney düzeneği taslağı: a) Birinci deney düzeneği, b) İkinci deney düzeneği (Veronese, 1937)

Serbest düşen jetten kaynaklanan mansap taban oyulmasının, sadece jetin yataktaki malzemeyi taşıma gücü ile değil, aynı zamanda jetin dalma bölgesinde oluşan ikincil çevrinti akımlarının, oyulan malzemeyi oyulma çukuru dışına taşıma gücü ile de ilişkili olduğunu belirtmiştir (Hartung, 1959).

Novak (1961)'de enerji kırıcı düşü havuzlarının mansabındaki oyulma derinliği için Denklem (2.21) önerilmiştir.

$$d_s = k \times \left[6h^{0.25} \times q^{0.5} \times \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{1/3} \right] - h_t \quad (2.21)$$

burada; k = batıklık oranı ile ilgili bir değerdir. Sıçramanın batıklık değeri: 1 ise $k= 0.65$, sıçramanın batıklık değeri: 1.6 ise $k= 0.45$ alınması önerilmiştir.

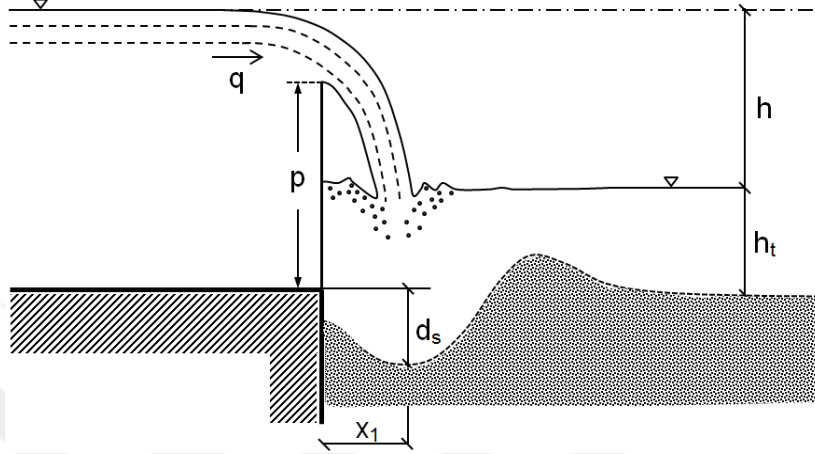
Kotoulas (1967)'de serbest düşülü jet oyulmaları büzülmesiz savaklar için incelenmiş ve maksimum oyulma derinliği için Denklem (2.22) sunulmuştur.

$$d_s = \frac{1.90}{g^{0.35}} \times \frac{h^{0.35} \times q^{0.70}}{d_{95}^{0.40}} - h_t \quad (2.22)$$

burada; d_{95} = taban malzemesinin %95'ini geçiren elek çapını ifade etmektedir. Ayrıca Kotoulas (1967)'de, oyulma derinliğinin maksimum olduğu nokta ile serbest düşülü su jeti çıkış noktası arasındaki uzaklık için ise Denklem (2.23) sunulmuştur. Şematik gösterimi Şekil 2.19'da verilmiştir.

$$x_1 = 3.90 \times \frac{h^{0.27} \times q^{0.54}}{g^{0.27} \times d_{95}^{0.08}} \quad (2.23)$$

burada; x_1 = maksimum oyulma derinliği ile serbest düşülü su jeti çıkış noktası arasındaki yatay mesafeyi, g = yerçekim ivmesini ifade etmektedir. Kotoulas (1967) deneysel çalışmasında geliştirilen denklemde, savak türünün etkisi dikkate alınmamış ve söz konusu denklem boyutsuz parametreler de içermemektedir.



Şekil 2.19. Serbest düşülü jet oyulması (Kotoulas, 1967)

Tschopp Bisacz (1972), oyulma derinliğinin tahimini için Denklem (2.24)'ü önermiştir.

$$d_s = 2.756q^{0.50} - 7.125d_{90} - h_t \quad (2.24)$$

Chian (1973), sıçratma eşikli dolusavakların mansabında oluşan oyulma derinliği için Denklem (2.25)'i geliştirmiştir.

$$d_s = 1.18H^{0.235} \times q^{0.51} - h_t \quad (2.25)$$

Çataklı (1973)'te ise mansap havuzundaki oyulma derinlikleri için Denklem (2.26) önerilmiştir. Bu çalışma Veronese (1937) tarafından yürütülen çalışmaya yakındır. Deneyler büzölmesiz savaklar için gerçekleştirilmiştir.

$$d_s = 1.62 \times \left[\frac{q^{0.6} \times (h + h_t)^{0.2}}{d_{90}^{0.1}} - h_t \right] \quad (2.26)$$

Mason ve Arumugam (1985) çalışmalarında sıçratma eşikli dolusavakların ve barajların mansabında oluşan oyulmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar boyut homojenliğini sağlamak için formüle yerçekimi ivmesini de dâhil etmişlerdir. Bu çalışmada türetilen Denklem (2.27)'de; K , α , β , γ , ϕ ve ψ sabitlerdir.

$$d_s = K \times \frac{q^\alpha \times h^\beta \times h_t^\gamma}{g^\phi \times d^\psi} \quad (2.27)$$

Mason (1989) çalışmasında, mansap havuzuna çarptıracağı su jetini tasarladığı özel bir deney düzeneği ile sağlamıştır. Farklı jet çarpma açıları oluşturarak, farklı debilerde ve farklı kuyruksuyu derinliklerinde bir dizi deneyler gerçekleştirmiştir. Yapay olarak su jeti ile birlikte mansap havuzu içerisine farklı debilerde hava verilmiştir. Bu çalışmada mansap havuzuna sokulan hava miktarının, oyulma derinliğine etkisi araştırılmıştır. Ervine (1980) tarafından sadece dikdörtgen jetler (rectangular jets) ve levha şekilli jetler (sheet jets) için verilen havalandırma oranı ($\beta=Q_{hava}/Q_{su}$) eşitliğini de dikkate almıştır. Burada Q_{hava} akım içerisine mansap havuzuna çarpan su jeti tarafından sokulan hava debisini, Q_{su} ise su jetinin debisini ifade etmektedir. Mason (1989) jetin şeklini, savak türünü de dikkate almamıştır. Su jetini yapay olarak oluşturmuştur. Ancak söz konusu çalışmada geliştirilen Denklem (2.28), boyutsuz parametreler içermemektedir.

$$d_s = 3.27 \times \frac{q^{0.60} \times h^{0.05} \times h_t^{0.15}}{g^{0.30} \times d^{0.10}} - h_t \quad (2.28)$$

Bormann ve Julien (1991), akarsularda eğim kontrolü amacıyla yapılan hidrolik yapıların mansabında oluşan oyulmayı hem teorik ve hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, laboratuvar dışında inşa edilen büyük boyutlara sahip bir açık kanalda ve büyük debilerde gerçekleştirilmiştir. (2.29) eşitliği geliştirilmiştir.

$$d_s = \left[\frac{0.611}{[\sin(0.436 + \Delta_u)]^{0.80}} q^{0.60} \frac{V_j}{g^{0.80} \times d_{90}^{0.40}} \right] - p \quad (2.29)$$

burada; V_j = jet çarpma hızını (m/s), p = kret yüksekliğini (m), Δ_u = oyulma çukurunun memba tarafındaki şev açısını (radyan) ifade etmektedir.

Serbest düşen su jetinin mansap taban oyulmasına etkisinin deneysel olarak araştırıldığı bir başka çalışmada ise deneyler 2 m uzunluğunda, 0.104 m genişliğinde ve 0.33 m yüksekliğindeki bir açık kanalda büzülmesiz savaklar için yürütülmüştür (Stein, 1993). Düşü yüksekliği $h=10$ ile 40 mm arasında, birim debi $q=0.00154$ ile $0.00493 \text{ m}^3/\text{s.m}$ arasında alınmıştır. Geliştirdikleri denklemlerin %20 oranında doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Hoffmans ve Pilarczyk (1995) hidrolik yapıların mansabındaki yerel oyulmayı inceledikleri çalışmalarında, hidrolik yapıların mansap tabanını oyulmaya karşı korumanın tasarımı kısaca anlatılmış ve oyulma sürecinin aşamaları ve mekanizması verilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada oyulma çukurunun memba eğimi (β) tartışılmış ve Denklem (2.30)'daki boyutsuz parametrelere bağlı olduğu ifade edilmiştir. Hidrolik yapıların mansap tabanının, hidrolik yapının güvenlik ve dayanıklılığını sağlamak için akım ve dalgalardan korunması gerektiği vurgulanmıştır. Oyulma çukurunun gelişimi, dört aşamaya ayrılmıştır. Bunlar; başlangıç aşaması, gelişme aşaması, stabilizasyon aşaması ve denge aşamasıdır. Başlangıç aşamasında oyulma çukurunun nerdeyse uniform olduğu ve erozyon kapasitesinin çok yüksek olduğu belirtilmiştir. Gelişme aşaması

boyunca oyulma derinliğinin arttığı, fakat oyulma çukurunun şeklinin çok değişmediği ifade edilmiştir. Stabilizasyon aşaması boyunca maksimum oyulma derinliğinin arttığı ve maksimum oyulma derinliği ve oyulma çukurunun memba eğimi için denge durumuna hemen hemen bu aşamada ulaşıldığı belirtilmiştir. Denge aşamasında ise oyulma çukurunun boyutlarında önemli bir değişme olmadığı ifade edilmiştir.

$$\cot\beta=f\left(\frac{d_{50}\times\sqrt{\Delta g\times d_{50}}}{v}, \Delta, \frac{d_{50}}{h_o}, \frac{U_o}{\sqrt{\Delta g\times d_{50}}}\right) \quad (2.30)$$

Hoffmans (1998) hem büzülmesiz savaktan düşen su jetlerinin ve hem de basınçlı yatay su jetlerinin mansabında oluşan denge oyulma problemini Newton'un II. yasasından yararlanarak farklı bir yaklaşım ile incelemiştir.

Wu (2000) RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) denklemlerini $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle birlikte kullanarak, açık kanallardaki akım ve sediment taşınımını üç boyutlu olarak modellemişlerdir ve test ettikleri tüm durumlar için deneysel ölçümlerle tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir.

Kitamura ve Wang (2001) gevşek taban malzemesi için bir enerji kırıcı havuzdaki oyulmayı modellemişlerdir.

Chen ve Hong (2001) serbest düşen jetin kontrol bentlerinin (check dam) mansabında oluşturduğu oyulmayı belirlemeye çalışmışlardır. Deney kanalı 11.50 m uzunluğunda, 0.30 m genişliğinde ve 0.40 m yüksekliğindedir. Düşü yükseklikleri 8.6 ile 16.7 cm arasında alınmıştır. Oldukça küçük düşü yüksekliği ve birim debi değerlerinde çalışılmıştır.

Yıldız (2001) "Barajların mansabındaki oyulmalar" başlıklı DSİ (Devlet Su İşleri) basımı olan kitabında, hidrolik yapıların mansabındaki oyulmalar ile ilgili birçok çalışmaya yer verilmiştir.

Robinson vd. (2002) serbest düşen bir jetin mansabına sıkıştırılmış kohezyonlu bir zemin yerleştirmişlerdir. 1.80 m genişliğinde bir açık kanal içerisine 1.20 m yüksekliğinde farklı uzunluklarda eşikler yerleştirmişlerdir. Bu eşik üzerinde 2.4 m tırmanma uzunluğundan ve 1.20 m kret uzunluğundan sonra 0.30 m düşü yüksekliği oluşturulup, mansap taban oyulmalarını deneysel olarak incelemiştir. 13 adet deney yapmışlardır. Kohezyonlu zeminin yoğunluğunun oyulma derinliğini değiştirdiğini ifade etmişlerdir.

Hanson vd. (2000), mansap kanalındaki kuyruksuyuna çarpan dairesel su jetlerinin oluşturduğu oyulma derinliğini incelemiştir.

Dey ve Westrich (2003) yatay batmış bir jetin mansabındaki kohezyonlu yatak geometrisinde oluşan oyulma problemini deneysel olarak incelemiştir. Farklı kapak açıklıkları, farklı jet hızları ve farklı apron uzunlukları ile yapılan deneyler Almanya'da 0.25 m genişliğinde, 0.60 m yüksekliğinde 8 m uzunluğunda bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Oyulma çukuru boyunca hız profilleri de belirlenmiştir. Maksimum hız ve taban kayma gerilmesi için denklemler sunulmuştur.

Lenzi vd. (2003) çalışmalarında Doğu İtalya Alplerinde altı adet akarsuda yetmiş üç adet kontrol bentleri (check dams) ve taban eşikleri (bed sills) mansabındaki oyulma çukurları arazide ölçülmüştür. Araştırmacılar, elde ettikleri veri ve gözlemlere dayanarak oyulma derinliğinin tespiti için denklemler sunmuşlardır.

Sarkar ve Dey (2004) su jetleri nedeni ile hidrolik yapılarda oluşan yerel oyulmalar hakkında, makalenin yazıldığı tarihe kadar yapılan çalışmaların toplandığı çok geniş kapsamlı bir çalışma yapmışlardır.

Dargahi (2004) Fluent yazılımıyla RANS denklemlerini $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle birlikte kullanarak bir nehirdeki sediment taşınımını 3B olarak başarılı bir şekilde modellemiştir. Araştırmacı genelde açık kanal modellerinde genellikle iyi sonuç verdiği için Akışkan Hacim Oranları (VOF) metodunu kullanmıştır.

D'Agostino ve Ferro (2004) eğim kontrolü için inşa edilen büzülmesiz savakların mansabında oluşan oyulma problemini “Noksan Öz Benzerlik Teorisi –*Incomplete Self-Similarity (ISS) Theory*” ile birçok araştırmacının (Veronese, 1937; Mossa, 1998; D'Agostino, 1994; Falciai ve Giacomini, 1978; Lenzi, 2000; Scimemi, 1939; Whittaker ve Schleiss, 1984) deney verilerini kullanarak oyulma derinliği için boyutsuz bir denklem sunmuşlardır.

Adduce ve Rocca (2006) bir boşaltım kanalının sonuna bir apron yerleştirerek, mansapta oluşan taban oyulmasını deneysel ve stabilite analizi ile incelemişlerdir. Yüzey dalga jetinin stabilite analizi uyarlanmış De Saint-Venant denklemleri ile yapılmıştır.

Ghodsian vd. (2006) büzülmesiz bir savaktan serbest düşen jetin mansabındaki yerel oyulmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Olaya etki eden parametrelere boyut analizi uygulayarak Denklem 2.31, 2.32 ve 2.33'ü geliştirmişlerdir.

$$d_s = f(R, h_t, d_{50}, \rho_{su}, \rho_s, g, V, h) \quad (2.31)$$

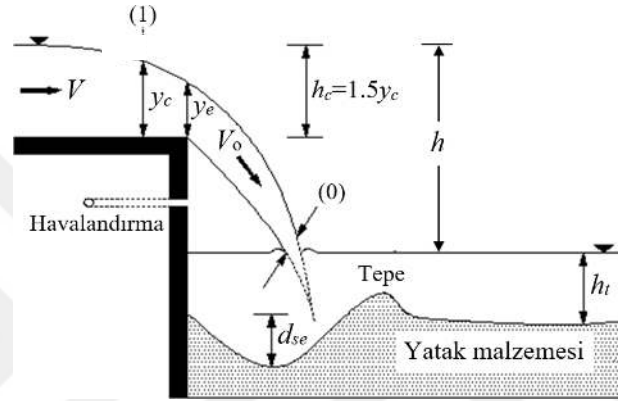
$$\frac{d_s}{R} = f\left(\frac{h}{R}, \frac{h_t}{R}, \frac{d_{50}}{R}, \frac{\rho_s - \rho_{su}}{\rho_{su}}, \frac{V}{\sqrt{g \times R}}\right) \quad (2.32)$$

$$\frac{d_s}{h_t} = f\left(\frac{h_t}{h}, \frac{V}{\sqrt{g \times d_{50} \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_{su}} - 1\right)}} \times \frac{R}{h}\right) \quad (2.33)$$

burada; R =hidrolik yarıçapı (m) ifade etmektedir.

Dey ve Raikar (2007) yüksek düşülerin mansabındaki oyulmayı büzülmesiz savak kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir (Şekil 2.20). Deneyler 0.30 m genişliğinde ve 0.70 m derinliğinde bir açık kanal içerisinde yürütülmüştür. Taban malzemesi olarak üniform kum ve çakıl

kullanılmıştır. Düşü yüksekliği/Kritik derinlik değeri (h/y_c) 1'den büyük olan durum, yüksek düşü olarak isimlendirilmiştir (Little ve Murphey, 1982). Çalışma, yüksek düşüler için gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları deneylerde düşme yüksekliğini (h) 7 ve 10 cm olarak sabit almışlardır. H derinliğini de 50 cm olarak almışlardır. Bu derinliği değiştirmemişlerdir. Kuyruksuyu derinliğini ilk deneylerde 15 cm olarak sabit almışlardır. İkinci grup deneylerde 8 ile 22 cm arasında değiştirmişlerdir. Dokuz adet medyan dane çapı ($d_{50}=0.26$ mm, $d_{50}=0.49$ mm, $d_{50}=0.81$ mm, $d_{50}=1.86$ mm, $d_{50}=2.54$ mm, $d_{50}=3.00$ mm, $d_{50}=4.10$ mm, $d_{50}=5.53$ mm ve $d_{50}=7.15$ mm) için deneyler yapmışlardır. Sediment havuzu 1.10 m uzunluğunda ve 0.30 m genişliğindedir.



Şekil 2.20. Serbest düşen jetin mansabındaki oyulmanın şematik gösterimi (Dey ve Raikar, 2007)

Söz konusu çalışmada boyutsuz düşü yüksekliği (h/y_c) 4.3'ten 29.8'e kadar değiştirilmiştir. Bu durumda İki farklı deney dizisi kullanılmıştır. Birinci grup deneyler sabit kuyruksuyu derinliği ve değişen jet kalınlığı dikkate alınarak yapılmıştır. İkinci grup deneylerde ise değişen kuyruksuyu derinliği ve sabit jet kalınlığı altında üniform taban malzemesi ile deneyler yapılmıştır. Düşük ve yüksek kuyruksuyu derinliği için farklı zamanlarda oyulma derinliğinin gelişimi incelenmiştir. Maksimum oyulma derinliğine 9 saat sonunda ulaşıldığını ifade etmişlerdir. Denge oyulma durumunu tespit etmek için deney süresini 12 saate kadar uzatmışlardır. 9 saat ve 12 saat sonundaki oyulma derinliklerinin değişmediğini gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, denge oyulma derinliğine etki eden parametreleri Denklem (2.34)'te vermişlerdir (Dey ve Raikar 2007).

$$d_s = f_1(U_o, y_o, h_t, \rho, \rho_s, g, v, d_{50}) \quad (2.34)$$

Uygulanan boyut analizi neticesinde, Denklem (2.35) elde edilmiştir.

$$\frac{d_{se}}{y_o} = f_2\left(F_o, \frac{d_{50}}{y_o}, \frac{h_t}{y_o}\right) \quad (2.35)$$

burada; d_{se} =denge oyulma derinliğin (m) ifade etmektedir. Densimetrik Froude sayısı (F_o), Denklem (2.36) ile verilmektedir.

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{\left(g \times d_{50} \times \frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)}} \quad (2.36)$$

Dey ve Raikar (2007) densimetrik Froude sayısının artması ile denge oyulma derinliğinin arttığını dane boyutunun ve kuyruksuyu derinliğinin artması ile de denge oyulma derinliğinin azaldığını belirlemişlerdir. Deneylerin küçük düşü yükseklikleri ve küçük birim debi değeri için yapıldığı görülmektedir.

Lui ve Garcia (2008) serbest bir yazılımla iki denklemlili $k-\epsilon$ türbülans modeli ve serbest yüzeyli akım modeli olarak VOF metodunu kullanarak yersel sediment oyulmalarını 3B olarak modellemiş ve akım ve oyulma sonuçları deneylerden elde edilenlere benzer elde etmişlerdir.

Zeng vd. (2005) eğrisel bir açık kanaldaki akım ve sediment taşınımını üç boyutlu olarak modellemek için RANS denklemlerini $k-\omega$ türbülans modeliyle birlikte kullanmışlar ve deneylerle iyi bir uyum elde etmişlerdir.

Güven ve Günel (2008a) eğim kontrolü için inşa edilen hidrolik yapıların mansabında meydana gelen yerel oyulmayı Genetik Programlama (GP) yaklaşımı ile incelemişlerdir. GP formülasyonu ile elde edilen sonuçların deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Güven ve Günel (2008b) aynı problemi yapay sinir ağları kullanarak incelemişlerdir.

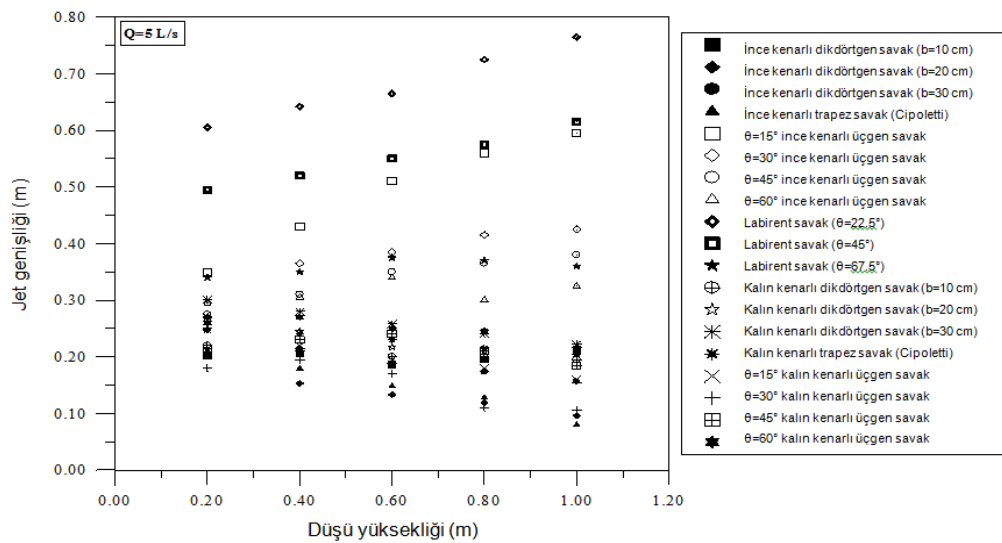
Oliveto ve Comuniello (2009) deneylerini 1 m genişliğinde ve 20 m uzunluğunda düz dikdörtgen bir kanal içerisinde yapmışlardır. Kanal girişinden 6 m ileride ogee kretli bir dolusavak yerleştirilmiştir. Deneylerde taban morfolojisinin zamansal ve mekânsal gelişimi incelenmiştir. Denge durumu ile oyulma çukurunun tanımlanmasına ortalama olarak yaklaşık üç günde ulaşılmıştır. Dört çeşit üniform taban malzemesi kullanılmıştır. Densimetrik Froude sayısı dikkate alınmıştır. Bu çalışmada eşik yüksekliği (s), $s=0$ ve $s=0.092$ m için çalışma sürdürülmüş ve eşik yapısının yerel oyulma üzerine etkisi araştırılmıştır. Oyulma derinliği ve oyulma derinliğinin maksimum olduğu noktanın memba ucuna olan mesafesi için doğrusal olmayan boyutsuz denklemler verilmiştir.

Jahromi ve Nasserian (2010) dikdörtgen, üçgen ve dairesel şekilli basınçlı su jetlerinin mansabında oluşan taban oyulmasını incelemişlerdir. Üç farklı düşü yüksekliği ve üç farklı kuyruksuyu derinliği dikkate alınmıştır. $d_{50}=1.27$ mm'dir. Dairesel su jetinde 1.02 L/s, kare su jetinde 1.27 L/s ve dikdörtgen su jetinde 1.77 L/s'lik debilerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü gibi debi değeri oldukça küçüktür ve sistem basınçlıdır. Çok küçük debi değeri çalışılmıştır.

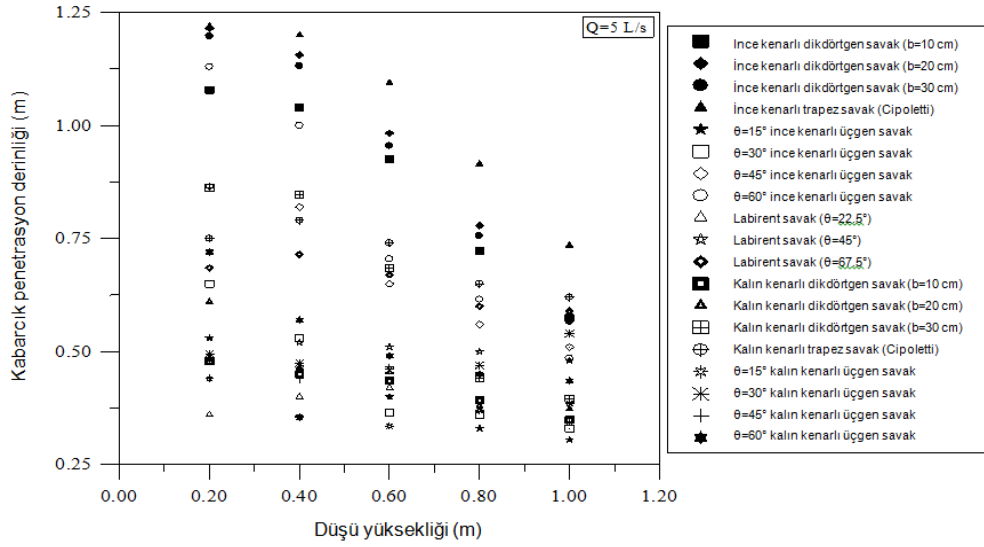
Emiroğlu (2010) değişik savak türlerinin karakteristik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında özellikle, jet genişliği, penetrasyon derinliği, jet yörüngesi ve kabarcık bölgesi uzunluğu ile ilgili her bir savak türü için ayrı ayrı denklemler sunmuştur. Dikdörtgen ve Cipoletti savakların penetrasyon derinliklerinin, labirent savakların penetrasyon derinliklerinden oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca serbest düşen jetlerin mansap havuzundaki suya çarpma genişliklerinin savak türlerine göre çok değişkenlik gösterdiğini ifade etmiştir. Özellikle küçük açılı üçgen savaklar ile labirent savaklardan düşen su jetlerinin mansap havuzuna çarpma genişliklerinin oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. Jetin genişlemesi ile penetrasyon derinliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Böylece, savak türünün, düşü yüksekliğinin, birim debinin, mansap havuzu su derinliğinin, jet genişliğinin, penetrasyon derinliği üzerinde önemli etkisi olduğu vurgulanmıştır (Şekil 2.21, 2.22 ve 2.23).

Dehghani (2010) uluslararası bir sempozyumda sundukları çalışmalarını 3.70 m uzunluğunda, 0.12 m genişliğinde, 0.17 m yüksekliğindeki oldukça küçük boyutlara sahip bir açık kanalda yürütmüşlerdir. 0.53 L/s gibi oldukça küçük debilerde ve 3 ile 4 cm kret yüksekliklerinde deneyler yapmışlardır. Çalıştıkları nap yükleri Novak ve Cabelka (1981) tarafından verilen 3 cm'lik minimum nap yükünün çok altında olmuştur. Deney düzeneği Veronese (1937) tarafından çalışılan deney düzeneğinin küçük bir modeli şeklindedir.

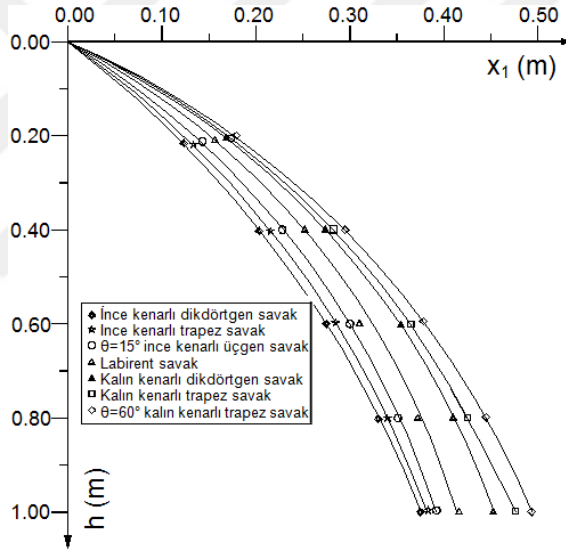
Vuik (2010) hidrolik yapılar üzerinde sediment taşınımı üzerinde farklı yazılım ve sayısal modellerin performansını incelemiş ve CFX ve Fluent gibi yazılımların ayrık faz modelleri (*Discrete Phase Model, DPM*) sayesinde süspansiyon halindeki sediment hareketini modellemede başarılı olurken, taban malzemesi hareketi (ve dolayısıyla oyulma) gibi problemlerde yetersiz kaldığını belirtmiştir.



Şekil 2.21. Jet genişliğinin düşü yüksekliği ile değişimi (Emiroglu, 2010)



Şekil 2.22. Kabarcık penetrasyon derinliğinin düşü yüksekliği ile değişimi (Emiroglu, 2010)



Şekil 2.23. Jet yörüngesinin düşü yüksekliği ile değişimi (Emiroglu, 2010)

Scurlock (2012) akarsulara eğim kontrolü, balık yaşamını koruma, nehir rehabilitasyonu ve kıyı koruma amaçlarıyla yerleştirilen alfabe olarak isimlendirilen A, U, W savakların mansabında oluşan taban oyulmasının deneysel olarak araştırıldığı kapsamlı bir çalışmadır. Bu savaklar çoğunlukla kaya malzemeden inşa edilmektedir. Deneyler büyük bir açık kanal deney setinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar oyulma derinliğinin hesaplanabilmesi için denklemler sunmuşlardır.

Kim (2012) çalışmalarında geniş ve belirli bir kısmına kadar kum dolu bir açık kanal içerisine V şekilli bir savak yerleştirilmiştir. Kanalin memba ve mansabında oluşan oyulma deneysel olarak incelenmiştir.

Ghodsian vd. (2012a) serbest düşen jetin oluşturduğu yerel oyulmayı, üniform olmayan taban malzemesi için deneysel olarak incelemişlerdir. Büzülmesiz ve eşiksiz savaklar için deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, Denklem (14)'teki boyutsuz parametrelere göre incelenmiştir. Üç adet debi, $Q=4.36, 7.40$ ve 10.11 L/s, dikkate alınmıştır. Kuyruksuyu derinliği 30 cm olarak sabit alınmıştır. Memba kanalı genişliği 18 cm, mansap sediment kanalı 1.5 m genişliğinde, 1.5 m yüksekliğinde ve 2.5 m uzunluğunda alınmıştır. Araştırmacılar olaya etkili parametreleri Denklem (2.37) ile belirlemişlerdir.

$$d_s = f(U_o, R, d_{50}, \sigma_g, \rho_s, \rho_{su}, g, h_t, b, B, h) \quad (2.37)$$

burada; taban malzemesinin geometrik standart sapması $\sigma_g=(d_{84}/d_{16})^{0.5}$, jetin genişliği b , jetin hidrolik yarıçapı R , mansap kanalının genişliği B 'yi ifade etmektedir. Boyut analizi uygulanarak Denklem (2.38) elde edilmiştir.

$$\frac{d_s}{h_t} = f \left(\sigma_g, \frac{h_t}{h}, F_o = \frac{U_o}{\sqrt{\left(g \times d_{50} \times \frac{\rho_{su}}{\rho_s} - 1 \right)}}, \frac{h}{R}, \frac{d_{50}}{h}, \frac{B}{b} \right) \quad (2.38)$$

Taban malzemesinin geometrik standart sapma değerinin artması ile oyulma çukuru parametrelerinin azaldığını belirlemişlerdir (Ghodsian vd., 2012a). Ervine (1998) ve Emiroğlu (2010) savakların karakteristik özelliklerini verirken, mansap havuzuna çarpan jet şeklinin üçgen ve labirent savaklarda hilal şeklinde, dikdörtgen savaklarda ise dar bir elips şeklinde olduğunu ve her savak türünde farklı jet şekillerinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Ghodsian vd. (2012a) tarafından verilen formülde oyulma derinliğinin belirlenebilmesi için jetin hidrolik yarıçapının (R) bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle, verilen formülün uygulamada çok kullanışlı olmayacağı düşünülmektedir. Kuyruksuyu derinliğinin oyulma geometrisi üzerinde oldukça önemli etkisi olmasına karşın, kuyruksuyu derinliği sabit alınmış; hem maksimum oyulma derinliği ve hem de düşme yüksekliği, kuyruksuyu derinliği ile boyutsuzlaştırılmıştır. Mansap kanalının genişliği çalışmada 1.50 m olarak sabit alınmış ve etkili parametreler arasında dikkate alınmıştır. Deneylerde üç adet densimetrik Froude sayısı için deneyler yapılmıştır. Bir başka değişle, çalışılan debi sayısı da sınırlı tutulmuş, üç adet debi için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Ghodsian vd. (2012b) çalışmalarında serbest düşü olarak dökülen nap sediment ile beslenmiştir. Bu özelliği ile diğer çalışmalardan farklıdır. Büzülmesiz savaklar ile ilgili bu çalışmada 80 adet deney yapılmıştır. Oyulma çukuru karakteristiklerinin; densimetrik Froude sayısına (F_o), kuyruksuyu derinliğinin düşme yüksekliğine oranına (h_t/h), jetin hidrolik yarıçapının

düşme yüksekliğine oranına (R/h), sediment sayısına $\left(q_s/\sqrt{g \times h_t^3}\right)$ ve boyutsuz zaman parametresine $(g \times t^2/h_t)$ bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Köken (2014) ve Göğüş ve Köken (2011) nehirlerde köprü yan ayakları sebebiyle oluşan daralmanın oluşturduğu oyulmaların simülasyonunda, çoğunlukla kullanılan RANS modellerinin yerine, döngüsel akımların modellenmesi için büyük döngü benzetimi (*Large Eddy Simulation LES*) ve ayrışan döngü benzetimi (*Detached Eddy Simulation, DES*) modellerin daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Epely-Chauvin (2014) Flow-3D yazılımını kullanarak bir yatak malzemesi üzerindeki türbülanslı su jetinin oluşturduğu oyulmaları 3B olarak çalışmışlar ve sonuçlarını deneysel bazı çalışmalarla doğrulamışlardır. Sediment davranışını hesaplamak için bu araştırmacılar Navier-Stokes Denklemlerini k-ε türbülans modeliyle birlikte kullanmışlardır.

Pagliara vd. (2014) doğrusal nehirlerdeki kaya malzemeden inşa edilen W savakların mansabında oluşan taban oyulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu kasamda ilgili savaklar 0.80 m genişliğinde, 20 m uzunluğunda ve 0.75 m yüksekliğindeki bir açık kanala yerleştirilmiştir. Debi değerleri, 5 ile 50 L/s arasında alınmıştır. Düşü yüksekliği, 2 mm ile 7 cm arasında alındığından dolayı, oldukça küçük değerler alındığı dikkat çekmektedir. Oyulma derinliğinin özellikle densimetrik Froude sayısına bağlı olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, kret uzunluğu, kanal genişliği ve düşü yüksekliğinin de oyulma derinliğini etkileyen parametreler arasında olduğu belirlenmiştir.

Kokpinar ve Kucukali (2016) sıçratma uçlu dolusavaklarda mansapta oluşan oyulma üzerine sediment boyutunun etkisini araştırmışlardır. Boyutsuz maksimum oyulma derinliği (d_s/d_{50}); densimetrik Froude sayısının karesi, jet Reynolds sayısı, sıçratma ucu dudak açısı ve sediment geometrik standart sapmasının bir fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Oyulma derinliğinin hesaplanması için iki adet formül önermişlerdir (Denklem 2.39 ve 2.40). İlk formülde bütün parametreler dikkate alınmıştır. İkinci formül mühendislerin kullanması için daha sadedir. Bu çalışmada Kığı Barajı DSI TAKK Hidrolik laboratuvarında yapılan model çalışma sonuçları kullanılmıştır. Verilen denklemler $F_0=2.9-29.69$, $Re=8.9 \times 10^3-4.2 \times 10^5$ ve $We>32$ için geçerlidir. Bu çalışma farklı sediment boyutları ($d_{50}=3-17$ mm) için yürütülmüştür. Önerilen formüllerdeki d_s içerisinde kuyruksuyu derinliği de vardır. Yazarlar σ_g 'nin artması ile oyulma derinliğinin azaldığını tespit etmişlerdir.

$$\frac{d_s}{d_{50}} = \frac{0.08 \times Re^{0.235} \times F_0^2 \times \sin(\alpha)}{\sigma_g} \quad (2.39)$$

$$\frac{d_s}{d_{50}} = 0.2 \times Re^{0.05} \times F_0^2 \quad (2.40)$$

burada; Re =jet Reynolds sayısını, F_o =densimetrik Froude sayısını, α =sıçratma ucu dudak açısını, σ_g =sedimentin geometrik standart sapmasını ifade etmektedir. Yukarıdaki denklemler $We>32$ için geçerlidir. Densimetrik Froude sayısı, Reynolds sayısı ve We sayısı formülleri sırasıyla Denklem (2.41, 2.42 ve 2.43)'te sunulmaktadır.

$$F_o^2 = \frac{\rho \times V_j^2}{(\rho_s - \rho) \times g \times d_{50}} \quad (2.41)$$

$$Re = (\rho \times V_j \times d_{50}) / \mu \quad (2.42)$$

$$We = (V_j / \sqrt{\sigma / \rho \times d_{50}}) \quad (2.43)$$

burada; V_j =sıçratma ucundaki jetin akım hızı, ρ =suyun özgül kütlesini, ρ_s =sedimentin özgül kütlesini, d_{50} =medyan dane çapını ifade etmektedir.

Chen (2016)'da serbest düşü yapılarında oyulma derinliğine kanal memba eğiminin etkisi araştırılmıştır. Deneyler 30 cm genişliğinde 11 m uzunluğunda eğimli bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Dört farklı kanal taban eğiminde ($J=0, 0.02, 0.04, 0.06$), üç farklı düşü yüksekliğinde ($h=24, 20.4$ ve 15.7 cm), bir adet medyan dane çapı ($d_{50}=0.5$ mm) ve düşü sayısı ($N_d=q^2/gh^3$, burada; N_d =düşü sayısı, q =birim debi, g =yerçekim ivmesi, h düşü yüksekliğini gösterir) 0.86×10^{-4} - 24.85×10^{-4} için deneyler yürütülmüştür. Toplamda 48 adet deney dizisi yapılmıştır. Farklı kanal eğimine sahip durumlar için mansap havuzunda oluşacak oyulma derinliği için Denklem (2.44, 2.45, 2.46 ve 2.47) önerilmiştir.

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1505} \quad J=0 \quad (2.44)$$

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1444} \quad J=0.02 \quad (2.45)$$

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1386} \quad J=0.04 \quad (2.46)$$

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1330} \quad J=0.06 \quad (2.47)$$

burada; d_s =verilen t zamanındaki maksimum oyulma derinliğini, d_{se} =denge durumunda maksimum oyulma derinliğini, t =verilen zamanı, t_e =denge oyulması durumundaki zamanı ifade etmektedir.

Mevcut çalışmada konu hakkında gerçekleştirilen detaylı literatür araştırmasından sonra Froude sayısı, düşü yüksekliği, kuyruksuyu derinliği, medyan dane çapı, birim debi gibi

parametrelerin oyulma derinliğine etkisi üzerine sınırlı sayıda çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Ancak savak tipinin etkisi dikkate alınmamış olup, geliştirilen birçok eşitliğin boyutsuz parametreler içermediği belirlenmiştir. Konu hakkında geliştirilen denklemler tablo halinde Tablo 2.7’de sunulmaktadır. Görüldüğü gibi literatürde; farklı savak türlerinin mansabındaki yerel oyulmaları konu alan, farklı savak türlerinin jet genişliklerini ve jetin şekli açısından problemin incelenmesi ve bunlarla ilgili kullanışlı denklemler sunulması açısından eksiklik söz konusudur. Oyulma problemleri ile ilgili mevcut çalışmalar çoğunlukla büzülmesiz ve eşiksiz savakların mansap kanalında oluşturdıkları oyulmalar etrafında yoğunlaşmıştır. Özellikle karşıdan alışı labirent savakların mansabında oluşan oyulmalar ile ilgili herhangi bir deneysel çalışmaya rastlanmamıştır. Her bir savak çeşidinin farklı akım ve fiziki koşulları için mansap havuzunda oluşturacağı denge oyulma derinliğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Dikdörtgen, üçgen ve trapez büzülmeli savakların mansap kanalındaki oyulma ile ilgili bilgi eksikliğinin olduğu düşünülmektedir. Jet genişliklerinin, şeklinin, yörüngesinin oyulma derinliği üzerine fiziksel etkisinin incelenmesi, literatüre ve uygulamadaki mühendislere katkı sağlayacaktır. Bu çalışma ile literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesi amaçlanmaktadır. Tablo 2.7’de Denklem (2.27) için dikkate alınmayan parametrelerin üsleri sıfır alınarak geliştirilmiş birçok denklem olduğu görülmektedir.

Tablo 2.7. Serbest düşülü savakların mansabında oluşan yerel oyulma derinlikleri ile ilgili literatürde geliştirilen denklemler

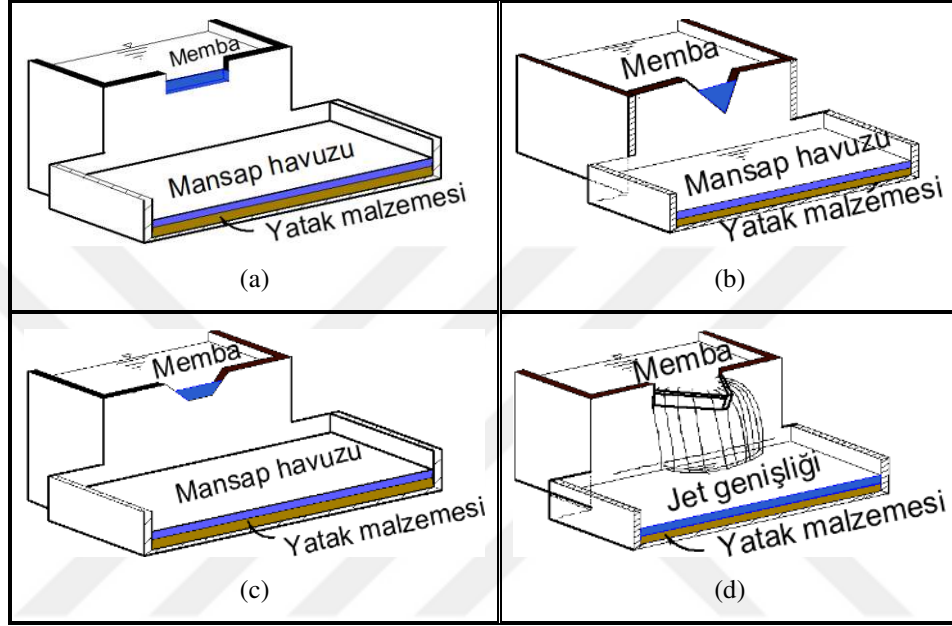
İlgili kaynak	Denklem	Kapsamı	Denkle m nu.
Schoklitsch (1932)	$d_s + h_t = 0.521 \times \frac{h^{0.20} \times q^{0.57}}{d_{90}^{0.32}}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız.	(2.48)
Veronese (1937)	$d_s + h_t = 1.9 \times h^{0.225} \times q^{0.54}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız.	(2.49)
Jeager (1939)	$d_s + h_t = 0.614 \times q^{0.5} \times \frac{h^{0.25}}{(h/d_{90})^{0.33}}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.50)
Eggenberger (1944)	$d_s + h_t = 1.444 \times \frac{h^{0.5}}{d_{90}^{0.4}} \times q^{0.6}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.51)
Müller (1944)	$d_s + h_t = 0.972 \times \frac{h^{0.5}}{d_{50}^{0.4}} \times q^{0.6}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.52)
Hartung (1957)	$d_s + h_t = 1.36 \times \frac{h^{0.36}}{d_{85}^{0.32}} \times q^{0.64}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.53)
Novak (1961)	$d_s + h_t = k \times \left[6h^{0.25} \times q^{0.5} \times \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{1/3} \right]$	Enerji kırıcı düşü havuzlarının mansabındaki oyulma, savaksız.	(2.54)
Damle (1966)	$d_s + h_t = 0.652 \times h^{0.5} \times q^{0.5}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.55)
Kotoulas (1967)	$d_s + h_t = 0.78 \times \frac{h^{0.35} \times q^{0.70}}{d_{90}^{0.40}}$	Serbest düşülü jet oyulmaları, büzülmesiz savaklar.	(2.56)
Chee and Padiyar (1969)	$d_s + h_t = 2.126 \times \frac{h^{0.18}}{d_n^{0.63}} \times q^{0.67}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.57)
Tschopp Bisacz (1972)	$d_s + h_t = 2.756q^{0.50} - 7.125d_{90} - h_t$	Serbest düşülü jet oyulmaları, büzülmesiz savaklar.	(2.58)

Tablo 2.7. Serbest düşülü savakların mansabında oluşan yerel oyulma derinlikleri ile ilgili literatürde geliştirilen denklemler (devam)

Wu (1973)	$d_s + h_t = 1.18 \times h^{0.235} \times q^{0.51}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.59)
Chian (1973)	$d_s + h_t = 1.18 H^{0.235} \times q^{0.51}$	Sıçratma eşikli dolusavakların mansabında oluşan oyulma.	(2.60)
Çataklı (1973)	$d_s = 1.62 \times \left[\frac{q^{0.6} \times (h + h_t)^{0.2}}{d_{90}^{0.1}} - h_t \right]$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, büzülmesiz savak.	(2.61)
Martins (1975)	$d_s + h_t = 1.5 \times h^{0.1} \times q^{0.6}$	Sıçratma eşikli dolusavakların mansabında oluşan oyulma.	(2.62)
USBR (1977)	$d_s + h_t = 1.9 \times h^{0.225} \times q^{0.54}$	Serbest düşülerin mansabındaki oyulma, savaksız	(2.63)
Mason ve Arumugam (1985)	$d_s = K \times \frac{q^\alpha \times h^\beta \times h_t^\psi}{g^\phi \times d^\gamma}$	Sıçratma eşikli dolusavakların ve barajların mansabında oluşan oyulma, $K, \alpha, \beta, \gamma, \phi$ ve ψ sabitlerdir.	(2.64)
Mason (1989)	$d_s + h_t = 3.27 \times \frac{q^{0.60} \times h^{0.05} \times h_t^{0.15}}{g^{0.30} \times d^{0.10}}$	Havalandırılmış su jeti oyulması	(2.65)
Bormann ve Julien (1991)	$d_s = \left[\frac{0.611}{[\sin(0.436 + \Delta_u)]^{0.8}} q^{0.6} \frac{V_j}{g^{0.8} \times d_{90}^{0.4}} \right] - p$	Akarsularda eğim kontrolü amacıyla yapılan hidrolik yapıların mansabında oyulma.	(2.66)
Kokpınar ve Kucukali (2016)	$\frac{d_s}{d_{50}} = \frac{0.08 \times \text{Re}^{0.235} \times F_o^2 \times \sin(\alpha)}{\sigma_g}$	Sıçratma uçlu dolusavaklarda mansapta oluşan oyulma.	(2.67)
	$\frac{d_s}{d_{50}} = 0.2 \times \text{Re}^{0.05} \times F_o^2$		(2.68)
Chen (2016)	$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1505}$	Serbest düşü yapıların mansabındaki oyulma derinliğine kanal memba eğiminin etkisi.	$J=0.00$
	$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1444}$		$J=0.02$
	$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1386}$		$J=0.04$
	$\frac{d_s}{d_{se}} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0.1330}$		$J=0.06$

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında; dikdörtgen, üçgen, trapez şekilli büzülmeli klasik savakların ve trapez şekilli labirent savakların mansabında oluşan yerel oyulmalar deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmayı yürütmek için (Şekil 3.1)'de verilen savaklar imal edilmiştir.

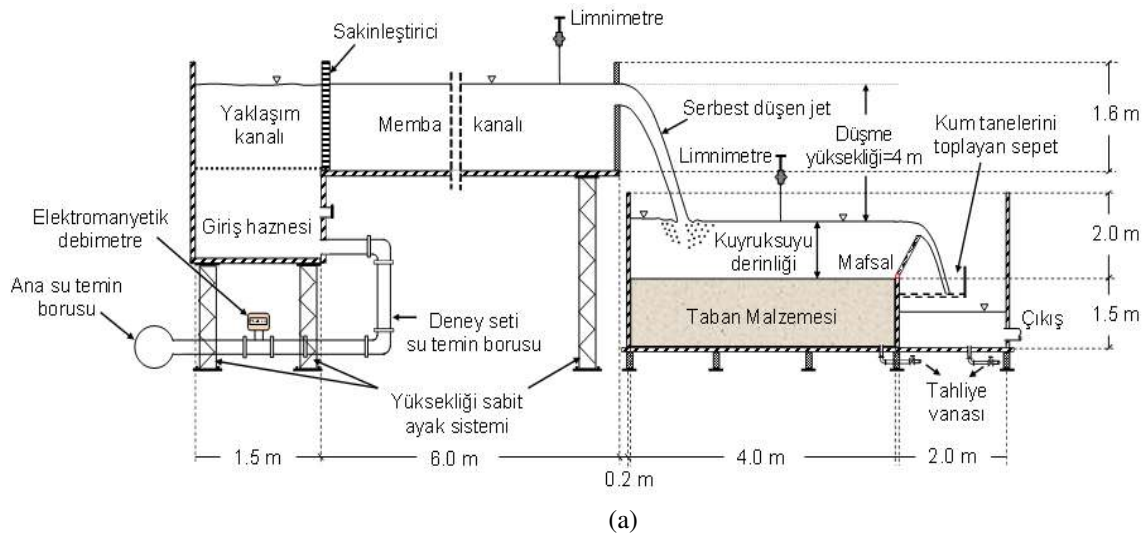


Şekil 3.1. Bu çalışma kapsamında test edilen savak türlerinin şematik gösterimi: a) dikdörtgen savak, b) üçgen savak, c) trapez savak, d) labirent savak

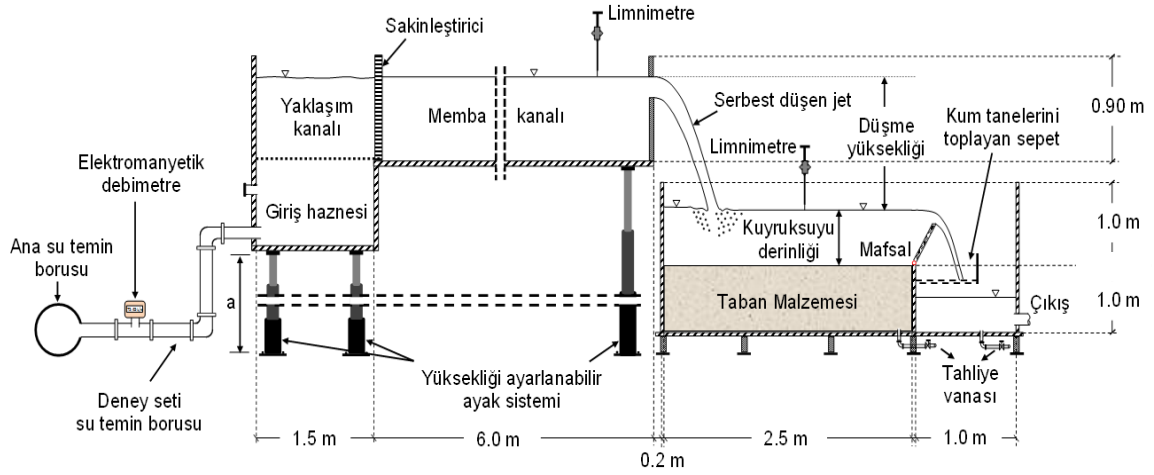
Bu çalışma kapsamında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik laboratuvarında iki adet deney düzeneği imal edilmiştir (Şekil 3.2). Deney setlerine ait plan, kesit ve görünüşler Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu deney setlerinden biri 1/2.4 ölçekli model, diğeri bunun prototipi olarak tasarlanmıştır. Aynı savaklar için her iki deney setinde de deneyler yürütülmüştür. Böylece ölçek etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. İkinci deney düzeneğinin boyutları da literatüre göre uygun ölçekte seçilmeye çalışılmıştır. Hem I. ve hem de II. deney düzeneği için memba kanalı uzunluğu gelişmiş akım koşulunu sağlamak için 6 m olarak yeterli uzunlukta alınmıştır. Diğer uzunluklar, $L_r=1/2.4$ ölçeğine uygun olarak tasarlanmıştır. I. deney düzeneğinin memba kanalı genişliği 1.20 m, II. deney düzeneğinin memba kanalı genişliği 0.50 m'dir. I. deney düzeneğinde mansap havuzu uzunluğu 4.0 m, genişliği 3.0 m'dir. II. deney düzeneğinde mansap havuzu uzunluğu 1.67 m, genişliği 1.25 m'dir. I. deney düzeneğinde 4.0 m sabit düşü yükseklikleri ile deneyler yürütülürken, II. deney düzeneğinde 0.25, 0.50, 1.00 ve 1.67 m olmak üzere dört adet düşü yükseklikleri için deneyler yürütülmüştür. Farklı düşü yükseklikleri deney setini düşey yönde hareket ettiren hidrolik sistem ile sağlanmıştır. I. deney düzeneğinde

mansap havuzu 1.5 m yüksekliğinde yatak malzemesi ile doldurulmuştur. II. deney düzeneğinde mansap havuzu 0.625 m yüksekliğinde yatak malzemesi ile doldurulmuştur. II. Deney düzeneğindeki yatak malzemelerinin medyan dane çaplarına da L_r ölçeğine göre belirlenmiştir. Froude kanununa göre modellenmiştir.

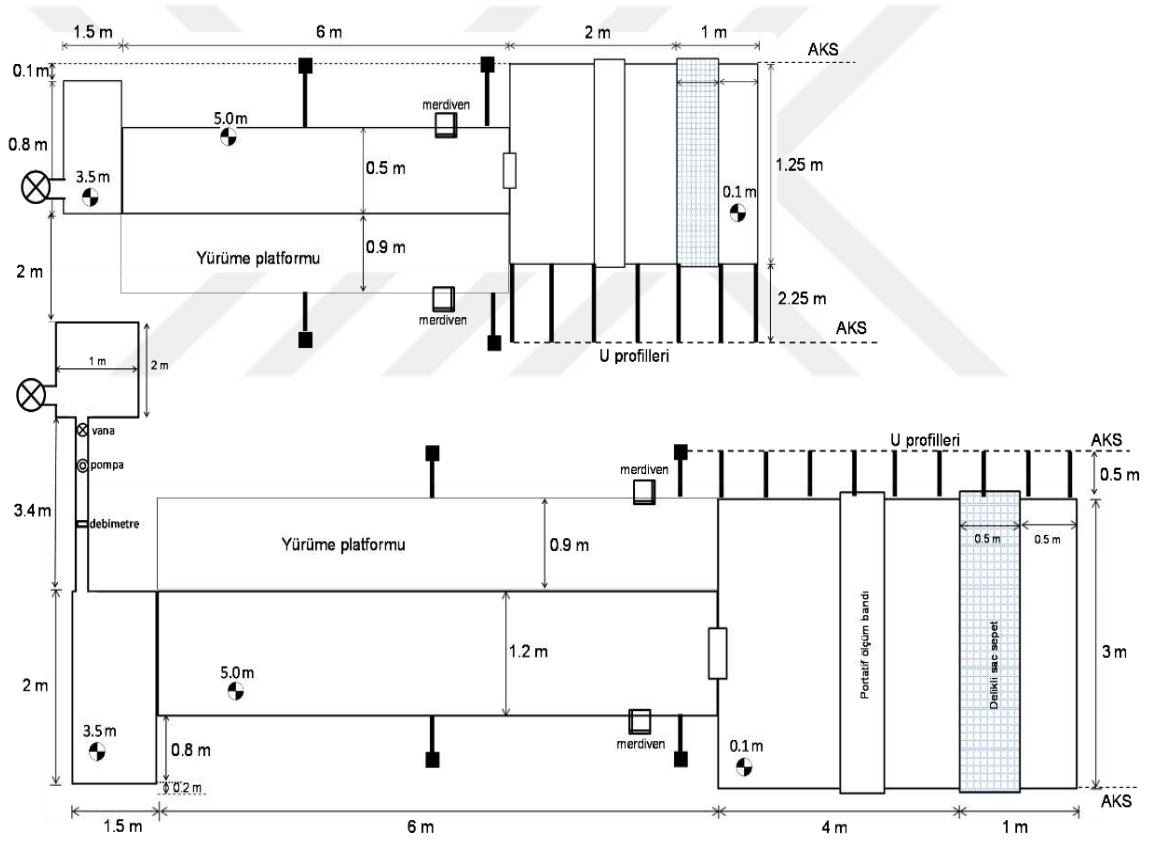
Deney düzeneklerinin inşaatı yaklaşık bir yıl sürmüştür. Sac malzemeden inşa edilen deney düzeneklerinin, gerek memba kısmı gerekse mansap kısmı hesaplanan sediment yükünü ve su yükünü güvenle taşıyabilmesi için öncelikle SAP2000’de gerekli analizler yapılmıştır. Sac malzeme kalınlıkları ve profiller bu analizlere göre belirlenmiştir. Deney setlerine su, hidrolik laboratuvarındaki mevcut tank sisteminden alınmıştır. Hidrolik laboratuvarında iki adet tank mevcuttur. Laboratuvarın bodrum kısmında bulunan tank 100 m³’tür. Bu tanktan yaklaşık 11 m yukarıdaki tank ise 50 m³’tür. Üst kattaki tank üzerinde su seviyesini statik tutup, hazne koşulunu sağlamak için bir taşma savağı yerleştirilmiştir. Aşağıdaki tanktan yukarıdaki tanka suyu basmak için üç adet 22 kW’lık pompalar kullanılmıştır. Çalışma öncesinde pompa-boru-hazne sisteminin bakım ve onarımları yapılmıştır. Pompaların her biri üst tanka 77 L/s’lik debi basabilmektedir. Böylece deney düzeneklerine istenilen debiler ana boru hattı üzerindeki vanalar yardımıyla güvenle alınabilmektedir. Prototip boyuttaki II. Deney düzeneğine suyu basmak için ayrıca 45 kW’lık bir pompa yerleştirilmiş ve bu sayede istenilen debiler rahatlıkla alınabilmektedir. İki deney düzeneği de sac levha, cam, pleksiglas, profil, krom-nikel, manşon, nipel, vanalar ve diğer bağlantı elemanları kullanılarak, itina ile inşa edilmiştir. Sonra özel metal boyası ile boyanmıştır. İskele merdivenler inşa edilmiştir. Ölçümlerde kullanılmak üzere dört adet hareketli ölçüm arabası imal edilmiştir.



Şekil 3.2. a) I. deney düzeneği (prototip) kesitsel görünüm, b) II. deney düzeneği (model) kesitsel görünüm, c) plan



(b)

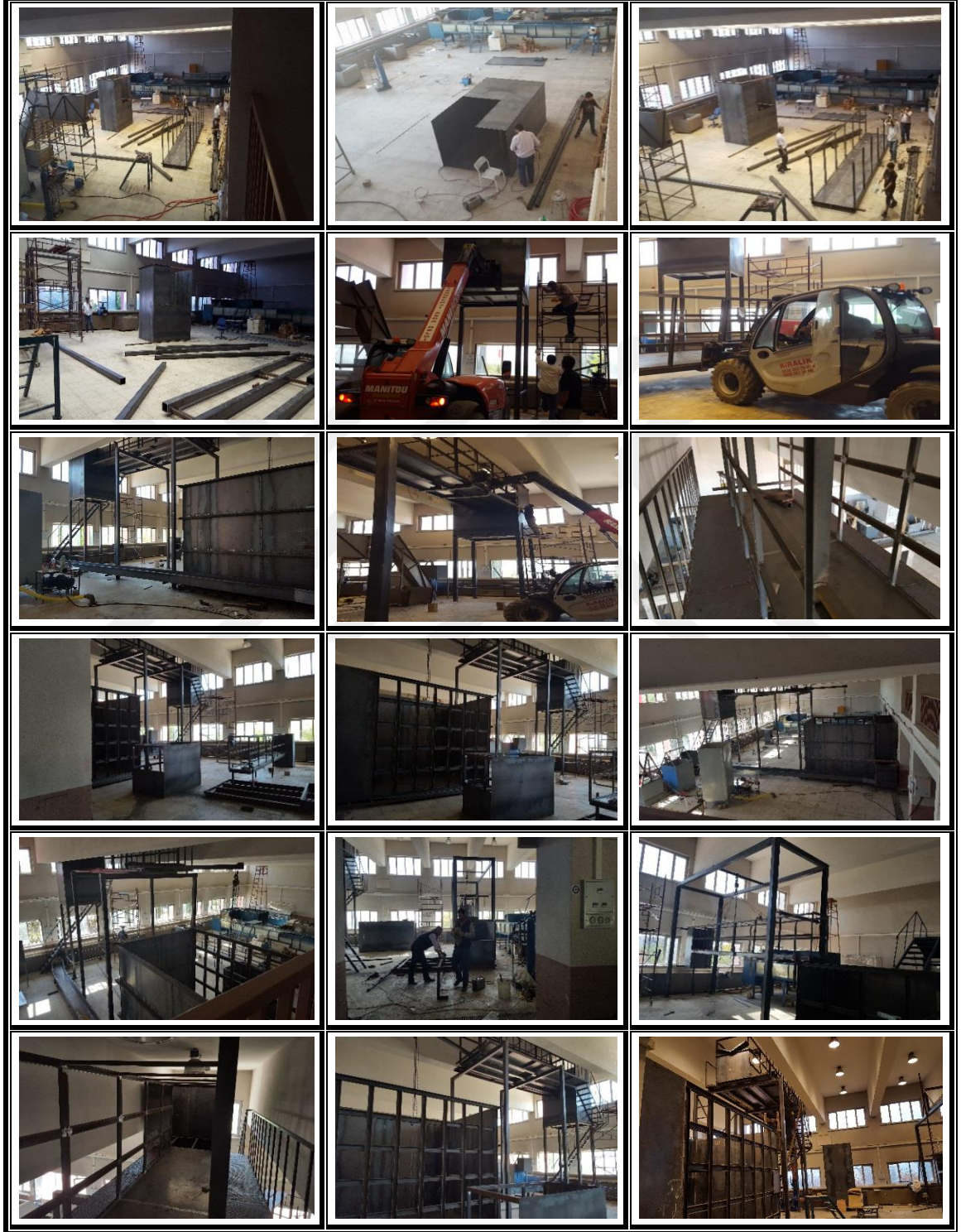


(c)

Şekil 3.2. a) I. deney düzeneği (prototip) kesitsel görünüm, b) II. deney düzeneği (model) kesitsel görünüm, c) plan (devam)

Deney setlerinin yan yüzleri kurşungeçirmez lameks cam ile kapatılmıştır. Bu kapsamda sanayi ile sürekli iş birliği içerisinde olunmuştur. Alanında uzman ustalar, deney setlerini laboratuvarında (yani yerinde) itina ile imal ve inşa etmişlerdir. Çünkü deney setlerinin taşınabilmesi

çok zordur. Şekil 3.3'te deney düzeneklerinin hazırlanma aşamasına ve gerekli malzemelerin teminine ait resimler sunulmaktadır.

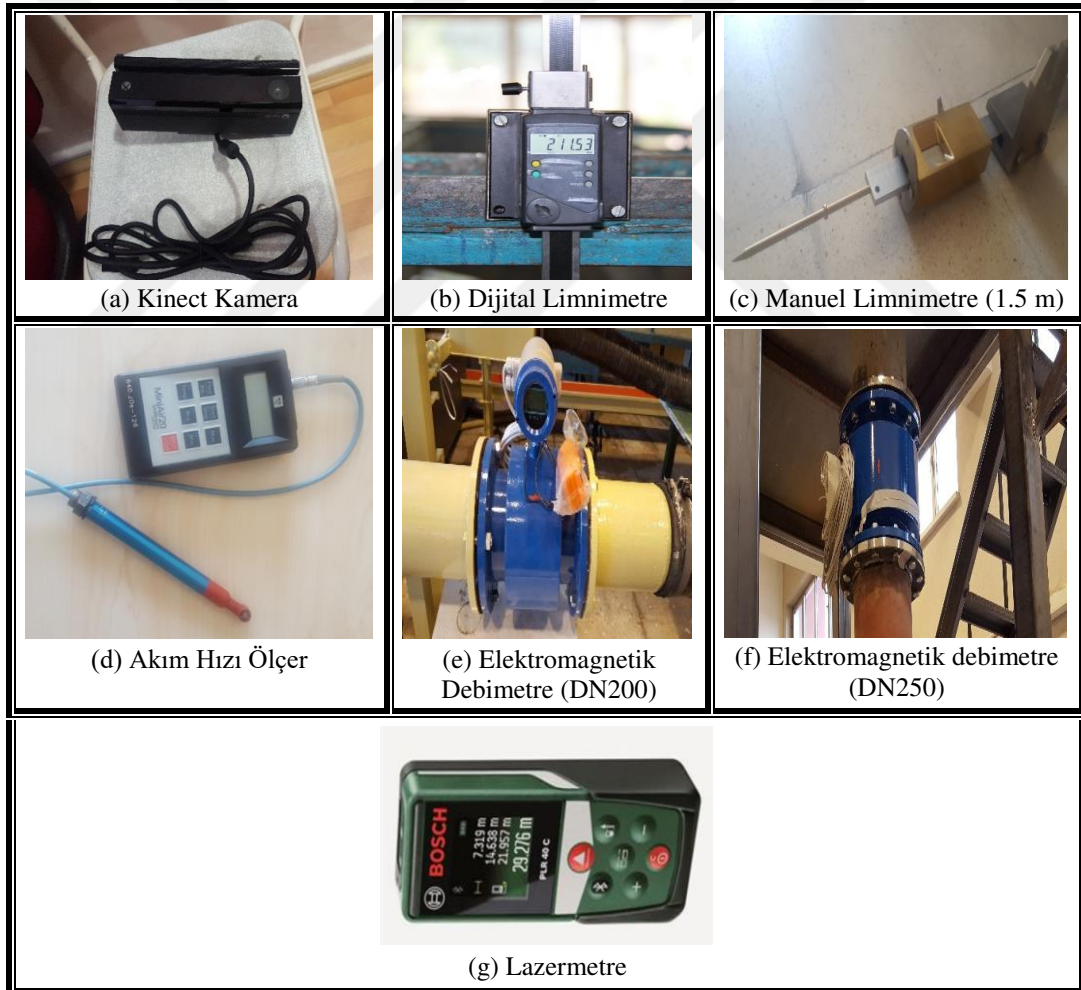


Şekil 3.3. Deney düzeneklerinin inşasına ait resimler



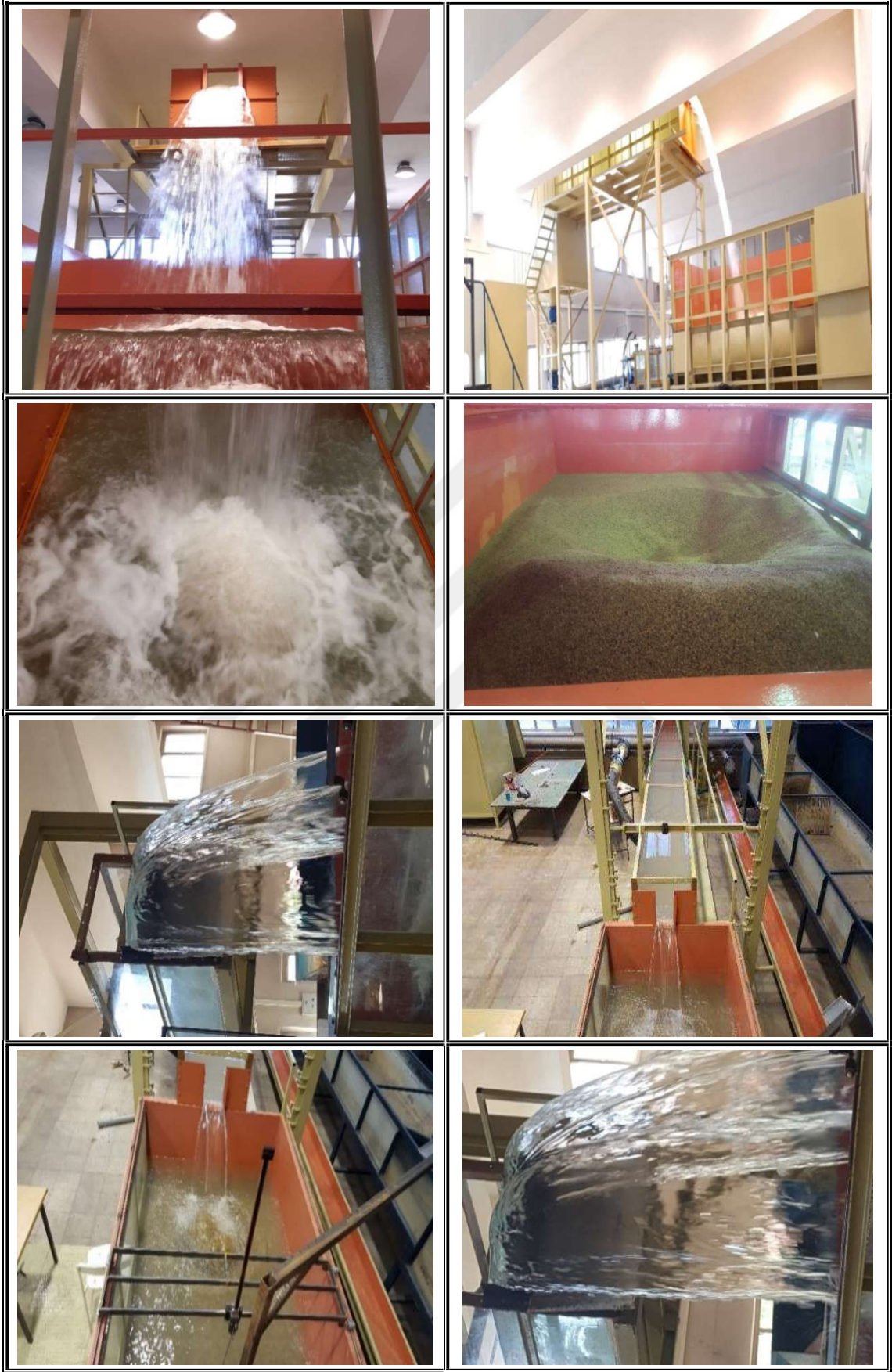
Şekil 3.3. Deney düzeneklerinin inşasına ait resimler (devam)

Şekil 3.4'te deneylerde kullanılan cihazlara ait resimler verilmiştir. Kinect sensor kamera (Şekil 3.4a) yardımı ile her deney sonunda nihai taban topografyası için görüntü kaydedilmiştir. Bu görüntüler Matlab Yazılımı ile işlenerek eş yükselti eğrileri elde edilmiştir. Dijital limnimetreden (Şekil 3.4b) iki adet temin edilmiştir. Mitutoyo marka dijital limnimetre yardımı ile seviye ve derinlik ölçümleri alınmıştır. Manuel limnimetre (Şekil 3.4c) ile de akım seviyeleri ölçülmüştür. Serbest düşen su jetinin mansap havuzunda kuyruksuyuna jet çarpma hızı Schild bild marka mikromuline hız ölçer yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.4d). II. Deney düzeneğinde kullanılmak üzere DN200 (200 mm çapında), I. Deney düzeneğinde kullanılmak üzere DN250 (250 mm çapında) iki adet Enlson marka elektromanyetik debimetre (Şekil 3.4e,f) temin edilmiş ve deney setlerine monte edilmiştir. Mesafe ölçümlerinin kontrolünü kolay bir şekilde sağlayabilmek için Bosch marka lazermetre (Şekil 3.4g) temin edilmiştir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan cihazlardan resimler: a) Kinect kamera, b) Dijital limnimetre, c) Manuel limnimetre, d) Akım hızı ölçer, e) Elektromanyetik debimetre, DN200, f) Elektromanyetik debimetre, DN250, g) Lazermetre

Şekil 3.5'te yürütülen deneylere ait resimler sunulmaktadır.



Şekil 3.5. Deneylere ait resimler



Şekil 3.5. Deneylere ait resimler (devam)



Şekil 3.5. Deneylere ait resimler (devam)

Model deney düzeneği olan II. deney düzeneği, bütün deneylerin yürütüldüğü deney düzeneğidir. Bu deney düzeneğinde test edilecek her savak türü (4 adet savak); dört adet düşü yüksekliği, dört adet birim debi, üç adet taban malzemesi, iki adet kuyruksuyu derinliği için 9 saat sürdürülerek deneyler yürütülmüştür. Literatürde bu tür deneyler için 9 saatte denge oyulma derinliğine ulaşıldığı belirtilmiştir (Dey ve Raikar, 2007; Fan vd., 2017; Liu vd., 2017). Mevcut çalışmada da denge oyulmasına ulaşmak için 9 saatlik süre yeterli olmuştur. Bu deney düzeneğinde başlangıçta toplam 384 adet deney yapılmıştır. Tablo 3.1’de II. deney düzeneği için test edilen savak türleri ile farklı akım parametreleri sunulmaktadır. Her iki deney düzeneği ile model ve prototip arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için bir dizi ek deney daha yapılmıştır.

Tablo 3.1. II. deney düzeneğinde test edilen savak türleri için deney parametreleri

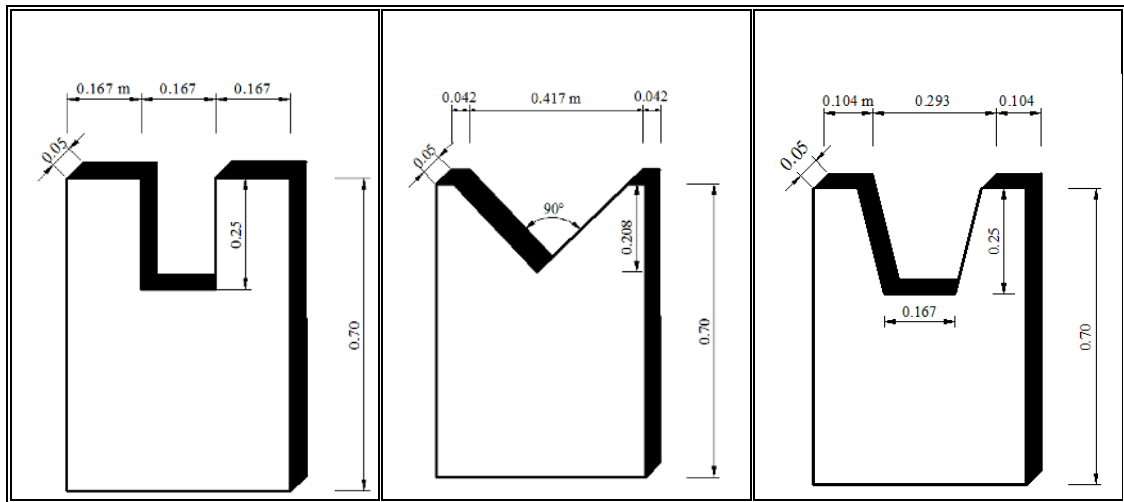
Parametreler	Savak tipleri (büzülmeli)			
	Dikdörtgen	Trapez	Üçgen	Labirent
Düşü yüksekliği, h (cm)	25, 50, 100, 167	25, 50, 100, 167	25, 50, 100, 167	25, 50, 100, 167
Debi, Q (L/s)	15, 20, 25, 30	15, 20, 25, 30	5, 8, 12, 15	10, 20, 30, 40
Taban malzemesi, d_{50} (mm)	1.3, 3.6, 6.1	1.3, 3.6, 6.1	1.3, 3.6, 6.1	1.3, 3.6, 6.1
Kuyruksuyu derinliği, h_t (cm)	25, 50	25, 50	25, 50	25, 50

Prototip deney düzeneği olan I. deney düzeneğinde $L_r=1/2.4$ ölçeğine uygun akım parametreleri seçilerek mevcut çalışma kapsamında test edilecek her savak türü (4 adet savak); sabit düşü yüksekliği ($h=4m$), model ölçeği ile orantılı debi, taban malzemesi ve kuyruksuyu

derinlikleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deney setinde yürütülen deneylerin bulguları yorumlanarak model ile prototip arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 3.1’de seçilen debi değerlerinin savak tipine göre değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni, farklı savak türlerinin farklı deşarj kapasitelerine sahip olmasıdır. Örneğin; aynı nap yükü için üçgen kesitli savakların daha az debi deşarj ettiği, labirent savakların ise daha fazla debi deşarj ettiği gözlenmiştir.

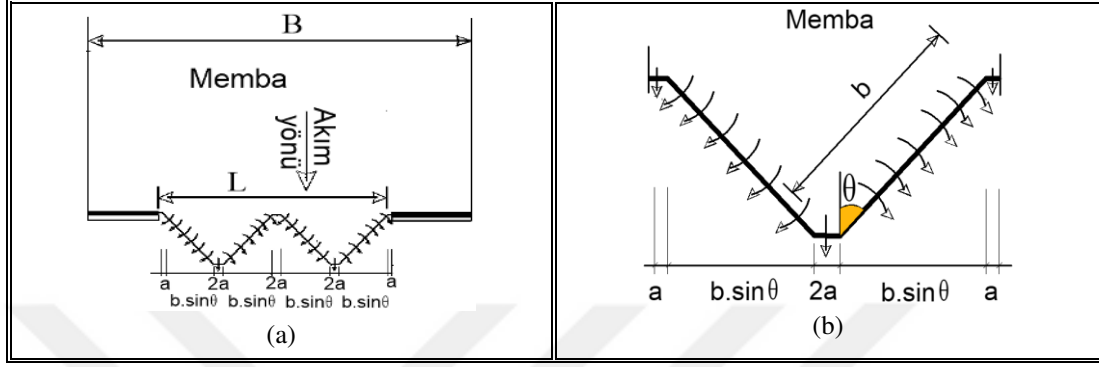
Bu çalışma kapsamında farklı şekillere sahip savaklar imal edilmiştir (Şekil 3.6). Savakların tasarımında USBR (*United States Bureau of Reclamation*) tarafından önerilen koşullar ve seçilen model ölçeği dikkate alınmıştır. Literatür araştırmasına göre, Cipoletti savağı için kenar uzunluklarının maksimum nap yükünün iki katından büyük olması ve nap yükü okumalarının savak ucundaki maksimum nap yükünün dört katı kadar ileriden okunması gibi bilimsel yaklaşımlara uyulmuştur. Ayrıca yüzeysel gerilme etkisini elimine etmek için nap yükleri 3 cm’den daha büyük alınmıştır. Deneylerde; jet yörüngesi, jet genişliği, jet kalınlığı, jet çarpma açısı, nap yükü, debi okumaları, zamana bağlı maksimum oyulma derinlikleri ve denge oyulma durumunda mansapta oluşan nihai taban topografyaları belirlenmiştir. Bu çalışmada kalın kenarlı dikdörtgen savak açıklığı $L=B/3$ olacak şekilde ilgili kurallara uygun olarak tasarlanmıştır. İnce kenarlı üçgen savak için tepe açısı $\alpha=45^\circ$ alınmıştır. İnce kenarlı trapez savak için Cipoletti tarafından önerilen şev eğimi ve $L=B/3$ için deneyler gerçekleştirilmiştir. Mevcut deneysel çalışmada test edilen büzülmeli dikdörtgen savak boyutları Şekil (3.6a)’da, büzülmeli üçgen savak boyutları Şekil (3.6b)’de ve büzülmeli trapez savak boyutları Şekil (3.6c)’de sunulmaktadır.



Şekil 3.6. Bu çalışmada test edilen savakların boyutları: a) Dikdörtgen savak, b) Üçgen savak, c) Trapez savak

Labirent savaklar, planda düz olmayan bir kret şekline sahiptir (Şekil 3.7). Bu savaklar, kret uzunluğunun klasik savaklara oranla daha uzun olması sebebiyle daha fazla debi deşarj

edebilmektedir (Emiroglu vd., 2011). Bu yapılar; üçgen, trapez ve dairesel şekilli olarak inşa edilebilmektedir. Trapez savakların inşa kolaylığı ve daha iyi akım koşulları sağlaması nedeniyle bu çalışma kapsamında yürütülen analizlerde $\theta=14^\circ$ yan duvar açısına sahip trapez labirent savaklar kullanılmıştır (Şekil 3.7).

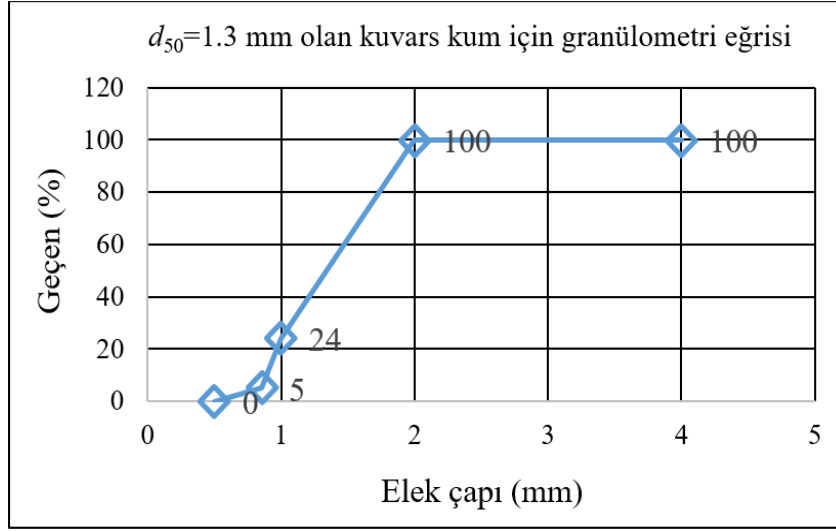


Şekil 3.7. Bu çalışmada test edilen labirent savağın şematik gösterimi: a) Büzülmeli iki gözlü labirent savak planı, b) Trapez labirent savak kontrol kesiti.

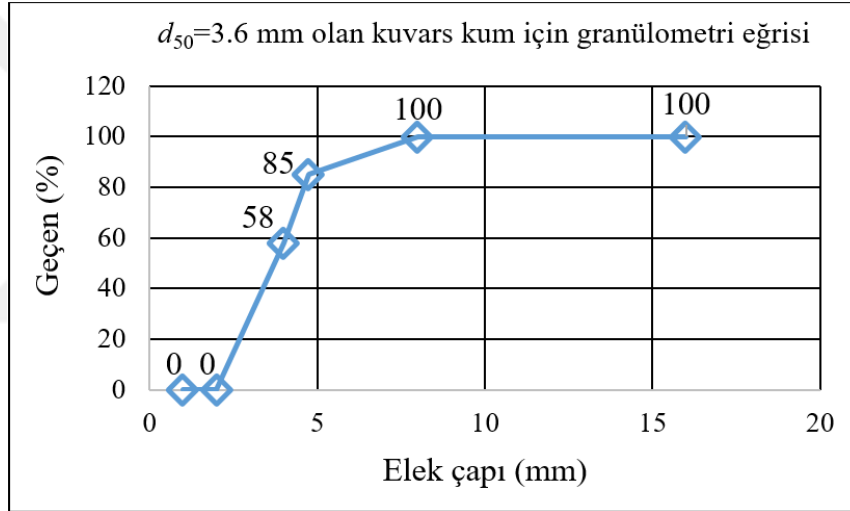
Karşıdan alışı labirent savaklar için toplam kret uzunluğu mansaptaki oyulmayı etkileyen önemli bir parametredir. Ancak, göz sayısının deneysel sonuçları pek etkilemediği belirlenmiştir. Çünkü geliştirilen denklemlerde savak açıklığı/toplam kret uzunluğu (L/L_{ef}) boyutsuz parametresi kullanılmaktadır. Bu nedenle literatürde deneyler hem tek gözlü ve hem de çok gözlü labirent savaklar için yürütülmüştür (Tullis vd., 1995). Bu çalışma kapsamında çift gözlü trapez labirent savaklar kullanılmıştır.

Bu deneysel çalışmada, taban malzemesi olarak granülometrisi ve özgül ağırlığı Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında yapılan deneylerle belirlenen kuvars kumu kullanılmıştır. Söz konusu kuvars kumu üç farklı medyan dane çapına sahip bir şekilde temin edilmiştir. Bu kapsamda, $d_{50}=1.3$ mm, $d_{50}=3.6$ mm ve $d_{50}=6.1$ mm için deneyler yürütülmüştür. Elde edilen granülometri eğrileri Şekil 3.8(a-c)'de verilmiştir. Seçilen granülometriden, uniform taban malzeme kullanılmıştır. Literatürdeki uniformluk, $\sigma_g = \sqrt{d_{84.1}/d_{15.9}} < 1.4$ ve $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 3$, şartlarını sağlamaktadırlar (Dey ve Raikar, 2007). Burada σ_g =Dane dağılımının geometrik standart sapması ve U =Uniformluk katsayısını ifade etmektedir.

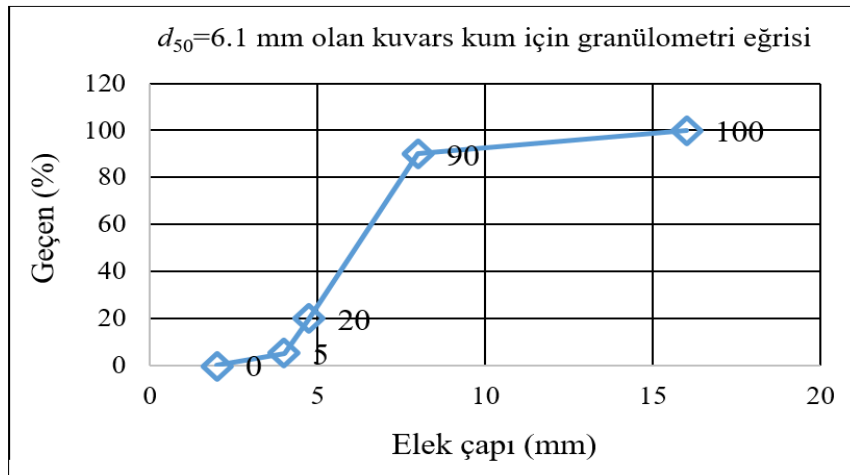
Maksimum oyulma derinlikleri zamana bağlı olarak belirlenmiştir. İlk bir saatte 15 dk.'da bir, ikinci saatte 20 dk.'da bir, üçüncü saatte 30 dk.'da bir ve sonraki saatlerde bir saatte bir ölçüm alınmıştır. Denge oyulma durumunda statik durum için oyulma geometrisi ve taban topografyası belirlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.8. Mansap havuzuna yerleştirilen taban malzemesi kuvars kumun granülometri eğrileri: a) $d_{50}=1.3$ mm için, b) $d_{50}=3.6$ mm için, c) $d_{50}=6.1$ mm için

3.1. Boyut Analizi

Bu çalışmada boyutsuz parametreleri belirlemek için boyut analizi yapılmış ve denge oyulma derinliğine etki eden parametreler Denklem (3.1)'de verilmiştir.

$$d_{se}=f(U_o, y_o, h, h_t, \rho, \rho_s', g, \mu, d_{50}) \quad (3.1)$$

burada; d_{se} =denge oyulma derinliğini (m), U_o =su jetinin kuyruksuyu havuzuna çarpma hızını (m/s), y_o =nap yükünü (m), h =düşü yüksekliğini (m), h_t = kuyruksuyu derinliğini (m), ρ =suyun özgül kütleini (kg/m³), ρ_s =sedimentin özgül kütleini (kg/m³), g =yerçekimi ivmesini (m/s²), μ =suyun dinamik viskozitesini (kg/m.s), d_{50} =sedimentin medyan dane çapını (m) ifade etmektedir.

Tekrarlayan değişkenler; U_o , y_o ve ρ seçilerek parametre sayısı $n=10$, tekrarlayan değişken sayısı $j=3$ için 7 adet Π hesaplanmıştır. Buckingham Π teoremi uygulanarak Denklem (3.2) elde edilmiştir.

$$\frac{d_{se}}{y_o}=f\left(\frac{h}{h_o}, \frac{h_t}{y_o}, \frac{\rho_s-\rho}{\rho}, \frac{g \cdot y_o}{U_o^2}, \frac{\mu}{\rho \cdot U_o \cdot y_o}, \frac{d_{50}}{y_o}\right) \quad (3.2)$$

burada; $\frac{d_{50}}{y_o}$, $\frac{g \cdot y_o}{U_o^2}$ ve $\frac{\rho_s-\rho}{\rho}$ boyutsuz parametrelerinin çarpılmasıyla Denklem (3.3) elde edilmiştir.

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{d_{50} \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_s-\rho}{\rho}\right)}} = \frac{U_o}{\sqrt{d_{50} \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_s'}{\rho}\right)}} = \frac{U_o}{(\Delta \cdot g \cdot d_{50})^{0.5}} \quad (3.3)$$

burada; F_o =densimetrik Froude sayısını ifade etmektedir. Yüksek türbülanslı akımdan dolayı, taban malzemesinin hareketinin başlamasında etkili olan “1/Re*” ihmal edilmiştir (Melville ve Sutherland, 1988).

Sonuç olarak dikdörtgen savaklar için Denklem (3.4), üçgen savaklar için Denklem (3.5), labirent savaklar için Denklem (3.6) elde edilmiştir.

$$\frac{d_{se}}{y_o} = f\left(F_o, \frac{d_{50}}{y_o}, \frac{h}{y_o}, \frac{h_t}{y_o}\right) \quad (3.4)$$

$$\frac{d_{se}}{y_o} = f\left(F_o, \frac{d_{50}}{y_o}, \frac{h}{y_o}, \frac{h_t}{y_o}, \alpha\right) \quad (3.5)$$

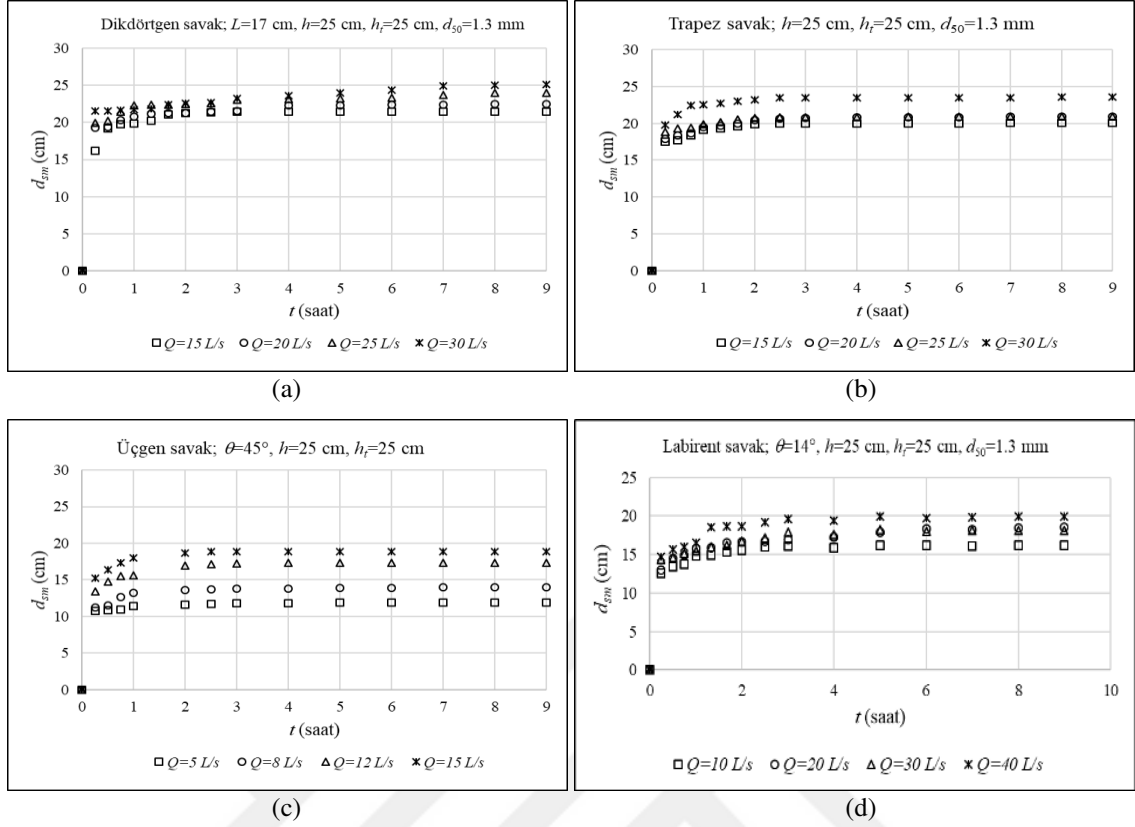
$$\frac{d_{se}}{y_o} = f\left(F_o, \frac{d_{50}}{y_o}, \frac{h}{y_o}, \frac{h_t}{y_o}, \frac{L_{ef}}{L}, \beta\right) \quad (3.6)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında; serbest düşümlü savakların mansabında oluşan zamana bağlı maksimum oyulma derinlikleri, jet yörüngesinin düşü yüksekliği ile değişimi, jet genişliklerinin düşü yüksekliği ve debiye bağlı olarak değişimi, denge oyulma derinliğinin debi ile değişimi, denge oyulma derinliğinin kuyruksuyu derinliği ile değişimi, denge oyulma derinliğinin sedimentin medyan dane çapı ile değişimi, denge oyulma derinliğinin düşü yüksekliği ile değişimi, farklı debi değerleri için yatak malzemesinin boykesit değişimi, deney sonunda mansap havuzu yatak malzemesinde oluşan taban topografyaları, boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/y_o) densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi, boyutsuz denge oyulma derinliği açısından model ile prototip arasındaki ilişki ve her bir savak türü için mansapta oluşan boyutsuz denge oyulma derinliğinin güvenle hesaplanabilmesi bakımından ilgili denklemler sunulmuştur. Bu bölümde elde edilen deneysel bulgular ilgili grafikler, tablolar ve şekillerle yorumlanmış ve tartışılmıştır.

4.1. Maksimum Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi

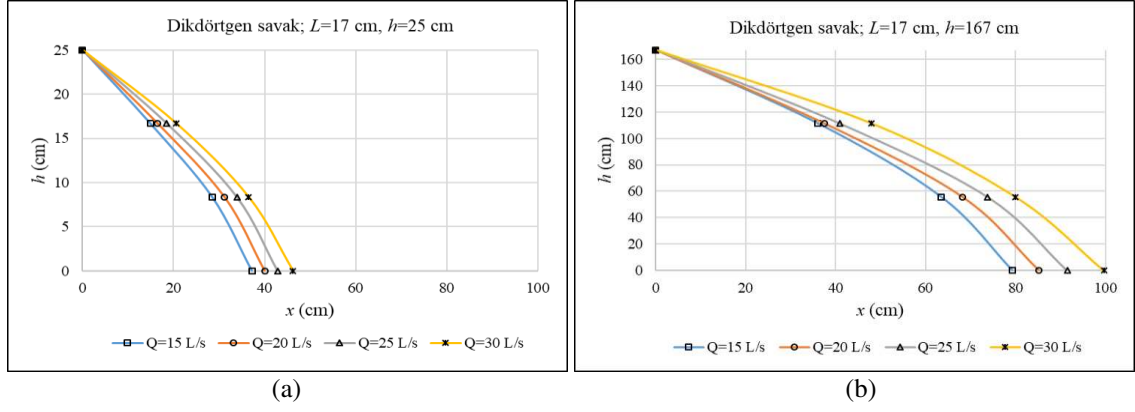
Düşü yüksekliği $h=25$ cm, kuyruksuyu derinliği $h_r=25$ cm ve medyan dane çapı $d_{50}=1.3$ mm için Şekil 4.1a'da dikdörtgen savağa ait, Şekil 4.1b'de trapez savağa ait, Şekil 4.1c'de üçgen savağa ait ve Şekil 4.1d'de trapez labirent savağa ait maksimum oyulma derinliğinin zamanla değişimi farklı debi değerleri için verilmiştir. İlgili diğer grafikler Ek-1'de sunulmaktadır. Bütün savak türleri için genel olarak maksimum oyulma derinliklerinin başlangıçta hızlı bir şekilde arttığı ve daha sonra zamanla asimptota yaklaştığı sonucuna varılmıştır. Dikdörtgen ve trapez savaklarda, üçgen ve labirent savaklara göre genellikle daha büyük oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Bunun nedeninin, dikdörtgen ve trapez savakların jet çarpma hızlarının ve penetrasyon derinliklerinin diğer savaklara göre daha fazla olduğu düşünülmektedir (Emiroğlu, 2010). Su jetinin mansap havuzunda dalma derinliğiyle ilişkili bir parametre olan penetrasyon derinliğinin daha fazla olması oyulma derinliğini arttırmaktadır. Bu sonuçlar bir başka açıdan tartışılacak olursa, dikdörtgen ve trapez savaklarda jet genişlikleri diğer savaklara göre daha az olması jet çarpma hızının artmasına sebep olmaktadır. Jet çarpma hızının artması penetrasyon derinliğini arttırmakta ve böylece daha yüksek oyulma derinlikleri elde edilmektedir. Ayrıca, kuyruksuyu derinliğinin artması ile oyulma derinliğinin azaldığı görülmüştür. Mansap havuzunda oluşan maksimum oyulmanın önemli bir kısmı ilk bir saat içerisinde gerçekleşmektedir. Yedinci saatten sonra genellikle denge oyulma durumuna yaklaşılmıştır. Kuyruksuyu derinliği ile düşü yüksekliğinin fazla olması ve debinin düşük olması durumunda özellikle üçgen savaklarda oldukça düşük oyulma derinlikleri elde edilmiştir.



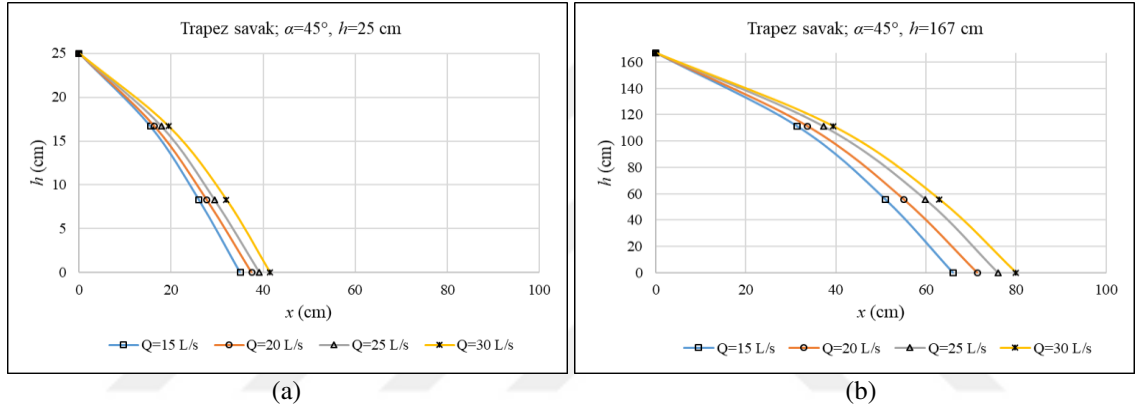
Şekil 4.1. Serbest düşülü savaklarda $h=25$ cm, $h_f=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) dikdörtgen savak için, b) trapez savak için, c) üçgen savak için, d) labirent savak için

4.2. Jet Yörüngesinin Düşü Yüksekliği ile Değişimi

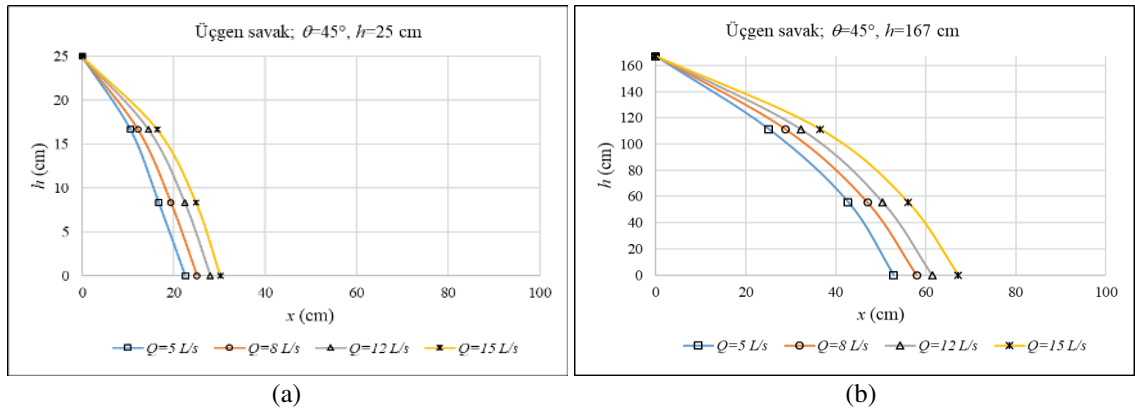
Farklı düşü yükseklikleri ($h=25$ cm ve $h=167$ cm) için Şekil 4.2’de dikdörtgen savağın, Şekil 4.3’te trapez savağın, Şekil 4.4’te üçgen savağın ve Şekil 4.5’te labirent savağın jet yörüngeleri verilmiştir. İlgili diğer grafikler Ek-2’de sunulmaktadır. Debinin artmasıyla jetin mansap havuzuna çarpma mesafesi artmaktadır. Su jetinin çıkış noktası ile mansap havuzuna çarpma noktası arasındaki mesafe debinin artmasıyla büyük oranda değişmemektedir. Üçgen savaklarda su jetinin çıkış noktası ile mansap havuzuna çarpma noktası arasındaki mesafe dikdörtgen savaklara göre daha küçük olmaktadır. Trapez savaklarda da söz konusu mesafe için dikdörtgen savaklardakine yakın değerler elde edilmiştir. Debinin artması ile artan momentuma bağlı olarak su jetinin düştüğü nokta ile savak arasındaki yatay mesafe artmaktadır. Dolayısıyla momentumun artması ile su jeti daha ileriye düştüğünden jet çarpma açısı azalmıştır. Ayrıca düşü yüksekliğinin artması ile jet çarpma açısı artmaktadır. Jetin bu akım karakteristikleri oyulma geometrisi üzerinde önemli rol oynamaktadır.



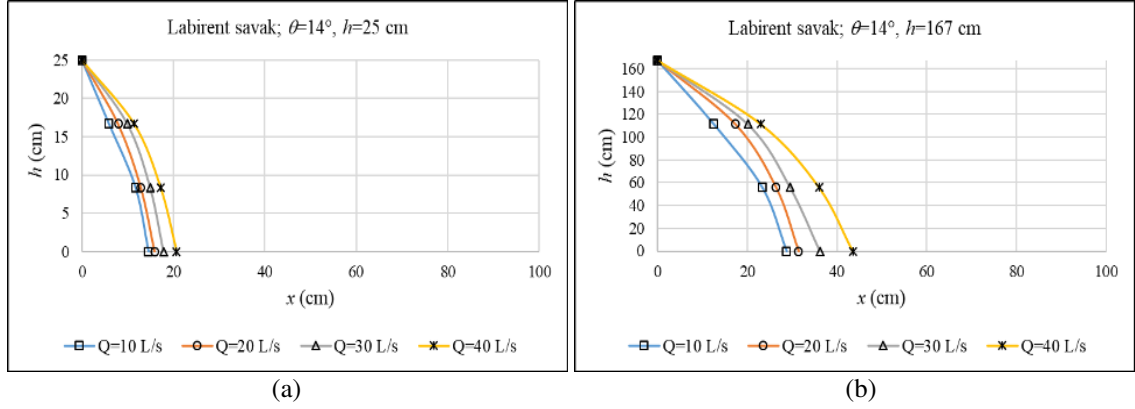
Şekil 4.2. Dikdörtgen savakta jeOt yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değışimi: a) $h=25$ cm için, b) $h=167$ cm için



Şekil 4.3. Trapez savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değışimi: a) $h=25$ cm için, b) $h=167$ cm için



Şekil 4.4. Üçgen savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değışimi: a) $h=25$ cm için, b) $h=167$ cm için



Şekil 4.5. Labirent savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi a) $h=25$ cm için, b) $h=167$ cm için

4.3. Jet genişliğinin Düşü Yüksekliği ve Debi ile Değişimi

Tablo 4.1-4.4'te test edilen savaklar için jet genişlikleri verilmiştir. Görüldüğü gibi debinin ve düşü yüksekliğinin artmasıyla jet genişliği artmaktadır. Jet genişliğinin artması ve jet çarpma açısının artmasıyla ve çarpma hızının azalmaması durumunda mansap havuzu içerisine daha fazla hava kabarcıkları sokulmaktadır. Eğer jet genişliği aşırı artarsa ve jet çarpma hızı azalırsa, o zaman akım içerisine sokulan hava kabarcıkları miktarı azalmaktadır. Deneylerde bunu görsel olarak da fark etmek mümkün olmaktadır. Dikdörtgen savaktan çıkan jetin daha dar olması nedeniyle düşü yüksekliğinin artmasıyla jet genişliği artmıştır. Elde edilen bulgular Emiroglu (2010) tarafından rapor edilen sonuçlarla uyumludur. Üçgen savaklarda oluşan jet genişlikleri dikdörtgen savaktakilerden daha azdır. Labirent savakta jet genişliği, düşü yüksekliğinin artmasıyla çok az oranda artmaktadır. Jetin genişliği de oyulma çukurunun karakteristikleri üzerinde önemli role sahiptir. Bütün deneyler için düşü yüksekliğinden de debinin artmasıyla jet genişliğinin daha fazla arttığı söylenebilmektedir.

Tablo 4.1. Dikdörtgen savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u)

h (cm) \ Q (L/s)	b_u (cm)			
	25	50	100	167
15	32.5	39.4	42.2	46.8
20	51.2	56.2	61.2	66.4
25	54.4	63.5	76.2	84.2
30	63.8	70.5	80	90.2

Tablo 4.2. Trapez savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u)

		b_u (cm)			
h (cm) \ Q (L/s)		25	50	100	167
15		32.6	34.6	36.2	40.3
20		35.8	45.8	50.4	51.7
25		46.7	49.8	57.9	59.3
30		48.9	54.3	63.4	64.7

Tablo 4.3. Üçgen savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u)

		b_u (cm)			
h (cm) \ Q (L/s)		25	50	100	167
5		19.4	24.9	30.6	35.5
8		21.6	31.2	37.6	49.6
12		32.4	37.4	46.1	55.5
15		33.2	50.8	56.9	57.5

Tablo 4.4. Labirent savakta düşü yüksekliği (h) ve debiye (Q) bağlı olarak elde edilen jet genişlikleri (b_u)

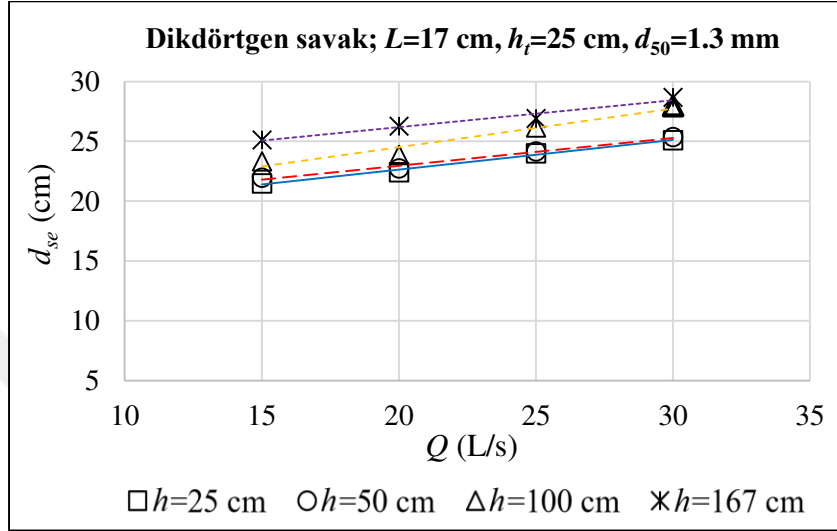
		b_u (cm)			
h (cm) \ Q (L/s)		25	50	100	167
10		46.2	46.9	41.9	42.5
20		47.8	49.2	50.1	50.5
30		54.7	54.9	56	56.5
40		58.9	59.6	59.9	60.1

4.4. Denge Oyulma Derinliğinin Debi, Kuyruksuyu Derinliği, Düşü Yüksekliği ve Sedimentin Medyan Dane Çapı ile Değişimi

Şekil 4.6-4.29’da, çalışılan savak türleri için debi, kuyruksuyu derinliği, düşü yüksekliği ve dane çapının oyulma derinliğine etkisi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, debinin artması ile beraber oyulma derinliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Düşü yüksekliğinin artması ile beraber oyulma derinliğinde, genel manada, artış olurken, artış trendinde azalma eğilimi olduğu gözlenmiştir. Düşü yüksekliğinin artmasına bağlı olarak su jeti içerisine giren hava kabarcıkları artacağından belirli bir yükseklikten sonra oyulma derinliğinin artış eğiliminde azalma görülmektedir. Bu durum literatür ile de uyumludur (Emiroglu, 2010). Kuyruksuyu derinliğinin artması ile oyulma derinliği azalmaktadır. Su jeti kuyruksuyu içerisine daldıktan sonra enerjisi kırılmaktadır. Savak açıklığı küçük olan dar tepe açılı üçgen savaklarla küçük debiler için yürütülen deneylerde, yatak malzemesinde neredeyse hiç oyulma oluşmadığı gözlenmiştir. Bunun nedeni,

hem debinin düşük olması ve hem de kuyruksuyu derinliğinin fazla olmasıdır. Kullanılan sediment malzemesinin dane çapının artması ile oyulma derinliğinde azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.6’da debi artışıyla denge oyulma derinliğinde doğrusal bir artış gözlenmektedir. Düşü yüksekliği arttıkça, denge oyulma derinliğinin de arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni düşü yüksekliği arttıkça mansap havuzuna çarpan jet hızının artmasıdır.

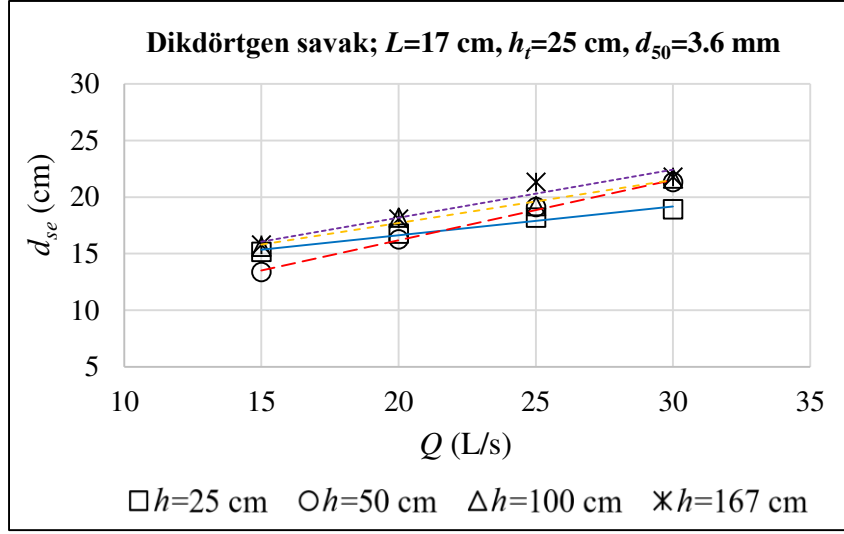


Şekil 4.6. Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm

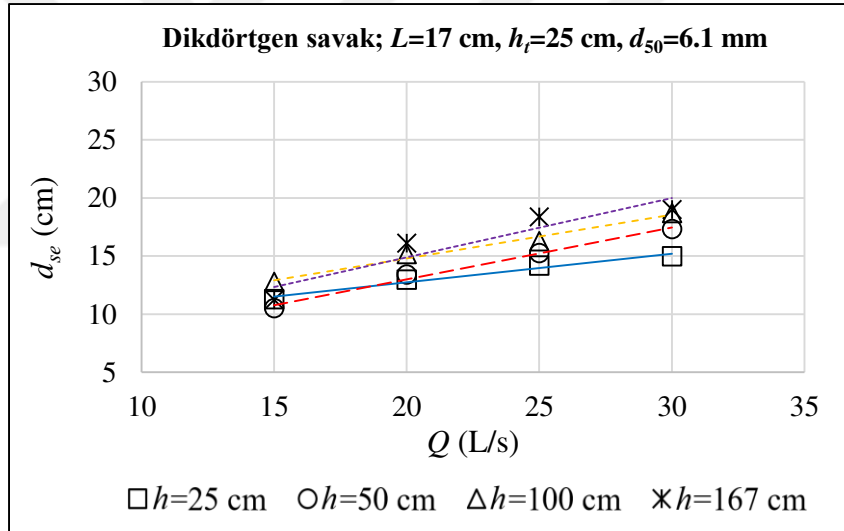
Şekil 4.7’de de Şekil 4.6’ya benzer şekilde debi ve düşü yüksekliğinin artmasıyla denge oyulma derinliklerinin arttığı söylenebilmektedir. Ancak, Şekil 4.7’de deneyler mansap havuzu taban malzemesinin medyan dane çapı $d_{50}=3.6$ mm için yapılmıştır. Medyan dane çapı 1.3 mm’den 3.6 mm’e arttıkça denge oyulma derinliğinin yaklaşık ortalama % 25-40 arasında azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 4.8’de $d_{50}=6.1$ mm için mevcut taban malzemesine ait en yüksek medyan dane çapı ile deneyler yürütülmüştür. $d_{50}=1.3$ mm ile $d_{50}=3.6$ mm için denge oyulma derinliklerindeki azalma eğiliminin daha fazla olduğu görülmektedir. Medyan dane çapı 3.6 mm’den 6.1 mm’e arttıkça denge oyulma derinliğinin yaklaşık ortalama % 15-20 arasında azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 4.9’da, Şekil 4.6’dan farklı olarak kuyruksuyu derinliğinin arttığı görülmektedir. İlgili grafikler incelendiğinde, kuyruksuyu derinliği değişiminin denge oyulma derinliğine önemli ölçüde etkisi olduğu söylenebilmektedir. Kuyruksuyu derinliğinin %100 oranında artırılmasına, denge oyulma derinliğinde farklı debi ve düşü yüksekliği değerlerine bağlı olarak %10 ile %30 arasında bir azalma gözlenmektedir.

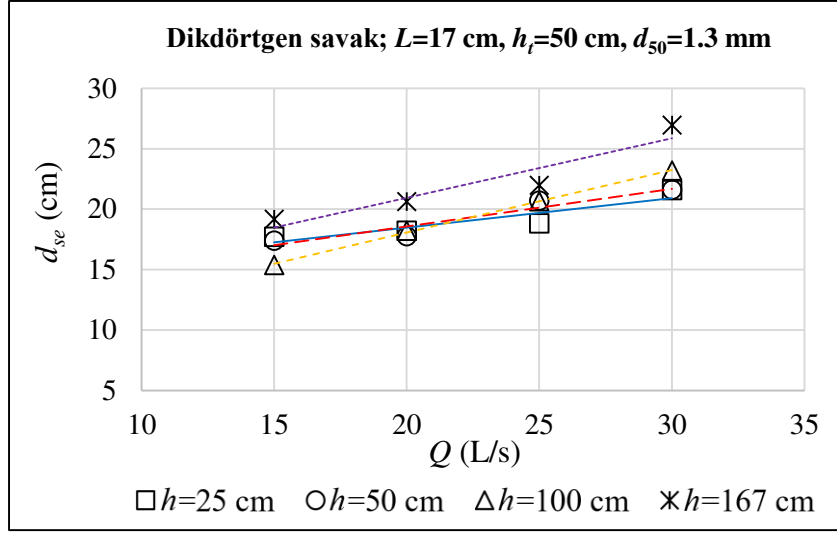


Şekil 4.7. Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm

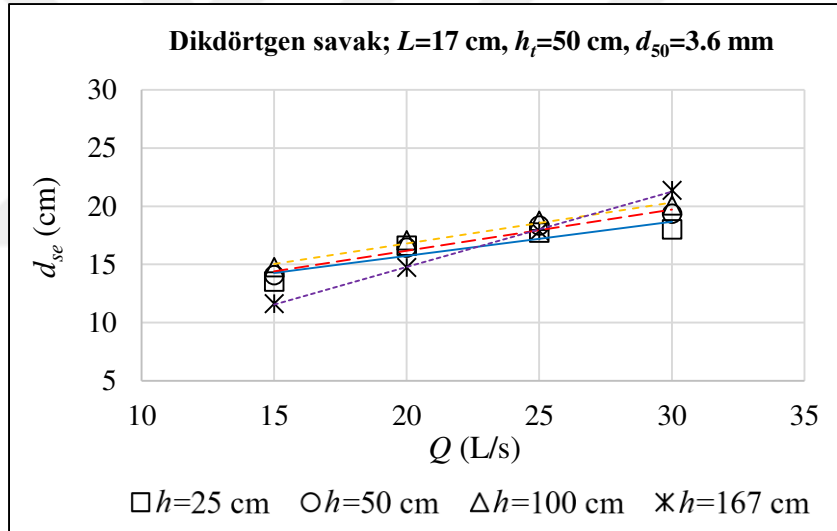


Şekil 4.8. Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm

Şekil 4.10'da büzülmeli dikdörtgen savak için yürütülen deneyde $d_{50}=3.6$ mm için denge oyulma derinliklerinin, diğer aynı şartlar aynı olup $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deneylere göre yaklaşık ortalama % 25 civarında azaldığı söylenebilmektedir. Bu durum mansap havuzundaki yatak malzemesinin medyan dane çapının, denge oyulma derinliği üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir.

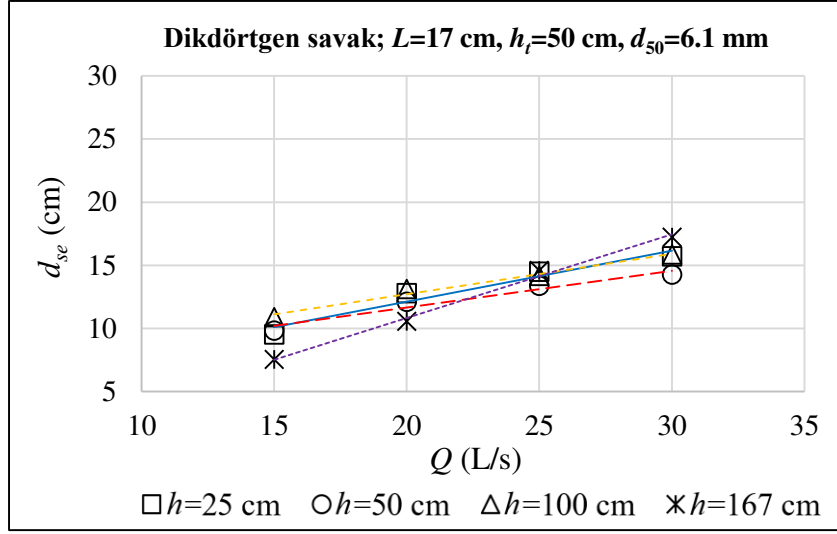


Şekil 4.9. Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm



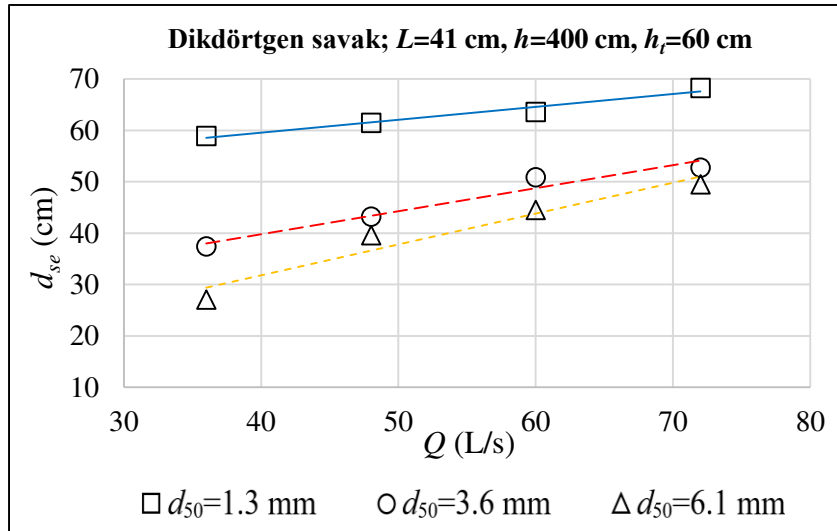
Şekil 4.10. Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm

Şekil 4.11’de ise Şekil 4.9 ve 4.10’dan farklı olarak mansap havuzundaki yatak malzemesinin medyan dane çapının $d_{50}=6.1$ mm olduğu durum için deneyler yürütülmüştür. Şekil 4.11’den görüldüğü üzere, yüksek medyan çaplı taban malzemesi deneğe oyulma derinliğinin önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır.



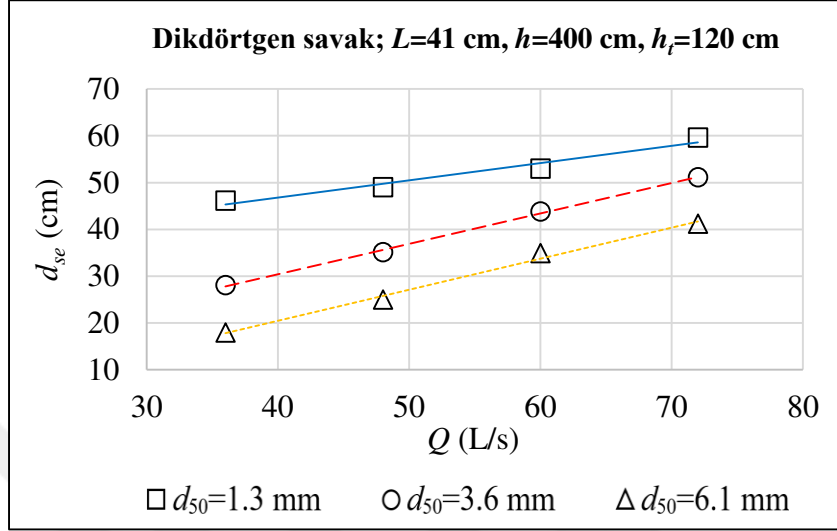
Şekil 4.11. Dikdörtgen savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm

Şekil 4.12’de I. deney düzeneğinde (prototip koşulları) yürütülen deneyler için farklı medyan dane çaplarına göre denge oyulma derinliklerinin değişimi sunulmaktadır. Bu deney düzeneğinde düşü yüksekliği $h=400$ cm sabit alınmıştır. Sonuçların model-prototip ilişkisine uygun bir şekilde yorumlanması için diğer özellikler yaklaşık 1/2.4 oranında ölçeklidir. Şekil 4.12’de denge oyulma derinliklerinin $d_{50}=1.3$ mm’den $d_{50}=3.6$ mm’ye arttığında yaklaşık ortalama % 40 oranında, $d_{50}=3.6$ mm’den $d_{50}=6.1$ mm’ye arttığında yaklaşık ortalama %50 oranında azaldığı söylenebilmektedir.



Şekil 4.12. Dikdörtgen savaklarda farklı medyan dane çapları için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=60$ cm, $h=400$ cm

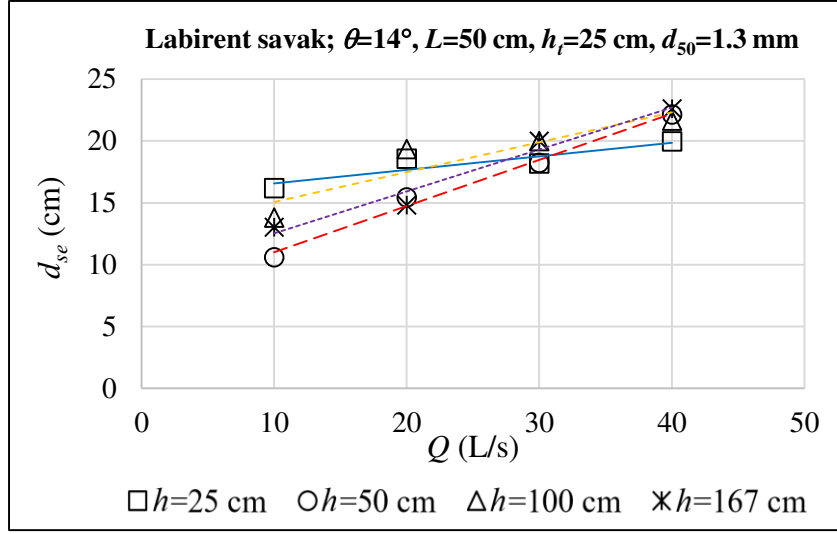
Şekil 4.13'te ise Şekil 4.12'den farklı olarak kuyruksuyu derinliğinin % 100 oranında arttırıldığı görülmektedir. Bu durum denge oyulma derinliklerinin yüksek oranda azalmasını sağlamıştır.



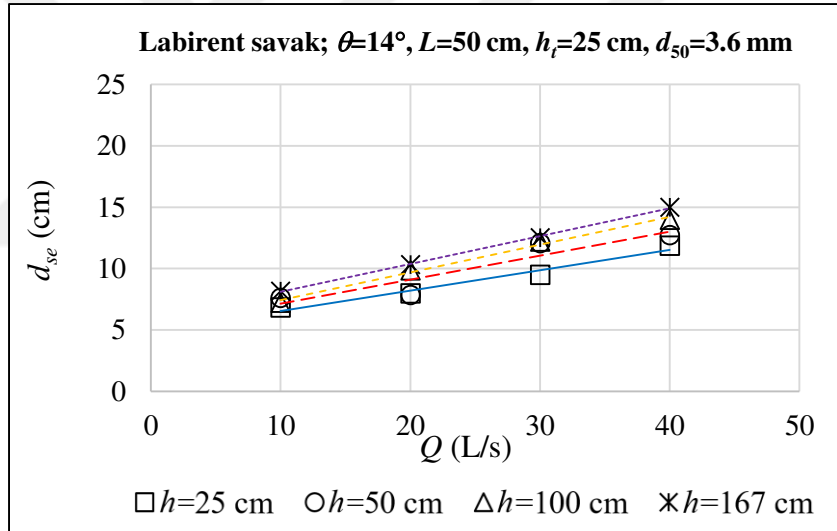
Şekil 4.13. Dikdörtgen savaklarda farklı medyan dane çapları için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=120$ cm, $h=400$ cm

Şekil 4.14'te $\theta=14^\circ$ yan duvar açısına sahip büzülmeli iki gözlü labirent savaklar için farklı düşü yükseklikleri dikkate alınarak debinin denge oyulma derinliği ile değişimi belirlenmiştir. Diğer sonuçlarla uyumlu olarak, hem debinin ve hem de düşü yüksekliğinin artmasıyla denge oyulma derinliğinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeninin jet hızının artması olduğu düşünülmektedir. Ancak düşük debiler için düşük jet düşü yükseklikleri ile gerçekleştirilen deneylerde, bazen denge oyulma derinliklerinin daha fazla olduğu gözlenebilmektedir. Bu durum, düşü yüksekliği ve debi az olduğu için jetin parçalanmadan ya da içerisine fazla hava sürüklenmesi olmadan mansap havuzuna çarpmasının sağlanması ile yatak malzemesinde daha fazla oyulma oluşabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.15'te ise Şekil 4.14'ten farklı olarak $d_{50}=3.6$ mm için deneyler yürütülmüş ve denge oyulma derinliklerinde yaklaşık ortalama %50 oranında azalma olduğu söylenebilmektedir. Burada debi ve düşü yüksekliğinin artmasıyla orantılı bir şekilde denge oyulma derinlikleri de artmıştır. Bu durumun Şekil 4.14'ten farklı olmasının sebebi, taban malzemesinin nispeten daha büyük medyan dane çapına sahip olmasıyla tanelerin yerinden kaldırılmasının zorlaşması şeklinde yorumlanabilir.

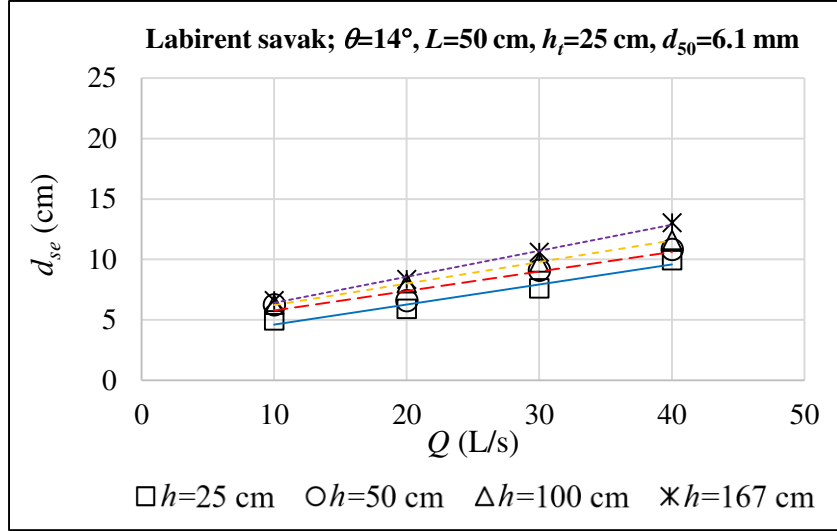


Şekil 4.14. Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_f=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm



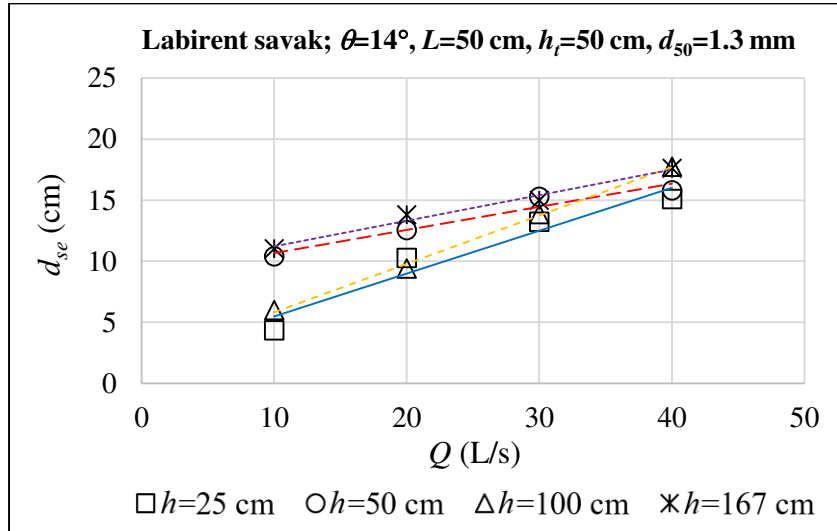
Şekil 4.15. Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_f=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm

Şekil 4.16'da ise $d_{50}=6.1$ mm olan taban malzemesinin oyulmaya etkisi değişik debi ve değişken düşü yükseklikleri için incelenmiştir. Görüldüğü üzere d_{50} 'nin 3.6 mm'den 6.1 mm'e çıkarılmasıyla denge oyulma derinliklerinde yine azalma gözlenmiştir. Ancak nispeten daha az oranda azalma gözlenmiştir.

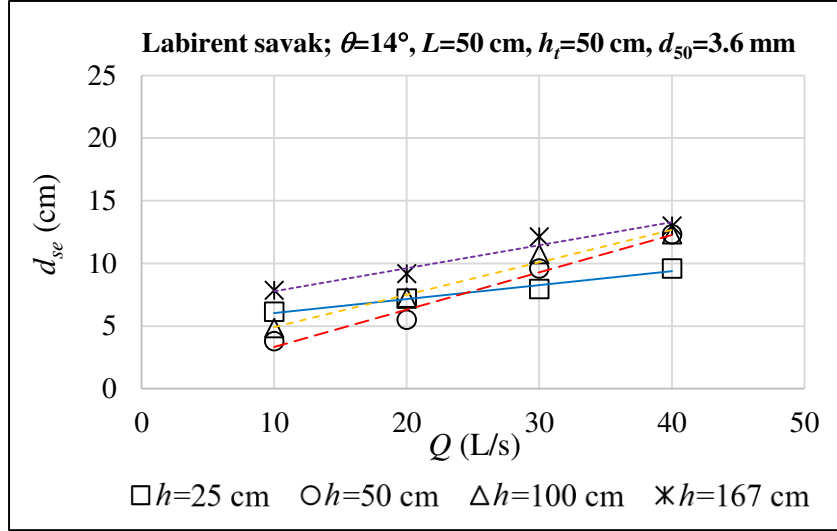


Şekil 4.16. Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm

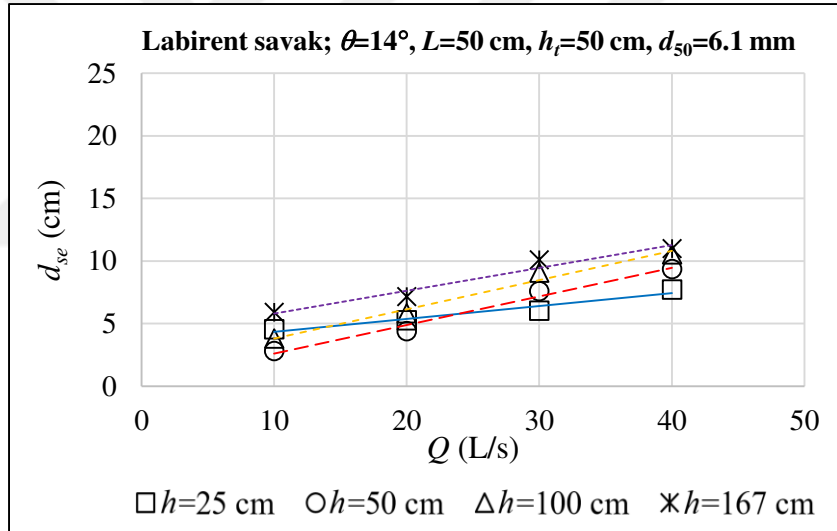
Şekil 4.17-19’da ise kuyruksuyu derinliği $h_t=50$ cm alınarak deneyler yürütülmüştür. Denge oyulma derinliklerinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Kuyruksuyu derinliğinin fazla olması yatak malzemesindeki hidrodinamik etkilerin belirlenmesini zorlaştırmıştır. Çünkü su jetinin mansap havuzunda kuyruksuyu içerisinde yol aldıkça enerjisini kaybederek yatak malzemesine yapacağı etkinin azalacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.17. Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm

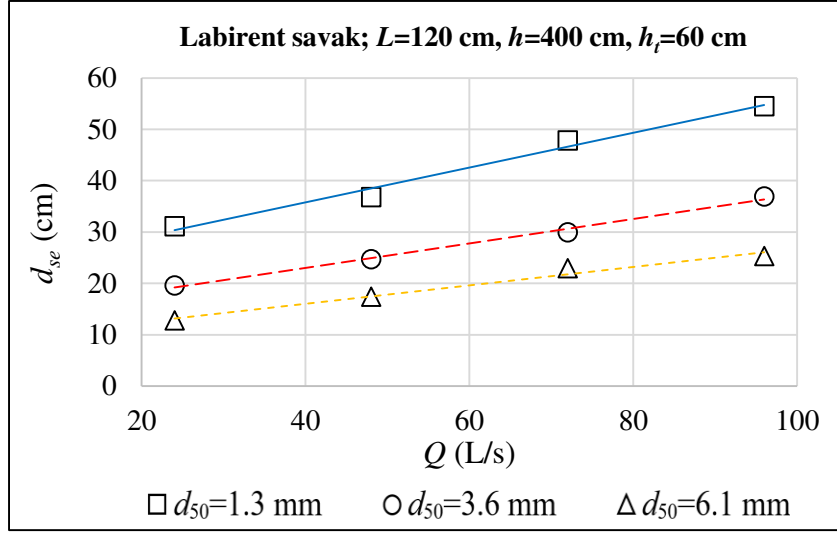


Şekil 4.18. Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm



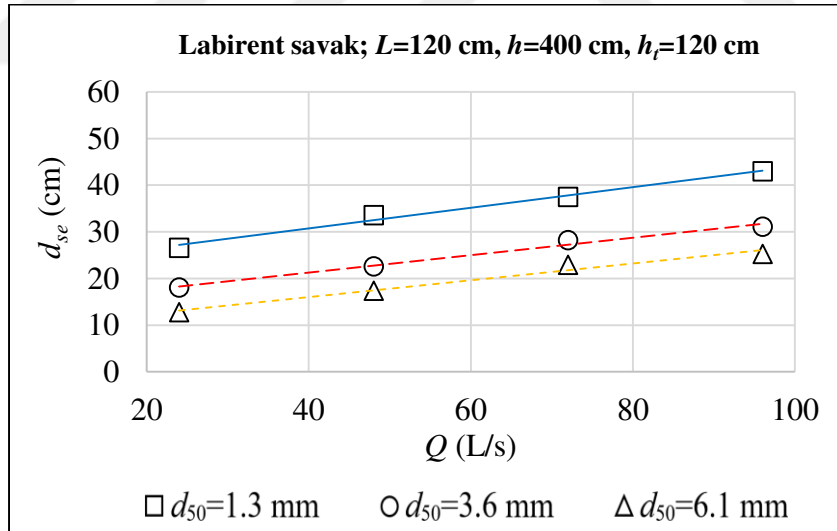
Şekil 4.19. Labirent savaklarda farklı düşü yükseklikleri için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $h_t=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm.

Şekil 4.20’de I. deney düzeneği prototip şartları için serbest düşülü labirent savağın mansabındaki oyulma $h_t=60$ cm için farklı medyan dane çapları dikkate alınarak incelenmiştir. Burada özellikle $d_{50}=1.3$ mm için yapılan deneylerde debi artışıyla denge oyulma derinliğinde daha belirgin bir artış görülebilmektedir.



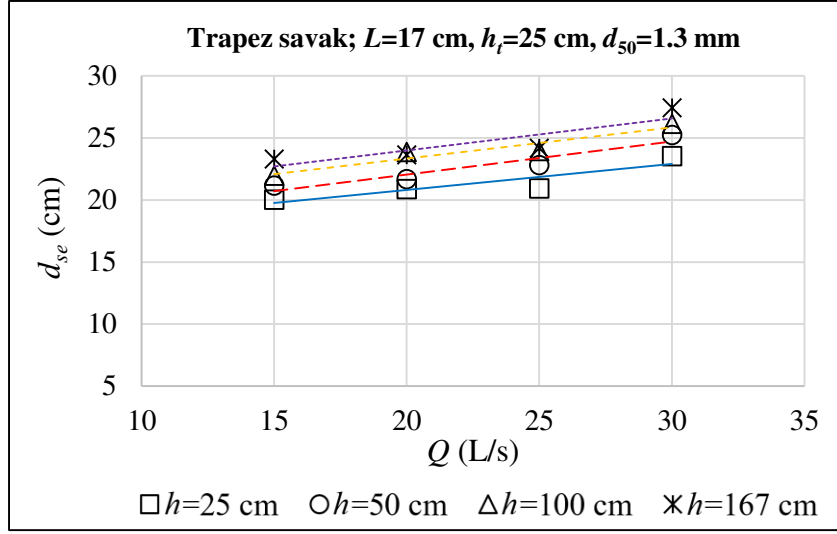
Şekil 4.20. Labirent savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=120$ cm, $h=400$ cm, $h_t=60$ cm

Şekil 4.21’de ise Şekil 4.20’den farklı olarak kuyruksuyu derinliği $h_t=120$ cm için testler gerçekleştirilmiştir. Kuyruksuyu derinliğinin %100 arttırılmasıyla denge oyulma derinliklerinde yaklaşık ortalama % 30 azalma olduğu söylenebilmektedir.



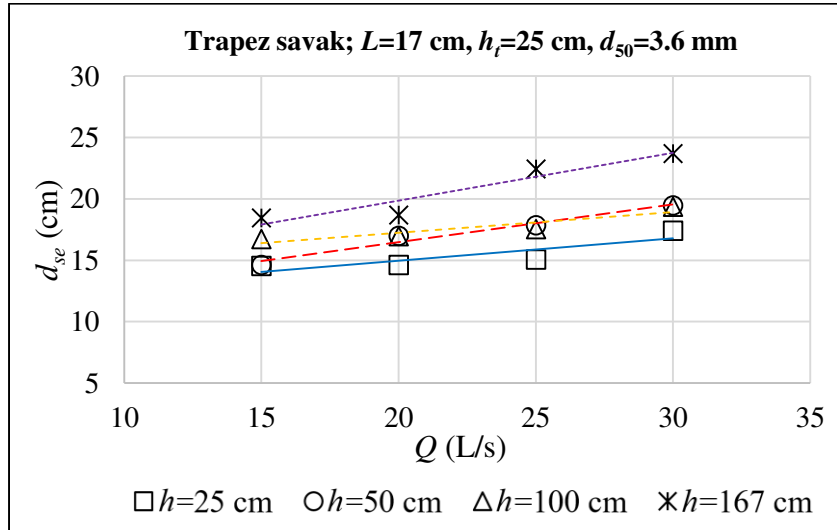
Şekil 4.21. Labirent savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=120$ cm, $h=400$ cm, $h_t=120$ cm

Şekil 4.22-4.29’da serbest düşülü trapez savağın mansabındaki oyulma derinliğinin debi ile değişimi görülmektedir. Şekil 4.22’de debi ve düşü yüksekliğinin artmasıyla denge oyulma derinliğinin arttığı görülmektedir. Düşü yüksekliğinin artmasıyla denge oyulma derinliğinin artış oranının, diğer savaklarla yapılan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında çok fazla olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.22. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm

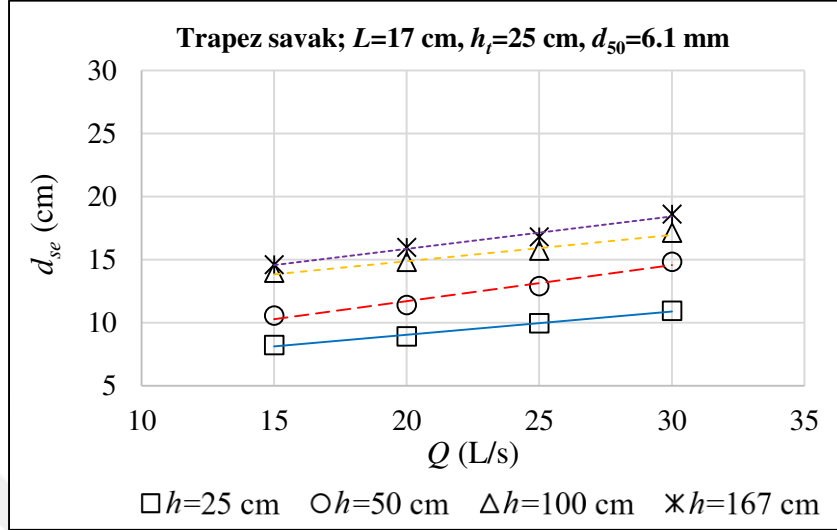
Şekil 4.23'te Şekil 4.22'den farklı olarak $d_{50}=3.6$ mm alınmıştır. Medyan dane çapının yaklaşık 2.7 kat artırılmasıyla denge oyulma derinliklerinin yaklaşık ortalama %20 azaldığı söylenebilmektedir. Ayrıca, $h=167$ cm için yapılan deneylerde düşü yüksekliğinin artmasıyla denge oyulma derinliğinde daha belirgin bir artış gözlenmiştir. Bunun nedeninin jet hızının artması ve trapez savağın akım karakteristikleri olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.23. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm

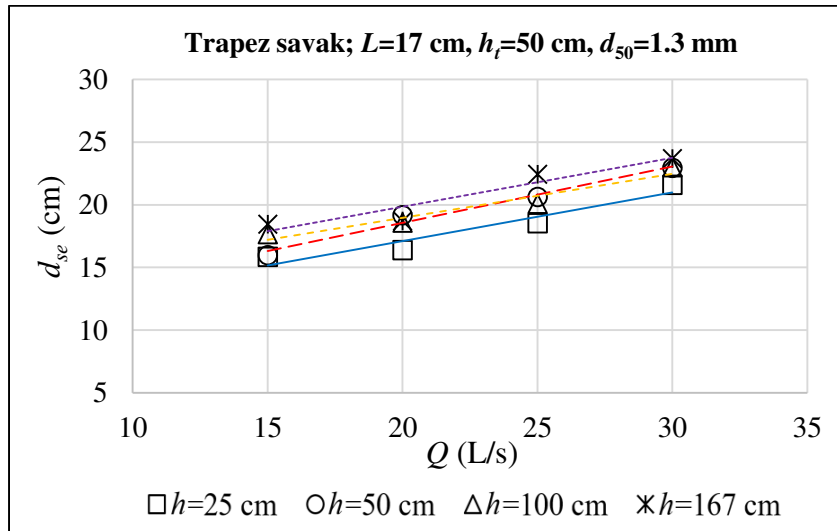
Şekil 4.24'te test edilen en yüksek medyan dane çapına sahip taban malzemesi için yürütülen deneylere ait debi ile denge oyulma derinliğinin değişimi sunulmaktadır. İlgili grafiklere bakılarak

medyan dane ϕ ının yaklaşık 4.7 kat artırılmasıyla ($d_{50}=1.3$ mm ve 6.1 mm için) denge oyulma derinliklerinin yaklaşık ortalama %50 azaldığı söylenebilmektedir.

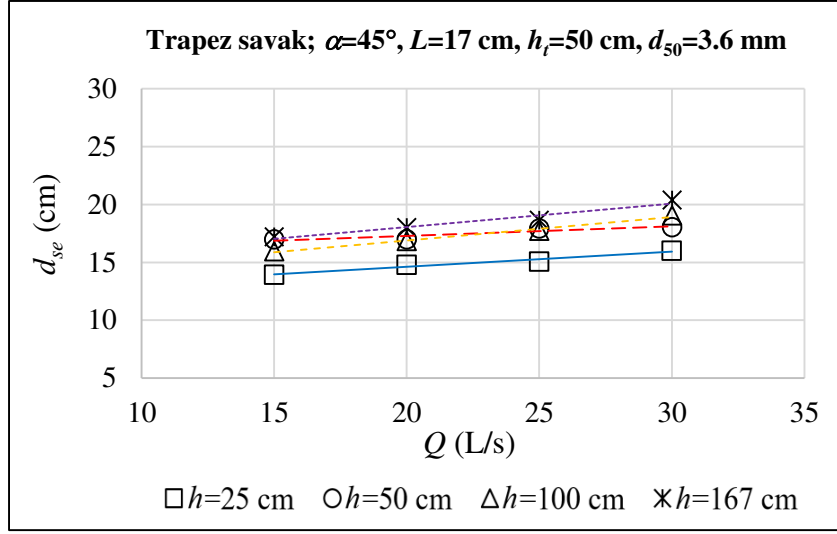


Şekil 4.24. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm

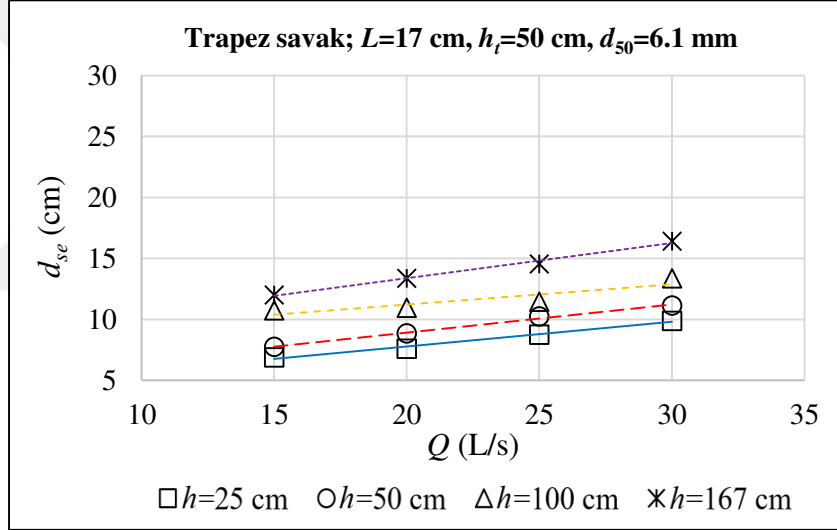
Şekil 4.25-27’de serbest düşülü trapez savakların mansabında oluşan denge oyulma derinliklerinin debi ile değişimi $h_t=50$ cm ve farklı d_{50} değerleri için incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.22-24 ile uyumlu olup, denge oyulma derinliklerinde $d_{50}=1.3$ mm için yaklaşık ortalama % 25, $d_{50}=3.6$ mm ve $d_{50}=6.1$ mm için yaklaşık ortalama % 10 azalma olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.25. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm



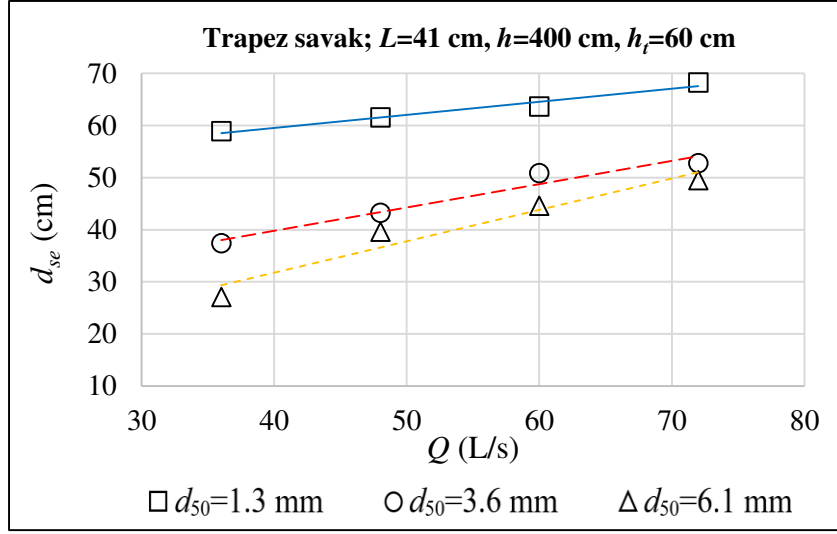
Şekil 4.26. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=17$ cm, $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm



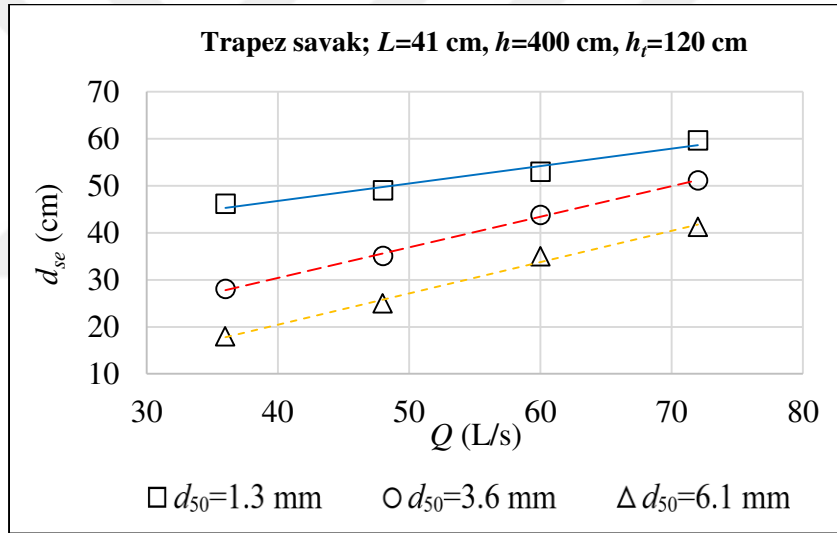
Şekil 4.27. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $\alpha=45^\circ$, $L=17$ cm, $h_t=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm

Şekil 4.28’de I. deney düzeneği prototip şartları için serbest düşülü trapez savağın mansabındaki oyulma $h_t=60$ cm için farklı medyan dane çapları dikkate alınarak incelenmiştir.

Şekil 4.29’da ise Şekil 4.28’den farklı olarak kuyruksuyu derinliği $h_t=120$ cm için testler gerçekleştirilmiştir. Kuyruksuyu derinliğinin %100 arttırılmasıyla denge oyulma derinliklerinde yaklaşık ortalama % 30 azalma olduğu söylenebilmektedir.



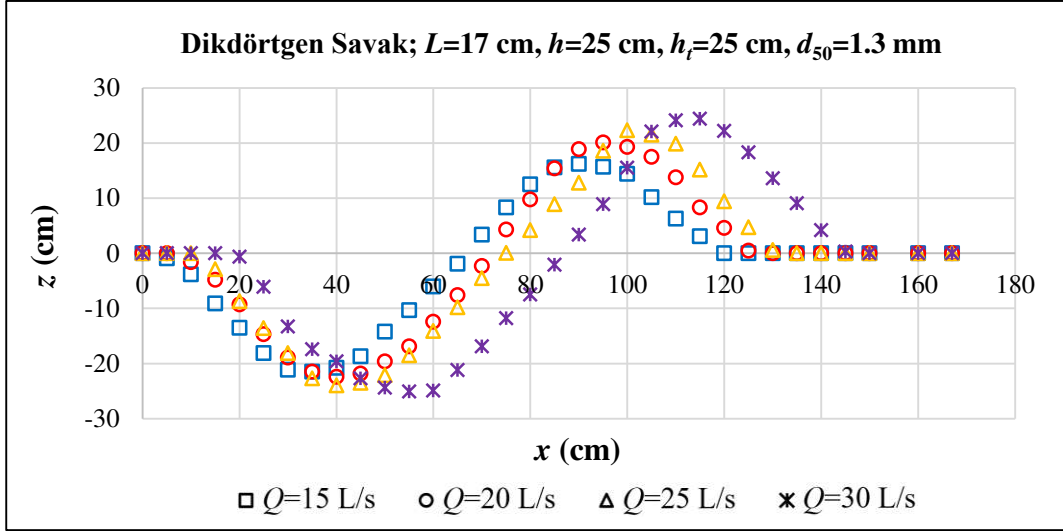
Şekil 4.28. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=41$ cm, $h=400$ cm, $h_f=60$ cm



Şekil 4.29. Trapez savak için debinin oyulma derinliği ile değişimi: $L=41$ cm, $h=400$ cm, $h_f=120$ cm

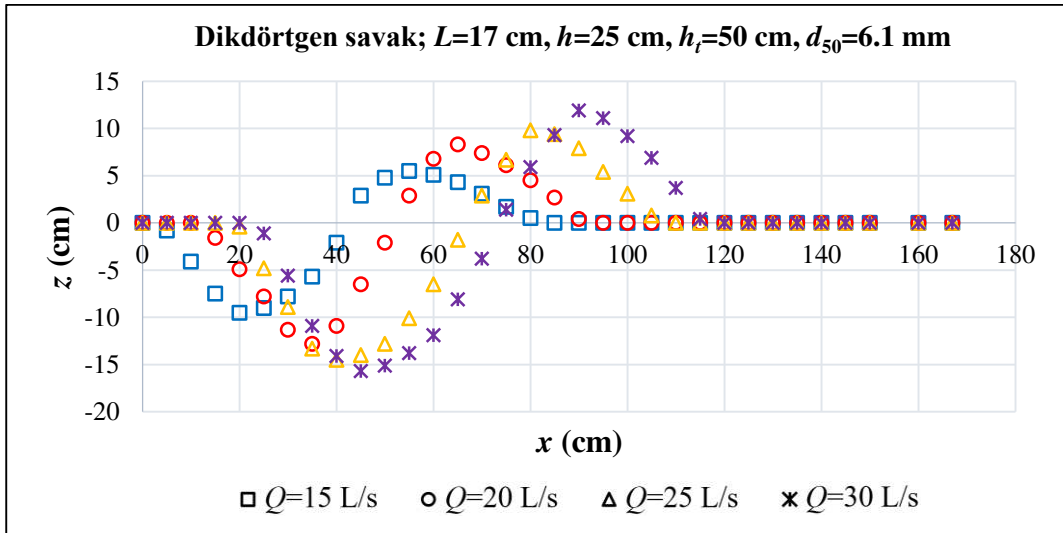
4.5. Yatak malzemesinin deney sonundaki boykesitleri

Şekil 4.30-4.37’de mansap havuzunda oluşan oyulma geometrisine ait boykesitler verilmiştir. Debinin artması ile oyulma çukuru hacmi de artmıştır. Oluşan çukur ve tepe savak merkezinden daha ileri kaymış ve boyutlarında artış gözlenmiştir. Labirent savaklarda oyulma çukuru hidrolik yapıya daha yakın olmuştur. Diğer savak türlerinde böyle bir durum ile karşılaşılmamıştır. Söz konusu serbest düşülü savaklarla yürütülen deneylerin sonunda yatak malzemesinin boykesitlerinin tamamı Ek-3’te sunulmaktadır.



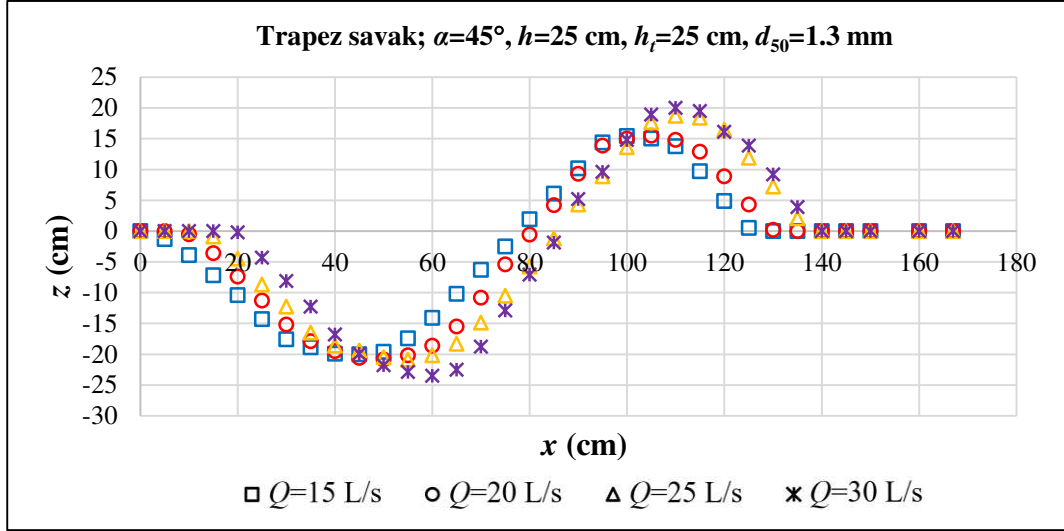
Şekil 4.30. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatak malzemesinin boykesiti

Dikdörtgen savak için boykesitler incelendiğinde oyulma çukuru ve tepe boyutlarının diğerlerine nazaran daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 4.31’de Şekil 4.30’dan farklı olarak kuyruksuyu derinliğinin %100 artmasıyla oyulma çukuru ve tepe boyutlarında da büyük oranda azalma olduğu gözlenmiştir.

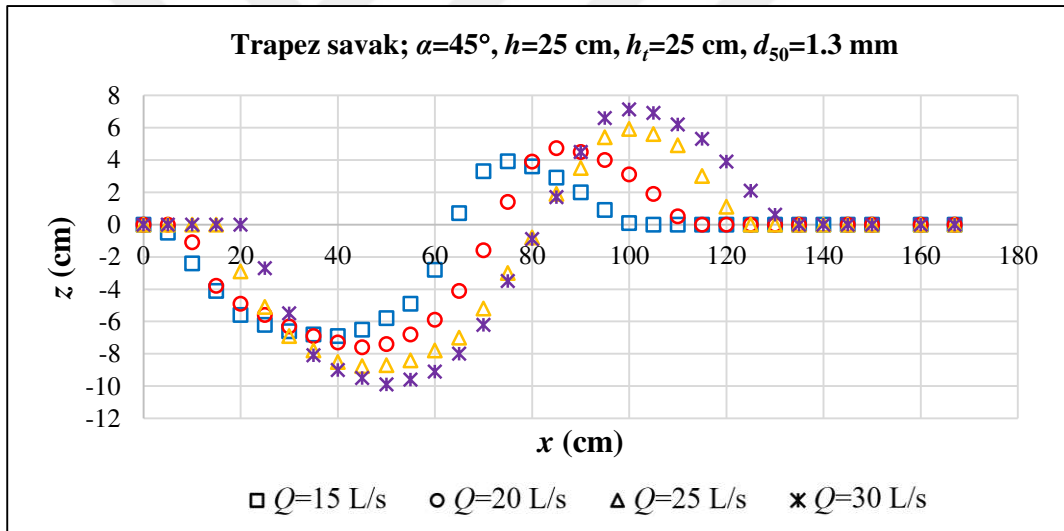


Şekil 4.31. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti

Şekil 4.32 ve 4.33’te trapez savaklar için yürütülen deneyler sonunda oluşan boykesitlerin dikdörtgen savaklara ait boykesitlere yakın bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde kuyruksuyu derinliğinin artmasıyla oyulma çukur ve tepe boyutlarında azalma gözlemlenmiştir.

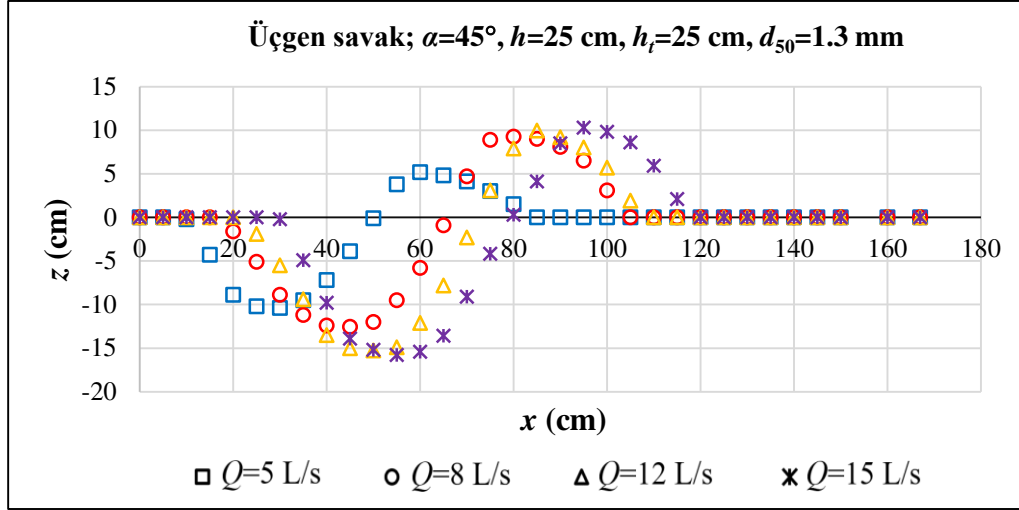


Şekil 4.32. Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti

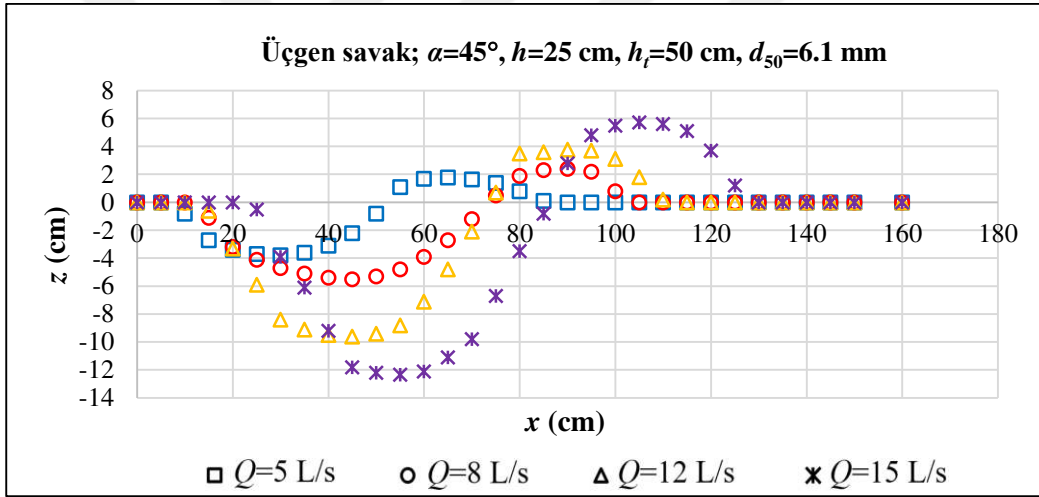


Şekil 4.33. Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti

Şekil 4.34 ve 4.35'te üçgen savağa ait boykesitler incelendiğinde, oyulma çukuru ve tepe boyutlarının dikdörtgen ve trapez savaklara göre oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, üçgen savaklarda tepe açısının dar olmasından dolayı ($\alpha=45^\circ$) yüksek debilerde çalışamamasıdır. Ayrıca, kuyruksuyunun artmasıyla oyulma çukuru ve tepe boyutlarında diğer savaklara göre daha az bir farkla azalma gözlenmiştir. Bu durum, üçgen savaklarda oyulma üzerinde en etkili parametrenin debi olabileceğini işaret etmektedir.

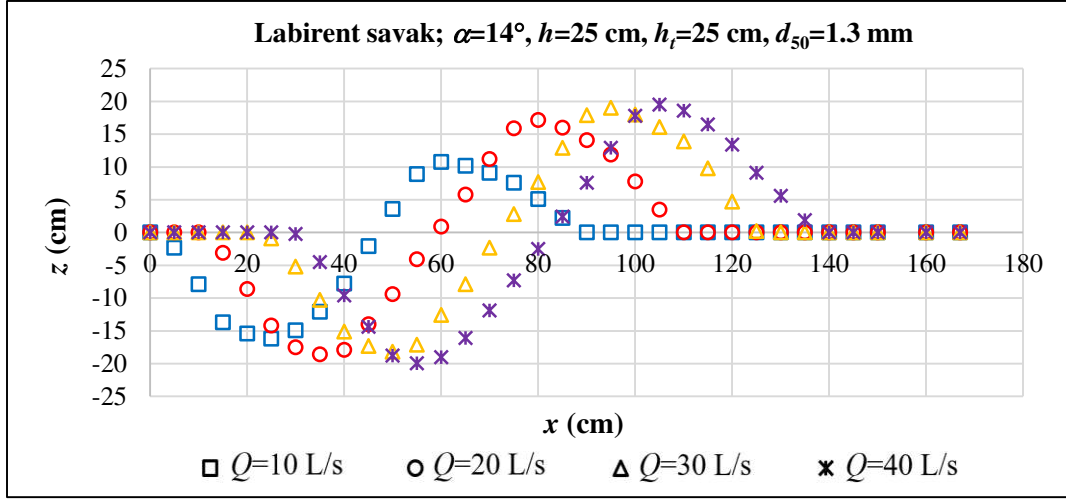


Şekil 4.34. Serbest düşümlü üçgen savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti

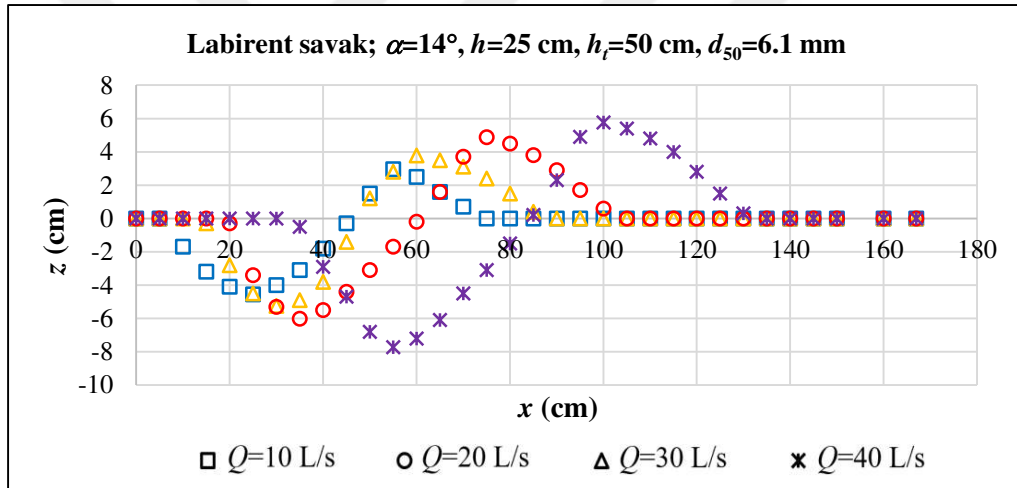


Şekil 4.35. Serbest düşümlü üçgen savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti

Şekil 4.36 ve 4.37’de labirent savaklar için yatak malzemesi boykesitleri sunulmuştur. Şekil 4.37 tüm deneyler içinde en düşük oyulma çukuru ve tepe boyutlarının oluştuğu boykesit olarak görülmektedir. Buna göre mansap tabanında malzeme taşınımının en az olduğu durumun minimum düşü yüksekliği ($h=25$ cm), maksimum kuyuksuyu derinliği ($h_t=50$ cm) ve maksimum medyan dane çapı ($d_{50}=6.1$ mm) için meydana geldiği söylenebilmektedir. Ayrıca aynı akım şartları için tabandaki oyulma çukuru ve tepe boyutlarının minimum değerleri, labirent savak testleri sonucunda elde edilen boykesitlerde görülmüştür.



Şekil 4.36. Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatak malzemesinin boykesiti



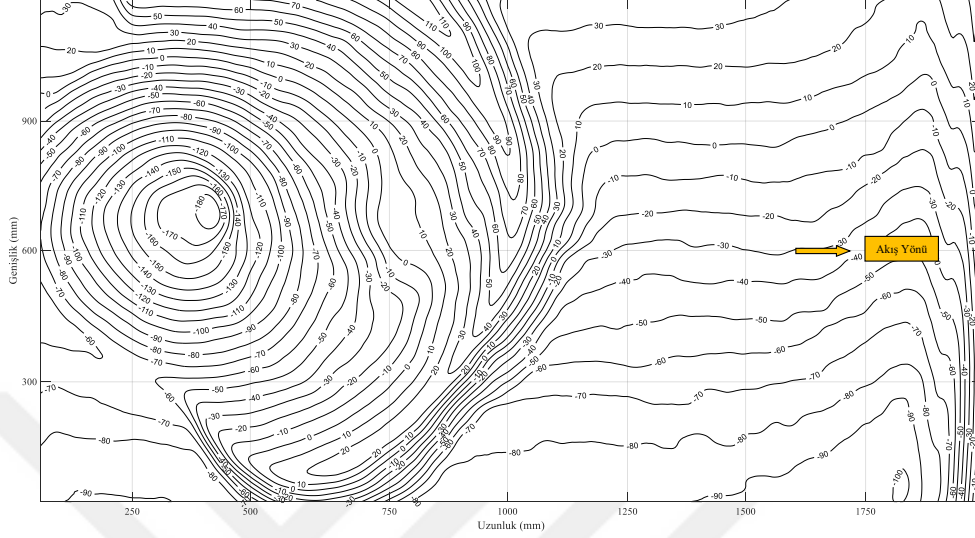
Şekil 4.37. Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti

4.6. Taban topografyaları

İlgili deneylerin sonunda, özel bir kamera sayesinde görüntü alınarak taban topografyaları belirlenebilmiştir. Daha sonra Matlab yazılımı kullanılarak görüntü işleme sayesinde yatağın eş yükselti eğrileri çizilmiştir.

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi dikdörtgen savaktan dökülen su maksimum oyulma çukurunu, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 40 cm ileride meydana getirmiştir. Oyulma çukurunun tam simetrik olarak meydana gelmediği görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 18 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzemenin ileriye doğru

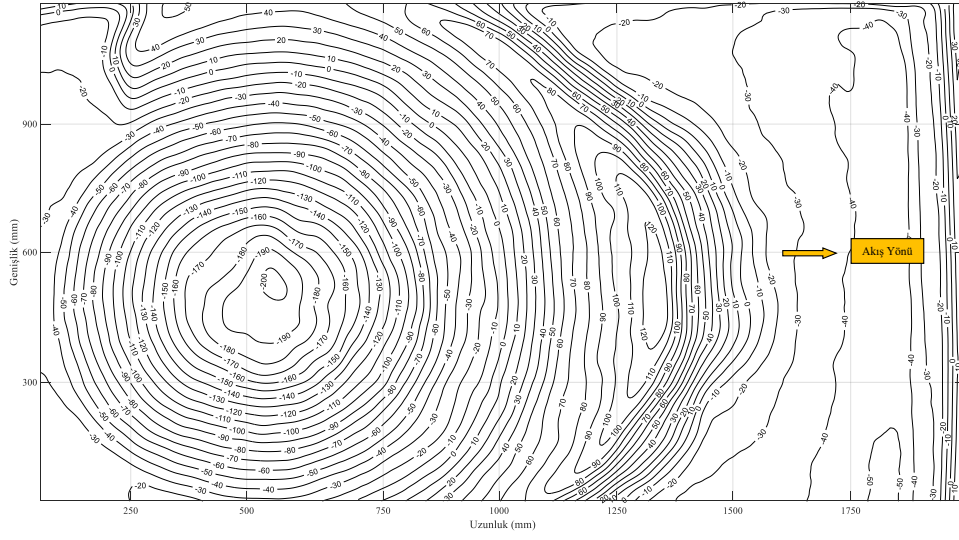
taşınmasıyla en fazla 11 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.



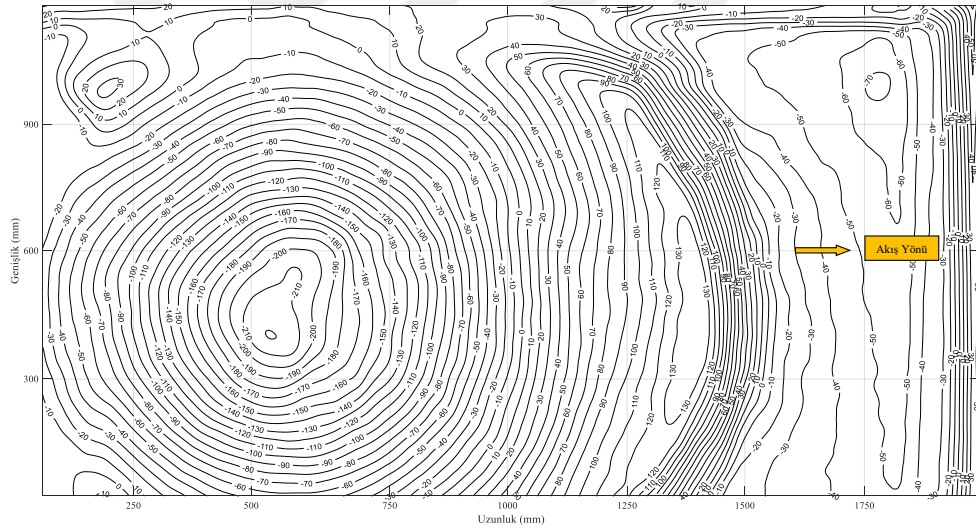
Şekil 4.38. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.39'a göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 53 cm ileride meydana getirmiştir. Oyulma çukurunun tam simetrik olarak meydana gelmediği ve sağ sahile doğru bir miktar kaydığı görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 20 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 90 cm taşınmış ve en fazla 12 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.

Şekil 4.40'ta dikdörtgen savaktan dökülen suyun maksimum oyulma çukurunu, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 55 cm ileride meydana getirdiği görülmüştür. Oyulma çukurunun tam simetrik olarak meydana gelmediği görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 21 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzemenin ileriye doğru taşınmış ve en fazla 13 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.

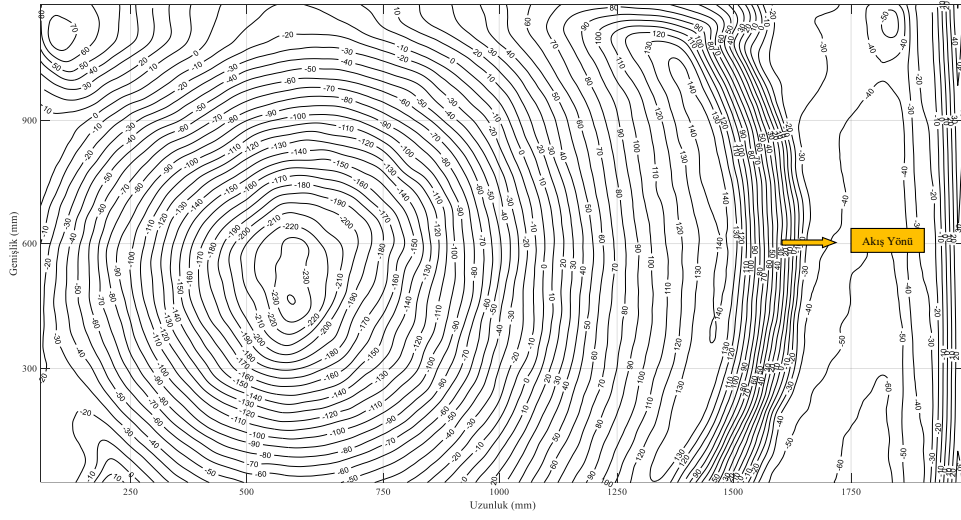


Şekil 4.39. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası



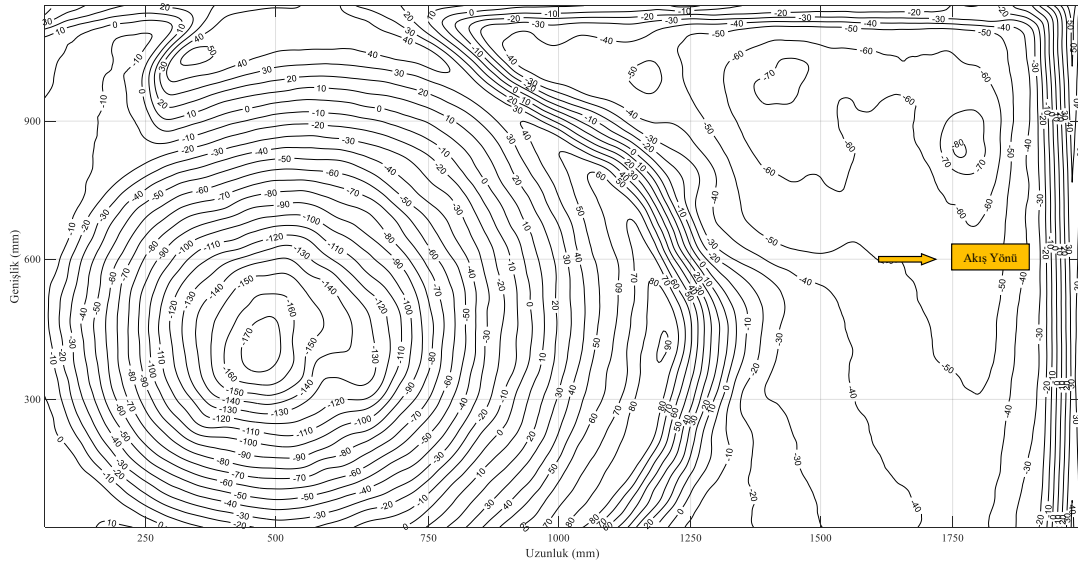
Şekil 4.40. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.41’de oyulma çukurunun, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 59 cm ileride meydana getirdiği görülmüştür. Oyulma çukuru tam simetrik olarak meydana gelmemiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 24 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzemenin ileriye doğru taşınmış ve en fazla 14 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.



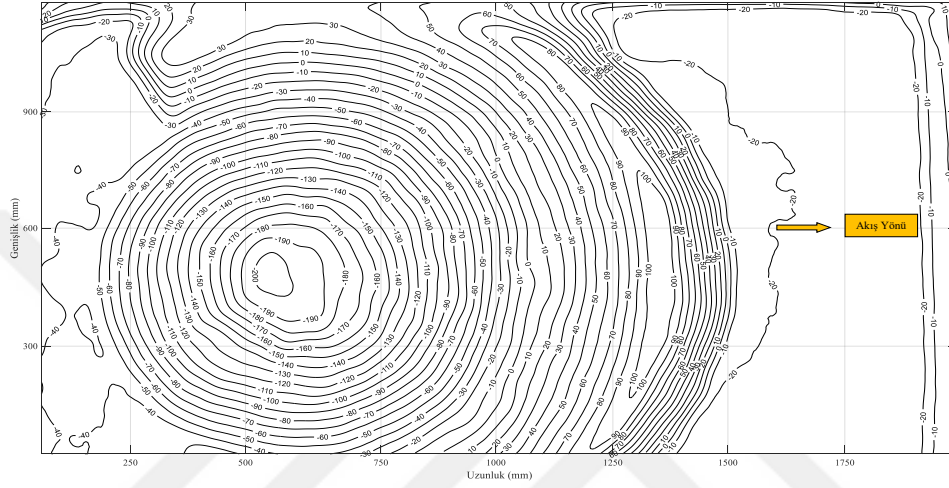
Şekil 4.41. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.42'ye göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 47 cm ileride meydana getirmiştir. Oyulma çukurunun tam simetrik olarak meydana gelmediği ve sağ sahile doğru bir miktar kaydığı görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 17 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 70 cm taşınmış ve en fazla 8 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.



Şekil 4.42. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

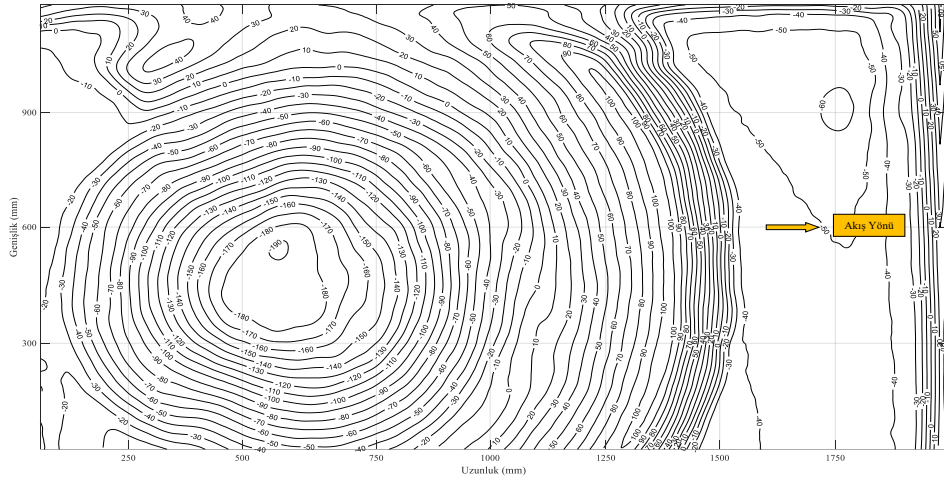
Şekil 4.43'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 55 cm ileride meydana getirmiştir. Oyulma çukurunun tam simetrik olarak meydana gelmediği ve sağ sahile doğru bir miktar kaydığı görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 20 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 83 cm taşınmış ve en fazla 10 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.



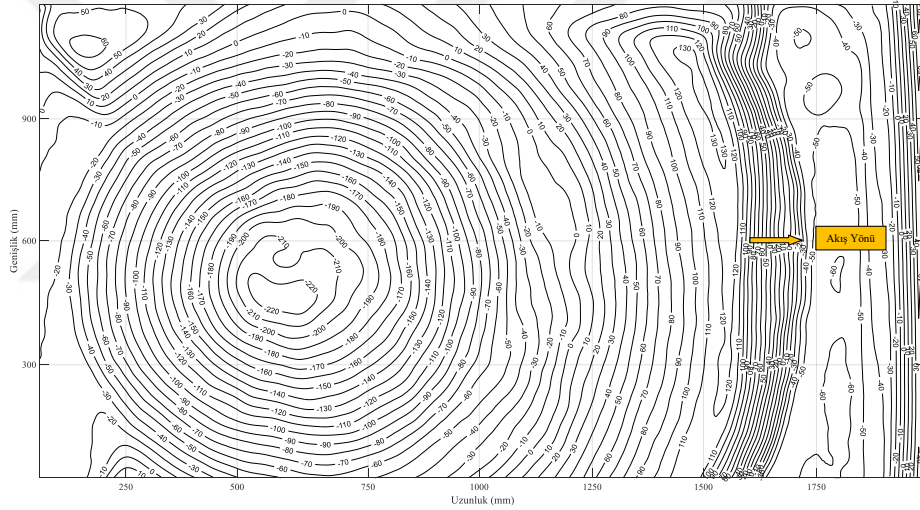
Şekil 4.43. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.44'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 57 cm ileride meydana getirmiştir. Oyulma çukurunun tam simetrik olarak meydana gelmediği ve sağ sahile doğru bir miktar kaydığı görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 18 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 80 cm taşınmış ve en fazla 10 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.

Şekil 4.45'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 58 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 22 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 100 cm taşınmış ve en fazla 13 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.



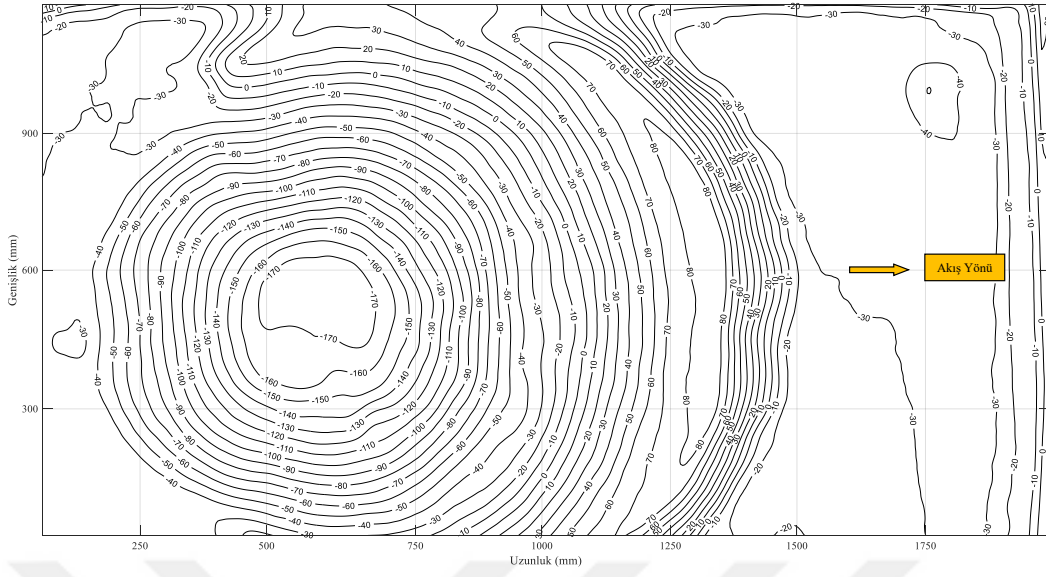
Şekil 4.44. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası



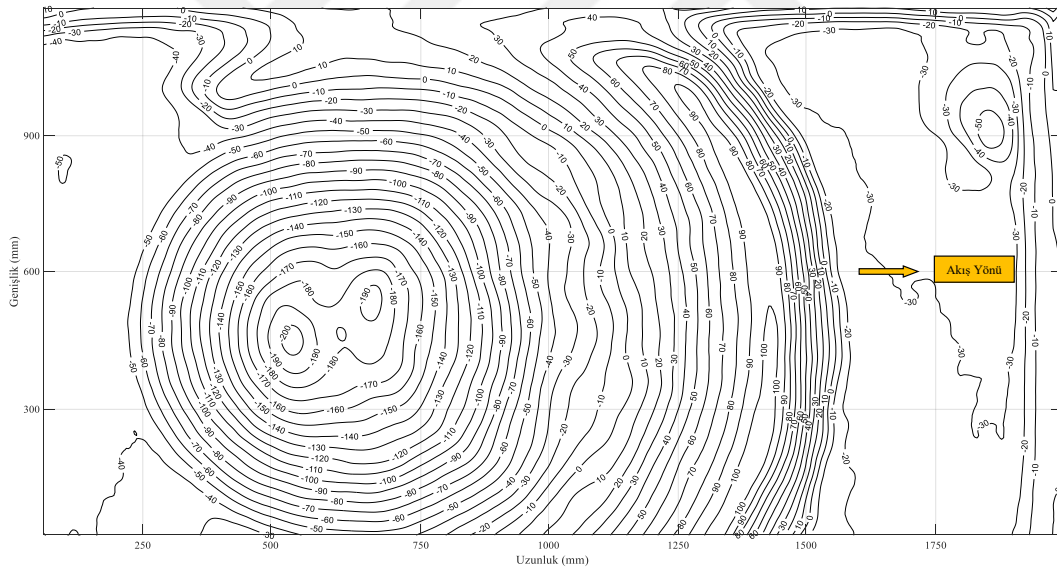
Şekil 4.45. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.46'ya göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 62 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 17 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 76 cm taşınmış ve en fazla 8 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.

Şekil 4.47'ye göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 62 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 19 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 85 cm taşınmış ve en fazla 10 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.

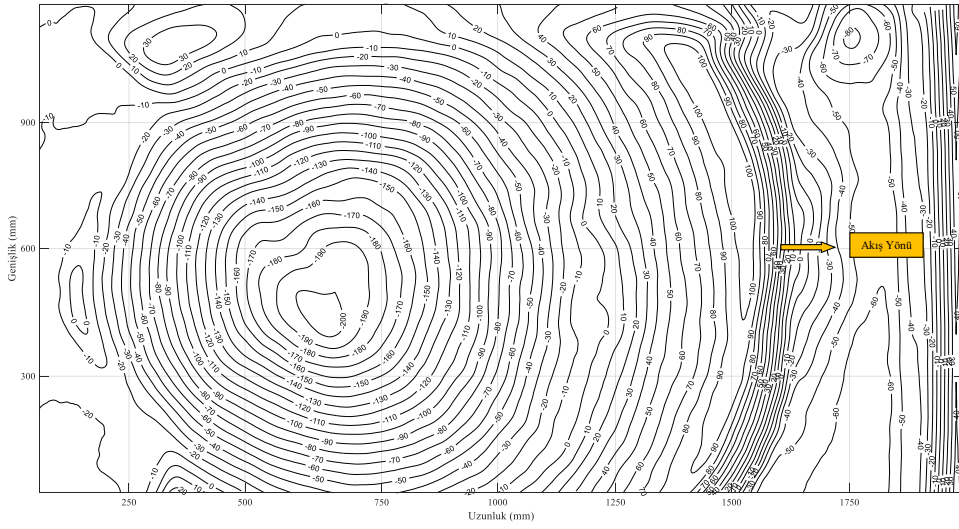


Şekil 4.46. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası



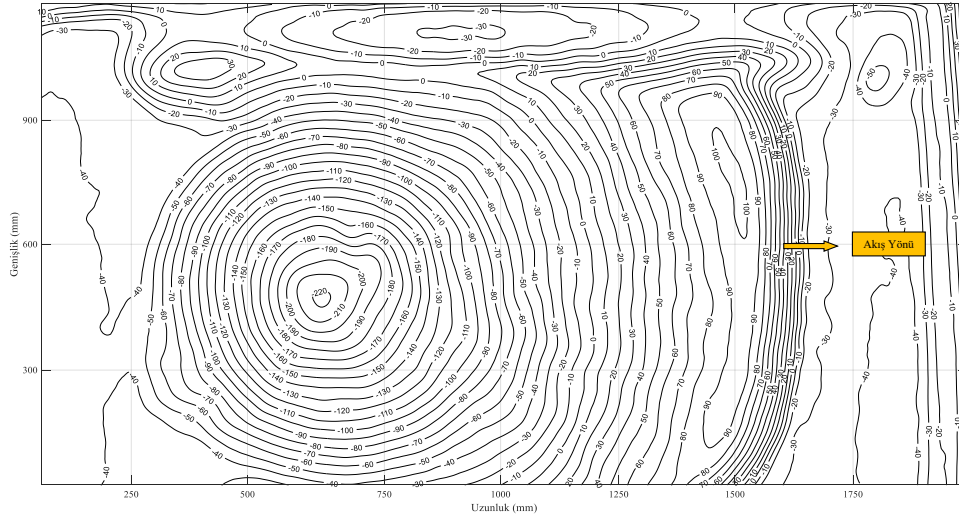
Şekil 4.47. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.48'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 66 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 20 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 85 cm taşınmış ve en fazla 10 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.

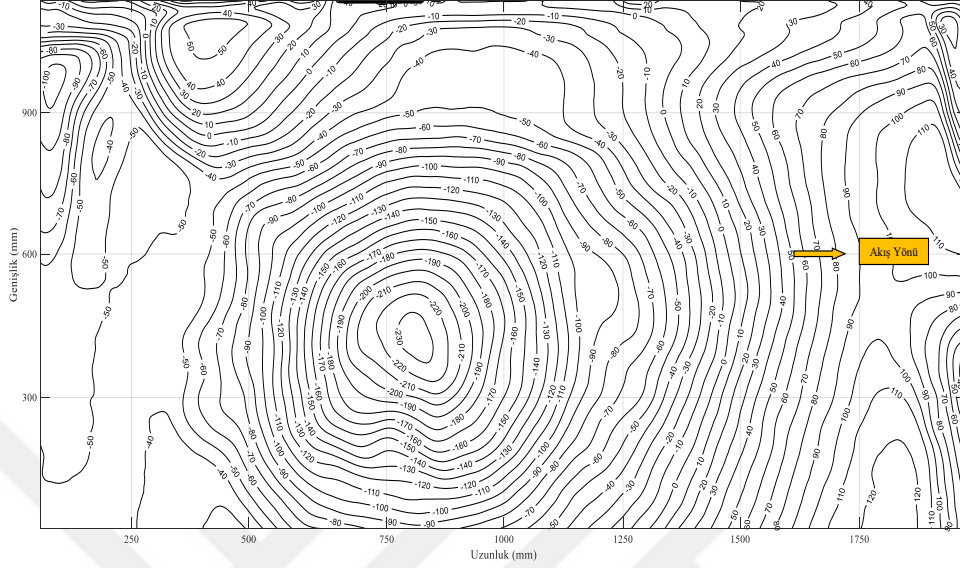


Şekil 4.48. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.49'a göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 67 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 21 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan ileriye doğru yaklaşık olarak 91 cm taşınmış ve en fazla 10 cm yüksekliğinde kum yığını oluşmuştur. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.

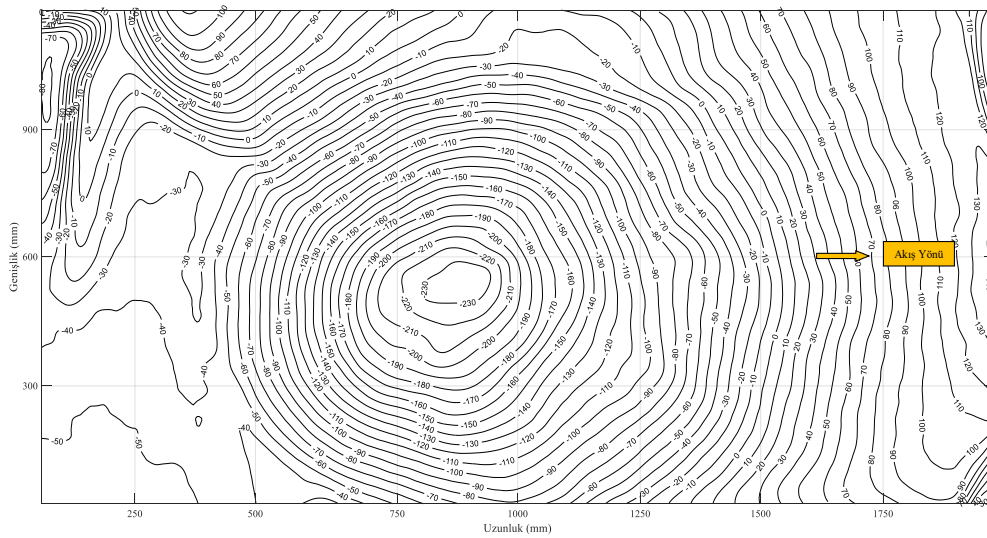


cm olarak gerçekleşmiştir. Oluşan kum yığını oyulma haznesinin genişliği boyunca hilal şeklinde yayılmıştır.



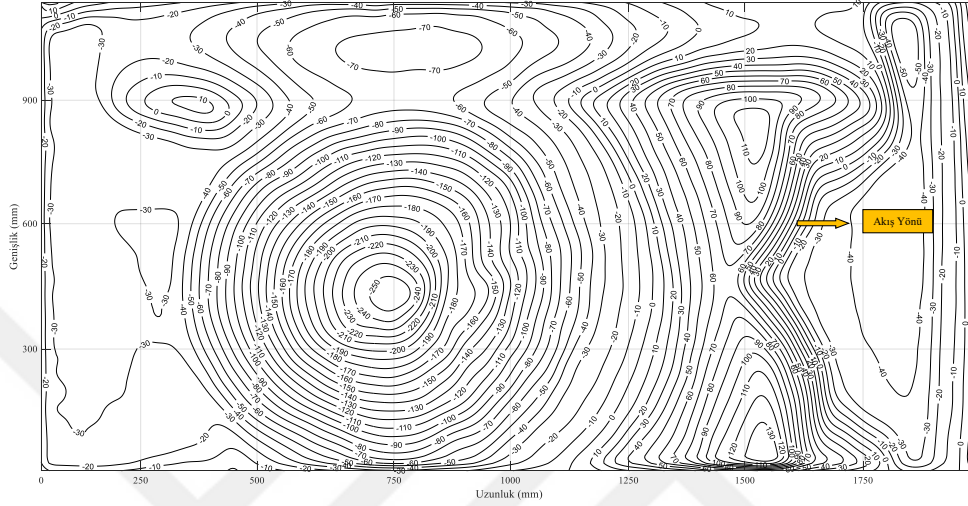
Şekil 4.50. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.51'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 92 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 23 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



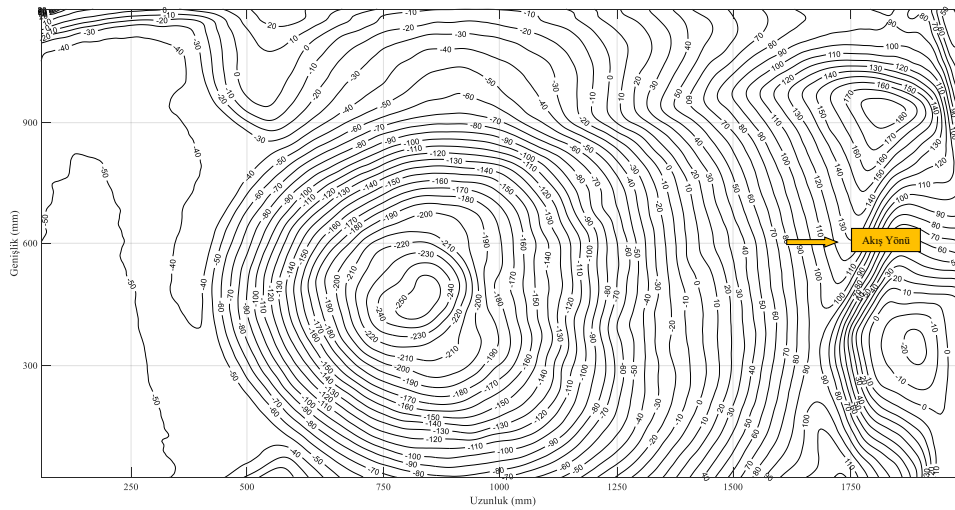
Şekil 4.51. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.52'ye göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 67 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 24 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



Şekil 4.52. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyuksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

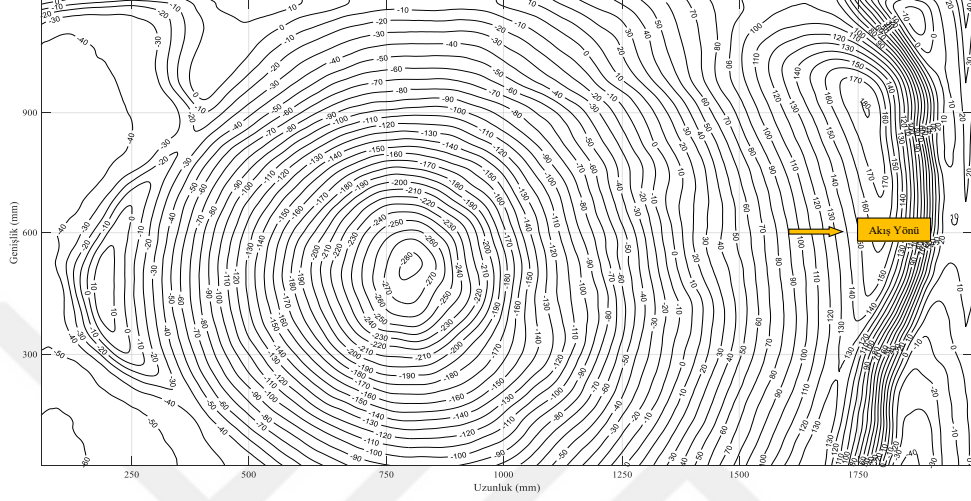
Şekil 4.53'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 82 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 25 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



Şekil 4.53. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 25 cm kuyuksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 20 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

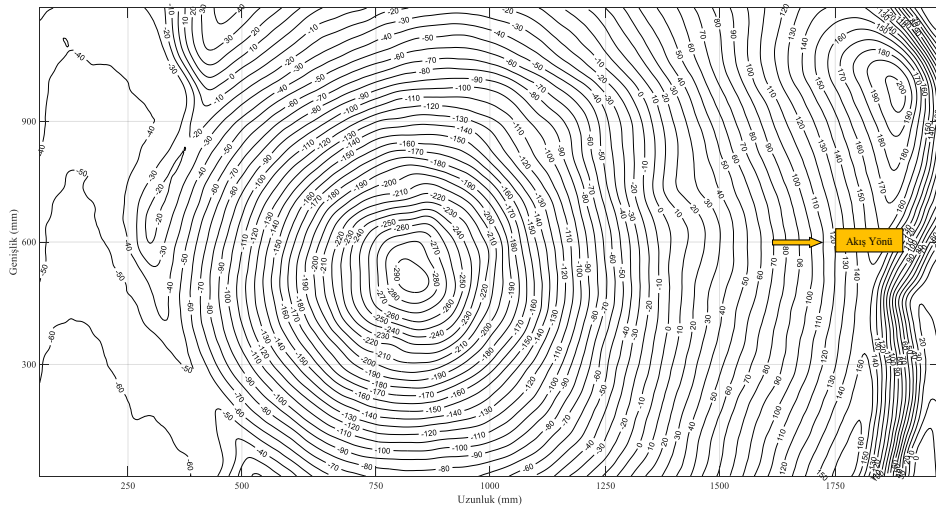
Şekil 4.55'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 98 cm ileride meydana gelmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 24 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.

Şekil 4.56'ya göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 85 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 27 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



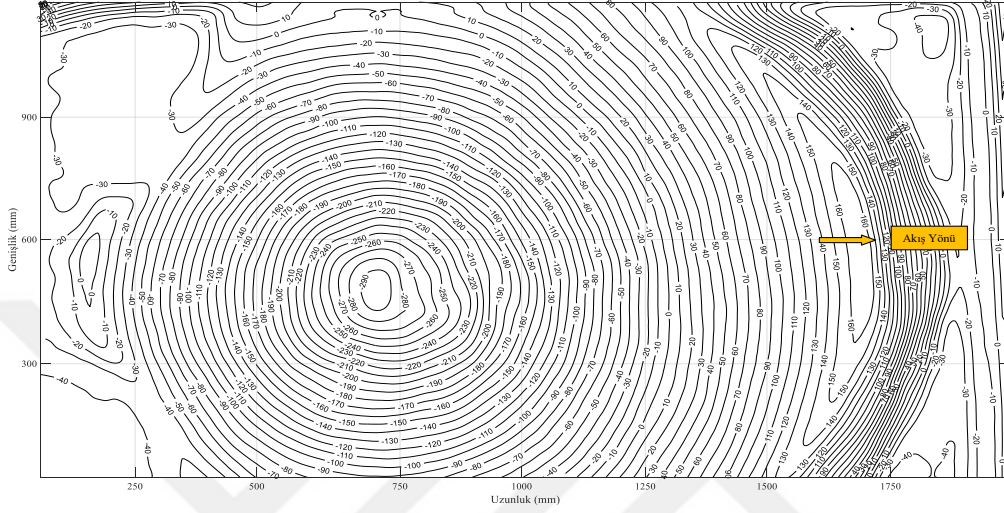
Şekil 4.56. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.57'ye göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 82 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 28 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



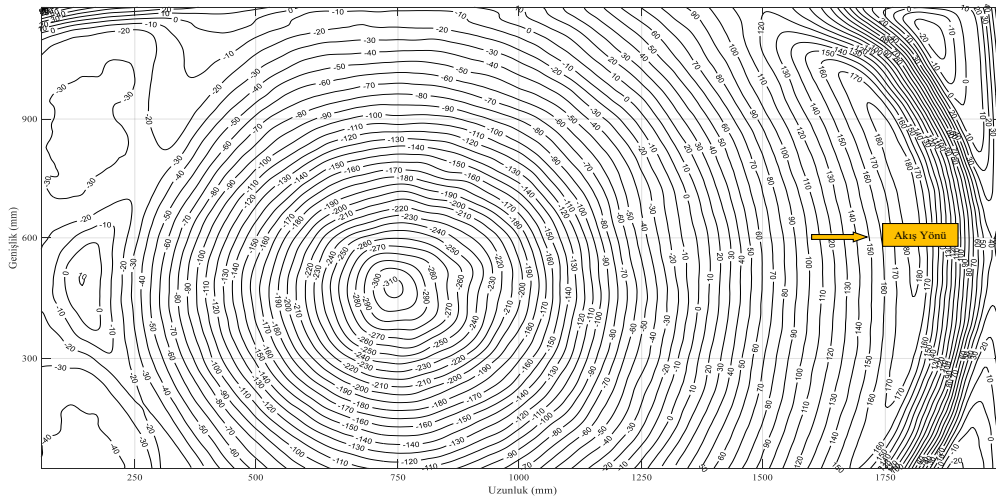
Şekil 4.57. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.58'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 65 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 28 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



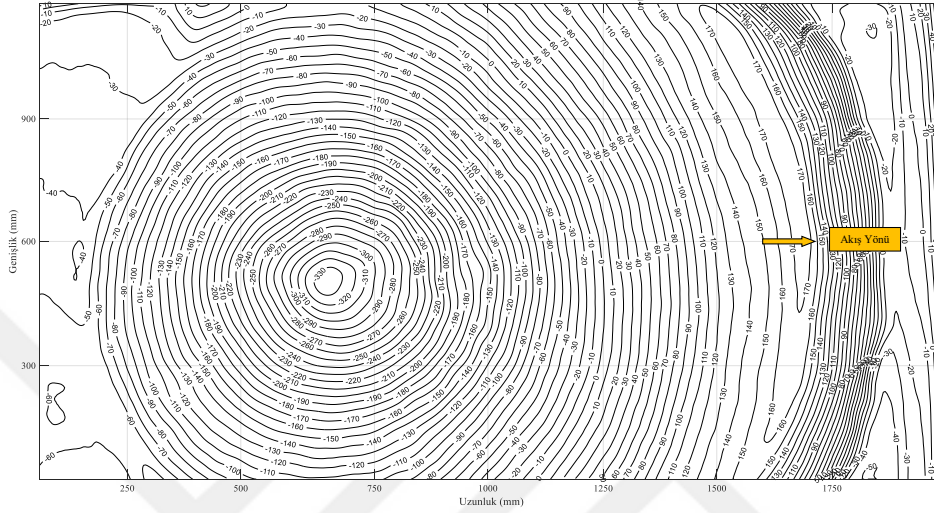
Şekil 4.58. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.59'a göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 75 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 30 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



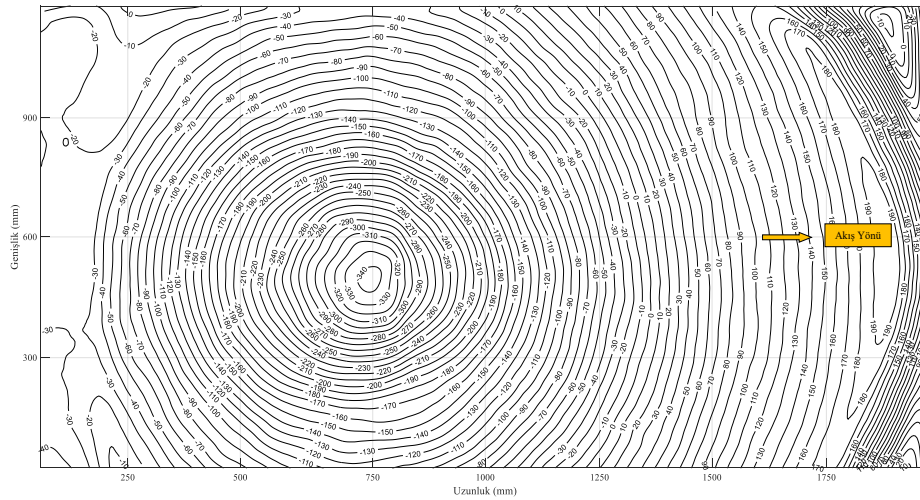
Şekil 4.59. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.60'a göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 66 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 32 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



Şekil 4.60. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 30 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.61'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 75 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 33 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



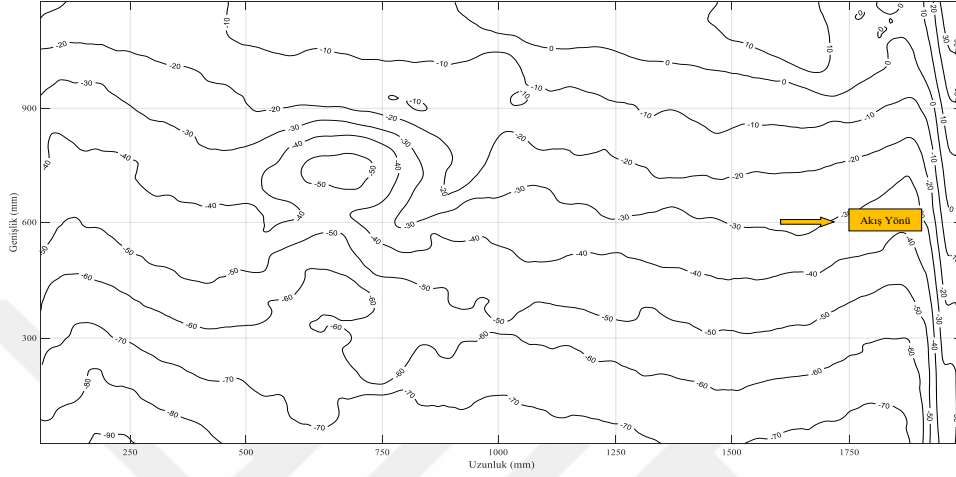
Şekil 4.61. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 25 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

İnk deði ni yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

The figure is a topographic map of the Akçay Yöresi area. It features contour lines representing elevation, with values ranging from 10 to 170 meters. The map is overlaid with a coordinate grid. The vertical axis is labeled 'G enişlik (mm)' (Latitude in mm) with values 300, 600, and 900. The horizontal axis is labeled 'Boyluk (mm)' (Longitude in mm) with values 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, and 1750. A yellow arrow points to the 'Akçay Yöresi' label, which is located at approximately 1650 mm longitude and 650 mm latitude.

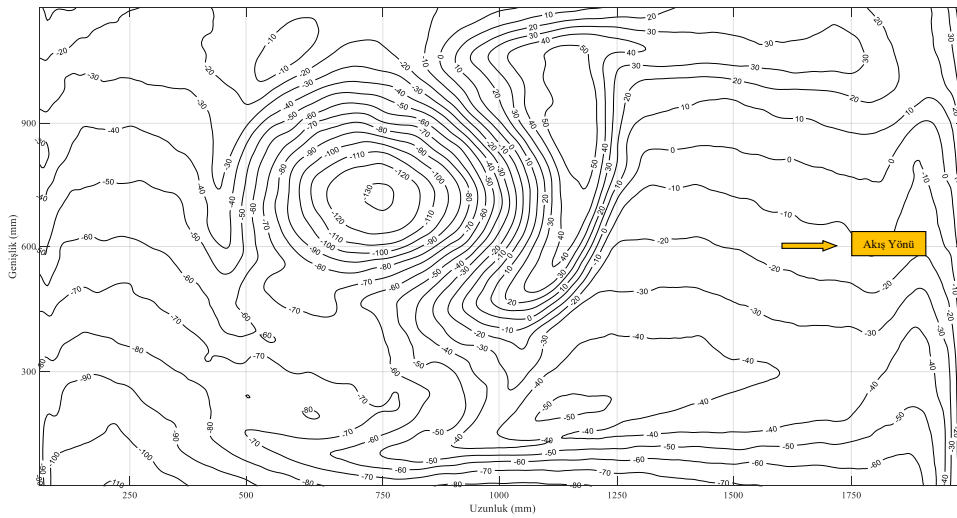
lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.66'ya göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 60 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 6 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



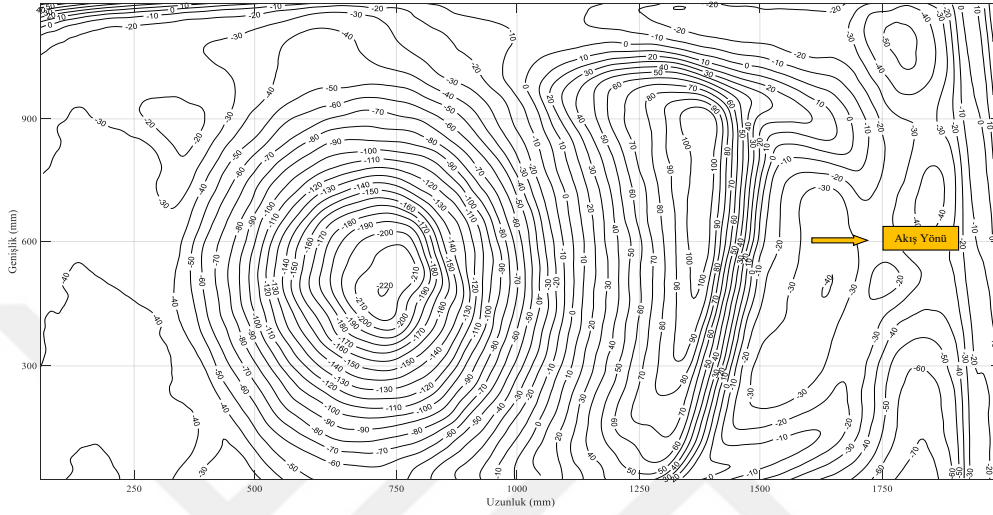
Şekil 4.66. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 25 cm düşü yüksekliği ve 5 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.67'ye göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 74 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 13 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



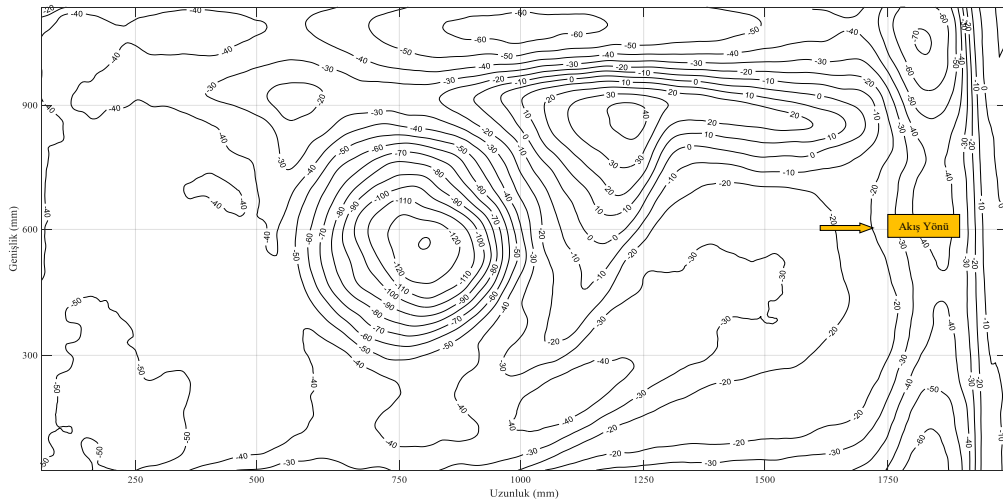
Şekil 4.67. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 5 L/s'lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.68'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 72 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 21 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



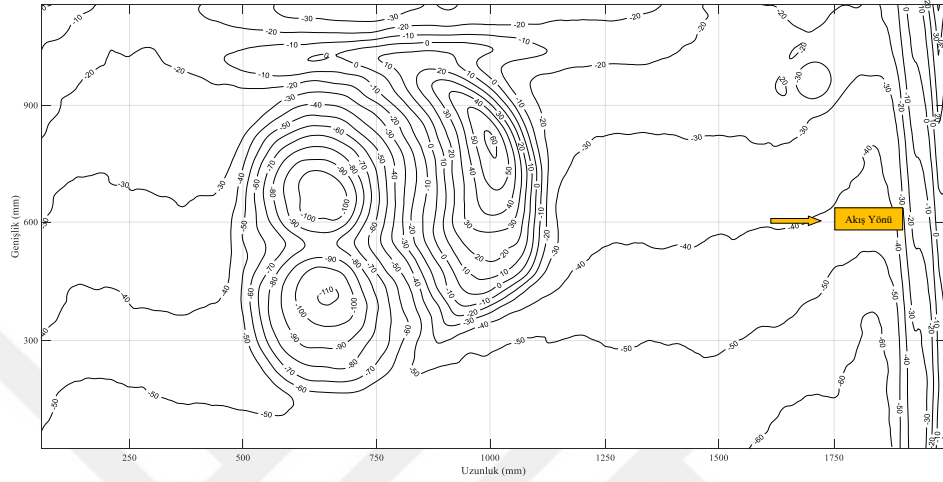
Şekil 4.68. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 8 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.69'a göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 77 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 12 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



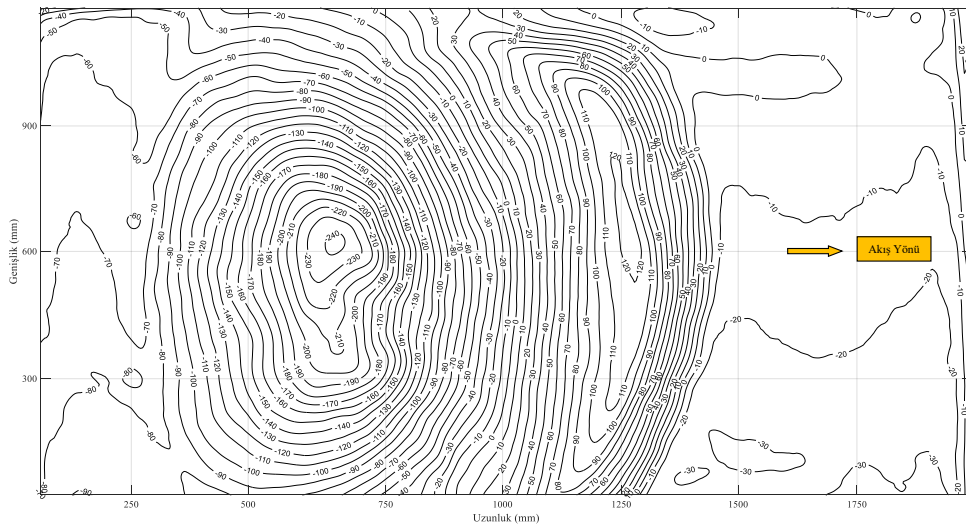
Şekil 4.69. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.70'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 65 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 11 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



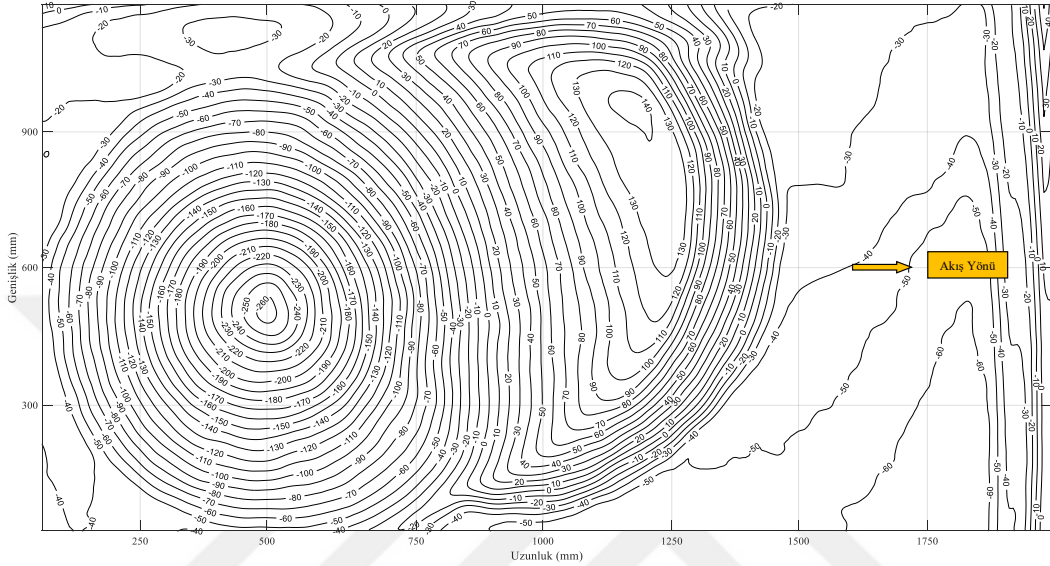
Şekil 4.70. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 100 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.71'e göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 68 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 23 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



Şekil 4.71. 17 cm genişlikli dikdörtgen savak, 50 cm kuyruksuyu derinliği, 167 cm düşü yüksekliği ve 5 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

Şekil 4.72'ye göre, maksimum oyulma çukuru, oyulma haznesinin başlangıcından itibaren yaklaşık olarak 50 cm ileride meydana getirmiştir. Maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak 25 cm olarak gerçekleşmiştir. Oyulan malzeme maksimum oyulmanın olduğu noktadan oyulma haznesinin kenarlarına doğru yayılmıştır.



Şekil 4.72. $\alpha=45^\circ$ açılı üçgen savak, 25 cm kuyruksuyu derinliği, 50 cm düşü yüksekliği ve 15 L/s lik debi ile yapılan deney sonucunda oluşan oyulma topografyası

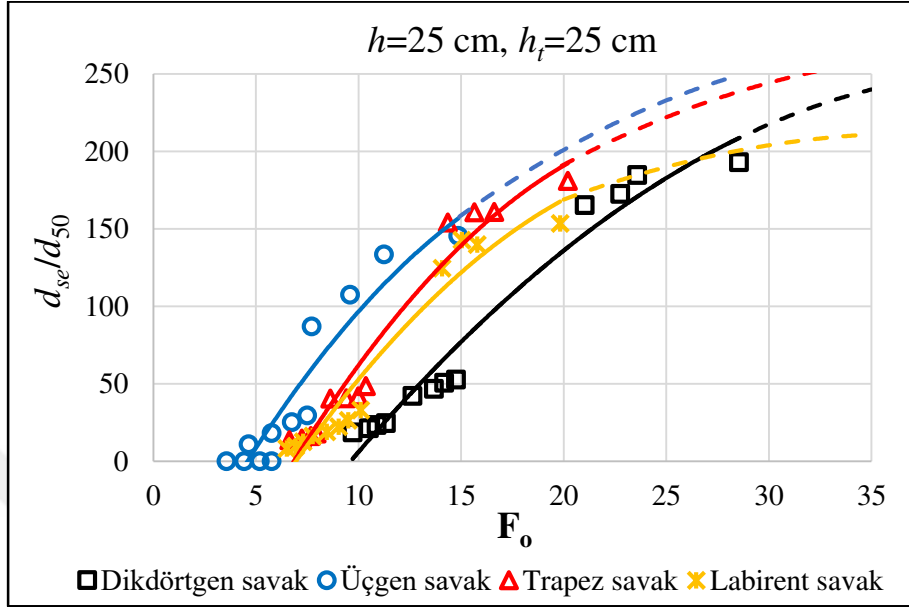
4.7. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin densimetrik Froude sayısı ile değişimi

Densimetrik Froude sayısı (F_o) serbest düşülü savakların mansabındaki oyulmanın karakteristiğini yorumlamada önemli bir yer tutmaktadır. Bu durum, mevcut çalışma kapsamında analiz edilmiş boyut analizinden de (Denklem 3.4) anlaşılmaktadır.

Şekil 4.73-4.80'de sabit kuyruksuyu derinliği ve sabit düşü yüksekliği için boyutsuz denge oyulma derinliklerinin densimetrik Froude sayısı ile değişimi sunulmaktadır. Genel olarak F_o 'ın artmasıyla d_{se}/y_o 'ın arttığı belirlenmiştir. Jet çarpma hızının, densimetrik Froude sayısının belirlenmesinde etkili bir parametre olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla jet çarpma hızının artmasıyla hem densimetrik Froude sayısının ve hem de denge oyulma derinliğinin artacağı aşikârdır. Dey ve Raikar (2007) çalışmasında da bu bakımdan mevcut çalışma sonuçlarına benzer bulgular elde edilmiştir. Bununla birlikte, düşü yüksekliklerinin artmasıyla F_o ve d_{se}/y_o için önemli derecede artış gözlemlenmiştir.

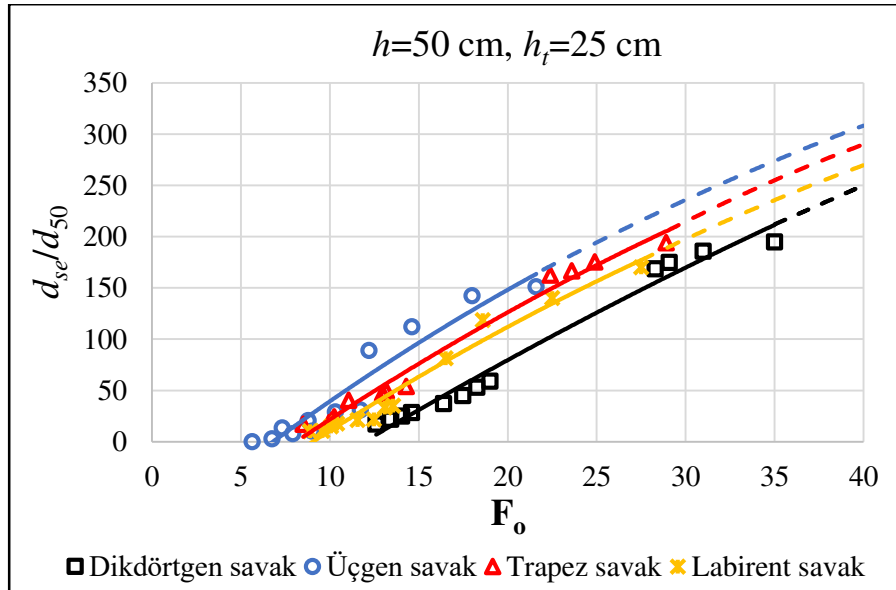
Şekil 4.73'te dikdörtgen, trapez ve üçgen savakların boyutsuz denge oyulma derinliği (d_{se}/d_{50}) artış eğilimlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Test edilen labirent savaklar için boyutsuz denge oyulma derinliği artışında yüksek F_o değerleri için asimptotata ulaşma durumu

görülmektedir. Bu durum labirent savaklar için yüksek jet çarpma hızlarında bile denge oyulma derinliğinin bazı akım şartları altında çok fazla değişmeyeceğini göstermektedir.



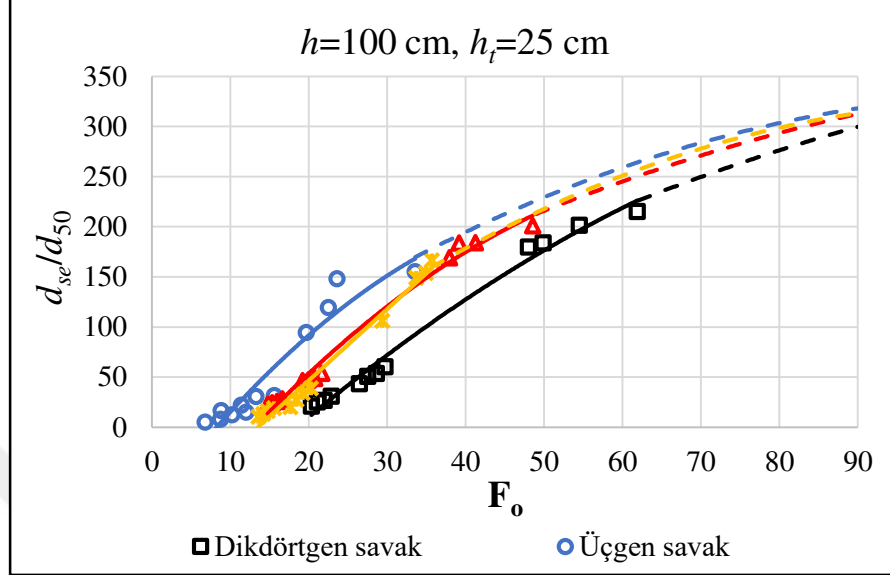
Şekil 4.73. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=25$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi

Şekil 4.74'te F_o değerlerinin artmasıyla boyutsuz denge oyulma derinliklerinde daha belirgin bir artış gözlenmiştir. Bütün savak türlerinde artış eğiliminin lineere yakın olduğu gözlemlenmiştir.



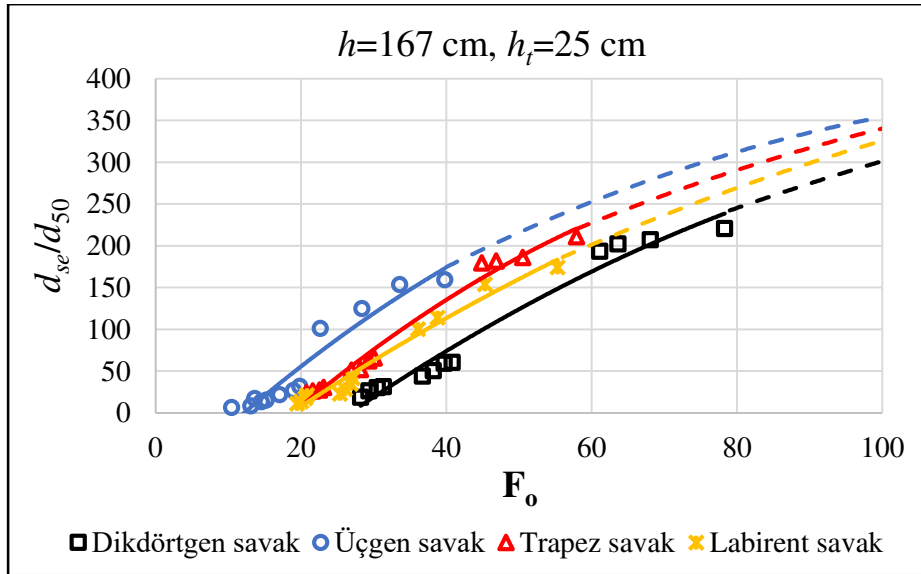
Şekil 4.74. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=50$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi

Şekil 4.75'te $h=100$ cm için Şekil 4.74'e göre yaklaşık 1.5-2 kat daha fazla F_o değerleri belirlenmiştir. Artış eğiliminin tüm savak türleri için hemen hemen aynı olduğu söylenebilmektedir.



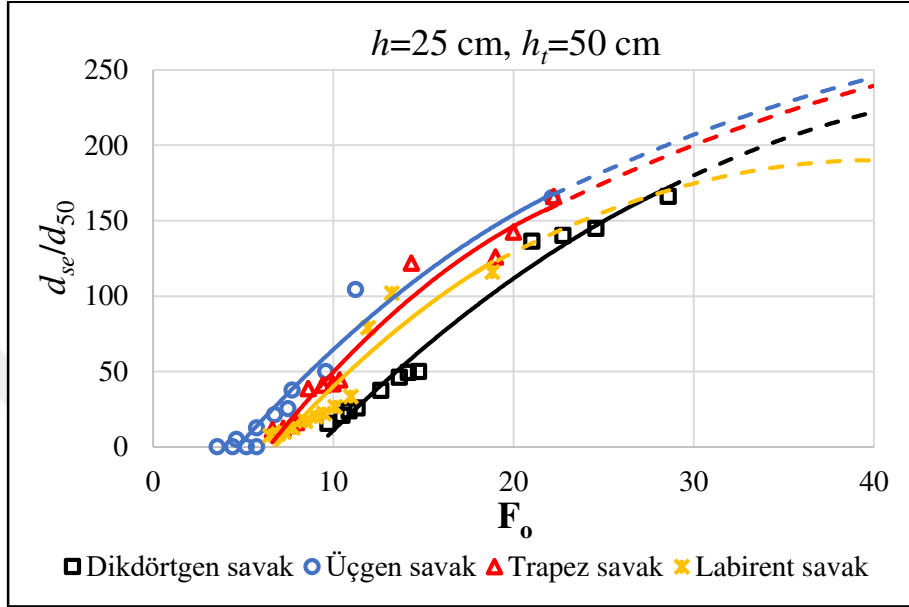
Şekil 4.75. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=100$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi

Şekil 4.76'da düşü yüksekliğinin artmasıyla yüksek oranda F_o değerleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak d_{se}/d_{50} değerlerinde de önemli bir artış gözlenmiştir. Tüm savak türlerinde artış eğilimi yaklaşık olarak aynı olup, en yüksek d_{se}/d_{50} değerlerinin dikdörtgen savaklar için vuku bulduğu görülebilmektedir.

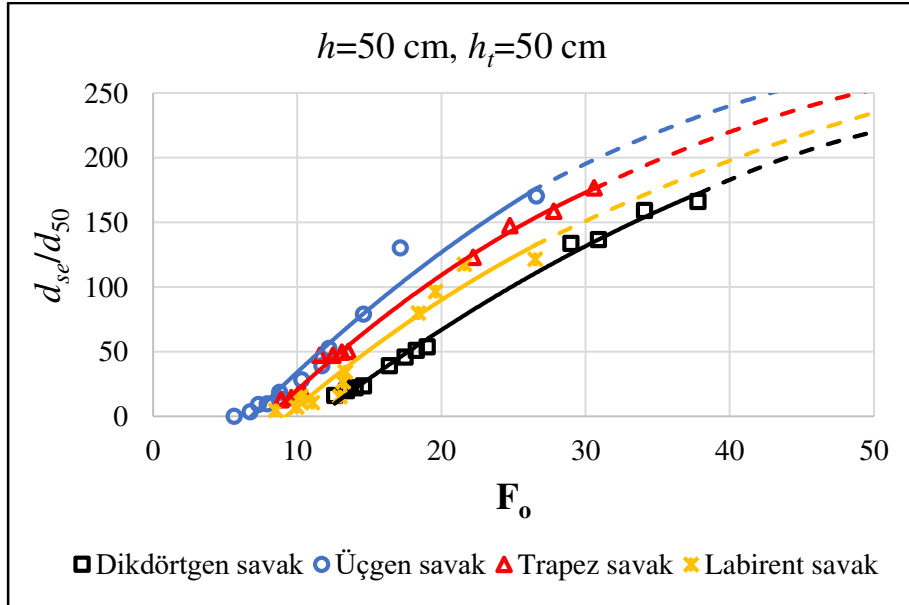


Şekil 4.76. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=167$ cm ve $h_t=25$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi

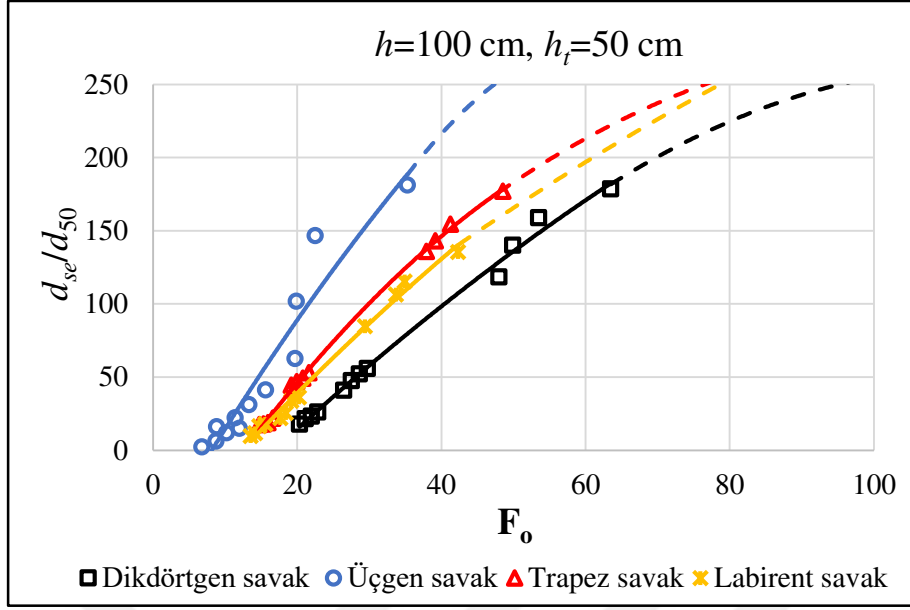
Şekil 4.77-4.80’de kuyruksuyu derinliğinin %100 oranında artırılmasıyla yaklaşık olarak Şekil 4.73-4.76’ya benzer F_o değerleri ve d_{se}/d_{50} değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, Benzer artış eğilimleri gözlemlenebilmektedir. Labirent savaktaki artış eğiliminin asimptota kavuşması, oyulma açısından kullanımının daha güvenli olacağını göstermektedir.



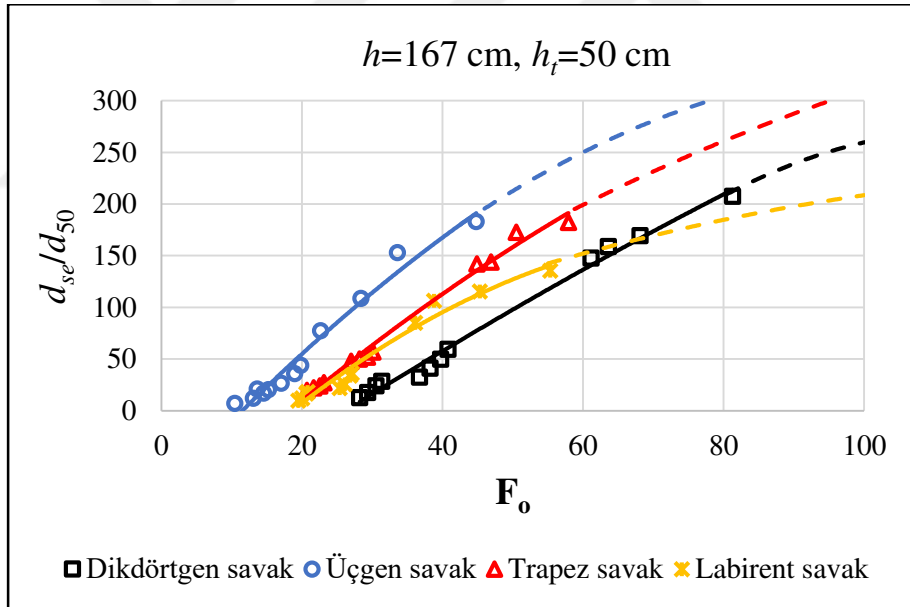
Şekil 4.77. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=25 \text{ cm}$ ve $h_t=50 \text{ cm}$ için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi



Şekil 4.78. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=50 \text{ cm}$ ve $h_t=50 \text{ cm}$ için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi



Şekil 4.79. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=100$ cm ve $h_t=50$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi

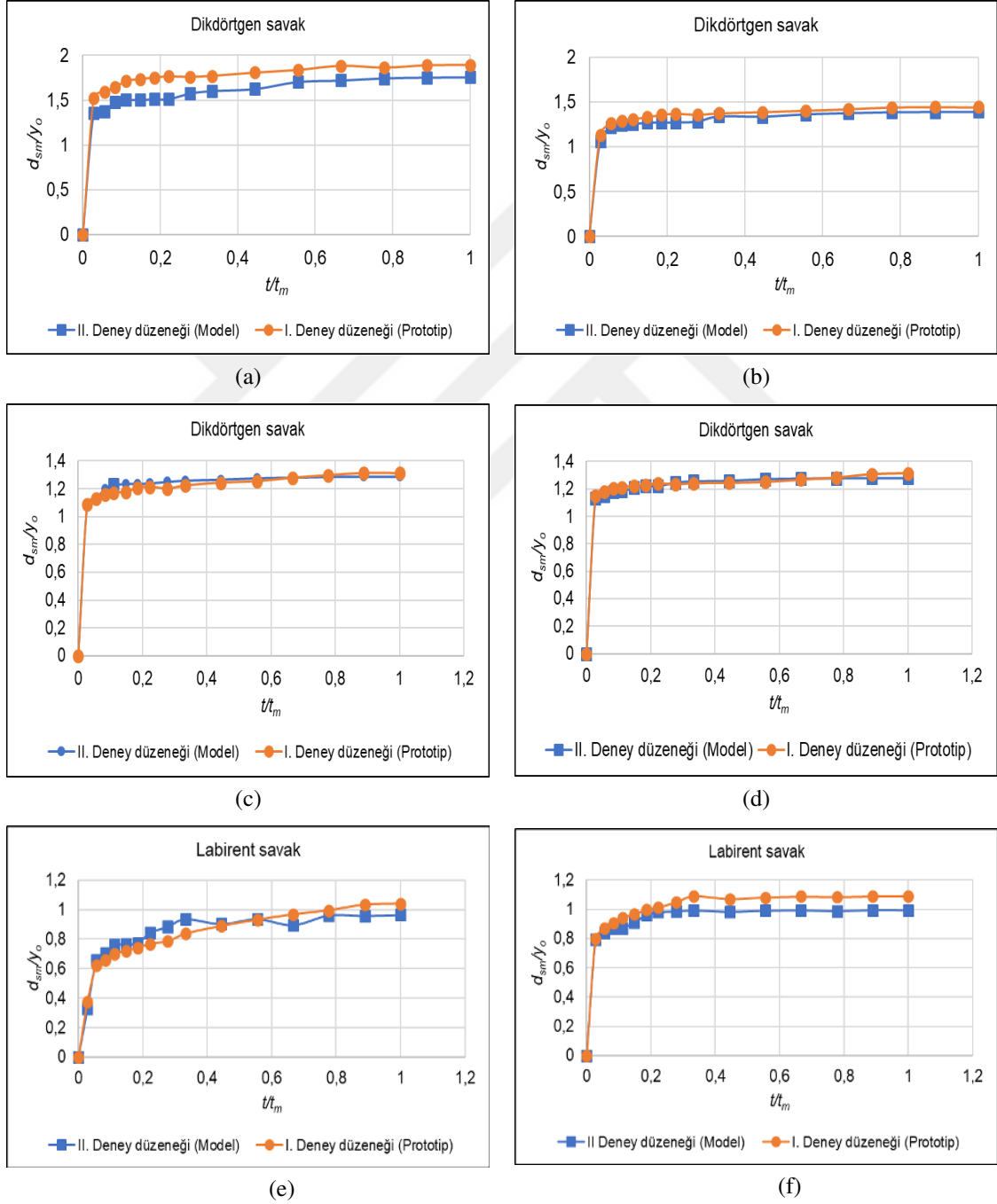


Şekil 4.80. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin (d_{se}/d_{50}), $h=167$ cm ve $h_t=50$ cm için densimetrik Froude sayısı (F_o) ile değişimi

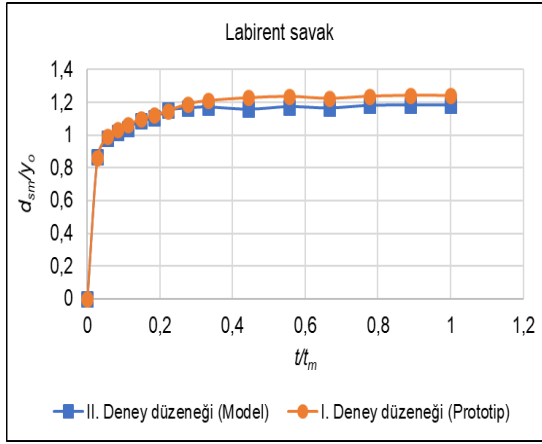
4.8. Model deney düzeneği ile prototip deney düzeneği arasındaki ilişki

I. ve II. Deney setlerinde aynı savak türleri için yapılan deney sonuçları Şekil 4.81 ve Şekil 4.82-4.89'da karşılaştırılmıştır. Burada amaç I. Deney setinde yapılan deney sonuçlarında ölçek etkisinin olup olmadığını görmektir. Şekil 4.81 (a-h)'da aynı sediment medyan dane çapı için deneyler yürütülmüşken Şekil 4.82-4.89'da uzunluk model ölçeği $L_r=1/2.4$ için sediment medyan dane çapı da dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Söz konusu grafiklerden görüldüğü gibi I. deney

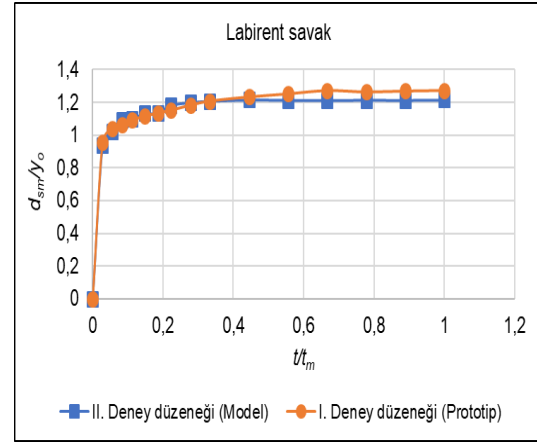
düzeneğinde elde edilen sonuçlar güvenle kullanılabilir durumdadır. Bir başka deyişle I. ve II. Deneylerde elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmuştur. I. Deney düzeneği de örneğin yüksek bir ince kemer baraj için model ölçeği yaklaşık 1/35'tir. Örneğin bir tersip bendi için ise yaklaşık $L_r=1/1$ veya 1/1.5 şeklinde düşünülmüştür. Bütün savak boyutları bu model ölçeğine göre imal edilmişlerdir. Ayrıca Şekil 4.82-4.89'da, olaya etki eden tüm parametreler (düşü yüksekliği, kuyruksuyu derinliği, birim debi, medyan dane çapı gibi) bu model ölçeğine göre ayarlanmıştır.



Şekil 4.81. I. Deney seti ile II. Deney setinden elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırılması



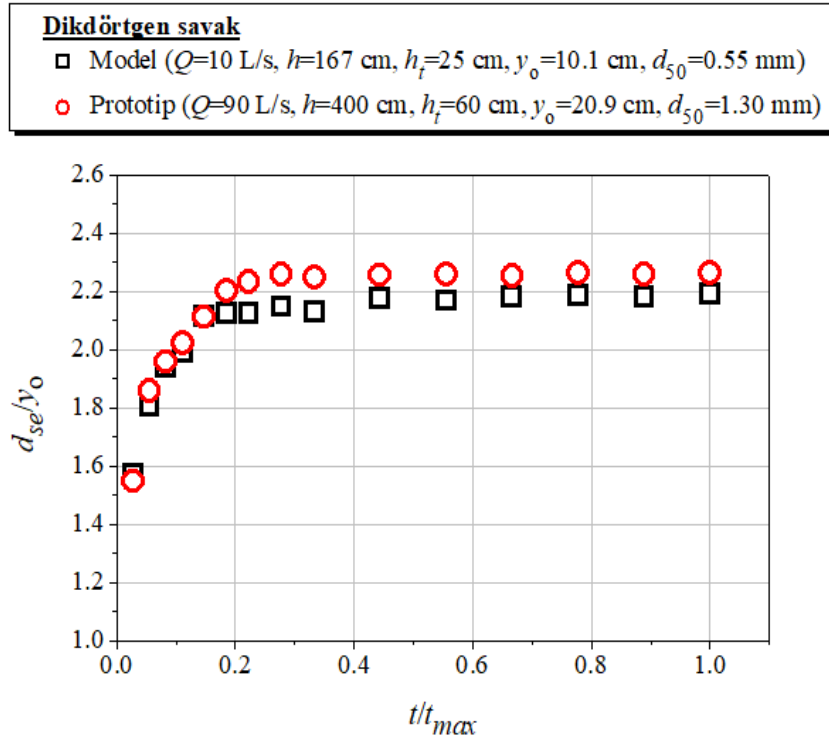
(g)



(h)

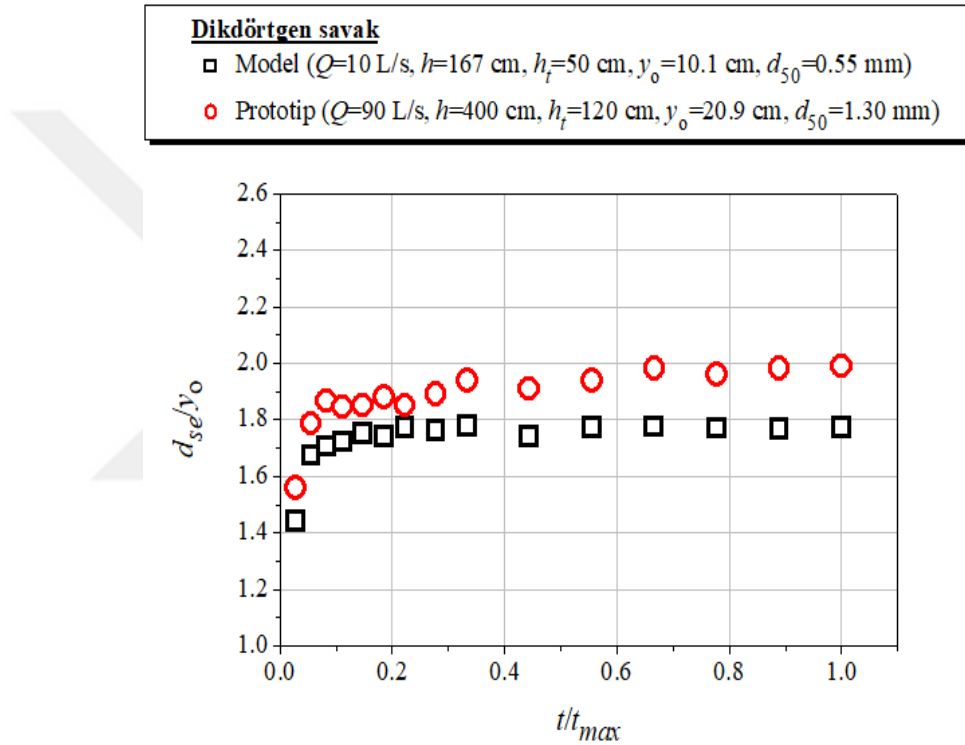
Şekil 4.81. I. Deney seti ile II. Deney setinden elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırılması (devam)

Şekil 4.82’de tüm etkili parametreler $L_r=1/2.4$ model ölçeğine göre düzenlenmiştir. Şekil 4.82’de dikdörtgen savakta $h_i=25$ ve 60 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 3 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Diğer savak türlerine nispeten daha yüksek boyutsuz denge oyulma derinliği (d_{se}/y_0) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca d_{se}/y_0 değerlerinin zamanla asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.82. Dikdörtgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_i=25$ cm ve $h_i=60$ cm için karşılaştırılması

Şekil 4.83'te dikdörtgen savakta $h_t=50$ ve 120 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 7.9 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Kuyruksuyu derinliğinin artmasıyla model-prototip arasındaki uyum az da olsa azalmıştır. Bunun nedenin kuyruksuyu içerisindeki jet karakteristiği olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, d_{se}/y_o değerlerinin zamanla asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir. Şekil 4.83'te Şekil 4.82'ye göre d_{se}/y_o değerlerinde model deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 19 oranında bir azalma, prototip deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 12 oranında bir azalma gözlemlenmiştir.



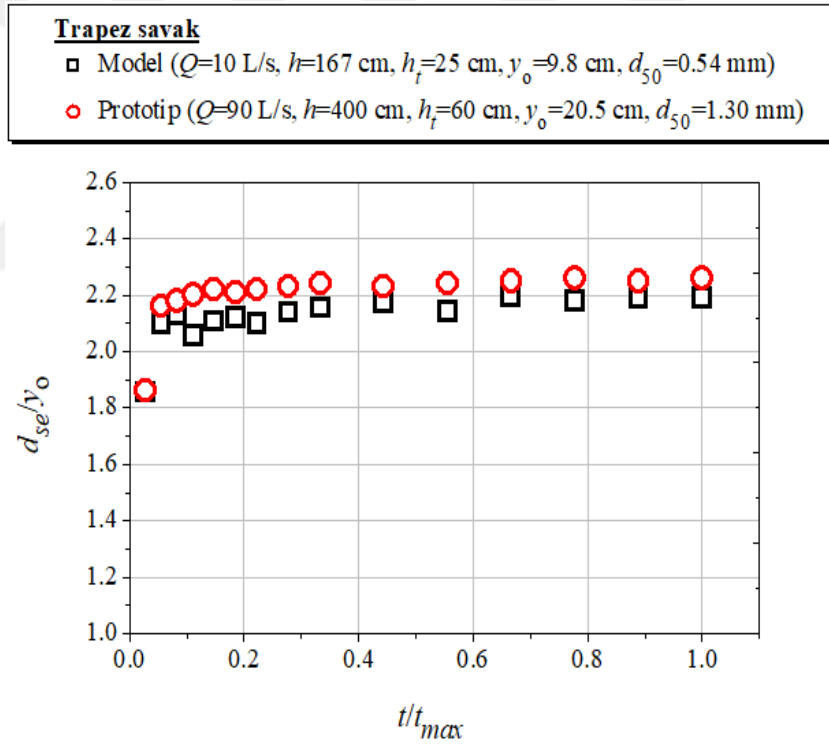
Şekil 4.83. Dikdörtgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması

Şekil 4.84'te trapez savakta $h_t=25$ ve 60 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 3.5 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Bu oranın aynı şartlar altındaki dikdörtgen savak deney sonuçları ile yakın olduğu görülmektedir. Benzer şekilde (d_{se}/y_o) değerleri de dikdörtgen savak sonuçlarına göre daha az olmasına rağmen yakındır. Ayrıca d_{se}/y_o değerlerinin zamanla asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir.

Şekil 4.85'te trapez savakta $h_t=50$ ve 120 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 3.6 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Kuyruksuyu derinliğinin artmasıyla model-prototip arasındaki uyum çok fazla değişmemiştir. Benzer şekilde, d_{se}/y_o değerlerinin zamanla

asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir. Şekil 4.85'te Şekil 4.84'e göre d_{se}/y_0 değerlerinde model deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 23 oranında bir azalma, prototip deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 24 oranında bir azalma gözlemlenmiştir.

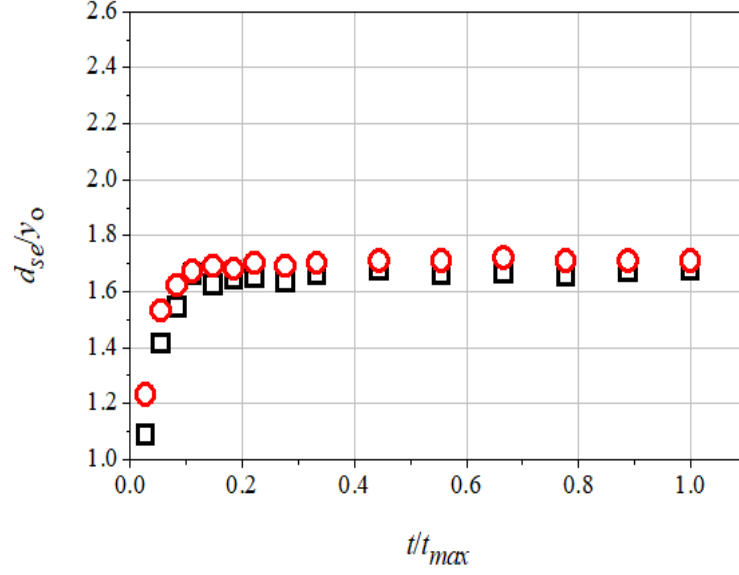
Şekil 4.86'da üçgen savakta $h_t=25$ ve 60 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 12 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Bu oranın aynı şartlar altındaki diğer savakların deney sonuçlarına göre fazla olduğu görülmektedir. Bu durum üçgen savaklarda jet karakteristiğinin değişen birim debiler için çok farklı olabileceğini göstermektedir. Üçgen savaklarda ölçülen d_{se}/y_0 değerlerinin dikdörtgen ve trapez savaklara göre oldukça az olduğu da görülmektedir. Ayrıca d_{se}/y_0 değerlerinin zamanla asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.84. Trapez savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=25$ cm ve $h_t=60$ cm için karşılaştırılması

Trapez savak

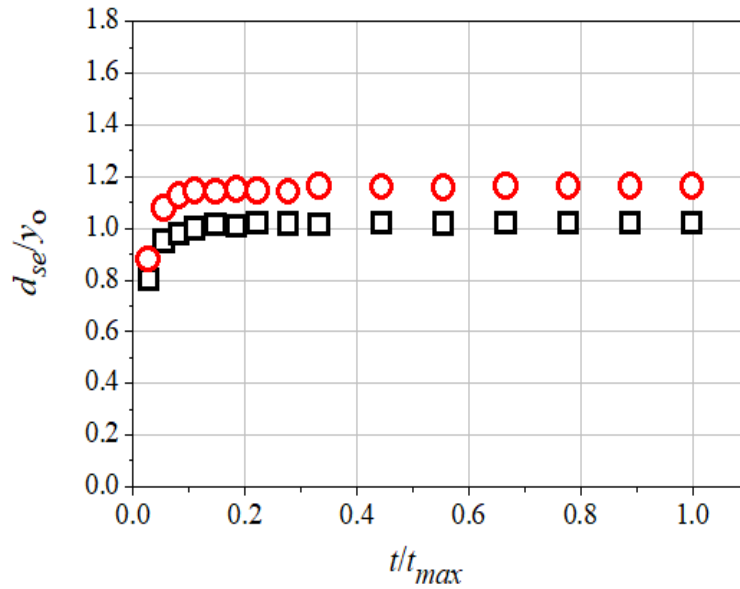
- Model ($Q=10$ L/s, $h=167$ cm, $h_t=50$ cm, $y_o=9.8$ cm, $d_{50}=0.54$ mm)
- Prototip ($Q=90$ L/s, $h=400$ cm, $h_t=120$ cm, $y_o=20.5$ cm, $d_{50}=1.30$ mm)



Şekil 4.85. Trapez savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması

Üçgen savak

- Model ($Q=10$ L/s, $h=167$ cm, $h_t=25$ cm, $y_o=12.9$ cm, $d_{50}=0.54$ mm)
- Prototip ($Q=90$ L/s, $h=400$ cm, $h_t=60$ cm, $y_o=23.7$ cm, $d_{50}=1.30$ mm)



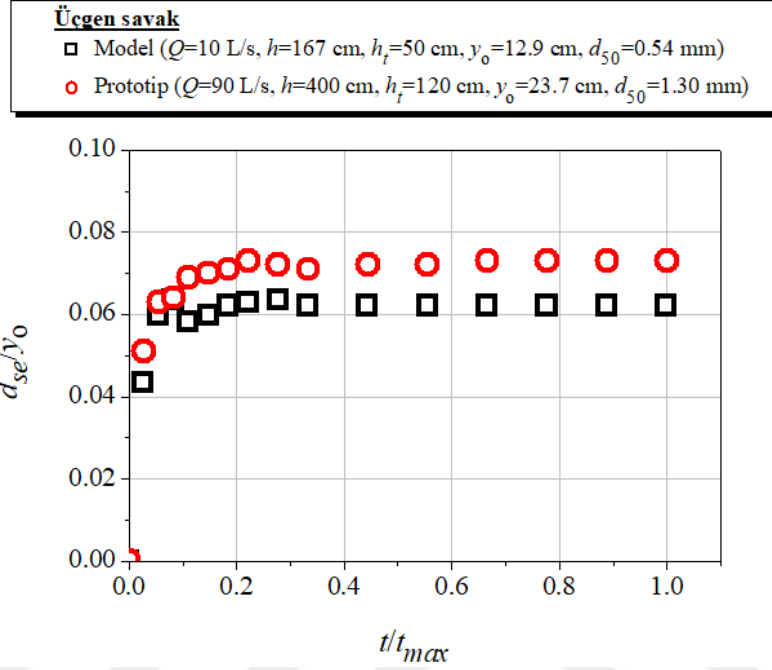
Şekil 4.86. Üçgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=25$ cm ve $h_t=60$ cm için karşılaştırılması

Şekil 4.87’de üçgen savakta $h_t=50$ ve 120 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 13 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Kuyruksuyu derinliğinin artmasıyla model-prototip arasındaki uyum çok fazla değişmemiştir. Benzer şekilde, d_{se}/y_o değerlerinin zamanla asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir. Şekil 4.87’de Şekil 4.86’ya göre d_{se}/y_o değerlerinde model deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 93.9 oranında bir azalma, prototip deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 93.7 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Burada, d_{se}/y_o değerleri için bu kadar yüksek fark oluşması üçgen savakların jet karakteristikleri ile ilgilidir. Üçgen savaklarda klasik dikdörtgen ve trapez savaklardan farklı olarak düşü yüksekliğinin az olması ile yüksek oyulma derinlikleri oluşabilmektedir. Bunun nedeninin yüksek birim debinin düşü yüksekliği ile ilişkisine bağlı olarak su jetinde yayılma meydana gelmesi ile jet çekirdeğinin parçalanması olduğu düşünülmektedir. Böylece, mansap havuzuna çarpan jet hızı azalmakta ve düşü oyulma derinlikleri elde edilmektedir.

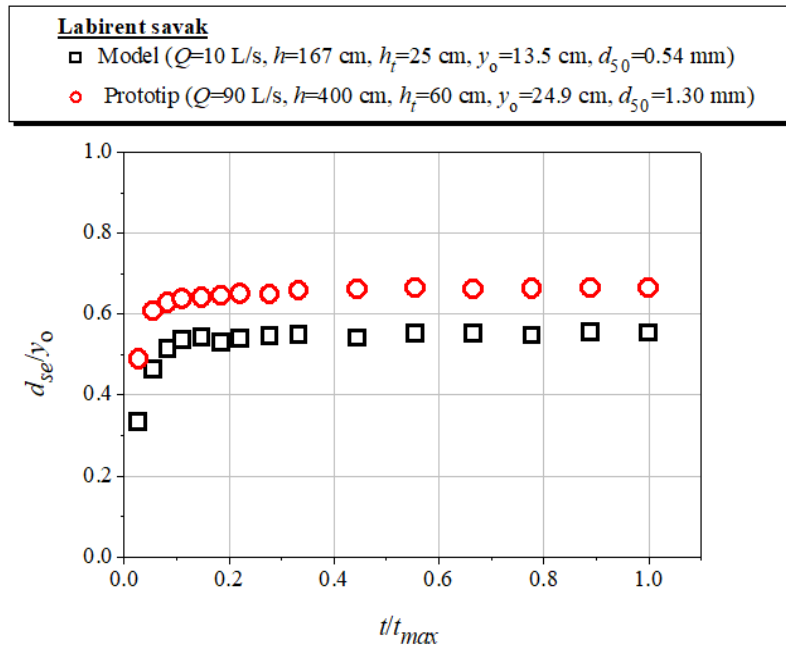
Şekil 4.88’de labirent savakta $h_t=25$ ve 60 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 18 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Bu oranın aynı şartlar altındaki diğer savakların deney sonuçlarına, özellikle dikdörtgen ve trapez savak sonuçlarına, göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu durum labirent savaklarda jet karakteristiğinin değişen birim debiler için çok farklı olabileceğini göstermektedir. Labirent savaklarda etkili kret uzunluğunun fazla olması sebebiyle deşarj kapasitesinin klasik savaklara göre 3-5 kat fazla olduğu bilinmektedir (Emiroğlu vd., 2010). Bu sebeple savak mansabındaki oyulma derinliğinin de klasik savaklara göre daha az olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte jet geniş bir açıklıktan parçalara ayrılmış bir şekilde düştüğü için model ile prototip arasında doğrudan net bir ilişki kurabilmek zorlaşmıştır. Bu nedenle, bağıl hata miktarı çok olmazsa da bir miktar yüksek çıkmıştır. Labirent savaklarda ölçülen d_{se}/y_o değerlerinin aynı akım şartları için diğer savak türlerine göre oldukça az olduğu da görülmektedir. Ayrıca d_{se}/y_o değerlerinin zamanla asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir.

Şekil 4.89’da labirent savakta $h_t=50$ ve 120 cm için yürütülen deney sonuçları arasında yaklaşık ortalama % 7 bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Kuyruksuyu derinliğinin artmasıyla model-prototip arasındaki uyum daha da artmıştır. Burada, d_{se}/y_o değerlerinin zamanla asimptota kavuşması, hem prototip deney düzeneği (I. deney düzeneği) ve hem de model deney düzeneği (II. deney düzeneği) için yaklaşık olarak aynı eğilimde gerçekleşmiştir. Şekil 4.89’da Şekil 4.88’e göre d_{se}/y_o değerlerinde model deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 91.7 oranında bir azalma, prototip deney düzeneği için yaklaşık ortalama % 92.6 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Burada, d_{se}/y_o değerleri için bu kadar yüksek fark oluşması labirent savakların jet karakteristikleri ile ilgilidir. Kuyruksuyu derinliğinin artmasıyla üçgen ve labirent savakların mansabındaki denge

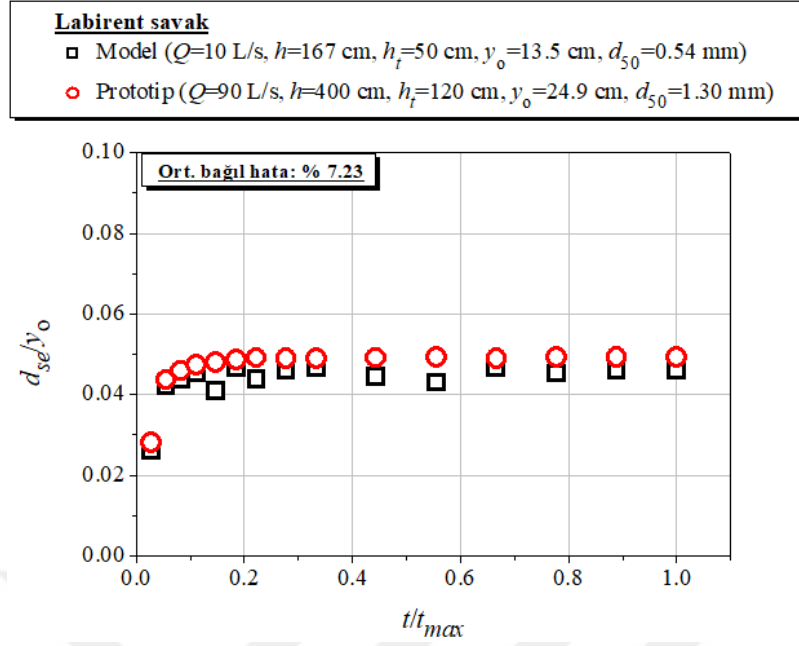
oyulma derinliklerinde ciddi azalma olduğu belirlenmiştir. Böylece, kuyruksuyunun oyulma üzerine etkisinin özellikle üçgen ve labirent savaklar için oldukça büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca savak yapısının, oyulmayı önemli derecede etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 4.87. Üçgen savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması



Şekil 4.88. Labirent savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=25$ cm ve $h_t=60$ cm için karşılaştırılması



Şekil 4.89. Labirent savakta model ile prototip deney sonuçlarının $h_t=50$ cm ve $h_t=120$ cm için karşılaştırılması

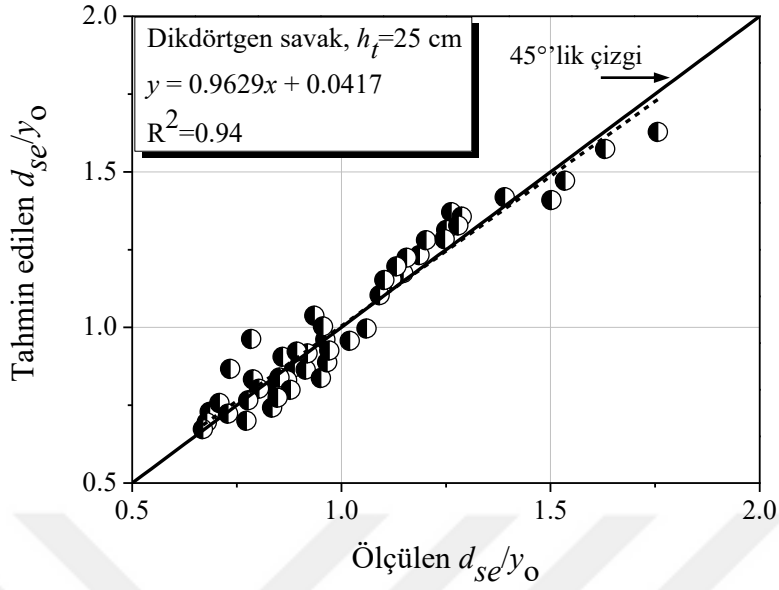
4.9. Boyutsuz denge oyulma derinliğinin hesaplanması için mevcut çalışma kapsamında türetilen denklemler

Bu bölümde II. deney düzeneğinde (model) gerçekleştirilmiş 384 adet deneye ait sonuçlar kullanılarak denge oyulma derinliğinin tahmini için geliştirilen ilgili denklemlerin doğruluğu tartışılmıştır. Bu kapsamda, mevcut çalışmanın boyut analizi bölümünde elde edilen boyutsuz parametreler (Denklem, 3.4) kullanılmıştır. Aşağıda söz konusu savak türlerinde boyutsuz denge oyulma derinliğinin hesaplanması için ilgili denklemler sıralanmaktadır.

4.9.1. Dikdörtgen savak için boyutsuz denge oyulma derinliğinin tahmini

Denge oyulma derinliğini elde edebilmek için aşağıdaki doğrusal olmayan denklem dikdörtgen savaklar için geliştirilmiştir. Elde edilen Denklem (4.1) için belirginlik katsayısı 0.94'tür. Şekil 4.90'da eşitliğin güvenle kullanılabilirliğine karar verilmiştir. Denklem (4.1) $1 \leq h_t/y_o \leq 2$ için geçerlidir.

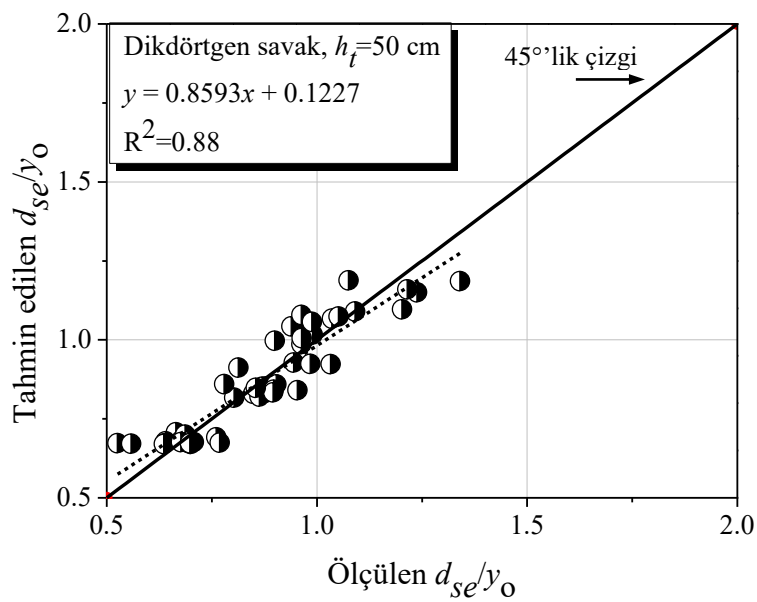
$$\frac{d_{se}}{y_o} = 0.17 \times (F_o)^{0.10} \times \left(\frac{h}{y_o}\right)^{0.02} \times \left(\frac{h_t}{y_o}\right)^{0.78} \times \left(\frac{d_{50}}{y_o}\right)^{-0.29} \quad (4.1)$$



Şekil 4.90. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.1) ile tahmin edilen değerlerin dikdörtgen savak ve $h_t=25$ cm için karşılaştırılması

Denklem (4.2) dikdörtgen savaklarda denge oyulma derinliğini tahmin edebilmek için $2 < h_t/y_o \leq 4$ için geçerli doğrusal olmayan bir denklemdir. Elde edilen Denklem (4.2) için belirginlik katsayısı 0.86'dır. Şekil 4.91'de eşitliğin güvenle kullanılabilirliğine karar verilmiştir.

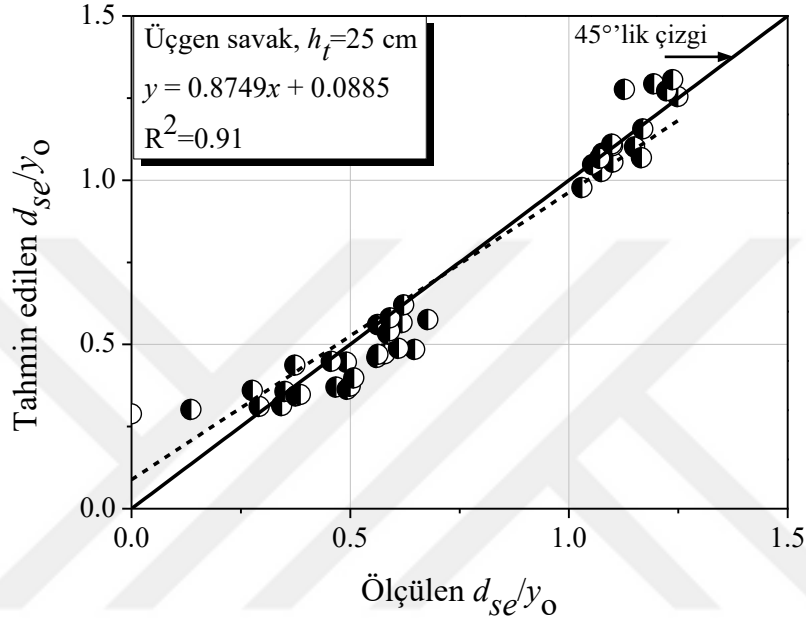
$$\frac{d_{se}}{y_o} = 0.56 + 0.01 \times F_o - 0.01 \times \frac{h}{y_o} + 0.19 \times \frac{h_t}{y_o} - 12.11 \times \frac{d_{50}}{y_o} \quad (4.2)$$



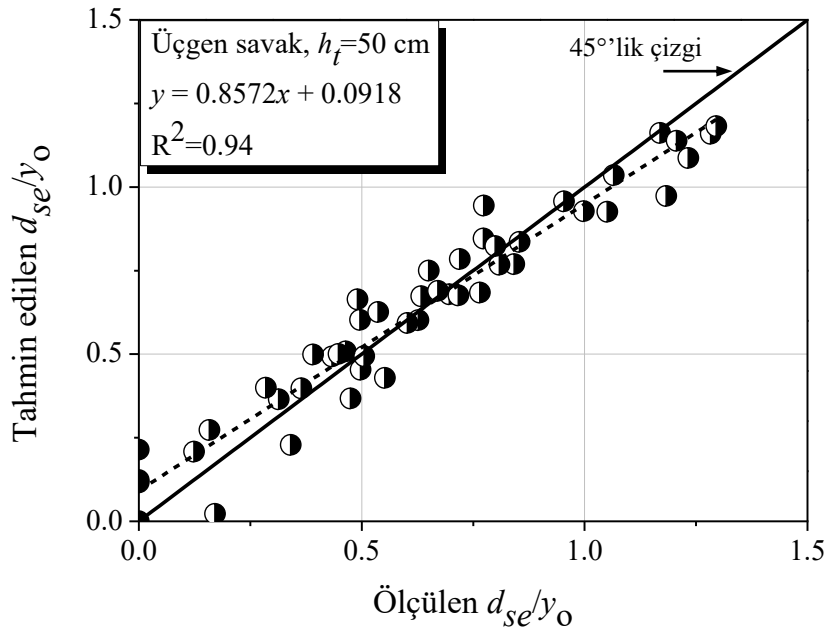
Şekil 4.91. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.2) ile tahmin edilen değerlerin dikdörtgen savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması

Denklem (4.4) üçgen savaklarda denge oyulma derinliğini tahmin edebilmek için $2.5 < h_t/y_o \leq 5$ için geçerli doğrusal olmayan bir denklemdir. Elde edilen Denklem (4.4) için belirsizlik katsayısı 0.94'tür. Şekil 4.93'te eşitliğin güvenle kullanılabilirliğine karar verilmiştir.

$$\frac{d_{se}}{y_o} = -4.65 \times (F_o^{-0.51}) + \left(\frac{h}{y_o}\right)^{-1.77} \times \left(\frac{h_t}{y_o}\right)^{0.17} \times \left(\frac{d_{50}}{y_o}\right)^{16.75} \quad (4.4)$$



Şekil 4.92. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.3) ile tahmin edilen değerlerin üçgen savak ve $h_t=25$ cm için karşılaştırılması



Şekil 4.93. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.4) ile tahmin edilen değerlerin üçgen savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması

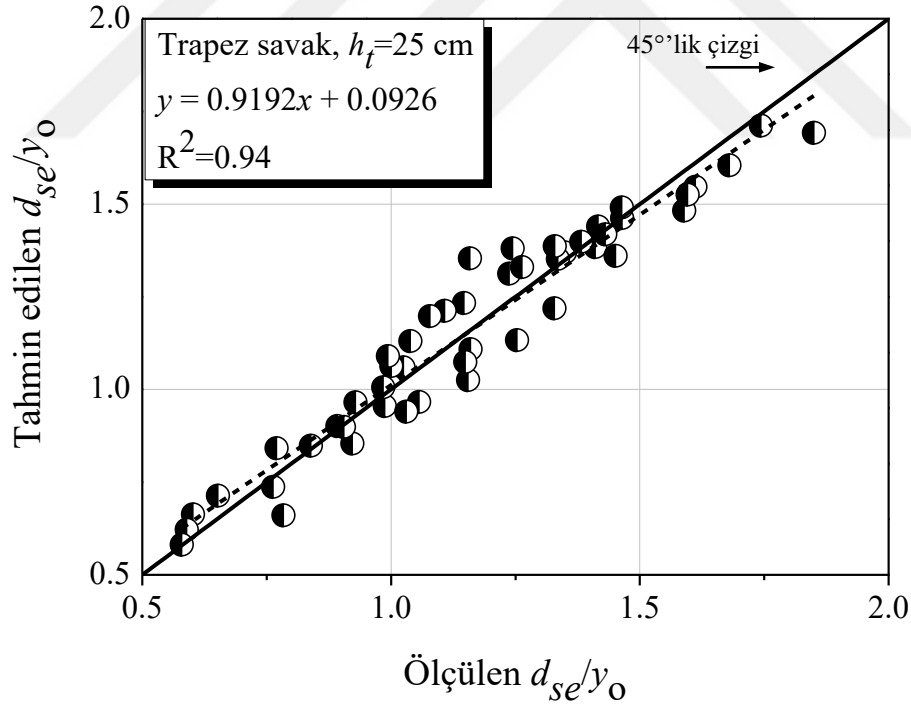
4.9.2. Trapez savak için boyutsuz denge oyulma derinliğinin tahmini

Denge oyulma derinliğini elde edebilmek için aşağıdaki doğrusal olmayan denklem trapez savaklar için geliştirilmiştir. Elde edilen Denklem (4.5) için belirginlik katsayısı 0.95'tir. Şekil 4.94'te eşitliğin güvenle kullanılabilirliğine karar verilmiştir. Denklem (4.5) $1 \leq h_t/y_o \leq 2$ için geçerlidir.

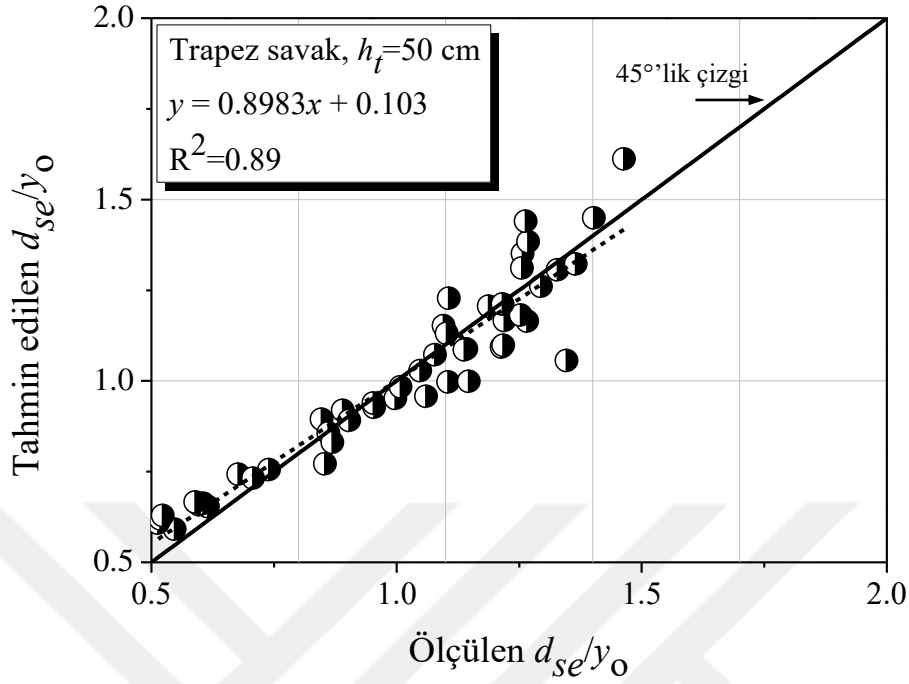
$$\frac{d_{se}}{y_o} = -7.02 \times (F_o^{-0.72}) + \left(\frac{h}{y_o}\right)^{-0.33} + \left(\frac{h_t}{y_o}\right)^{0.79} \times \left(\frac{d_{50}}{y_o}\right)^{17.20} \quad (4.5)$$

Denklem (4.6) trapez savaklarda denge oyulma derinliğini tahmin edebilmek için $2.5 < h_t/y_o \leq 4$ için geçerli doğrusal olmayan bir denklemdir. Elde edilen Denklem (4.6) için belirginlik katsayısı 0.90'dır. Şekil 4.95'te eşitliğin güvenle kullanılabilirliğine karar verilmiştir.

$$\frac{d_{se}}{y_o} = 0.76 - 0.01 \times F_o + 0.04 \times \frac{h}{y_o} + 0.20 \times \frac{h_t}{y_o} - 21.01 \times \frac{d_{50}}{y_o} \quad (4.6)$$



Şekil 4.94. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.5) ile tahmin edilen değerlerin trapez savak ve $h_t=25$ cm için karşılaştırılması

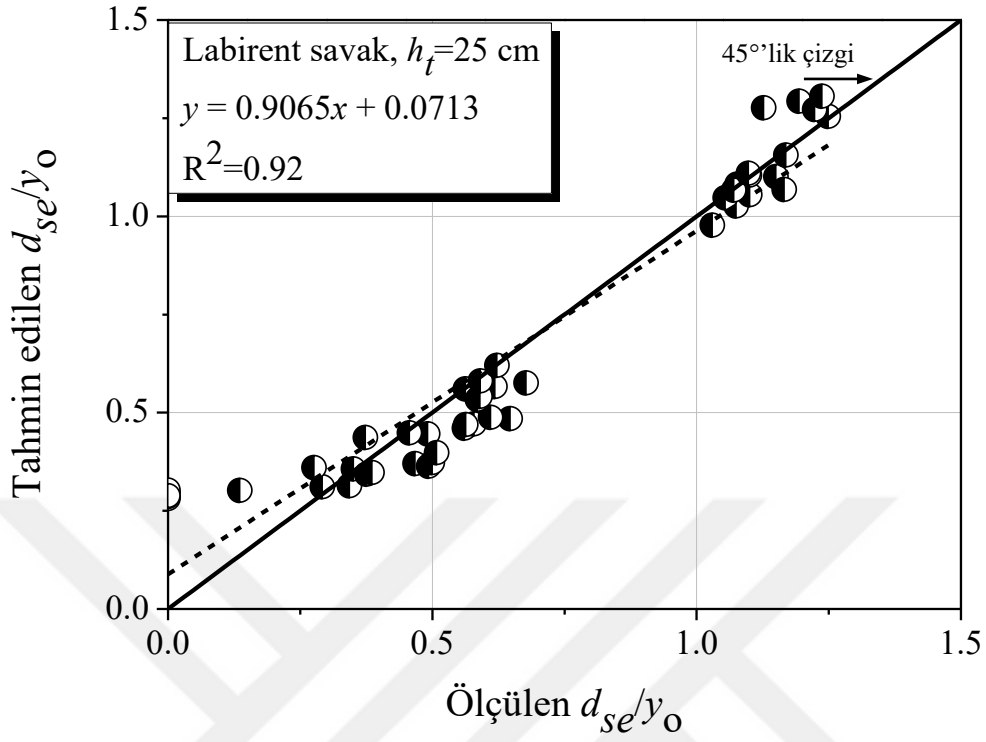


Şekil 4.95. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.6) ile tahmin edilen değerlerin trapez savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması

4.9.3. Labirent savak için boyutsuz denge oyulma derinliğinin tahmini

Denge oyulma derinliğini elde edebilmek için aşağıdaki doğrusal olmayan denklem labirent savaklar için geliştirilmiştir. Elde edilen Denklem (4.7) için belirginlik katsayısı 0.92'dir. Şekil 4.96'da eşitliğin güvenle kullanılabilirliğine karar verilmiştir. Denklem (4.7) $1 \leq h_t/y_o \leq 2$ için geçerlidir.

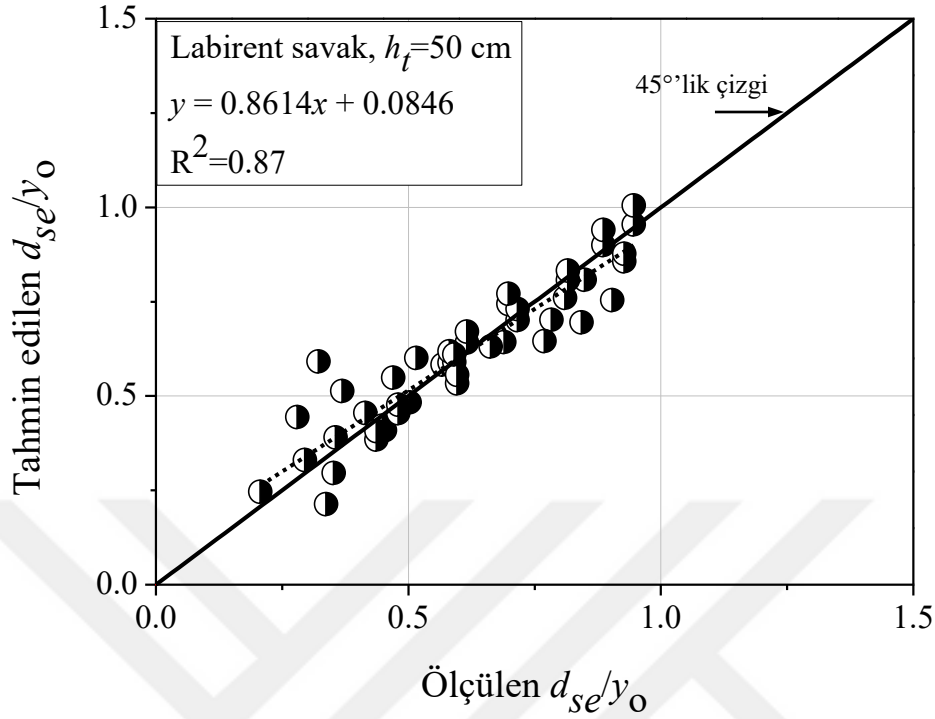
$$\frac{d_{se}}{y_o} = 0.09 * (F_o^{0.31}) \times \left(\frac{h}{y_o}\right)^{-0.12} \times \left(\frac{h_t}{y_o}\right)^{0.15} \times \left(\frac{d_{50}}{y_o}\right)^{-0.34} \quad (4.7)$$



Şekil 4.96. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.7) ile tahmin edilen değerlerin labirent savak ve $h_t=25\text{cm}$ için karşılaştırılması

Denklem (4.8) labirent savaklarda denge oyulma derinliğini tahmin edebilmek için $2 < h_t/y_o \leq 4$ için geçerli doğrusal olmayan bir denklemdir. Elde edilen Denklem (4.8) için belirginlik katsayısı 0.87'dir. Şekil 4.97'de eşitliğin güvenle kullanılabilirliğine karar verilmiştir.

$$\frac{d_{se}}{y_o} = 1.05 + 0.01 \times F_o + 0.01 \times \frac{h}{y_o} - 0.12 \times \frac{h_t}{y_o} - 10.16 \times \frac{d_{50}}{y_o} \quad (4.8)$$



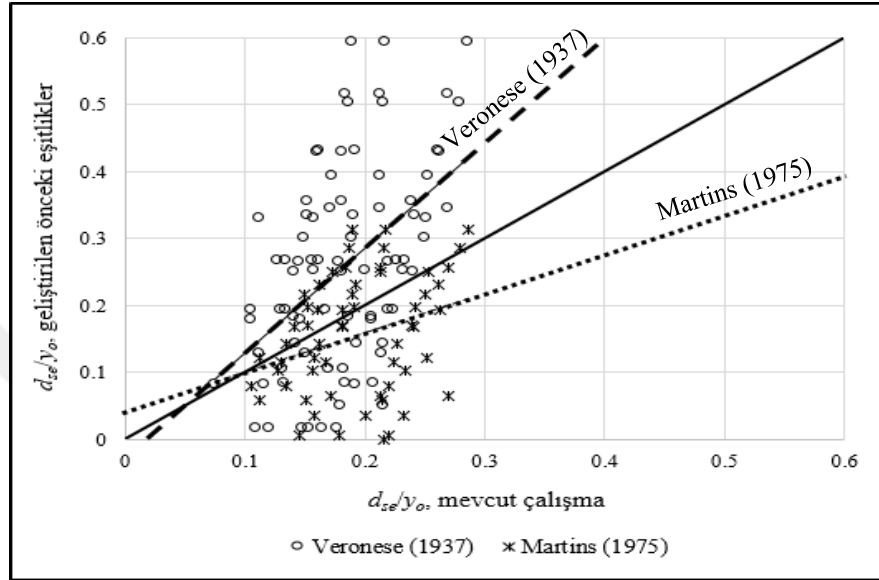
Şekil 4.97. Deneysel ölçülen ve Denklem (4.8) ile tahmin edilen değerlerin labirent savak ve $h_t=50$ cm için karşılaştırılması

4.10. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlarla literatürdeki çalışmalardan elde edilen ilgili sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4.98’de mevcut çalışmadan elde edilen deneysel d_{se}/y_o değerleri, Veronese (1937)’ye ait Denklem (2.57) ile Martins (1975)’e ait Denklem (2.70) kullanılarak hesaplanan d_{se}/y_o değerleri ile karşılaştırılmıştır. Denklem (2.70) ile hesaplanan d_{se}/y_o değerleri genellikle mevcut çalışmadan elde edilen d_{se}/y_o değerlerinden düşükken, Denklem (2.57) ile hesaplanan d_{se}/y_o değerleri genellikle mevcut çalışmadan elde edilen d_{se}/y_o değerlerinden yüksek çıkmıştır. Her iki çalışma sonuçları mevcut çalışma sonuçları ile karşılaştırıldığında arada çok fazla bir fark olmadığı görülebilmektedir. Sonuçlara uydurulan lineer eğrilerin 45°’lik çizgi ile aralarındaki açılar birbirine yakın olduğu ve az olduğu görülebilmektedir.

Şekil 4.99’da ilgili çalışmalardan ve mevcut çalışmadan elde edilen d_{se} değerleri karşılaştırıldığında, Veronese (1937b) ile Martins (1975) çalışmalarından elde edilen sonuçların mevcut çalışma sonuçlarına daha yakın oldukları söylenebilir. Bununla birlikte diğer araştırmacıların geliştirdiği denklemler ile hesaplanan d_{se} değerlerinin mevcut d_{se} değerlerinden oldukça uzak olduğu görülmektedir. Özellikle Kotoulas (1967) çalışmasının sonuçlarının oldukça farklı olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar büzülmeli savaklara ait değildir. Mevcut çalışma ile literatür arasındaki farklılığın en önemli nedeni budur. Söz konusu araştırmacıların önermiş oldukları denklemlerden elde edilen sonuçlarla

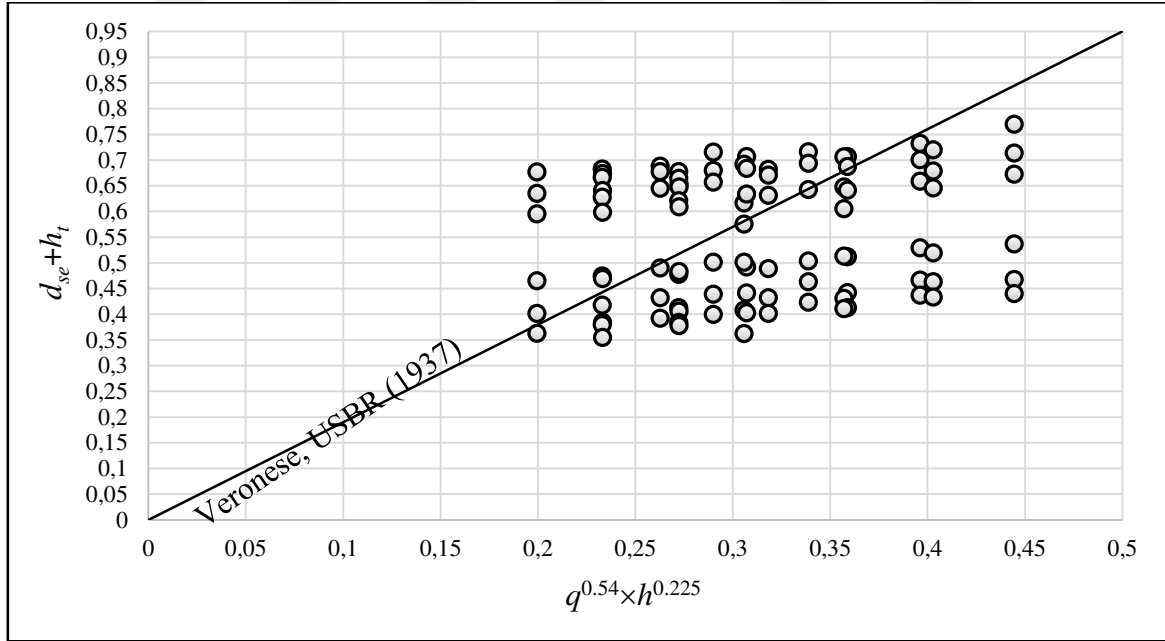
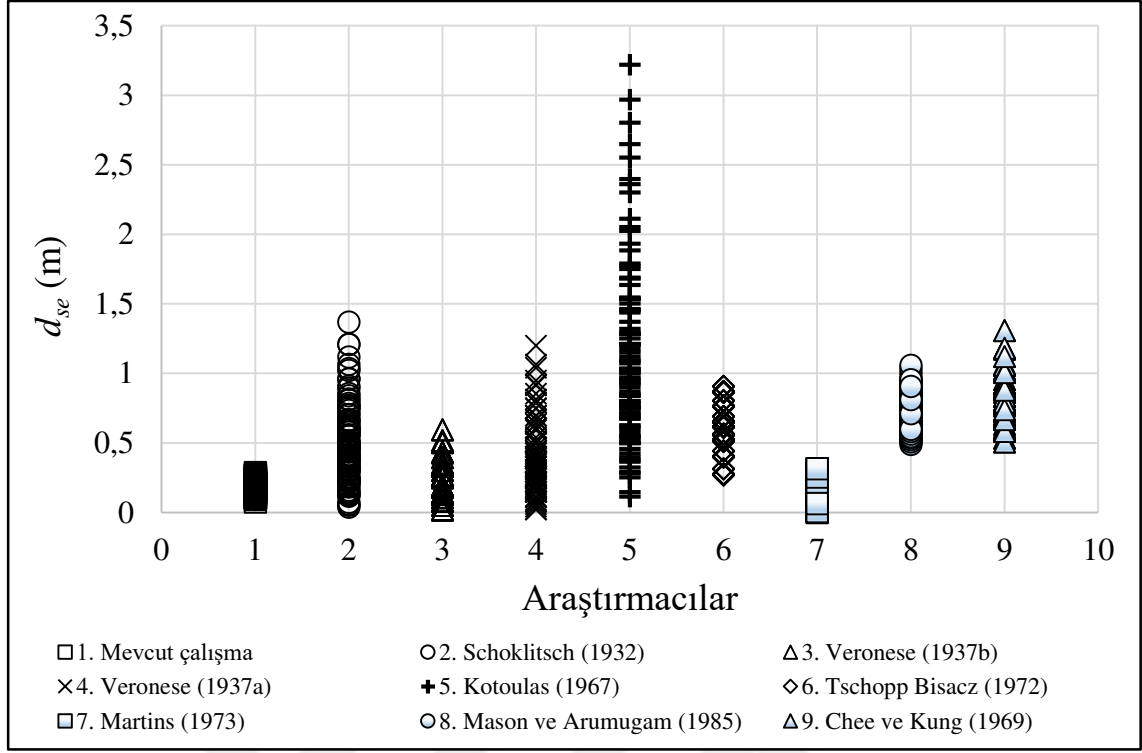
mevcut çalışma sonuçları arasındaki farklılıkların, sonuçlara etki eden bütün parametrelerin dikkate alınmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, parametrelerin olaya etkisi oldukça karmaşık olduğundan sonuçların karşılaşılabilecek tüm problemleri dikkate alarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, ilgili araştırmacılar belirli durumlar için bazı parametrelerin oyulmaya etkisinin olmadığını savunmuşlardır. Bu durum deneysel çalışma ile uyumsuzdur.

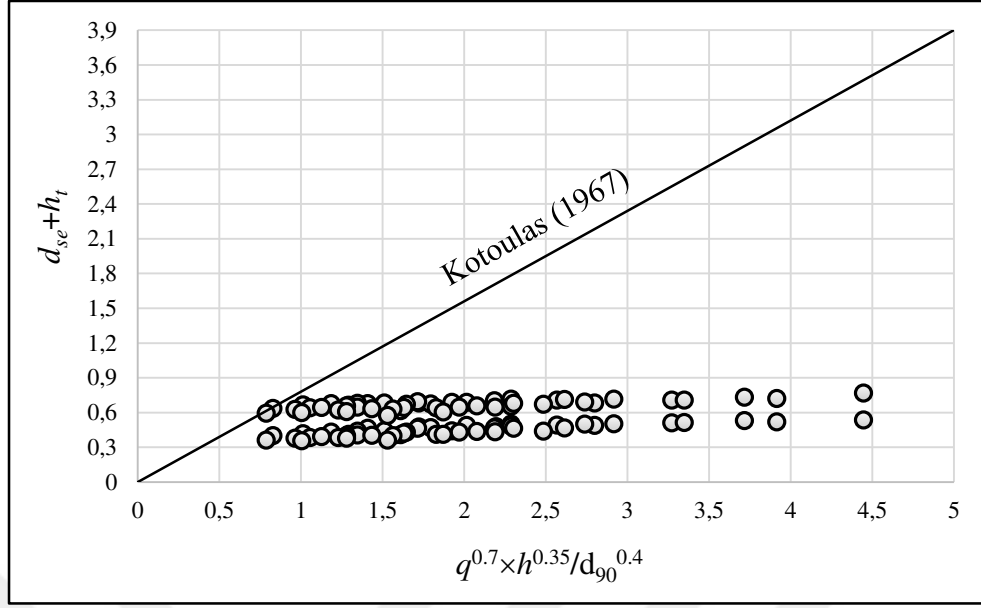


Şekil 4.98. Mevcut çalışma ile geliştirilen önceki denklemlerden elde edilen d_{se}/y_o değerlerinin karşılaştırılması

Veronese (1937) tarafından sunulan Denklem (2.57)'de $y=a.x$ denklemini oluşturularak “x” eksenine ve “y” eksenine ilgili ifadeler yerleştirilmiştir. Bu denklemde mevcut deneysel çalışma verileri kullanılmıştır. Söz konusu veriler kullanılarak belirlenen değerlerin Denklem (2.57) eğrisi üzerindeki dağılımı grafiksel olarak gösterilmektedir (Şekil 4.100). Burada mevcut çalışma sonuçlarının eğri üzerinde saçıldığı görülmektedir. Bu bakımdan, söz konusu eşitliğin mevcut çalışma sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu söylenebilmektedir.

Kotoulas (1967) tarafından sunulan Denklem (2.64)'te $y=a.x$ denklemini oluşturularak “x” eksenine ve “y” eksenine ilgili ifadeler yerleştirilmiştir. Bu denklemde mevcut deneysel çalışma verileri kullanılmıştır. Söz konusu veriler kullanılarak belirlenen değerlerin Denklem (2.64) eğrisi üzerindeki dağılımı grafiksel olarak gösterilmektedir (Şekil 4.101). Burada mevcut çalışma sonuçlarının Denklem (2.64) ile belirlenen eğri üzerinde yoğunlaşmadığı görülmektedir. Bu bakımdan, söz konusu eşitliğin mevcut çalışma sonuçları ile uyumsuz olduğu söylenebilmektedir. Bunun başlıca nedenlerinin, Kotoulas (1967) çalışmasında savak türünün dikkate alınmaması ve eşitliğin boyutsuz parametreler ile verilmemesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu denklem ile çok yüksek değerlerde oyulma derinlikleri elde edilmesi eşitliğin güvenilirliği açısından düşündürücüdür.

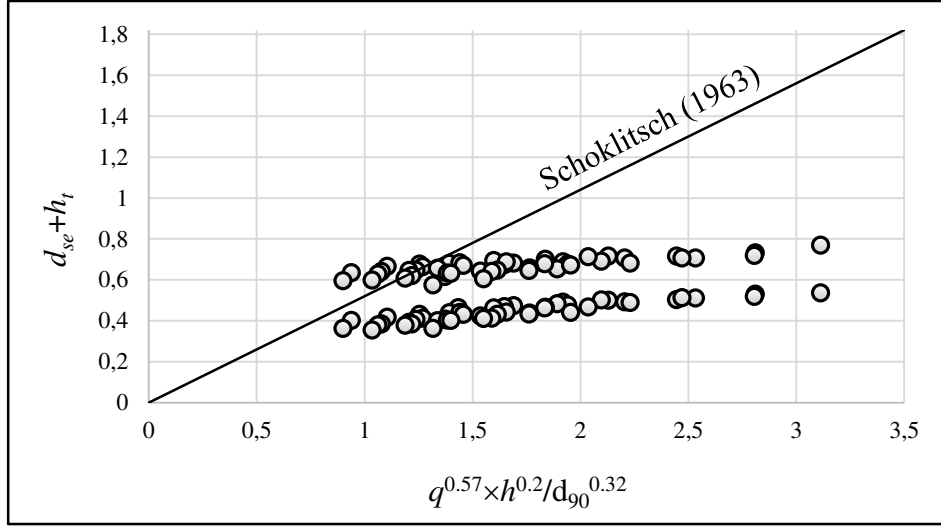




Şekil 4.101. Kotoulas (1967)'de sunulan Denklem (2.64)'ün mevcut çalışma verileri ile uyarlanması

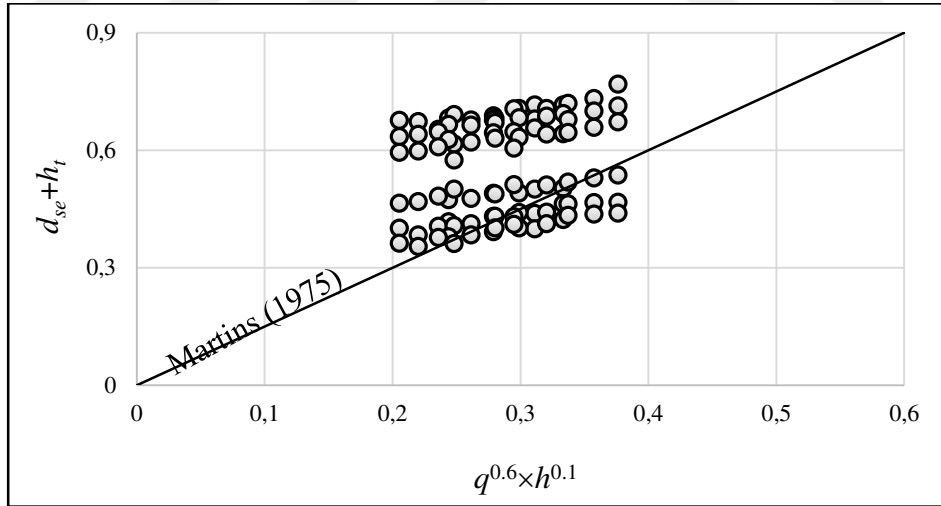
Schoklitsch (1932) tarafından sunulan Denklem (2.56)'da $y=a.x$ denkelemi oluşturularak “x” eksenine ve “y” eksenine ilgili ifadeler yerleştirilmiştir. Bu denklemde mevcut deneysel çalışma verileri kullanılmıştır. Söz konusu veriler kullanılarak belirlenen değerlerin Denklem (2.56) eğrisi üzerindeki dağılımı grafiksel olarak gösterilmektedir (Şekil 4.102). Burada mevcut çalışma sonuçlarının Denklem (2.56) ile belirlenen eğri üzerinde yoğunlaşmadığı görülmektedir. Bu bakımdan, söz konusu eşitliğin mevcut çalışma sonuçları ile uyumsuz olduğu söylenebilmektedir. Bunun başlıca nedenlerinin, Schoklitsch (1932) çalışmasında savak türünün dikkate alınmaması ve eşitliğin boyutsuz parametreler ile verilmemesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu denklem ile özellikle yüksek düşü yükseklikleri için mevcut çalışmaya göre çok yüksek değerlerde oyulma derinlikleri elde edilmesi eşitliğin güvenilirliği açısından düşündürücüdür.

Martins (1975) tarafından sunulan Denklem (2.70)'te $y=a.x$ denkelemi oluşturularak “x” eksenine ve “y” eksenine ilgili ifadeler yerleştirilmiştir. Bu denklemde mevcut deneysel çalışma verileri kullanılmıştır. Söz konusu veriler kullanılarak belirlenen değerlerin Denklem (2.70) eğrisi üzerindeki dağılımı grafiksel olarak gösterilmektedir (Şekil 4.103). Burada mevcut çalışma sonuçlarının eğriye yakın olarak saçıldığı görülmektedir. Bu bakımdan, söz konusu eşitliğin mevcut çalışma sonuçları ile bir uyum içerisinde olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca, mevcut deneysel çalışmadan elde edilen d_{se} değerlerinin Denklem (2.70)'ten elde edilen d_{se} değerlerinden az bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.102. Schoklitsch (1932)'te sunulan Denklem (2.56)'nın mevcut çalışma verileri ile uyarlanması

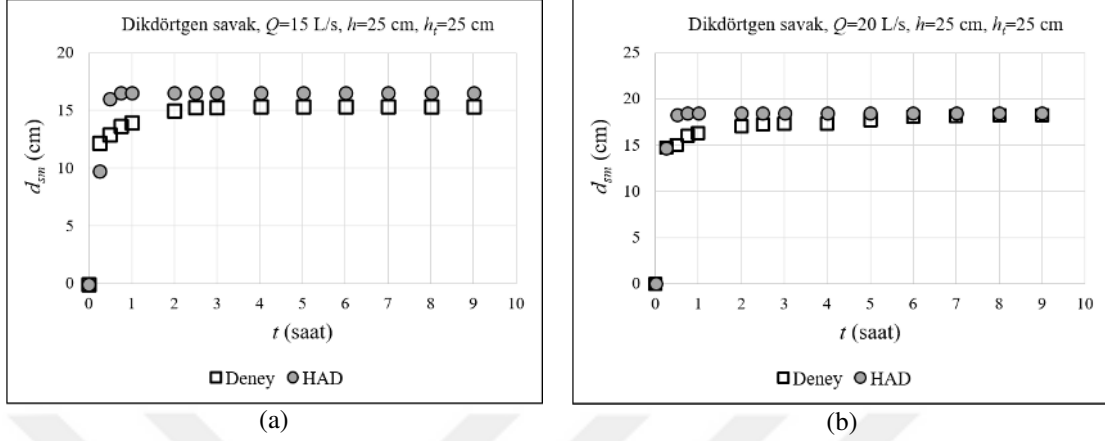
Şekil 4.104-4.107'de tüm savak tipleri için mevcut deneysel çalışmadan elde edilen maksimum oyulma derinlikleri (d_{sm}) ile İkinciogulları (2019) tez çalışmasından hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak sayısal analizle elde edilen maksimum oyulma derinliklerinin zamana bağlı değişimi sunulmaktadır.



Şekil 4.103. Martins (1975)'te sunulan Denklem (2.70)'in mevcut çalışma verileri ile uyarlanması

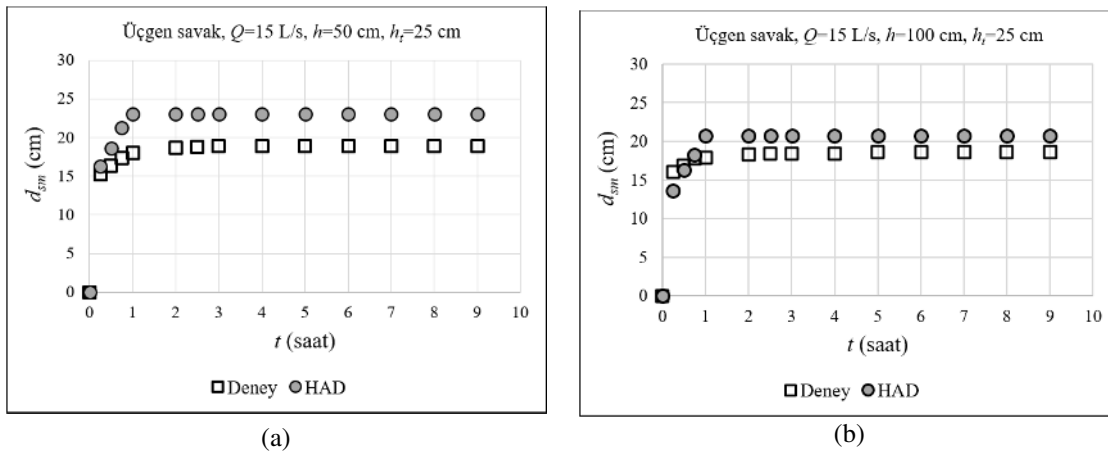
Şekil 4.104a'da dikdörtgen savak $Q=15$ L/s. $h=25$ cm ve $h_r=25$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 7 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.104b'de dikdörtgen savak $Q=20$ L/s. $h=25$ cm ve $h_r=25$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 2 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Debinin artmasıyla ilgili sonuçlar arasındaki bağıl

hata oranının azaldığı görülmektedir. Şekil 4.104b’de birim debinin %33 oranında artırılmasıyla deneysel d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 18, sayısal d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 12 artış gözlenmiştir.



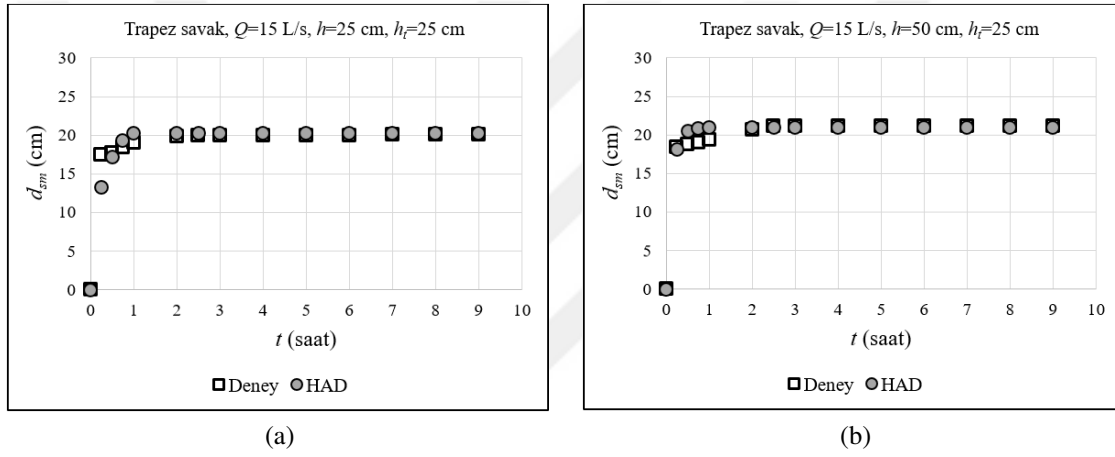
Şekil 4.104. Dikdörtgen savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkinciogulları, 2019) karşılaştırılması: a) $Q=15$ L/s. $h=25$ cm ve $h_t=25$ cm. b) $Q=20$ L/s. $h=25$ cm ve $h_t=25$ cm

Şekil 4.105a’da üçgen savak $Q=15$ L/s. $h=50$ cm ve $h_t=25$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 22 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Bu oran dikdörtgen savağa göre oldukça yüksektir. Bunun nedeninin, üçgen savağın su jeti karakteristiğinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.105b’de dikdörtgen savak $Q=15$ L/s, $h=100$ cm ve $h_t=25$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 12 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Kuyruksuyu derinliğinin artmasıyla ilgili sonuçlar arasındaki bağıl hata oranının azaldığı görülmektedir. Şekil 4.105b’de kuyruksuyu derinliğinin %100 oranında artırılmasıyla deneysel d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 2, sayısal d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 10 azalma gözlenmiştir.



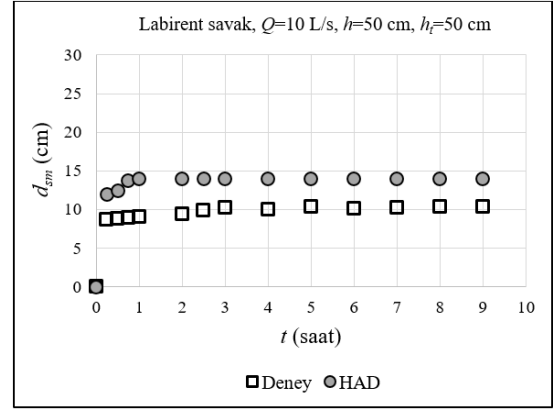
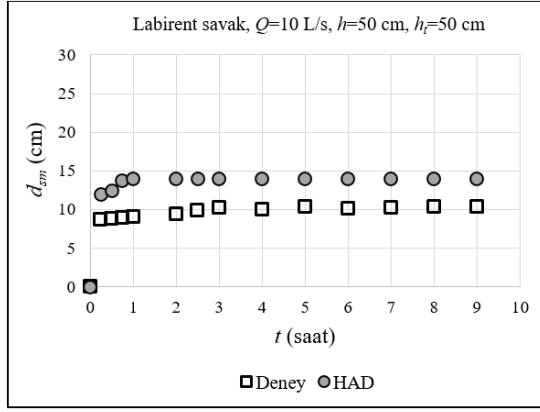
Şekil 4.105. Üçgen savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkinciogulları, 2019) karşılaştırılması: a) $Q=15$ L/s. $h=50$ cm ve $h_t=25$ cm. b) $Q=15$ L/s. $h=100$ cm ve $h_t=25$ cm

Şekil 4.106a’da trapez savak $Q=15$ L/s, $h=25$ cm ve $h_t=25$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 1 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Bu oran diğer savak türleri içerisindeki en düşük orandır. Şekil 4.106b’de trapez savak $Q=15$ L/s, $h=50$ cm ve $h_t=25$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 1 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.106’da görüldüğü üzere tüm savak türleri içerisinde sayısal sonuçlarla en iyi uyum trapez savaklar için sağlanmıştır. Düşü yüksekliğinin artmasıyla ilgili sonuçlar arasındaki bağıl hata oranının çok değişmediği görülmektedir. Şekil 4.105b’de düşü yüksekliğinin %100 oranında arttırılmasıyla deneysel d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 5, sayısal d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 3 artış gözlenmiştir.



Şekil 4.106. Trapez savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkinciogulları, 2019) karşılaştırılması: a) $Q=15$ L/s, $h=25$ cm ve $h_t=25$ cm. b) $Q=15$ L/s, $h=50$ cm ve $h_t=25$ cm

Şekil 4.107a’da labirent savak $Q=10$ L/s, $h=50$ cm ve $h_t=50$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 35 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Bu oran diğer savak türleri içerisindeki en yüksek orandır. Deneysel sonuçların sayısal sonuçlara göre daha az olması, labirent savak mansabında oluşan oyulma derinliklerindeki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca labirent savak mansabındaki oyulma konusu hidrolik mühendisliğine kazandırılmış yeni bir konudur. Bu nedenle, bu durumun daha detaylı incelenmesi gerekmektedir. Bu konuyu teoride henüz tam olarak çözümlenmediği düşünülmektedir. Şekil 4.107b’de labirent savak $Q=30$ L/s, $h=50$ cm ve $h_t=50$ cm için yürütülen mevcut deneysel çalışma ile söz konusu sayısal çalışma arasında nihai durumda yaklaşık % 6 oranında bağıl hata olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.107b’de ilgili sonuçlar arasındaki hesaplanan bağıl hata oranının Şekil 4.107a’ya göre daha düşük çıkmasının sebebi, yüksek debide çalışılmasıyla jetin özelliği bozulmadan mansap havuzuna çarpması şeklinde yorumlanabilmektedir. Birim debinin % 300 arttırılmasıyla deneysel d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 47, sayısal d_{sm} değerlerinde yaklaşık % 16 artış gözlenmiştir.



Şekil 4.107. Labirent savak için mevcut çalışma ile HAD sonuçlarının (İkincioğulları, 2019) karşılaştırılması: a) $Q=10$ L/s, $h=50$ cm ve $h_t=50$ cm, b) $Q=30$ L/s, $h=50$ cm ve $h_t=50$ cm

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı savak türlerinden savaklanan su jetinin mansap havuzunda oluşturduğu yerel oyulmalar, deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Yürütülen deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yürütülen deneysel çalışmalar neticesinde, genel olarak ilk bir saat içerisinde nihai oyulma derinliğinin yaklaşık %90'ına ulaşıldığı gözlenmiştir.
- Bütün savak türleri için birim debinin ve densimetrik Froude sayısının artmasıyla oyulma derinliğinde, tepe yüksekliğinde ve oyulma çukurunun genişliğinde artış olduğu gözlenmiştir.
- Su jetinin çıkış noktası ile mansap havuzuna çarpma noktası arasındaki yatay mesafe, birim debinin ve densimetrik Froude sayısının artması ile arttığı gözlenmiştir.
- Klasik dikdörtgen savak kullanılarak yapılan deneylerde mansap havuzunda nispeten daha büyük oyulma derinliklerinin olduğu gözlenmiştir.
- Düşü yüksekliği arttıkça su jetinin çıkış noktası ile mansap havuzuna çarpma noktası arasındaki yatay mesafenin arttığı görülmüştür.
- En düşük yerel oyulma derinlikleri, test edilen labirent savaklar için elde edilmiştir.
- Jet genişliğinin, jet kalınlığının, jet çarpma hızının, jet çarpma açısının ve jet yörüngesinin mansap havuzunda oluşan oyulma geometrisi üzerinde önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Jet genişliğinin artması ile maksimum oyulma derinliğinin azaldığı gözlenmiştir.
- Birim debi ve düşü yüksekliğinin artması ile jetin çarpma hızında artış olduğu gözlenmiştir.
- Birim debinin artmasıyla jetin çarpma açısında azalma gözlenmiştir.
- Düşü yüksekliğinin artması ile jetin çarpma açısında artma olduğu gözlenmiştir.
- En yüksek jet hızına dikdörtgen savaklarda, en düşük jet hızına $\theta=14^\circ$ yan duvar açılı labirent savaklarda ulaşıldığı gözlemlenmiştir.
- Sabit debi ve kuyruksuyu derinliği için, düşü yüksekliğinin artmasıyla genellikle oyulma derinliğinde artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, düşü yüksekliğinin artmasıyla jet çarpma hızının artması şeklinde açıklanabilir.
- Bazı deneylerde düşü yüksekliğinin artmasıyla oyulma derinliğinde önemli değişiklik olmamıştır. Bunun nedeni, çarpma hızı artan jetin akım içerisine soktuğu hava kabarcıkları miktarının artış oranının doğrusal olmamasından kaynaklandığı şeklinde açıklanabilir.
- Aynı şartlar altında, kuyruksuyu derinliğinin artması sonucunda oyulma derinliğinde azalma olduğu belirlenmiştir.

- Bütün savak çeşitlerinde momentumun artışı ile beraber oyulmanın dengeye ulaşma süresinde artış olduğu belirlenmiştir.
- Oyulma derinliğinin labirent savaklarda düşük çıkmasının yanı sıra oyulma çukurunun daha geniş olması ve maksimum oyulma derinliğinin hidrolik yapıya olan yatay mesafesinin en düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Jetin çarpma noktası ile hidrolik yapı arasındaki maksimum mesafe ise klasik dikdörtgen savaklarda elde edilmiştir.
- Aynı koşullarda yürütülen deney sonuçlarına göre; en düşük oyulma derinliği labirent savaklarda, en yüksek oyulma derinliği ise dikdörtgen savaklar ile trapez savaklarda gözlenmiştir.



ÖNERİLER

- Türbülans modelinin sonuçlara etkisini incelemek için farklı türbülans modelleri denenebilir.
- Farklı dane çapının oyulma üzerine etkisi çok daha fazla medyan dane çapına sahip sediment için incelenebilir.
- Kuyruksuyu etkisinin net bir şekilde görülebilmesi için daha yüksek kuyruksuyu derinliklerinde çalışmalar yapılabilir.
- Mansap havuzunda rijit taban alınarak çalışma yürütülebilir.
- Daha büyük model ölçeği için deneyler gerçekleştirilebilir.
- Rijit tabanda oluşacak basınçlar, farklı savak türleri için incelenebilir.
- Farklı savak türleri için mansap havuzundaki hava konsantrasyonları belirlenerek oyulmaya etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, S., Kamanbedast, A., & Ahadian, J. (2011). Numerical Investigation of Angle and Geometric of L-Shape Groin on the Flow and Erosion Regime at River Bends. *World Applied Sciences Journal*, 15(2), 279-284.
- Adduce, C., La Rocca, M. (2006). "Local scouring due to turbulent water jets downstream of a trapezoidal drop: Laboratory experiments and stability analysis", *Water resources research*, 42(2).
- Adduce, C., & Sciortino, G. (2006). Scour due to a horizontal turbulent jet: Numerical and experimental investigation. *Journal of hydraulic research*, 44(5), 663-673.
- Aderibigbe, O.O. and Rajaratnam, N. (1996): "Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets." *Journal of Hydraulic Research*, 34:1, 19-33, DOI: 10.1080/00221689609498762
- Amen, K. A. (2008). Mathematical Model for Estimating Scour Downstream Weirs. *Journal of Eng., Faculty of Eng., Assiut University, Egypt*, 36(2), 285-294.
- Annandale G.W. and George, M.F. (2011): "Closure problem to jet scour.", *Journal of Hydraulic Research*, 49:2, 276-277, DOI: 10.1080/00221686.2011.568205.
- Annandale G.W. (2006): "Scour technology: mechanics and engineering practice." New York: McGraw-Hill c2006, ISBN0071440577; ISBN9780071440578.
- Annandale, G.W.; Witley, R.J.; Mefford, B.W.; Abt, S.R. and Ruff, J.F. (1995): "Spillway and dam foundation erosion: Predicting progressive erosion extent.", Presented At The First International Conference On Water Resources Engineering In San Antonio, Texas, August 14-18, Texas.
- Annandale, G.W.; Smith, S.P.; Nairns, R. and Jones, J.S. (1996): "Scour power." *Civil Engineering*; Jul 1996; 66, 7; ProQuest pg. 58.
- Annandale, G.W. "Rock scour: past, present and future.", Presentation, Available from: <http://www.seprem.es/st_pe_f/JTAliviaderos2/ROCK_SCOUR.pdf>, [28/08/2015].
- Armitage, N.; Cunningham, M.; Kabir A.; and Abban B. (2007): "Local scour in rivers: The extent of the problem in South Africa, The state of the art of numerical modelling." WRC Report no. KV 185/07.
- Asadollahi, P.; Tonon, F.; Federspiel, M.P.E.A. and Schleiss, A.J. (2011): "Prediction of rock block stability and scour depth in plunge pools." *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 750- 756, DOI: 10.1080/00221686.2011.618055.
- Asadollahi P. and Tonon, F. (2010): "Stability of rock blocks subjected to high velocity water jets." *ARMA* 10-203.
- Aswegen, V.W.J.; Dunkley, E.; and Blake, K.R.K. (2001): "Plunge Pool Scour Reproduction in Physical Hydraulic Models." Report of the Water Research Commission, 2001.
- Balachandar R and Reddy, H.P. (2013): "Scour caused by wall jets." Chapter 8, INTECH Open Access Publisher, 2013 , ISBN 953511039X, 9789535110392.
- Baron, T. (1949): "Technical report", University of Illinois, no. 4.
- Berchtold, T.H. and Pfister, M. (2011): "Measures to reduce dynamic plunge pool pressures generated by a free jet." *Dams and Reservoirs under Changing Challenges – Schleiss & Boes (Eds) © 2011 Taylor and Francis Group, London*, ISBN 978-0-415-68267-1.
- Bollaert, E.F.R. (2002): "Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact." Communication No.13 of the Laboratory of Hydraulic Constructions, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Bollaert, E.F.R. and Schleiss, A.J. (2005): "Physically based model for evaluation of rock scour due to high-velocity jet impact." *ASCE J. of Hydraulic Engineering*, March: 153-165.
- Bollaert, E.F.R.; Manso, P.A. and Schleiss, A.J. (2004): "Dynamic pressure fluctuations at real life plunge pool bottoms." *Hydraulics of dams and river structures*, Teheran, Iran, pp. 117-124. 2004.

- Bollaert, E.F.R. (2004): "A comprehensive model to evaluate scour formation in plunge pools." Hydropower and dams, Issue one, 2004.
- Bollaert, E.F.R. (2010a): "Rock scour at hydraulic structures: a practical engineering approach". Geo-Strata July-August 2010.
- Bollaert, E.F.R. (2010b): "The Comprehensive Scour Model: Theory and Feedback from Practice." 5th International Conference on Scour and Erosion, San Francisco, November 2010.
- Bollaert, E.F.R. (2010c): "A Prototype scaled rock scour prediction model." USSD Annual Meeting, April 12-15 2010, Sacramento, United States.
- Bollaert, E.F.R.; Duarte, R.; Pfister, M.; Schleiss, A. and Mazvidza, D. (2012): "Physical And Numerical Model Study Investigating Plunge Pool Scour At Kariba Dam." Commission Internationale Des Grands Barrages Vingt-Quatrième Congrès Des Grands Barrages Kyoto, June 2012.
- Borghei, S.M. and Zarnani, P. (2008): "Jet impact geometry and plunge pool dimensions effects on dynamic pressures at pool sidewalls." Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(4): 408-417, 10.1139/L07-141.
- Bormann, N. E., Julien, P. Y. (1991). "Scour downstream of grade-control structures", Journal of hydraulic engineering, 117(5), 579-594.
- Boushaba, F.; Manso, P.; Schleiss, A.J.; Yachouti, A. and Daoudi, S. (2013): "Numerical and Experimental High-Reynolds Jet Diffusion and Impact Pressures in Flat and Laterally Confined Aerated Pools." International Journal of Hydraulic Engineering 2013, 2(6): 133-141 DOI: 10.5923/j.ijhe.20130206.02.
- Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. (1991), "Scouring." Balkema, pp. 99 – 122, Rotterdam, ISBN: 90 6191 983 5.
- Burkow, M., & Griebel, M. (2016). A full three dimensional numerical simulation of the sediment transport and the scouring at a rectangular obstacle. Computers & Fluids, 125, 1-10.
- Calitz, J. (2016). Analysis of the Hydrodynamics of rectangular plunging Jets and the subsequent scouring in broken-up Rock Beds (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).
- Castillo, L.G. E. (2015): Personal communication, 28 February.
- Castillo, L.G.E. (2006): "Aerated Jets and Pressure Fluctuation in Plunge Pools." The 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), Sep 10 – Sep 13, Philadelphia, USA.
- Castillo, L.G.E. (2007): "Pressures Characterization of Undeveloped and Developed Jets in Shallow and Deep Pool." 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering & Research Venice, Italy, 1 – 6 July 2007.
- Castillo, L. G., & Carrillo, J. M. (2014). Scour estimation of the Paute-Cardenillo Dam. Proceedings of the International Perspectives on Water Resources & the Environment, Quito, Ecuador, 8-10.
- Castillo, L.G.; Carrillo, J.M. and Blázquez, A. (2014): Plunge pool dynamic pressures: a temporal analysis in the nappe flow case, Journal of Hydraulic Research, DOI: 10.1080/00221686.2014.968226.
- Chee, S. P., and Padiyar, P. V. (1969). "Erosion at the base of flip buckets." Engrg. J., 52(111), 22-24.
- Chen, J. Y., Hong, Y. M. (2001). "Characteristics of check dam scour hole by free over-fall flow", Journal of the Chinese Institute of Engineers, 24(6), 673-680.
- Cheng, X.; Chen Y. and Luom L. (2006): "Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways." Science in China, Series E: Technological Sciences 2006 Vol.49 No.6 674—6847.
- Chunrong, L., Aode, H., & Wenju, M. (2002). Numerical and experimental investigation of flow over a semicircular weir. Acta Mechanica Sinica, 18(6), 594-602.
- CUR (1995): "Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering." Balkema, Rotterdam. ISBN: 90 5410 605 0.
- Çatakli, O., Özal, K., Tandoğan, A.R. (1973). "A study of scours at the end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipators", 11th Congress of Large Dams, Madrid.

- D'Agostino, V. (1994). "Indagine sullo scavo a valle di opere trasversali mediante modello fisico a fondo mobile." *Energ. Elettr.*, 71(2), 37–51, (in Italian).
- D'Agostino, V., Ferro, V. (2004). "Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(1), 24-37.
- Damle, P. M., et al. (1966). "Evaluation of scour below ski jump buckets of spillways" *Golden Jubilee Symp., Central Water and Power Res. Station, Poona, India*, 1, 154-163.
- Dargahi, B. (2004). "Three-Dimensional Flow Modelling and Sediment Transport in The River Klarälven", *Earth Surf. Process. Landforms*, 29, 821–852.
- Dasgupta, B.; Basu, D.; Das, K. and Green, R. (2011): "Development Of Computational Methodology To Assess Erosion Damage In Dam Spillways." *U.S. Society on Dams*
- Dehghani, A. A., Bashiri, H., Dehghani, N. (2010). "Downstream scour of combined flow over weirs and below gates", *River Flow–Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds)*.
- Dey, S., Westrich, B. (2003). "Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry", *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 44-53.
- Dey, S., Raikar, R. V. (2007). "Scour below a high vertical drop." *Journal of Hydraulic Eng. ASCE*, 133 (5), 564-568.
- Dey, D. and Eldho, T.I. (2009): "Effect of spacing of two offset jets on scouring phenomena." *Journal of Hydraulic Research, Journal of Hydraulic Research*, 47:1, 2009, pg. 82-89.
- Eggenberger W, Muller R. 1944. " Experimentelle und theoretische Untersuchungen "uber das Kolkproblem, Mitteilung aus der Versuchsanstalt f'ur Wasserbau, 5. Verlag A.G. Gebr. Leemann & Co.: Zurich; 59–79.
- Eggenberger, W. (1943). "Die Kolkbildung bei einen Uberstromen und beider Kombination Uberstromen-Unterstromen," thesis presented to ETH, at Zurich, Switzerland, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (in German).
- Emiroglu (2010). "Estimating Flow Characteristics of Different Weir Types and Optimum Dimensions of Downstream Receiving Pool", *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58(4), 245-260.
- Emiroglu, M. E., Kaya, N., & Agaccioglu, H. (2010). Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136 (1), 37-46.
- Emiroglu, M. E., Gogus, M., Tunc, M., and Islamoglu, K. (2017). "Effects of Antivortex Structures Installed on Trapezoidal Labyrinth Side Weirs on Discharge Capacity and Scouring." *Journal of Irrigation and Drainage (ASCE)*, 143(4).
- Engineeringtoolbox, "Water surface tension." (surface tension values) Available from: <http://www.engineeringtoolbox.com/water-surface-tension-d_597.html>, [28/08/2015].
- Epely-Chauvin, G., De Cesare, G., Schwindt S (2014). "Numerical Modelling of Plunge Pool Scour Evolution in Non-Cohesive Sediments", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4), 477–487.
- Ervine, D. A. (1998). "Air Entrainment in Hydraulic Structures: A Review", *Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy*, 130(3), 142-153.
- Ervine, D. A., McKeogh, and Elsayy, E. M. (1980). "Effect of turbulence intensity on the rate of air entrainment by plunging water jets", *Proc., Inst., Civ. Engrs., Part 2*, June, 425-445.
- Ervine, D.A.; Falvey, H.T. and Withers, W. (1997): "Pressure fluctuations on plunge pool floors." *Journal of Hydraulic Research*, 35:2, 257-279, DOI:10.1080/00221689709498430.
- Ervine, D.A. and Falvey, H.T. (1987). "Behaviour of Turbulent Water Jets in the Atmosphere and in Plunge Pools." *Ice Proceedings 01/1987*; 83(1):295-314. DOI: 10.1680/iicep.1987.353.
- Falciai, M., and Giacomini, A. (1978). "Indagine sui gorghi che si formano a valle delle traverse torrentizie." *Italia Forestale Montana*, 23(3), 111–123, (in Italian).

- Fan, F., Liang, B., Bai, Y., Zhu, Z., & Zhu, Y. (2017). Numerical modeling of local scour around hydraulic structure in sandy beds by dynamic mesh method. *Journal of Ocean University of China*, 16(5), 738-746.
- Flow 3D. (2014). Manual, Sediment Scour Model. Flow-3D User Manual, v11.0.3. Flow Science, Inc.
- George M.F. and Sitar, N. (2012): "Block theory application to scour assessment of unlined rock spillways." Report no. UCB GT 12-02.
- Ghodsian, M. Melville, B., Tajkarimi, D. (2006). "Local scour due to free overfall jet", *Proceeding of Institution of Civil Engineers, Water Management*, 159(WM4), 253-260.
- Ghodsian, M. Mehraein, M. Ranjbar, H.R. (2012a). "Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment", *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 19(6), 1437-1444.
- Ghodsian, M. Melville, B., Coleman, S. (2012b). "Local scour due to sediment-carrying free-overfall water jet", *Proceeding of Institution of Civil Engineers, Water Management*, 165(WM1), 21-29.
- Göğüş, M., Köken, M. (2011). Köprü Yan Ayağı Uzunluğunun Akım Karakteristiklerine ve Taban Oyulmasına Etkisi. TÜBİTAK araştırma projesi, Proje No: 108M590.
- Güven, A., Günel, M. (2008a). "Genetic programming approach for prediction of local scour downstream of hydraulic structures", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2), 241-249.
- Güven, A., Günel, M. (2008b). "Prediction of scour downstream of grade-control structures using neural networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(11), 1656-1660.
- Güven A., (2010): "A multi-output descriptive neural network for estimation of scour geometry downstream from hydraulic structures." *Advances in Engineering Software* Volume 42, Issue 3, March 2011, Pages 85-93.
- Hanson, G. J., Robinson, K. M., Cook, K. R. (2000). "Estimating free overfall jet scour of a cohesive soil", *ASAE Annual International Meeting*, Paper No. 2065, July 9-12, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- Hartung, W.(1959) "Scour of the movable bed due to floods." , *Die wasser-wirtschaftl*, (in German), 49(1), 309-313.
- Hausler, E. (1983): "Spillways and outlets with high energy concentration.", *Trans. Int. Symp. Layout of dams in Narrow Gorges*, Vol. 2 pp. 177-194 Rio de Janeiro;1983.
- Hawkswood, M.; Evans, G. and Hawkswood, G. (2013): "Berth Scour Protection for Fast Ferry Jets." *ICE Marine Structures & Breakwaters* 2013.
- Heng, S.; Tingsanchali, T. and Suetsugi, T. (2012): "Analysis of plunge pool scour hole formation below a chute spillway with flip bucket using a physical laboratory model." *ASEAN Engineering journal Part C* 1 (1), pg. 88 – 101.
- Hickin, E.J. (2004): "River hydraulics and channel form", Chapter 5: Nature of turbulence and velocity distributions in rivers, Available from: <<http://www.sfu.ca/~hickin/FLUIDS/Chapt5-Turbulence.pdf>>, [28/08/2015].
- Hoffmans, G. J. (1998). "Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Engineering*", 124(4), 430-437.
- Hoffmans, G. J., Pilarczyk, K. W. (1995). "Local scour downstream of hydraulic structures", *Journal of Hydraulic Engng.*, ASCE, 121(4), 326-339.
- Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J. (1997): "Scour manual." Balkema, Rotterdam.
- Horeni, P. (1956): "Disintegration of a free jet of water in air." *Sesit* 93, Praha, Pokbaba.
- Huai, W.; Wang, Z.; Qian, Z. and Han, Y. (2011): "Numerical simulation of sandy bed erosion 2D vertical jet." *Science China Technological Sciences* Volume 54, Issue 12 , pp 3265-3274.
- İkinciogulları, E. (2019). Serbest düşümlü savakların mansabında oluşan yerel oyulmanın sayısal analizi, Fırat Üniversitesi, Doktora Tezi, Elazığ, Türkiye.
- Jaeger, C. (1939). "Über die Aehnlichkeit bei flussaulichen Modellversuchen." *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, 34(23/24), 269, (in German).

- Jia, Y.; Kitamura, T and Wang, S.S.Y. (2001): "Simulation of scour process in plunging pool of loose bed-material." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 3, March, 2001. q ASCE, ISSN 0733-9429/01/0003-0219-0229. Paper No. 21545.
- Jahromi, S. M., Nasserian, H. H. (2010). "Effect of tailwater depth on the scour downstream of falling jets", In *Scour and Erosion ASCE*, 688-696.
- Jorabloo, M., Maghsoodi, R., & Sarkardeh, H. (2011). 3D Simulation of Flow over Flip Buckets at Dams. *Journal of American Science*, 7(6), 931-936.
- Karim, O.A. and Ali, K.H.M. (2000): "Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets." *Journal of Hydraulic Research*, 38:4, 279-287, DOI: 10.1080/00221680009498327.
- Kieffer D.S. and Goodman, R.E. (2012): "Assessing scour potential of unlined spillways with the block scour spectrum." *Geomechanics and Tunnelling Volume 5, Issue 5*, pages 527–536, October 2012.
- Kitamura, J. Y., Wang, S. (2001). "Simulation of scour process in plunging pool of loose bed – material", *Journal of Hydraulic Engineering* 127(3), 219-229.
- Köken, M. (2014). Nehirlerde Köprü Yan Ayakları Sebebiyle Oluşan Daralmanın Oyulma ve Akım Karakteristiklerine Etkisi ve Oyulmayı Azaltıcı Düzeneklerin Araştırılması, TÜBİTAK Araştırma Projesi, Proje No: 111M377.
- Kotoulas, D. (1967). "Das kolkproblem unter besonderer Berücksichtigung der faktoren "Zeit" und "Geschiebemischung" im Rahmen der Wildbachverbaug, Schweizerische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, 43(1).
- Lenzi, M. A., Marion, A., Comiti, F. (2003). "Local scouring at grade-control structures in alluvial mountain rivers, *Water Resources Research*, 39(7).
- Lewis, T.M.; Abt, S.R.; Wittler, F.R.J. and Annandale, G.W. (1999); Predicting Impact Velocities of Developed Jets, *Water International*, 24:3, 255-265, DOI: 10.1080/02508069908692169.
- Little, W. C., Murphey, J. B. (1982). "Model study of low drop grade control structures". *Journal of the Hydraulics Division*, 108(10), 1132-1146.
- Liu, X., & García, M. H. (2008). Three-dimensional numerical model with free water surface and mesh deformation for local sediment scour. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 134(4), 203-217.
- Liu, S., Yang, Y., & Wu, X. (2017). Simulations of Local Scour Around a Cylindrical Bridge Pier And a Semicircular Abutment Using Unsteady k-ε Model Combined with σ-Grid. *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1).
- Liu, P.Q.; Dong, J.R. and Yu, C. (1998): "Experimental investigation of fluctuation uplift on rock blocks at the bottom of the scour pool downstream of Three-Gorges spillway." *Journal of Hydraulic Research*, 36:1, 55-68.
- Lui, X., Garcia, M. H. (2008). Three-Dimensional Numerical Model with Free Water Surface and Mesh Deformation for Local Sediment Scour. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 134(4), 203-217.
- Lu, J.Y.; Su, C.C; Hong, J.H and Chen, E.J. (2012): "Prediction of Maximum General Scour Depth during a Flood for Intermittent Rivers." *ICSE6 Paris - August 27-31, 2012*, pg. 79-86.
- Manso, P.F.A.; Bollaert, E.F.R. and Schleiss, A.J. (2008): "Evaluation of high-velocity plunging jet-issuing characteristics as a basis for plunge pool analysis." *Journal of Hydraulic Research*, 46:2, 147-157, DOI:10.1080/00221686.2008.9521852.
- Martins, R. (1975). "Scouring of rocky riverbeds and free-jet spillways." *Int. Water Power Dam Constr.*, 27(5), 152-153.
- Mason, P. J., Arumugam, K. (1985). "Free jet scour below dams and flip buckets". *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2), 220-235.
- Mason, P.J. (1989). "Effects of air entrainment on plunge pool scour." *J. Hydraulic Eng.*, 115(3), 385-399.
- Mastbergen, D. R., Van Den Berg, J. H. (2003). "Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons", *Sedimentology*, 50(4), 625–637.

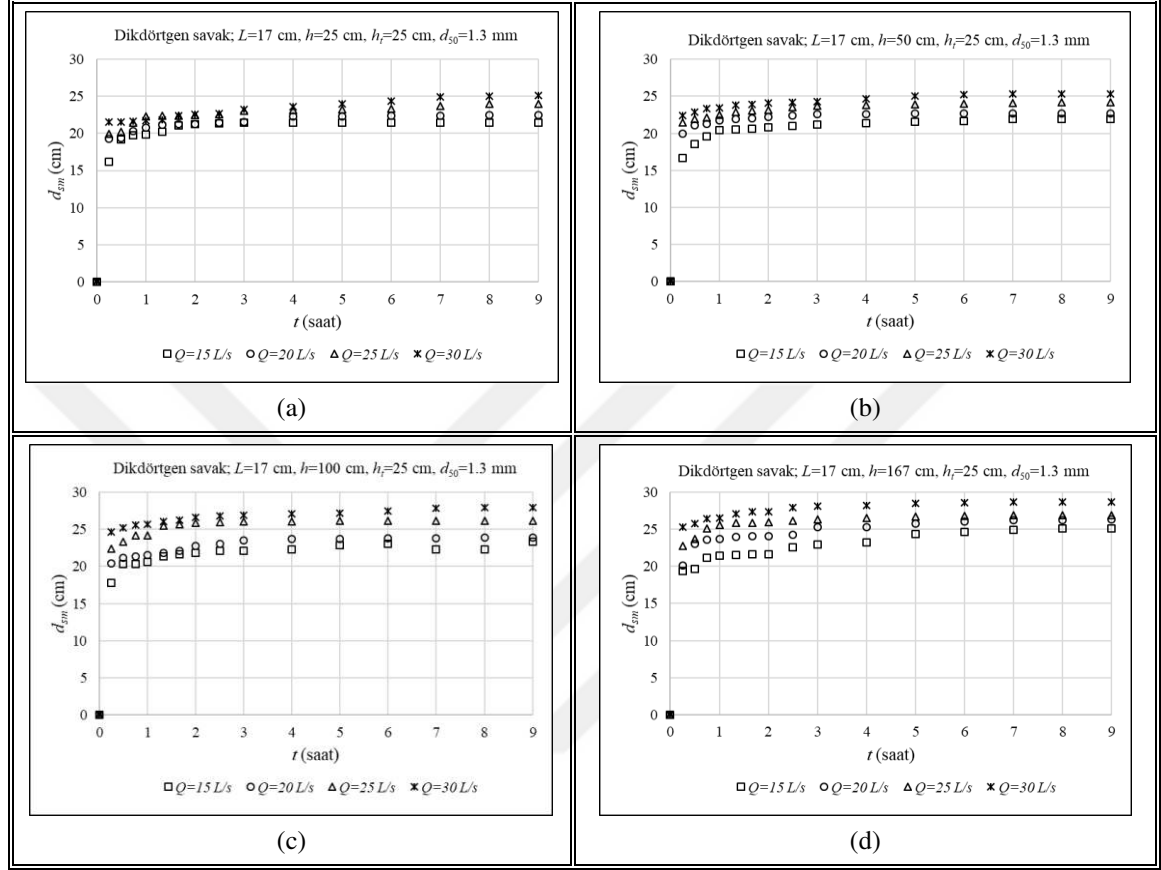
- Mazurek, K.A. and Rajaratnam, N. (2005): "Erosion of sand beds by obliquely impinging plane turbulent air jets." *Journal of Hydraulic Research*, 43:5, 567-573, DOI: 10.1080/00221680509500155
- Mazurek, K. A. and Hossain, T. (2007), "Scour by jets in cohesionless and cohesive soil." NRC Canada.
- Mehraein, M.; Ghodsian, M. and Schleiss, A.J. (2012): Scour formation due to simultaneous circular impinging jet and wall jet, *Journal of Hydraulic Research*, 50:4, pg. 395-399, DOI: 10.1080/00221686.2012.694174.
- Mehta, A.J. (1991): "Review notes on cohesive sediment erosion". In *Coastal Sediments '91: Proceedings of a Specialty Conference on Quantitative Approaches to Coastal Sediment Processes*, Seattle, Wash., 25-27 June 1991. Edited by N.C. Kraus, K.J. Gingerich, and D.L. Kriebel. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y. Vol. 1, pp. 40-53.
- Melville, B.W. and Sutherland, A.J., 1988. Design method for local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(10).
- Meyer-Peter, E. Müller, R. (1948). "Formulas for bed-load transport", *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*, 39-64.
- Monfette, M. (2004): "Comprehensive review of plunge pool performance at four of the BC hydro dam sites and assessment of scour extent", Master's Thesis, The University of British Columbia.
- Mossa, M. (1998). "Experimental study on the scour downstream of grade-control structures." *Proc., 26th Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Catania, September, 3, 581-594.
- Müller, R. (1944), "Über einige Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauung." *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 95, 11-25 [On some bases of river and torrent structures] (in German).
- Nejad, J.K.; Moghadam, M.F.; Lashkarara B. and Haghighipour, S. (2011): Dynamic pressures of flip bucket jets, *World applied sciences journal* 12 (8); 1165-1171, 2011.
- Neyshabouri, A.A.S.; Da Suva, A.M.F. and Barron, R. (2003): "Numerical simulation of scour by a free falling jet." *Journal of Hydraulic Research*, 41:5, 533-539, DOI: 10.1080/00221680309499998.
- Noret, C.; Girard, J.C.; Munodawafa, M.C. and Mazvidza, D.Z. (2012): "Kariba Dam on Zambezi River: Stabilizing the Natural Plunge Pool." *ICSE6 Paris - August 27-31, 2012*.
- Novak, P. (1961). "Influence of bed load passage on scour and turbulence downstream of a stilling basin", 9th Congress of the IAHR, Dubrovnik.
- Novak, P., Cabelka, J. (1981). *Models in hydraulic engineering*. London: Pitman Publishing Limited.
- Oliveto, G., Comuniello, V. (2009). "Local scour downstream of positive-step stilling basins" *J. Hydr. Engng. ASCE*, 135(10), 846-851.
- Paaswell, R.E. (1973): "Causes and mechanisms of cohesive soil erosion: state of the art." In *Soil Erosion: Causes and Mechanisms, Prevention and Control: Proceedings of a Conference- Workshop*, Washington, D.C., 26 January 1973. Special Report 135, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. pp. 52-74.
- Pagliara, S., Kurdistani, S. M., Cammarata, L. (2014). "Scour of clear water rock W-weirs in straight rivers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(4).
- Pagliara, S.; Hager, W.H. and Minor, H.E. (2004): "Plunge pool scour in prototype and laboratory", *Intl. Symp. on Hydraulics of Dams and River Structures*, Teheran, Iran, pp. 165-172. 2004.
- Pagliara, S.; Hager, W.H. and Minor, H.E. (2006): "Hydraulics of plane plunge pool scour." *Journal of Hydraulic Engineering* 132 (5), 450 e 461.
- Pang, A. L. J., Skote, M., Lim, S. Y., Gullman-Strand, J., & Morgan, N. (2016). A numerical approach for determining equilibrium scour depth around a mono-pile due to steady currents. *Applied Ocean Research*, 57, 114-124.
- Peiqing, L. and Aihua, L. (2007): "Fluctuating uplift acting on rock blocks at the bottom of river bed and estimation of the limiting scour depth." *Journal of Hydraulic Research*, 45:4, 478-485, DOI: 10.1080/00221686.2007.9521782.

- Pourshahbaz, H., Abbasi, S., & Taghvaei, P (2017). Numerical scour modeling around parallel spur dikes in FLOW-3D.
- Robinson, K.M, Hanson, G.J., Cook, K.R. (1999). "Investigation of scour below an overfall", ASAE Annual International Meeting, Paper No. 992037, July 18-21, Toronto, Ontario, Canada.
- Robinson, K.M, Hanson, G.J., Cook, K.R. (2002). "Scour below an overfall: Part 1. Investigation", ASAE Annual International Meeting, Paper No. 962121, July 14-18, Phoenix, Arizona.
- Robinson, K.M, Hanson, G.J., Cook, K.R. (2002). "Scour below an overfall: Part II. Prediction", ASAE Annual International Meeting, Paper No. 962121, July 14-18, Phoenix, Arizona.
- Sarkar, A., and Dey, S. (2004). "Review on local scour due to jets." *Int. J. Sediment Res.*, 19(3), 210-238.
- Schoklitsch, A. (1932). "Kolkbildung unter Ueberfallstrahlen." *Wasserwirtschaft*, 24, 341-343, (in German).
- Scimemi, E. (1939). "Sulla relazione che intercede fra gli scavi osservati nelle opere idrauliche originali e nei modelli." *Energ. Elettr.*, 16(11), 3-8 (in Italian).
- Scurlock, S. M., Thornton, C. I., Abt, S. R. (2012). "Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade-control structures". *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 167-176.
- Sirdari, Z. Z., Ghani, A. A., & Hasan, Z. A. (2013). Application of 3D Numerical Model in Bedload Transport and Bed Morphology of River Channel Confluence. In *Proceedings of 35th IAHR World Congress: the Wise Find Pleasure in Water*. China (pp. 8-13).
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands*, Chapter 9: Bedload transport. Thomas Telford Publications, London.
- Soulsby, R. L., Whitehouse, R. J. S. W. (1997). "Threshold of sediment motion in Coastal Environments", *Proc. Combined Australian Coastal Engineering and Port Conference*, EA, 149-154.
- Stein, O. R., Julien, P. Y., Alonso, C. V. (1993). "Mechanics of jet scour downstream of a headcut", *Journal of hydraulic research*, 31(6), 723-738.
- Stratford, C.E.; Bollaert, E.F.R. and Lesleighter, E.J. (2013): "Plunge Pool Rock Scour Analysis Techniques: Wivenhoe Dam Spillway, Australia, HYDRO2013, Innsbruck, October.
- Termini, D. (2010): "Bed scouring downstream of hydraulic structures under steady flow conditions: Experimental analysis of space and time scales and implications for mathematical modelling." *Catena* 84 (2011) 125-135.
- Tokyay N.D. "Chapter 4: Design of Outlet Structures." Presentation, Available from: <<http://www2.ce.metu.edu.tr/~ce458/CE458-Chapter-4nt.pdf>> , Middle East Technical University, [28/08/2015].
- Tokyay N.D. "Chapter 5: Design of Dissipation Structures." Presentation, Available from: <<http://www2.ce.metu.edu.tr/~ce473/458/CE458-Chapter%205.pdf>> , Middle East Technical University, [28/08/2015].
- Tsiatas, G. (2005): "Stream Stability and Scour Potential for Rhode Island Bridges.", USGS.
- Tullis, J.P., Amanian, N., Waldron, D., 1995. Design of labyrinth spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No.3., pp. 247-255.
- Tunç, M. (2014). Hareketli Tabanlı Akarsularda Labirent Yan Savaklardaki Akımın Hidrodinamiğinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, Türkiye.
- Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2018). Investigation of Live-Bed Scour at Labyrinth Side Weirs. *Firat University Turkish Journal of Science and Technology*, 13(1), 129-136.
- USBR (2012): "Erosion of rock and soil.", Nov 15, 2012, Available from : <[http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/Risk/BestPractices/15ErosionOfRockAndSoil20121126 .pdf](http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/Risk/BestPractices/15ErosionOfRockAndSoil20121126.pdf)> , [28/08/2015].
- Van Aswegen, W.J.; Dunkley, E. and Blake, K.R.K. (2001): "Plunge pool scour reproduction in physical hydraulic models." WRC Report no. 502/1/01.

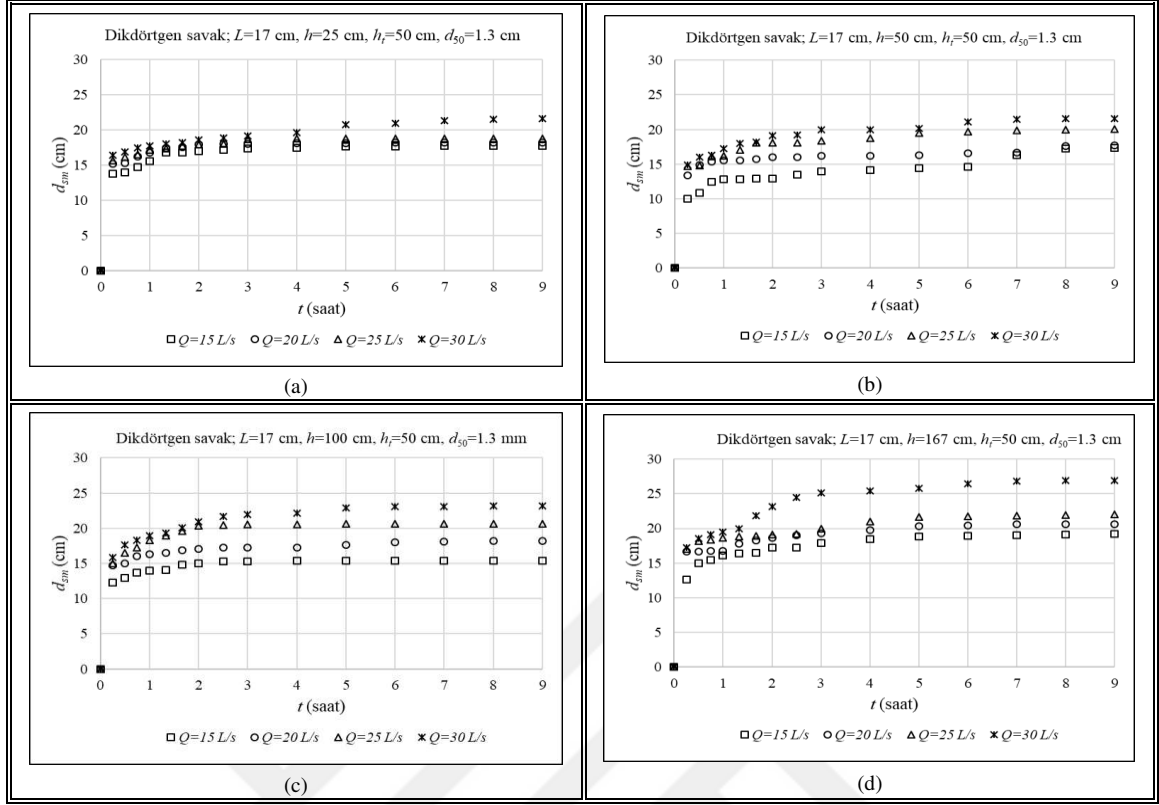
- Vasquez, J. A., & Walsh, B. W. (2009). CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow. In 33rd IAHR Conference Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver.
- Veronese, A. (1937). “Erosioni di fondo a valle di uno scarico.” *Annal. Lavori Pubbl.*, 75(9), 717–726, (in Italian).
- Veronese, A. (1937). “Erosioni de fondo e aval d’uno decharge”, IAHR Meeting for Hydraulic Works, Berlin.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007): “An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method.” Pearson, Prentice Hall.
- Vuik, V. (2010). Numerical modeling of sediment transport over hydraulic structures. MSc Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Field of River Engineering. 131p.
- Wang, C., Liang, F., & Yu, X. (2016). Experimental and numerical investigations on the performance of sacrificial piles in reducing local scour around pile groups. *Natural Hazards*, 1-19.
- Whittaker, J. G., and Schleiss, A. (1984). “Scour related to energy dissipators for high head structures.” *Mitt. Nr. 73 VAW/ETH*, Zurich.
- Winterwerp, J. C., Bakker, W. T., Mastbergen, D. R., Van Rossum, H. (1992). “Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed”, *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 118, 1508–1525.
- Wu, C.M. (1973). “Scour at Downstream End of Dams in Taiwan”. In: *International Symposium on River Mechanics*, Bangkok, Thailand, Vol. I(A 13), pp. 1–6.
- Wu, W., Rodi, W., Wenka, T. (2000). “3D Numerical Modeling Of Flow And Sediment Transport In Open Channels”, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 126(1), 4-17.
- Wu, I; Peirson, B.; Pells, S; Douglas, K. and Miller, B. (2012): “On the Significance of Aeration in the Assessment of Erosion of Unlined Spillways.” *Houille Blanche*; no. 3; pp. 30 - 35; 0018-6368 (ISSN).
- Yıldız, D. (2001). *Barajların mansabındaki oyulmalar*, Ankara: DSİ Genel Müdürlüğü yayınları, Yayın No: KK-951.
- Younkins, B.D. (2008): “Prediction if scour formation due to turbulent wall jet along a noncohesive sediment bed.”, PHD thesis, The Pennsylvania State University The Graduate School Department of Civil Engineering.
- Zeng, J., Constantinescu, G., & Weber, L. (2005). A fully 3d non-hydrostatic model for prediction of flow, sediment transport and bed morphology in open channels. In *Proceedings of the 31st IAHR Congress* (pp. 1327-1338).
- Zhang, H., & Nakagawa, H. (2008). Scour around spur dyke: recent advances and future researches. *Annu Disaster Prev Res Inst, Kyoto Univ*, 51.
- Zhang, H., Nakagawa, H., Baba, Y., Kawaike, K., & Teraguchi, H. (2010). Three-dimensional flow around bandal-like structures. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 54, 175-180.
- Zhu, Z.W. and Liu, Z.Q. (2012): “CFD prediction of local scour hole around bridge piers.” *J. Cent. South Univ.* (2012) 19: 273–281.

EKLER

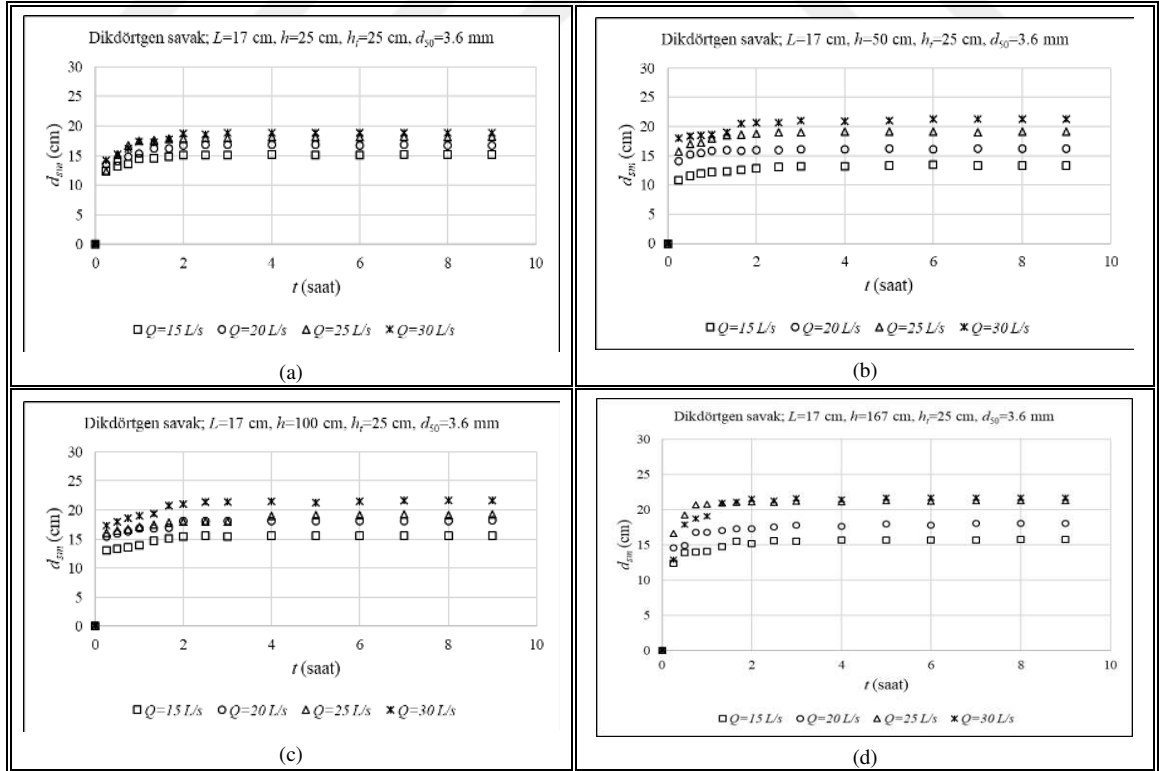
EK- 1: MAKSİMUM OYULMA DERİNLİĞİ-ZAMAN GRAFİKLERİ



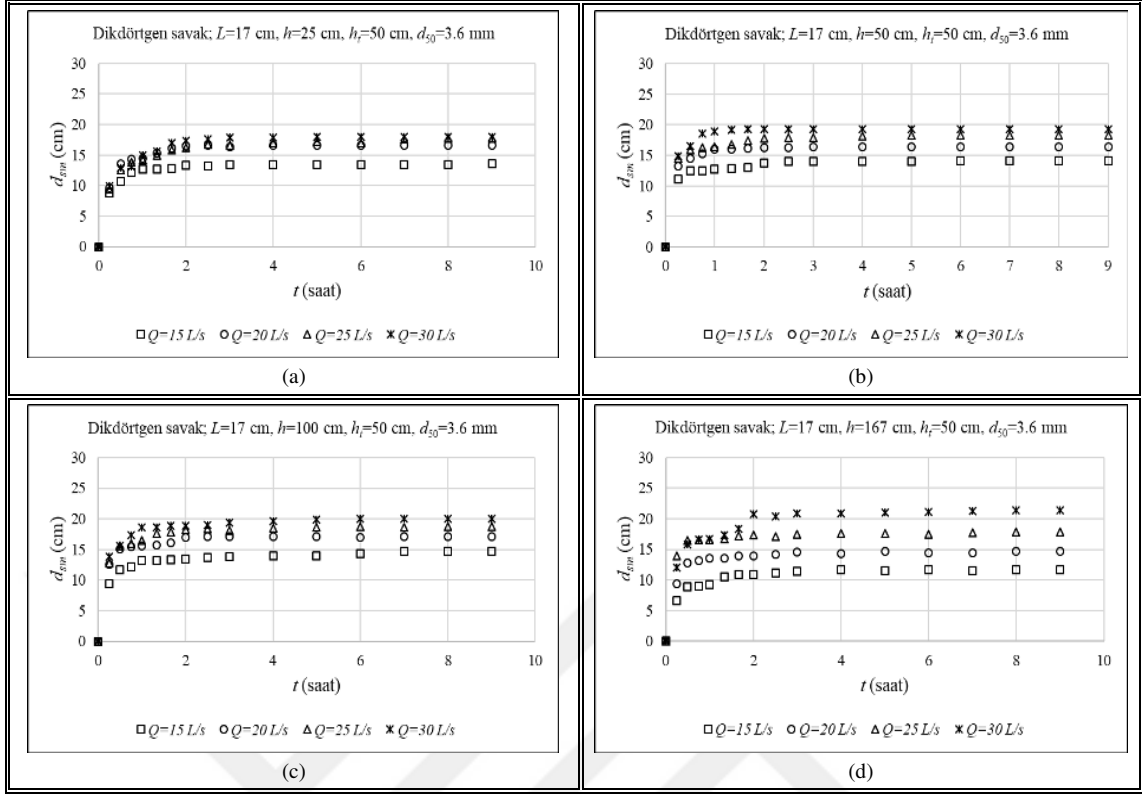
Şekil E1.1. Serbest düşülü dikdörtgen savakta; $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm.



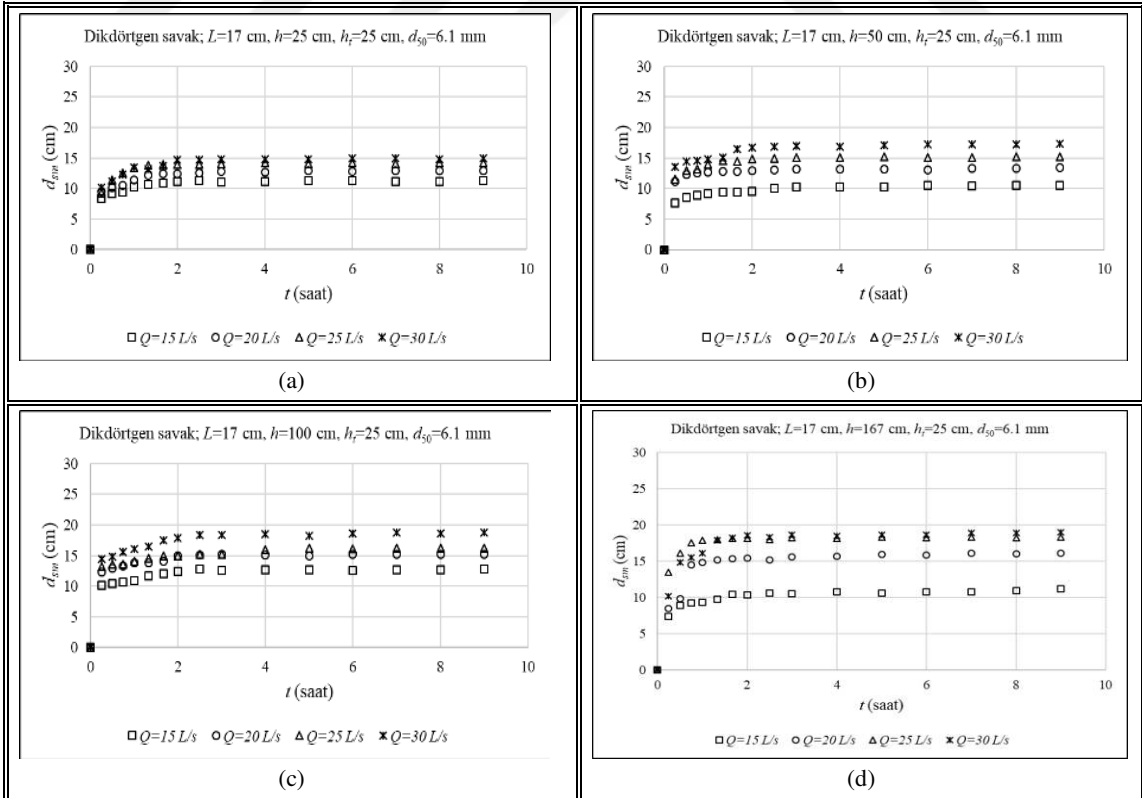
Şekil E1.2. Serbest düşülü dikdörtgen savakta; $h_f=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



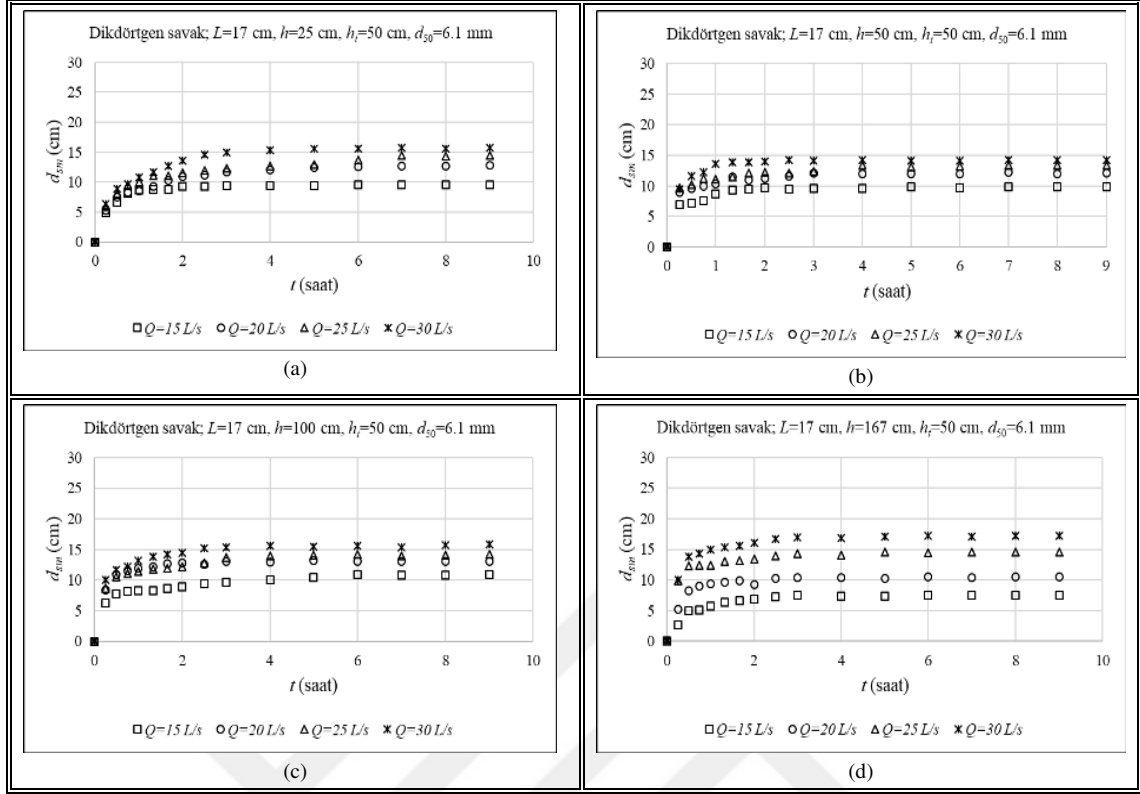
Şekil E1.3. Serbest düşülü dikdörtgen savakta; $h_f=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



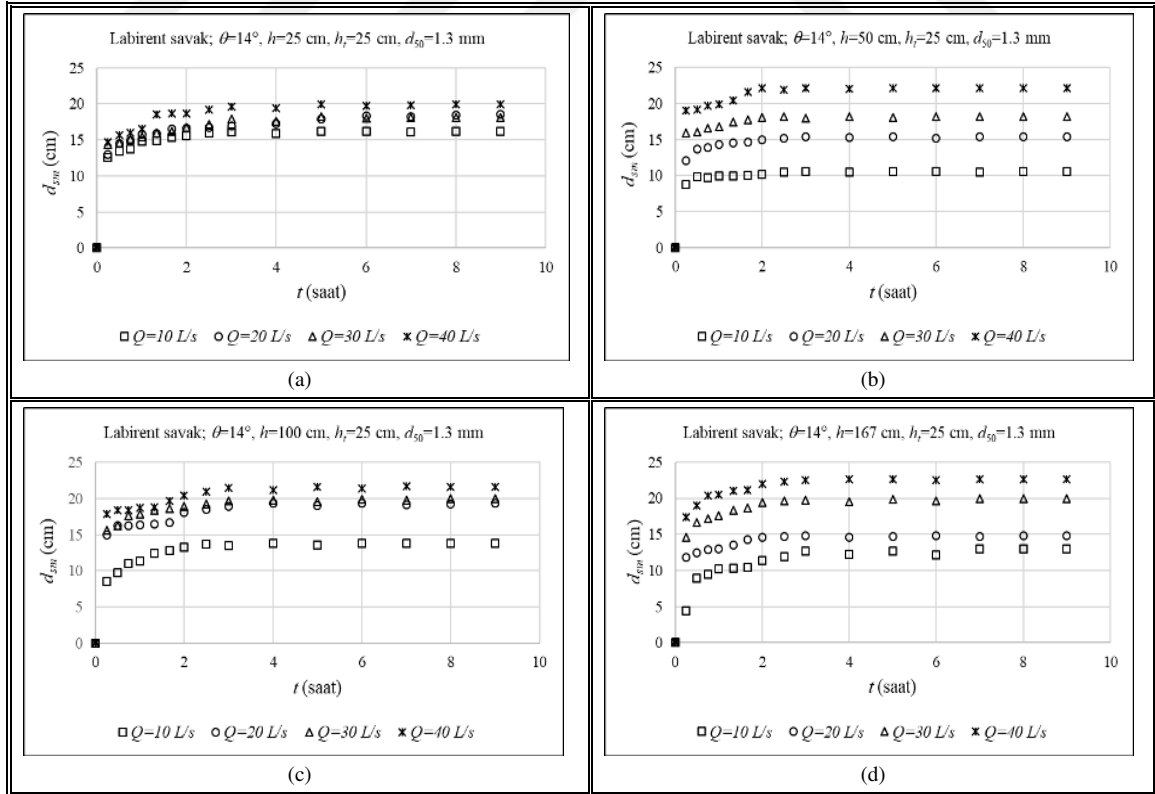
Şekil E1.4. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta; $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



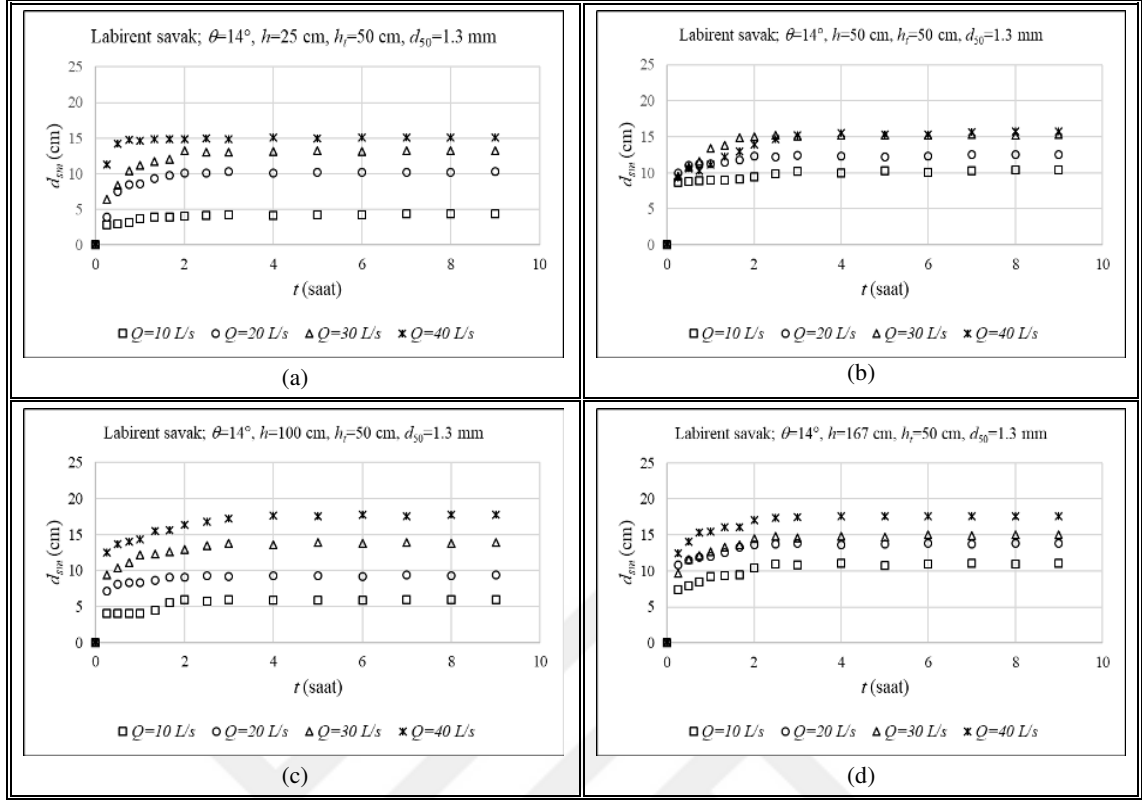
Şekil E1.5. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta; $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



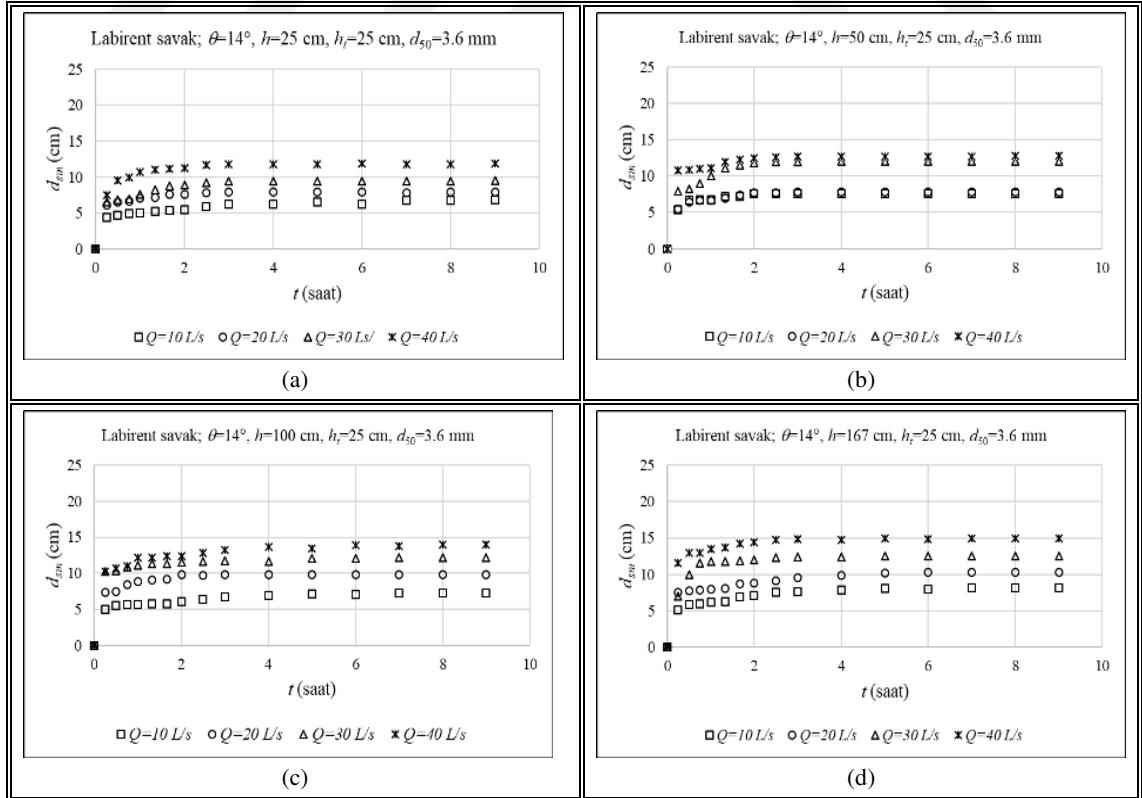
Şekil E1.6. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta; $h_t=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



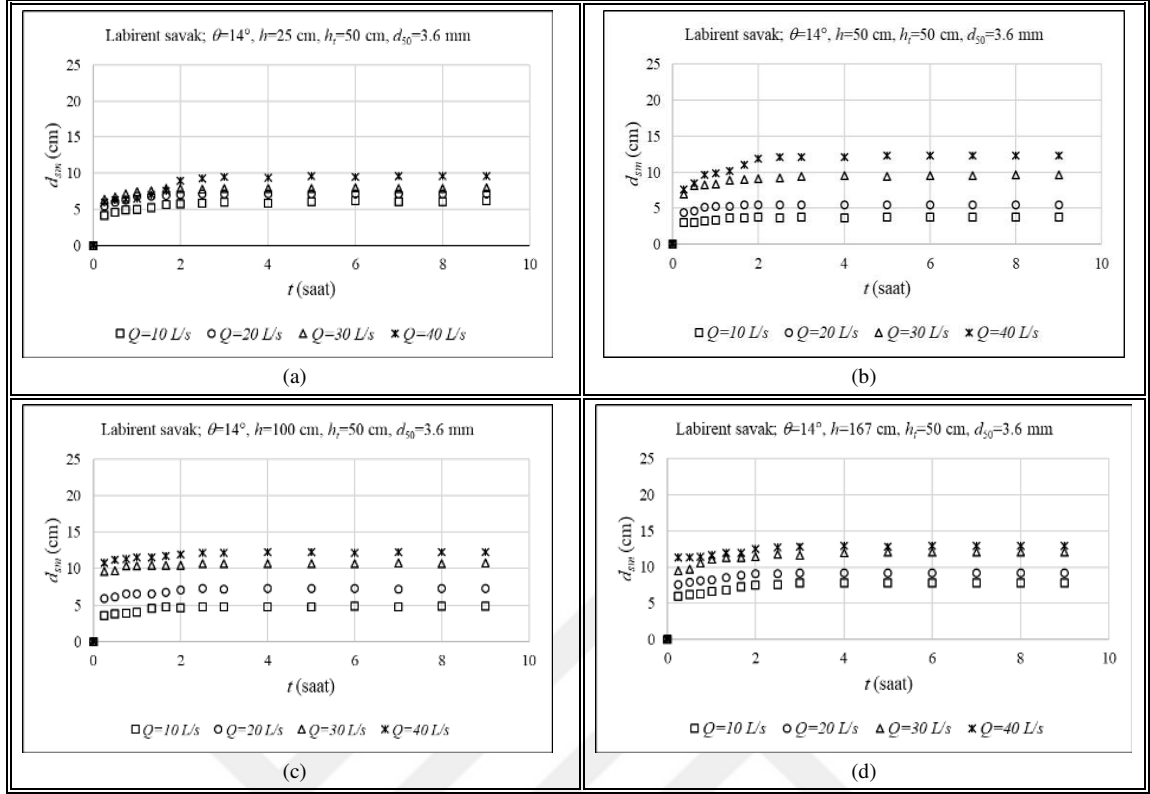
Şekil E1.7. Serbest düşümlü labirent savakta; $h_t=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=10-40$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



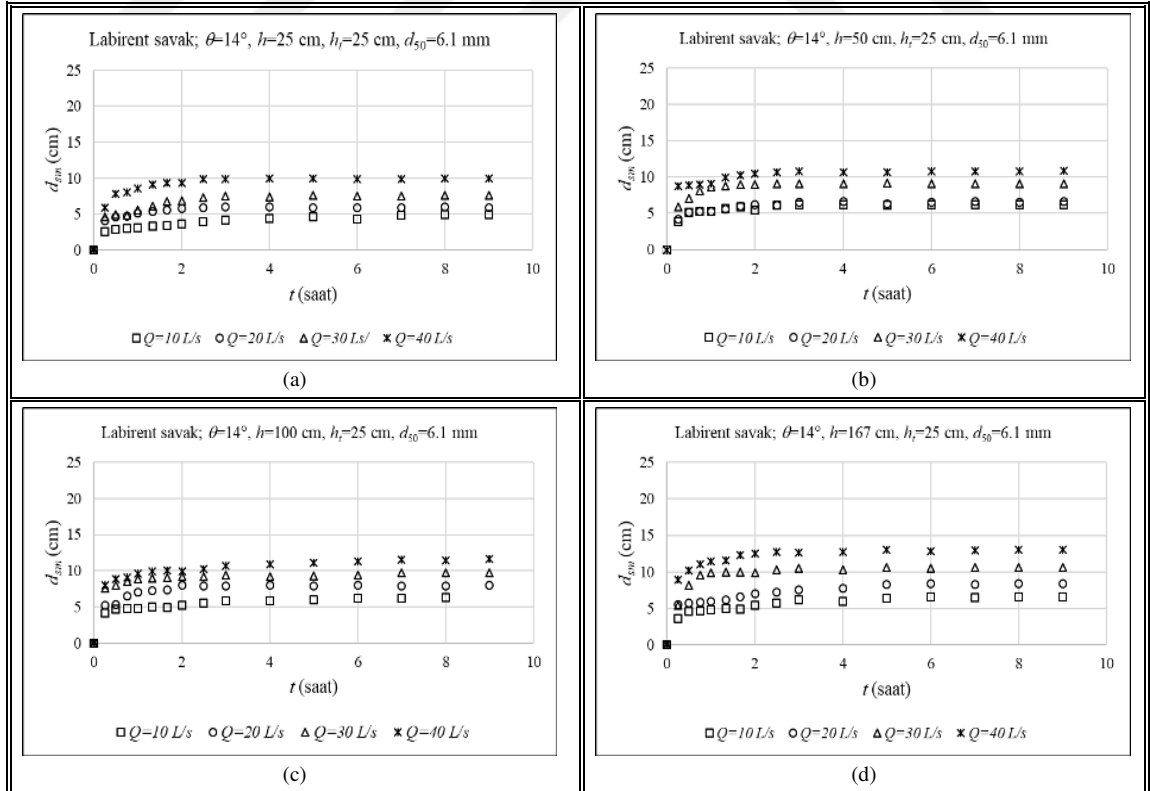
Şekil E1.8. Serbest düşümlü labirent savakta; $h_f=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=10-40$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



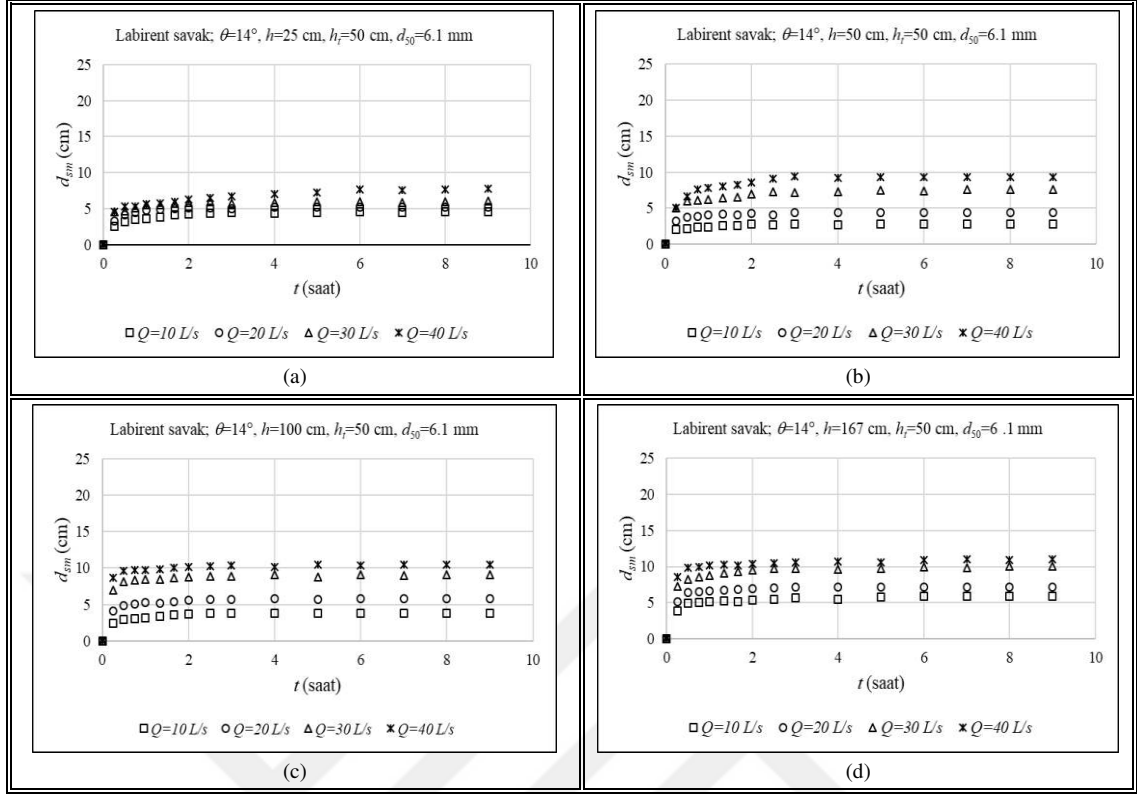
Şekil E1.9. Serbest düşümlü labirent savakta; $h_f=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=10-40$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



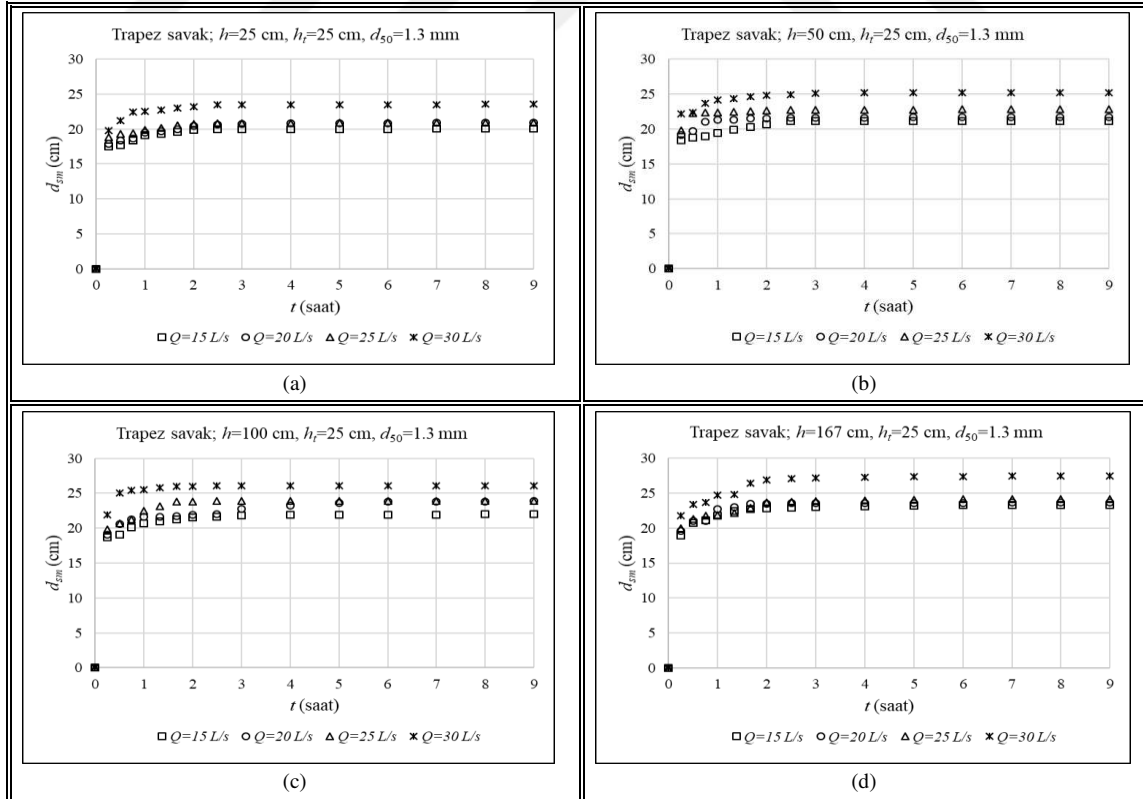
Şekil E1.10. Serbest düşümlü labirent savakta; $h_t=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=10-40$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



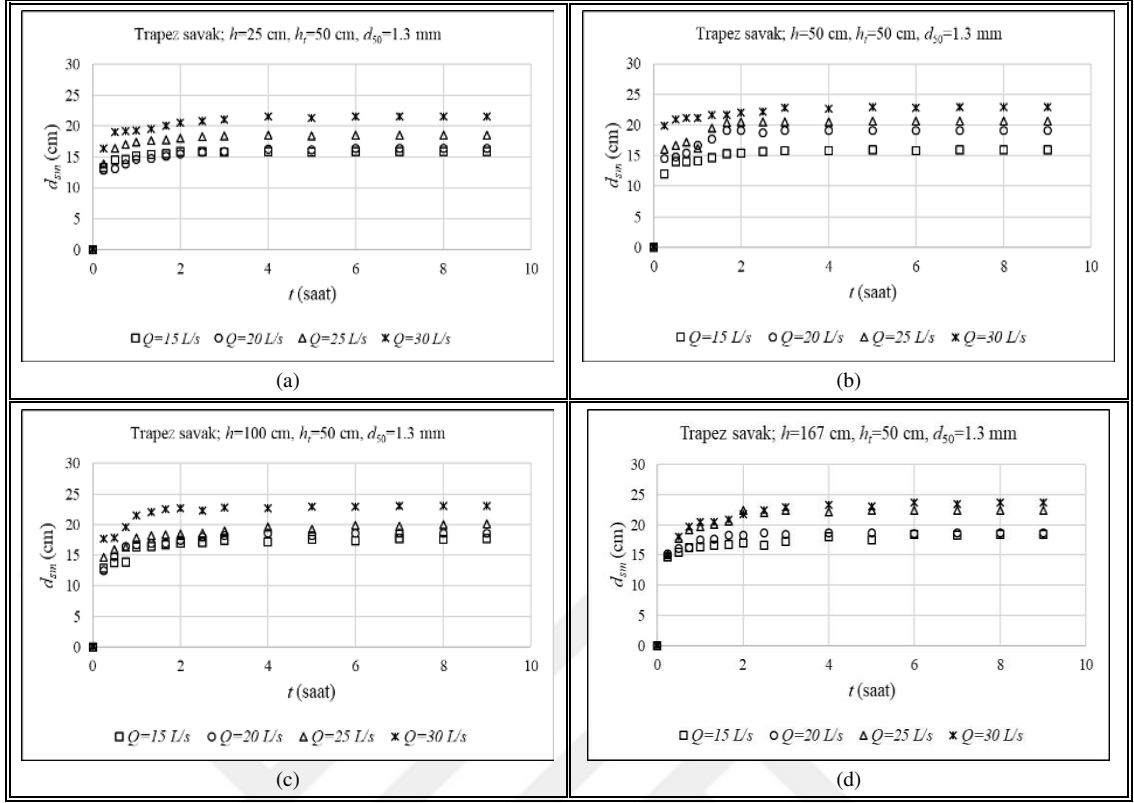
Şekil E1.11. Serbest düşümlü labirent savakta; $h_t=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=10-40$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



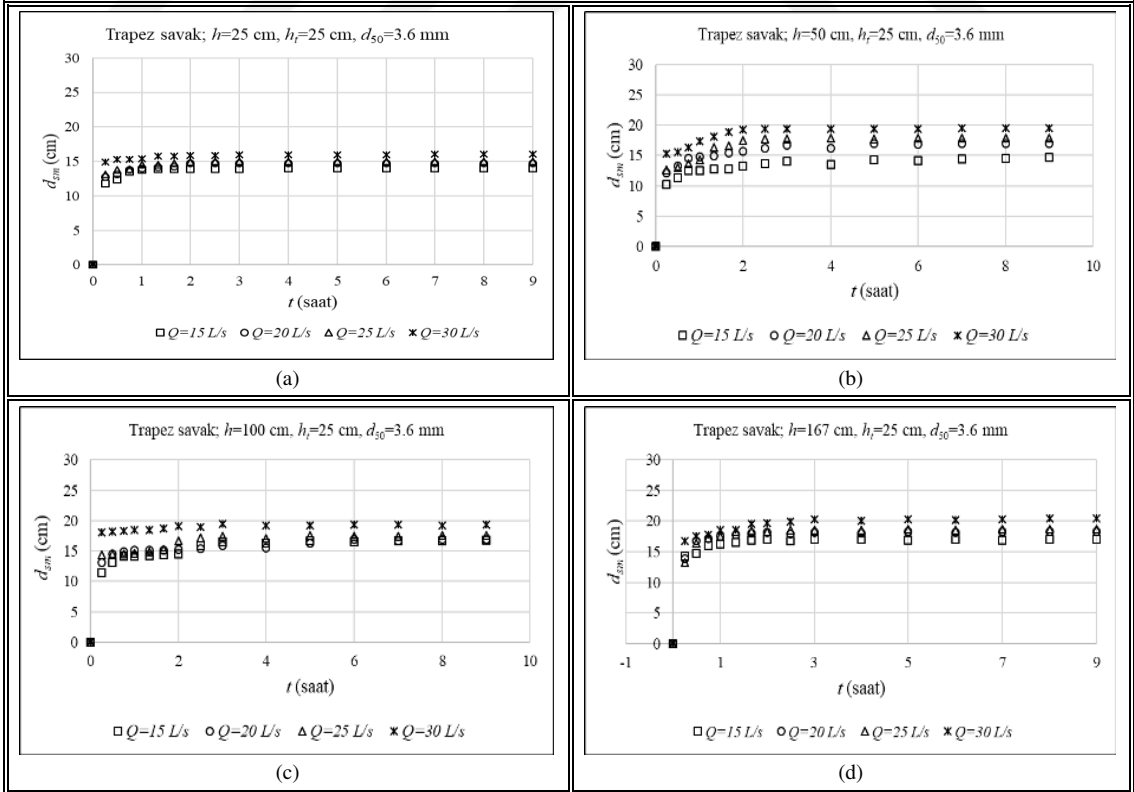
Şekil E1.12. Serbest düşümlü labirent savakta; $h_i=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=10-40$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



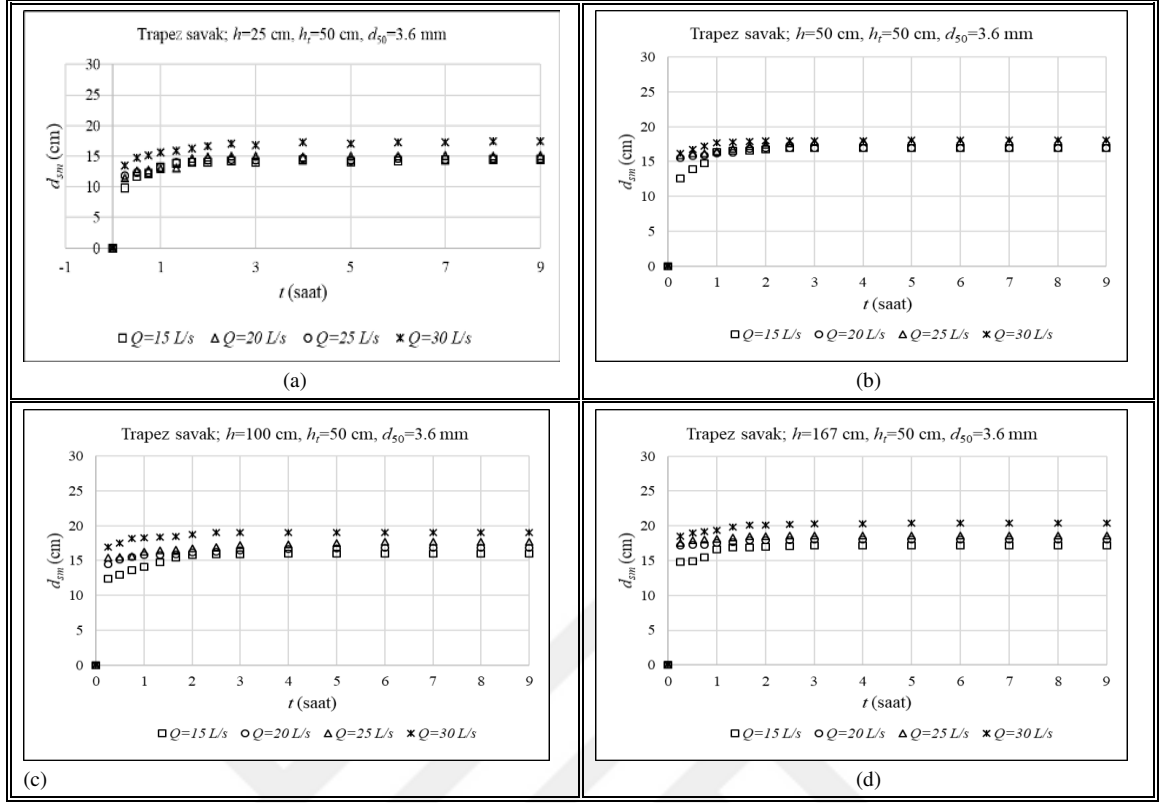
Şekil E1.13. Serbest düşümlü trapez savakta; $h_i=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



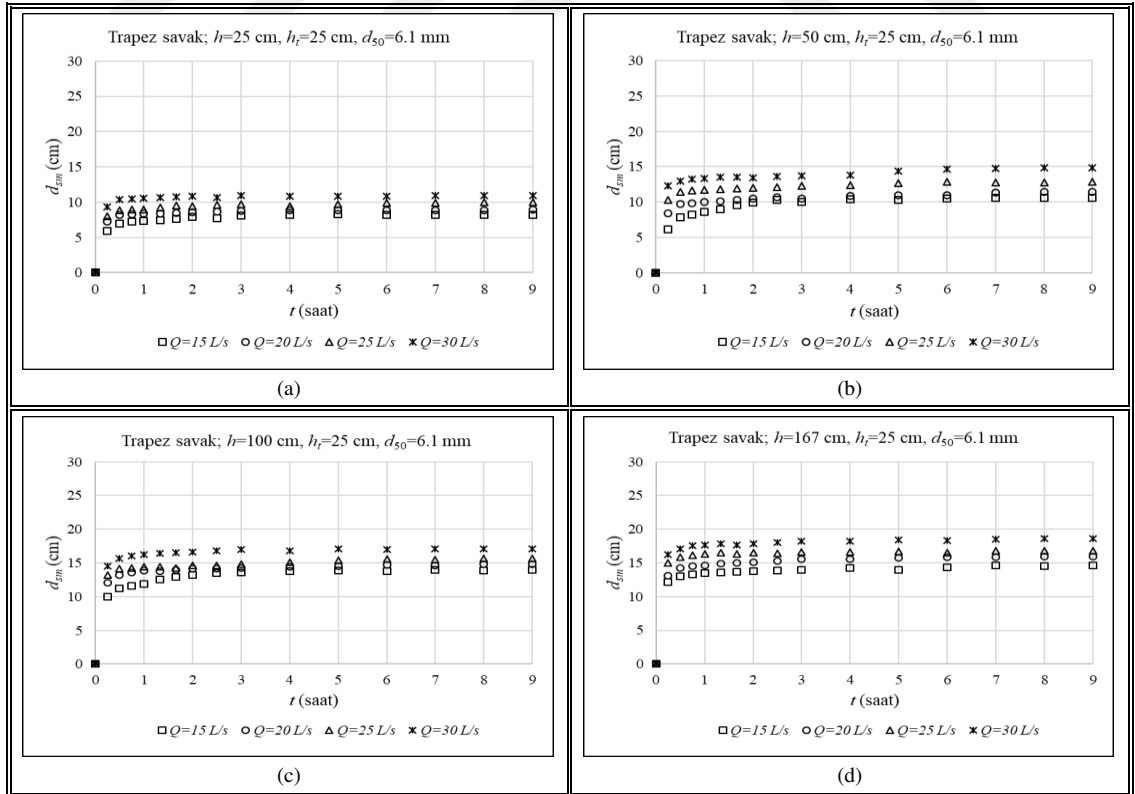
Şekil E1.14. Serbest düşümlü trapez savakta; $h_f=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



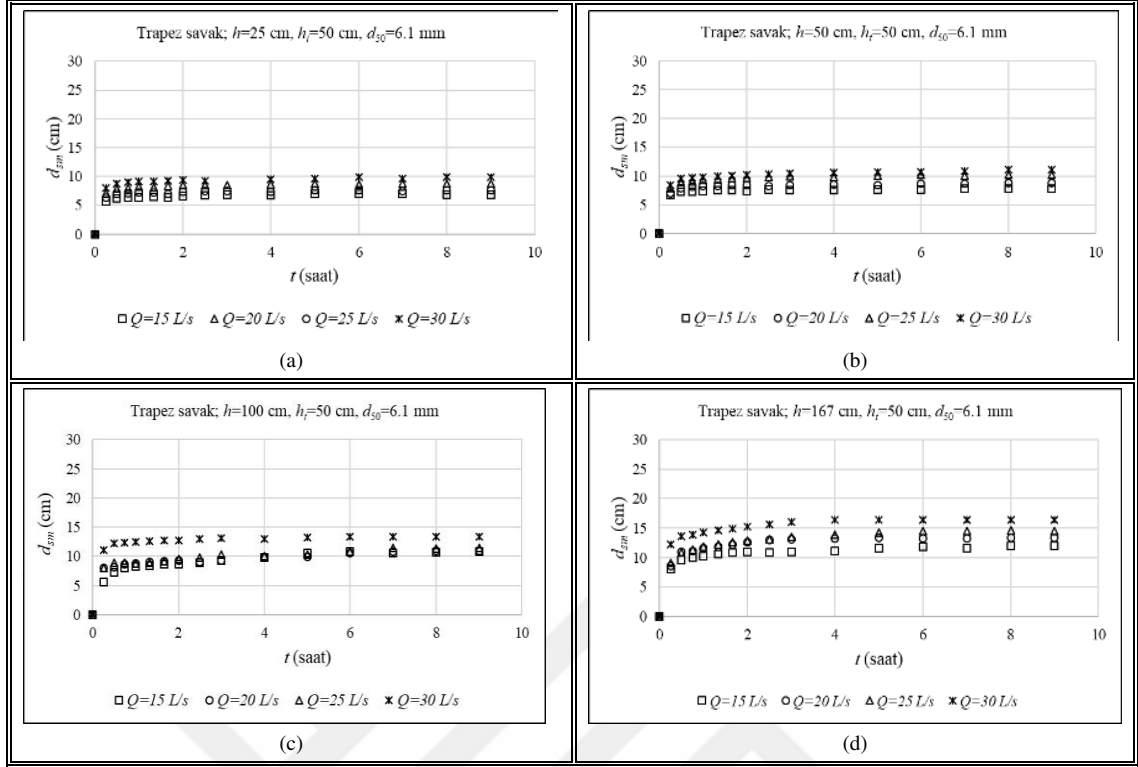
Şekil E1.15. Serbest düşümlü trapez savakta; $h=25$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



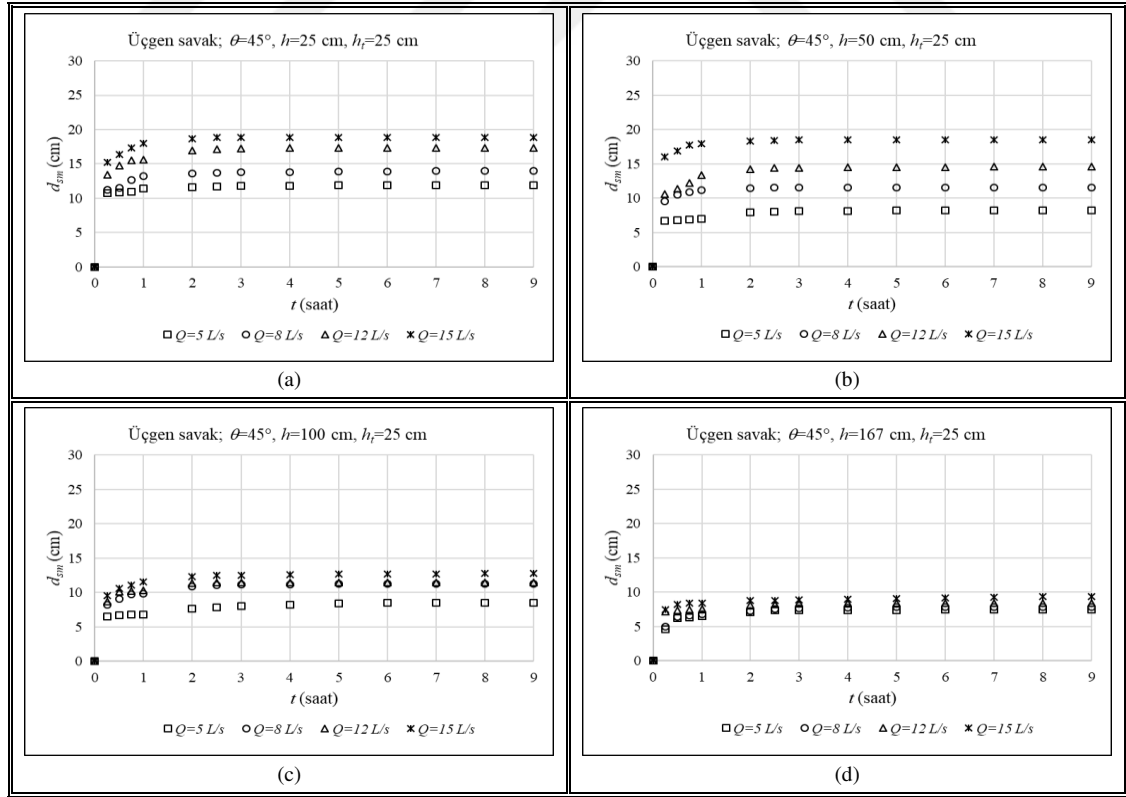
Şekil E1.16. Serbest düşülü trapez savakta; $h_f=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



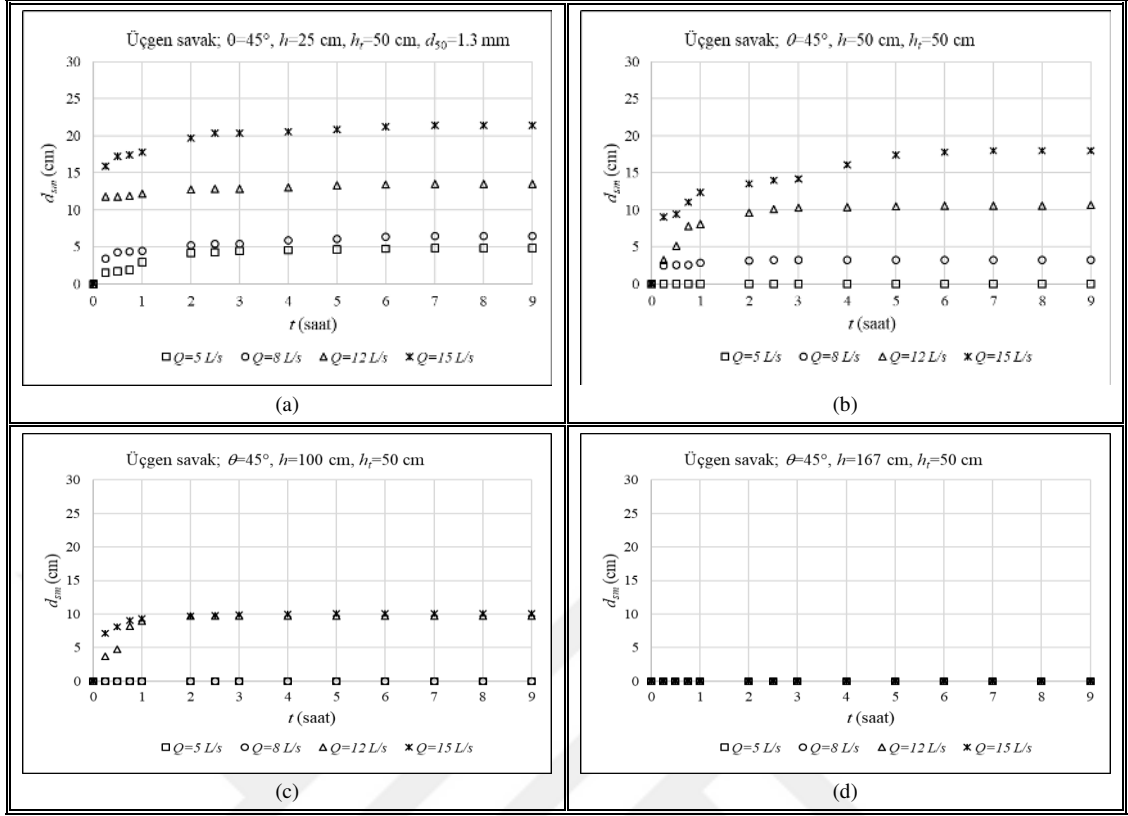
Şekil E1.17. Serbest düşülü trapez savakta; $h=25$ cm, $d_{50}=6.1$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



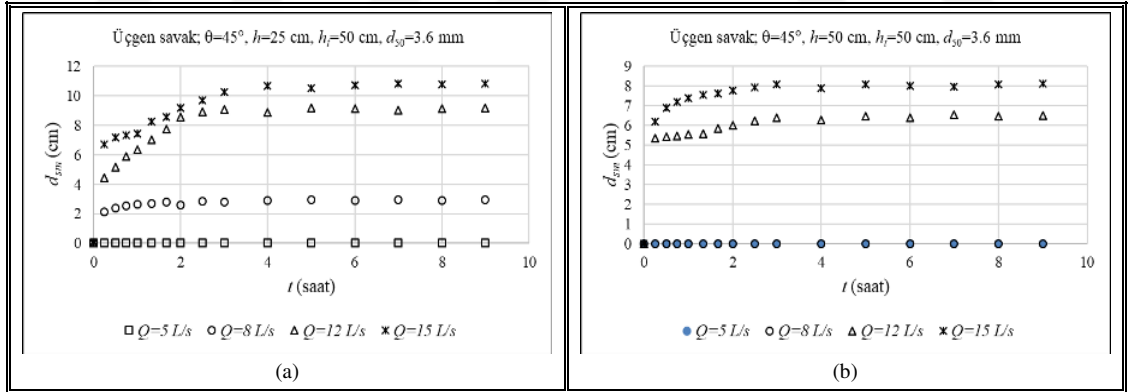
Şekil E1.18. Serbest düşülü trapez savakta; $h_f=50$ cm, $d_{50}=6.1$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=15-30$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm



Şekil E1.19. Serbest düşülü üçgen savakta; $\alpha=45^\circ$, $h_f=25$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=5-15$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm

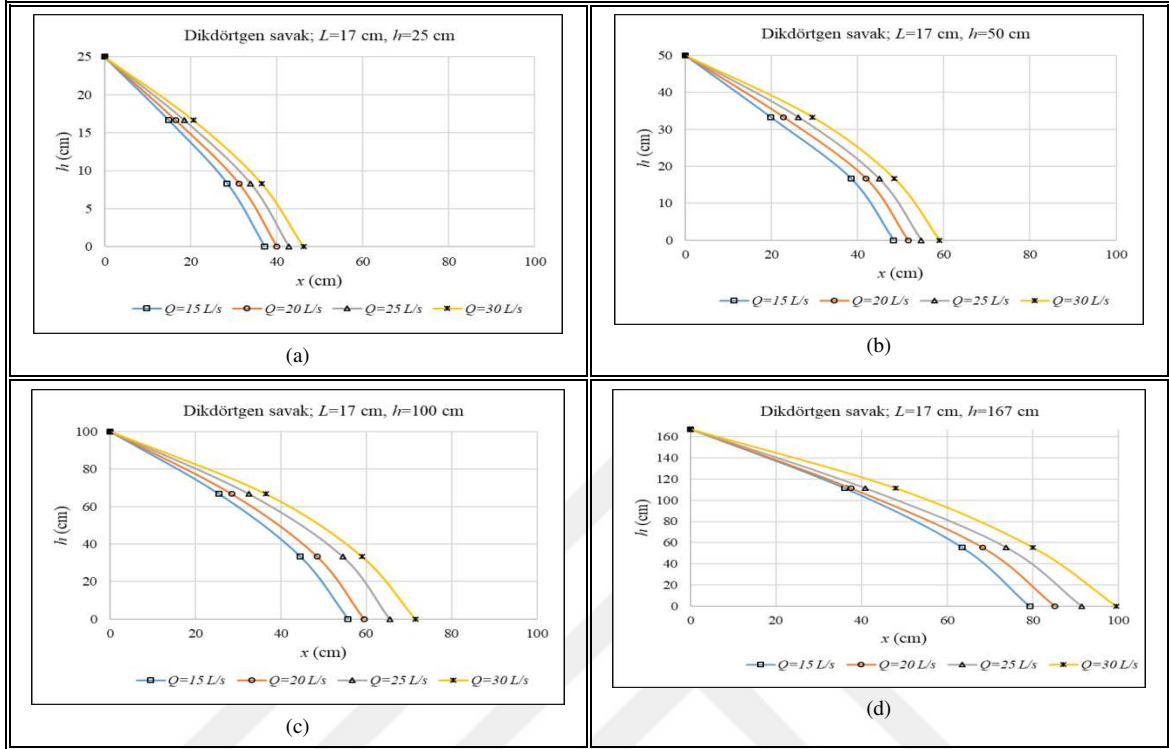


Şekil E1.20. Serbest düşümlü üçgen savakta; $\alpha=45^\circ$, $h_i=50$ cm, $d_{50}=1.3$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=5-15$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm, c) $h=100$ cm ve d) $h=167$ cm

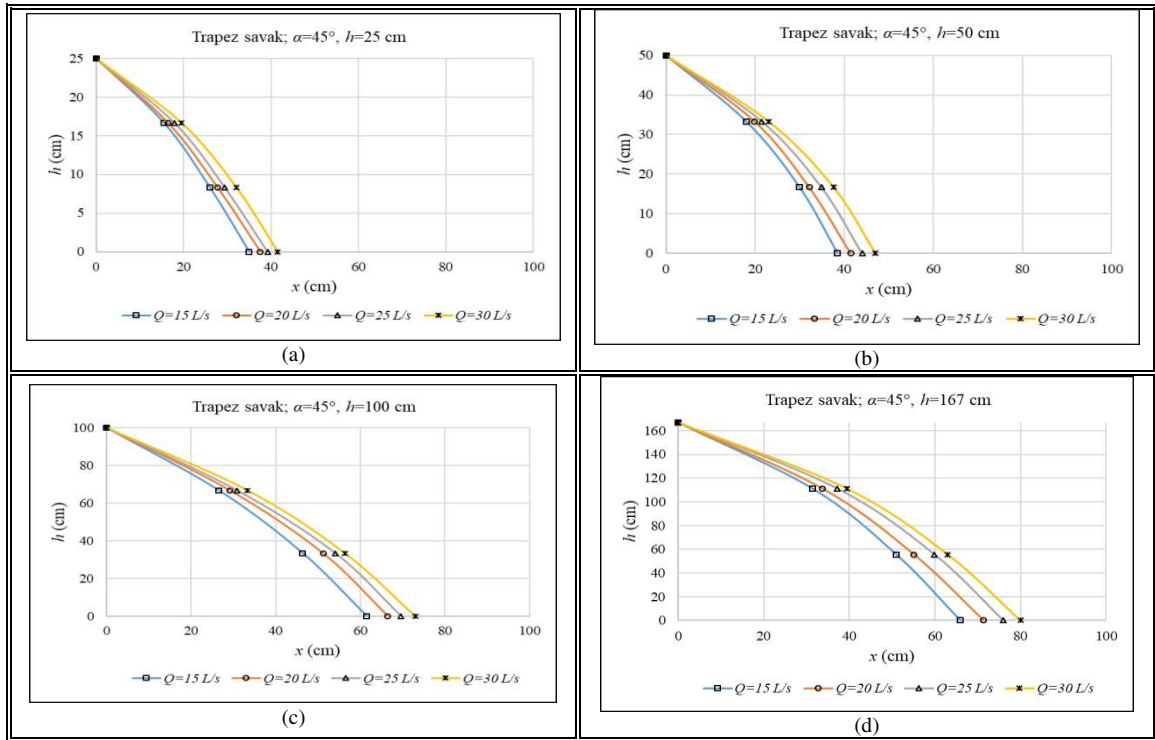


Şekil E1.21. Serbest düşümlü üçgen savakta; $\alpha=45^\circ$, $h_i=50$ cm, $d_{50}=3.6$ mm ve farklı debi değerleri ($Q=5-15$ L/s) için zamanla maksimum oyulma derinliğinin değişimi: a) $h=25$ cm, b) $h=50$ cm

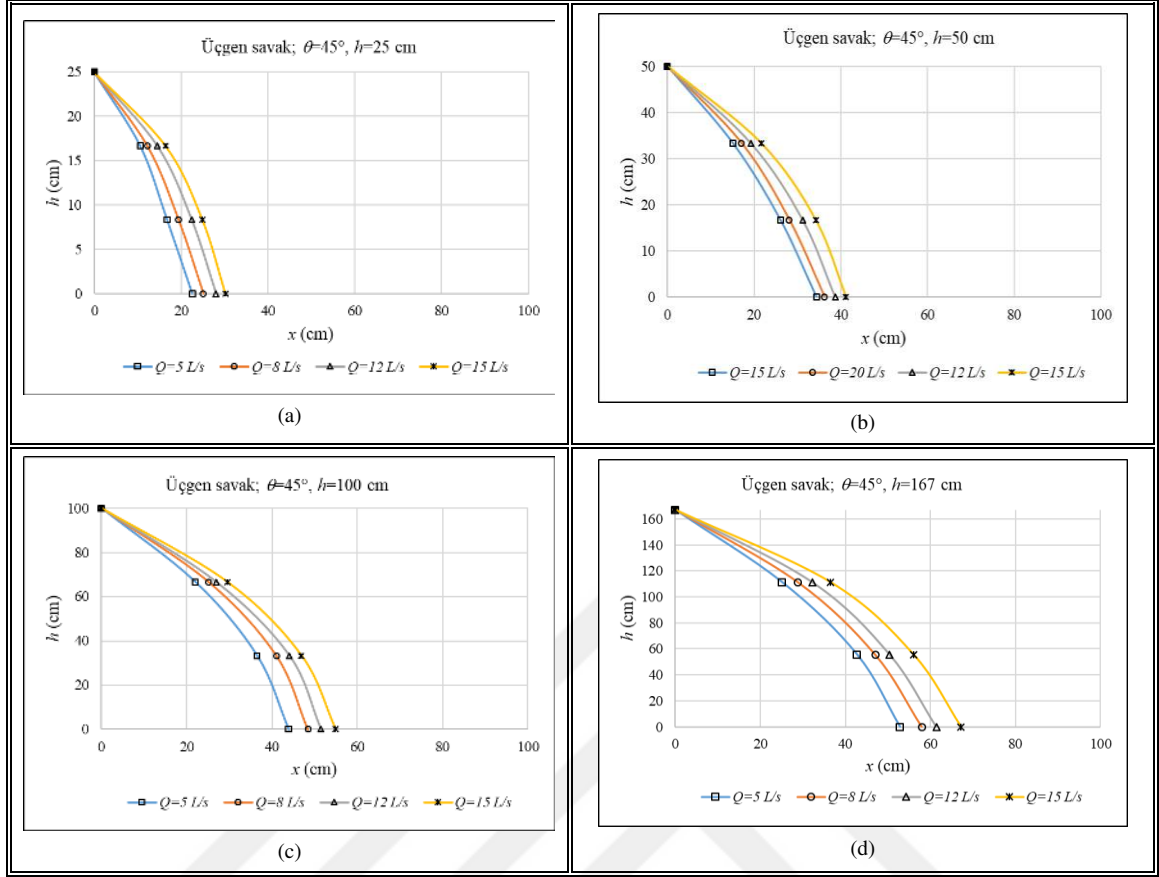
EK- 2: DİKDÖRTGEN, TRAPEZ, ÜÇGEN VE LABİRENT SAVAKLARDA JET YÖRÜNGESİNE AİT GRAFİKLER



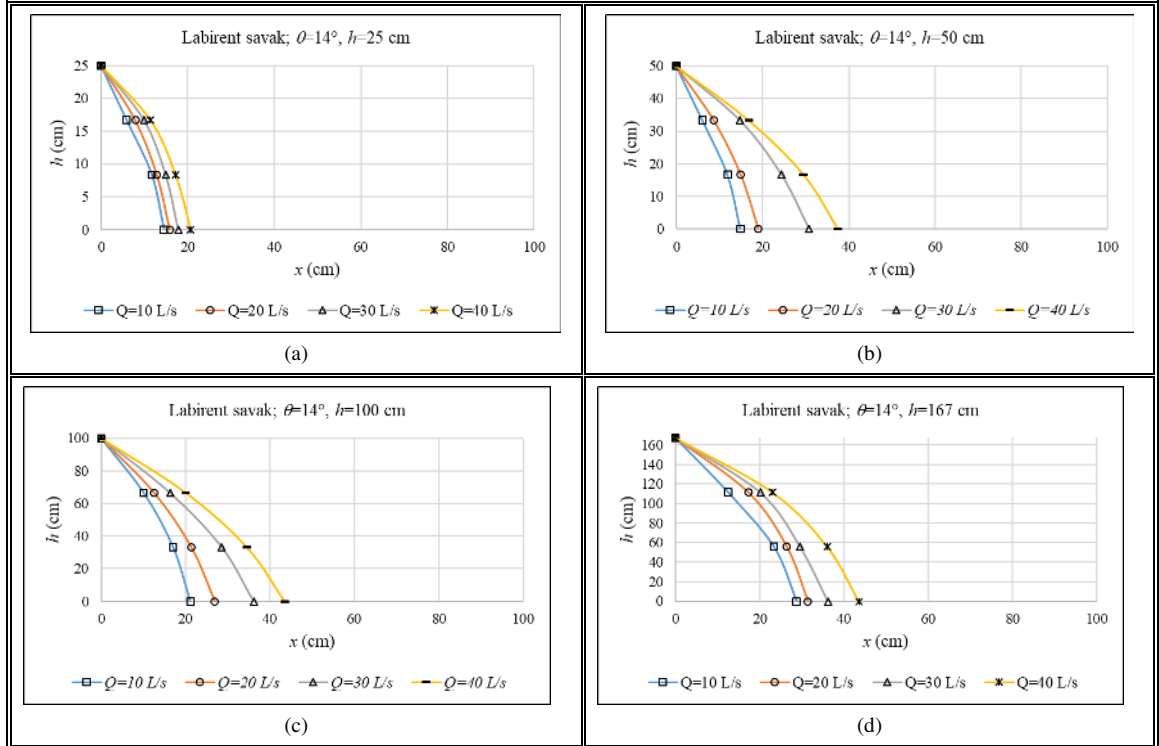
Şekil E2.1. Dikdörtgen savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi: a) $h=25$ cm için, b) $h=50$ cm için, c) $h=100$ cm için, d) $h=167$ cm için



Şekil E2.2. Trapez savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi: a) $h=25$ cm için, b) $h=50$ cm için, c) $h=100$ cm için, d) $h=167$ cm için

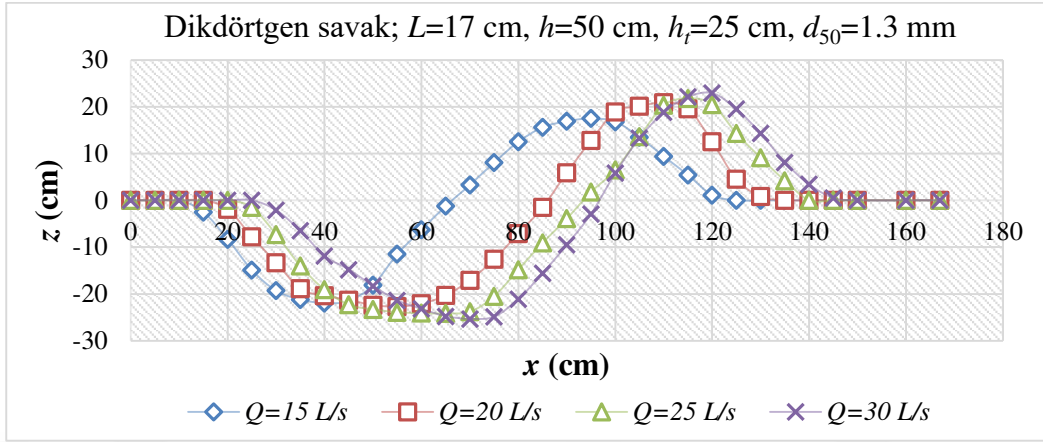


Şekil E2.3. Üçgen savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi: a) $h=25$ cm için, b) $h=50$ cm için, c) $h=100$ cm için, d) $h=167$ cm için

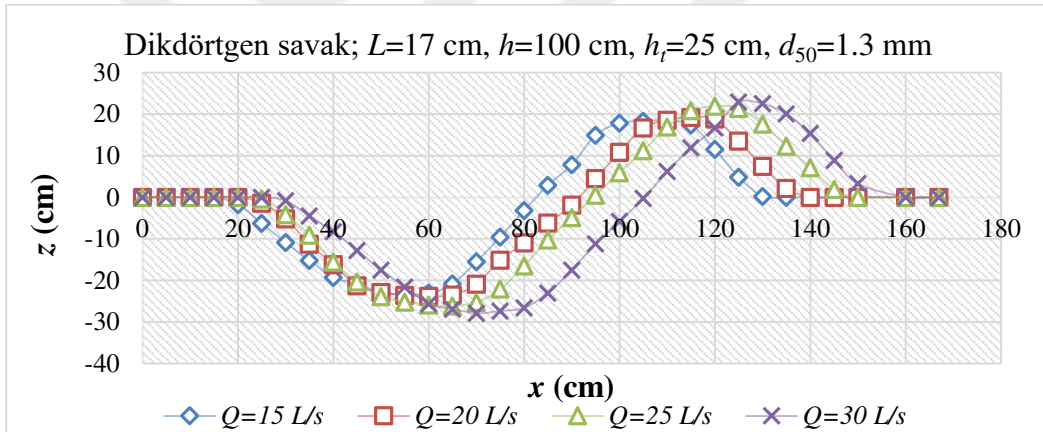


Şekil E2.4. Labirent savakta jet yörüngesinin farklı düşü yükseklikleri için debi ile değişimi: a) $h=25$ cm için, b) $h=50$ cm için, c) $h=100$ cm için, d) $h=167$ cm için

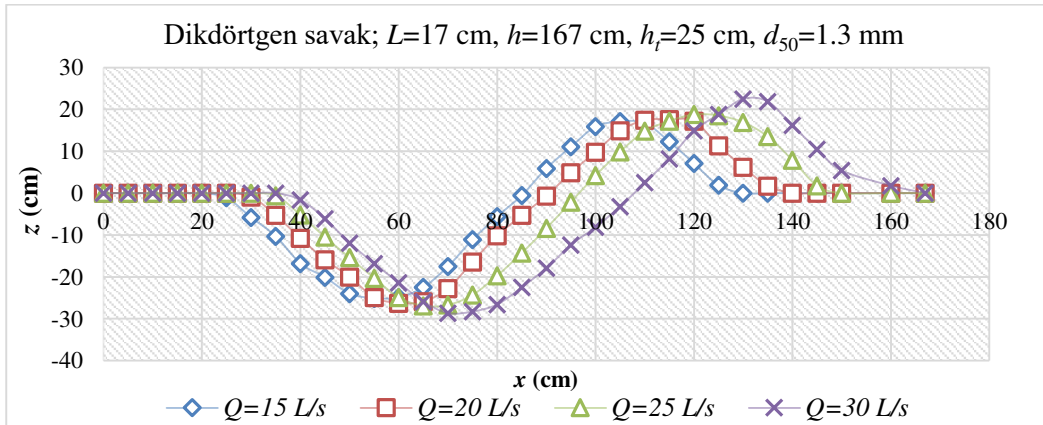
Ek- 3: MANSAP HAVUZUNDA OLUŞAN OYULMA GEOMETRİSİNE AİT BOYKESİTLER



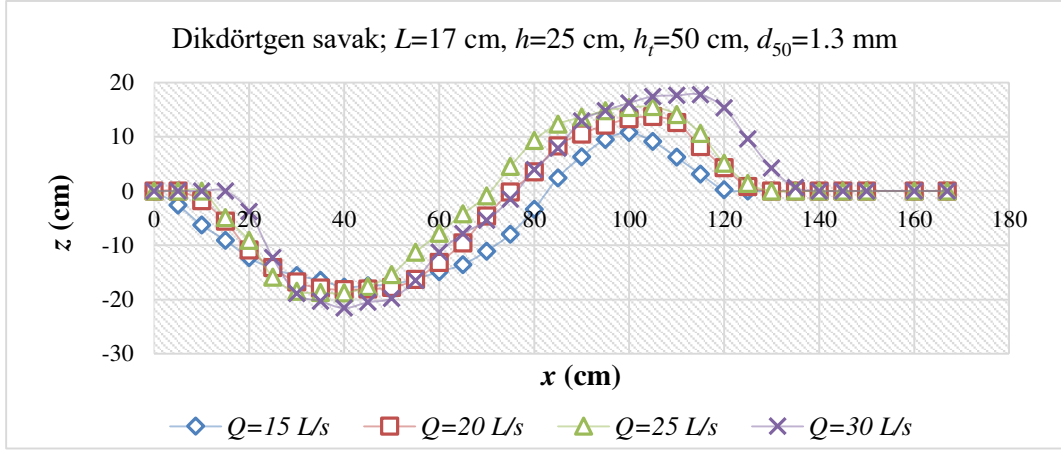
Şekil E3.1. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



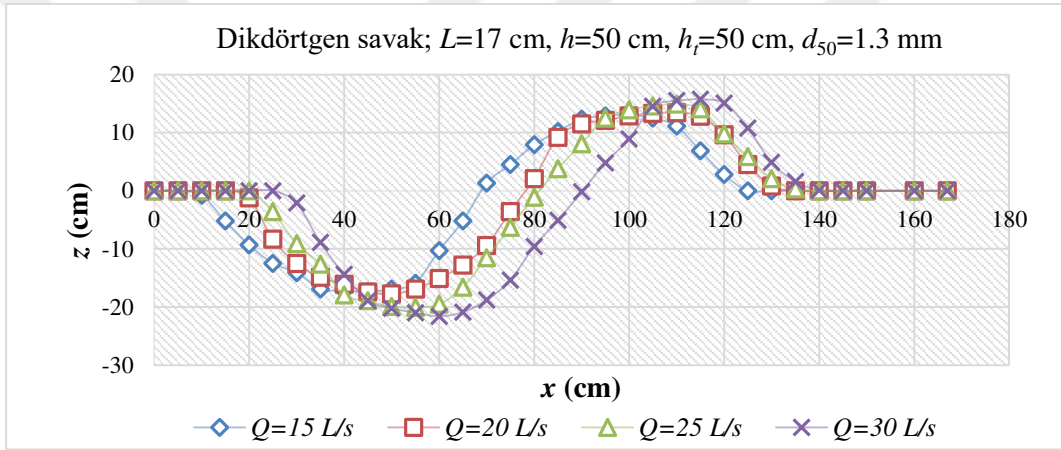
Şekil E3.2. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



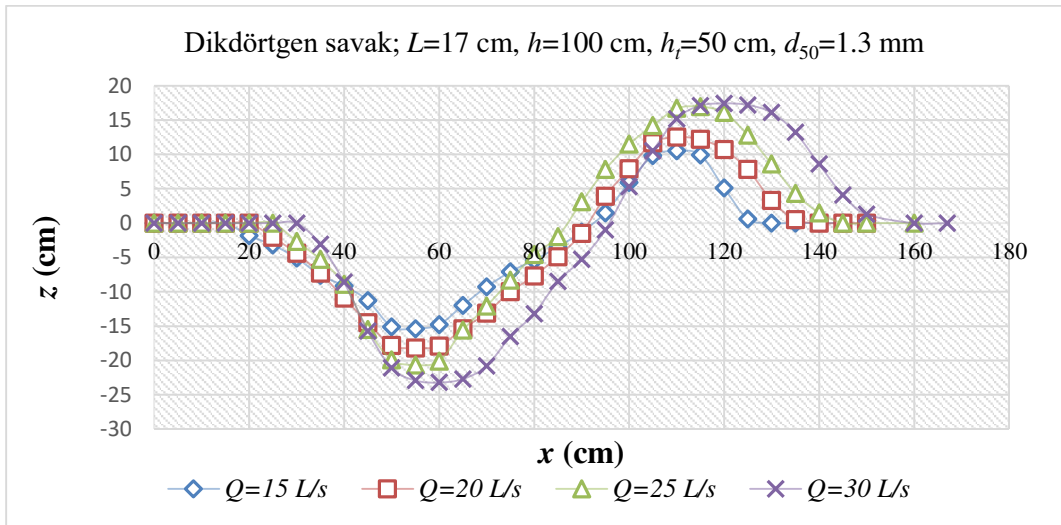
Şekil E3.3. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



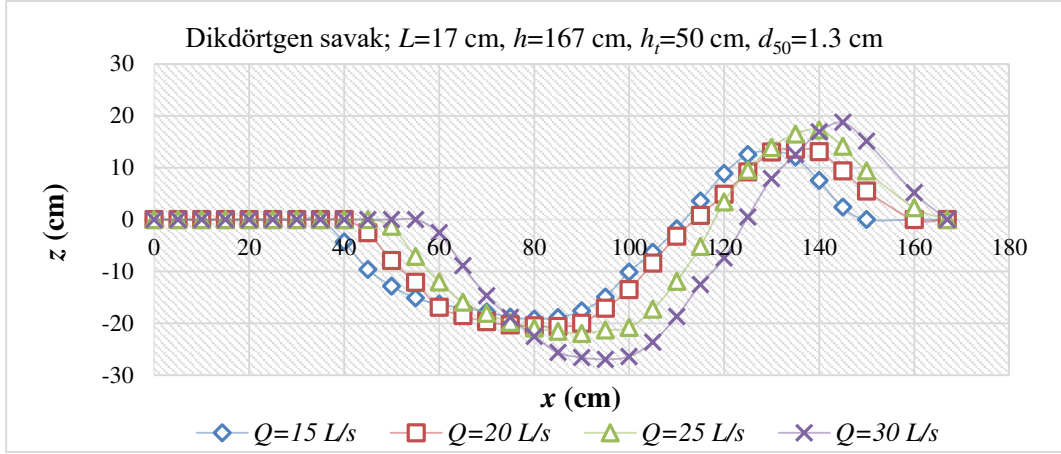
Şekil E3.4. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



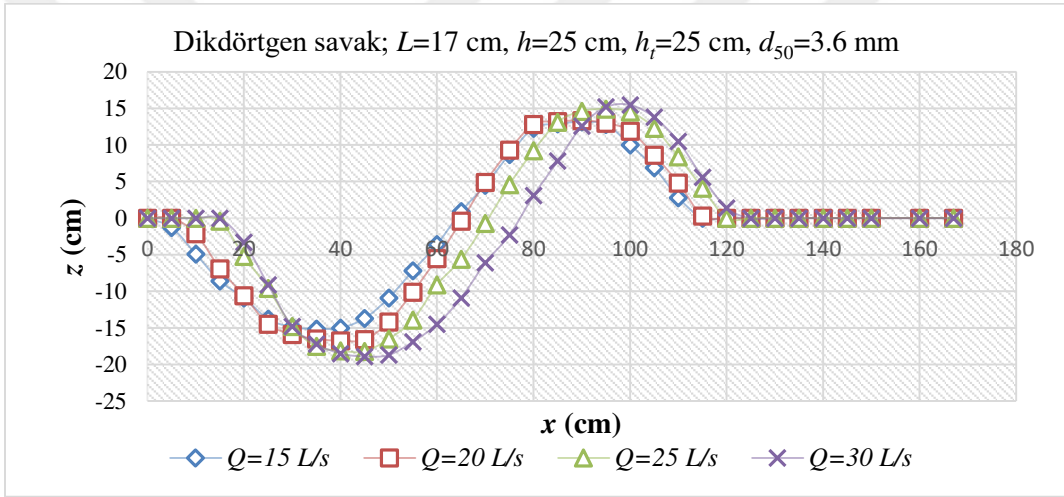
Şekil E3.5. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



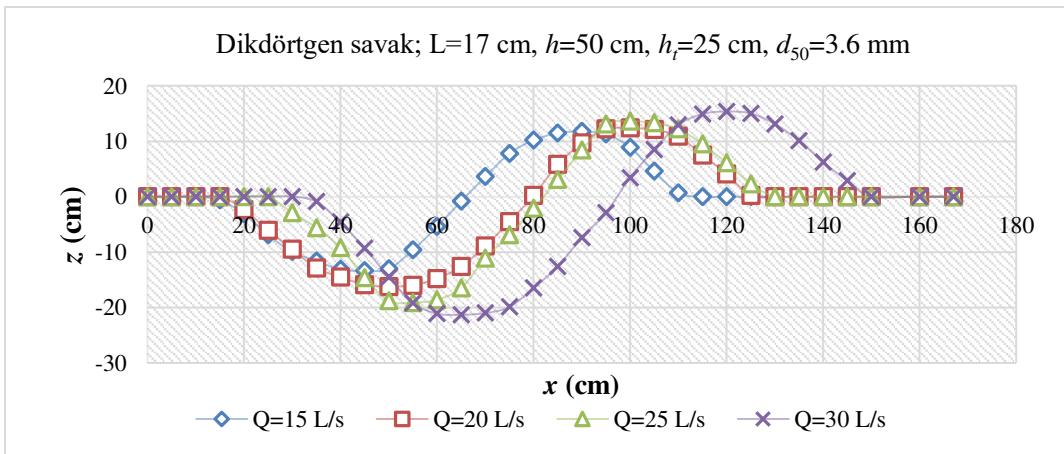
Şekil E3.6. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



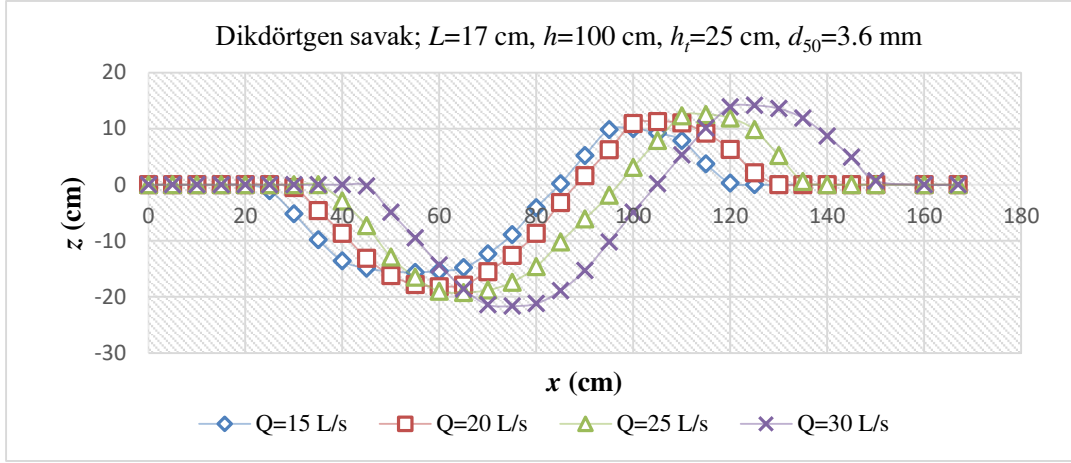
Şekil E3.7. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



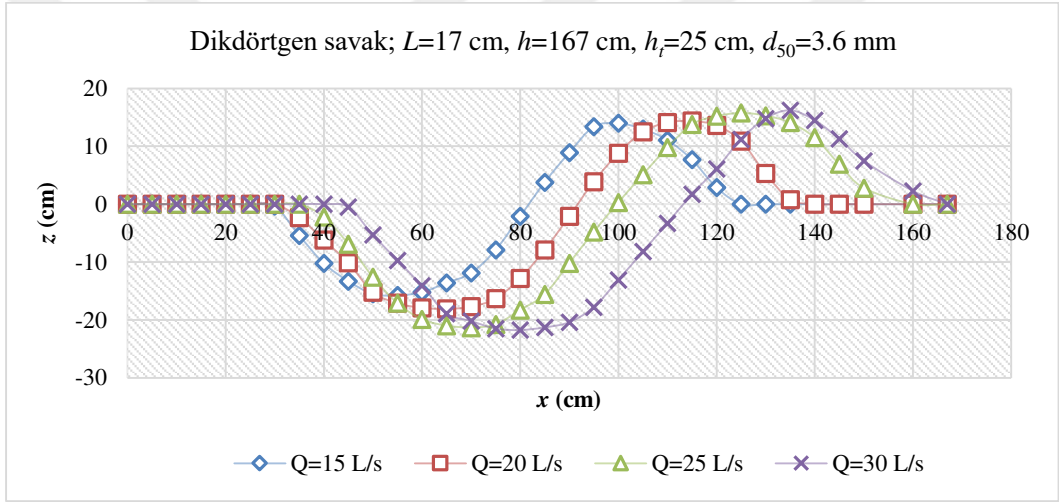
Şekil E3.8. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



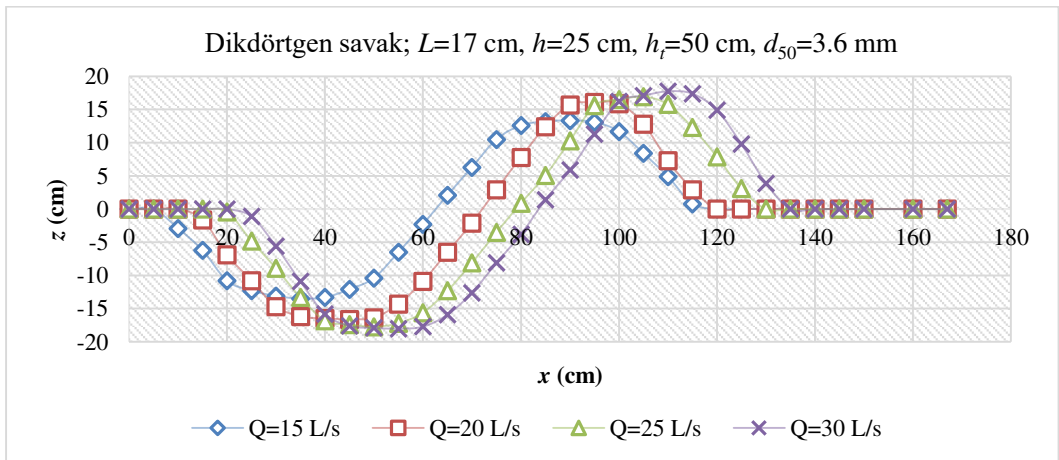
Şekil E3.9. Serbest düşümlü dikdörtgen savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



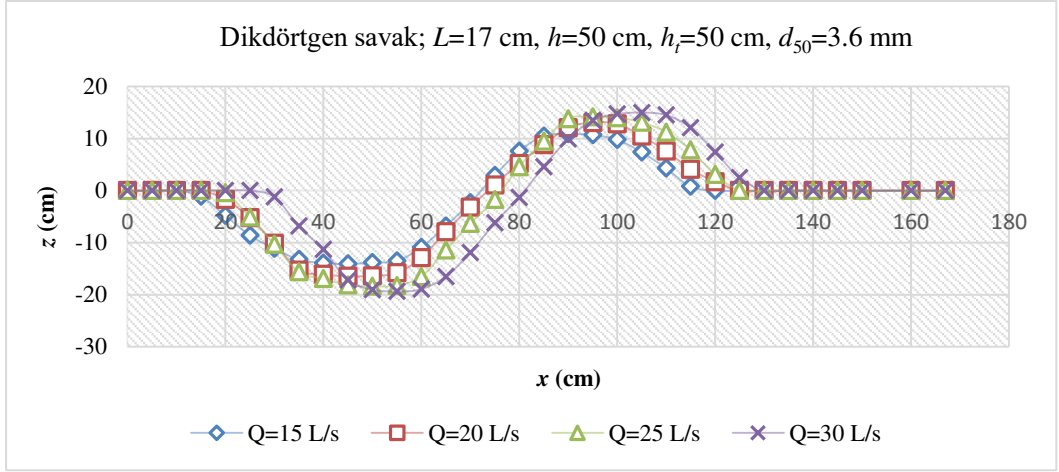
Şekil E3.10. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



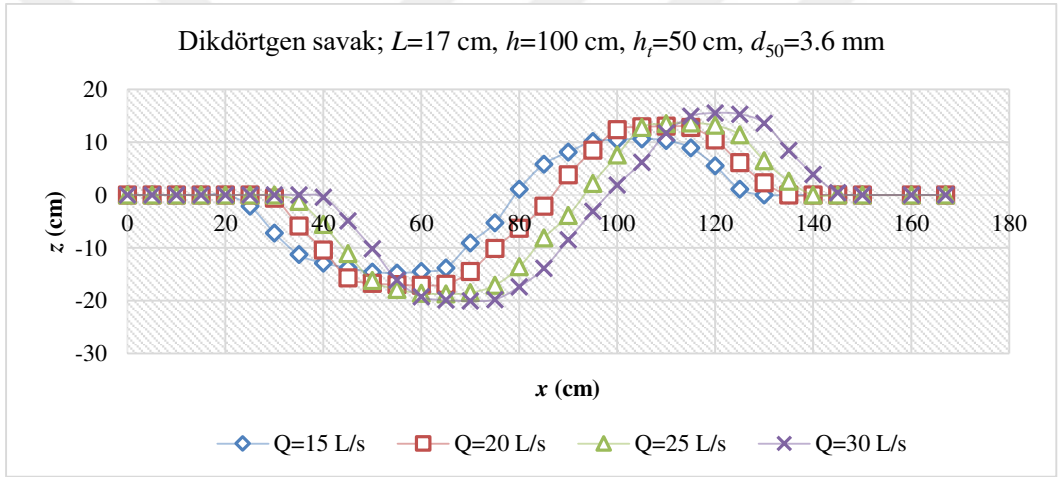
Şekil E3.11. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



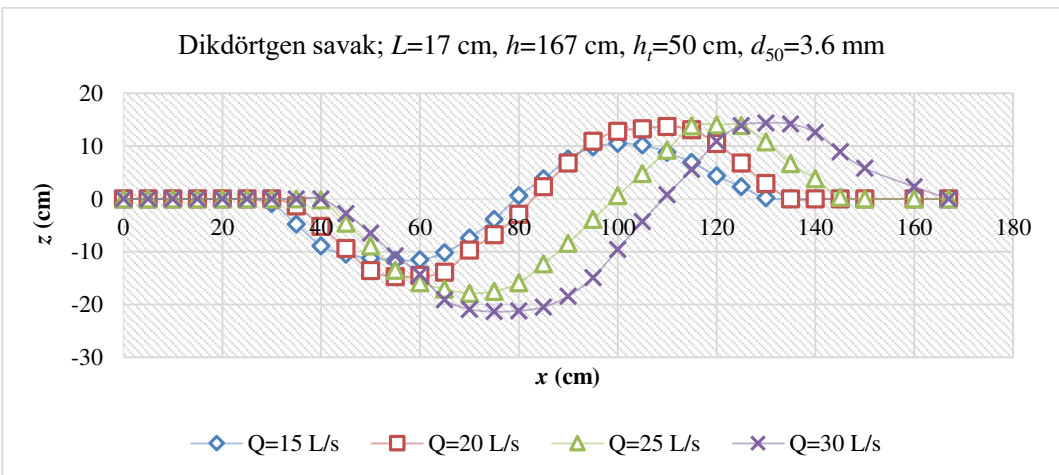
Şekil E3.12. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



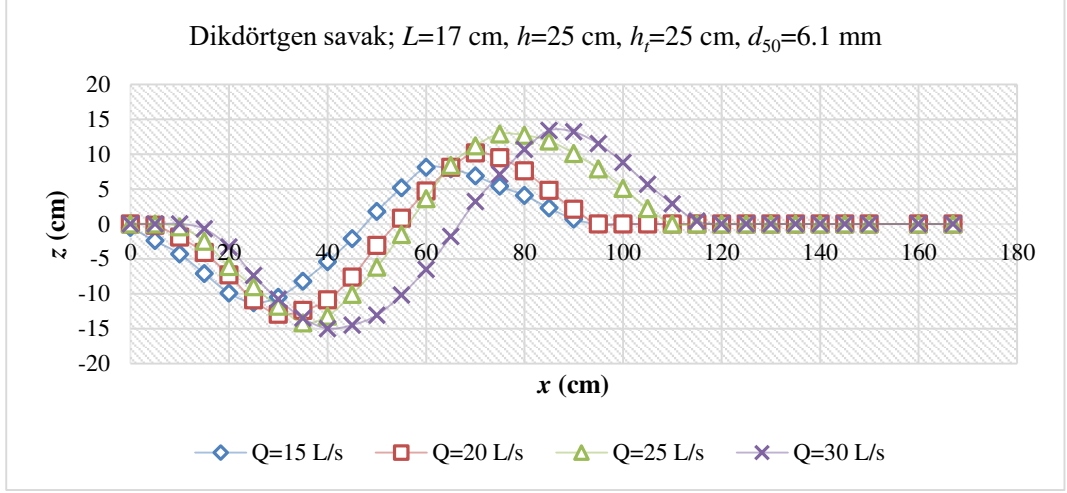
Şekil E3.13. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=50$ cm, $h_f=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



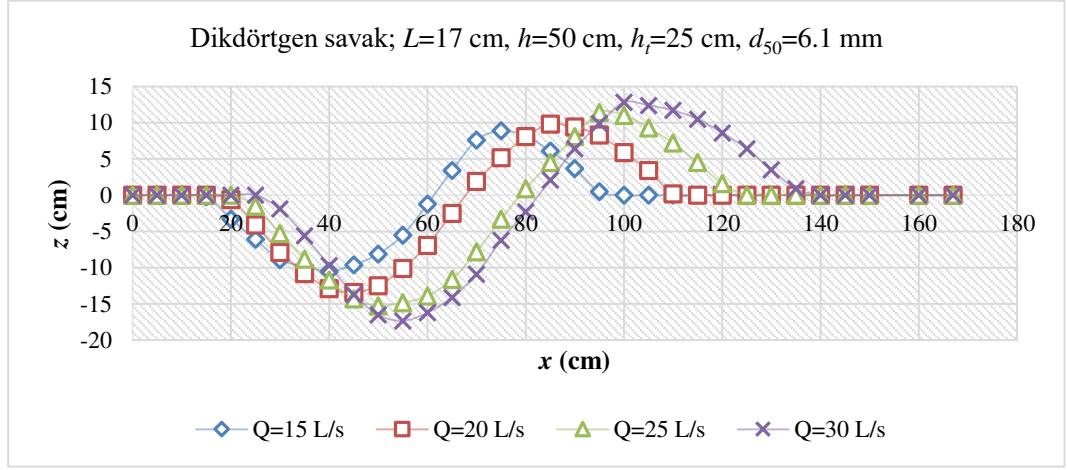
Şekil E3.14. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=100$ cm, $h_f=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



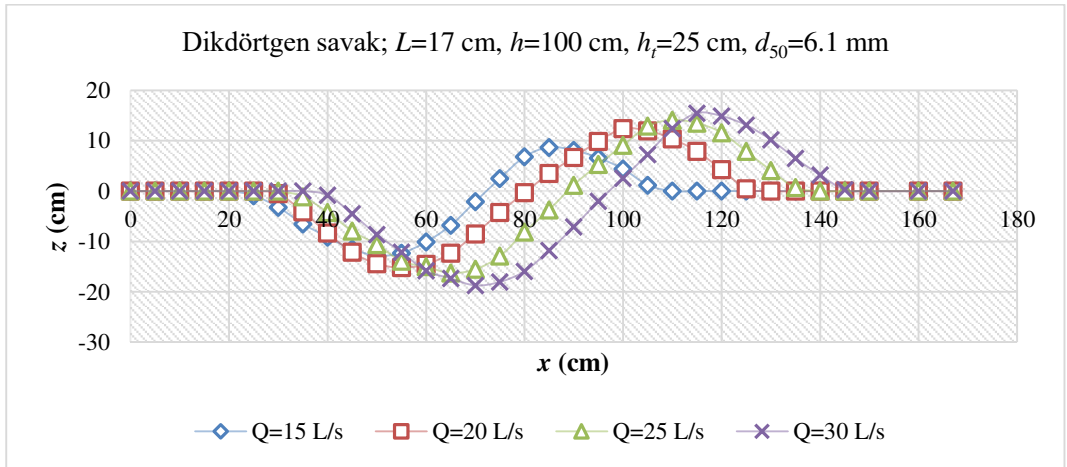
Şekil E3.15. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=167$ cm, $h_f=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



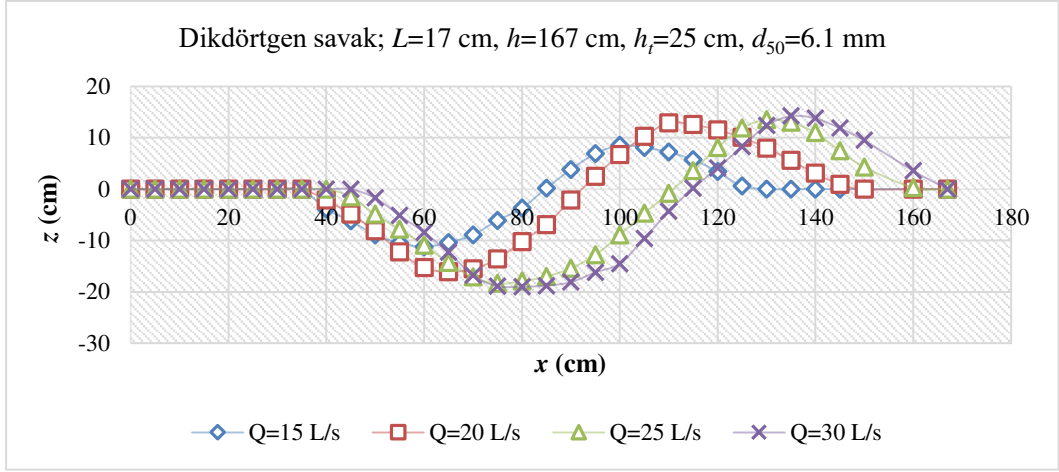
Şekil E3.16. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



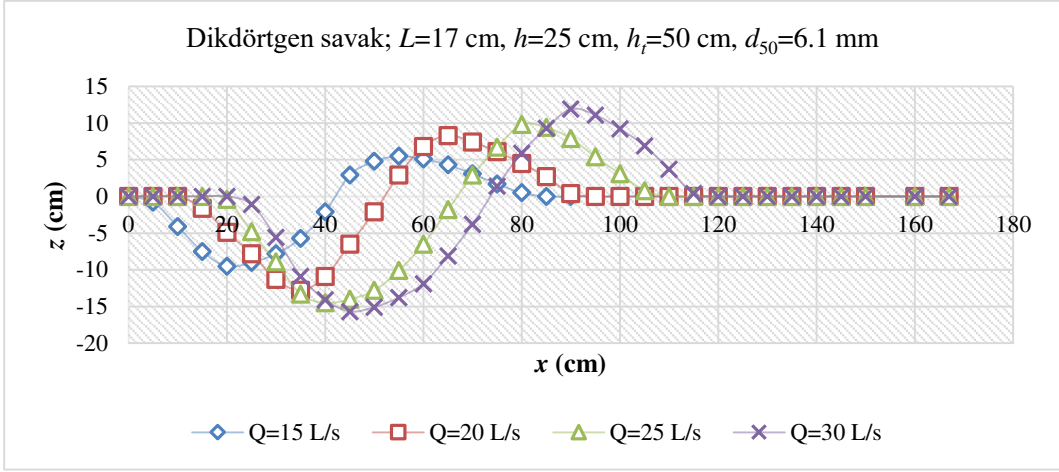
Şekil E3.17. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



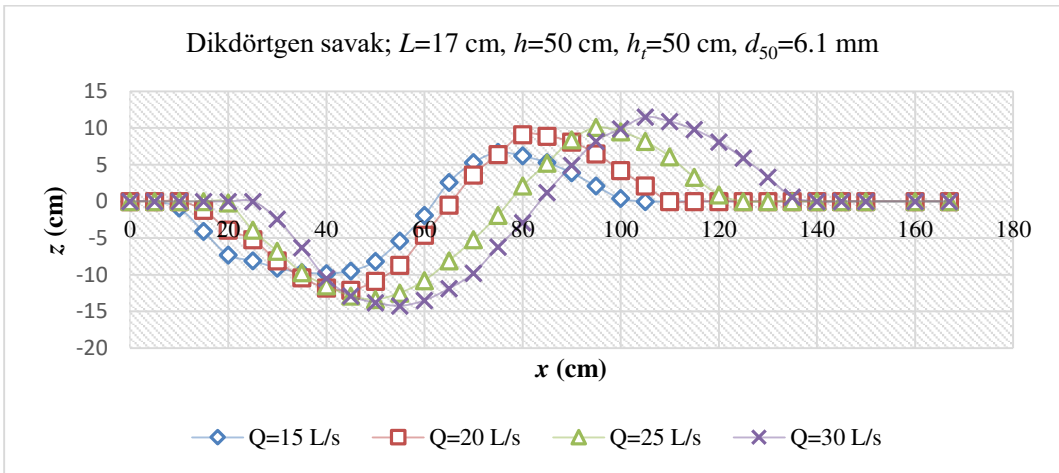
Şekil E3.18. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



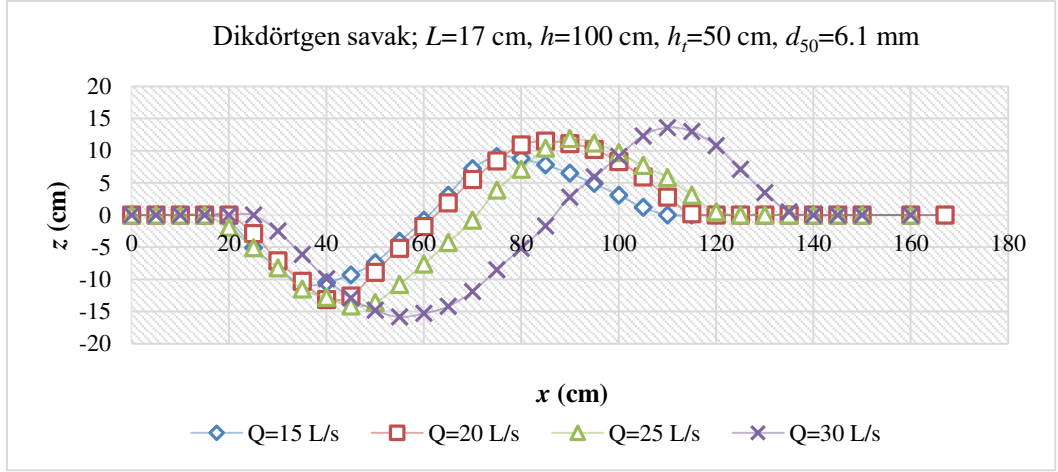
Şekil E3.19. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



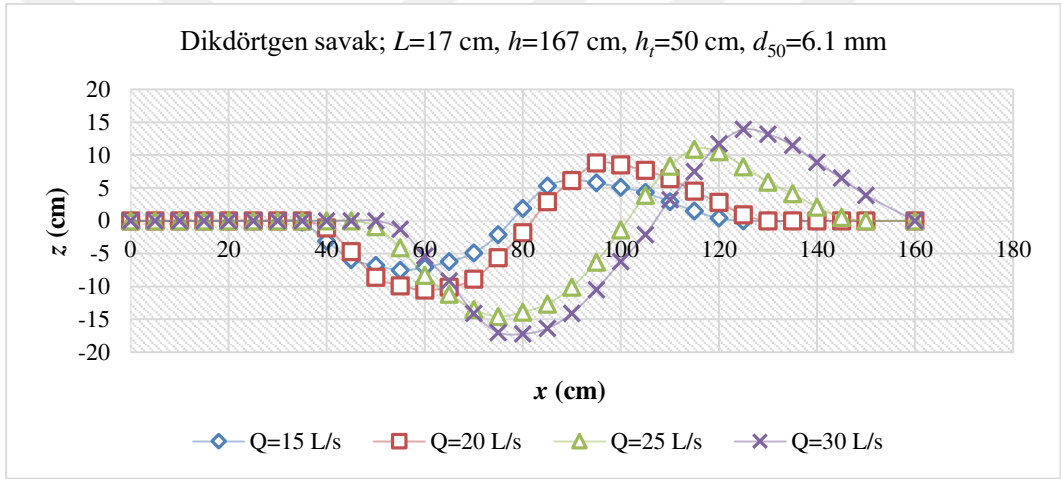
Şekil E3.20. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



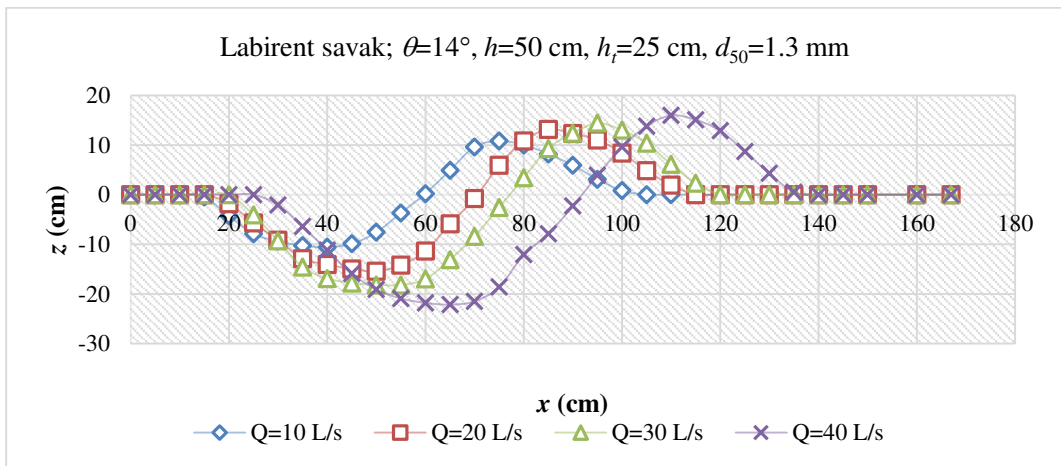
Şekil E3.21. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



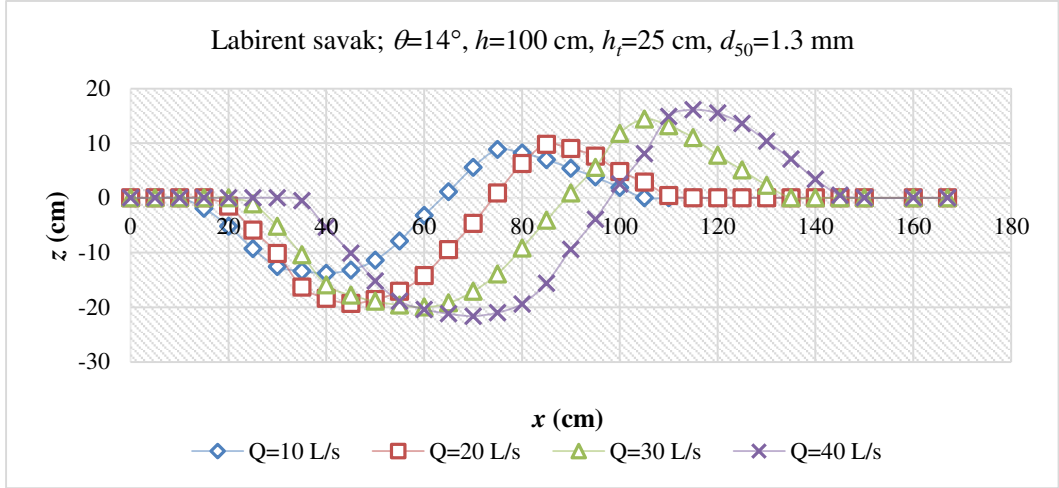
Şekil E3.22. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



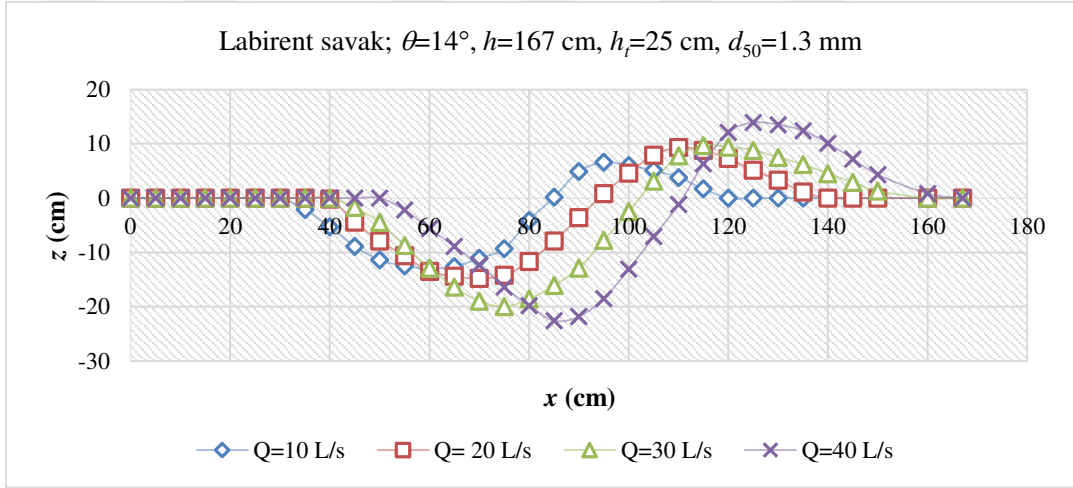
Şekil E3.23. Serbest düşülü dikdörtgen savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



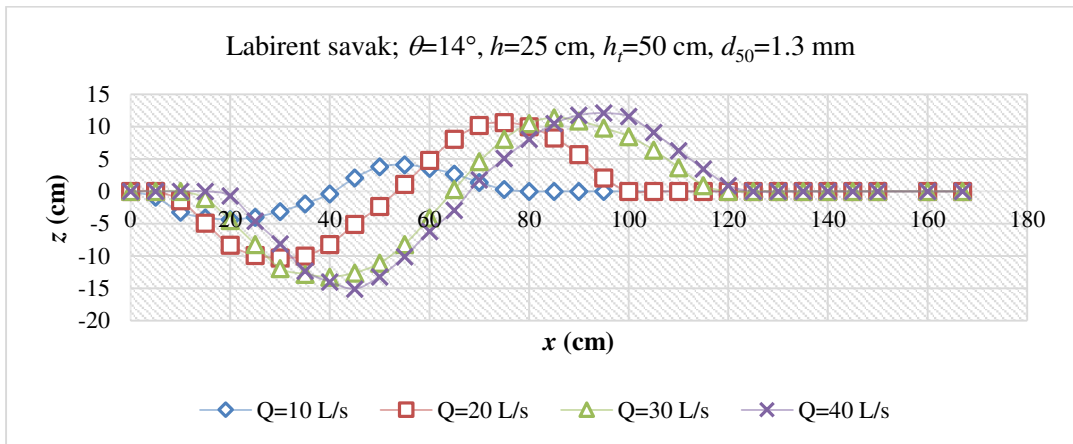
Şekil E3.24. Serbest düşülü labirent savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



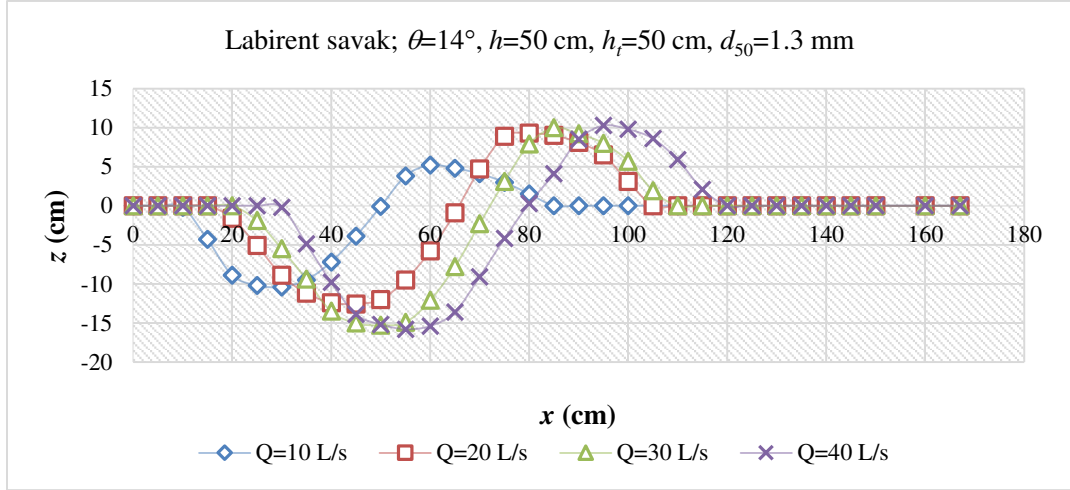
Şekil E3.25. Serbest düşülü labirent savakta $h=100$ cm, $h_f=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



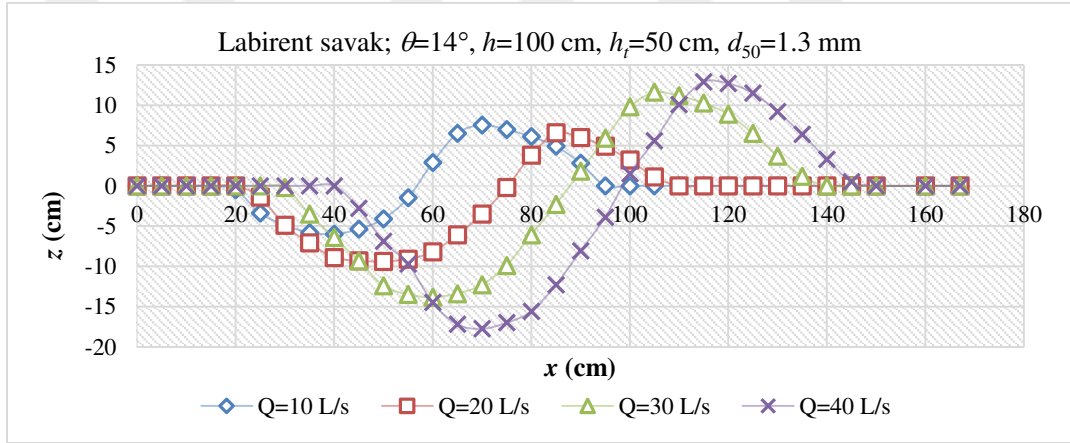
Şekil E3.26. Serbest düşülü labirent savakta $h=167$ cm, $h_f=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



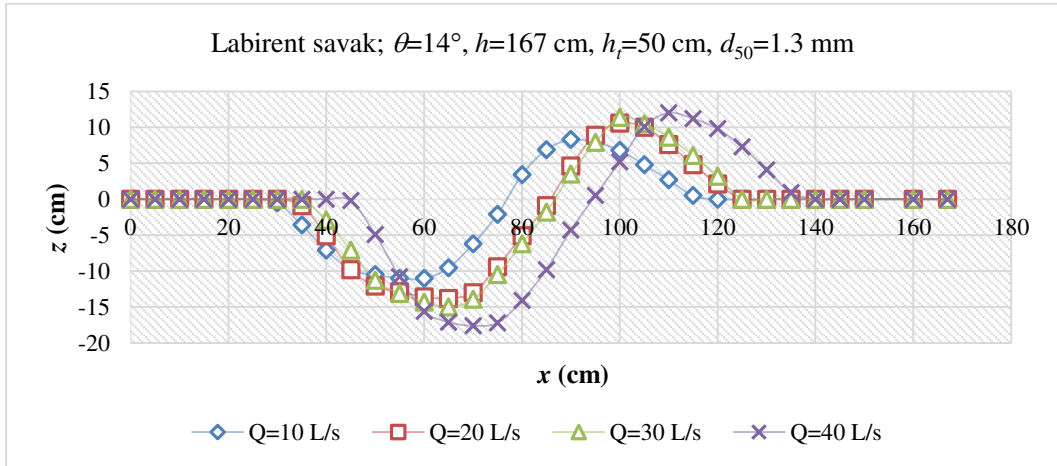
Şekil E3.27. Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_f=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



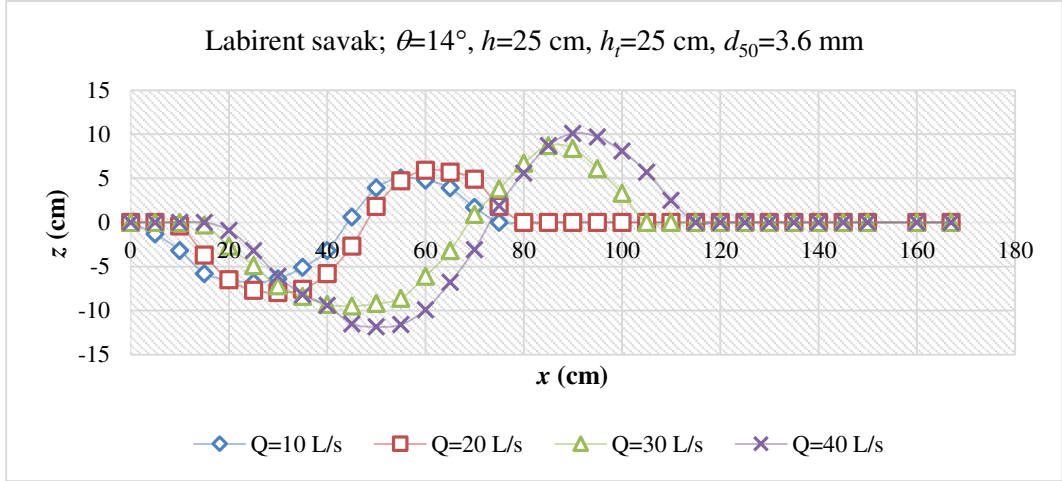
Şekil E3.28. Serbest düşülü labirent savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



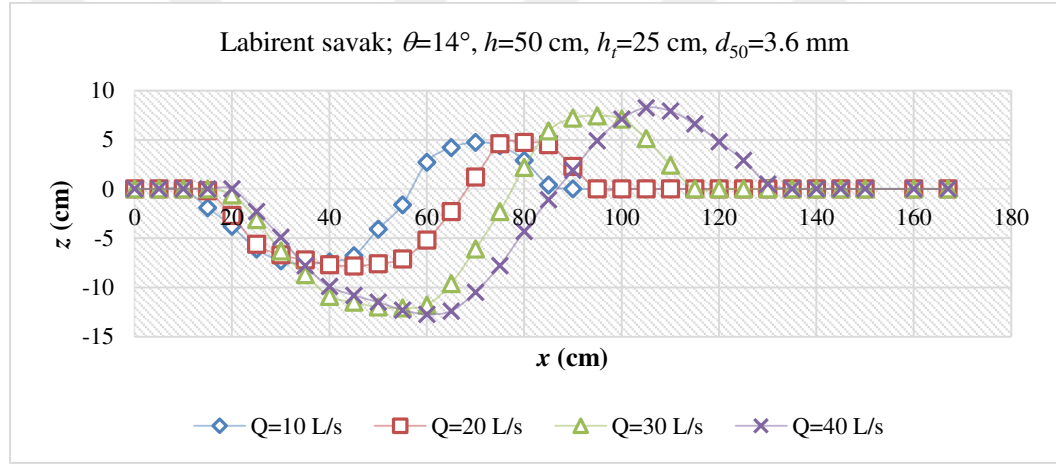
Şekil E3.29. Serbest düşülü labirent savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



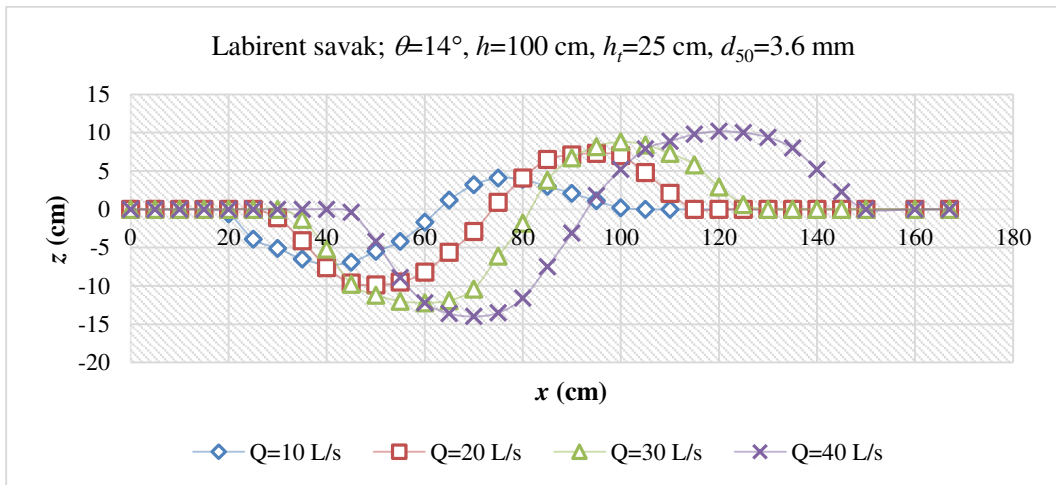
Şekil E3.30. Serbest düşülü labirent savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



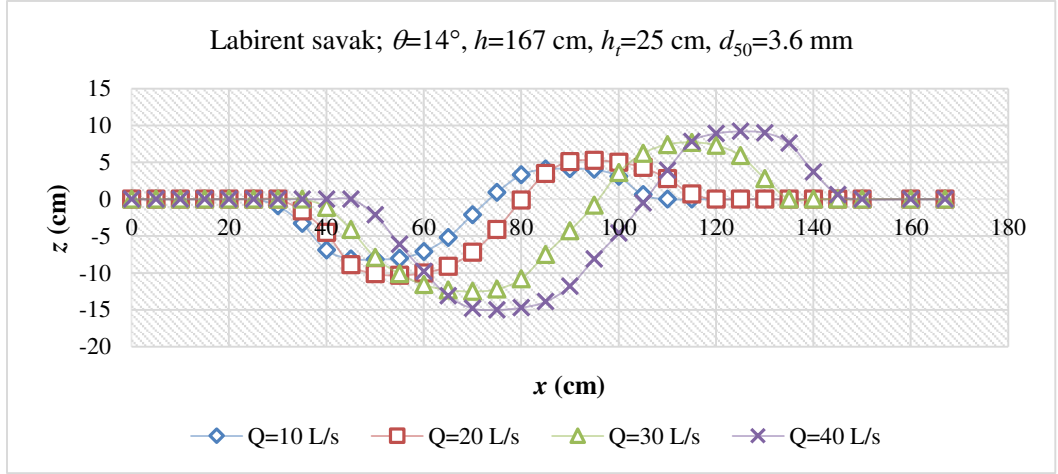
Şekil E3.31. Serbest düşümlü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



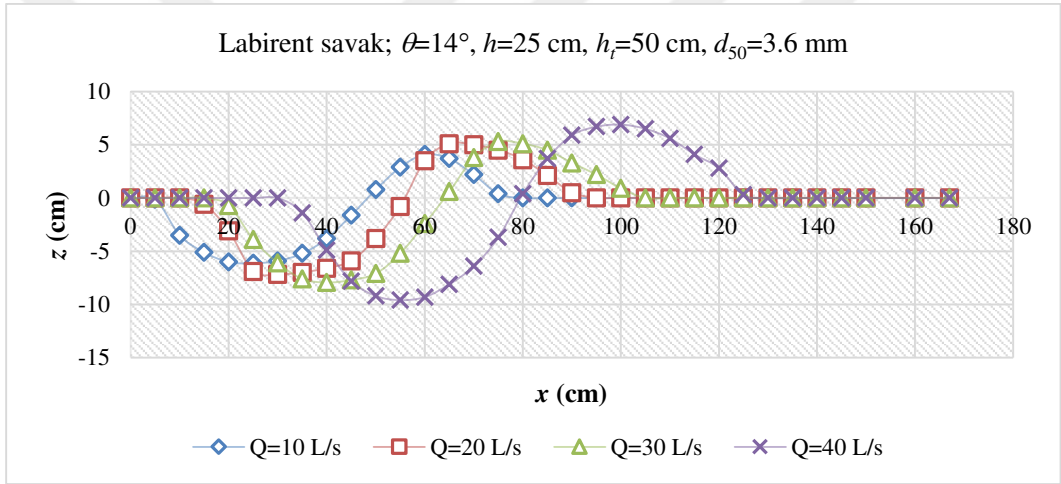
Şekil E3.32. Serbest düşümlü labirent savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



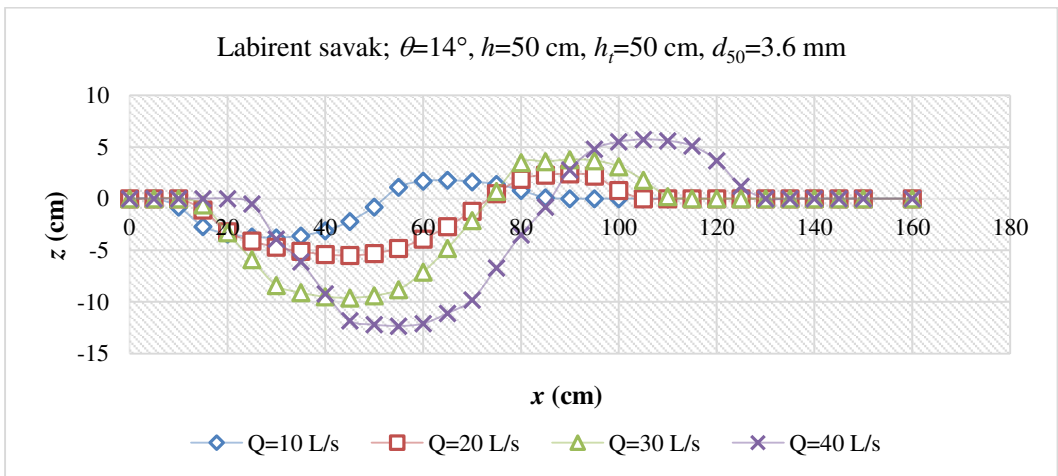
Şekil E3.33. Serbest düşümlü labirent savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti



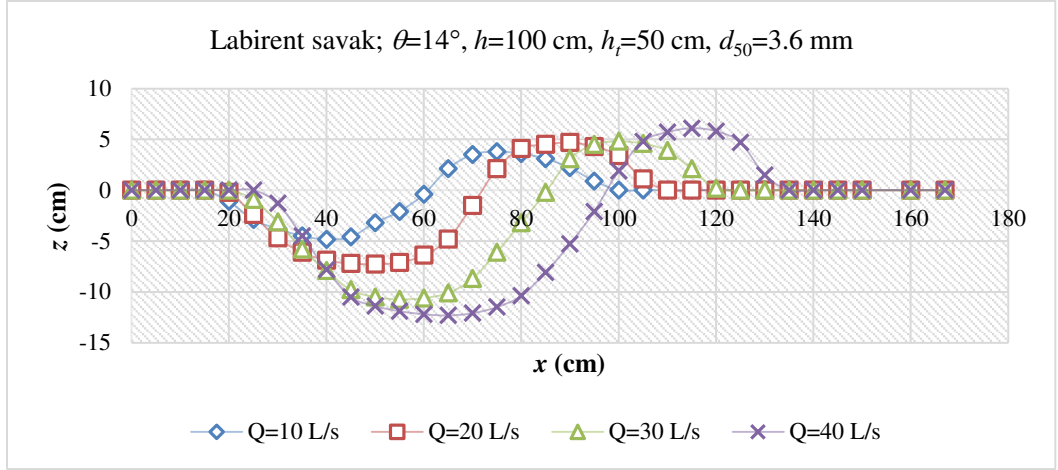
Şekil E3.34. Serbest düşülü labirent savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



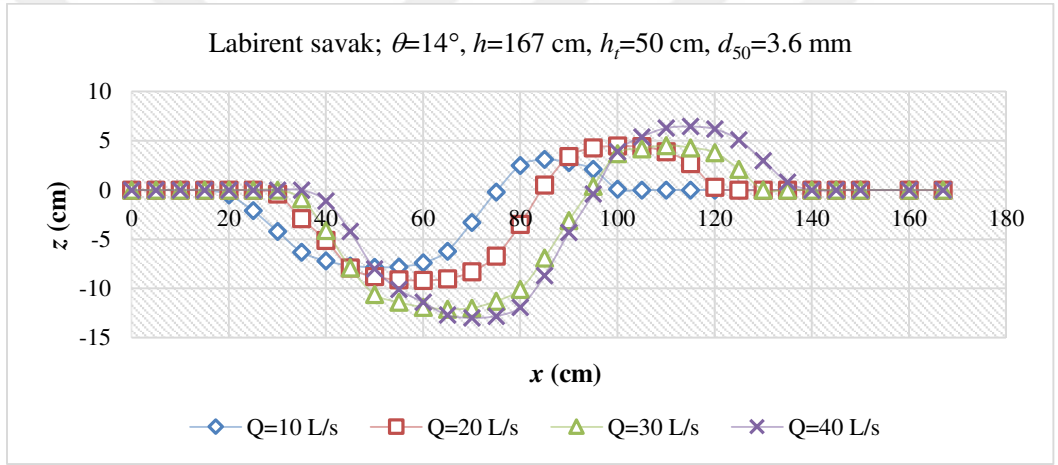
Şekil E3.35. Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



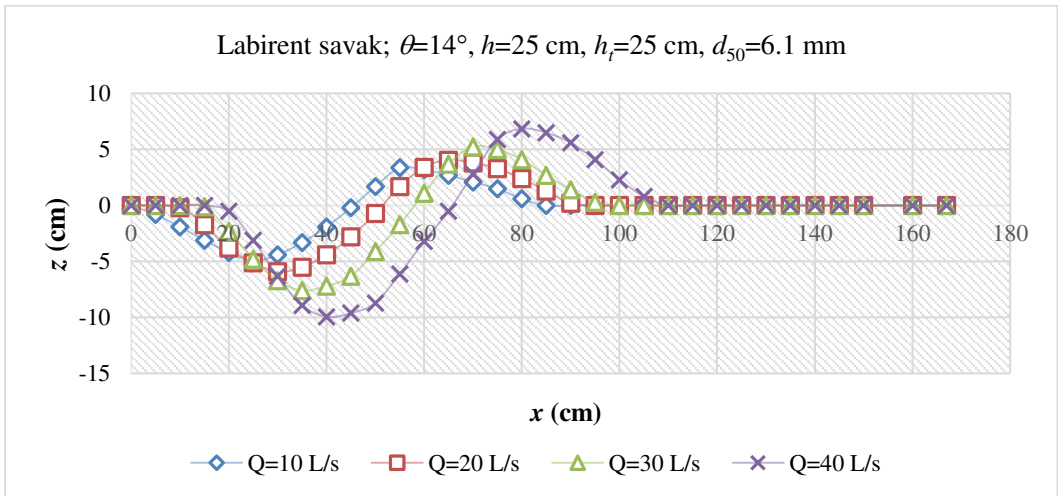
Şekil E3.36. Serbest düşülü labirent savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



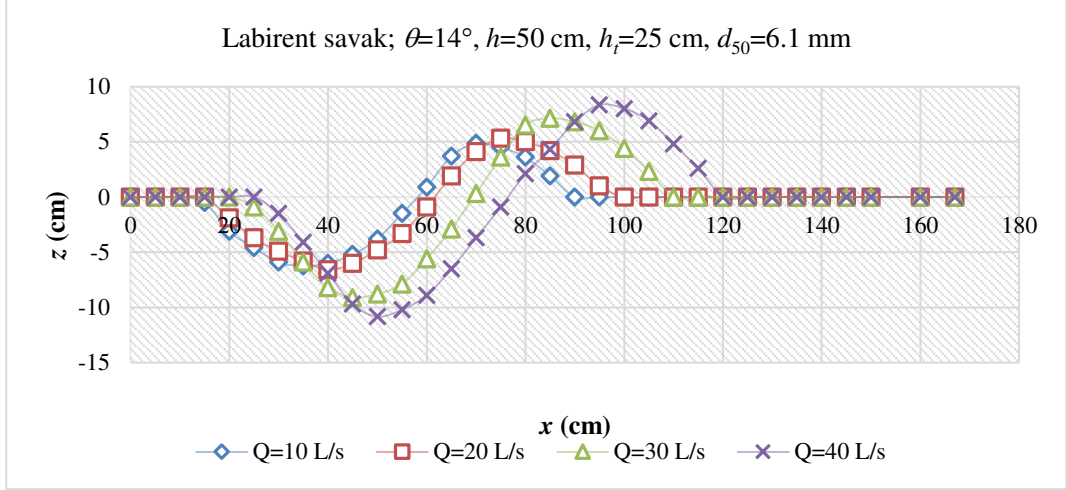
Şekil E3.37. Serbest düşülü labirent savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



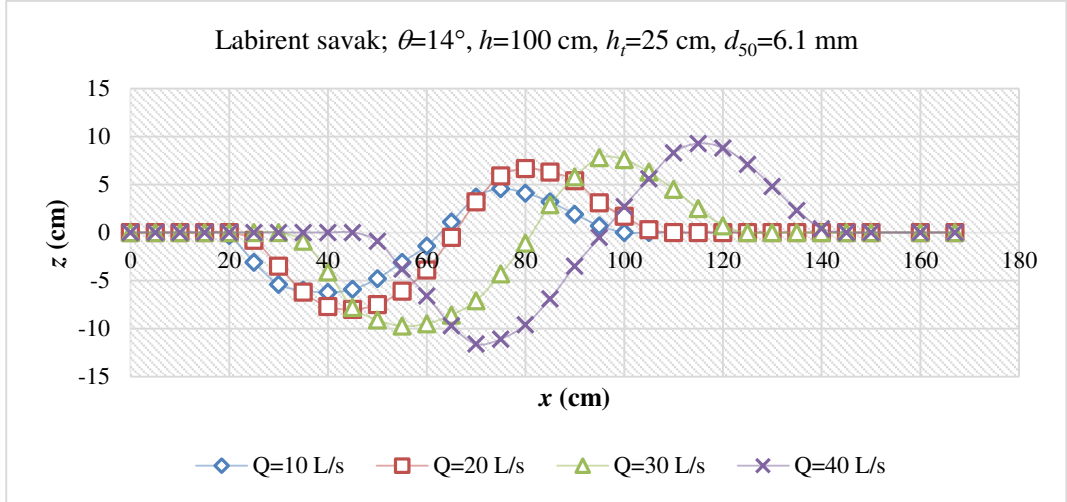
Şekil E3.38. Serbest düşülü labirent savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



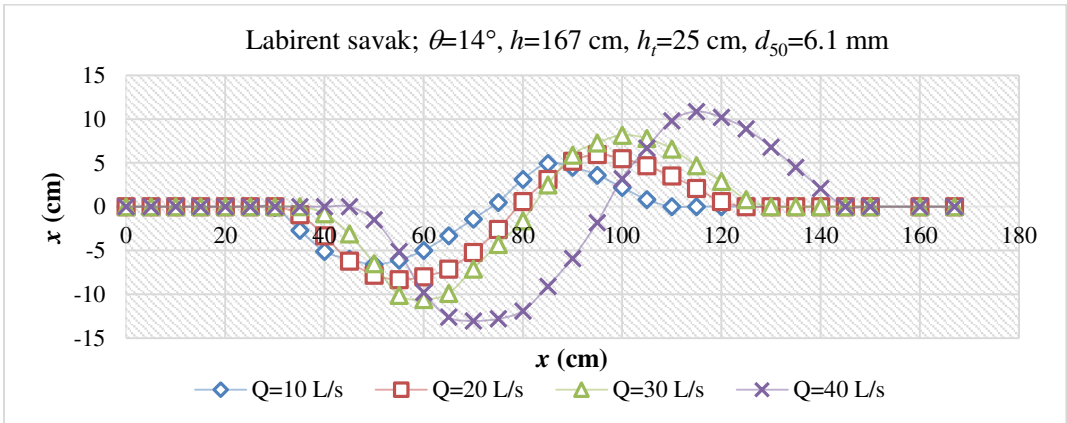
Şekil E3.39. Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



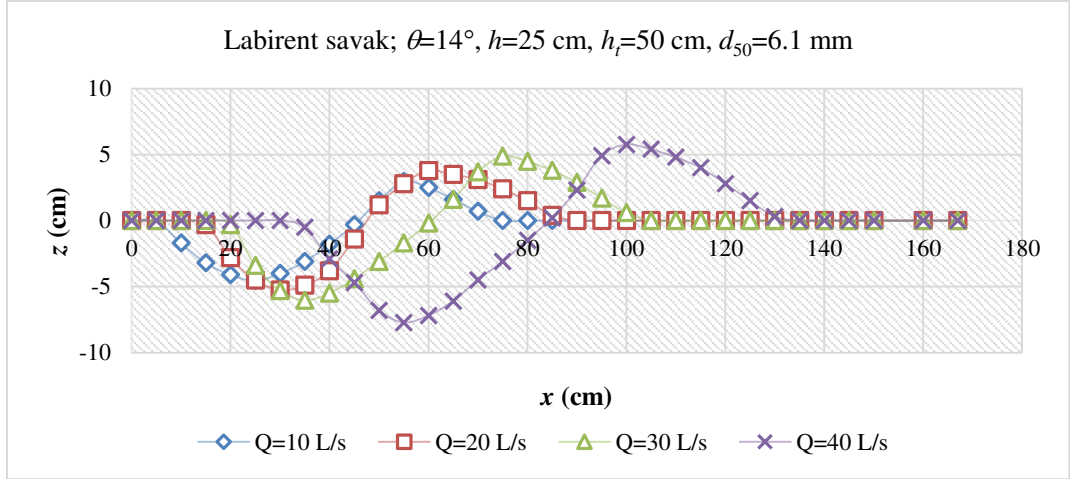
Şekil E3.40. Serbest düşülü labirent savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



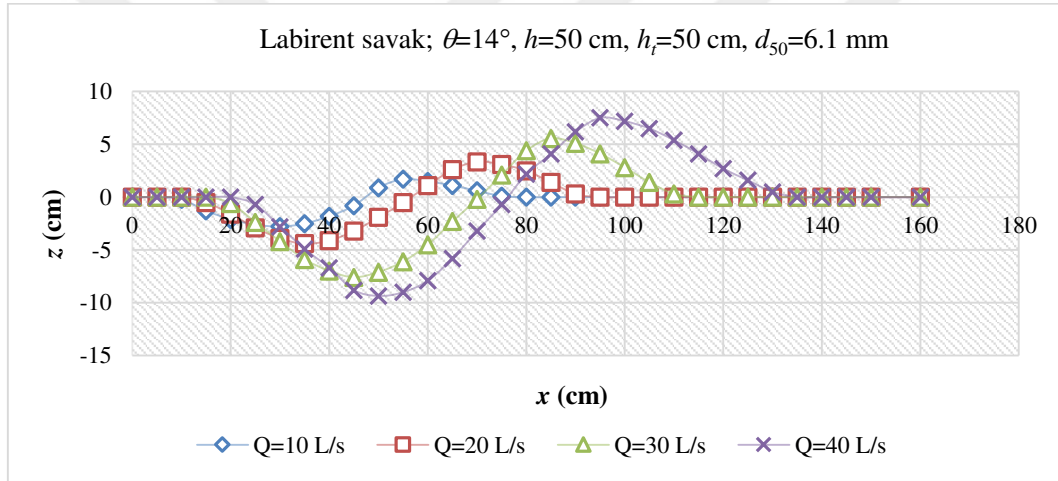
Şekil E3.41. Serbest düşülü labirent savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



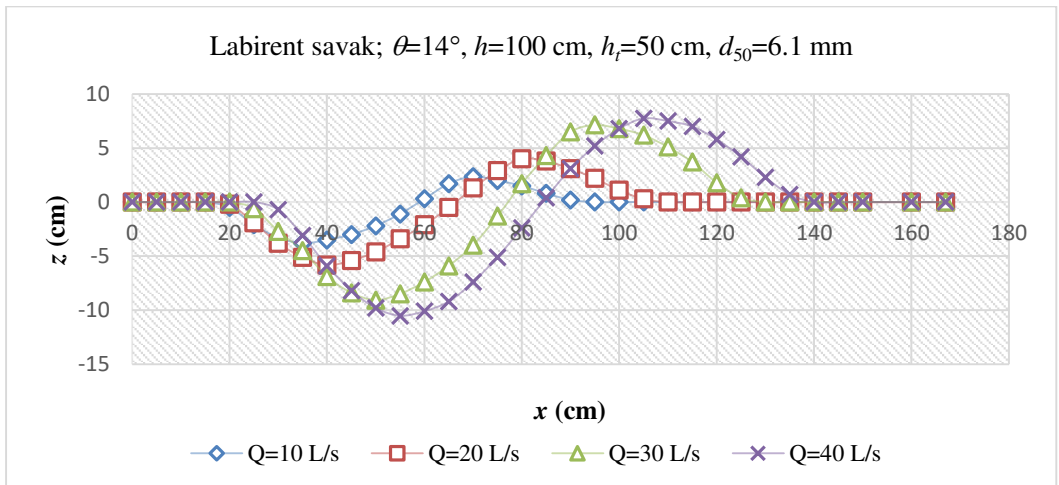
Şekil E3.42. Serbest düşülü labirent savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



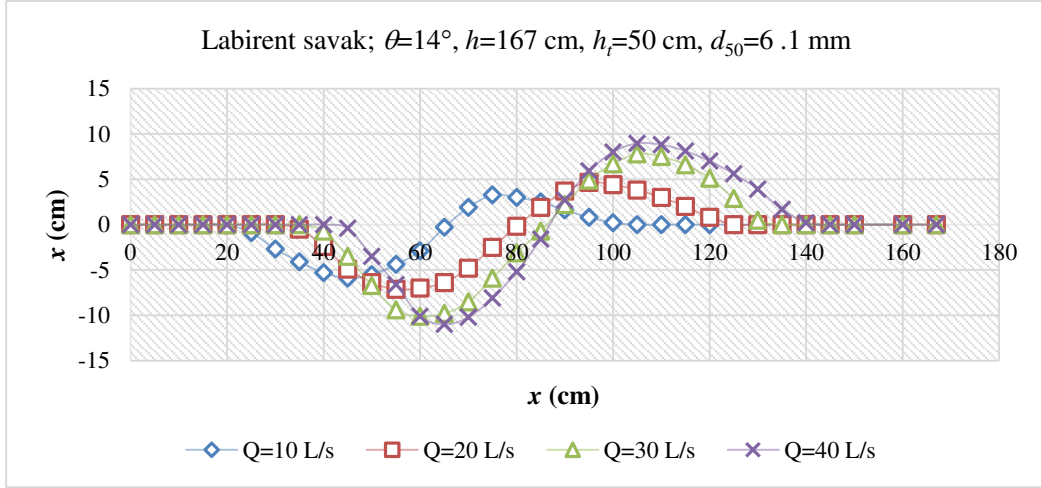
Şekil E3.43. Serbest düşülü labirent savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



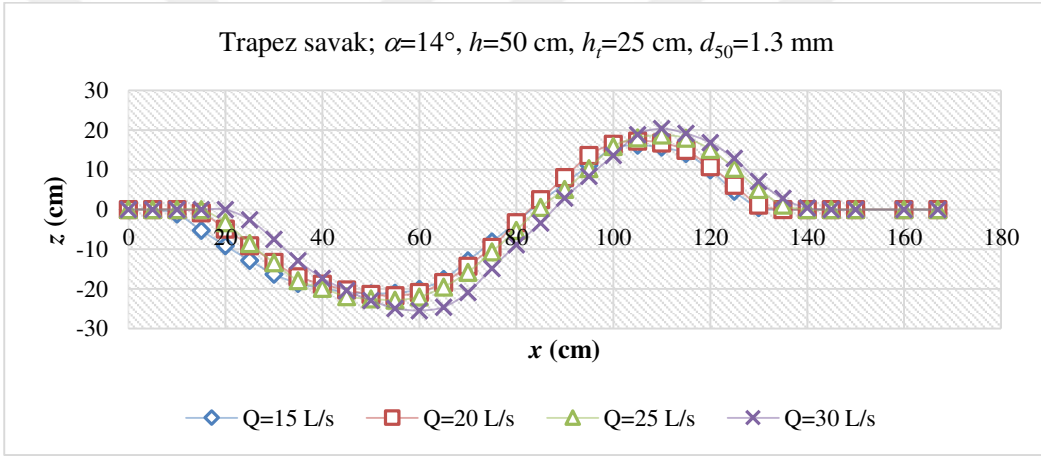
Şekil E3.44. Serbest düşülü labirent savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



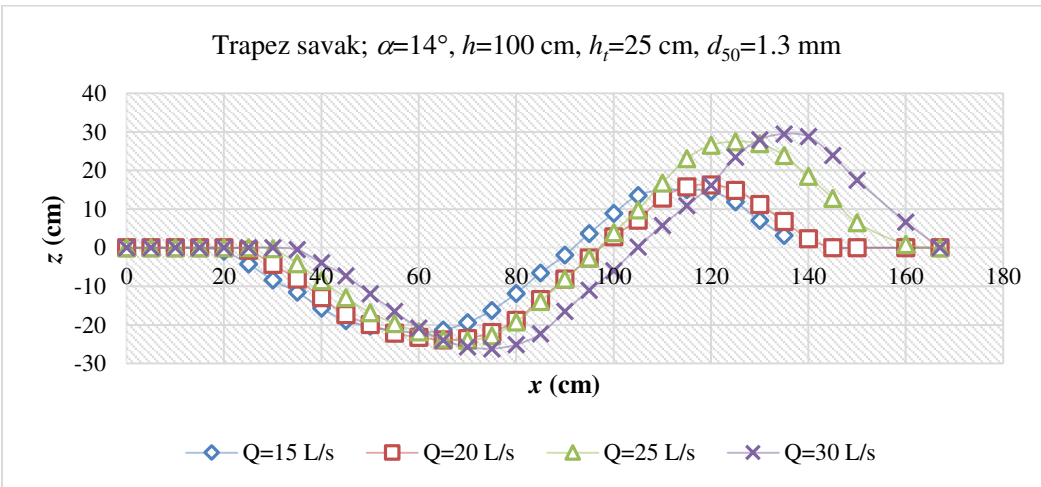
Şekil E3.45. Serbest düşülü labirent savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



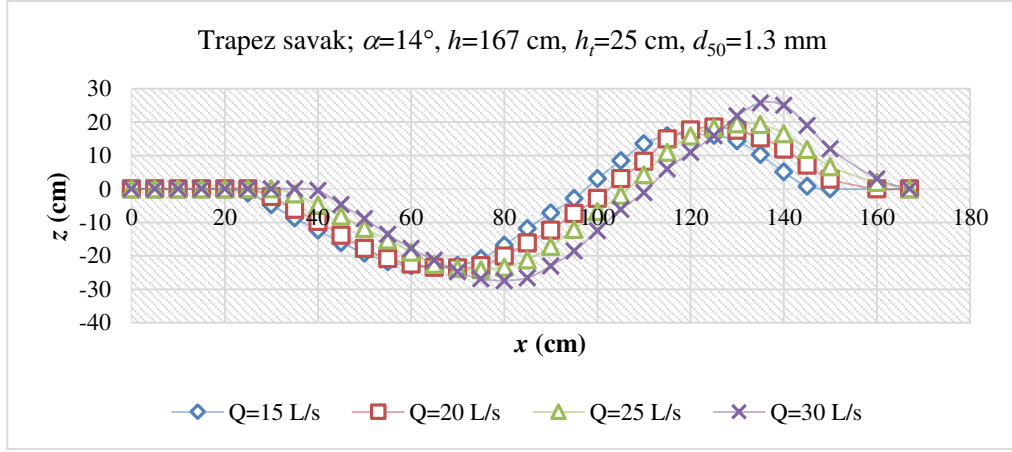
Şekil E3.46. Serbest düşülü labirent savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



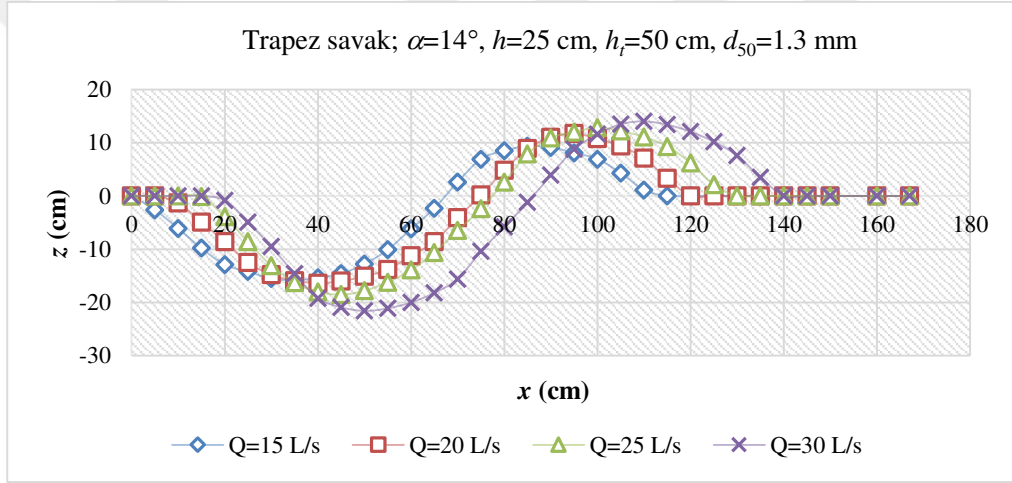
Şekil E3.47. Serbest düşülü trapez savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



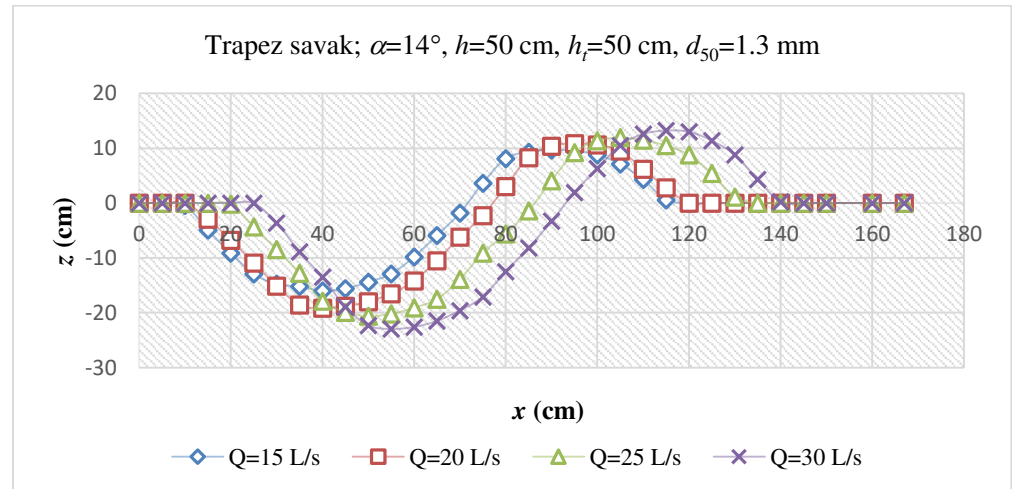
Şekil E3.48. Serbest düşülü trapez savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



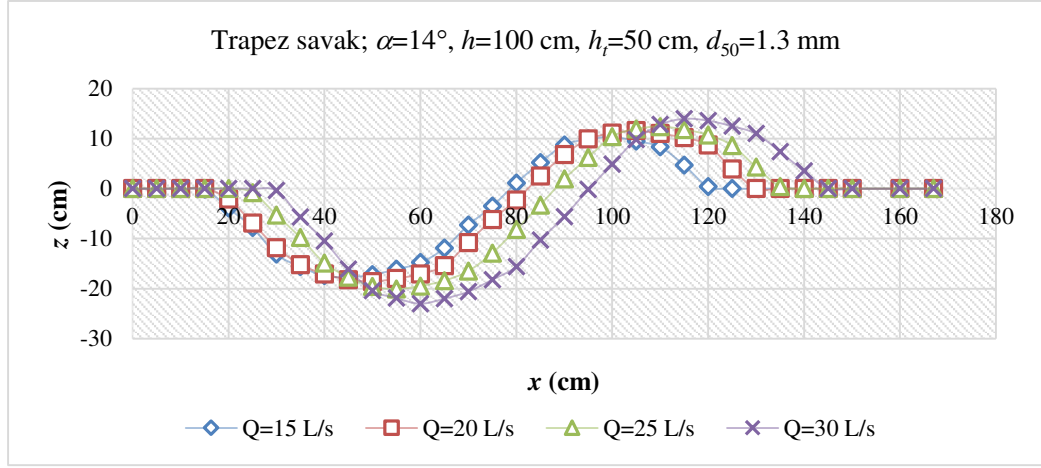
Şekil E3.49. Serbest düşülü trapez savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



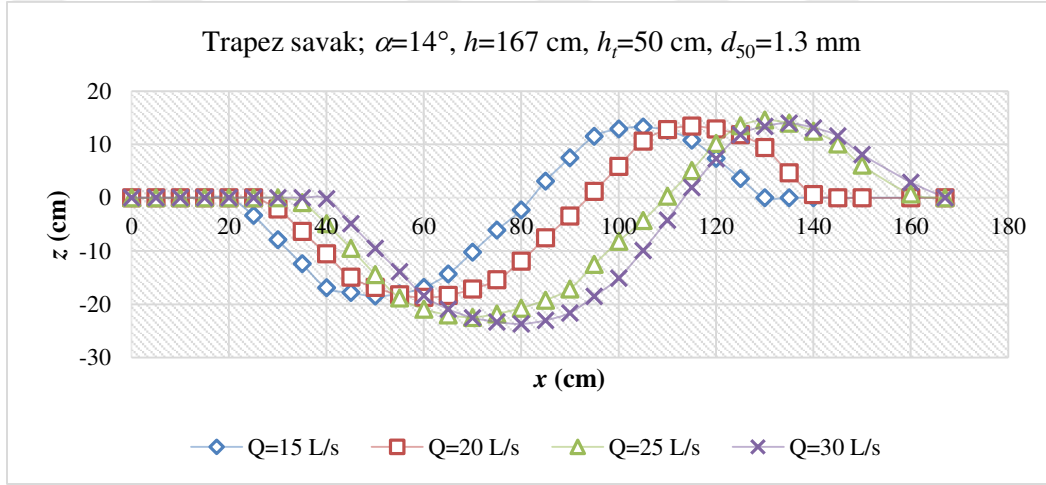
Şekil E3.50. Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



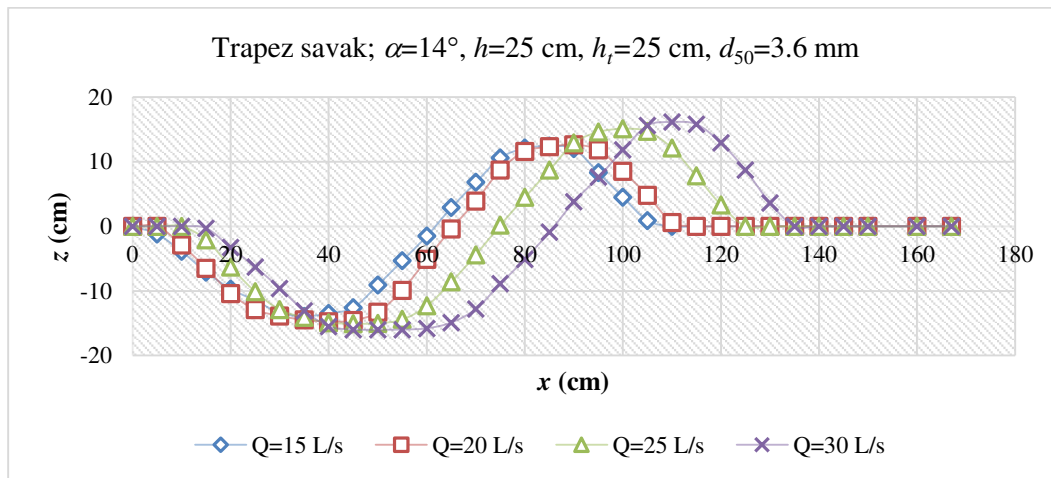
Şekil E3.51. Serbest düşülü trapez savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



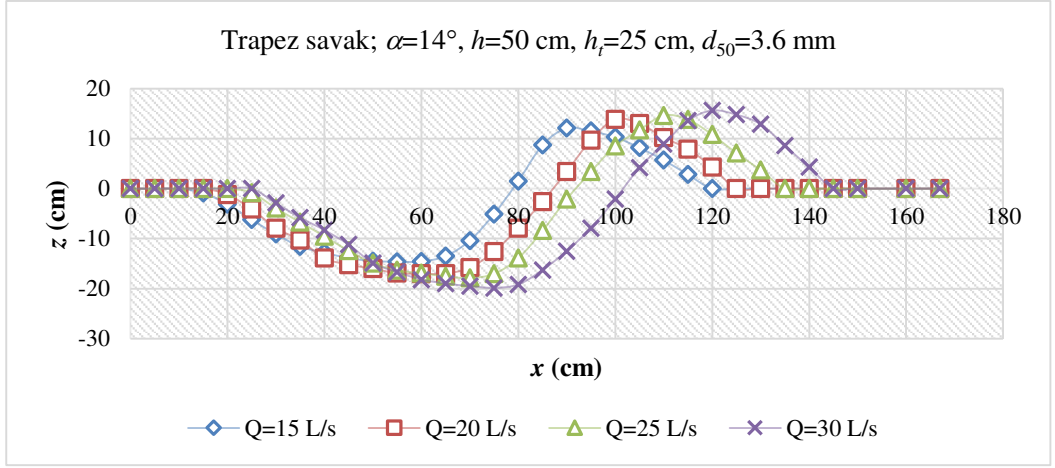
Şekil E3.52. Serbest düşülü trapez savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



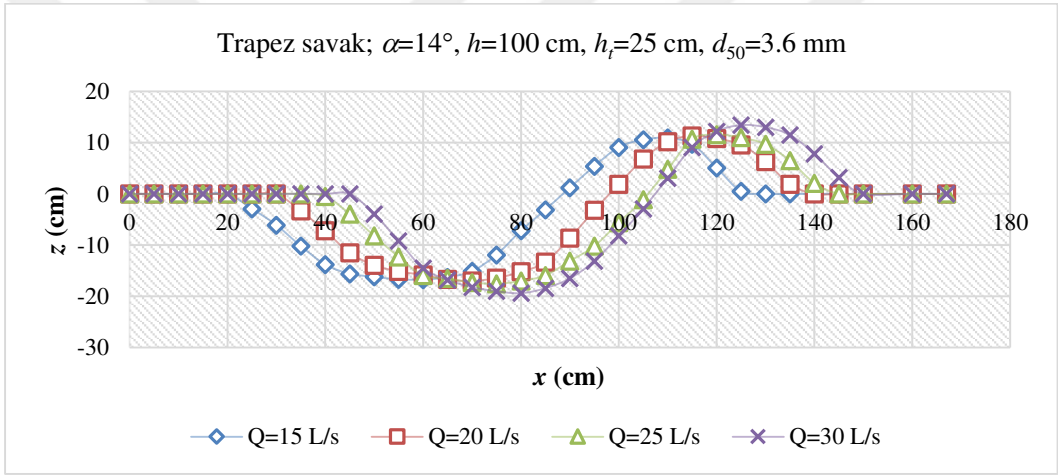
Şekil E3.53. Serbest düşülü trapez savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=1.3$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



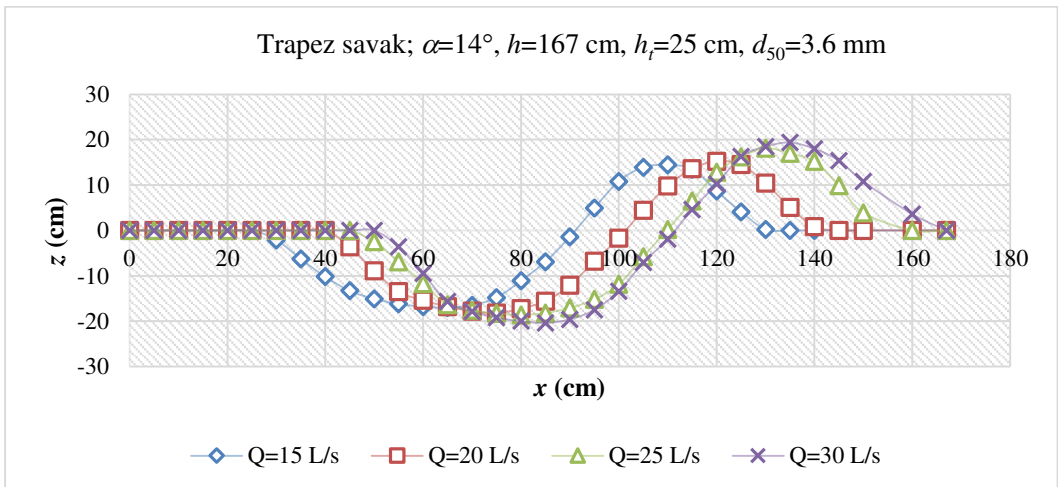
Şekil E3.54. Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



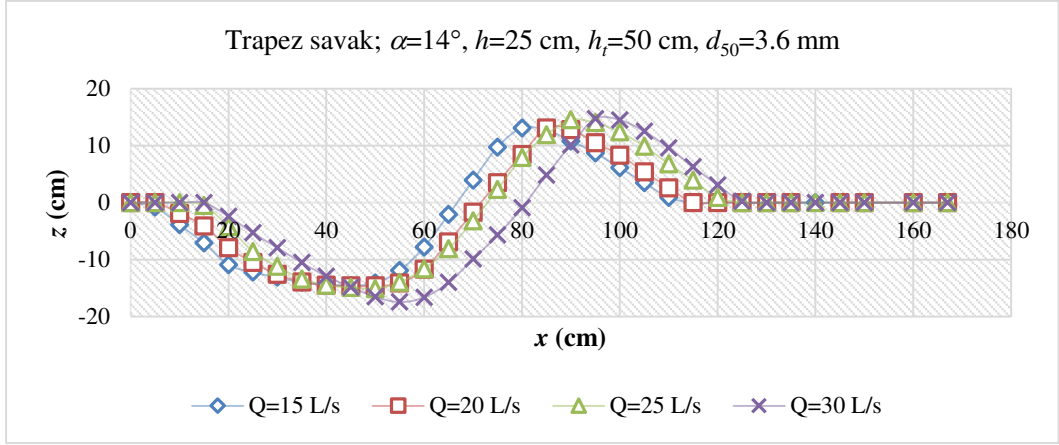
Şekil E3.55. Serbest düşülü trapez savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



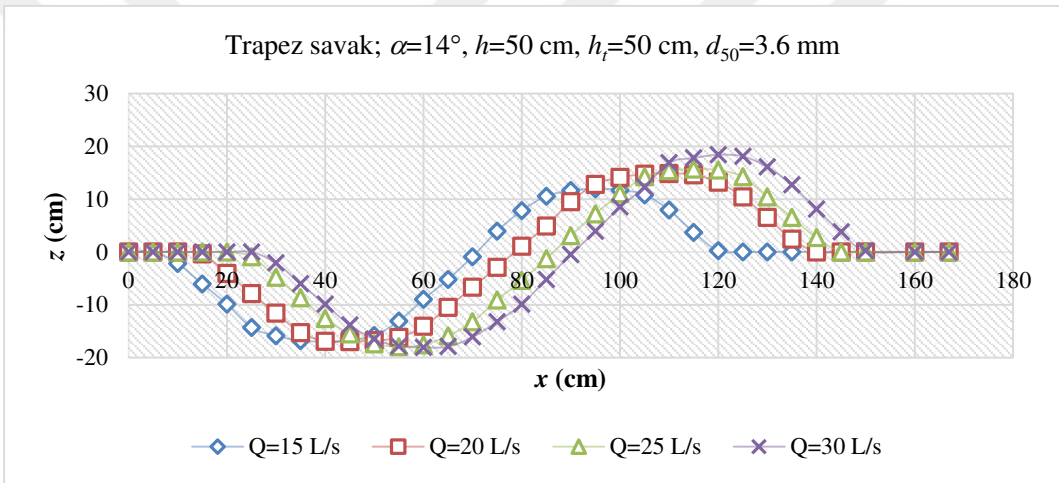
Şekil E3.56. Serbest düşülü trapez savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



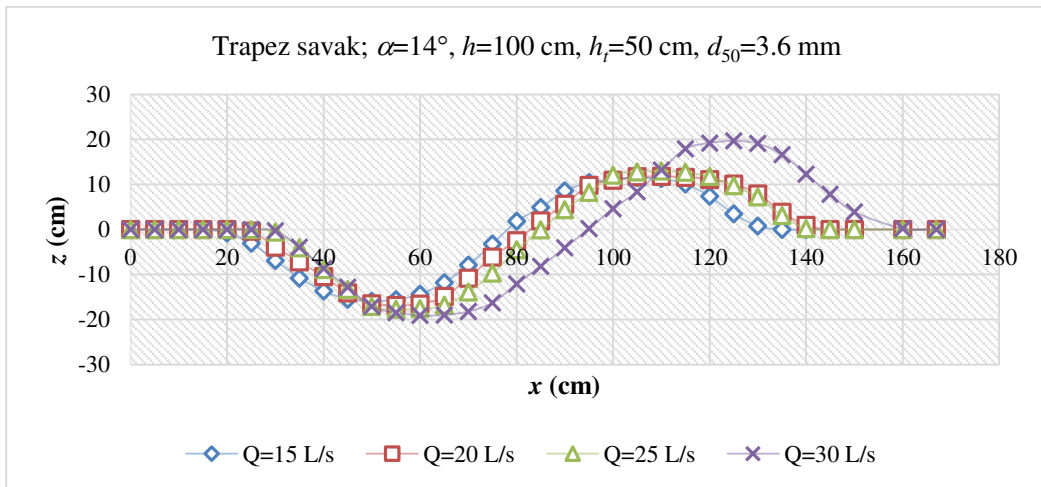
Şekil E3.57. Serbest düşülü trapez savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



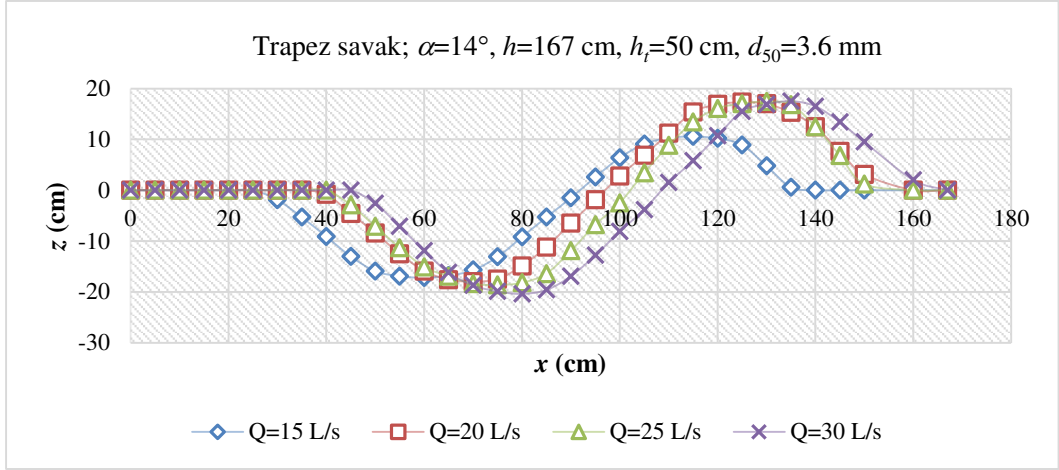
Şekil E3.58. Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



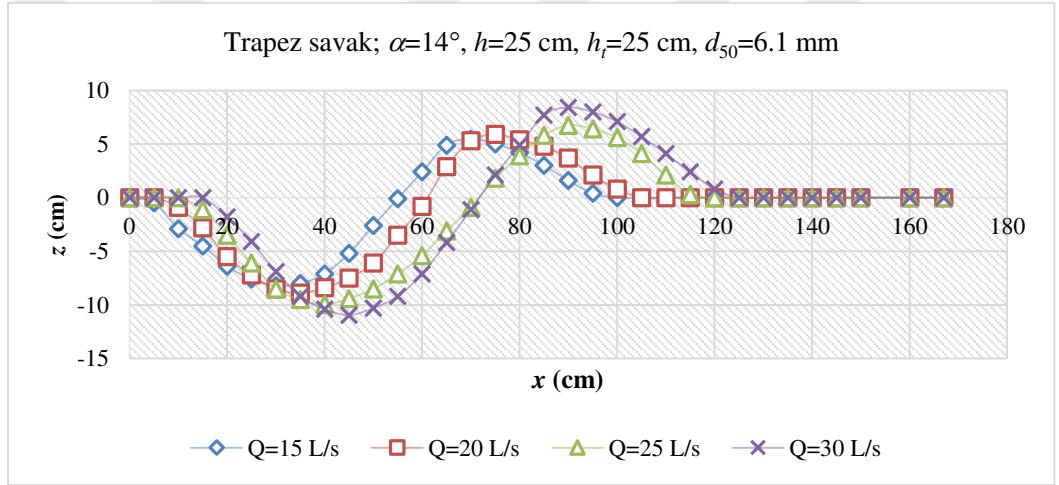
Şekil E3.59. Serbest düşülü trapez savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



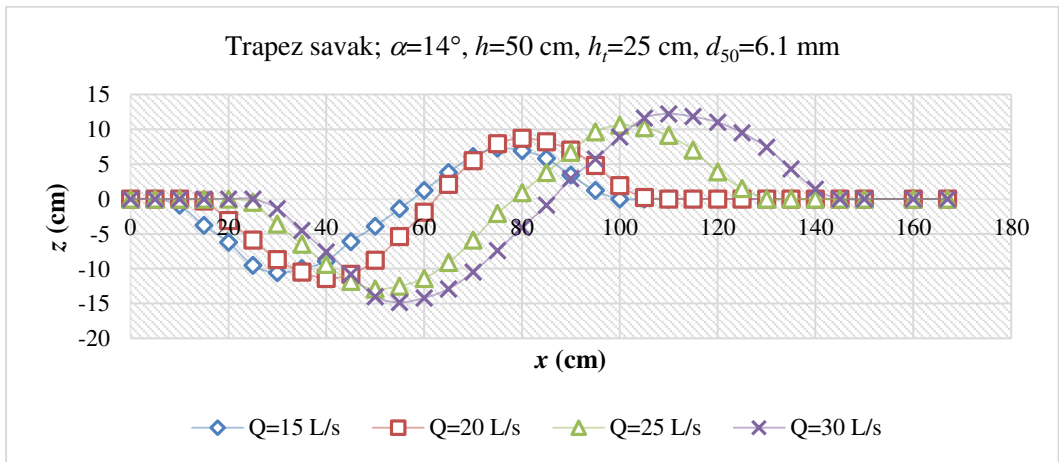
Şekil E3.60. Serbest düşülü trapez savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



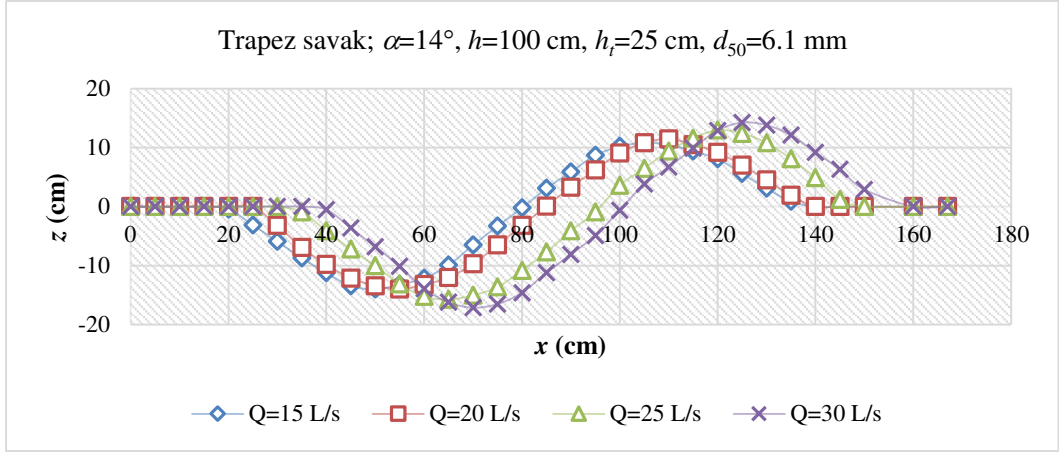
Şekil E3.61. Serbest düşümlü trapez savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=3.6$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



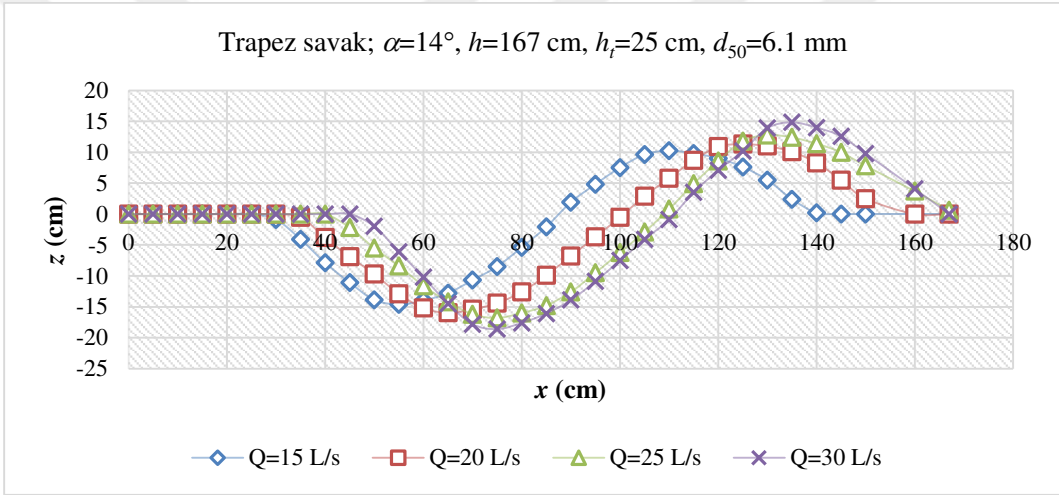
Şekil E3.62. Serbest düşümlü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



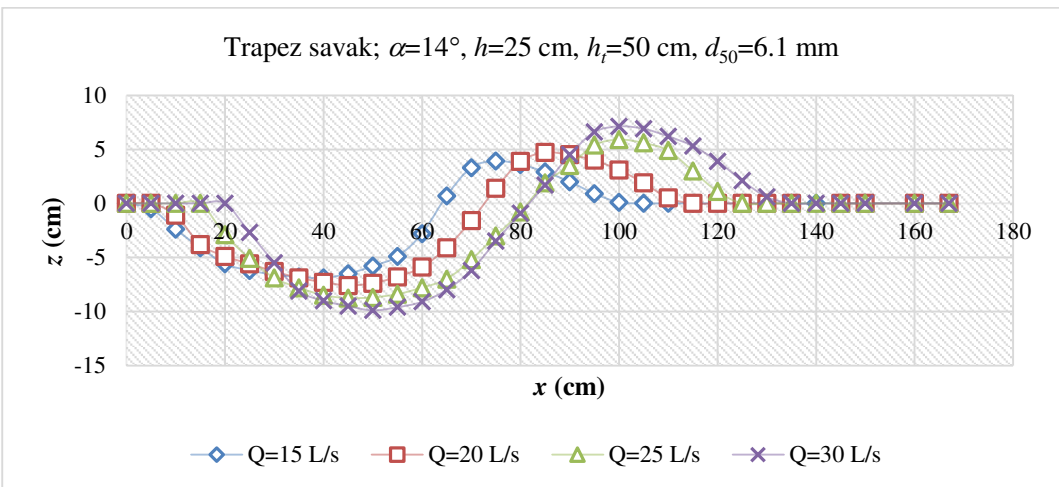
Şekil E3.63. Serbest düşümlü trapez savakta $h=50$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



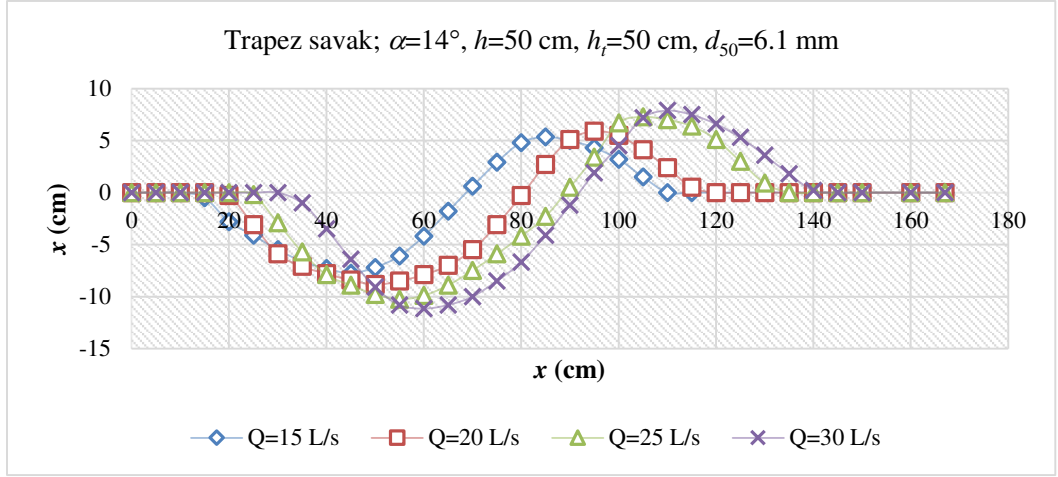
Şekil E3.64. Serbest düşülü trapez savakta $h=100$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



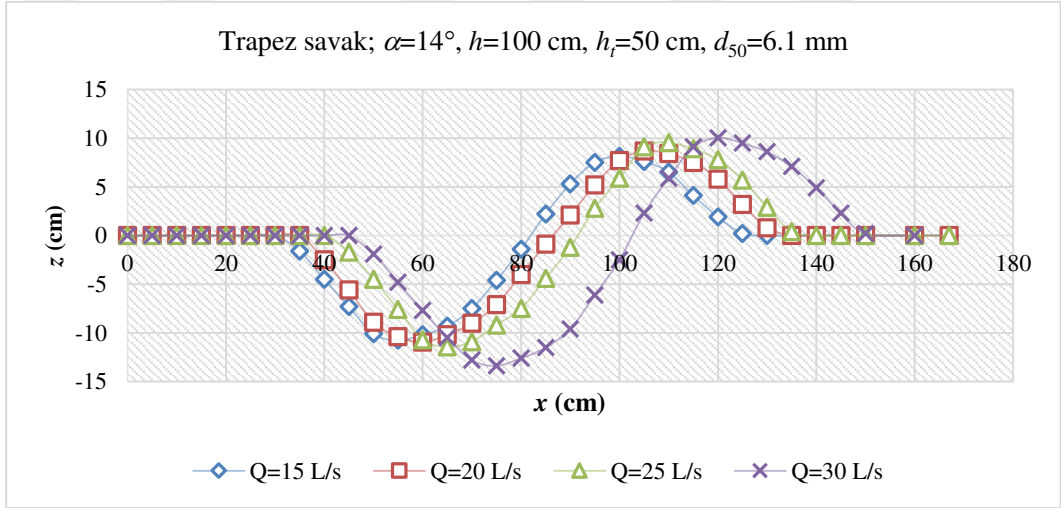
Şekil E3.65. Serbest düşülü trapez savakta $h=167$ cm, $h_t=25$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



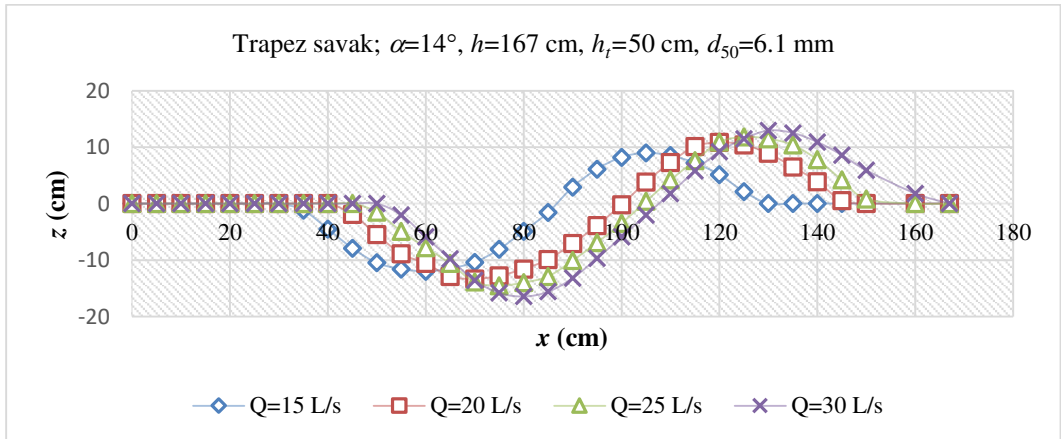
Şekil E3.66. Serbest düşülü trapez savakta $h=25$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



Şekil E3.67. Serbest düşülü trapez savakta $h=50$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



Şekil E3.68. Serbest düşülü trapez savakta $h=100$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.



Şekil E3.69. Serbest düşülü trapez savakta $h=167$ cm, $h_t=50$ cm ve $d_{50}=6.1$ mm için yürütülen deney sonunda farklı debi değerleri için yatağın boykesiti.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa TUNÇ

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Elazığ
Doğum Yılı : 1988
Uyruğu : T.C.
Adres : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ.
E-posta : mtunc@firat.edu.tr
Yabancı Diller : İngilizce (ÜDS:65)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : “Hareketli Tabanlı Akarsularda Labirent Yan Savaklardaki Akımın Hidrodinamiğinin İncelenmesi”
Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2014
Danışman: Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU
Lisans : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2011
Lise : Korgeneral Hulusi Sayın Lisesi, Elazığ, 2006

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Bildiğiniz deney sistemleri:
Hidrolik laboratuvarında yürütülen oyulma deneyleri, savak deneyleri, vorteks önleyici deneyler, su yüzü profili deneyleri, deşarj kapasitesi belirleme vb.
- ✓ Kullandığınız laboratuvar cihazları:
Akım debi ölçer, akım hızı ölçer, limnometre, ölçüm kameraları vb.
- ✓ Bildiğiniz bilgisayar programlama dilleri:
Fortran 90/95, C/C++.
- ✓ Kullanabildiğiniz bilgisayar programları:
FLOW 3D, MATLAB, AUTOCAD, SURFER, STATİSTİKA, SPSS, ORİGİN, HEC-RAS.

İŞ DENEYİMİ

2013 – ... : Araştırma Görevlisi / Öğretim Elemanı (Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ)

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Emiroğlu, M.E., Göğüş, M., Tunç, M., Islamoğlu, K., (2017). Effects of Antivortex Structures Installed on Trapezoidal Labyrinth Side Weirs on Discharge Capacity and Scouring. Journal of Irrigation and Drainage Engineering / ASCE, 143(6),4017006-.
2. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2018). Investigation of Live-Bed Scour at Labyrinth Side Weirs. Fırat University Turkish Journal of Science and Technology, 13(1),129-136.
3. Tunç, M. & Emiroğlu, M. E., (2019). Yan Savak Akımında Sediment Taşınımının Deneysel İncelenmesi. Su Kaynakları, 4(1), 1-11.

Bildiriler:

1. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2018). Experimental Study of Free Jet Scour Below Rectangular Weirs. 3rd International Science Symposium (ISS2018), (),1-9.

2. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2019). Effect of Labyrinth Side Weirs on Topography of the Movable Bed. International Civil Engineering and Architecture Conference (ICEARC'19), 861-869.
3. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2019). The Effect of Different Bed Material Grain Sizes on the Equilibrium Scour Depth at the Labyrinth Side Weir Flow. The International Conference on Materials and Engineering Technology (TICMET'19).
4. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2019). Sediment Transport Capacity for Different Flow Discharges in an Alluvial Channel. 1st International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology (ICIVILTECH 2019).
5. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2019). The Vortex at Labyrinth Side Weir Flow Installed in An Open Channel. International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019).
6. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2018). Açık Kanallarda Hareketli Taban Durumu ve Farklı Yan Savak Boyutları için Sediment Taşımının DeneySEL İncelenmesi. Uluslararası Su ve Çevre Kongresi (SUCEV), (),736-744.
7. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2018). An Experimental Investigation of Methods to Reduce the Maximum Scour Depth around Labyrinth Side Weir. 13th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE), (),1-9.
8. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2018). Relationship between sediment transport and scour geometry for high flow velocities at the labyrinth side weir. 5th International Symposium on dam Safety, (),462-470.
9. Tunç, M., Sayın, E., Karaton, M., Emiroğlu, M.E., (2018). Investigation of Loads Applied to Flexible Pipelines Having Linear Elastic Behavior with Different Methods. International Conference on Innovative Engineering Applications, CIEA' 2018, (),-.
10. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., Doğan, Y., Kaya, N., (2017). The Effect of Anti-vortex Plates on Scouring at Labyrinth Side Weirs. 8 th International Advanced Technologies Symposium, (),3826-3833.
11. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2017). Investigation of Live-Bed Scour at Labyrinth Side Weirs. International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE), (),233-239.
12. Emiroğlu, M.E., Tunç, M., (2016). Anti-vortex Use at Labyrinth Side Weirs. 10th International Commission on Large Dams European Club Symposium, (),-.
13. Emiroğlu, M.E., Tunç, M., İkinçioğulları, E., (2016). Determination Of Discharge Capacity At The Triangular Labyrinth Side Weirs Using Different Approaches. 10th International Commission on Large Dams European Club Symposium, (),-.
14. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2016). Effect of Triangular Labyrinth Side Weirs Mounted in Live-Bed Streams on Local Scours. International Congress on Natural and Engineering Sciences, (),-.
15. Emiroğlu, M.E., Tunç, M., (2016). Investigation of Anti-Vortex Use in Triangular Labyrinth Side Weirs for Clear-Water Scour. International Congress on Natural and Engineering Sciences, (),-.
16. Tunç, M., Emiroğlu, M.E., (2014). Hareketli Tabanlı Akarsulara Yerleştirilen Labirent Yan Savakların Taban Topografyasına Etkisi. Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, (),759-770.
17. Emiroğlu, M.E., Aydın, M.C., Tunç, M., (2012). Tek ve Çok Gözlü Labirent Yan Savaklar. 3. Uluslararası Katılımlı III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, (),583-593.

Projeler:

1. TUBİTAK-1001 (115M478), Doktora bursiyeri, 2019.