

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAİRESEL KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA  
MEYDANA GELEN YEREL OYULMA ÇUKURU  
ŞEKLİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**



**Ömer Yavuz ESKİ**

**Aralık, 2015**

**İZMİR**

**DAİRESEL KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA  
MEYDANA GELEN YEREL OYULMA ÇUKURU  
ŞEKLİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik, Hidroloji ve Su Kaynakları**

**Anabilim Dalı**

**Ömer Yavuz ESKİ**

**Aralık, 2015**

**İZMİR**


## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÖMER YAVUZ ESKİ, tarafından YRD. DOÇ. DR. AYŞEGÜL ÖZGENÇ AKSOY yönetiminde hazırlanan “DAİRESEL KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA MEYDANA GELEN YEREL OYULMA ÇUKURU ŞEKLİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. AYŞEGÜL ÖZGENÇ AKSOY

Danışman



Prof. Dr. Mehmet SÜKRÜ GÜNEY

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe FİLİBELİ

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, çalışmanın her aőamasında elinden gelen yardımı ve gayreti esirgemeyen tez danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY'a teőekkürlerimi sunarım.

Teorik konularda engin bilgi birikimini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. M. őükrü GÜNEY'e, deneysel çalışmalar süresince bana yardım eden değerli arkadaőım Mert Can GÜNATI'ya, çalıőmalarım boyunca bana hep pozitif enerji veren Araő. Gör. Dr. Mustafa DOğAN'a ve laboratuvar teknisyeni İsa ÜSTÜNDAğ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, beni büyütüp bugüne getiren aileme teőekkürü bir borç bilirim.

Ömer Yavuz ESKİ

# DAİRESEL KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA MEYDANA GELEN YEREL OYULMA ÇUKURU ŞEKLİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

## ÖZ

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, dairesel köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmaların şekli incelenmektedir. Deneyler, 80 cm genişliğinde, 18,6 m uzunluğunda ve 75 cm derinliğinde bir kanalda , Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında su derinliği ve debi ölçümleri ultrasonik seviye sensörleri ve elektromanyetik debimetre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemenin ortalama medyan çapı 1,633 mm olup, geometrik standart sapması ise 1,303'tür. Deneyler sonunda meydana gelen oyulma çukurunun şekli belirlenmiş olup bu ölçümler kullanılarak yeni ampirik bir bağıntı önerilmiştir. Önerilen bağıntı mevcut literatürdeki bilgiler ışığında yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Köprü ayağı, açık kanal akımı, temiz su oyulması, yerel oyulma çukuru

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SHAPE OF THE SCOUR HOLE AROUND CIRCULAR BRIDGE PIERS

## ABSTRACT

In this thesis, the shape of the scour hole around circular bridge pier was investigated under different steady state conditions. The experiments were carried out in a rectangular flume of 80 cm width, 18.6 m length and 75 cm depth in the Hydraulic Laboratory of the Civil Engineering Department at Dokuz Eylül University. The flow depths were monitored by ultrasonic level sensors and the flow rates were measured by electromagnetic flow meter. During the experiments uniform sediment with median diameter of 1.633 mm and geometric standard deviation of 1.303 was used. The shape of the scour hole was determined after each experiment and a new empirical equation was proposed by using the experimental results. The results of the proposed equation were compared and interpreted in the light of the available knowledge.

**Keywords:** Bridge pier, open channel flow, clear water scour, scour hole

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
TEZ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	1
1.2 Geçmişte Yapılan Akademik Çalışmalar .....	1
<b>BÖLÜM İKİ – TEORİK BAKIŞ.....</b>	<b>5</b>
2.1 Giriş.....	5
2.2 Köprü Ayakları Etrafındaki Meydana Gelen Yerel Oyulmalar .....	6
2.3 Temiz Su Oyulması .....	8
2.4 Hareketli Taban Oyulması.....	9
2.5 Temiz Su Oyulması ile Hareketli Taban Oyulması Arasındaki Farklar .....	9
2.6 Oyulma Mekanizmasına Etki Eden Faktörler .....	10
2.7 Yaklaşan Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi .....	14
2.8 Yaklaşan Akım Hızının Etkisi.....	15
2.9 Taban Malzemesi Özelliklerinin Etkisi .....	15
2.10 Zamanın Yerel Oyulmaya Etkisi .....	16
2.11 Literatürde Verilen Bağlıntılar .....	17
2.11.1 Yanmaz ve Altınbilek (1991) .....	17
2.11.2 Khwairakpam ve diğer. (2012).....	18
2.11.2.1 Oyulma Çukurunun Uzunluğu ve Genişliği .....	18

2.11.2.2 Oyulma ukuru Hacmi .....	19
2.11.3 Das ve diğer. (2014) .....	19
2.11.3.1 Oyulma Uzunluğunun Belirlenmesi .....	19
2.11.3.2 Oyulma Genişliğinin Belirlenmesi .....	19
2.11.3.3 Oyulma Hacminin Belirlenmesi .....	19
<b>BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ALIşMALAR.....</b>	<b>21</b>
3.1 Deney Düzenegi .....	21
3.2 Deneysel Bulgular .....	25
<b>BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL VERİLERİN DEğERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>38</b>
4.1 Regresyon Analizi .....	38
4.2 Saçılma İndisi .....	39
4.3 Önerilen Bağıntılar .....	39
4.4 Önerilen Bağıntı Sonuçlarının Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	42
4.5 Önerilen Bağıntı Sonuçlarının Literatürde Mevcut Diğer Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması .....	44
4.6 Literatürde Verilen Denklemler ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması....	46
4.6.1 Yanmaz ve Altınbilek (1991) .....	46
4.6.2 Khwairakpam ve diğer. (2012) .....	47
4.6.3 Das ve diğer. (2014) .....	49
4.7 Literatürdeki Verilen Formül Sonuçlarının Literatürde Mevcut Diğer Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması .....	51
<b>BÖLÜM BEş - SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>58</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>61</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Oyulma çeşitlerinin şeması .....	5
Şekil 2.2 Bir köprü ayağı etrafındaki çevrıntiler ve oyulma çukuru .....	7
Şekil 2.3 Oyulma derinliğinin zamana bağlı olarak değişimi .....	10
Şekil 2.4 Dairesel ayak için oyulma çukurunun geometrik tanımı .....	17
Şekil 3.1 Deney düzeneğinin genel görünümü .....	21
Şekil 3.2 Taban malzemesinin granülometrik eğrisi .....	22
Şekil 3.3 Deney düzeneği ve araçlar .....	22
Şekil 3.4 a) Pompa b) Hız Kontrol Cihazı .....	23
Şekil 3.5 Elektromanyetik debimetre .....	23
Şekil 3.6 ULS Cihazı .....	24
Şekil 3.7 Oyulma çukurunun şematik gösterimi .....	26
Şekil 3.8 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler, D=8 .....	29
Şekil 3.9 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler, D=11 .....	30
Şekil 3.10 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler, D=15 .....	31
Şekil 3.11 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler, D=20 .....	32
Şekil 3.12 Köprü ayağı etrafında ölçülen enkesitler .....	33
Şekil 3.13 Oyulma çukurunun eşyükselti eğrileri ile gösterilmesi (a) D-20-3, (b) D-15-3, (c) D-11-3, (d) D-8-3 (birimler: cm) .....	34
Şekil 3.14 Deneyler sonrasında köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar (a) D-20-3, (b) D-15-3, (c) D-11-3, (d) D-8-3 .....	36
Şekil 4.1 Hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru uzunlukları, $l_s$ .....	42
Şekil 4.2 Hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru genişlikleri, $w_s$ .....	43
Şekil 4.3 Hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru hacimleri, $\Psi$ .....	43
Şekil 4.4 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru uzunlukları, $l_s$ .....	44
Şekil 4.5 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru genişlikleri, $w_s$ .....	45
Şekil 4.6 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru hacimleri, $\Psi$ .....	46

Şekil 4.7 (2.16) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru hacimleri .....	47
Şekil 4.8 (2.17) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru uzunlukları .....	48
Şekil 4.9 (2.18) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru genişlikleri .....	48
Şekil 4.10 (2.19) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru hacimleri .....	49
Şekil 4.11 (2.20) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru uzunlukları .....	50
Şekil 4.12 (2.21) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru genişlikleri .....	50
Şekil 4.13 (2.22) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru hacimleri .....	51
Şekil 4.14 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.16) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru hacimleri .....	52
Şekil 4.15 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.17) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru uzunluğu .....	52
Şekil 4.16 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.18) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru genişliği .....	53
Şekil 4.17 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.19) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru hacimleri .....	53
Şekil 4.18 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.20) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru uzunluğu .....	54
Şekil 4.19 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.21) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru genişliği .....	54
Şekil 4.20 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.22) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru hacimleri .....	55

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 3.1 Deneylein koşulları (debi (Q), yaklaşım akım derinliği (y), köprü ayağı çapları (b), hesaplanan akım şiddeti ( $V/V_c$ ), Froude sayısı değerleri (Fr)) .....	27
Tablo 3.2 Deneyleer sonunda ölçülen oyulma çukuru özellikleri (nihai oyulma derinliği değerleri ( $d_s$ ), oyulma çukurunun hacmi ( $\nabla$ ), oyulma çukuru genişliği ( $w_s$ ) ve uzunlukları ( $l_s$ )) .....	28
Tablo 4.1 Literatürde verilen deneyleer .....	41
Tablo 4.2 Literatürde mevcut deneysel veriler .....	45
Tablo 5.1 Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçları ile önerilen denklem sonuçlarının karşılaştırılması .....	56
Tablo 5.2 Literatürde mevcut deneysel sonuçlar ile önerilen denklem sonuçlarının karşılaştırılması .....	57
Tablo 5.3 Literatürde önerilen bağıntı sonuçları ile bu tez kapsamında yapılan deney sonuçlarının karşılaştırılması .....	57
Tablo 5.4 Literatürde mevcut deneysel sonuçlar ile literatürde önerilen bağıntı sonuçlarının karşılaştırılması .....	57

# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Çalışmanın Amacı

Köprülerin yıkılmasında en önemli iki neden olarak taşkınlar ve köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar gösterilmektedir. Yerel oyulmaların meydana geliş sebepleri oldukça karmaşıktır, bu konuyla alakalı birçok çalışma olmasının yanısıra hala araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Bu tez çalışmasında silindirik köprü orta ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar, üniform taban malzemesi kullanılarak deneysel olarak incelenmiş olup yeni bir ampirik bağıntı önerilmiştir. Önerilen bağıntının sonuçları hem literatürde mevcut olan bağıntıların sonuçları ile hem de verilen diğer deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda mevcut olan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.

### 1.2 Geçmişte Yapılan Akademik Çalışmalar

Melville ve Sutherland (1988), geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı tipte köprü orta ayağı çevresindeki temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini tahmin eden bir bağıntı önermişlerdir.

Melville (1997), deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı tipte köprü orta ve yan ayakları çevresindeki temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini tahmin eden bir bağıntı önermiştir.

Yanmaz ve Altinbilek (1991), çalışmalarında üniform taban malzemesi için dairesel ve kare olmak üzere iki farklı tipte köprü orta ayakları çevresindeki temiz su oyulmalarının nihai derinliğini tahmin eden bağıntı önermişlerdir. Ayrıca oyulma hacmi ile alakalı iki bağıntı vermişlerdir.

Richardson ve Davis (2001), geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, farklı tipte köprü orta ayakları çevresinde nihai temiz su ve hareketli taban oyulmasını tahmin eden bir bağıntı önermişlerdir.

Oliveto ve Hager (2002), üniform ve üniform olmayan taban malzemesi kullanarak dairesel köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmalarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde, 1 m ve 0,50 m genişliklerine sahip, 11 metre uzunluğunda iki ayrı dikdörtgen kanal kullanmışlardır. Taban malzemesi olarak 3 ayrı üniform ve 3 ayrı üniform olmayan malzeme kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, temiz su koşullarında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimini veren bir bağıntı önermişlerdir.

Mia and Nago (2003), çalışmalarında geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, dairesel köprü orta ayakları etrafında, üniform taban malzemesi kullanarak, temiz su koşullarında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimini veren bağıntı önermişlerdir.

Sheppard, Odeh ve Glasser (2004), üniform taban malzemesi kullanarak köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmasını deneysel olarak incelemiş ve nihai oyulma derinliğini veren bir bağıntı önermişlerdir. Deneylerini 6,1 m genişliğe, 6,4 m derinliğe ve 38,4 m uzunluğa sahip bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları dairesel orta ayak çapları 0,114, 0,305, 0,914 m'dir ve taban malzemeleri üniform olup, medyan çapları 0,22, 0,80, 2,90 mm'dir.

Oliveto ve Hager (2005), 2002'deki çalışmalarına ek olarak yan ayaklar ve mahmuzlar etrafında oluşan yerel oyulmaları deneysel olarak incelemiştir. Ayrıca köprü orta ayakları etrafında taşkın hidrografları sırasında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimini veren bir yöntem önermişlerdir.

Kothari, Hager ve Oliveto (2007), temiz su oyulmasının zamana bağlı gelişimini hesaplamak için yeni bir bağıntı önermişlerdir. Deneysel, 1 m ve 0,50 m genişliklerine sahip, 11 metre uzunluğunda iki ayrı dikdörtgen kanalda gerçekleştirilmiştir.

Chang, Lai ve Yen (2009), kararlı ve kararsız akım koşullarında, üniform veya üniform olmayan taban malzemesi kullanarak köprü orta ayağı etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimi için bir hesap yöntemi önermişlerdir.

Hodi (2009), araştırmasını üniform taban malzemesi kullanarak köprü orta ayağı etrafındaki temiz su oyulmasını 20, 30 ve 45 mm'lik dairesel köprü ayağı kullanarak 600 ve 900 mm genişliğinde iki farklı tipteki kanalda gerçekleştirmişlerdir. Araştırmasında kanal genişliğinin ve densimetrik Froude sayısının oyulma çukuru derinliği, oyulma çukuru genişliği, maksimum depolanan yükseklik ve maksimum depolanan genişliği üzerindeki etkisini araştırmıştır.

Diab (2011), temiz su oyulma koşullarında üniform taban malzemesi kullanarak orta köprü ayakları etrafındaki meydana gelen oyulmaları incelemiştir. Çalışmalarında 0,2 m çapında dairesel ayak, 0,2 m kenar uzunluğunda kare ayak, 0,2 ve 0,4 m kenar uzunluklarında dikdörtgen ayak ve 0,2 ve 0,8 m kenar uzunluklarında dikdörtgen ayak olmak üzere 4 farklı tipte köprü ayağı kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda oyulma derinliğinin ve oyulma şeklinin geometrisini zamana bağlı değişimini veren bağıntılar vermiştir.

Khwairakpam ve diğer. (2012), deneylerinde uniform taban malzemesi kullanarak orta kopru ayakları etrafındaki oyulmaları incelemişlerdir. Temiz su oyulma koşullarında çalışarak 3 farklı debide deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Akış derinliğine ve densimetrik Froude sayısına bağlı olarak oyulma derinliği, oyulma uzunluğu ve genişliği, oyulma alanı ve hacmi ile bağıntılar vermişlerdir.

D'Alessandro (2013), deneyini üniform taban malzemesi kullanarak kopru orta ayağı etrafındaki temiz su oyulma koşullarında değişen duvar genişliklerinde blokaj etkisini (duvar müdahalesini) incelemiştir.

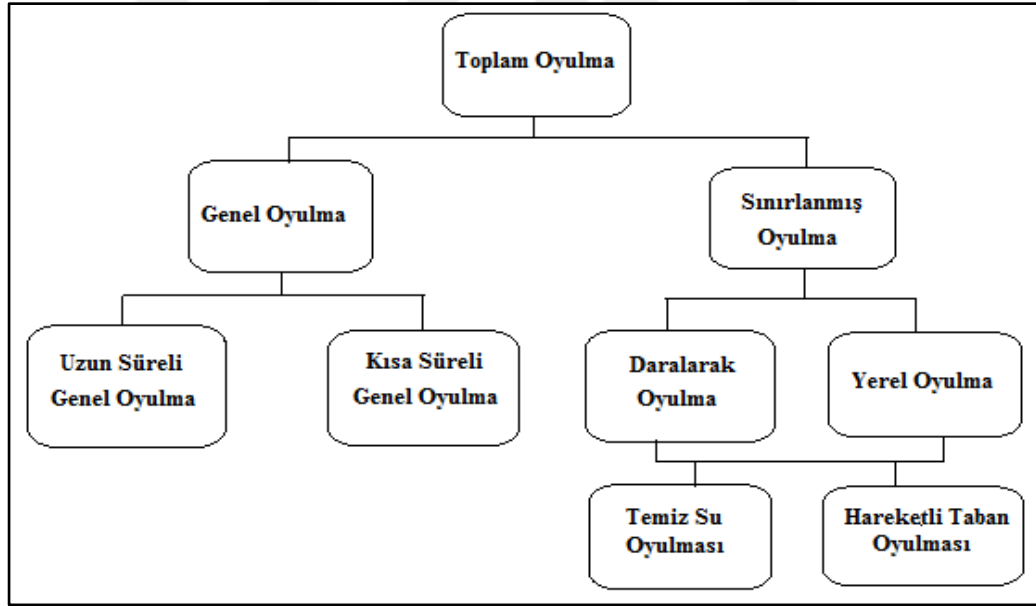
Das ve diğer. (2014), temiz su oyulma koşullarında uniform taban malzemesi kullanarak orta kopru ayakları etrafındaki meydana gelen oyulmaları incelemişlerdir. alışmalarında daire , kare, dikdörtgen ve düz plak olmak üzere 4 farklı tipte kopru ayağı kullanmışlardır. alışmaları sonucunda oyulma derinliği, oyulma uzunluğu ve genişliği, oyulma alanı ve hacmi ile ilgili literatüre bağıntı önermişlerdir.

## BÖLÜM İKİ

### TEORİK BAKIŞ

#### 2.1 Giriş

Genel olarak oyulma kavramı, akışkanın tabandan ya da köprü ayağı çevresinden taban malzemesi koparması ve sürüklemesi ile ifade edilmektedir (Richardson and Davis, 2001). Ayrıca Cheremisinoff ve diğer. (1987) oyulmayı, köprü gibi nehir yapılarının temelinin açığa çıkarma eğiliminde olacak şekilde suyun aşındırması ve nehir yatağı seviyesinin alçaltılması olarak tanımlamışlardır. Yazarlara göre oyulmanın sebebi ya normal akış ya da taşkın olaylarıdır. Belirli bir doğal seviyeden (genellikle olay başlamadan önceki nehir yatağının seviyesi) itibaren oluşan alçalma miktarına oyulma derinliği adı verilmektedir. Şekil 2.1'de oyulma çeşitleri şema halinde gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Oyulma çeşitlerinin şeması (Cheremisinoff ve diğer., 1987)

Genel oyulma: Bu oyulma çeşidi nehir kanalının boyuna profilinin toplam alçalmasına neden olan etkilerden gerçekleşmektedir. Genel oyulma bir köprünün varlığına bakılmaksızın gelişir ve uzun süreli ve kısa süreli olarak ikiye



ayrılmaktadır. Kısa süreli genel oyulma taşkına cevap olarak gelişirken uzun süreli oyulma ise genelde birkaç yıllık daha uzun süreli olarak gelişmektedir.

**Sınırlanmış oyulma:** Genel oyulmanın aksine sınırlanmış oyulma köprü ve diğer hidrolik yapıların varlığına bağlanmaktadır. Sınırlanmış oyulma yerel oyulma ve daralarak oyulma olarak ikiye ayrılır.

**Daralarak oyulma:** Bu oyulma çeşidi ya insan etkisinden dolayı taşkın yatağının değiştirilmesi ya da doğanın etkilerinden dolayı gerçekleşmektedir. Bu daralmanın sonucunda akış alanında azalma ve ortalama akış hızında artış meydana gelmektedir. Bu olayın sonucunda kanal yatağı üzerindeki erozyon kuvvetlerinde bir artma meydana gelmektedir ve kanal yatağı alçalmaktadır.

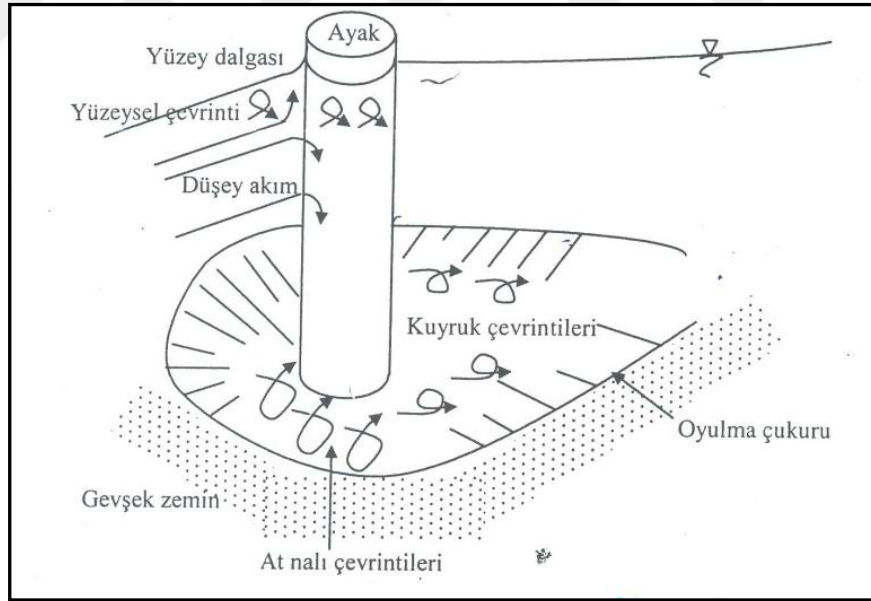
**Yerel oyulma:** Tabanında taşınabilir maddeler bulunan akarsularda; akım rejimi, malzeme cinsi, akarsuyun kesit özellikleri ve kullanımı ile ilişkilendirilebilecek oyulmalar ve yığılmalar oluşur (Cheremisinooff ve diğer., 1987). Yerel oyulmalarla ilgili detaylı bilgi bölüm 2.2’de verilmektedir.

## **2.2 Köprü Ayakları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalar**

Köprü ayakları, mahmuzlar ve yan savaklar akım içerisine yerleştirilen hidrolik yapılardır ve bu hidrolik yapılar etrafında yerel oyulmalar meydana gelmektedir. Bu yapılar etrafında gerçekleşen yerel oyulmalar bu yapıların temellerinin zayıflamasına ve daha sonra yıkılmasına sebep olmaktadır. Oyulma olayı akarsulardaki taban malzemesinin özelliklerine, temel geometrisine ve akımın özelliklerine bağlı olarak gerçekleşmektedir (Raudkivi, 1986).

Akım alanına yerleştirilmiş bir köprü ayağı, açıklıktaki net akım alanını azaltacağından ortalama hızı arttırır. Böylece, daralmış kesitteki katı madde taşıma kapasitesi artar. Akım hızındaki ani düşme nedeniyle köprü ayağı memba yüzünde su seviyesi artar ve burada durgunluk düzlemi oluşur. Su seviyesindeki bu artış akımının hızına ve ayak geometrik özelliklerine bağlıdır. Durgunluk düzlemindeki ani basınç artışı sebebiyle ayak memba tarafındaki türbülanslı sınır tabakası ayrılır.

Bu ayrılmanın şiddeti küt burunlu ayaklarda daha fazladır. Akım hızı derinlikle azaldığı için durgunluk basıncı da derinlik boyunca azalmaktadır. Bu durumda, yüzeyde büyük basınç oluşmaktadır. Böylece, yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğru, yani yüzeyden tabana doğru bir düşey akım oluşur. Bu düşey akımın yaklaşım akımıyla girişimi sonucunda memba tarafında çevrıntiler oluşur. Bu çevrıntilere, planda oluşturdukları oyulma çukuru şekli nedeniyle at nalı çevrintisi denilir. Şekil 2.2’de at nalı çevrintisi gösterilmektedir. Ayak memba tarafından oluşan düşey akım bir jet etkisi yaparak tabana çarpar ve taban oyulmaya başlar. Ancak tabandan sökülen taneler at nalı çevrintileri vasıtasıyla akımla birlikte mansap yönüne taşınır. Bu taşınımın derecesi, doğal olarak yaklaşım akımının türbülans şiddetine, yani Reynolds sayısının mertebesine bağlıdır. At nalı çevrıntiler ayağın yanlarından geçerek ayak çapının birkaç katı kadar mesafe alırlar ve etkilerini kaybederler. Akım şartlarının normal olarak kontrol edilemeyeceği göz önüne alınır, ayak geometrisinin mümkün olduğu kadar akım iplikçiklerini bozmayacak şekilde seçilmesiyle at nalı çevrıntilerin etkisi azaltılır (Yanmaz, 2002).



Şekil 2.2 Bir köprü ayağı etrafındaki çevrıntiler ve oyulma çukuru (Yanmaz, 2002)

Ayağın mansap tarafında kayma gerilmesi gradyanlarından ötürü kuyruk çevrıntileri oluşur. Kuyruk çevrıntilerinin etki alanı ayrılma bölgesinin içinde kaldığından, bu etkiyi azaltmak için akım alanına uygun ayak geometrisi

seçilmelidir. Ayrılma bölgesi sınırı mansaba doğru belli bir mesafe ilerlediğinden kuyruk çevrintilerinin etki uzunluğu at nalı çevrintilerinkinden daha fazladır. Ancak at nalı çevrintilerinin şiddeti kuyruk çevrintilerinin şiddetinden daha fazla olduğu için maksimum oyulmalar ayağın memba yüzünde gerçekleşir. Bunun bir başka sebebi de memba yüzünden sökülen tanelerin bir kısmının düşen akım hızı nedeniyle ayağın mansap yönünde birikmesidir (Yanmaz, 2002).

Sağlam bir köprü temelini gerçekleştirmek için köprü ayaklarının neden olduğu oyulmalar bilinmelidir. Bir çok araştırmacıya göre, hidrolik yapılar etrafındaki oyulma derinliği yaklaşan akımın şiddetine bağlıdır. Oluşabilecek oyulmalar ‘temiz su oyulması’ ve ‘hareketli taban oyulması’ olarak ikiye ayrılmaktadır.

### **2.3 Temiz Su Oyulması**

Melville ve Chiew (1999), akım hızının kritik hızdan küçük ( $V < V_{kr}$ ) olması durumunda temiz su oyulması meydana geldiğini ve bu hızların birbirine eşit ( $V = V_{kr}$ ) olmaları durumunda ise maksimum denge oyulma derinliğinin oluştuğunu belirtmişlerdir.

Ayrıca Yanmaz (1989)’a göre akım koşulları tabanda kritik kayma gerilmesini aşan gerilmeler yaratmıyorsa membada sürüntü yükü hareketi başlamamıştır. Ancak ayak etrafında oluşan çevrintilerden dolayı köprü ayakları etrafında oyulma başlayabilir. Bu tür oyulmalara temiz su oyulması denilmektedir.

Oyulma derinliğinin dengeye ulaşma süresi, taban malzemesinin direncine ve akımın taşıma kapasitesine de bağlıdır. Bu yüzden temiz su oyulması zamana bağlıdır. Yanmaz ve Altınbilek (1991), temiz su oyulması ile ilgili yaptıkları deneysel çalışmalarda laboratuvar koşullarında uzun süreli deney yapmanın zorluklarından dolayı deney sürelerini altı saatle sınırlandırmışlardır. Ayrıca araştırmacılar, denge zamanının %33 ve %67’lik kısımlarında denge oyulma derinliklerinin %87 ve %95’lik kısmına ulaşıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca Melville ve Chiew (1999), birbirini takip eden 24 saatlik bir zaman diliminde oyulma

derinliklerindeki artış ayak çapının %5'ini geçmez ise bu süreyi denge oyulma süresi olarak alınabileceğini ifade etmişlerdir.

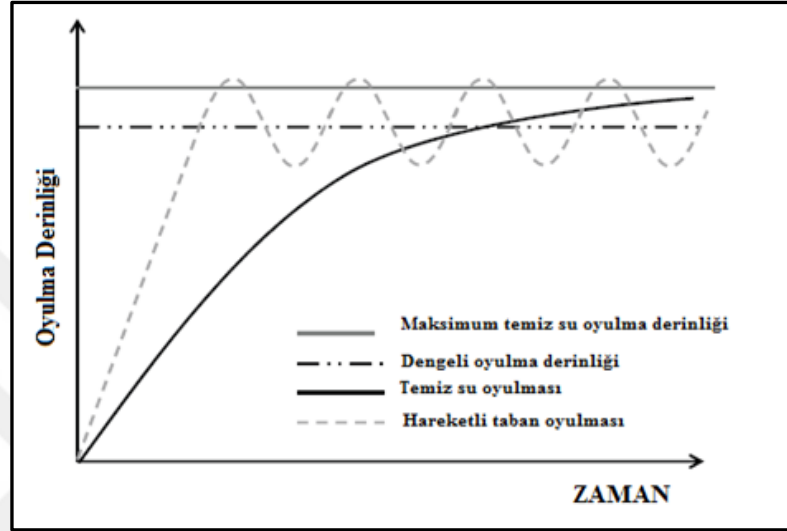
#### **2.4 Hareketli Taban Oyulması**

Melville ve Chiew (1999) , akım hızının kritik hızdan büyük ( $V > V_{kr}$ ) olması durumunda ise hareketli taban oyulması meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yanmaz (1989) 'göre Akım şiddeti arttığı zaman membadaki taban kayma gerilmesi taban malzemesinin karşı koyacağı kritik kayma gerilmesi değerini aşacaktır ve bunun sonucunda membadan itibaren akım yönünde sürüntü yükü hareketi olacaktır. Bu hareket sonunda, çevrinti etkisi ile oluşan oyulma çukurundaki akımla birleşecektir. Dolayısıyla oyulma çukurunun gelişimi sadece çukur içindeki akım özelliklerine değil, aynı zamanda membadaki akım koşullarına da bağlı olacaktır. Bu tip oyulmaya hareketli taban oyulması denilmektedir.

#### **2.5 Temiz Su Oyulması ve Hareketli Taban Oyulması Arasındaki Farklar**

Başlangıçta hızla artan oyulma derinliği ( $d_s$ ), zamanla daha yavaş gelişir. Hareketli taban oyulması durumunda membada taban şekillerinden ötürü direnç zamanla değişim gösterdiğinden, oyulma çukurundaki katı madde taşınımının miktarı membada oluşan ilave kayma gerilmesine bağlıdır. Temiz su oyulması durumunda ise belli bir denge seviyesine ulaşıldıktan sonra oyulma çukuru şevlerindeki katı madde taneleri ileri geri kısa salınımlar yapar; ancak taban kayma gerilmesi değeri yeterince fazla olmadığından bu taneler akımla birlikte hareket etmezler. Hareketli taban durumunda, oyulma derinliği kısa sürede maksimum değerine ulaşır. Daha sonra membada değişen taban direnç seviyesine göre katı madde debisinde artma ve azalma olacağından oyulma çukuru birbirini izleyen oyulma ve yığılma olaylarına maruz kalmaktadır. Bu nedenle, hareketli taban oyulması durumunda maksimum oyulma derinliğinden sonra artan ve azalan salınımlar görülmektedir. Temiz su oyulması durumunda ise akım şartları hareketli tabana göre daha sakin olduğundan oyulma derinliğinin zamansal değişimi daha yavaş gelişir. Membadan sürüntü yükü gelmediğinden oyulma derinliği değerlerinde bir salınım beklenmez. Oyulma

derinliği zamanla yavaş yavaş artarak dengeli bir derinliğe ( $d_{se}$ ) erişir. Köprü ayakları etrafındaki temiz su oyulması ortalama akım hızının kritik ortalama akım hızının yaklaşık yarısı değerine ulaştığında başlamaktadır (Yanmaz, 1989). Şekil 2.3'te oyulma derinliğinin zamana bağlı olarak temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması olarak değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Oyulma derinliğinin zamana bağlı olarak değişimi (Brandimarte ve diğer., 2012)

## 2.6 Oyulma Mekanizmasına Etki Eden Faktörler

Köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar, birden çok parametrenin yol açtığı karmaşık olaylardır ve bu sebepten etkili olan parametre sayısı oldukça fazladır. Ancak olayın karmaşıklığından dolayı yapılan çalışmalarda bazı parametreler ihmal edilmiştir.

Oyulma mekanizmasına etkiyen parametreler aşağıda verilmektedir (Yanmaz, 2002).

i) Akışkan parametreleri

$\rho$ : suyun yoğunluğu ( $ML^{-3}$ )

$\nu$ : suyun kinematik viskozitesi ( $L^2T^{-1}$ )

ii) Akım parametreleri

$g$  : yerçekimi ivmesi ( $LT^{-2}$ )

$V$  : ortalama yaklaşan akım hızı ( $LT^{-1}$ )

$y$  : yaklaşan akım derinliği ( $L$ )

$\theta$  : akım ve ayak eksenini arasındaki açı

$u_*$  : kayma hızı ( $LT^{-1}$ )

iii) Akarsu parametreleri

$S_0$  : taban eğimi

$B$  : akarsu genişliği ( $L$ )

$C_c$  : daralma katsayısı

$K_b$  : membada taban pürüzlülüğünü gösteren katsayı ( $L$ )

$K_\theta$  : yaklaşım akımıyla köprü eksenini arasındaki açının etki faktörü

$K_a$  : akarsu güzergâhı etkisini gösteren katsayı

$K_c$  : akarsu şevlerinin pürüzlülüğünü gösteren katsayı ( $L$ )

$K_G$  : akarsu en kesit etkisini gösteren katsayı

iv) Taban malzemesi parametreleri

$\rho_s$  : tane yoğunluğu ( $ML^{-3}$ )

$d_{50}$  : tane medyan çapı ( $L$ )

$\sigma_g$  : tane dağılımının geometrik standart sapması

$C$  : kohezyon katsayısı ( $ML^{-1}T^2$ )

$K_d$  : tane şekil faktör

v) Köprü ayağı parametreleri

$b$  : ayak genişliği ( $L$ )

$K_s$  : ayak şekli faktörü

$K_g$  : ayak grup etki faktörü

$K_r$  : ayak yüzeyi pürüzlülük faktörü

$K_v$  : ayak yüzeyiyle düşey açı arasındaki etkisi

vi) Zaman parametresi

$t$  : akım süresi (  $T$  )

Bu parametreler aşağıdaki gibi bir fonksiyon ile ifade edilebilir.

$$f \left( d_s, \rho, v, g, y, V, \theta, u_*, S_0, B, C_c, K_\theta, K_a, K_b, \right. \\ \left. K_c, K_G, \rho_s, d_{50}, \sigma_g, C, K_d, b, K_s, K_g, K_r, K_v, t \right) = 0 \quad (2.1)$$

$$f \left( l_s, \rho, v, g, y, V, \theta, u_*, S_0, B, C_c, K_\theta, K_a, K_b, \right. \\ \left. K_c, K_G, \rho_s, d_{50}, \sigma_g, C, K_d, b, K_s, K_g, K_r, K_v, t \right) = 0 \quad (2.2)$$

$$f \left( w_s, \rho, v, g, y, V, \theta, u_*, S_0, B, C_c, K_\theta, K_a, K_b, \right. \\ \left. K_c, K_G, \rho_s, d_{50}, \sigma_g, C, K_d, b, K_s, K_g, K_r, K_v, t \right) = 0 \quad (2.3)$$

burada  $d_s$  oyulma derinliği,  $l_s$  oyulma çukuru uzunluğu,  $w_s$  oyulma çukuru genişliğidir.

Buckingham  $\pi$  teoremi kullanılarak ve tekrar eden parametreler  $\rho, u_*, b$  seçildiğinde aşağıda verilen boyutsuz parametreler elde edilmektedir (Yanmaz, 2002).

$$\frac{d_s}{b} = f_1 \left( \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{Vd_{50}}{v}, \frac{V}{\sqrt{\Delta g d_{50}}}, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \frac{d_{50}}{B}, \frac{Vt}{b}, K_r, \frac{K_c}{d_{50}}, \frac{K_b}{d_{50}}, \frac{d_{50}}{b} \right) \\ \left( \frac{C}{\rho V^2}, \theta, S_0, C_c, K_a, K_\theta, K_G, \sigma_g, K_d, K_s, K_g, K_v \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{l_s}{b} = f_2 \left( \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{Vd_{50}}{v}, \frac{V}{\sqrt{\Delta g d_{50}}}, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \frac{d_{50}}{B}, \frac{Vt}{b}, K_r, \frac{K_c}{d_{50}}, \frac{K_b}{d_{50}}, \frac{d_{50}}{b} \right) \\ \left( \frac{C}{\rho V^2}, \theta, S_0, C_c, K_a, K_\theta, K_G, \sigma_g, K_d, K_s, K_g, K_v \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{w_s}{b} = f_3 \left( \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{Vd_{50}}{v}, \frac{V}{\sqrt{\Delta g d_{50}}}, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \frac{d_{50}}{B}, \frac{Vt}{b}, K_r, \frac{K_c}{d_{50}}, \frac{K_b}{d_{50}}, \frac{d_{50}}{b} \right) \\ \left( \frac{C}{\rho V^2}, \theta, S_0, C_c, K_a, K_\theta, K_G, \sigma_g, K_d, K_s, K_g, K_v \right) \quad (2.6)$$

Burada ;

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}, \quad Re = \frac{Vd_{50}}{\nu}, \quad F_d = \frac{V}{\sqrt{\Delta g d_{50}}}, \quad \Delta (\text{göreceli yoğunluk}) = (\rho_s - \rho) / \rho$$

Yerel oyulmalar için oluşturulabilecek en genel fonksiyon, tüm etkenler göz önüne alındığında yukarıda belirtilen parametrelerle anlatılabilir. Fakat ortam koşulları ve bazı kabuller göz önüne alınarak denklem sadeleştirilebilir. Sabit şekil faktörü ( $K_d=1$ ), taban malzemesinin kohezyonsuz olması ( $C=0$ ), kum için göreceli yoğunluğun sabit olması ( $\Delta=1,65$ ), akarsuyun yeterince geniş olması ( $C_c=1$ ), taban şekillerinin ihmal edilmesi ve taban pürüzlülüğünün sadece  $d_{50}$  cinsinden ifade edilmesi ( $K_b = K_c=1$ ), akarsuyun sabit taban eğimine sahip olması ( $S_0$ =sabit ve  $K_G=1$ ), ayağın tek olması, pürüzsüz olması ve tabana dik yerleştirilmiş olması ( $K_s=K_g=K_r=K_v=1$ ) gibi kabullerde bulunarak (2.4), (2.5) ve (2.6) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{d_s}{b} = f_4 \left( Fr, Re, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, \frac{Vt}{b}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{l_s}{b} = f_5 \left( Fr, Re, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, \frac{Vt}{b}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{w_s}{b} = f_6 \left( Fr, Re, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, \frac{Vt}{b}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.9)$$

Yüksek türbülanslı akımlarda sürtünmenin Reynolds sayısından bağımsız olması nedeniyle Reynolds sayısı etkin parametre olarak göz önüne alınmayabilir. Tane çapının ve taban eğiminin sabit olduğu durumlarda  $u_*/V$  oranı sadece yaklaşım akım derinliğine bağlı olacağı için bu parametre de fonksiyondan çıkarılabilir.

Zamanın etkisi de nihai oyulma derinliği hesaplanırken dikkate alınmayabilir ve böylece olaya etkin parametreler denklem 2.10, 2.11 ve 2.12'de verildiği gibi azaltılabilmektedir.



$$\frac{d_s}{b} = f_7 \left( F_r, \frac{y}{b}, F_d, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.10)$$

$$\frac{l_s}{b} = f_8 \left( F_r, \frac{y}{b}, F_d, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{w_s}{b} = f_9 \left( F_r, \frac{y}{b}, F_d, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.12)$$

## 2.7 Yaklaşan Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi

Oyulma çukurunun gelişimi sürecinde derinlik ve ayak geometrisi, göreceli olarak etkilidir. Sığ sularda oyulma derinliği tamamen yaklaşan akım derinliğine ( $y$ ) bağımlı olup, ayak genişliğinden ( $b$ ) bağımsız iken derin sularda ise bu durum tam tersi şekilde ifade edilebilir. Orta derinlikli sularda oyulma çukurunun derinliği, hem ayak geometrisi hem de akım derinliğinden etkilenir (Kandasamy, 1989). Melville (1997), yaptığı çalışmalar sonucu  $b/y < 0,7$  durumu için oyulma derinliğinin yaklaşan akım derinliğinden,  $b/y > 5$  durumu için ise ayak genişliğinden bağımsız olduğunu ileri sürmüştür.  $b/y > 3-4$  olduğu durumlarda da oyulma derinliğinin ayak genişliğinden bağımsız olduğunu kabul edenler olmuştur (Breusers, Nicollet ve Shen, 1977; Ettema, 1980; Raudkivi, 1986). Derin sularda yaklaşan akım derinliğinin oyulma derinliğinin gelişimi üzerine etkisinin kaybolmasını Yanmaz (2002), ayağın memba yüzünde su yüzeyinden tabana dik doğrultuda hareket eden akımın etkisinin azalması ile açıklamıştır.

Ayak genişliği kadar ayak şeklinin de oyulma gelişimi sürecinde etkili olduğu gözlenmiştir. Laboratuarda yapılan deneyler sonucu, ayakların memba ucu sivrildikçe akımın daha az oyulmaya yol açtığını gözlenmiştir. Örnek vermek gerekirse, dairesel silindirik ayaklar karesel ayaklardan daha az oyulurken sivri uçlu ayaklar dairesel silindirik ayaklardan daha az oyulur.

## 2.8 Yaklaşan Akım Hızının Etkisi

Yaklaşan akım hızının kritik hıza oranı, akım şiddeti ( $V / V_c$ ) olarak ifade edilir. Melville (1997) ve Yanmaz (2002)'in belirttiği üzere  $V / V_c \leq 1$  olduğu durumlarda tabanda malzeme sürüklenmesi gerçekleşmez ve yaklaşan akımın tüm gücü, köprü ayağı etrafındaki oyulma gelişimine harcanır.  $V / V_c > 1$  olduğu durumlarda ise tabanda malzeme sürüklenmesi gerçekleşir ve köprü ayağı etrafında oyulma meydana gelirken akım gücünün bir kısmı da malzeme sürüklenmesi için harcanır. Laboratuvar çalışmaları göstermiştir ki temiz su koşullarına ayak etrafındaki oyulma, yaklaşan akım hızı orantılı olarak gelişmektedir. Fakat  $V / V_c > 1$  durumunda akım gücünün bir kısmı malzeme sürüklenmesine harcanacağından ve sürüklenen taban malzemesinin bir kısmı oyulma çukuruna taşınacağından hareketli taban koşullarında temiz su koşullarına göre köprü ayağı etrafında daha az oyulma gerçekleşecektir (Yanmaz, 2002). Köprü ayağı etrafındaki yerel oyulmanın başlaması için,  $V / V_c$  değerinin bir eşik değerine erişmesi gerekir. Örneğin Breusers, Nicollet ve Shen (1977) bu değeri 0,5 önermişken, Lai, Chang ve Yen (2009) ise 0,4 olarak vermişlerdir.

## 2.9 Taban Malzemesi Özelliklerinin Etkisi

Tabanda kullanılan malzeme özellikleri, kohezyonlu-kohezyonsuz, üniform olup olmaması ve malzemenin çapı gibi alt başlıklar altında toplanabilir. Malzeme çapının oyulma gelişimine olan etkisi köprü ayağı genişliğine olan oranına bağlıdır.

Bu orana göreceli tane çapı denir. Göreceli tane çapı ( $b/d_{50}$ ) arttıkça oyulma derinliği de artar ancak bir noktadan sonra tane çapının oyulma derinliğine etki etmez. Ettema (1980) bu noktadaki değeri  $b/d_{50} = 50$ , Melville (1997),  $b/d_{50} = 25$  olarak önermiştir. Malzemenin üniform olup olmadığı geometrik standart sapma  $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$  bağıntısı ile hesaplanır.  $\sigma_g < 1,4$  olan malzemeler üniform; 1,4'ten büyük olan malzemeler üniform olmayan malzeme olarak sınıflandırılırlar. Üniform olmayan malzemelerde, malzeme sürüklenmesi ince tanelerde başlar ve en son kalın tanelere sürüklenir. Kalın taneleri sürükleyebilecek hızda bir akım yoksa kalın

malzemeler ayak tabanında bir zırhlanma bölgesi oluşturur ve ayağı oyulmaya karşı korur.

## 2.10 Zamanın Yerel Oyulmaya Etkisi

Temiz su oyulması durumunda dengeli oyulma derinliğine çok geç ulaşılır. Bunun başlıca nedeni , böyle bir durumun oyulma çukuru içindeki ortalama kayma gerilmesi, su ağırlık kuvveti etkisi ve türbülans gerilmelerinin birlikte bir denge yaratmasının sağlanmasıdır (Yanmaz, 2002). Dairesel kesitli köprü ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamansal değişimi için, oyulmanın boyutsuz büyüklükler cinsinden bazı araştırmacıların yaptıkları deneylerin sonucunda regresyon ifadeleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\frac{d_s}{d_{se}} = 0,12 \ln\left(\frac{t}{t_e}\right) + 1,0 \quad (\text{Yanmaz, 1989}) \quad (2.13)$$

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp\left(-0,03 \left| \frac{u_c}{u} \ln\left(\frac{t}{t_e}\right) \right| \right) \quad (\text{Melville ve Chiew, 1999}) \quad (2.14)$$

Burada;

$d_s$  = t anında köprü ayaklarındaki oyulma derinliği

$d_{se}$  = Köprü ayaklarındaki dengeli oyulma derinliği

$t_e$  = Dengeli oyulma derinliğine erişme süresi

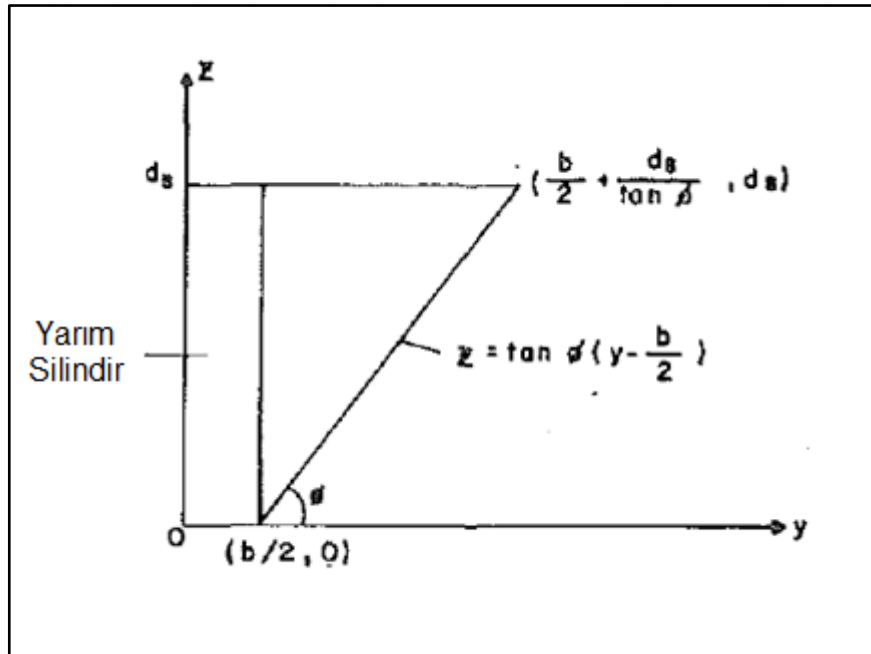
Raudkivi, (1986) temiz su koşullarında dengeli oyuma derinliğine ulaşmak için yaklaşık 50 saatlik bir sürenin gerekli olduğunu belirtmektedir. Froude benzeşimi kullanıldığında 50 saatlik bir sürenin doğada çok daha büyük akım süresine karşı geldiği anlaşılmıştır. Böyle bir sürenin oluşması fiziksel koşullar altında zordur. Bu nedenle, köprü ayağı temel derinliğinin temiz su koşulları için tayin edilmesinde dengeli derinlik yerine makul bir tasarım süresinde ulaşılacak oyulma derinliğinin kullanılması daha gerçekçi ve ekonomik olacaktır. Bunun için temiz su

oyulması durumunda oyulma derinliğinin zamanla değişimi bilinmelidir (Yanmaz,1989).

## 2.11 Literatürde Verilen Bağlıntılar

### 2.11.1 Yanmaz ve Altınbilek (1991)

Çalışmalarını temiz su oyulması koşullarında 6,7 , 5,7 ve 4,7 cm çapında dairesel köprü ayağı ve 6,7 , 5,7 ve 4,7 cm kenar uzunluğunda kare köprü ayağı olarak iki farklı tipteki köprü ayakları için deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Köprü ayağı şeklinin oyulma çukuru üzerindeki gelişimini test etmişlerdir. Deneyler sonucunda vermiş oldukları bağıntılarda kullanılmak üzere Şekil 2.4'te verilen oyulma çukurunun geometrik tanımı gösterilmektedir. Kenar açıları her deney için belirlemişlerdir. Dairesel ve kare ayaklar etrafında oluşan oyulma çukuru ortalama açısını danenin yığılma açısı olan  $\phi' = 33^\circ$  olarak elde etmişlerdir. Bu açının kuvars kumunun yığılma açısına yakın olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.4 Dairesel ayak için oyulma çukurunun geometrik tanımı (Yanmaz ve Altınbilek ,1991)

Bu tez kapsamında dairesel köprü ayakları incelendiği için sadece dairesel ayaklar için olan bağıntılar verilecektir. Şekil 2.4 yardımıyla dairesel ayak etrafındaki oyulma çukuru ifadesi elde edilebilmektedir.

$$V = \pi \int_0^{d_s} y^2 dz - \pi \left(\frac{b}{2}\right)^2 d_s \quad (2.15)$$

ve entegre edilirse,

$$V = \frac{\pi}{3 \tan \phi} \left( \frac{d_s^3}{\tan \phi} + \frac{3d_s^2 b}{2} \right) \quad (2.16)$$

elde edilir. Burada;

$d_s$  : Maksimum oyulma derinliği [L];

$b$  : Köprü ayağının çapı [L];

$\phi$  : Danenin yığılma açısı;

$V$  : Dairesel ayaklar etrafında oluşan oyulma çukurunun hacmi [ $L^3$ ];

### 2.11.2 Khwairakpam ve diğer. (2012)

Khwairakpam ve diğer. (2012) deneylerini temiz su oyulması koşullarında ve  $D=50$  mm çaplı dairesel köprü ayağı kullanarak 10 m uzunluğunda, 0,81 m genişliğinde ve 0,60 m derinliğinde bir kanalda gerçekleştirmişlerdir.

#### 2.11.2.1 Oyulma Çukurunun Uzunluğu ve Genişliği

$$L_s = (3,958(h/b) - 2,371) D_s + (-2,649(h/b) + 5,082) \quad (2.17)$$

$$W_s = (6,204(h/b) - 5,412) D_s + (-4,435(h/b) + 7,597) \quad (2.18)$$

### 2.11.2.2 Oyulma Çukuru Hacmi

$$\Psi_s = (-1,520 (h/b) + 3,661) e^{(1,568(h/b) - 0,716) D_s} \quad (2.19)$$

Burada;

$\Psi_s$  = Göreceli oyulma hacmi ( $\Psi_s / \Psi_p$ )

$\Psi_s$  = Oyulma çukuru hacmi [ $L^3$ ];

$\Psi_p$  = Oyulma çukuru içindeki ayak hacmi [ $L^3$ ];

$h$  = Yaklaşım akım derinliği [ $L$ ];

$b$  = Köprü ayağı çapı [ $L$ ];

$d_s$  = Oyulma derinliği [ $L$ ];

$D_s$  = Göreceli oyulma derinliği ( $d_s / b$ );

$L_s$  = Göreceli oyulma uzunluğu ( $l_s / b$ );

$W_s$  = Göreceli oyulma genişliği ( $w_s / b$ );

### 2.11.3 Das ve diğer. (2014)

Das ve diğer. (2014) çalışmalarında dört farklı tipte köprü ayağı kullanmış olup, literatüre aşağıdaki denklemleri vermişlerdir.

#### 2.11.3.1 Oyulma Çukurunun Uzunluğu

$$l_s / b_c = 5,065 (d_s / b_c) \quad (2.20)$$

#### 2.11.3.2 Oyulma Çukurunun Genişliği

$$w_s / b_c = 5,576 (d_s / b_c) \quad (2.21)$$

#### 2.11.3.3 Oyulma Çukuru Hacmi

$$\Psi_s / \Psi_c = 0,161 \exp (2,461 (d_s / b_c)) \quad (2.22)$$

Burada;

$b$  = ayak veya plaka genişliği [ $L$ ];

$b_c$  =  $(beK_s)$  karakteristik ayak veya plaka genişliği [ $L$ ];

$K_s$  = Şekil faktörü olup dairesel ayak için  $K_s=1$ ;

$b_e$  = efektif ayak veya plaka genişliği [ $L$ ];

$d_s$  = maksimum oyulma derinliği [ $L$ ];

$h$  = yaklaşım akım derinliği [ $L$ ];

$w_s$  = maksimum oyulma genişliği [ $L$ ];

$l_s$  = maksimum oyulma uzunluğu [ $L$ ];

$v_s$  = oyulma çukuru hacmi [ $L^3$ ];

$v_c$  =  $(ha_c)$  su seviyesinin altında kalan karakteristik köprü ayak hacmi [ $L^3$ ];

$a_c$  =  $(\pi b_c^2/4)$  köprü ayağının karakteristik en kesit alanı [ $L^2$ ];

simgelemektedir.

## BÖLÜM ÜÇ

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Deney Düzeneği

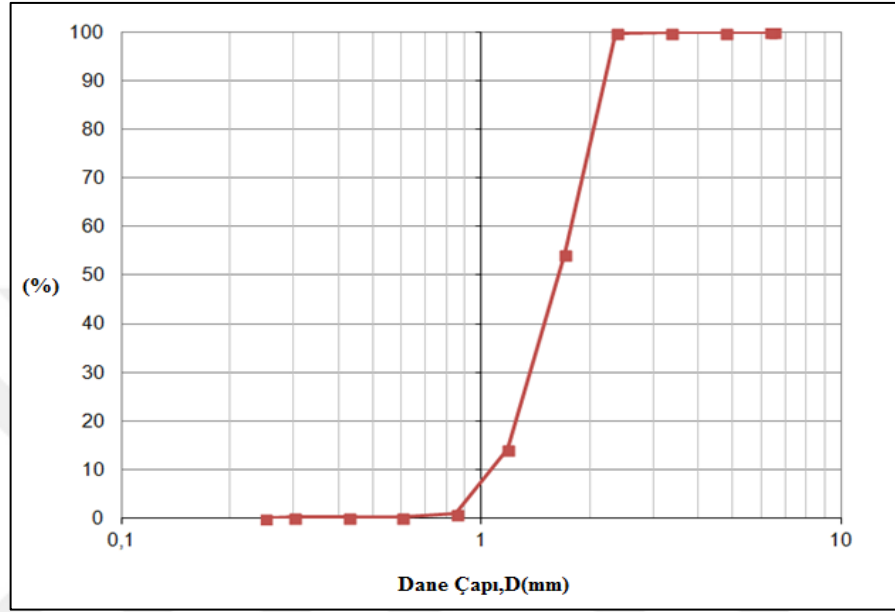
Deneysel çalışmalar, Dokuz Eylül Üniversitesi Hidrolik Laboratuvar'ında TÜBİTAK 106M274 nolu proje kapsamında inşa edilmiş kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanalın uzunluğu 18,6 m, genişliği 80 cm, derinliği 75 cm dir. Kanalın 7. ve 13. metreleri arasında 25 cm kalınlığında üniform taban malzemesi konulmuştur. Kanalın ilk 6 metresi ve son 5 metresinde kanal tabanına öncelikle 20 cm yüksekliğinde gaz beton döşenmiş ve üzerine 5 cm kalınlığında üniform taban malzemesi serilmiştir. Şekil 3.1'de deney düzeneğinin genel görünümü gösterilmektedir.



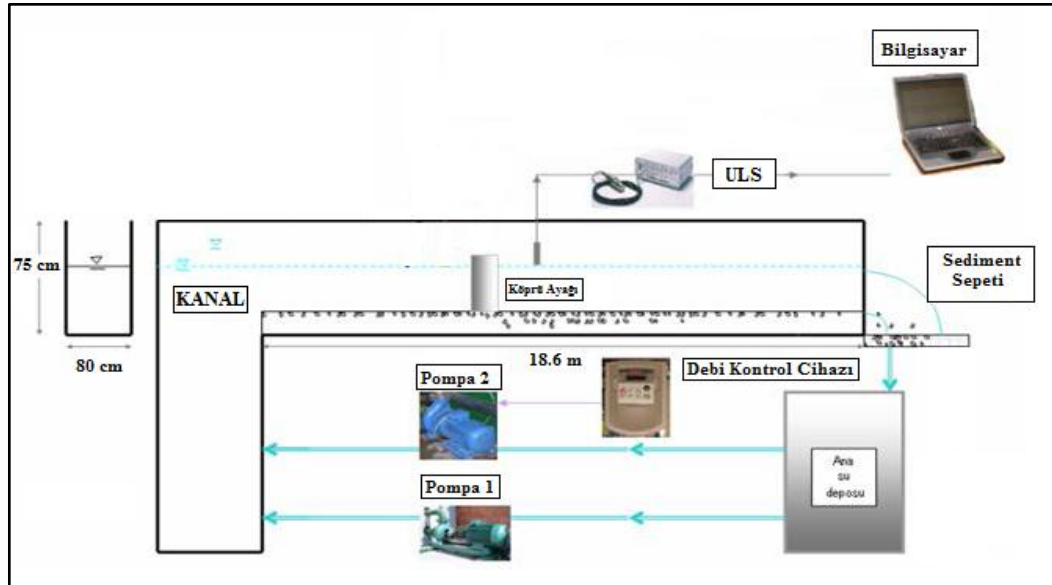
Şekil 3.1 Deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 3.2'de deneylerde kullanılan üniform taban malzemesinin granülometri eğrisi görülmektedir. Kullanılan malzemenin ortalama medyan çapı ( $d_{50}$ ) 1,633 mm olup, geometrik standart sapması ise ( $\sigma_g$ ) 1,303'tür. Şekil 3.3'te deney düzeneğinin şematik gösterimi ve deneyler sırasında kullanılan ölçüm cihazları gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Taban malzemesinin granülometrik eğrisi



Şekil 3.3 Deney düzeneği ve araçlar (TÜBİTAK 109M637 Nihai Rapor, 2012)

Akım kanal membasına maksimum debisi 100 l/s olan bir pompa ile iletilmektedir. Hız kontrol cihazı, bir bilgisayar programı aracılığı ile pompa devir sayısını istenilen sabit değere ulaştırmaktadır (Şekil 3.4). Kanalın mansabına ulaşan akım, buradan 27 m<sup>3</sup> hacimli bir hazneye savaklanmaktadır ve devridaim ile yeniden kanala aktarılmaktadır.



Şekil 3.4 a) Pompa, b) hız kontrol cihazı

Deneyle sırasında debi ölçümü Krohne firması tarafından üretilen ve besleme hattı üzerine yerleştirilen OPTIFLUX 1000 elektromanyetik debimetre ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Elektromanyetik debimetre

Yaklaşan akım derinliğini ölçmek için, Şekil 3.6'da gösterilen ULS (Ultrasonic Level Sensor) cihazı kullanılmıştır. Hidrolik laboratuvarında cihazın 4 adet algılayıcısı bulunup eş zamanlı olarak 4 farklı kesitten akım derinliği ölçümlerini kayıt altına alınabilmektedir. Cihazın hassasiyeti  $\pm 1$  mm dir.



Şekil 3.6 ULS cihazı

Yaklaşım akım hızı, ölçülen debi ve yaklaşım akım derinlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Deneylerin sonunda lazer metre yardımıyla köprü ayağı çevresinde oluşan oyulma çukuru geometrisi çıkarılmıştır. Ölçümler x ekseninde (kanal boykesiti) iki santimetrede bir ve y ekseninde (kanal enkesiti) beş santimetrede bir olmak üzere ölçümler alınmıştır.

### 3.2 Deneysel Bulgular

Deneyleler, çapları 8, 11, 15, 20 cm olan dairesel kesitli kopru ayakları ve üniform taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylelerin her biri 7 saat surmş olup, deneylelerin koşulları Tablo 3.1’de verilmektedir. Deney sonunda ölçülen oyulma derinliği, oyulma çukuru uzunluğu, genişliği ve hesaplanan oyulma çukuru hacmi Tablo 3.2’de verilmiştir.

Melville ve Sutherland (1988), kritik hızaın ( $V_c$ ) aşağıda verilen denklem ile hesaplanmasını önermişlerdir.

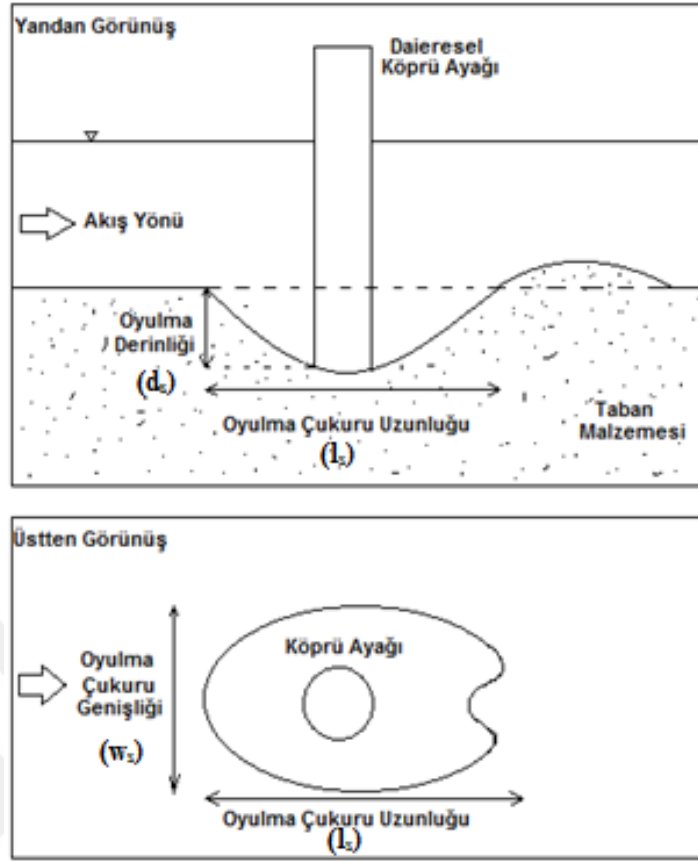
$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5,75 \log \left( 5,53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (3.1)$$

Kritik kayma hızaı ( $u_{*c}$ ) aşağıdaki verilen denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir (Melville (1997)). Bu denklemlerde  $d_{50}$  değeri mm biriminde alındığında  $u_{*c}$  m/s biriminde elde edilmektedir.

$$u_{*c} = 0,0115 + 0,0125d_{50}^{1,4} \quad ; \quad 0,1 \text{ mm} < d_{50} < 1 \text{ mm} \quad (3.2)$$

$$u_{*c} = 0,0305d_{50}^{0,5} - 0,0065d_{50}^{-1} \quad ; \quad 1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ mm} \quad (3.3)$$

şekil 3.7’de oyulma çukurunun şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.7 Oyulma çukurunun şematik gösterimi

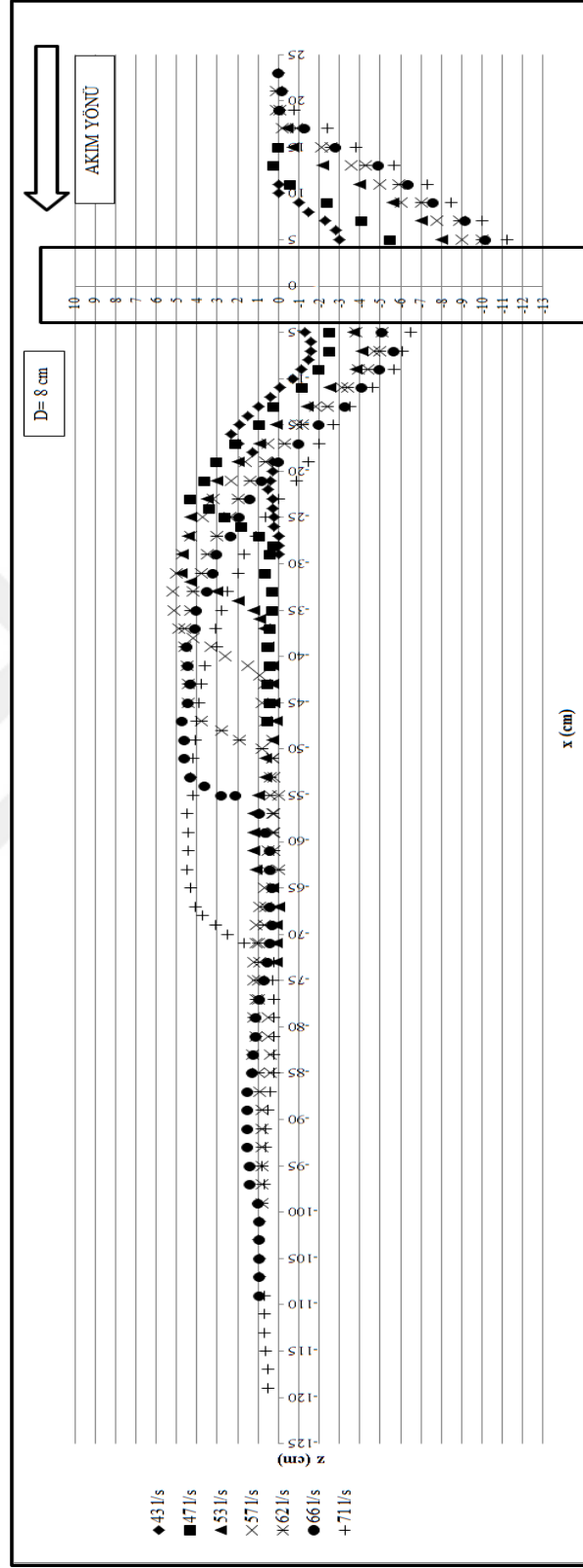
Tablo 3.1 Deneilerin koşulları (debi (Q), yaklaşım akım derinliği (y), köprü ayağı çapları (b), hesaplanan akım şiddeti ( $V/V_c$ ), Froude sayısı değerleri (Fr))

Deney No	b(cm)	Q(l/s)	y(cm)	$V/V_c$	Fr
D-8-1	8	43	19,50	0,49	0,20
D-8-2	8	47	20,20	0,51	0,21
D-8-3	8	53	20,70	0,56	0,22
D-8-4	8	57	21,30	0,58	0,23
D-8-5	8	62	22,30	0,60	0,23
D-8-6	8	66	22,70	0,63	0,24
D-8-7	8	71	23,40	0,65	0,25
D-11-1	11	43	19,50	0,49	0,20
D-11-2	11	47	20,20	0,51	0,21
D-11-3	11	53	20,70	0,56	0,22
D-11-4	11	57	21,30	0,58	0,23
D-11-5	11	62	22,30	0,60	0,23
D-11-6	11	66	22,70	0,63	0,24
D-11-7	11	71	23,40	0,65	0,25
D-15-1	15	43	19,50	0,49	0,20
D-15-2	15	47	20,20	0,51	0,21
D-15-3	15	53	20,70	0,56	0,22
D-15-4	15	57	21,30	0,58	0,23
D-15-5	15	62	22,30	0,60	0,23
D-15-6	15	66	22,70	0,63	0,24
D-15-7	15	71	23,40	0,65	0,25
D-20-1	20	43	19,50	0,49	0,20
D-20-2	20	47	20,20	0,51	0,21
D-20-3	20	53	20,70	0,56	0,22
D-20-4	20	57	21,30	0,58	0,23
D-20-5	20	62	22,30	0,60	0,23
D-20-6	20	66	22,70	0,63	0,24
D-20-7	20	71	23,40	0,65	0,25

Tablo 3.2 Deneyler sonunda ölçülen oyulma çukuru özellikleri ( n i h a i oyulma derinliği değerleri ( $d_s$ ), oyulma çukurunun hacmi ( $\Psi$ ), oyulma çukuru genişliği ( $w_s$ ) ve uzunlukları ( $l_s$ ))

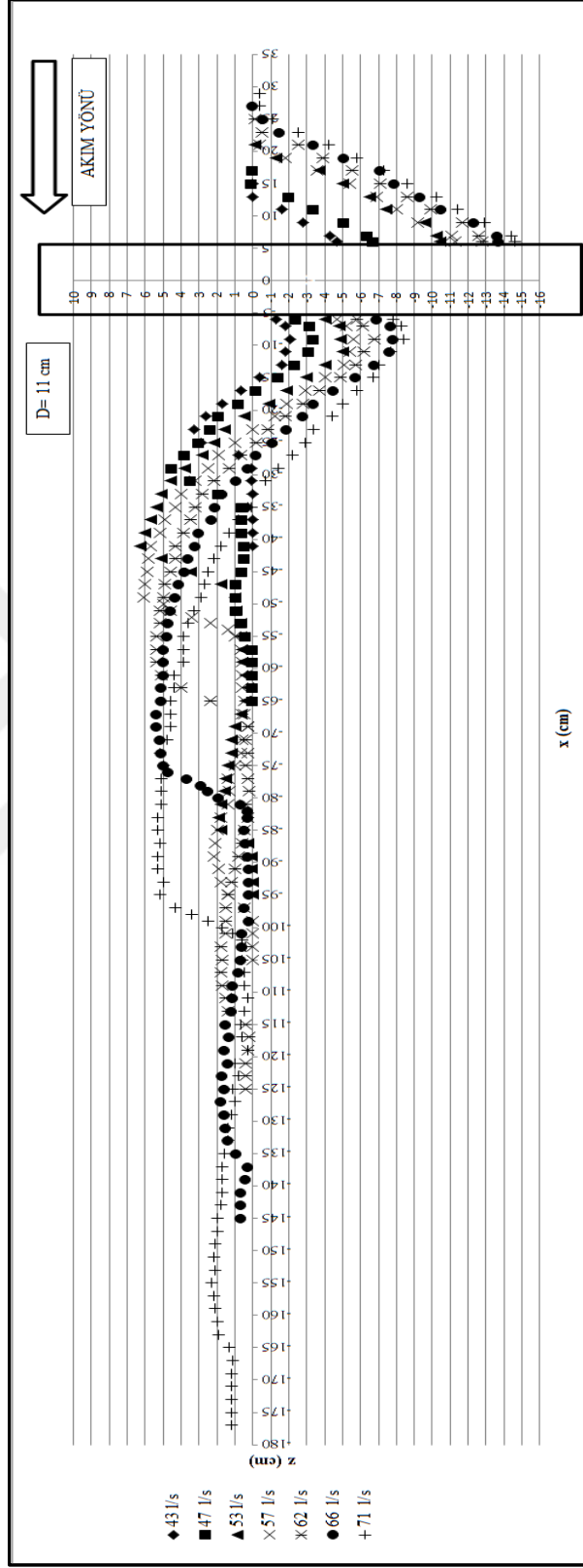
Deney No	$d_s$ (cm)	$l_s$ (cm)	$w_s$ (cm)	$\Psi$ (cm <sup>3</sup> )
D-8-1	3,00	21	29,80	173,56
D-8-2	5,50	26	29,60	664,22
D-8-3	8,00	32	29,60	1553,31
D-8-4	9,00	34	33,60	2674,39
D-8-5	10,00	38	39,40	5571,06
D-8-6	10,20	38	39,80	5365,91
D-8-7	11,20	46	40,00	7073,01
D-11-1	4,70	28	31,00	590,04
D-11-2	6,70	32	30,00	1344,90
D-11-3	10,40	42	47,80	3364,78
D-11-4	11,30	44	44,40	4651,27
D-11-5	12,80	50	50,80	7372,02
D-11-6	13,70	54	59,20	10138,80
D-11-7	14,60	60	53,00	15721,23
D-15-1	4,40	36	33,60	701,25
D-15-2	6,80	42	44,20	2169,93
D-15-3	11,90	52	48,60	6905,75
D-15-4	13,30	58	56,60	7775,07
D-15-5	15,90	68	62,00	15579,21
D-15-6	16,60	70	62,20	22329,12
D-15-7	18,40	84	69,40	26596,91
D-20-1	7,20	44	51,60	2551,91
D-20-2	8,70	52	54,60	3894,75
D-20-3	10,20	58	61,00	9951,24
D-20-4	13,80	70	69,00	15444,34
D-20-5	16,10	76	71,40	28393,91
D-20-6	19,20	88	79,00	31081,73
D-20-7	20,60	96	79,20	42944,73

Şekil 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 ve Şekil 3.12’de bu tez kapsamında yapılan tüm deneyler sonucunda ölçülen boykesitler ve enkesitler sırasıyla gösterilmektedir.

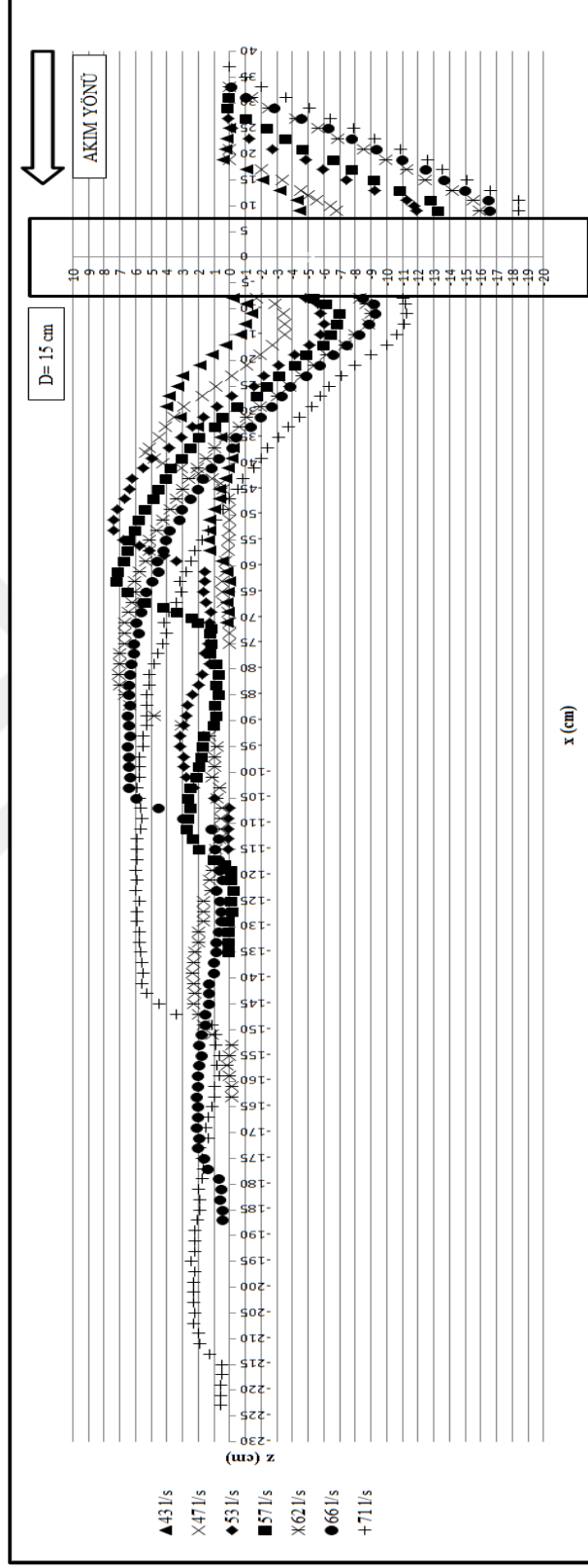


Şekil 3.8 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler,  $D=8$  cm

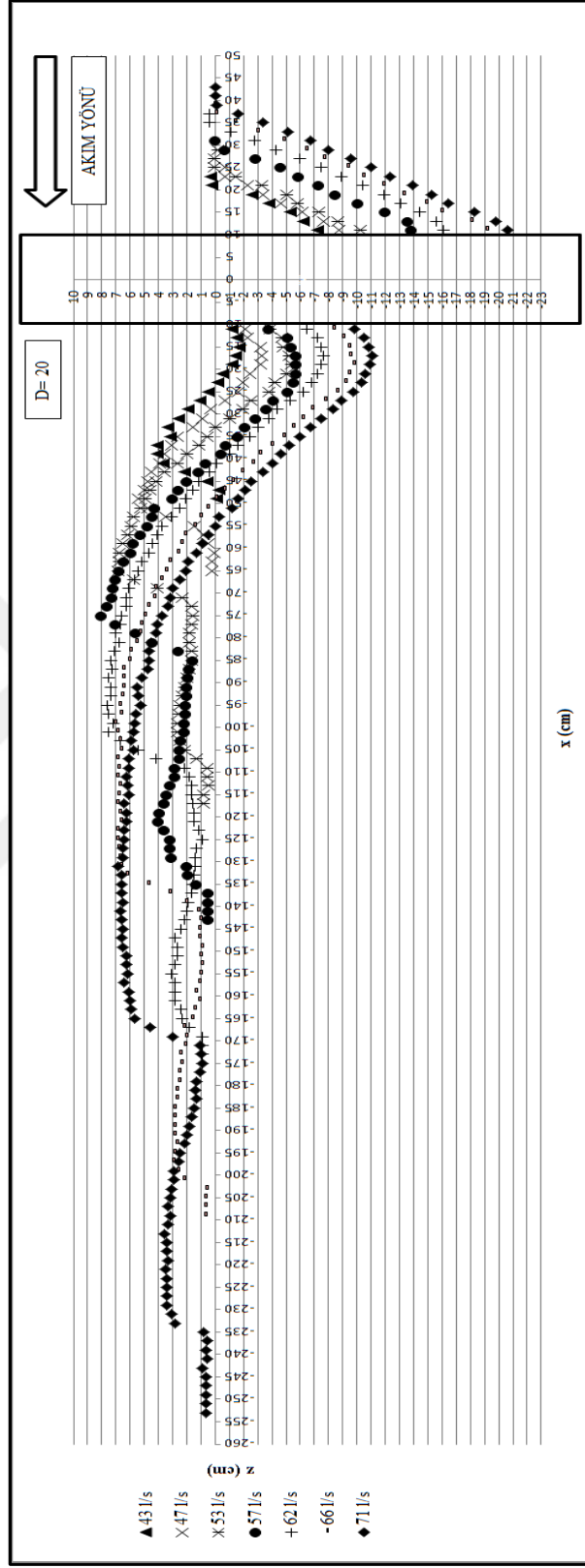




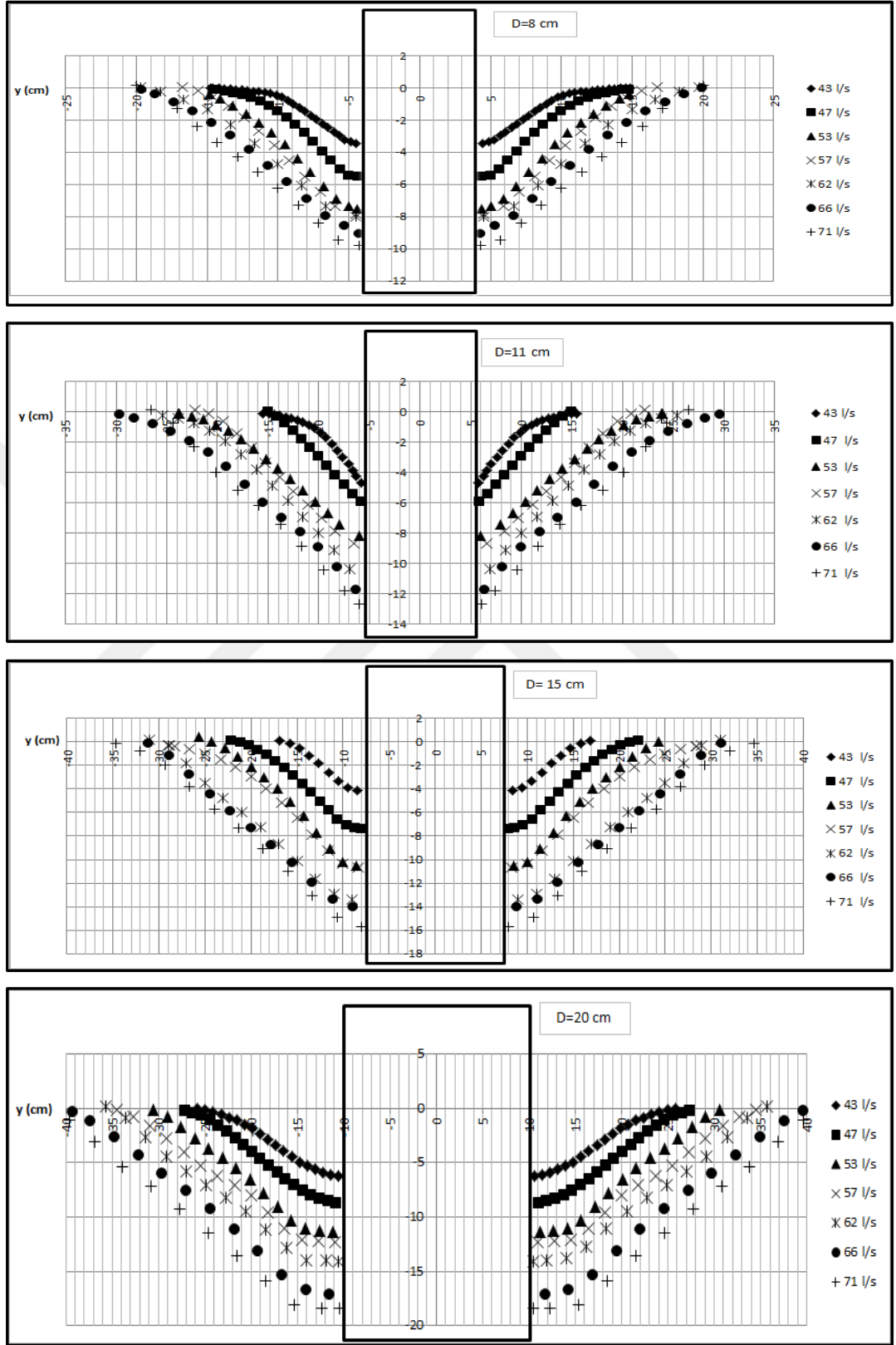
Şekil 3.9 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler, D=11 cm



Şekil 3.10 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler,  $D=15$  cm

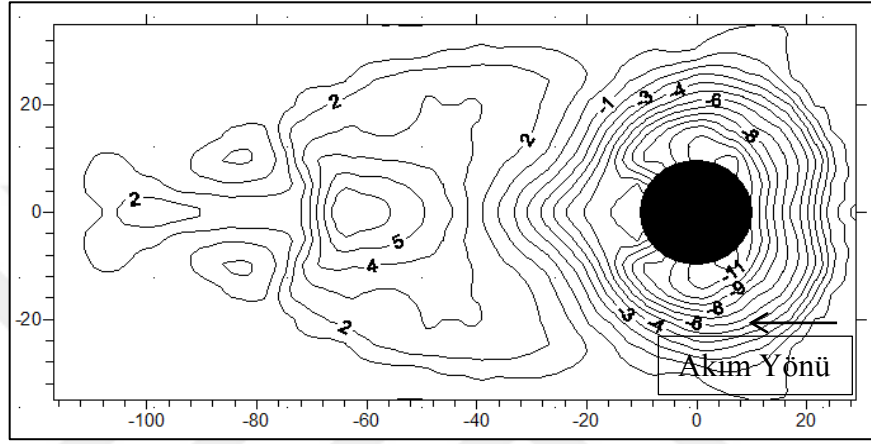


Şekil 3.11 Kanal ekseninde akım boyunca ölçülen boykesitler,  $D=20$  cm

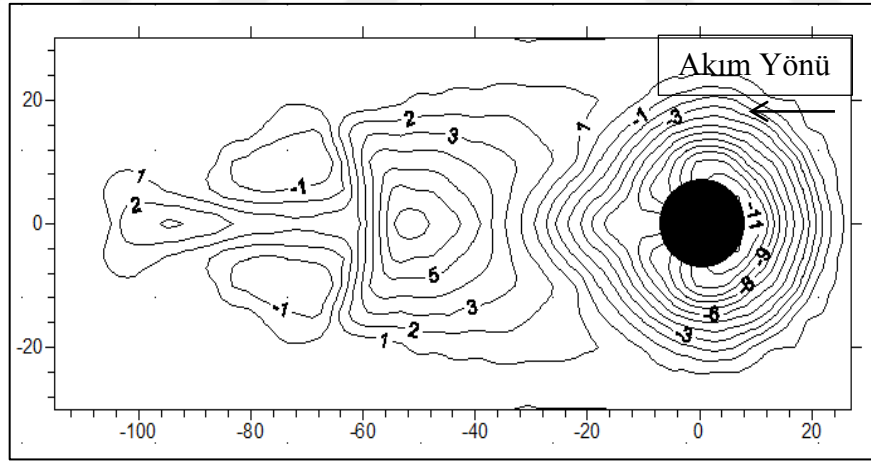


Şekil 3.12 Köprü ayağı etrafında ölçülen enkesitler

Oyulma çukuru uzunluğu ( $l_s$ ), genişliği ( $w_s$ ) ve hacmi ( $\Psi$ ) Golden software Surfer-8 programı yardımıyla hesaplanmıştır. Örnek olarak D-20-3, D-15-3, D-11-3 ve D-8-3 deneyleri için oyulma çukurunun eşyüksekti eğrileri Şekil 3.13 (a), 3.13 (b), 3.13 (c) ve 3.13 (d)'de gösterilmektedir. Diğer deneylere ait sonuçlar ekte verilmektedir.

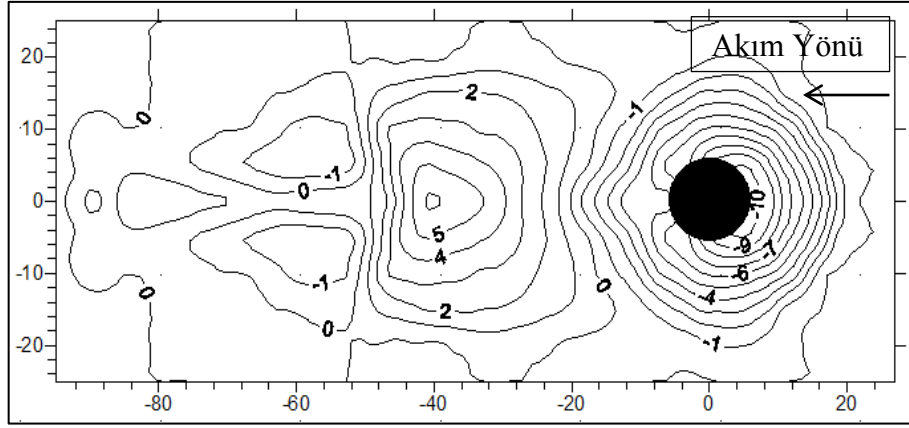


(a)

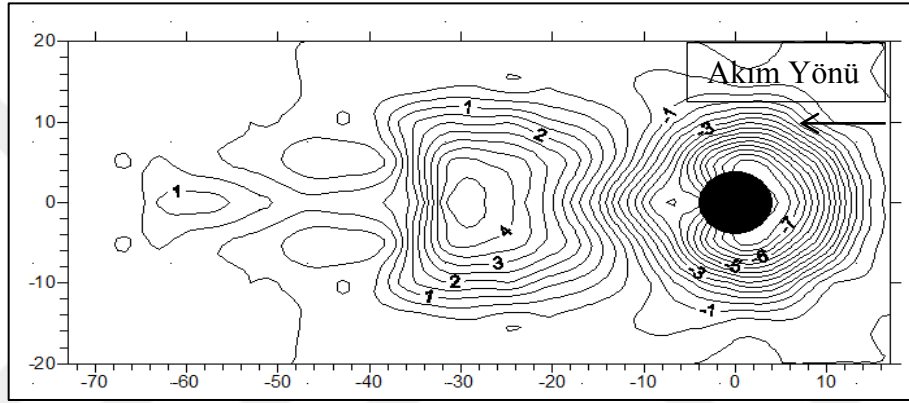


(b)

Şekil 3.13 Oyulma çukurunun eşyüksekti eğrileri ile gösterilmesi (a) D-20-3, (b) D-15-3, (c) D-11-3, (d) D-8-3 (birimler: cm)



(c)



(d)

Şekil 3.13 Oyulma çukurunun eşyüksekti eğrileri ile gösterilmesi (a) D-20-3, (b) D-15-3, (c) D-11-3, (d) D-8-3 (birimler: cm) (devamı)

D-20-3, D-15-3, D-11-3 ve D-8-3 nolu deneyler sonrasında çekilen fotoğraflar, Şekil 3.14 (a) , 3.14 (b) , 3.14 (c) ve 3.14 (d)'de verilmektedir.

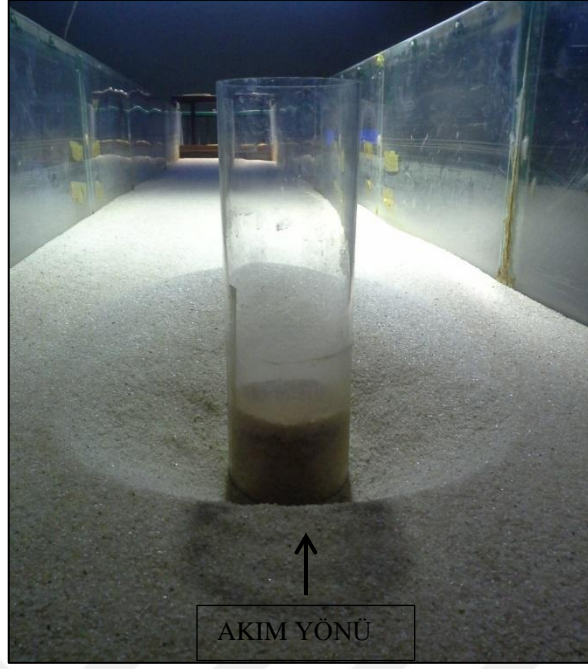


(a)



(b)

Şekil 3.14 Deneyler sonrasında köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar (a) D-20-3, (b) D-15-3, (c) D-11-3, (d) D-8-3



(c)



(d)

Şekil 3.14 Deneyler sonrasında köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar (a) D-20-3, (b) D-15-3, (c) D-11-3, (d) D-8-3 (devamı)



## BÖLÜM DÖRT

### DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 4.1 Regresyon Analizi

Korelasyon katsayısı ( $r$ ) iki parametrenin birlikte değişebilirliğinin bir ölçüsüdür. Korelasyon katsayısı dikkate alınarak gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda ise iki değişken arasındaki ilişki ortaya çıkarılmaktadır.  $r > 0$  ise iki değişken arasında aynı yönde doğrusal bir ilişki,  $r < 0$  ise de değişkenler arasında ters yönlü bir ilişki söz konusudur.

$R^2$  (Determinasyon Katsayısı) korelasyon katsayısının ( $r$ ) karesi olup varyans karşılama oranı olarak adlandırılmaktadır. Başka bir deyişle regresyon denklemi ile bulunan değer, bu değişkenin gerçek değerini (ölçülen değeri) hangi oranda yansıttığını göstermektedir. 4.1 nolu denklemde korelasyon katsayısının ( $r$ ) ifadesi verilmektedir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{nS_x S_y} \quad (4.1)$$

$x_i$  = Ölçülen değer

$\bar{x}$  = Ölçülen değerlerin ortalaması

$y_i$  = Regresyon denklemi sonucunda hesaplanan değer

$\bar{y}$  = Regresyon denklemi sonucunda hesaplanan değerlerin ortalaması

$n$  = Veri sayısı

$S_x, S_y$  = x ve y değerlerinin standart sapmasıdır.

## 4.2 Saçılma İndisi

Ölçülen ve hesaplanan değerlerin ideal ilişkisi olan  $r=1$  doğrusu etrafındaki salınımların yüzdesel değeri saçılma indisi (SI) olarak tanımlanmaktadır. Saçılma indisi,

$$SI(\%) = \frac{RMSE}{x} \cdot 100 \quad (4.2)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir.

## 4.3 Önerilen Bağıntılar

Bu tez kapsamında yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak , aşağıda verilen oyulma çukuru uzunluğunu ( $l_s$ ), oyulma çukuru genişliğini ( $w_s$ ) ve oyulma çukuru hacmini ( $V$ ) tahmin eden bağıntılar regresyon analizi sonunda elde edilmiştir.

$$l_s = 4,4 \left( \frac{d_s}{b} \right)^{0,64} b \quad (4.3)$$

$$w_s = 4,1 \left( \frac{d_s}{b} \right)^{0,48} b \quad (4.4)$$

$$\frac{V}{b^3} = 1,08 \left( \frac{d_s}{b} \right)^{2,02} (F_d)^{1,85} \quad (4.5)$$

Burada;

$$F_d = \text{Densimetrik Froude sayısı} = (V/(\Delta_g d_{50})^{0.5})$$

$$\Delta g = [(\rho_s - \rho)/\rho] g \quad [LT^{-2}];$$

$$\rho = \text{Suyun yoğunluğu} \quad [ML^{-3}];$$

$$\rho_s = \text{Taban malzemesi yoğunluğu} \quad [ML^{-3}];$$

$$g = \text{Yer çekimi ivmesi} \quad [LT^{-2}];$$

Bu bağıntılar ortalama hata karelerinin toplamını (Root mean squared error-RMSE) minimum yapacak katsayılar kullanılarak elde edilmiştir. RMSE değeri;

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ölçülen,i} - x_{hesaplanan,i})^2}{n}} \quad (4.6)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bu denklemde; n veri sayısını,  $x_{ölçülen,i}$  deney sonucunda ölçülen değeri,  $x_{hesaplanan,i}$  ise önerilen bağıntılar kullanılarak hesaplanan değeri simgelemektedir.

Bu tez kapsamında önerilen denklemler diğer araştırmacıların deneysel verileri ve sonuçları ile de kıyaslanmıştır. Tablo 4.1’de diğer araştırmacılara ait deneysel veriler ve sonuçlar gösterilmektedir. Bu tabloda verilen köprü ayağı çapı değerleri (b), oyulma derinliği değerleri ( $d_s$ ), ölçülen oyulma çukurunun genişliği ( $w_s$ ) ve oyulma çukuru uzunlukları ( $l_s$ ) verilmektedir.

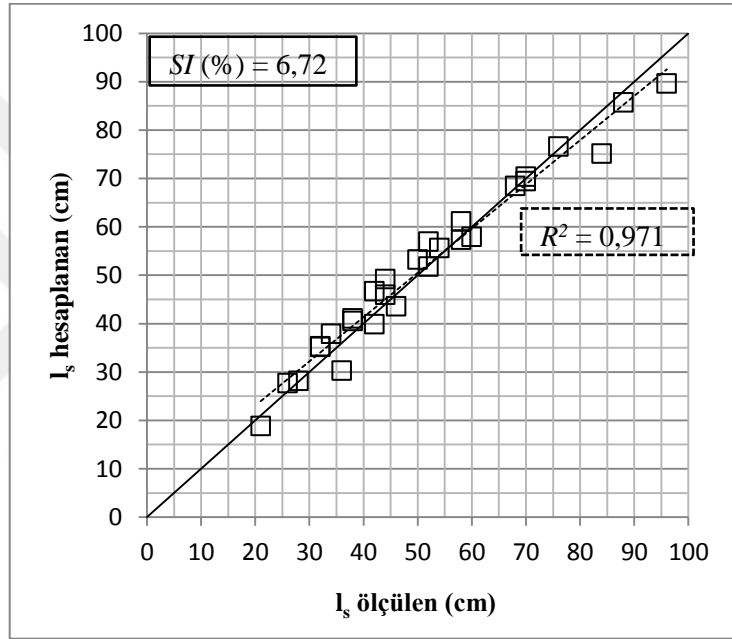
Tablo 4.1 Literatürde verilen deneyler

Deney No*	b (cm)	d <sub>s</sub> (cm)	w <sub>s</sub> (cm)	l <sub>s</sub> (cm)
A1	3,00	5,05	21,60	20,25
A2	3,00	5,44	27,80	23,25
A3	10,08	12,27	56,40	50,40
A4	8,89	10,83	49,00	42,67
A5	7,94	10,55	47,80	42,08
A6	6,99	5,68	31,60	32,15
A7	8,89	10,95	50,40	43,56
A8	7,94	10,04	46,80	41,29
A9	6,99	8,81	43,20	37,75
A10	10,08	11,09	50,60	45,36
A11	7,94	9,37	45,80	38,11
A12	6,99	9,32	46,10	39,14
A13	8,89	8,66	43,20	41,78
A14	6,99	8,11	40,60	32,85
A15	7,94	9,94	47,60	40,49
A16	6,99	9,42	45,20	38,45
B1	11,00	9,20	53,00	46,00
B2	15,56	11,20	60,00	58,00
B3	12,70	9,60	49,00	48,00
B4	11,01	8,20	48,00	42,00
C1	2,00	2,47	2,47	10,40
C2	2,00	1,93	1,93	8,24
C3	3,00	4,43	4,43	18,82
C4	3,00	2,67	2,67	12,65
C5	4,50	5,50	5,50	19,85

\* (A1-A16) D'Alessandro (2013), (B1-B4) Das ve diğer. (2014), (C1-C5) Hodi (2009) ait deneysel verilerdir.

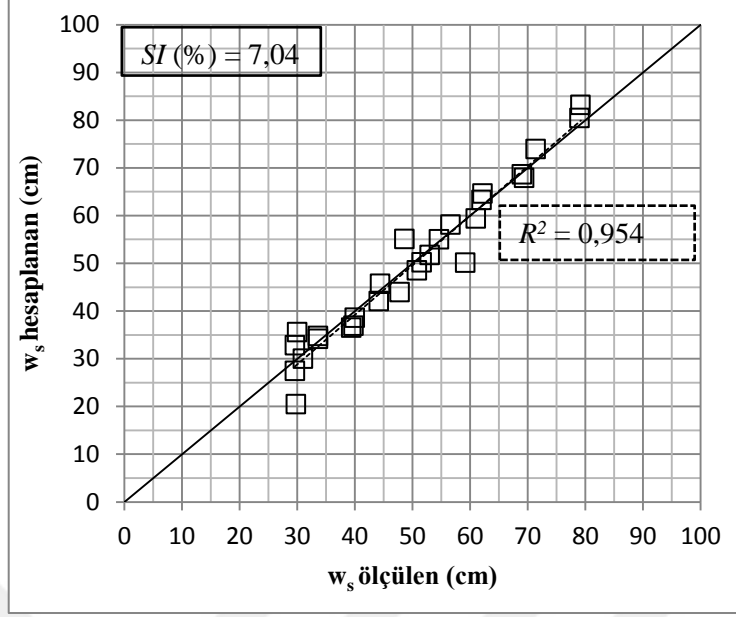
#### 4.4 Önerilen Bağntı Sonuçlarının Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu tez kapsamında verilen tüm grafikler üzerinde  $R^2$  ve  $SI$  (%) gösterilmektedir. Bu grafiklerde düz çizgi  $45^\circ$  doğrusunu, kesikli çizgi ise veriler kullanılarak elde edilen regresyon doğrusunu simgelemektedir. Şekil 4.1’de deneyler sonunda ölçülen oyulma çukuru uzunlukları ( $l_s$ ) ile 4.3 nolu bağntı kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru uzunlukları ( $l_s$ ) görülmektedir.



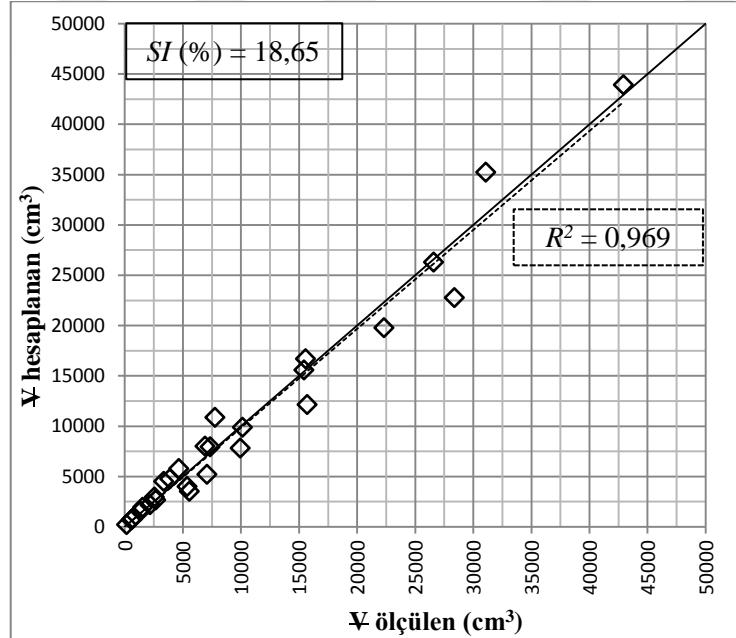
Şekil 4.1 Hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru uzunlukları,  $l_s$

Şekil 4.2’de deneyler sonunda ölçülen oyulma çukuru genişlikleri ( $w_s$ ) ile 4.4 nolu bağntı kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru genişlikleri ( $w_s$ ) görülmektedir.



Şekil 4.2 Hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru genişlikleri,  $w_s$

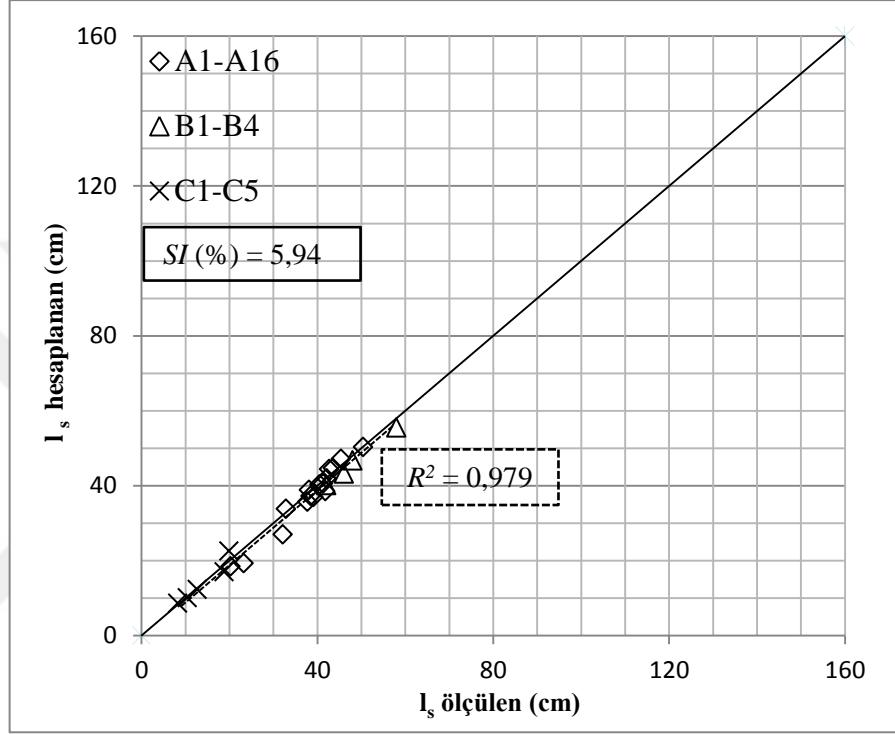
Şekil 4.3'te deneyler sonunda elde edilen oyulma çukuru hacimleri ( $\Psi$ ) ile 4.5 nolu bağıntı kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru hacimleri( $\Psi$ ) görülmektedir.



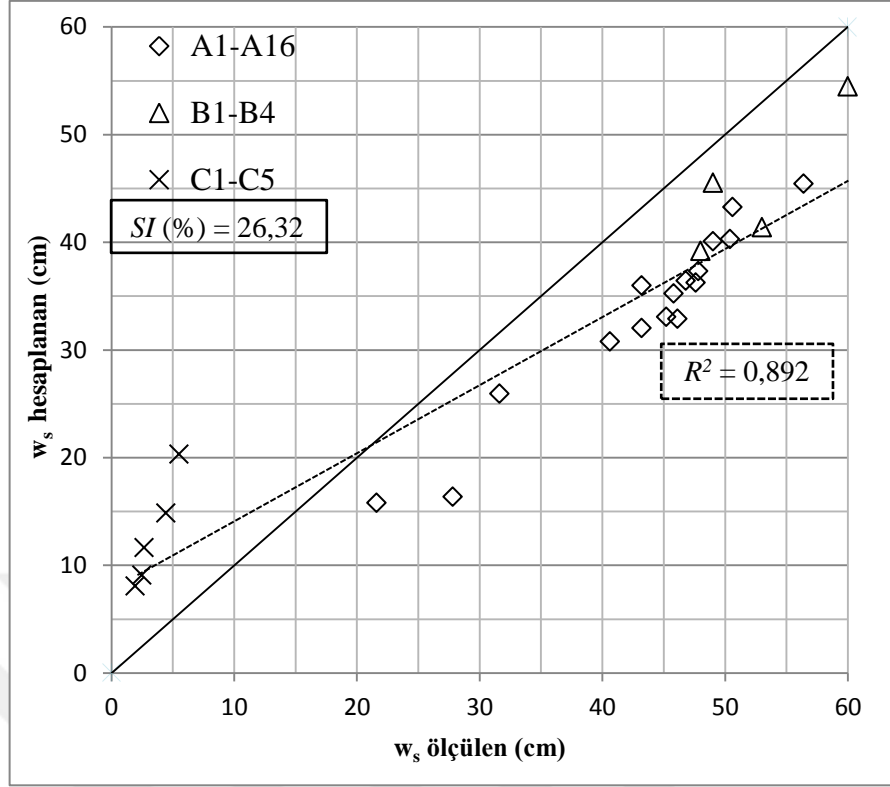
Şekil 4.3 Hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru hacimleri,  $\Psi$

#### 4.5 Önerilen Bağntı Sonuçlarının Literatürde Mevcut Diğer Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

Şekil 4.4 ve 4.5'te Tablo 4.1'de verilen literatürde mevcut diğer deney sonuçları ile bu tez kapsamında önerilen bağntılar ile hesaplanan değerler verilmektedir.



Şekil 4.4 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru uzunlukları, I<sub>s</sub>



Şekil 4.5 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru genişlikleri,  $w_s$

Tablo 4.2’de literatürde mevcut olan deneylere ait köprü ayağı çapları değerleri (b), oyulma derinliği değerleri ( $d_s$ ), oyulma çukurunun hacmi ( $\nabla$ ) verilmektedir.

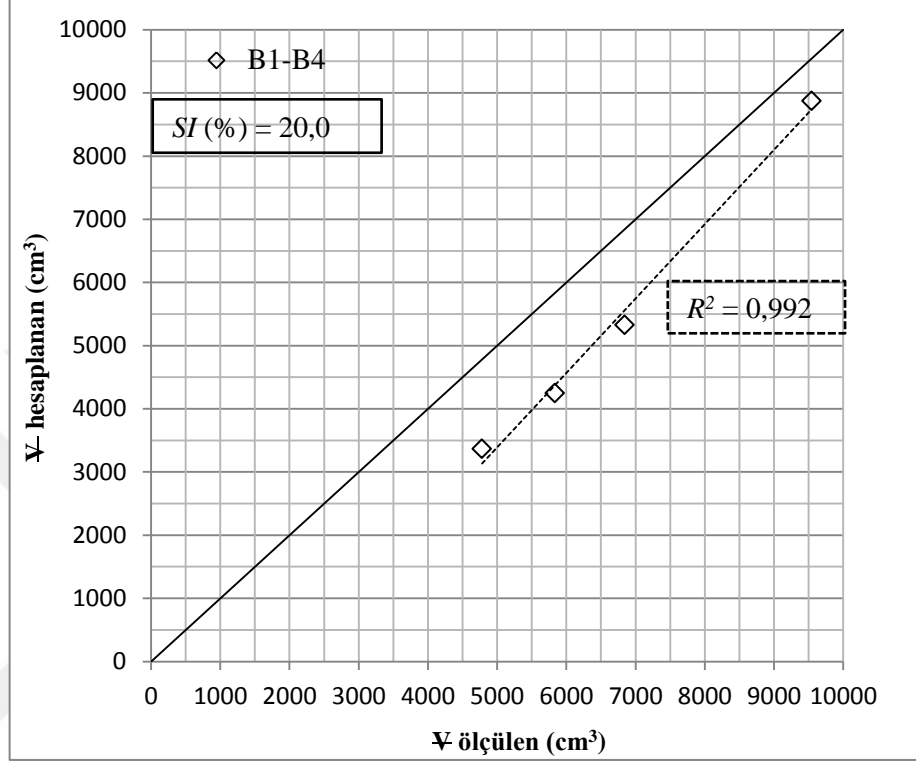
Tablo 4.2 Literatürde mevcut deneysel veriler

Deney No*	b (cm)	$d_s$ (cm)	$\nabla$ (cm <sup>3</sup> )
B1	11,00	9,20	5835
B2	15,56	11,20	9545
B3	12,70	9,60	6842
B4	11,01	8,20	4780

\*(B1-B4) Das ve diğer. (2014) ait deneysel verilerdir.



Şekil 4.6’da Tablo 4.2’de verilen literatürde mevcut diğer deney sonuçları ile bu tez kapsamında önerilen bağıntı ile hesaplanan oyulma çukuru hacim değerleri görülmektedir.



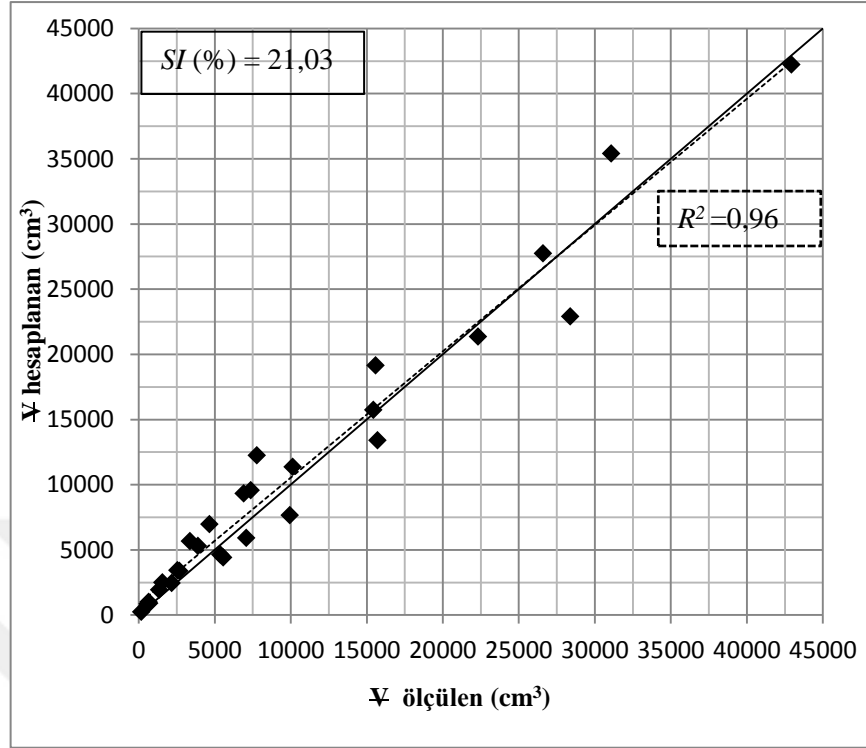
Şekil 4.6 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru hacimleri,  $\Psi$

#### 4.6 Literatürde Verilen Denklemler ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bu tez kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar, (2.11) nolu bölümde bahsedilen ve diğer araştırmacılar tarafından önerilen bağıntılar yardımıyla hesaplanan değerler ile kıyaslanmıştır.

##### 4.6.1 Yanmaz ve Altınbilek (1991)

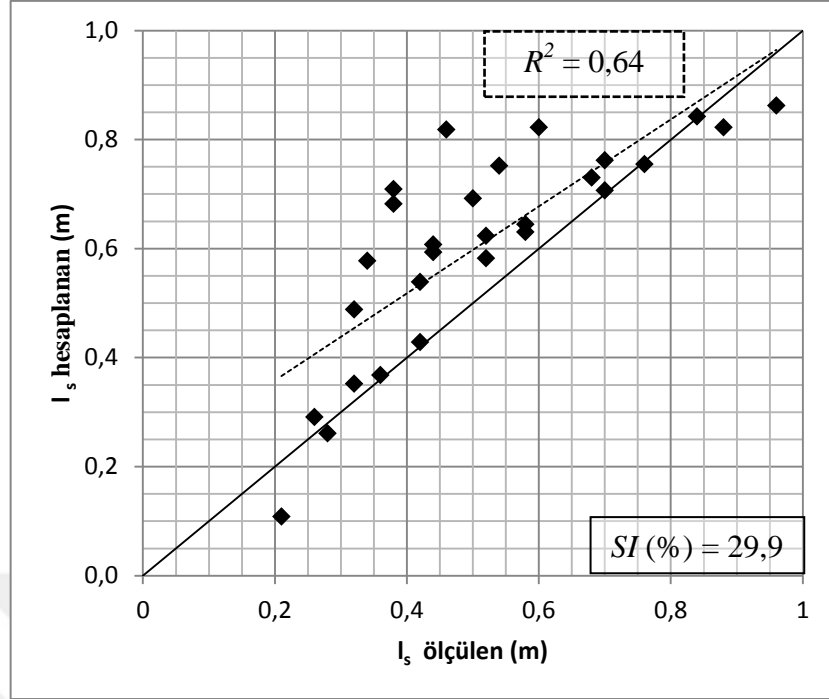
Deneysel sonucunda elde edilen hacim değerleri Yanmaz ve Altınbilek (1991) tarafından verilen (2.16) nolu denklem kullanılarak hesaplanan hacim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.7’de ölçülen ve hesaplanan hacim değerleri verilmektedir.



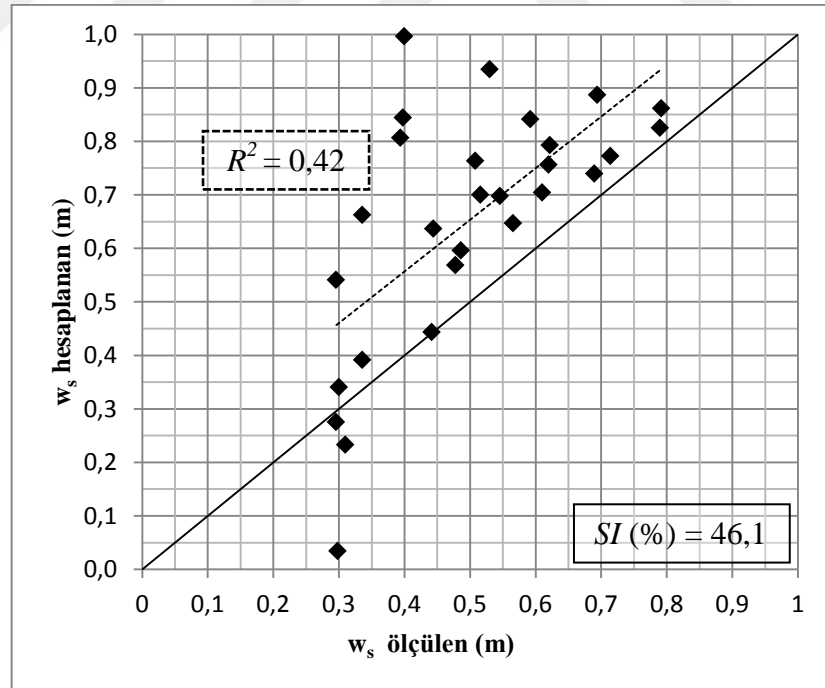
Şekil 4.7 (2.16) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen hacim değerleri

#### 4.6.2 Khwairakpam ve diğer.(2012)

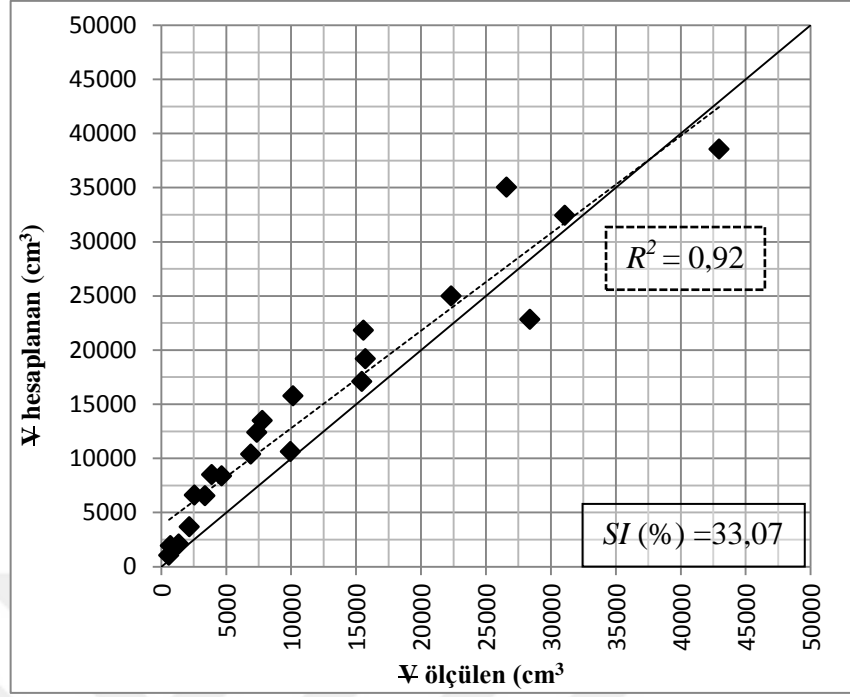
Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel sonuçlar (2.17) , (2.18) ve (2.19) bağıntıları kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da sırasıyla ölçülen ve hesaplanan oyulma uzunlukları ( $l_s$ ) , oyulma genişlikleri ( $w_s$ ) ve oyulma çukuru hacimleri ( $V$ ) gösterilmektedir.



Şekil 4.8 (2.17) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru uzunlukları



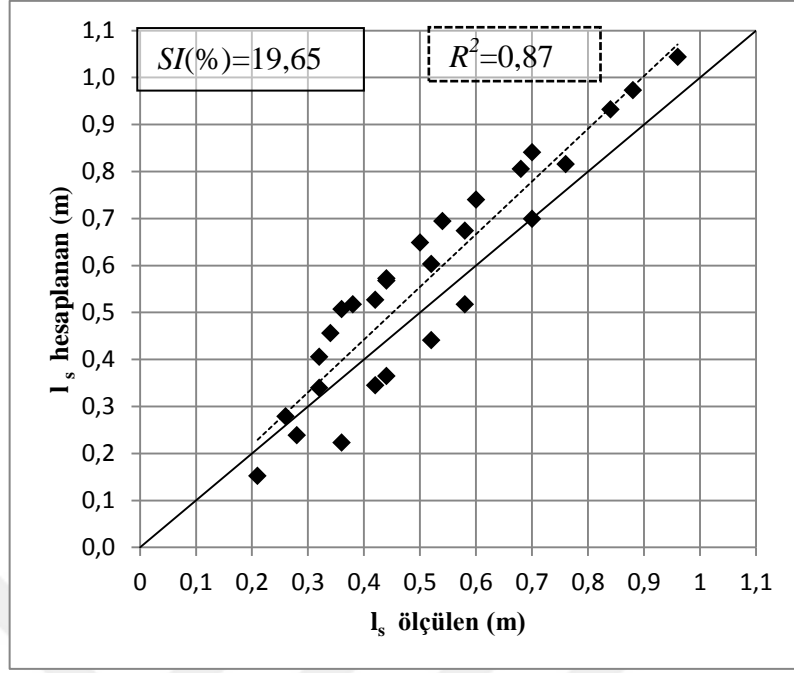
Şekil 4.9 (2.18) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru genişlikleri



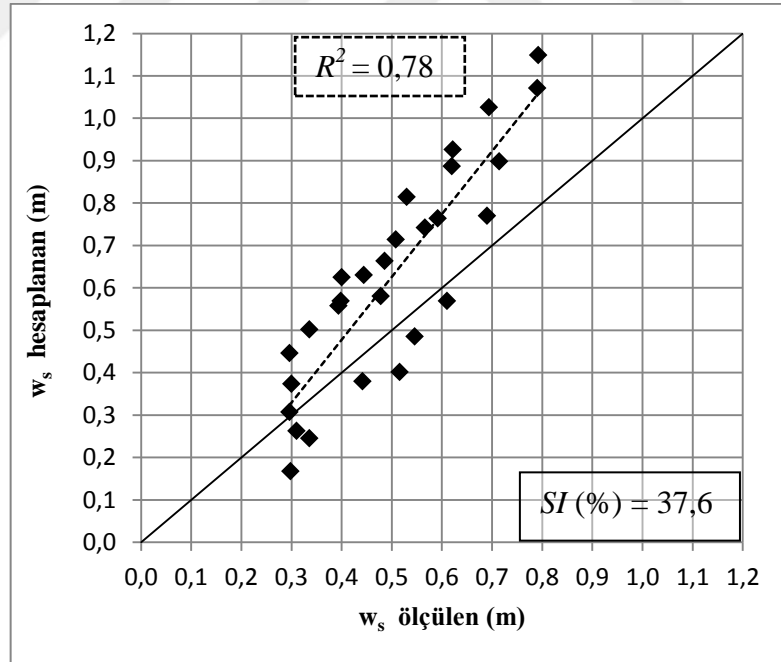
Şekil 4.10 (2.19) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru hacimleri

#### 4.6.3 Das ve diğer.(2014)

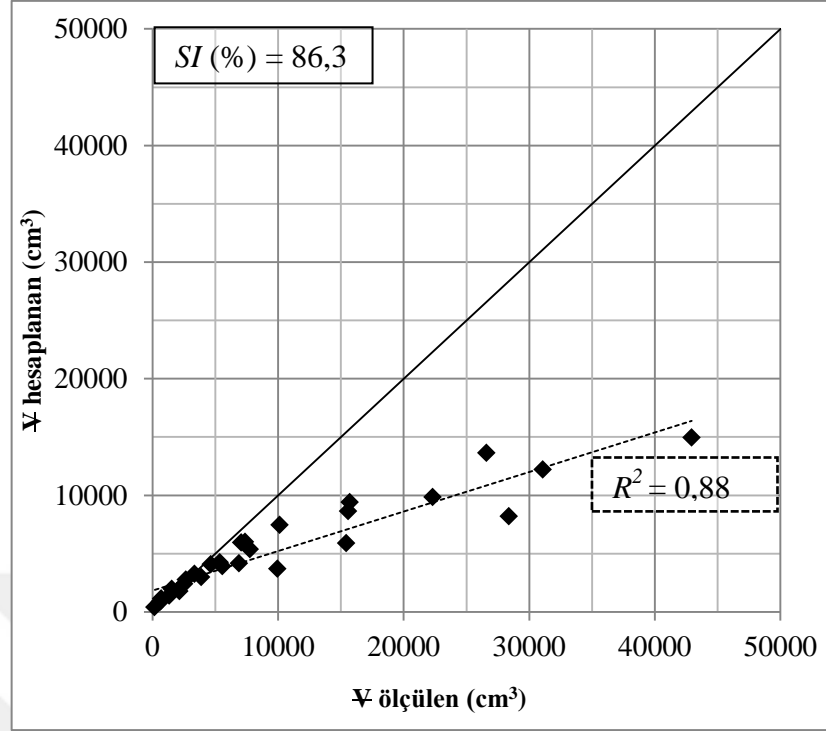
Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel sonuçlar (2.20) , (2.21) ve (2.22) bağıntıları kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te sırasıyla ölçülen ve hesaplanan oyulma uzunlukları ( $l_s$ ) , oyulma genişlikleri ( $w_s$ ) ve oyulma çukuru hacimleri ( $V$ ) gösterilmektedir.



Şekil 4.11 (2.20) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru uzunlukları



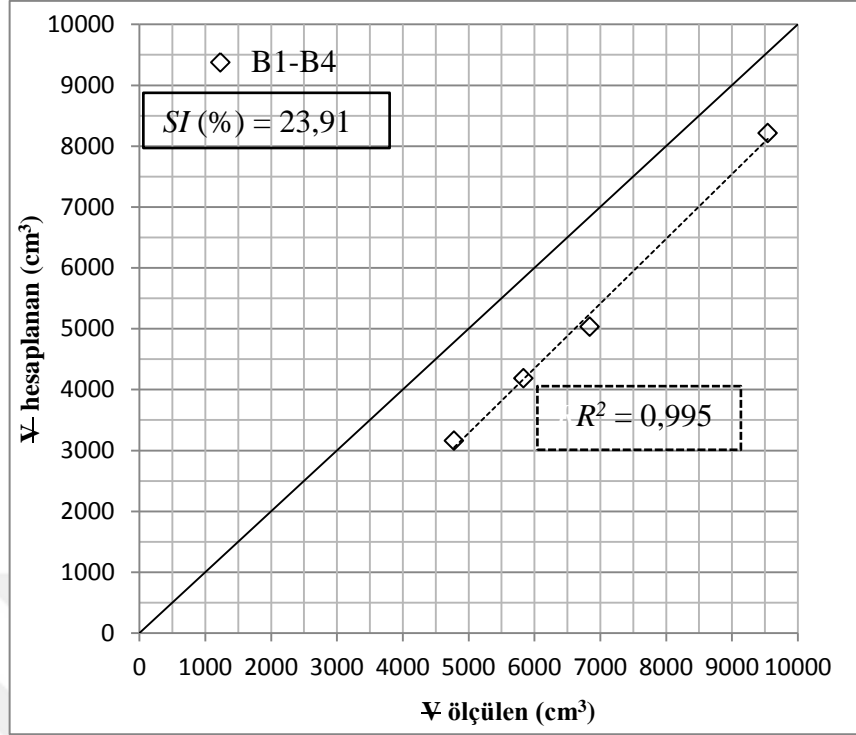
Şekil 4.12 (2.21) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru genişlikleri



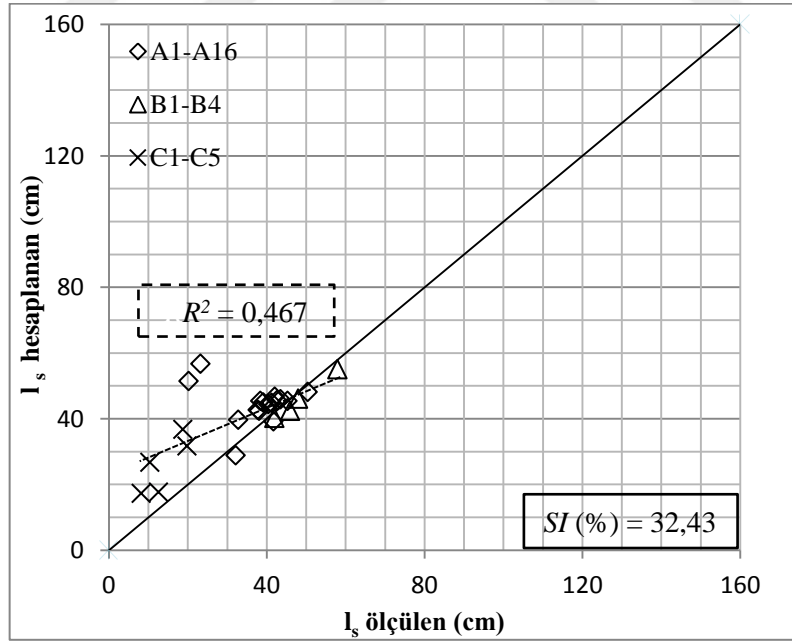
Şekil 4.13 (2.22) nolu denklem kullanılarak hesaplanan ve ölçülen oyulma çukuru hacimleri

#### 4.7 Literatürde Verilen Formül Sonuçlarının Literatürde Mevcut Diğer Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

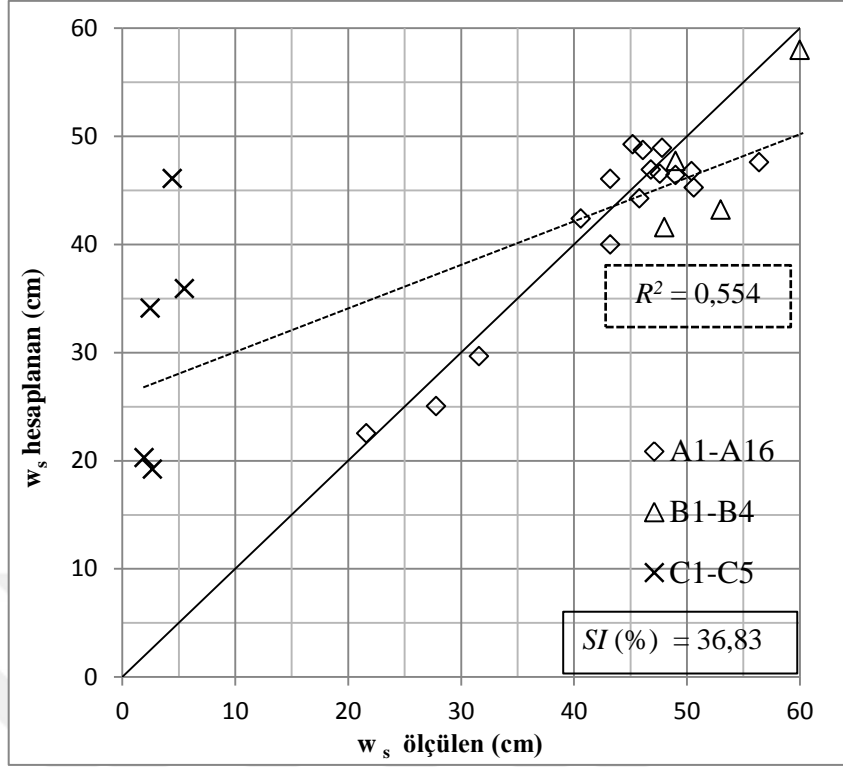
Literatürde mevcut deney sonuçları, diğer araştırmacılar tarafından önerilen bağıntılar ile hesaplanan değerler ile de kıyaslanmıştır. (2.16), (2.17), (2.18), (2.19), (2.20), (2.21) ve (2.22) bağıntıları kullanılarak hesaplanan değerler ile Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilen deneysel bulgular sırasıyla Şekil 4.14 - 4.20’de verilmiştir.



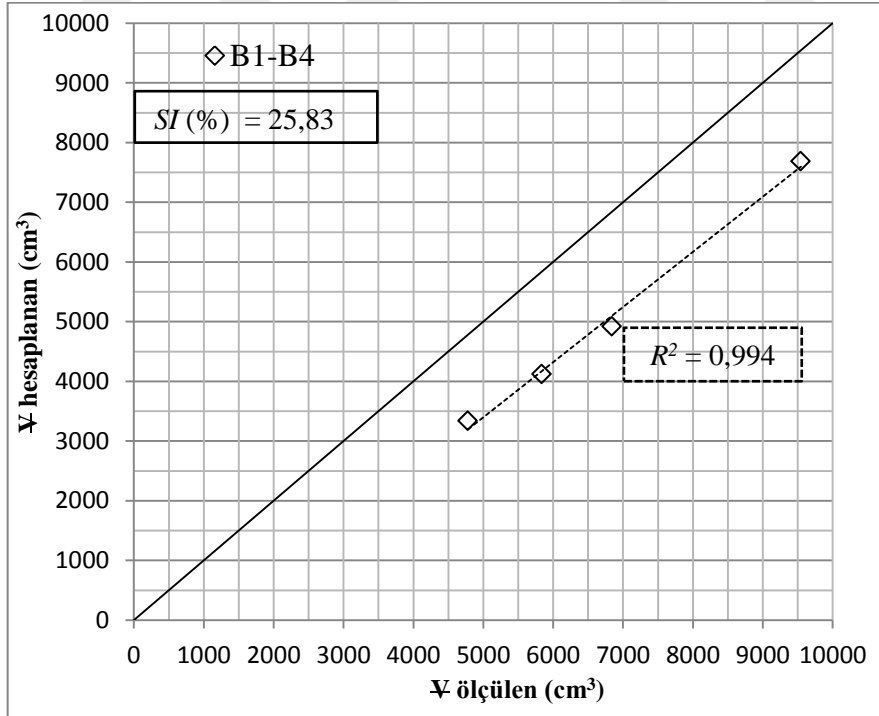
Şekil 4.14 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.16) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru hacimleri



Şekil 4.15 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.17) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru uzunluğu

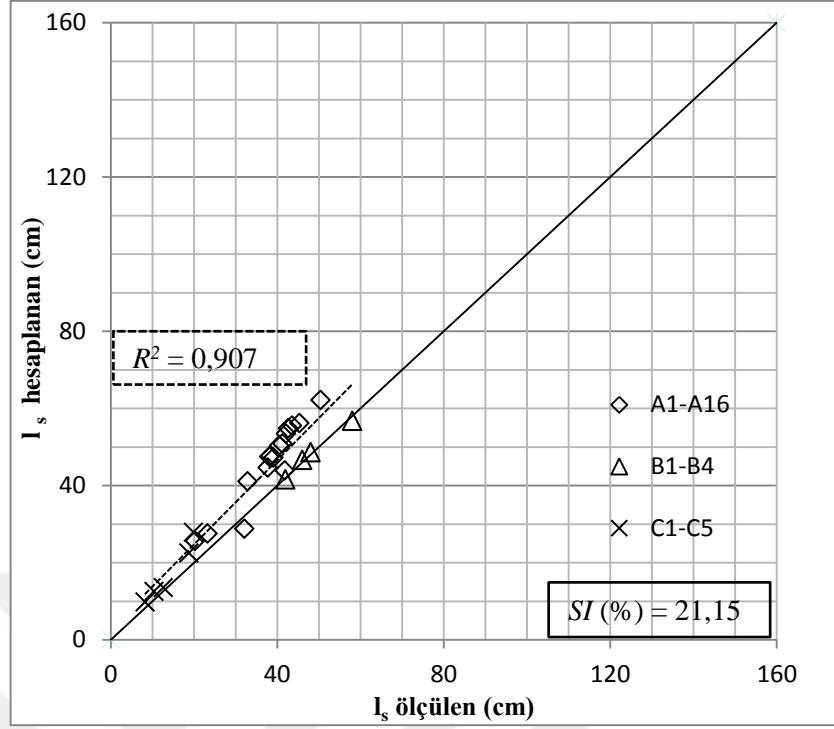


Şekil 4.16 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.18) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru genişliği

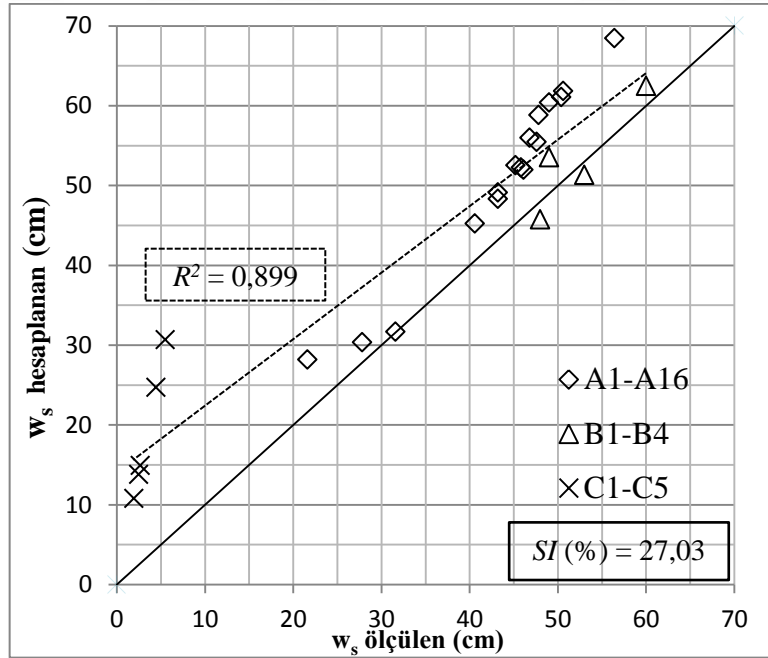


Şekil 4.17 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.19) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru hacimleri

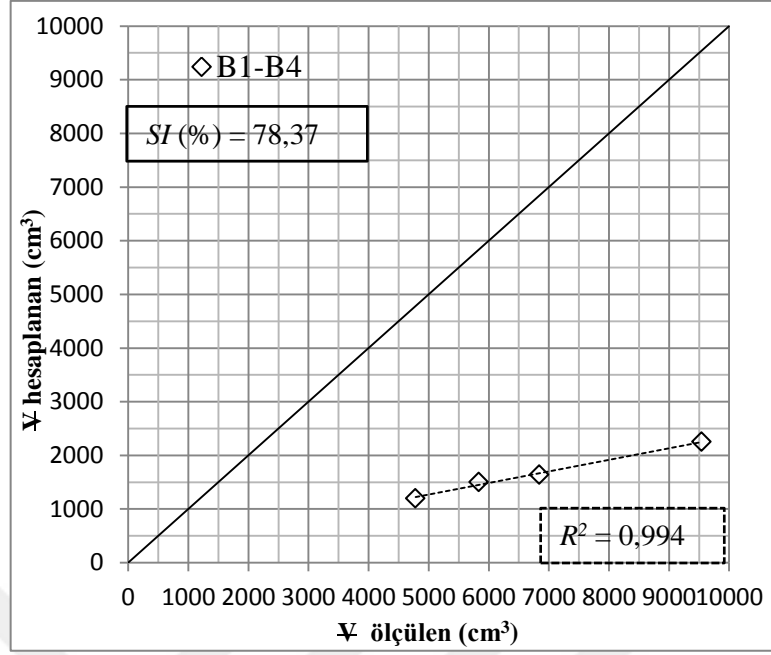




Şekil 4.18 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.20) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru uzunluğu



Şekil 4.19 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.21) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru genişliği



Şekil 4.20 Diğer araştırmacılar tarafından ölçülen ve (2.22) nolu denklem kullanılarak hesaplanan oyulma çukuru hacimleri

## BÖLÜM BEŞ

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında dairesel köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulma çukurunun şekli incelenmiştir. Deneyler farklı çaplarda köprü ayakları ve debiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneylerin sonucunda;

- Akım şiddeti, Froude sayısı ve Densimetrik Froude dane sayısı arttıkça oyulma derinliğinin, oyulma çukuru uzunluğunun, oyulma çukuru genişliğinin ve oyulma çukuru hacminin arttığı gözlemlenmiştir.
- Deney sonuçları kullanılarak oyulma çukuru uzunluğunu, oyulma çukuru genişliğini ve oyulma çukuru hacmini tahmin eden bağıntılar elde edilmiştir.
- Bu tez kapsamında gerçekleştirilen ve literatürde mevcut deneysel sonuçlar ile tez kapsamında ve literatürde önerilen bağıntıların sonuçları karşılaştırılmış ve Tablo 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4'te saçılma indisi ve determinasyon katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 5.1 Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçları ile önerilen denklem sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre	SI (%)	$R^2$
$l_s$	6,72	0,971
$w_s$	7,04	0,954
$\Psi$	18,65	0,969

Tablo 5.2 Literatürde mevcut deneysel sonuçlar ile önerilen denklem sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre	SI (%)	R <sup>2</sup>
l <sub>s</sub>	5,94	0,979
w <sub>s</sub>	26,32	0,892
∇	20,00	0,992

Tablo 5.3 Literatürde önerilen bağıntı sonuçları ile bu tez kapsamında yapılan deney sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre	Yanmaz ve Altınbilek (1991)		Khwairakpam ve diğer. (2012)		Das ve diğer. (2014)	
	SI (%)	R <sup>2</sup>	SI (%)	R <sup>2</sup>	SI (%)	R <sup>2</sup>
l <sub>s</sub>	-	-	29,90	0,64	19,65	0,87
w <sub>s</sub>	-	-	46,10	0,42	37,60	0,78
∇	21,03	0,96	33,07	0,92	86,30	0,88

Tablo 5.4 Literatürde mevcut deneysel sonuçlar ile literatürde önerilen bağıntı sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre	Yanmaz ve Altınbilek (1991)		Khwairakpam ve diğer. (2012)		Das ve diğer. (2014)	
	SI (%)	R <sup>2</sup>	SI (%)	R <sup>2</sup>	SI (%)	R <sup>2</sup>
l <sub>s</sub>	-	-	32,43	0,467	21,15	0,907
w <sub>s</sub>	-	-	36,83	0,554	27,03	0,899
∇	23,91	0,995	25,83	0,994	78,37	0,994

Tablolardaki SI (%) değerleri göz önüne alındığında bu tez kapsamında yapılan deney sonuçları ile elde edilen bağıntılarda saçılım indisinin en az olduğu görülmektedir. Sonuç olarak önerilen bağıntılar ile elde edilen değerlerin güvenilirliği ortaya konulmuştur.

## KAYNAKLAR

- Brandimarte, L., Paron, P. ve Baldassarre, G. D. (2012). Bridge pier scour : a review of processes, Measurements and Estimates. *Environmental Engineering and Management Journal*, EEMJ, 11(5).
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., ve Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Resources*, 15(3), 211-252.
- Cheremisinoff, P. N., Cheremisinoff, N. P., ve Cheng, S. L. (1987). *Hydraulic mechanics*. 2. Civil Engineering Practice, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, USA.
- D'alessandro, C. M. (2013). *Effect of blockage on circular bridge pier local scour*. Master of Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Windsor University, Canada.
- Das, S., Das, R., ve Mazumdar, A. (2014). Variations in clear water scour geometry at piers of different effective widths. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, (38), 97–111.
- Diab, R. (2011). *Experimental investigation on scouring around piers of different shape and alignment in gravel*. PhD Thesis, Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany.
- Ettema, R. E. (1980). *Scour at bridge piers*. Rep. No. 236, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- Hodi, B. S. (2009). *Effect of blockage and densimetric froude number on circular bridge pier local scour*. Master of Thesis, Windsor University, Canada.

- Kandasamy, I. K. (1989). *Abutment scour. Rep. No. 458*, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- Khwairakpam, P., Ray, S. S., Das, S., Das, R., ve Mazumdar, A. (2012). Scour hole characteristics around a vertical pier under clearwater scour conditions. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(6), 649-654.
- Kothyari, U. C., Hager, W. H., ve Oliveto, G. (2007). Generalized approach for clear-water scour at bridge foundations elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11).
- Lai, J. S., Chang, W. Y. ve Yen, C. L. (2009). Maximum local scour depth at bridge piers under unsteady flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135 (7).
- Melville, B. W. ve Chiew, Y. M. (1999). Time scale for local scour at bridge scours. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(1), 59-65.
- Melville, B. W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (2), 125–136.
- Melville, B. W. ve Sutherland A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (10), 1210-1226.
- Mia, M. F. ve Nago, H. (2003). Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129(6), 420 – 427.
- Oliveto, G. ve Hager, W. H. (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 97–105.
- Oliveto, G. ve Hager, W. H. (2002). Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), 811–820.

Raudkivi, A. J. ( 1986). Functional trends of scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112(1)*, 1-13.

Richardson, E.V. ve Davis, S.R. (2001). Evaluating scour at bridge. 4th edition. Publ. No. FHWA NHI 01-001, HEC-18, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Sheppard, D.M., Odeh, M., ve Glasser, T. (2004). Large scale clear-water local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 130 (10)*, 957-963.

TÜBİTAK 109M637 nolu proje (2012). *Açık kanallarda taşkın hidrograflarının yayılmasından kaynaklanan katı madde hareketinin iki boyutlu olarak deneysel ve teorik araştırılması; bu hareket nedeniyle köprü uç ve orta ayaklarında oluşan yerel oyulmaların belirlenmesi - karşı önlemlerin tasarımları ve test edilmeleri.*  
Nihai rapor

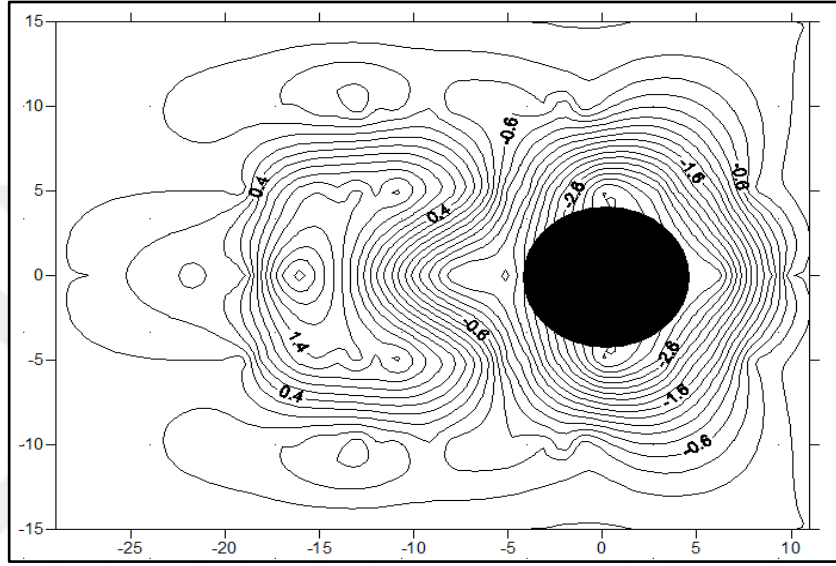
Yanmaz, A. M. ve Altınbilek, H. D. (1991). Study of time-dependent local scour around bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(10)*, 1247-1267.

Yanmaz, A. M. (2002). *Köprü hidroliği*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık A.Ş.

Yanmaz, A. M. (1989). *Time dependent analysis of clear water scour around bridge piers*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

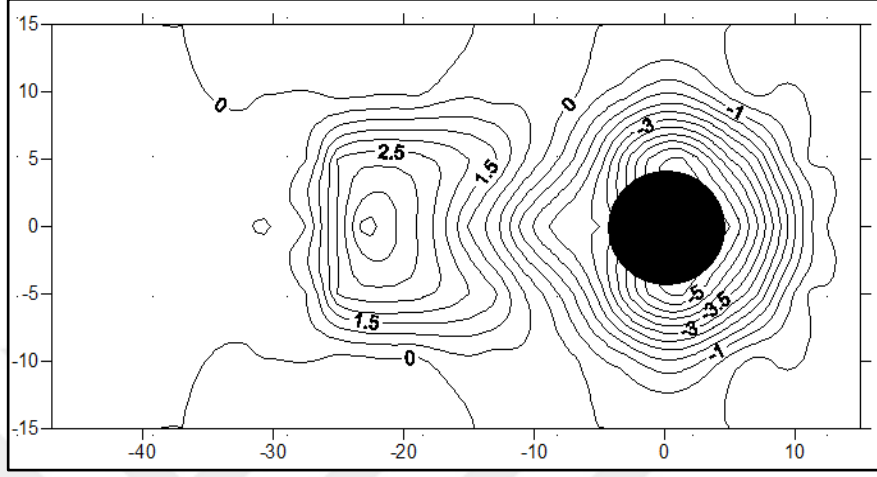
## EKLER

Deneyler sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrileri ve deneyler sonunda çekilen fotoğraflar

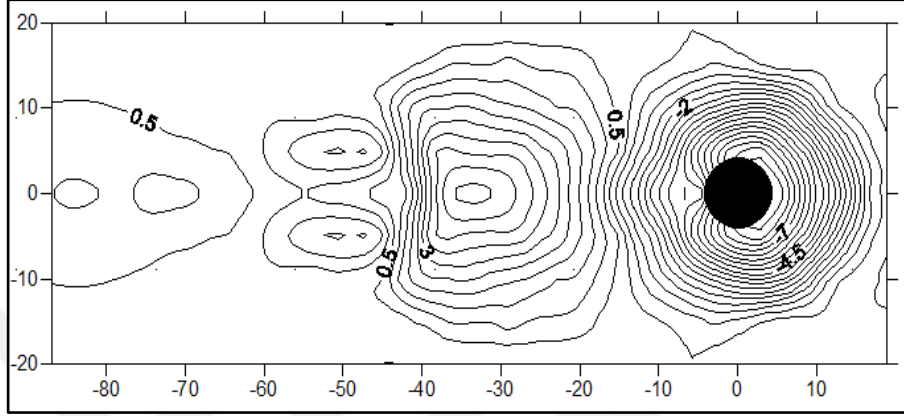


Şekil 1 D-8-1 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf

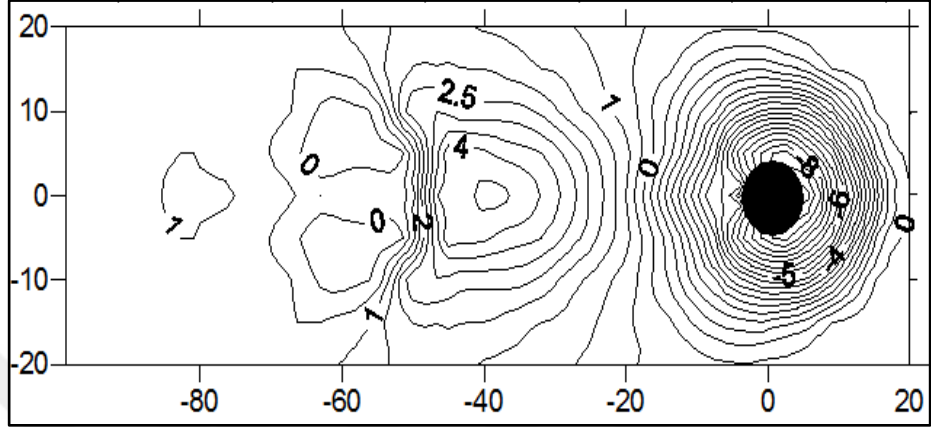




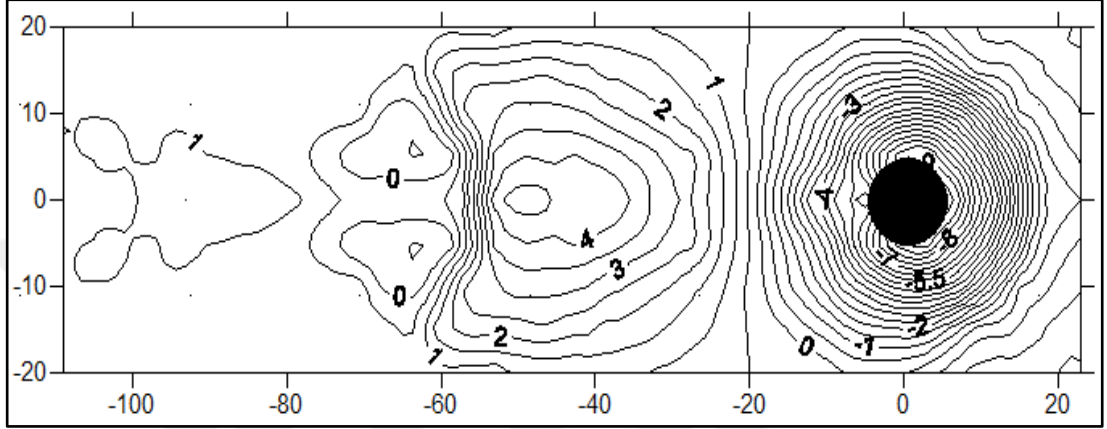
Şekil 2 D-8-2 nolu deney sonrasında elde edilen eşyükselti eğrisi ve çekilen fotoğraf



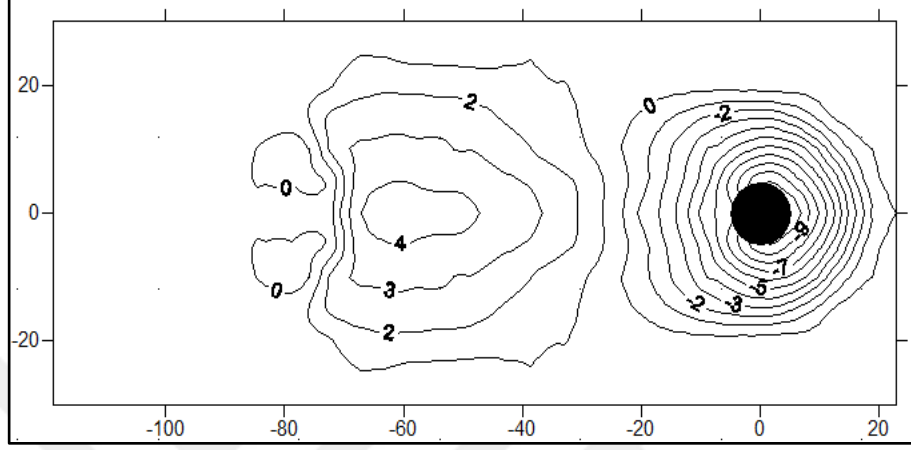
Şekil 3 D-8-4 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf



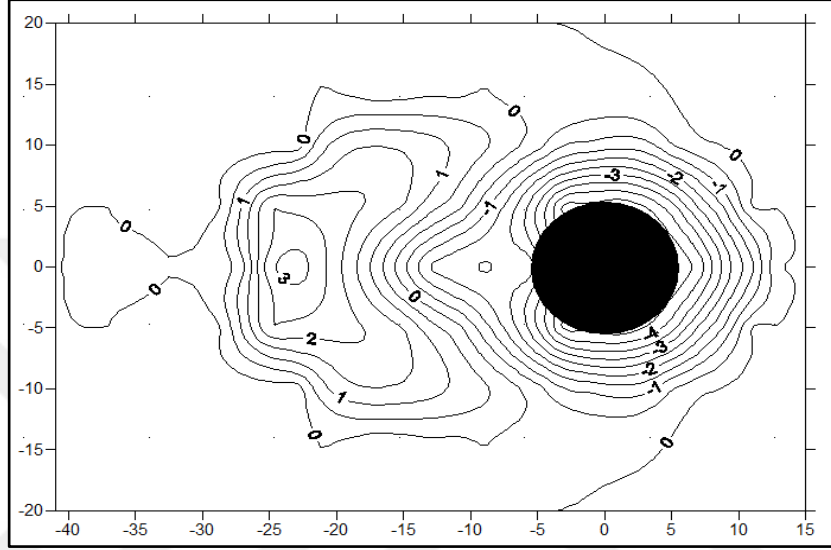
Şekil 4 D-8-5 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf



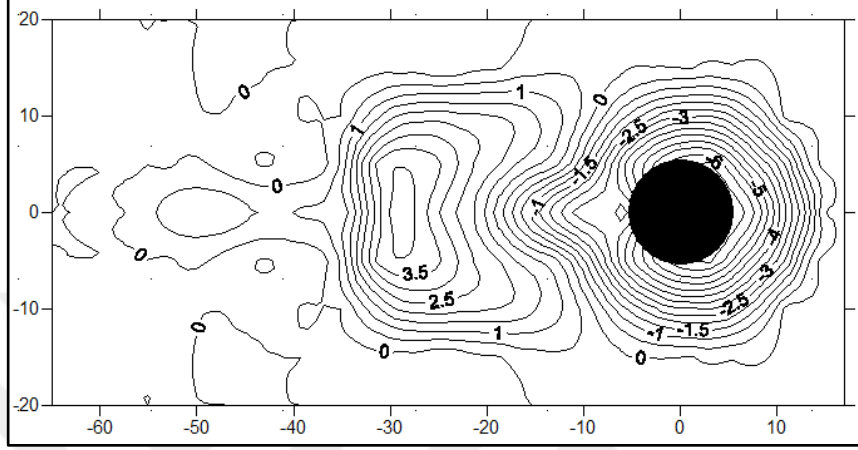
Şekil 5 D-8-6 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf



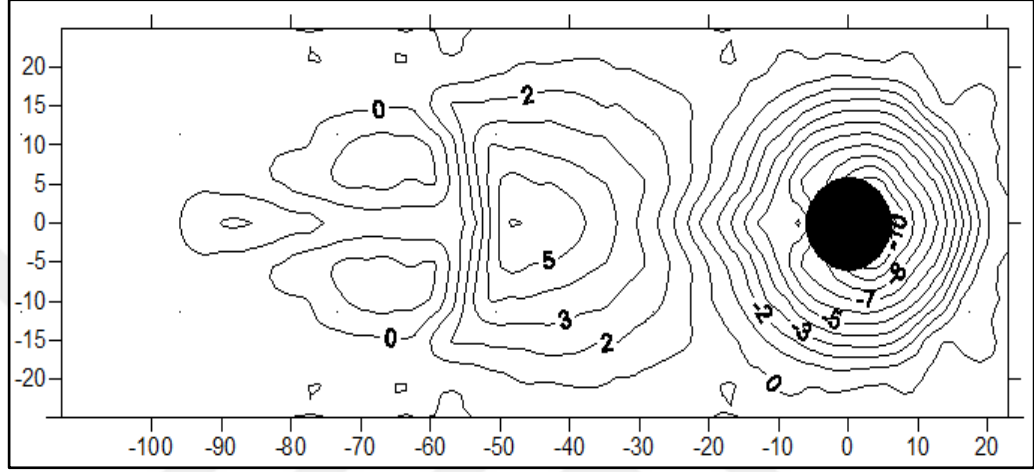
Şekil 6 D-8-7 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf



Şekil 7 D-11-1 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf

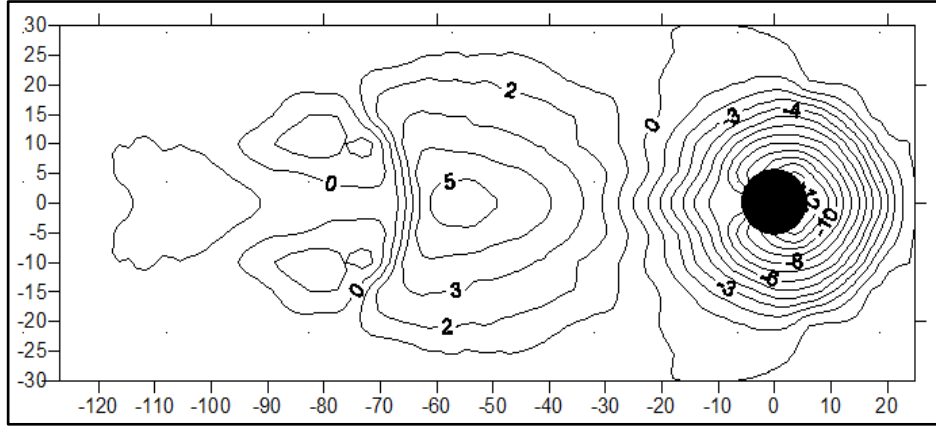


Şekil 8 D-11-2 nolu deney sonrasında elde edilen eşyükselti eğrisi ve çekilen fotoğraf

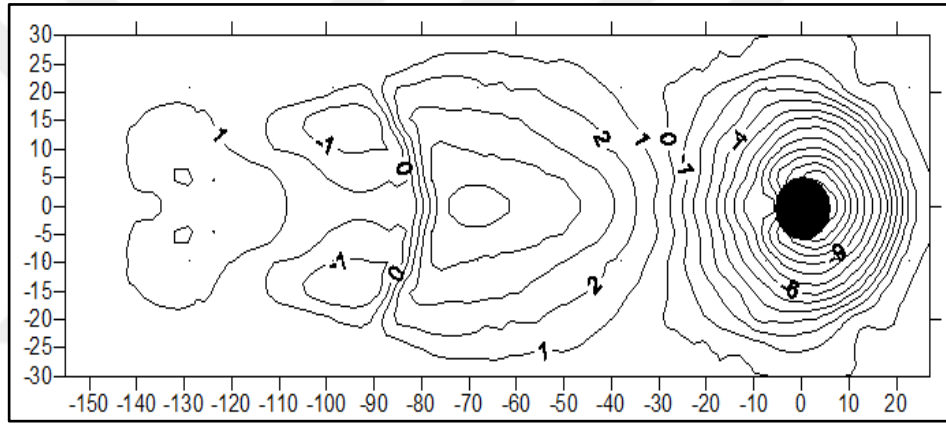


Şekil 9 D-11-4 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf

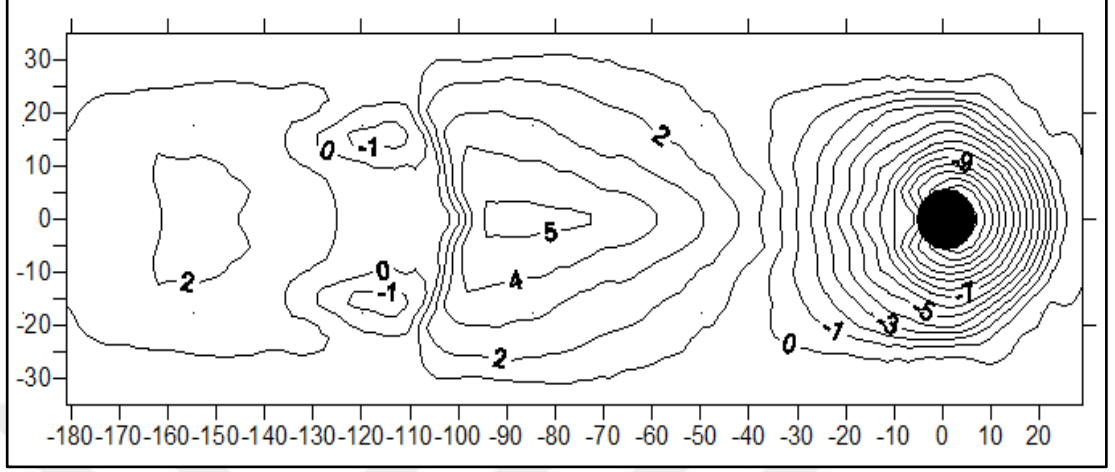




Şekil 10 D-11-5 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi

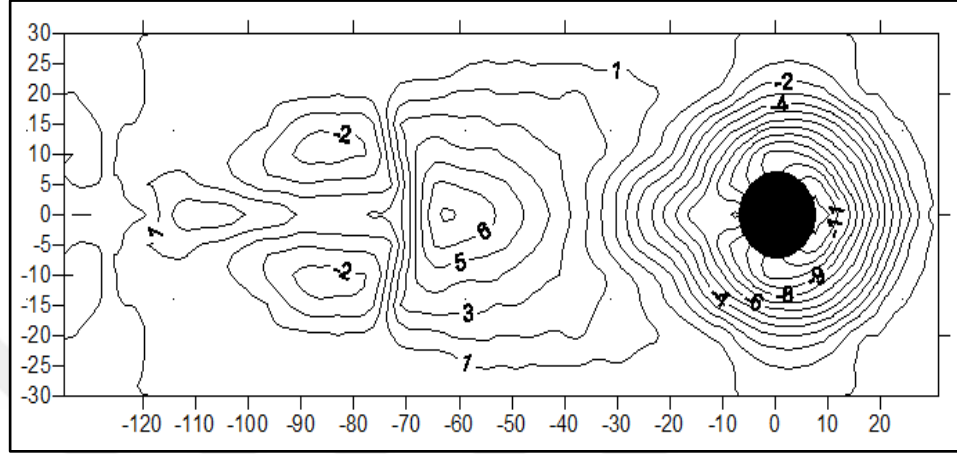


Şekil 11 D-11-6 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf

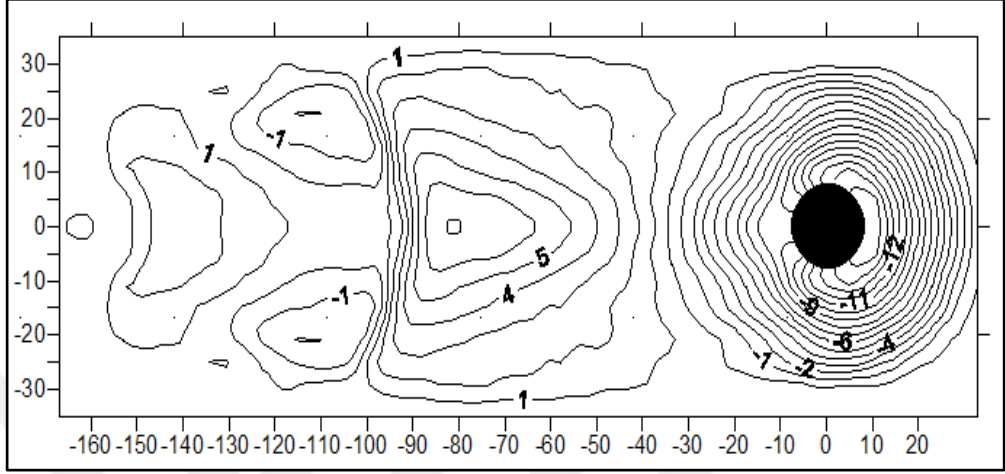


Şekil 12 D-11-7 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf

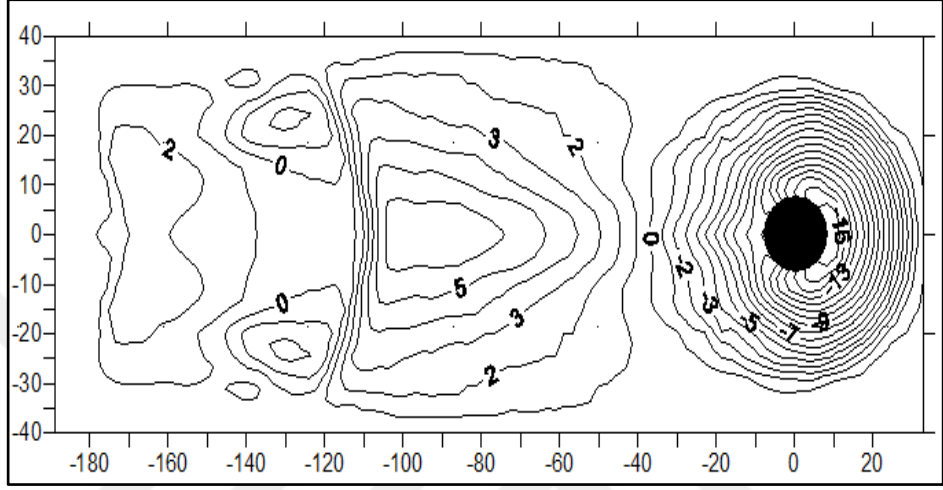




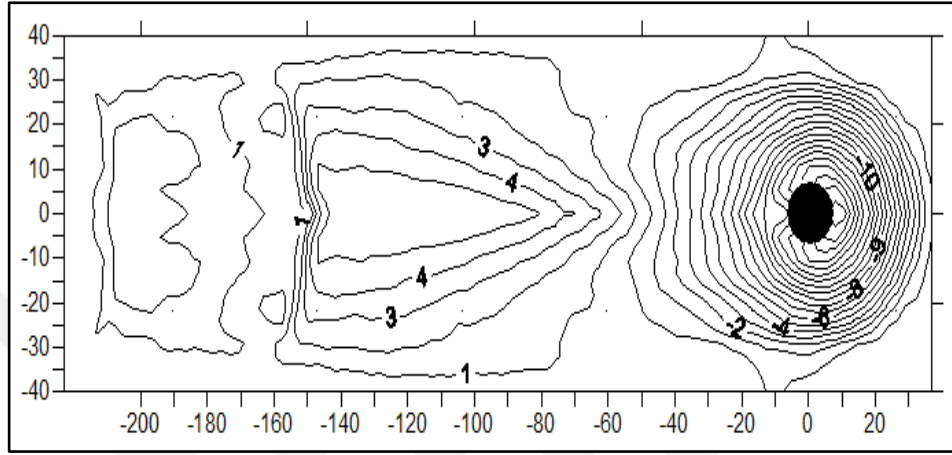
Şekil 15 D-15-4 nolu deney sonrasında elde edilen eşyükselti eğrisi ve çekilen fotoğraf



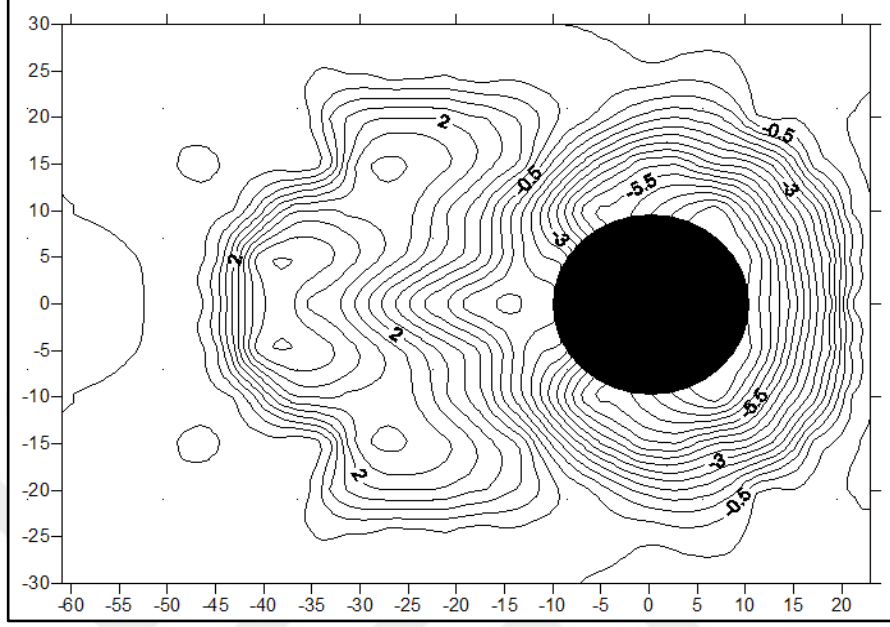
Şekil 16 D-15-5 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf



Şekil 17 D-15-6 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf

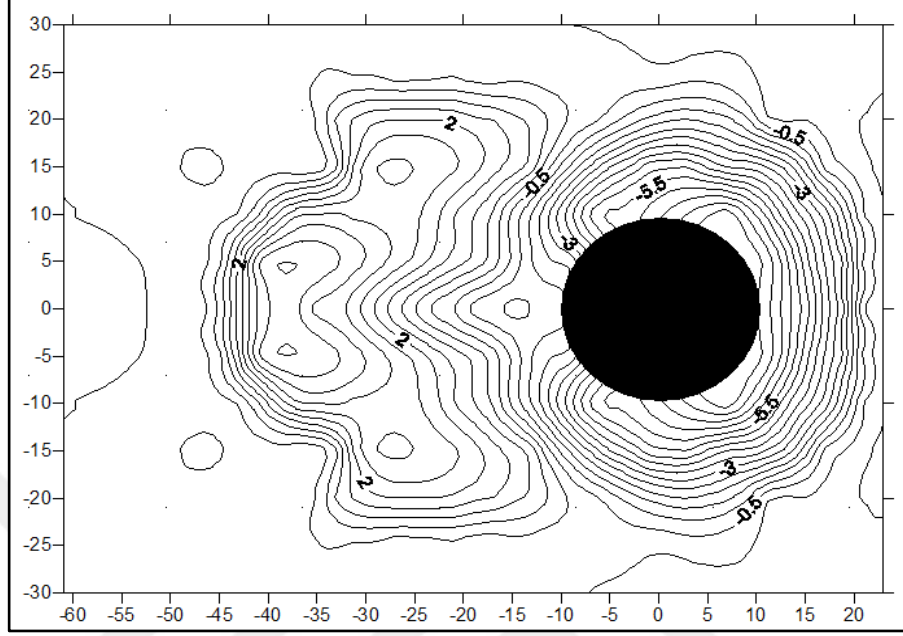


Şekil 18 D-15-7 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi ve çekilen fotoğraf



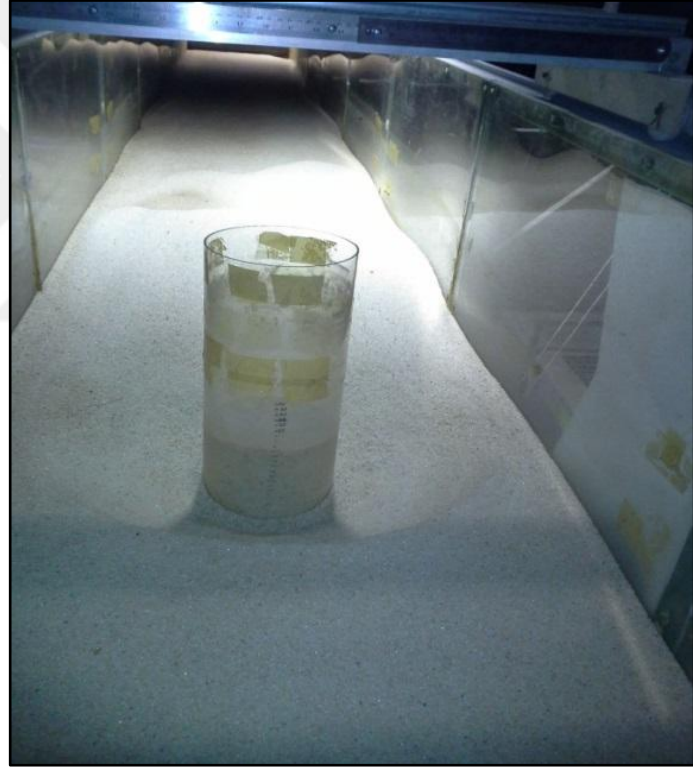
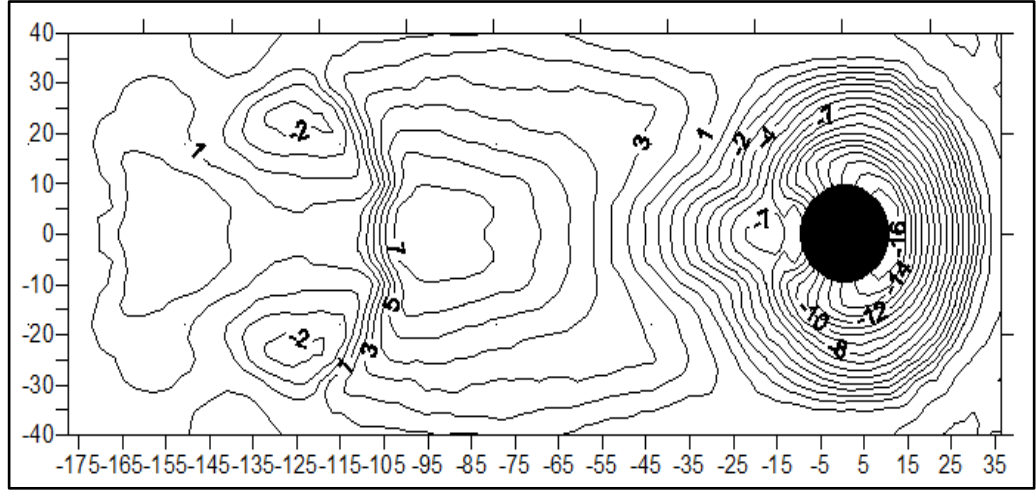
Şekil 19 D-20-1 nolu deney sonrasında elde edilen eşyükselti eğrisi ve çekilen fotoğraf



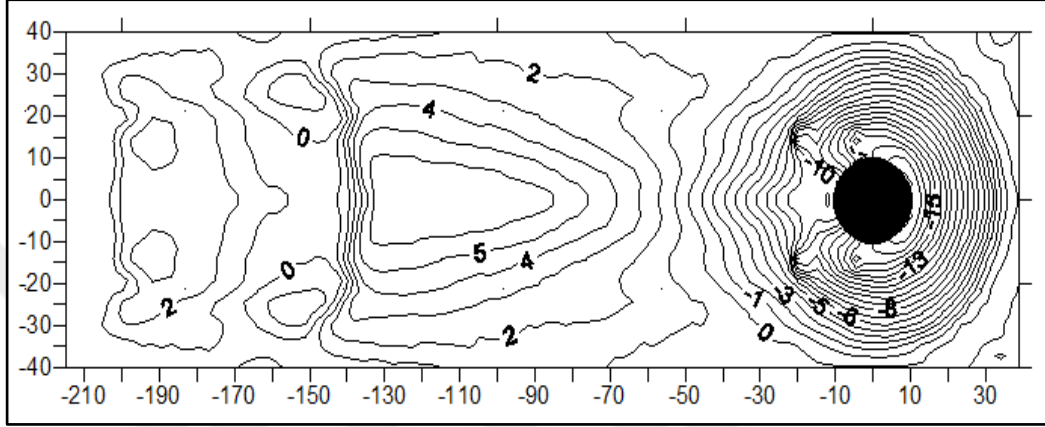


Şekil 20 D-20-2 nolu deney sonrasında elde edilen eşyükselti eğrisi ve çekilen fotoğraf

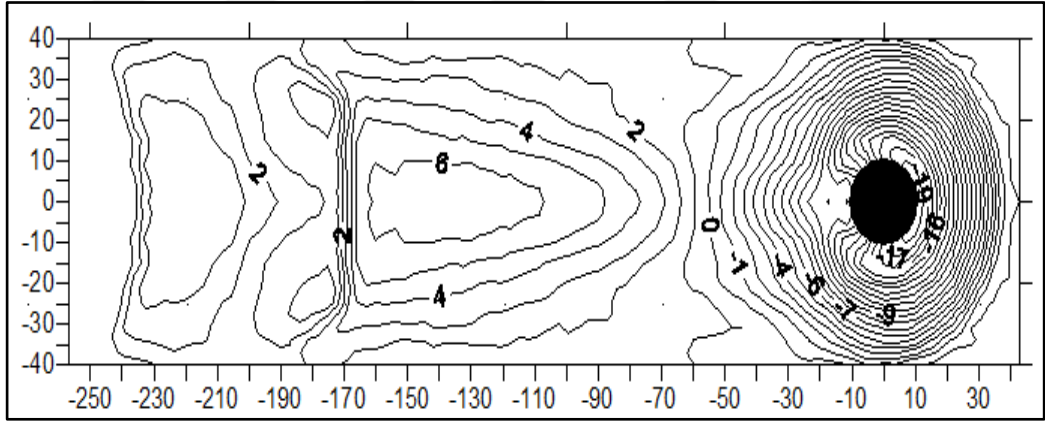




Şekil 22 D-20-5 nolu deney sonrasında elde edilen eşyükselti eğrisi ve çekilen fotoğraf



Şekil 23 D-20-6 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi



Şekil 24 D-20-7 nolu deney sonrasında elde edilen eşyüksekti eğrisi