

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖPRÜ UÇ VE ORTA AYAKLARI
ETRAFINDAKİ YEREL OYULMALARA KARŞI
KORUYUCU ÖNLEMLERİN ARAŞTIRILMASI

Tanıl ARKIŞ

Ocak, 2013

İZMİR

**KÖPRÜ UÇ VE ORTA AYAKLARI
ETRAFINDAKİ YEREL OYULMALARA KARŞI
KORUYUCU ÖNLEMLERİN ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

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

Tanıl ARKIŞ

Ocak, 2013

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

TANIL ARKIŞ, tarafından YRD. DOÇ. DR. AYŞEGÜL ÖZGENÇ AKSOY yönetiminde hazırlanan “KÖPRÜ UÇ VE ORTA AYAKLARI ETRAFINDAKİ YEREL OYULMALARA KARŞI KORUYUCU ÖNLEMLERİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

A. ÖZGENÇ

Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY

M. S. GÖNEY

Prof. Dr. Mehmet Sıkı GÖNEY

M. ÖZDİĞER

Prof. Dr. Davut ÖZDİĞER

M. SABUNCU

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK 109M637nolu proje kapsamında hazırlanan bu tez çalışmasında, kaynaklar konusunda beni yönlendiren ve araştırmalarımaya ışık tutan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanaklarından yararlanmamı sağlayan ve tezin her aşamasında ilgisini esirgemeyen Prof. Dr. M. Şükrü GÜNEY'e, yapılan deneylerde yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Gökçen BOMBAR'a, Araş. Gör. Mustafa DOĞAN'a, teknisyen İsa ÜSTÜNDAĞ'a ve laboratuvardaki arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince her türlü fedakarlığı yapan, beni yetiştiren aileme teşekkürü borç bilirim.

Tanıl ARKIŞ

KÖPRÜ UÇ VE ORTA AYAKLARI ETRAFINDAKİ YEREL OYULMALARA KARŞI KORUYUCU ÖNLEMLERİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

TÜBİTAK 109M637 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulmaları önlemek amacıyla kullanılan yöntemler deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda mevcut 80 cm genişliğinde, 18,6 m uzunluğunda ve 75 cm yüksekliğindeki dikdörtgen kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal tabanına serili malzeme üniform olup koruyucu önlem olarak riprap ve yaka kullanılmıştır. Deneyler kararsız akım koşullarında gerçekleştirilmiştir. Köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kullanılan koruyucu yöntemin oyulma derinliğini ne ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Deneysel bulgular ilgili mevcut literatür bilgileri ile de karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Köprü ayağı, kararsız akım, yerel oyulma, koruyucu önlemler

INVESTIGATION OF PROTECTIVE MEASURES AGAINST LOCAL SCOURS AROUND THE BRIDGE PIERS AND ABUTMENTS

ABSTRACT

In this thesis, methods of countermeasures to prevent local scour around bridge pier were investigated experimentally within the scope of the TUBİTAK 109M637 project. The experiments were carried out in a rectangular flume of 80 cm width, 18.6 m length and 75 cm depth which was available in the Hydraulic Laboratory of the Civil Engineering Department at Dokuz Eylul University. The bed material of the flume was uniform and riprap and collar were used as countermeasure practices. The temporal variations of scour depth were measured and the efficiency of various preventive means was determined. The experimental results were compared and interpreted in the light of available literature.

Keywords: Bridge pier, unsteady flow, local scour, countermeasure

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı.....	1
1.2 Geçmişte Yapılan Akademik Çalışmalar.....	3
BÖLÜM İKİ - TEORİK BAKIŞ.....	6
2.1 Giriş.....	6
2.2 Oyulma Mekanizmasına Etki Eden Faktörler.....	7
2.3 Yaklaşım Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi.....	10
2.4 Yaklaşım Akım Hızının Etkisi.....	11
2.5 Taban Malzemesi Özelliklerinin Etkisi.....	11
2.6 Koruyucu Önlem Olarak Kullanılan Riprap için Verilen Bağıntılar.....	12
2.6.1 Gales (1938).....	12
2.6.2 Bonasoundas (1973).....	12
2.6.3 Neill (1973).....	13
2.6.4 Posey (1974).....	13
2.6.5 Breusers ve diğer. (1977).....	13
2.6.6 Richardson ve diğer. (1991).....	14
2.6.7 Richardson ve Davis (1995).....	14
2.6.8 Parola (1993,1995).....	15
2.6.9 Lauchlan (1999).....	15
2.7 Koruyucu Önlem Olarak Kullanılan Yaka için Verilen Bağıntılar.....	16
2.7.1 Kumar ve diğer. (1999).....	16

2.7.2 Masjedi ve diğeri. (2010).....	17
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	18
3.1 Deney Düzenegi.....	18
BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL SONUÇLAR.....	24
4.1 Riprap Kullanılarak Elde Edilen Deney Sonuçları.....	24
4.2 Yaka Kullanılarak Elde Edilen Deney Sonuçları.....	39
4.3 Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	77
BÖLÜM BEŞ - SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	89

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Bir akış alanında bir engel civarında akış yatağının erozyona uğramasına oyulma denir (Chang, 1988). Mekanizmanın köprü ve hidrolik yapıların bütünlüğüne tehdidi yapıların temelini yok olmasına yol açmasıdır. Lagasse ve Richardson (2001) A.B.D otoban köprülerindeki hataların %60'ının, genel oyulma, yerel oyulma, uzun dönem birikim ve bozulması, akışkan dengesizliği gibi hidrolik faktörlerden kaynaklandığını ifade etmiştir. Hoffmans ve Verheij (1997) köprü yıkılmalarının ana nedeninin taşkınlar sonucu köprü ayak ve temeli etrafında oluşan yerel oyulmalar olduğunu belirtmişlerdir. 1987 yılında 10 kişinin öldüğü New York'taki Scholarie Creek Köprü'sü faciasının ana nedeninin köprü ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma olduğu gösterilmiştir (Ting ve diğer., 2001). Dey ve Barbhuiya (2004), Yeni Zelanda Rangitikei Nehri'nde Bulls Köprüsü'nün yıkılışının ana nedeninin yerel oyulmalar olduğundan bahsetmişlerdir. Cheremisinoff ve diğer.(1987), 1964-1972 yılları arası meydana gelen taşkınlar sebebiyle köprülerde oluşan zararın köprü başına 100 milyon dolar olduğunu beyan etmişlerdir. Melville ve Coleman (2000), Yeni Zelanda'da nehirlerin neden olduğu oyulmaların yılda 36 milyon Yeni Zelanda doları kadar zarar verdiğini belirtmişlerdir. (Alabi, 2006)

Zonguldak'ın Çaycuma ilçesinde, Filyos Çayı üzerinde bulunan köprünün orta ayağında meydana gelen oyulmadan dolayı köprü tabliyesinin bir kısmı 6 Nisan 2012 tarihinde çökmüştür. Filyos Çayı'ndaki köprünün çökmesiyle ilgili yürütülen soruşturma kapsamında, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) bilirkişi raporu hazırlamıştır. Açıklanan bilirkişi raporunda "Köprünün göçmesi, meydana gelen yağış seviyesine bağlı olarak çayın ortasında bulunan köprü ayaklarının oyulması, kazıkların taşıma gücünü yitirmesi sonucu tabliye yüklerini taşıyamamasıyla meydana gelmiştir" açıklamalarına yer verilmiştir. Raporda esas üzerinde durulması gereken durumun köprülerin üst yapısından çok anılan köprü ayaklarındaki oyulmayı önlemek için oluşturulan bariyerin bakım ve denetimindeki yetersizlik olarak

belirtilmiştir. (<http://www.habername.com/haber-filyos-koprusu-caycuma-istanbul-teknik-universitesi-itu--77806.htm>)

Köprülerin yıkılmasında önemli etkenlerden biri olan yerel oyulmaların meydana geldiği köprü ayaklarının bakım ve yenileme çalışmaları için her yıl büyük miktarda paralar harcanmaktadır. Bu sebeple köprü ayakları etrafında oluşacak yerel oyulmaların önlenmesi amacıyla alınacak yöntemler birçok çalışmaya konu olmuştur.

Köprü ayağı etrafında meydana gelen yerel oyulmaların en önemli sebebi ayak etrafında oluşan at nalı şeklindeki çevrıntiler olarak gösterilebilir (Kumar ve diğer., 1999). Yerel oyulmaları azaltmanın bir yolu riprap gibi sert malzeme kullanarak at nalı çevrıntilerinin aşındırıcı faaliyetine karşı mücadele etmektir. Diğer yaklaşımlar ise akışı zayıflatmak ve mümkünse at nalı çevrıntilerini engellemek amacıyla ayak etrafına cihazlar yerleştirmektir (Chiew ve Lim, 2003; Melville ve Coleman, 2000). Akışı değiştirici cihazlar, yerel oyulmayı önlemek üzere membaya yerleştirilen kazıklar, ayak boyunca bir yarık ve yaka gibi ayağa bitişik bir akış yönü değiştiricisidir. Yakaların kullanımlarını inceleyen araştırmalar arasında Chabert ve Engeldinger, (1956), Laursen ve Toch, (1956), Thomas (1967), Tanaka ve Yano, (1967), Kumar ve diğer. (1999), Chiew (1992), Zarrati ve diğer. (2006) ile Fotherby ve Jones, (1993)'un araştırmaları sayılabilir. Araştırmalar yakaların kullanımının köprü ayağındaki oyulma derinliğini azaltmada çok etkili olduğunu göstermiştir. Yaka kullanımı maksimum oyulma derinliğini azaltmaya ilave olarak oyulma hızını da önemli derecede azalmaktadır. (Alabi, 2006)

Bu tez çalışması kapsamında yerel oyulmaları önlemek amacıyla kullanılan iki yöntem deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda koruyucu önlem olarak riprap ve yaka kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Riprap deneylerinde dane boyutu, genişliği ve kalınlığı, yaka deneylerinde ise yakanın konumu ve kalınlığı değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar koruma önlemi alınmayan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

1.2 GemiŖte Yapılan Akademik alıŖmalar

Chiew (1995), dairesel köprü ayağı etrafında riprap tabakasının stabilitesini araŖtırmıŖtır. Deneyler sırasında kullanılan taban malzemesi üniform olup temiz su oyulmaları incelenmiŖtir.  farklı riprap dane boyutu için uzun ve kısa süreli deneyler yapılmıŖtır. Deneylerde debi değerleri ile riprap malzemesinin geniŖliđi ve kalınlığı deđiŖtirilmiŖtir.

Kumar ve diğer.(1999), deneylerinde  farklı üniform taban malzemesi kullanmıŖlardır. Koruyucu nlem olarak yaka ve köprü ayağında aılmıŖ yarığın oyulmalara etkisini temiz su oyulması Ŗartlarında araŖtırmıŖlardır.

Lauchlan ve Melville (2001), koruyucu önlem olarak riprap kullanmıŖ ve hareketli taban koŖulları altında deneyler yapmıŖlardır.Taban malzemesi sabit tutularak köprü çapı, riprap dane boyutu ve ortalama yaklaŖım akım hızı deđiŖtirilmiŖtir. alıŖmalarının sonucunda riprap malzemesinin, taban malzemesinin altına yerleŖtirildiđinde oyulmaları daha iyi koruduğunu belirtmiŖlerdir.

Chiew (2004), köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmaları ve riprap tabakasının stabilitesini incelemiŖtir. Deneyler hareketli taban koŖulları altında  farklı akım Ŗiddeti kullanılarak gerekleŖtirilmiŖtir. Deneylerde 120 saatten sonra oyulma oranının ihmal edilebilir olduğu grlmŖtir. Toplam oyulma derinliğinin akım Ŗiddeti ile arttığı gzlenmiŖtir.

Unger ve Hager (2006), dairesel köprü ayakları etrafına yerleŖtirilen riprap tabakasının stabilitesi incelemiŖlerdir. Deneyler temiz su oyulma koŖullarında gerekleŖtirilmiŖ olup riprap boyutunun akım yüksekliğine oranının Froude sayısı ile iliŖkisini vermiŖlerdir. Riprap tabakasının maksimum korumayı sağlaması için dikkatlice serilmesini nermiŖlerdir.

Alabi P.D.(2006), Kanada'da Saskatchewan niversitesinde yaptığı doktora tezi alıŖmasında köprü ayağı etrafına yerleŖtirilen yakanın oyulmayı ne kadar azalttığını araŖtırmıŖtır. Temiz su oyulma koŖullarında, üniform taban malzemesi ve dairesel iki

ayak çapı ile deneylerini gerçekleştirmiştir. Yaka kalınlığının oyulmaya etkisinin ihmal edilebilir olduğunu çalışmalarının sonucunda belirlemiştir.

Zarrati ve diğer. (2006), dairesel iki ayaktan oluşan ayak grubu etrafına yerleştirilen riprap ve yakanın oyulmaya etkisini araştırmışlardır. Yakanın ayaklara ayrı ayrı olarak veya tek parça şeklinde yerleştirilmesini ve yakanın akıma paralel veya dik konumda olması hallerinde meydana gelen yerel oyulmaları incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda aynı hizadaki iki ayağa uygulanan yaka ve riprapın oyulmayı 60% azalttığını gözlemlemişlerdir.

Yasser ve diğer. (2008), dikdörtgen ayakta üçgen yakayı küçük Froude sayılı akımlarda kullanmışlardır. Yaka genişlikleri köprü ayağının 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 ve 5,0 katı seçilmiştir. Oyulmayı sırasıyla 22%, 42%, 56%, 63%, 71%, 77% ve 82% azalttığını deneylerle elde etmişlerdir.

Khwairakpam ve Mazumdar (2009), kararlı akım koşullarında kohezyonsuz yatak malzemesi için oyulma denklemleri elde etmişlerdir. Koruyucu önlem olarak literatürdeki çalışmalara değinmişlerdir. Akım doğrultusunda bulunan aynı hizadaki iki dikdörtgen köprü ayağında yakanın etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Mashahir ve diğer. (2009), gerçekleştirdikleri deneylerde yaka ile beraber çubuk kullanmışlardır. Çubukların oyulmayı önlemleri derecede etkilemediğini bulmuşlardır. Yakanın yerini değiştirerek deneylerini yapmışlardır. Yaka genişliğinin köprü ayağının 3 katından büyük seçilmesinin korumayı arttırmadığını belirtmişlerdir.

Masjedi ve diğer. (2010), köprü ayağı etrafına köprü ayak genişliğinin 1,5; 2,0; 2,5 ve 3,0 katı genişliğinde yakaları yerleştirerek yaka genişliğinin oyulma süreci üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda köprü ayak genişliğinin 3 katı genişliğe sahip olan yakanın oyulmayı en çok önlediğini belirtmişler ve yakayı, taban malzemesinin altına ayak genişliğinin 0,1 katı kadar gömülmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Bhalerao ve Garde (2010), riprap tabakasının tasarımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. 5 cm çapında köprü ayağı kullanarak altı farklı yatak malzemesi ve riprap boyutunu temiz su deneyleri altında test etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda riprap tabaka tasarımı için bir yöntem önermişlerdir.

Zarrati ve diğer. (2010), 40 mm köprü ayağı etrafına yedi farklı çapta üniform riprap malzemesi ve iki farklı genişliğe sahip yaka yerleştirerek deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yaka genişliğinin köprü ayağının 3 katı olması durumunda oyulmayı daha fazla önlediğini belirlemişlerdir. Ayrıca yaka yerini de değiştirerek sonuca etkisini araştırmışlardır.

Simarro ve diğer. (2011), ayak grupları etrafında meydana gelen oyulmalara karşı riprap korumasını çalışmışlardır. Üniform taban malzemesinin bulunduğu kanalda 4 farklı riprap çapı kullanılmıştır. Ayak gruplarının konumuna göre, kullanılması gereken riprap boyutlarını belirlemişleridir.

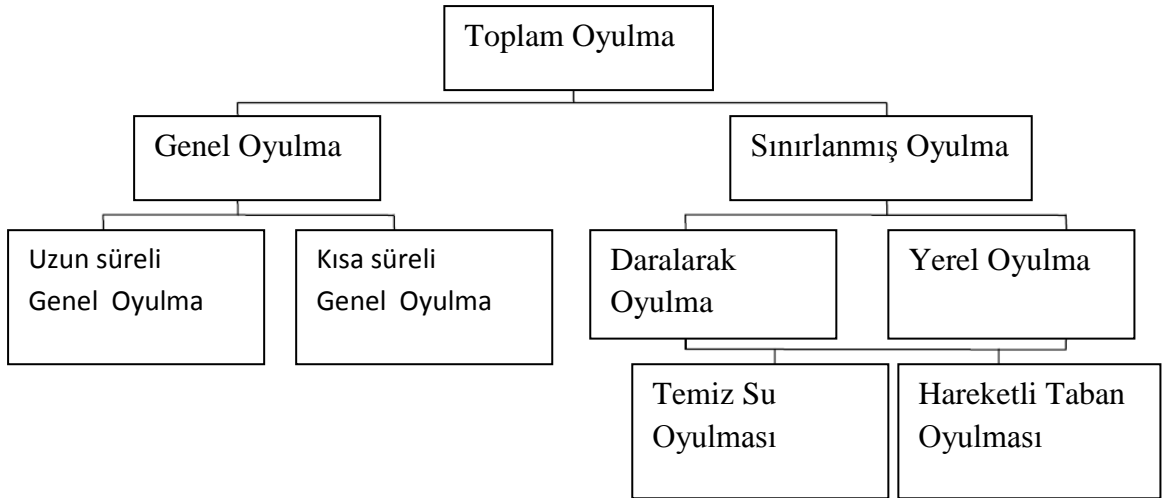
Nohani ve diğer. (2012), 180 derece dönen bir kanalda dört farklı riprap malzemesi kullanarak temiz su oyulması altında riprap tabakasının stabilitesini incelemişlerdir. Kanalın 30, 60, 90 ve 120 derece dönüşlerine köprü orta ayağı yerleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda kanalın 30 derecelik dönüş açısına sahip kısmında riprap tabakasının daha az zarar gördüğünü belirtmişlerdir.

BÖLÜM İKİ

TEORİK BAKIŞ

2.1 Giriş

Breusers ve diğer. (1977) oyulmayı nehir ve akarsularda suyun akışının neden olduğu doğal olay olarak tanımlamışlardır. Cheremisinoff ve diğer. (1987) oyulmayı, köprü gibi nehir yapılarının temelinin açığa çıkarma eğilimi olacak şekilde suyun aşındırması ve nehir yatağı seviyesinin alçaltılması olarak tarif etmişlerdir. Yazarların belirttiğine göre oyulma nedeni ya normal akış ya da taşkın olayları yüzündendir. Belirli bir doğal seviyeden (genellikle olay başlamadan önceki nehir yatağının düzeyi) itibaren oluşan alçalma miktarına oyulma derinliği adı verilir. Şekil 2.1'de oyulma çeşitleri gösterilmiştir.



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

Genel oyulma: Bu tip oyulma nehir kanalının uzunlamasına profilinin toplam alçalmasına neden olan etkilerden kaynaklanmaktadır. Genel oyulma bir köprünün varlığına bakılmaksızın gelişir ve uzun süreli ve kısa süreli olarak ikiye ayrılır (Cheremisinoff ve diğer., 1987). Kısa süreli genel oyulma taşkına yanıt olarak gelişirken uzun süreli oyulma genelde birkaç yıllık daha uzun süreli olarak gelişmektedir.

Sınırlanmış oyulma: Genel oyulmaya karşıt olarak sınırlanmış oyulma köprünün varlığına veya diğer nehir yapılarının varlığına bağlanmaktadır. Sınırlanmış oyulma daralarak oyulma ve yerel oyulma olarak ikiye ayrılmaktadır.

Daralarak oyulma: Bu tip oyulma ya insan tarafından taşkın yatağının değiştirilmesi ya da doğal değişim sonucu olarak gerçekleşmektedir. Bu daralmanın etkisi sonucu akış alanında azalma ve ortalama akış hızında artma meydana gelmektedir. Bunun sonucunda kanal yatağı üzerindeki erozyon kuvvetlerinde bir artış meydana gelmekte ve kanal yatağı alçalmaktadır.

Yerel oyulma: Bu tip oyulma köprü kenar ayakları veya orta ayakları civarında aniden katı maddenin taşınması olarak tanımlanabilir.

2.2 Oyulma Mekanizmasına Etki Eden Faktörler

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

i) Akışkan parametreleri

ρ : suyun yoğunluğu (ML^{-3})

ν : suyun kinematik viskozitesi (L^2T^{-1})

ii) Akım parametreleri

g : yerçekimi ivmesi (LT^{-2})

y : yaklaşım akım derinliği (L)

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

θ : akım ve ayak eksenleri arasındaki açı

u_* : kayma hızı (LT^{-1})

iii) Akarsu parametreleri

S_0 : taban eğimi

B : akarsu genişliği (L)

C_c : daralma katsayısı

K_θ : yaklaşım akımıyla köprü eksenini arasındaki açının etki faktörü

K_a : akarsu güzergâhı etkisini gösteren katsayı

K_b : membada taban pürüzlülüğünü gösteren katsayı (L)

K_c : akarsu şevlerinin pürüzlülüğünü gösteren katsayı (L)

K_G : akarsu en kesit etkisini gösteren katsayı

iv) Taban malzemesi parametreleri

ρ_s : tane yoğunluğu (ML^{-3})

d_{50} : tane medyan çapı (L)

σ_g : tane dağılımının geometrik standart sapması

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

K_d : tane şekil faktörü

v) Köprü ayağı parametreleri

D : ayak çapı

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.

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

Buckingham π teoremi kullanılarak ve tekrar eden parametreler ρ , u_* , b seçildiğinde aşağıda verilen boyutsuz parametreler elde edilmektedir (Yanmaz, 2002).

$$\frac{d_s}{b} = f_1 \left(\frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{Vd_{50}}{\nu}, \Delta, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \frac{d_{50}}{B}, \frac{Vt}{b}, K_r, \frac{K_c}{d_{50}}, \frac{K_b}{d_{50}}, \frac{d_{50}}{b}, \frac{C}{\rho V^2}, \theta, S_0, C_c, K_a, K_\theta, K_G, \sigma_g, K_d, K_s, K_g, K_v \right) \quad (2.2)$$

Burada;

$$\frac{V}{\sqrt{gy}} = \text{Froude sayısı}, \quad \frac{Vd_{50}}{\nu} = \text{Reynolds sayısı}, \quad \Delta = (\rho_s - \rho) / \rho = \text{göreceli}$$

yoğunluk, u_* kayma hızıdır. 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 planda düz olması ($S_0 = \text{sabit}$ 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 2.2 denklemini aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d_s}{b} = f_2 \left(F_r, R_e, \frac{y}{b}, \frac{u_*}{V}, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, \frac{Vt}{b}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.3)$$

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 2.4'te verildiği gibi azaltılabilmektedir.

$$\frac{d_s}{b} = f_3 \left(F_r, \frac{y}{b}, \sigma_g, \frac{b}{d_{50}}, K_s, K_\theta \right) \quad (2.4)$$

2.3 Yaklaşım Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi

Derinlik ve ayak geometrisi, oyulma çukurunun gelişimi süresince, göreceli olarak etkilidir. Sığ sularda oyulma derinliği tamamen yaklaşım akım derinliğine (y) bağlıdır, ayak genişliğinden (b) bağımsız iken derin sularda bu durum tam tersi şeklindedir. Oyulma çukurunun derinliği, orta derinlikli sularda, hem ayak geometrisi, hem de akım derinliğinden etkilenir (Kandasamy 1989). Melville (1997), yaptığı çalışmalar sonucu $b/y < 0,7$ durumu için oyulma derinliğinin yaklaşım 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 yaklaşım 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 şekli de, ayak genişliği kadar oyulma gelişimi sürecinde etkilidir. Laboratuvardaki deneyler, ayakların memba ucu sivrilmesinin, yerel oyulma derinliğini azalttığını göstermiştir. Örneğin, karesel ayaklar etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliği dairesel ayaklara göre daha fazla iken, dairesel ayaklar etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliği sivri uçlu ayaklara göre daha fazladır.

2.4 Yaklaşım Akım Hızının Etkisi

Akım şiddeti, yaklaşım akım hızının kritik hıza oranı (V/V_c) şeklinde gösterilir. $V/V_c \leq 1$ olduğu durumlarda membada bulunan taban malzemesi hareket etmez ve akımın tüm gücü, köprü ayağı etrafındaki oyulma gelişimine harcanır. $V/V_c > 1$ durumunda ise membada taban malzemesi hareketi meydana gelir ve akım gücünün bir kısmı da bu malzeme taşınımı için harcanır. Ayak etrafındaki oyulmanın, yaklaşım akım hızına orantılı olarak gelişmekte olduğunu laboratuvar çalışmaları göstermiştir. Fakat $V/V_c > 1$ durumunda akım gücünün bir kısmı malzeme sürüklenmesine harcanacağından hareketli taban koşullarında temiz su koşullarına göre köprü ayağı etrafında daha az oyulacaktır (Yanmaz, 2002). Burada V yaklaşım akım hızı, V_c ise kritik hızdır. Melville ve Sutherland (1988), kritik hızın (V_c) aşağıda verilen denklem ile hesaplanmasını önermişlerdir.

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5,751 \log \left(5,53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (2.5)$$

Bu ifadedeki u_{*c} değeri kritik kayma hızı olup, d_{50} medyan tane boyutu esas alınarak Shields diyagramından bulunabilir. Ancak pratik olması açısından Melville (1997), u_{*c} 'yi hesaplamak için $u_{*c} = m/s$ ve $d_{50} = mm$ cinsinden olmak üzere aşağıdaki denklem takımına dönüştürmüştür:

$$u_{*c} = 0,0115 + 0,0125d_{50}^{1,4}; \quad 0,1 \text{ mm} < d_{50} < 1 \text{ mm} \quad (2.6a)$$

$$u_{*c} = 0,0305d_{50}^{0,5} - 0,0065d_{50}^{-1} \quad 1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ mm} \quad (2.6b)$$

2.5 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 taneler sürüklenir. Kalın taneleri sürükleyebilecek hızda bir akım yoksa kalın malzemeler ayak tabanında bir zırhlanma bölgesi oluşturur ve ayağı oyulmaya karşı korur.

2.6 Koruyucu Önlem Olarak Kullanılan Riprap için Verilen Bağıntılar

Köprü ayağı etrafında meydana gelen yerel oyulmaları önlemek amacıyla seçilmesi gereken minimum riprap çapı ve riprap tabaka boyutları için yapılan öneriler aşağıda verilmektedir.

2.6.1 Gales (1938)

Gales (1938) seçilmesi gereken riprap tabakasının uzunluğunun köprü ayak genişliğinin 5,5 katı, riprap tabaka genişliğinin ise 5,0 katı olması gerektiğini önermiştir.

2.6.2 Bonasoundas (1973)

Bonasoundas (1973) yaptığı çalışmalar sonucunda riprap tabaka uzunluğunun ayak genişliğinin 7 katı (2,5 katı ayağın mansap kısmında kalacak şekilde), genişliğinin 6 katı ve tabaka kalınlığının ayak genişliğinin 1/3'ü kadar olmasını önermiştir. Ayrıca seçilmesi gerekli minimum riprap dane boyutunu da denklem 2.7 bağıntısı ile vermiştir.

$$D_{50} = 6 - 3,3U + 4U^2 \quad (2.7)$$

Burada;

D_{50} : riprapın ortalama dane boyutu (m),

U: ortalama akım hızıdır (m/s).

2.6.3 Neill (1973)

Neill (1973) riprap tabakasının köprü ayağı etrafına ayak genişliğinin 1,5 katı kadar genişletilerek yerleştirilmesini ve tabaka kalınlığının da riprap çapının 2 katından büyük olması gerektiğini önermiştir.

2.6.4 Posey (1974)

Posey (1974) riprap tabakasının köprü ayak etrafına her yönden ayak genişliğinin 1,5 ile 2,5 katı kadar yerleştirilmesini önermiştir.

2.6.5 Breusers ve diğer. (1977)

Kullanılması gereken minimum riprap çapı seçimi için verilen bağıntı aşağıda verilmektedir.

$$D_{50} = \frac{1,384U^2}{(S_s - 1)2g} \quad (2.8)$$

Burada;

D_{50} : riprapın ortalama dane boyutu (m),

U: ortalama akım hızı (m/s),

S_s : riprapın bağıl özgül ağırlığı ($S_s = 2,65$),

g: yer çekimi ivmesidir ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

2.6.6 Richardson ve diğer. (1991)

Rırap tabaka genişliğini ayak genişliğinin iki katı, tabaka kalınlığının ise rırap dane çapının üç katından fazla olması gerektiğini belirlemişlerdir. Minimum rırap çapı için ise aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$D_{50} = \frac{0,692(KU)^2}{(S_s-1)2g} \quad (2.9)$$

Burada;

D_{50} : rırapın ortalama dane boyutu (m),

K: yuvarlak burunlu ayak için 1,5 ve dikdörtgen ayak için 1,7

U: ortalama akım hızı (m/s),

S_s : rırapın bağıl özgül ağırlığı ($S_s = 2,65$),

g: yer çekimi ivmesidir ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

2.6.7 Richardson ve Davis (1995)

Richardson ve Davis'in (1995) seçilmesi gerek rırap çapı için verdikleri bağıntı aşağıda görülmektedir.

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{0,346 f_1^2 f_2^2}{S_s-1} Fr^2 \quad (2.10)$$

Burada;

D_{50} : rırapın ortalama dane boyutu (cm),

y: yaklaşım akım derinliği (cm),

f_1 : köprü ayak şekil faktörü (Yuvarlak burunlu köprü ayaklarında 0,71 dikdörtgen köprü ayaklarında 1,0 alınır.),

f_2 : köprü ayağı kıyıya yakın olduğunda 0,9; ana akımın olduğu köprü ayağında 1,7 alınır,

S_s : rırapın bağıl özgül ağırlığı ($S_s = 2,65$),

Fr^2 : Froude sayısının karesidir.

2.6.8 Parola (1993,1995)

Yapılan çalışmalarda seçilmesi gereken riprap boyutunun ifadesi denklem 2.11'de verilmiştir.

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{f_1 f_3}{S_s - 1} Fr^2 \quad (2.11)$$

Burada;

D_{50} : riprapın ortalama dane boyutu (cm),

y : yaklaşım akım derinliği (cm),

f_1 : köprü ayak şekil faktörü (Yuvarlak burunlu köprü ayaklarında 0,71 dikdörtgen köprü ayaklarında 1,0 alınır.),

f_3 : ayak boyut faktörü,

S_s : riprapın bağıl özgül ağırlığıdır ($S_s = 2,65$),

Fr^2 : Froude sayısının karesidir.

$$f_3 = 0,83 ; 4 < \frac{b}{D_{50}} < 7 \quad (2.12a)$$

$$f_3 = 1,00 ; 7 < \frac{b}{D_{50}} < 14 \quad (2.12b)$$

$$f_3 = 1,25 ; 20 < \frac{b}{D_{50}} < 33 \quad (2.12c)$$

b : köprü ayağının öngörülen genişliğidir.

2.6.9 Lauchlan (1999)

Lauchlan (1999) riprap çapı seçimi için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$\frac{D_{50}}{y} = 0,3S_f \left(1 - \frac{Y_r}{y}\right)^{2,75} Fr^{1,2} \quad (2.13)$$

Burada;

D_{50} : riprapın ortalama dane boyutu (cm),

y : yaklaşım akım derinliği (cm),

S_f : güvenlik faktörü (minimum değeri 1,1 olarak önerilmiştir),

Y_f : riprap tabakasının yatak seviyesinden itibaren olan derinliği,

Fr : Froude sayısıdır.

2.7 Koruyucu Önlem Olarak Kullanılan Yaka için Verilen Bağlıntılar

Köprü ayağı etrafında meydana gelen yerel oyulmaları önlemek amacıyla kullanılması gereken yaka boyutları için yapılan öneriler aşağıda verilmektedir.

2.7.1 Kumar ve diğer. (1999)

Deneylerinde kullandığı yakanın kalınlıkları 3mm'dir. 61 ve 112,5mm iki farklı köprü ayağında deneylerini gerçekleştirmişlerdir. 112,5mm lik köprü ayağında beş farklı yaka genişliği (1,5b; 2,0b; 2,5b; 3,0b ve 4,0b), 61mm lik köprü ayağında tek yaka genişliği (2,5b) kullanılmıştır. Temiz su oyulmasını üniform taban malzemesinde incelemişlerdir, deney süreleri üç saattir. Aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$\left(\frac{ds_p - ds_c}{ds_p}\right) = 0,057 \left(\frac{B}{b}\right)^{1,612} \left(\frac{H}{Y_0}\right)^{0,837} \quad (2.14)$$

Burada;

ds_p : korumasız köprü ayağındaki denge oyulma derinliği (mm),

ds_c : yakalı köprü ayağındaki denge oyulma derinliği (mm),

B : yaka çapı (cm),

b : köprü ayağı çapı (cm),

H : serbest su yüzeyinin altındaki yaka derinliği (mm)

y_0 : akım derinliğidir (mm).

2.7.2 Masjedi ve diğeri. (2010)

Yaptıkları deneylerde köprü ayağını en iyi koruyan yaka genişliğini köprü ayağının 3,0 katı olarak bulmuşlardır. Ayrıca aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$\frac{d_s}{B} = 1,45 \left(\frac{W}{B}\right)^{1,24} \left(\frac{H+4,5}{B}\right)^{0,085} \ln\left(\frac{t+360}{t_e}\right)^{0,185} \quad (2.15)$$

Burada;

d_s : oyulma derinliği (mm),

B : köprü ayak genişliği (mm),

W : yaka genişliği (mm),

H : serbest su yüzeyinin altındaki yaka derinliği (mm),

t : oyulma zamanı (s),

t_e : oyulmanın dengeye ulaşma zamanıdır (s).

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

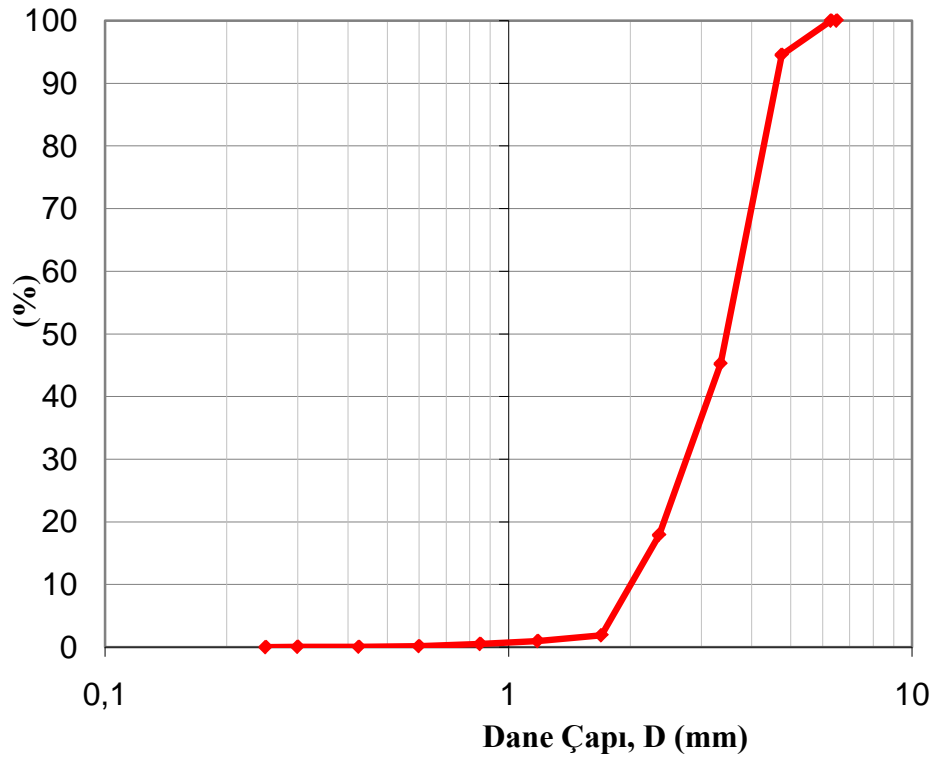
3.1 Deney Düzenegi

Şekil 3.1'de gösterilmekte olan deney düzenegi DEÜ Hidrolik Laboratuvar'ında TÜBİTAK 106M274 nolu proje kapsamında inşa edilmiştir. Deney kanalı 18,6 m uzunluğunda, 80 cm genişliğinde, 75 cm derinliğindedir. Deneyler sırasında kullanılan üniform taban malzemesi, kanalın 7. ve 13. metreleri arasında, 25 cm kalınlığında konulmuştur. Kanalın ilk 6 ve son 5 metrelerinde 20 cm yüksekliğinde gaz betonu mevcut olup bu beton blokların üzerine 5 cm kalınlığında üniform taban malzemesi yerleştirilmiştir.

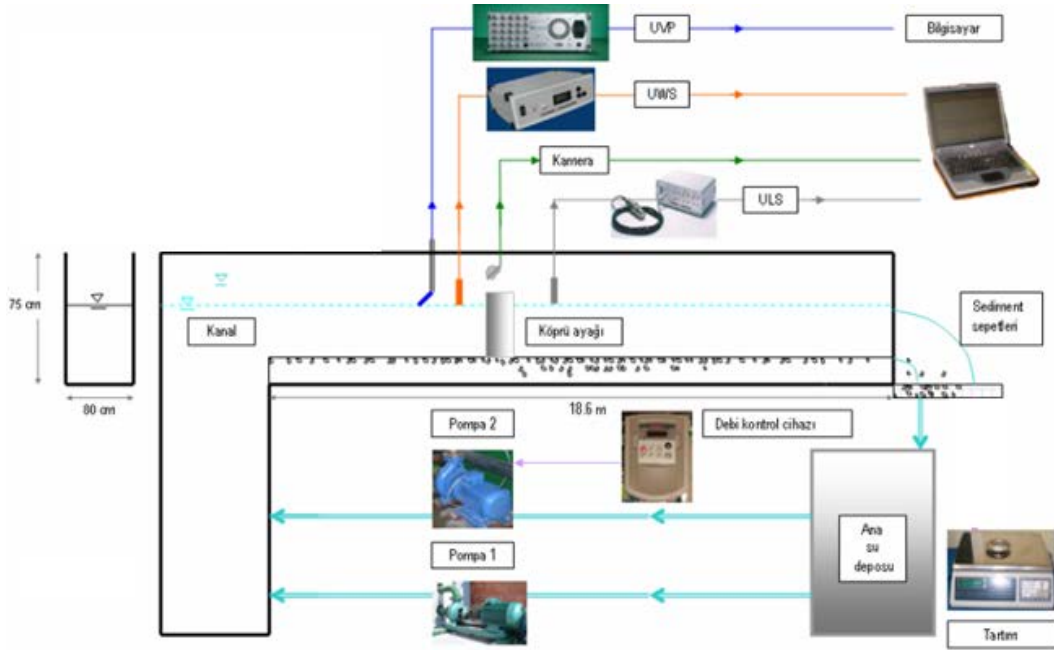


Şekil 3.1 Deney düzeneginin genel görünümü

Deneylerde üniform taban malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin ortalama medyan çapı (d_{50}) 3,47 mm , geometrik standart sapması (σ_g) 1,39'dur. Granülometri eğrisi, Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Şekil 3.3'te deney düzeneginin 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. Deneylerde kullanılan üçgen hidrograflar bir bilgisayar programı yardımı ile pompa devir sayısına müdahale ederek oluşturulmuştur. Şekil 3.4a ve

3.4b’de sisteme suyu basan pompa ile pompa devir sayısını ayarlayan hız kontrol cihazı görülmektedir. Kanal mansabında bulunan su deposu 27 m³ hacindedir.



Şekil 3.4 a) Pompa b) Hız Kontrol Cihazı

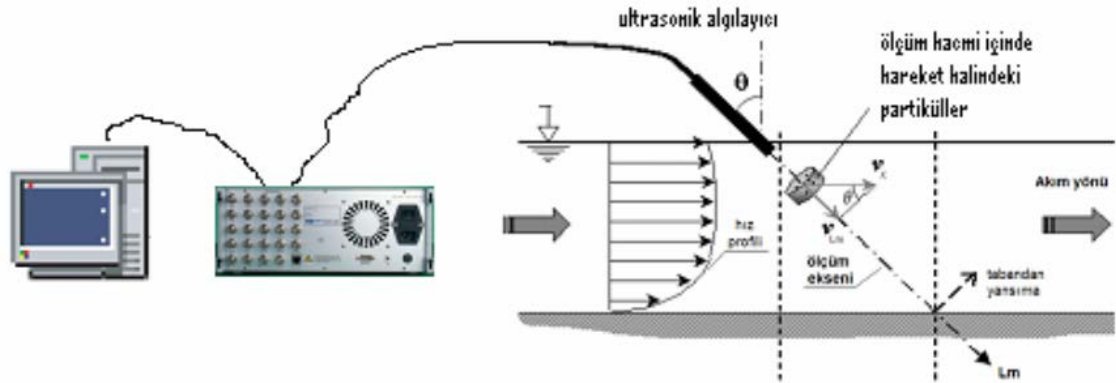
Deneyler sırasında debi, Krohne firması tarafından üretilen, Şekil 3.5'te gösterilen elektromanyetik debimetre ile zamana bağlı ölçülmüş ve eşzamanlı olarak bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 3.5 Elektromanyetik debimetre

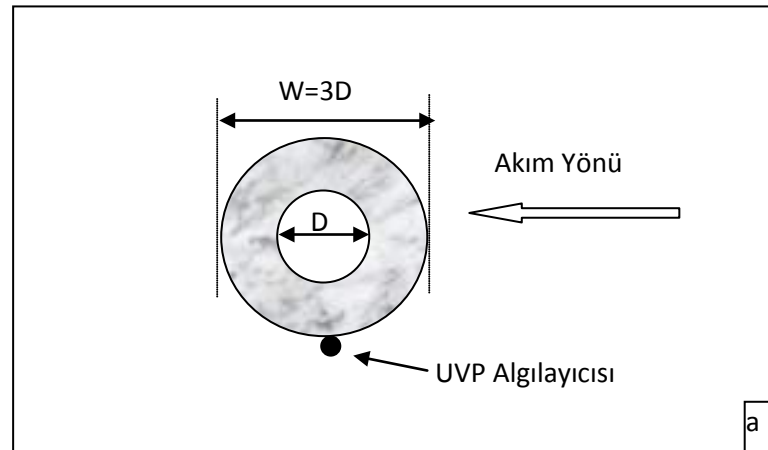
Oyulma derinliği, deneyler sırasında zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler için İsviçre Met-Flow firması tarafından üretilen Ultrasonic Velocity Pofiller (UVP) cihazının algılayıcıları kullanılmıştır. Cihazın asıl amacı akustik yöntemle hız ölçümüdür. Yüksek frekanslı ses dalgaları, su içindeki parçacıklara çarpar, sonra yansırarak geri döner. Bu geri dönen ses frekanslarındaki değişimi kullanılarak akım hızı saptanabilmektedir. Aynı frekansta algılayıcı kullanmak şartıyla birden fazla

algılayıcı cihaza bağlanabilmektedir. Şekil 3.6'da UVP cihazının çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.6 UVP'nin çalışma prensibi (METFLOW, 2002)

Bu çalışmada UVP algılayıcısı köprü orta ayağı etrafına Şekil 3.7(a) ve 3.7(b)'de görüldüğü şekilde yerleştirilmiştir. UVP algılayıcısı tarafından gönderilen ve tabandan yansıyan dalgalar takip edilerek Güney ve diğer. (2012)'nin verdiği yöntemle tabanda meydana gelen değişim zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Köprü orta ayağı kanalın memba ucundan 11,5 m uzaklıkta bulunmaktadır.



Şekil 3.7(a) UVP algılayıcısının yeri



Şekil 3.7(b) Köprü kenarına yerleştirilen algılayıcı

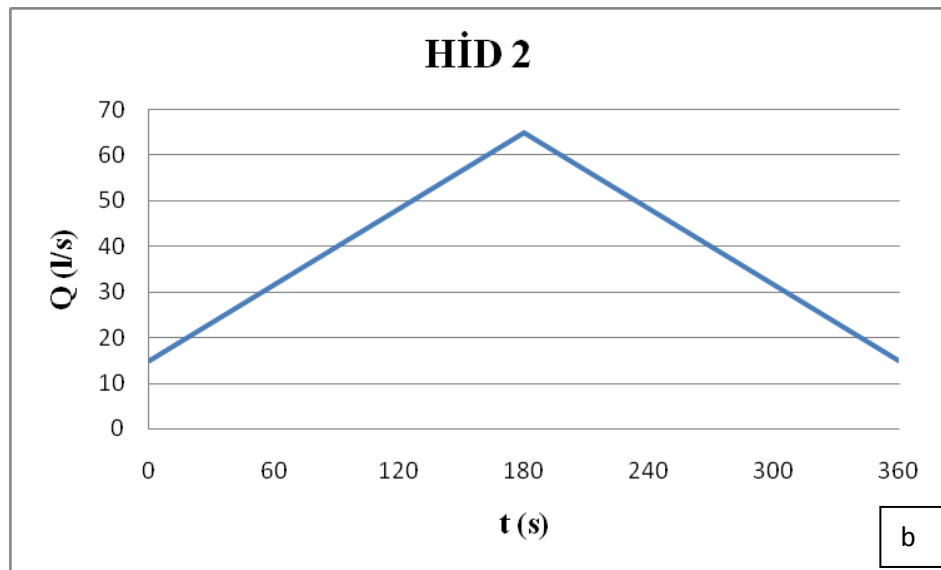
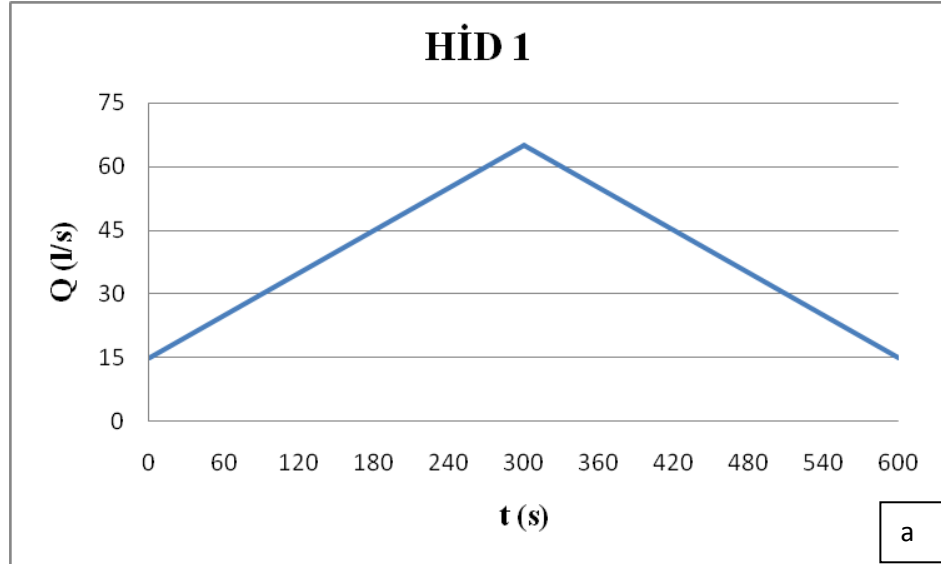
ULS (Ultrasonic Level Sensor) cihazı, yaklaşım akım derinliğini ölçmek için kullanılmıştır. ULS algılayıcısı Şekil 3.8'de görülmektedir. Cihazın 4 adet algılayıcısı Hidrolik laboratuvarında mevcut olup 4 farklı kesitten akım derinliği eş zamanlı olarak kayda alınabilmektedir. Cihazın hassasiyeti $\pm 0,1$ mm'dir.



Şekil 3.8 ULS Cihazı

Köprü orta ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmaları incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler sırasında kullanılan hidrograflar Şekil 3.9(a) ve 3.9(b)'de verilmektedir. Debi 15 l/s'den 65 l/s değerine Hid 1'de 300 saniyede Hid 2'de ise 180

saniyede ulaşmaktadır. Pik debiye ulaştıktan sonra debi azalarak aynı süreler içinde 15 l/s değerine geri düşmektedir.



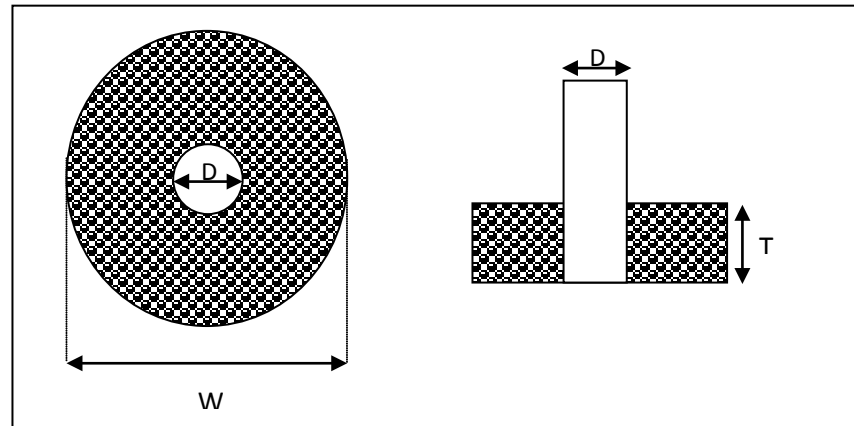
Şekil 3.9 (a) Hid 1(b) Hid 2 debi zaman grafikleri

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Riprap Kullanılarak Elde Edilen Deney Sonuçları

Riprap deneyleri Şekil 3.9 a ve 3.9 b'de verilen Hid 1 ve Hid 2 nolu hidrograflar altında gerçekleştirilmiştir. Kullanılması gereken minimum riprap çapının belirlenmesi için denklem (2.13) kullanılmış ve riprap çapı 2,20 cm olarak belirlenmiştir. Üniform riprap malzemesi, çapı 8 cm olan dairesel kesitli köprü ayağı etrafına yerleştirilmiştir (Şekil 4.1). Farklı riprap genişlikleri (W) ve kalınlıkları (T) kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonrasında bu riprap çapı için fazla oyulma meydana gelmemiştir. Böylece denklem 2.13 ile bulunan riprap dane çapının gerçekten de oyulmayı önlediği gözlenmiştir. Bu sebeple riprap dane çapı taban malzemesinin 2 katı büyüklüğünde olacak şekilde 0,70 cm olarak değiştirilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney ayrıntıları Hid 1 ve Hid 2 hidrografları için sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmektedir. Yapılan deneylerde debi ölçümü kanala suyu basan boru hattı üzerinden yaklaşım akım derinliği ise kanalın içerisindeki köprü ayağının önünden ölçülmüştür. Bu nedenle yaklaşım akım derinliği pik değerine debi pik değerinden 12 saniye sonra ulaşmıştır. R16 ve R17 deneyleri, 8 cm çapında köprü kenar ayağı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup deneylerde oyulma gözlenmemiştir.



Şekil 4.1 Köprü ayağı etrafına yerleştirilen riprap düzeneğinin şematik gösterimi (TÜBİTAK 109M637 Nihai Rapor, 2012)

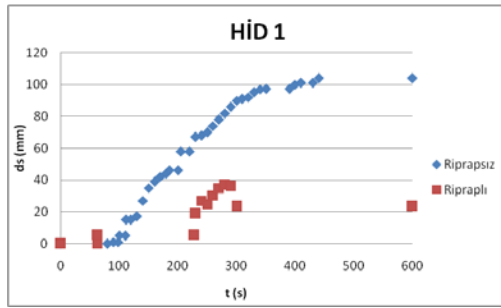
Tablo 4.1Hid 1 hidrografi ile gerçekleştirilen deneyler

Deney No	Riprap yeri	D ₅₀ (mm)	W _{riprap} (cm)	t _{riprap} (mm)	Nihai oyulma derinliği d _s (mm)
R1	Yüzeyde	22	40	44	Oyulma Yok
R2	Yüzeyde	22	40	22	Oyulma Yok
R3	Yüzeyde	22	30	22	Oyulma Yok
R4	Yüzeyde	22	20	22	23,4
R5	Yüzeyde	22	20	44	Oyulma Yok
R6	1cm gömülü	22	20	22	Riprapta Oyulma Yok
R7	Yüzeyde	7	40	7	69,0
R16	Yüzeyde	22	20	44	Oyulma Yok

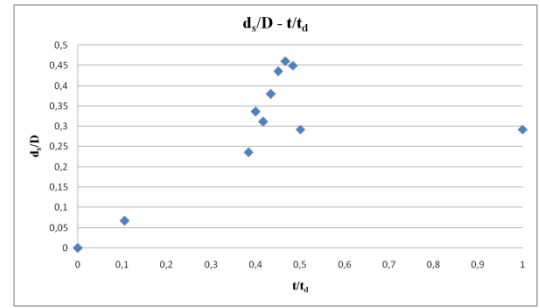
Tablo 4.2Hid 2 hidrografi ile gerçekleştirilen deneyler

Deney No	Riprap yeri	D ₅₀ (mm)	W _{riprap} (cm)	t _{riprap} (mm)	Nihai oyulma derinliği d _s (mm)
R8	Yüzeyde	22	40	44	Oyulma Yok
R9	Yüzeyde	22	40	22	Oyulma Yok
R10	Yüzeyde	22	30	22	Oyulma Yok
R11	Yüzeyde	22	20	22	37,50
R12	Yüzeyde	22	20	44	Oyulma Yok
R13	1cm gömülü	22	20	22	Riprapta Oyulma Yok
R14	Yüzeyde	7	40	7	53,8
R15	Yüzeyde	7	Dikdörtgen a=32 ve b=80	7	60,0
R17	Yüzeyde	22	20	44	Oyulma Yok

R4 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.2'de görülmektedir. Riprap malzemesi taban malzemesi ile aynı hizada olup riprap boyutu, taban malzemesinin yaklaşık 7 katı kadardır. Riprap, köprü ayağı etrafına tek sıra halinde yerleştirilmiş, kalınlığı bir riprap malzemesi kadar ve çevresi 20 cm'dir (2,5xD). Bu deney sonucunda riprap tabakasının köprü ayağı etrafındaki oyulmaları % 77,50 azalttığı gözlemlenmiştir. t_d deneyin toplam süresi olmak üzere göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zamana (t/t_d) bağlı değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

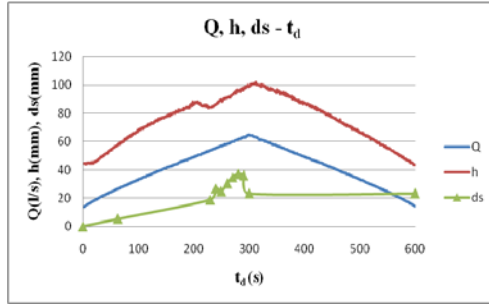


Şekil 4.2 R4 deneyi oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri

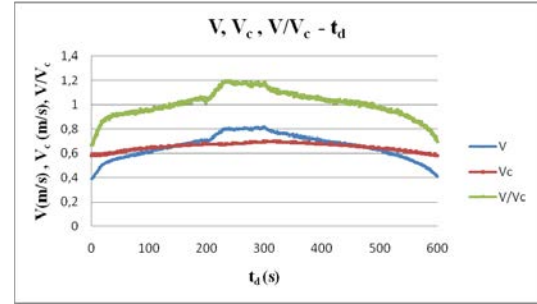


Şekil 4.3 R4 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi

Köprü ayağı etrafında oyulma 280. saniyede en yüksek değerine ulaşmıştır ancak kanalın başından sürüklenen sediment oyulma çukurunu bir miktar yeniden doldurmuştur. Şekil 4.4'te hidrograf boyunca köprü orta ayağı etrafında meydana gelen oyulma, su derinliği ve debi değerleri verilmektedir. Yaklaşım akım hızı (V), kritik hız (V_c) ve akım şiddetinin (V/V_c) boyutsuz zaman ile değişim grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Akım şiddeti değerinin 1'den büyük olması durumunda kanal membasından da taban malzemesi taşınmakta ve hareketli taban oyulması meydana gelmektedir. Şekil 4.5'ten de görüldüğü gibi 145-465 saniyeleri arasında akım şiddeti 1'in üzerine çıkmaktadır.

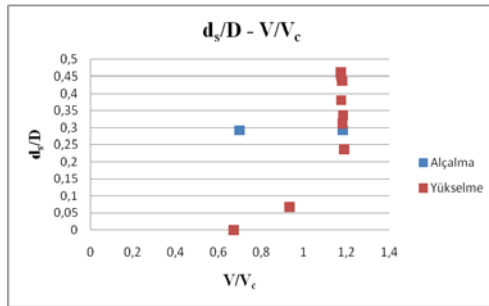


Şekil 4.4 R4 deneyi sırasında ölçülen debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi

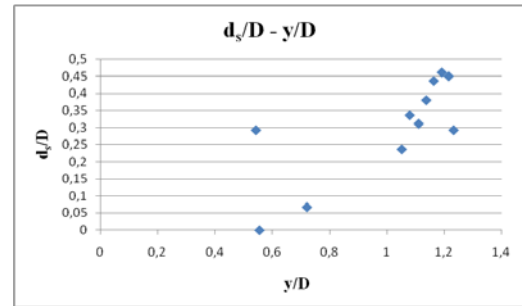


Şekil 4.5 R4 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi

Şekil 4.6'da hidrografın yükselme eğrisi için akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliğinin değişimi verilmektedir. Şekil 4.7'de yükselme eğrisi süresince yaklaşım akım derinliği ile boyutsuz oyulma derinliğinin değişimini gösteren grafik görülmektedir.



Şekil 4.6 R4 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



Şekil 4.7 R4 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi

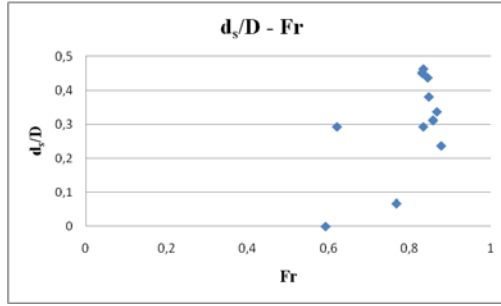
Şekil 4.8'de hidrografın yükselme eğrisi için boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi gösterilmiştir.

$$F_d : \text{Yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısı} = V_0 / (g' d_{50})^{1/2}$$

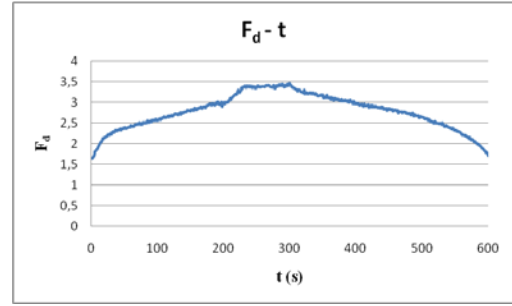
$$g' : \text{Göreceli yerçekimi ivmesi} = [(\rho_s - \rho) / \rho] g$$

d_s : Oyulma derinliğidir.

Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının zamana bağlı değişimi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

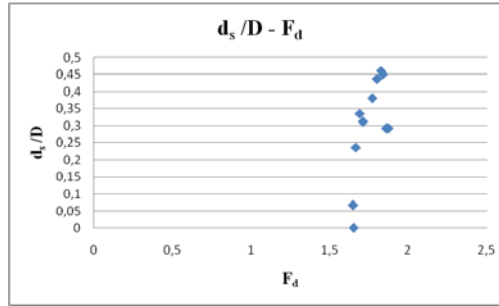


Şekil 4.8 R4 deneyi Froude sayısı ve boyutsuz derinliğinin değişimi



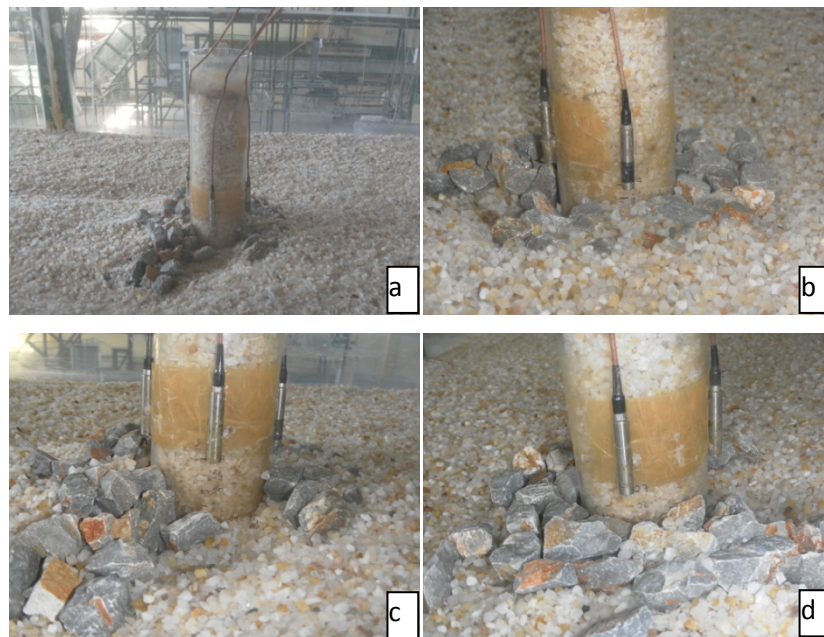
Şekil 4.9 R4 yoğunluk esaslı tane oyulma Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki

Şekil 4.10'da yoğunluk esaslı tane Froude sayısı ile boyutsuz oyulma derinliği değişimi verilmektedir.



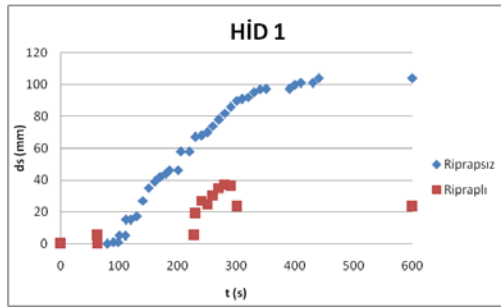
Şekil 4.10 R4 yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

R4 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.11'de verilmektedir.

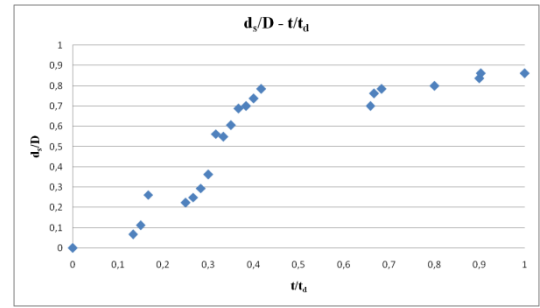


Şekil 4.11(a)(b)(c)(d) R4 deneyi sonundaki çekilen fotoğraflar

R7 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.12'de görülmektedir. Riprap malzemesi taban malzemesi ile aynı hizada olup riprap boyutu, taban malzemesinin yaklaşık 2 katı kadardır. Riprap, köprü ayağı etrafına tek sıra halinde yerleştirilmiş, kalınlığı bir riprap malzemesi kadar ve çevresi 40 cm'dir (5xD). Riprapın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %33,65 azalttığı yapılan deneylerde gözlemlenmiştir. Göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zamanla değişimi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

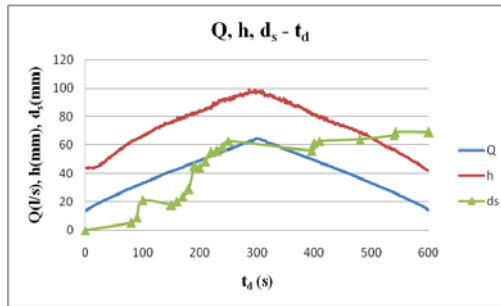


Şekil 4.12 R7 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri

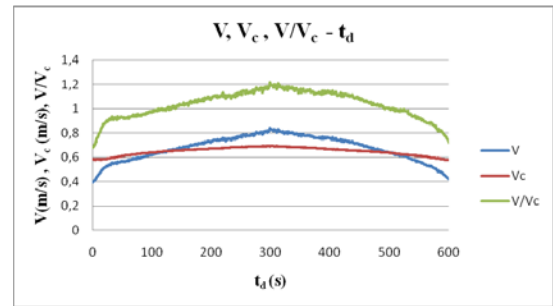


Şekil 4.13 R7 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi

Şekil 4.14'te hidrograf süresince kanalda ölçülen oyulma, debi ve su derinliği değerleri verilmektedir. Şekil 4.15'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zamanla aldığı değerler görülmektedir. Debinin en yüksek değeri aldığı noktada akım hızının artmasına bağlı olarak akım şiddeti de artar. Hidrograf başladıktan yaklaşık 120 saniye sonra akım şiddeti değeri, kritik 1,0 barajını aşarak temiz su durumundan hareketli taban koşuluna geçmektedir.

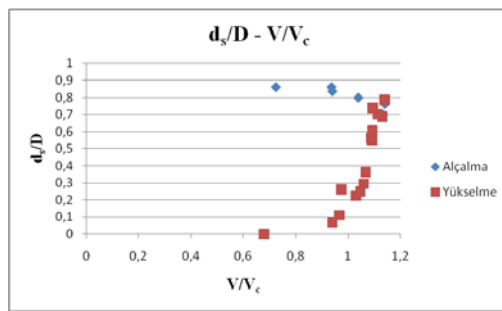


Şekil 4.14 R7 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi

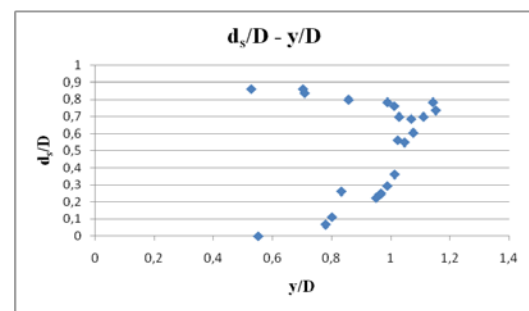


Şekil 4.15 R7 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi

Şekil 4.16'da hidrografın yükselme eğrisi için akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliğinin değişimi verilmektedir. Oyulma çukurunun oluşumunda derinlik ve ayak geometrisi, suyun durumuna göre değişmektedir. Sığ sularda oyulma derinliği yaklaşık akım derinliğine (y) bağlıdır, ayak genişliğinden (D) bağımsızdır. Derin sularda ise ayak genişliği akım derinliğine göre daha önemlidir. Orta derinlikli sularda oyulma derinliği, hem ayak geometrisine hem de akım derinliğine aynı derecede bağlıdır (Kandasamy, 1989). Şekil 4.17'de yaklaşık akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi verilmiştir.

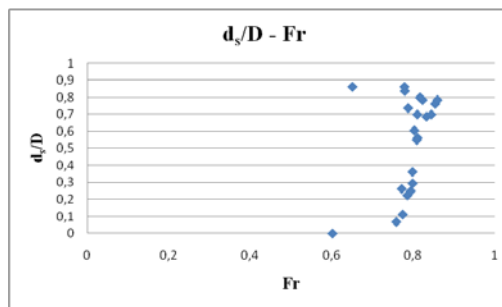


Şekil 4.16 R7 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

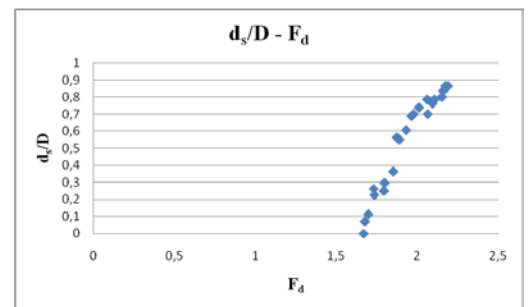


Şekil 4.17 R7 deneyi yaklaşık akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi

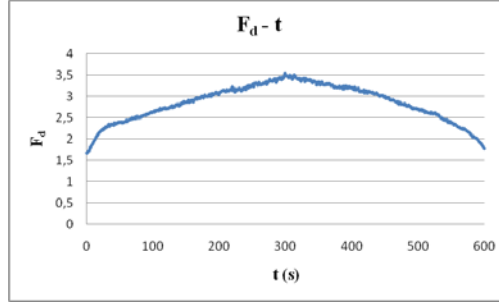
Şekil 4.18'te görüldüğü gibi akım Froude sayısı arttıkça oyulma derinliği deney başında artmaktadır. Şekil 4.19'da yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliğine olan etkisi yer almaktadır. Grafikten görüleceği gibi bu parametre arttıkça oyulma derinliği artmaktadır. Zamana bağlı yoğunluk esaslı tane Froude sayısının değişimi Şekil 4.20'de verilmiştir. R7 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.21'de verilmektedir.



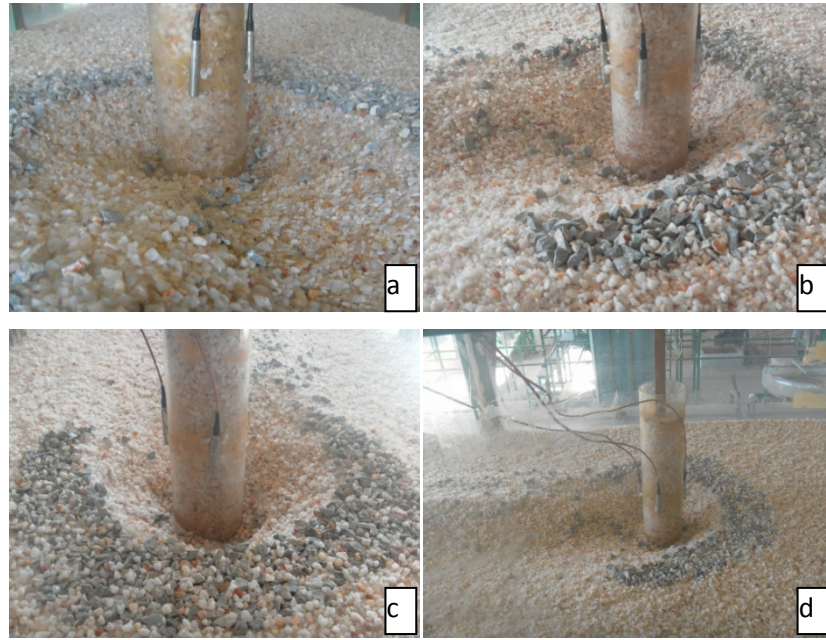
Şekil 4.18 R7 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.19 R7 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



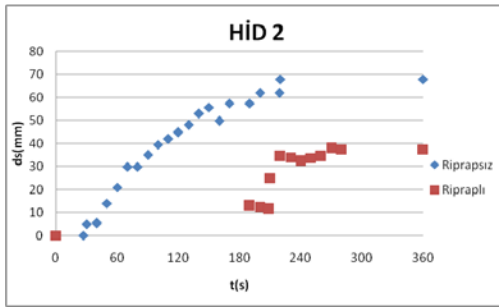
Şekil 4.20 R7 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



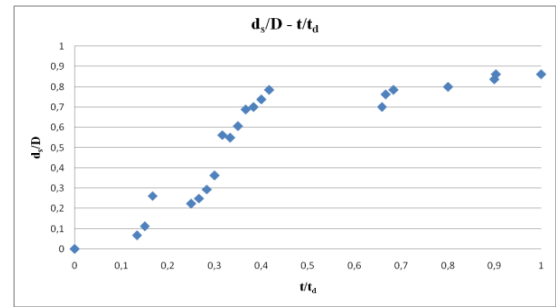
Şekil 4.21 (a)(b)(c)(d) R7 deneyi sonundaki çekilen fotoğraflar

R11 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.22'de görülmektedir. Riprap malzemesi taban malzemesi ile aynı hizada olup riprap boyutu, taban malzemesinin yaklaşık 2 katı kadardır. Riprap, köprü ayağı etrafına tek sıra halinde yerleştirilmiş, kalınlığı bir riprap malzemesi kadar ve çevresi 20 cm'dir ($2,5 \times D$). Riprapın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %44,85 azalttığı yapılan deneylerde gözlemlenmiştir. Göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zamanla değişimi Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Şekil 4.24'te hidrograf süresince kanalda ölçülen oyulma, debi ve su derinliği değerleri verilmektedir. Şekil 4.25'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zamanla aldığı değerler görülmektedir. Debinin en yüksek değeri aldığı noktada akım hızının artmasına bağlı olarak akım

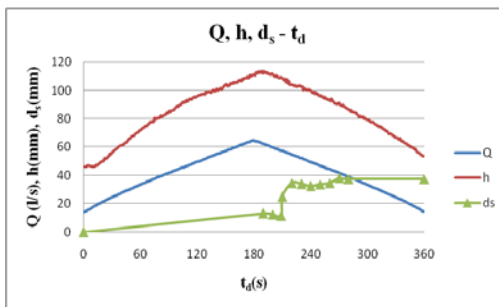
şiddeti de artar. Hidrograf başladıktan yaklaşık 120 saniye sonra akım şiddeti değeri, kritik 1,0 barajımı aşarak temiz su durumundan hareketli taban koşuluna geçmektedir. Şekil 4.26'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.27'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi verilmiştir. Şekil 4.28'te görüldüğü gibi akım Froude sayısı arttıkça oyulma derinliği deney başında artmaktadır. Şekil 4.29'da yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliğine olan etkisi yer almaktadır. Grafikten görüleceği gibi bu parametre arttıkça oyulma derinliği artmaktadır. Zamana bağlı yoğunluk esaslı tane Froude sayısının değişimi Şekil 4.30'da verilmiştir. R11 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.31'de verilmektedir.



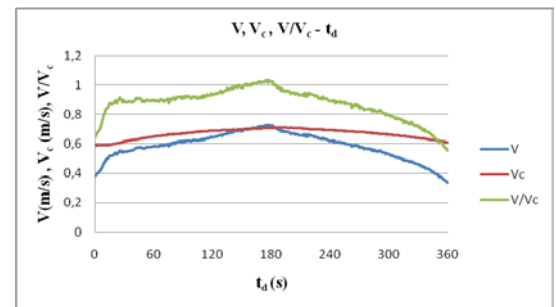
Şekil 4.22 R11 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



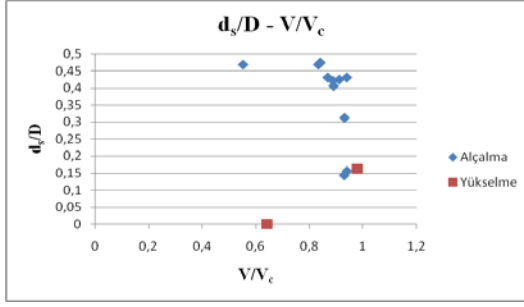
Şekil 4.23 R11 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



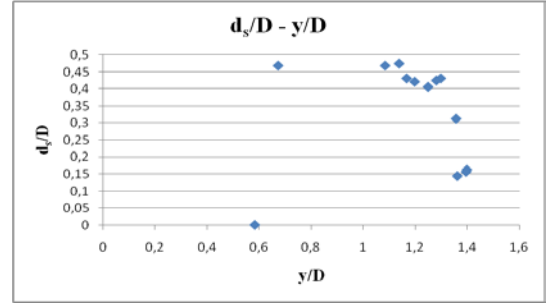
Şekil 4.24 R11 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



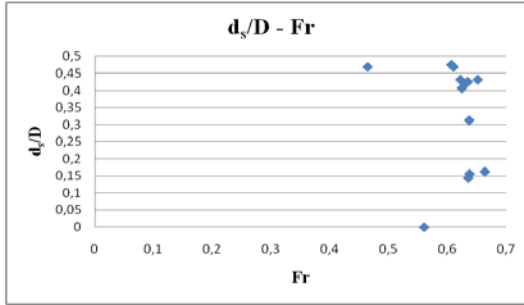
Şekil 4.25 R11 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



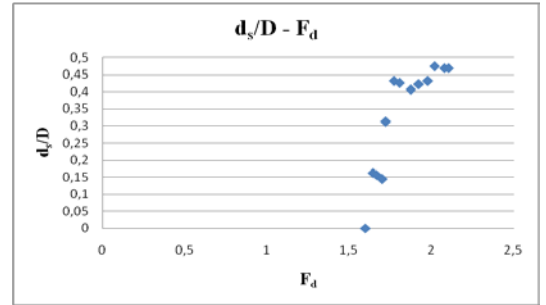
Şekil 4.26 R11 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



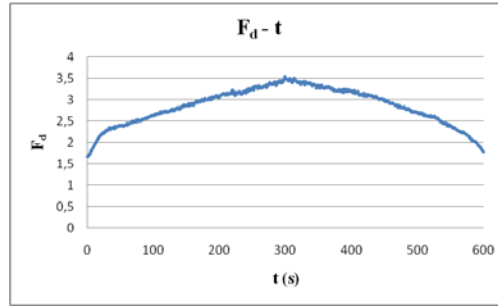
Şekil 4.27 R11 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



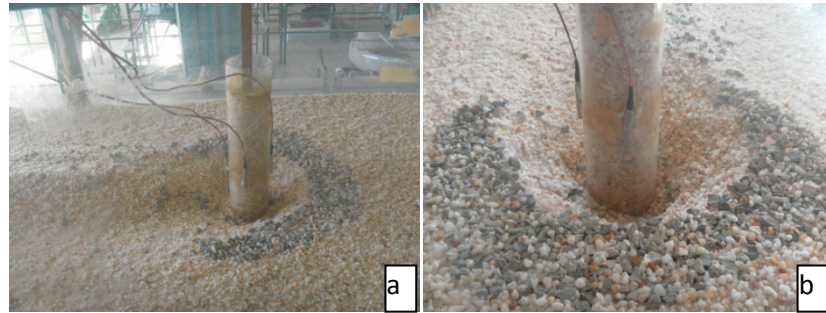
Şekil 4.28 R11 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi

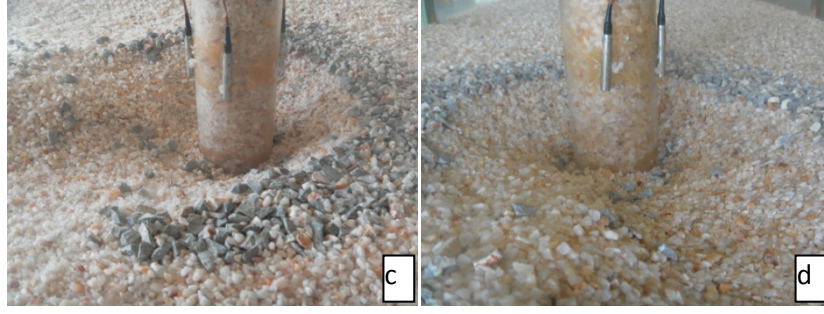


Şekil 4.29 R11 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



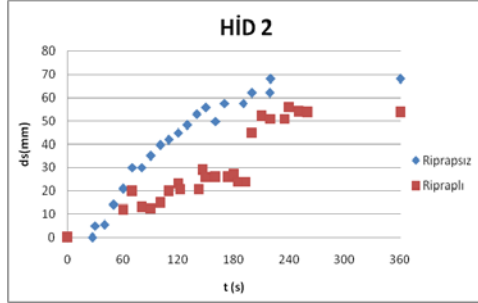
Şekil 4.30 R11 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



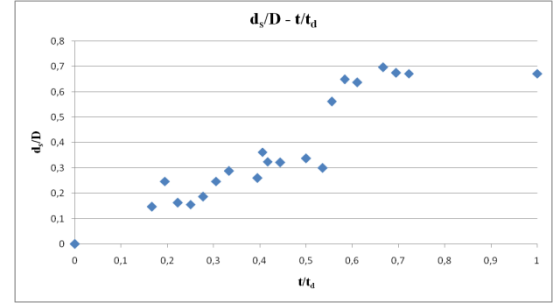


Şekil 4.31 (a)(b)(c)(d) R11 deneyi sonundaki çekilen fotoğraflar

R14 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.32’de görülmektedir. Riprap malzemesi taban malzemesi ile aynı hizada olup riprap boyutu, taban malzemesinin yaklaşık 2 katı kadardır. Riprap, köprü ayağı etrafına tek sıra halinde yerleştirilmiş, kalınlığı bir riprap malzemesi kadar ve çevresi 40 cm’dir (5xD). Riprapın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %20,88 azalttığı yapılan deneylerde gözlemlenmiştir. Oyulma derinliğinin boyutsuz zamanla değişimi Şekil 4.33’te gösterilmiştir.



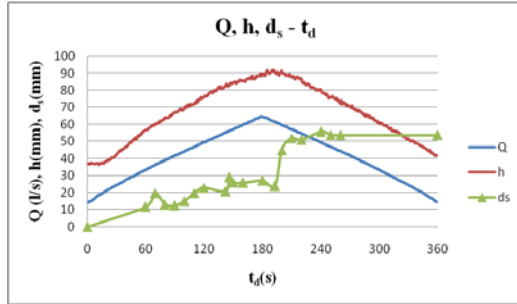
Şekil 4.32 R14 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



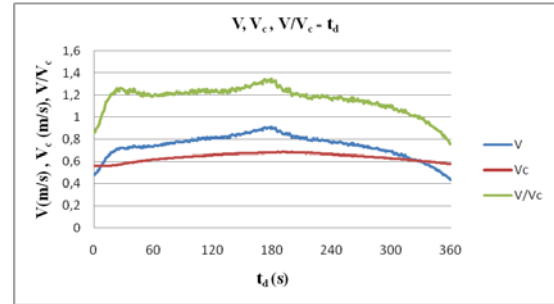
Şekil 4.33 R14 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi

Köprü ayağı çevresine yerleştirilen riprap genişliğinin arttırılmasına rağmen oyulmanın 53,8 mm olmasının nedeni, riprap dane boyutunun küçültülmesidir. Şekil 4.34’te deney süresi boyunca ortalama debi, su seviyesi ve oyulma derinliği grafiği verilmiştir. Şekil 4.35’te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddeti boyutsuz zaman grafiği bulunmaktadır. Akım şiddetinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi Şekil 4.36’da gösterilmiştir. Şekil 4.38’de boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekil 4.39’da boyutsuz oyulma derinliğinin

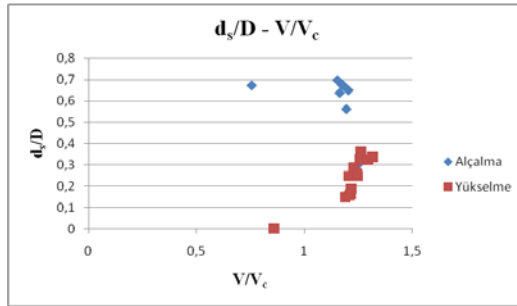
yoğunluk esaslı tane Froude sayısı ile arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 4.40'ta zamana bağlı yoğunluk esaslı tane Froude sayısının grafiği verilmektedir. R14 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.41'de verilmektedir.



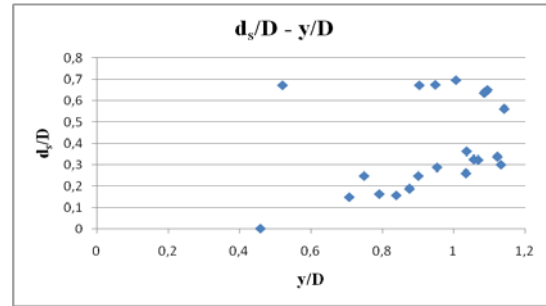
Şekil 4.34 R14 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



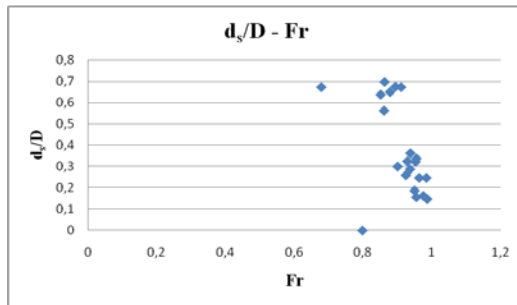
Şekil 4.35 R14 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



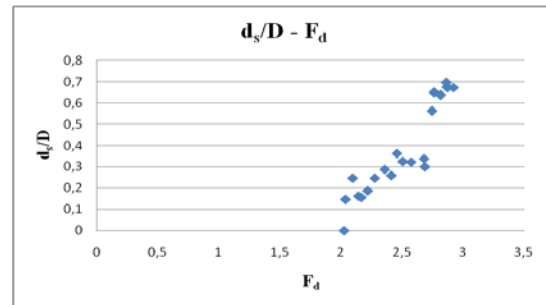
Şekil 4.36 R14 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



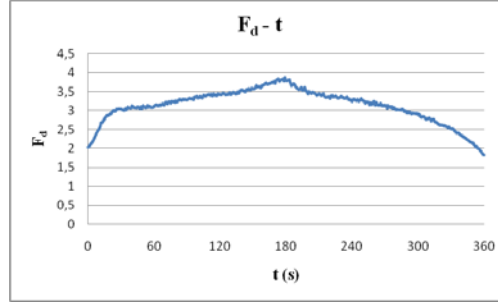
Şekil 4.37 R14 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



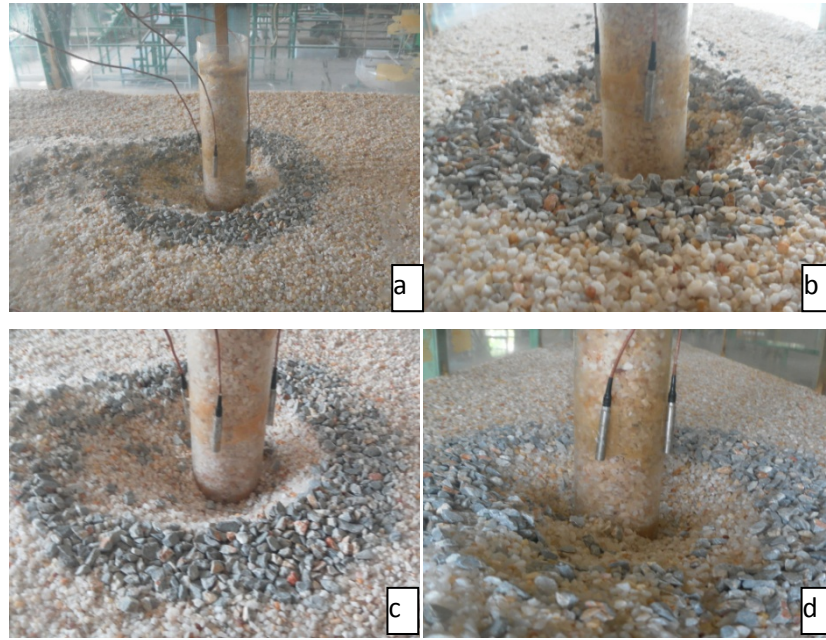
Şekil 4.38 R14 deneyi boyutsuz oyulma derinliği Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.39 R14 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

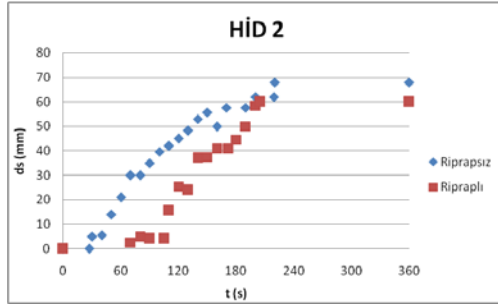


Şekil 4.40 R14 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısının (F_d) zamana bağlı değişimi

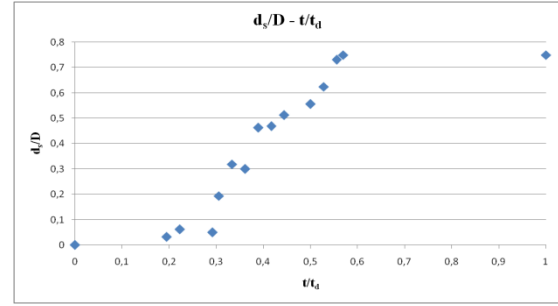


Şekil 4.41 (a)(b)(c)(d) R14 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar

R15 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.42'de görülmektedir. Riprap malzemesi taban malzemesi ile aynı hizada olup riprap boyutu, taban malzemesinin yaklaşık 2 katı kadardır. Riprap, köprü ayağı etrafına çift sıra halinde yerleştirilmiş, kalınlığı iki riprap malzemesi kadardır. Serilen riprap örtüsünün genişliği kanal genişliği kadar (80cm) eni 32cm'dir. Riprapın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %11,76 azalttığı yapılan deneylerde gözlemlenmiştir. Oyulma derinliğinin zamanla değişimi Şekil 4.43'te gösterilmiştir.

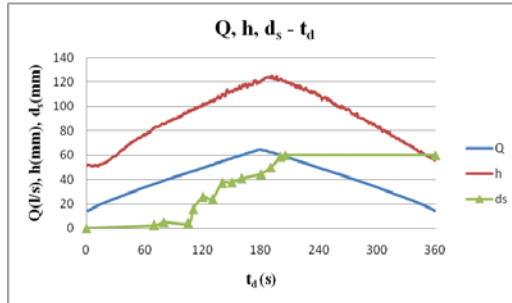


Şekil 4.42 R15 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri

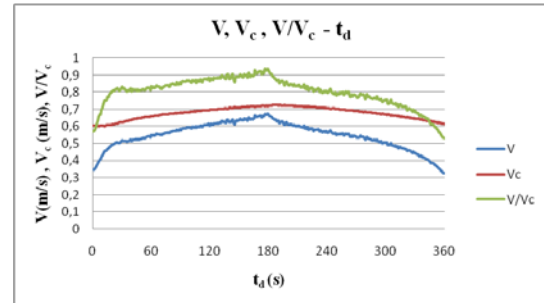


Şekil 4.43 R15 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi

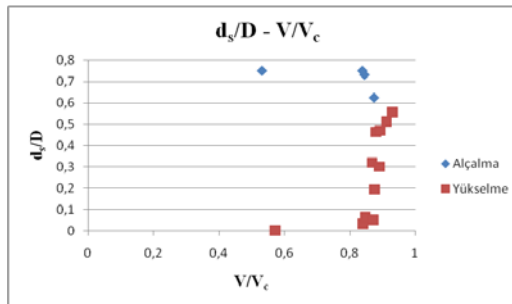
R15 deneyinde gelen akım pik debiye ulaştıktan sonra alçalma süresinin başında oyulma dengeye ulaşmıştır. Şekil 4.44'te ortalama debi, su seviyesi ve oyulma derinliği grafiği verilmiştir. Şekil 4.45'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddeti değerinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.46'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki değişim, Şekil 4.47'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi gösterilmiştir.



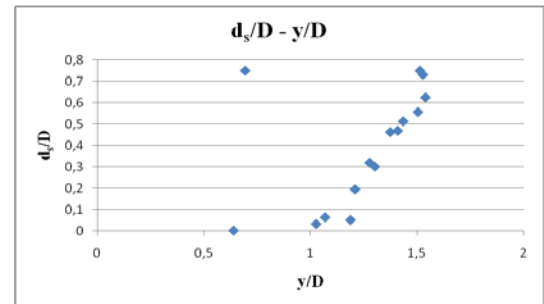
Şekil 4.44 R15 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



Şekil 4.45 R15 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi

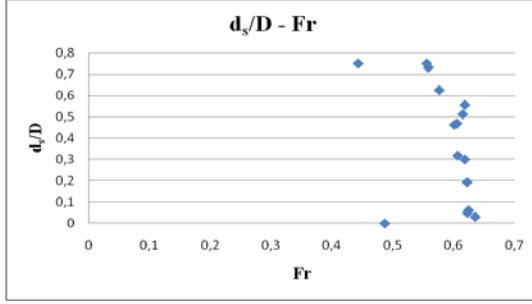


Şekil 4.46 R15 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

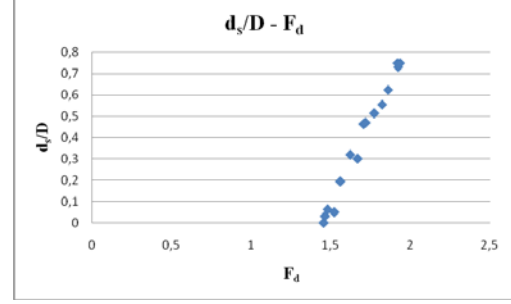


Şekil 4.47 R15 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi

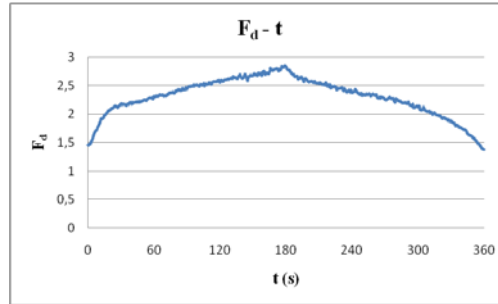
Şekil 4.48'de boyutsuz oyulma derinliği ile Froude sayısının değişimi verilmektedir. Şekil 4.49'da bu kez boyutsuz oyulma derinliğinin yoğunluk esaslı tane Froude sayısı ile arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 4.50'de zamana bağlı yoğunluk esaslı tane Froude sayısının grafiği verilmektedir. R15 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.51'de verilmektedir.



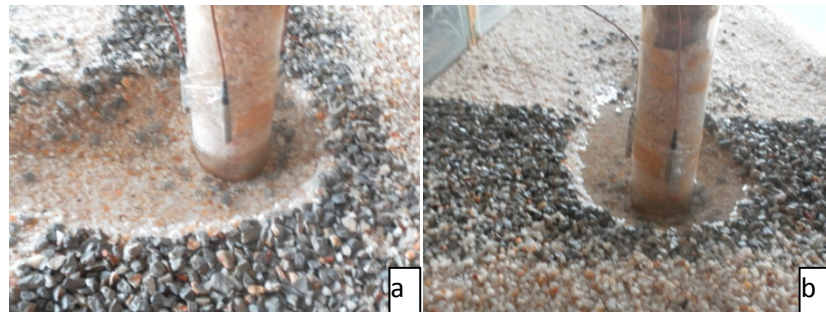
Şekil 4.48 R15 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi

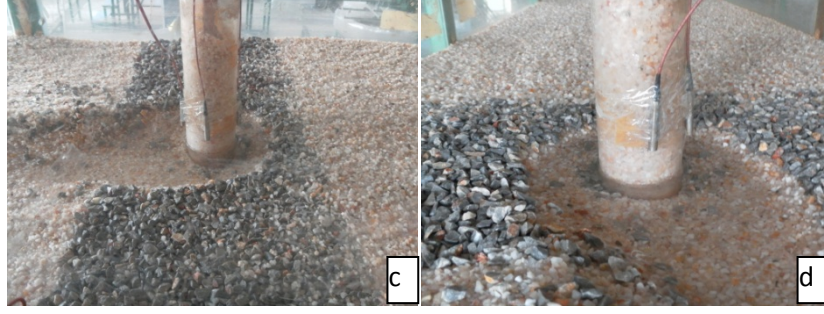


Şekil 4.49 R15 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



Şekil 4.50 R15 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki





Şekil 4.51 (a)(b)(c)(d) R15 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar

4.2 Yaka Kullanılarak Elde Edilen Deney Sonuçları

Yaka deneyleri Hid 1 ve Hid 2 nolu hidrograflar altında gerçekleştirilmiştir. Çapı 8 cm olan dairesel kesitli köprü ayağı etrafına ayak çapının 3 katı olan 24 cm çapındaki yaka yerleştirilmiştir. Deney ayrıntıları Hid 1 ve Hid 2 hidrografları için sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’da verilmektedir.

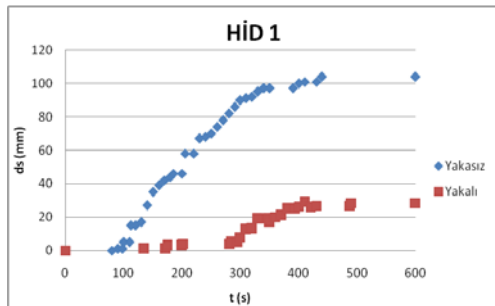
Tablo 4.3 Hid 1 hidrografi ile gerçekleştirilen deneyler

Deney No	Yaka yeri	t_{collar} (mm)	Nihai oyulma derinliği d_s (mm)
C1	Yüzeyde	3	28,5
C2	1cm gömülü	3	12,3
C3	1cm üzerinde	3	20,0
C4	2cm üzerinde	3	22,5
C5	Yüzeyde	6	26,5
C6	1cm üzerinde	6	25,5
C7	2cm üzerinde	6	19,0
C8	1 cm gömülü	6	10,0

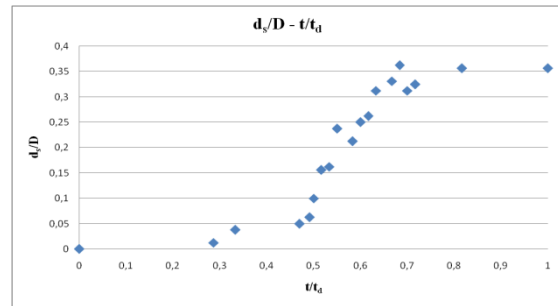
Tablo 4.4 Hid 2 hidrografi ile gerçekleştirilen deneyler

Deney No	Yaka yeri	t_{collar} (mm)	Nihai oyulma derinliği d_s (mm)
C9	Yüzeyde	3	26,0
C10	1cm gömülü	3	11,9
C11	1cm üzerinde	3	20,0
C12	2cm üzerinde	3	17,0
C13	Yüzeyde	6	26,0
C14	1cm üzerinde	6	20,3
C15	2cm üzerinde	6	12,2
C16	1cm gömülü	6	10,8

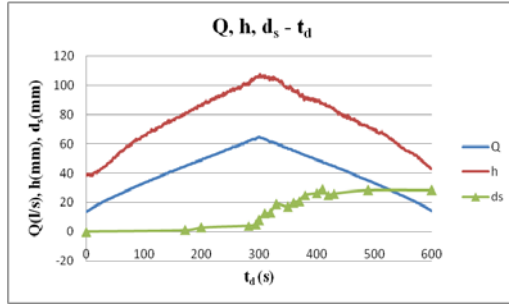
C1 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.52'de verilmiştir. Yaka taban malzemesi ile aynı hizada olup yakanın kalınlığı 3 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %72,60 azalttığı gözlemlenmiştir. Boyutsuz oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi Şekil 4.53'te verilmiştir. Şekil 4.54'te zamana bağlı deney sırasında ölçülen debi, su seviyesi ve oyulma derinlik değerleri verilmektedir. Şekil 4.55'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi verilmiştir. Şekil 4.56'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.57'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir.



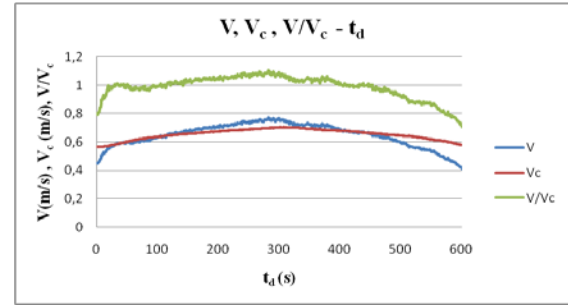
Şekil 4.52 C1 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



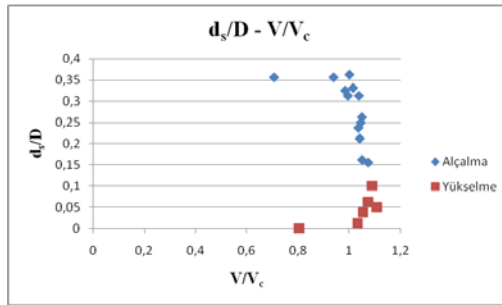
Şekil 4.53 C1 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



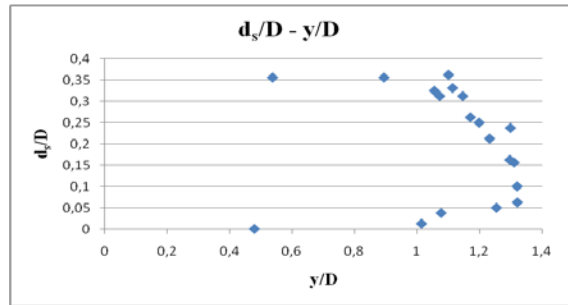
Şekil 4.54 C1 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



Şekil 4.55 C1 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi

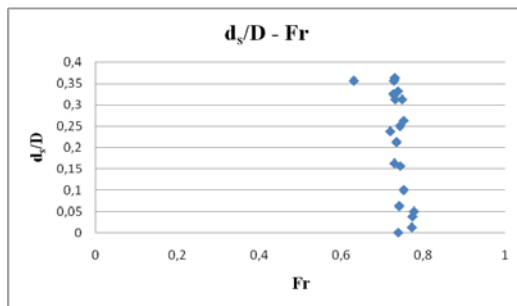


Şekil 4.56 C1 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

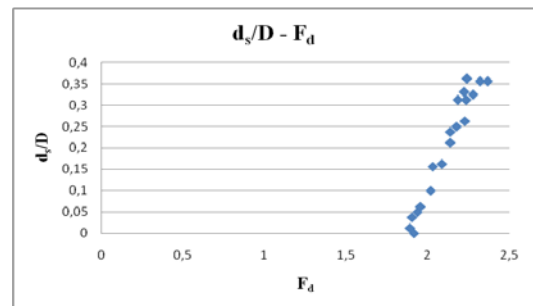


Şekil 4.57 C1 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi

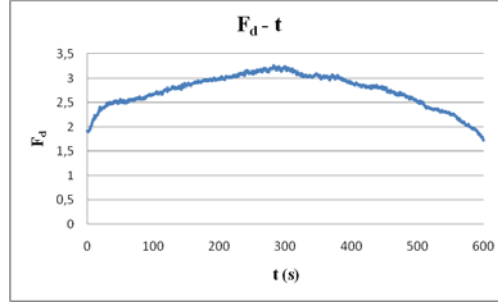
Deney başında boyutsuz oyulma derinliği akım derinliğinin artması ile yükselmiştir ancak yaklaşım akım derinliğinin sabit olduğu durumda oyulma derinliği artmaya devam etmiştir. Deney sonuna doğru su seviyesinin azalması ile yaklaşım akım derinliği düşmektedir. Şekil 4.58'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.59'da ve Şekil 4.60'ta gösterilmiştir. C1 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.61 'de görülmektedir.



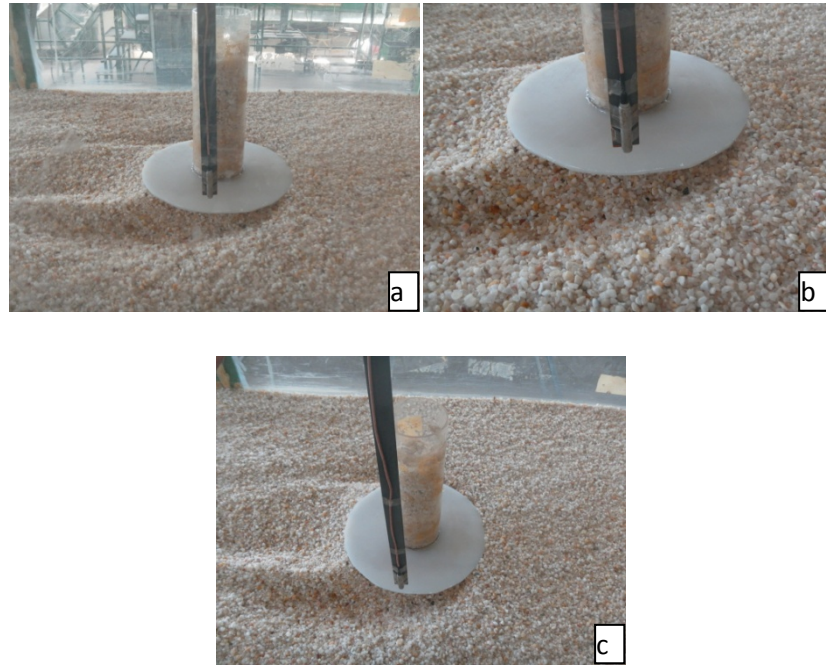
Şekil 4.58 C1 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.59 C1 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



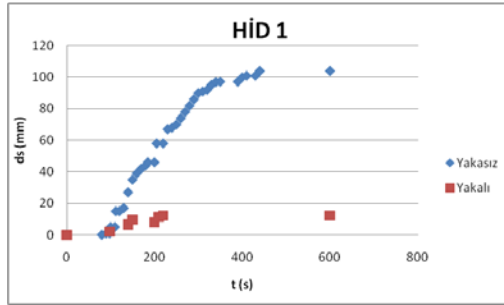
Şekil 4.60 C1 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



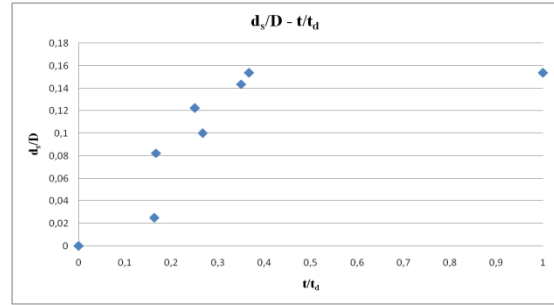
Şekil 4.61(a)(b)(c) C1 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

C2 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.62’de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 1 cm altına yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 3 mm’dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %88,17 azalttığı yapılan deneyde gözlemlenmiştir. Şekil 4.63’te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.64’te deney esnasında ölçülen debi, su seviyesi ve oyulmanın değerlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.65’te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi verilmiştir. Şekil 4.66’da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.67’de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Deney başında boyutsuz

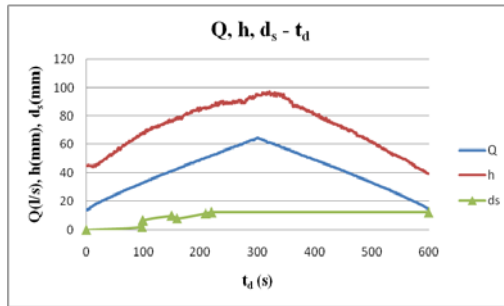
oyulma derinliği akım derinliğinin artması ile yükselmiştir ancak yaklaşım akım derinliğinin sabit olduğu durumda oyulma derinliği artmaya devam etmiştir. Deney sonuna doğru su seviyesinin azalması ile yaklaşım akım derinliği düşmektedir.



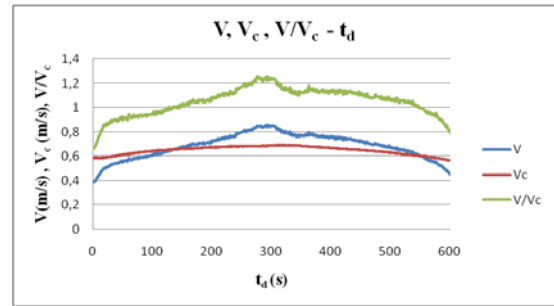
Şekil 4.62 C2 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



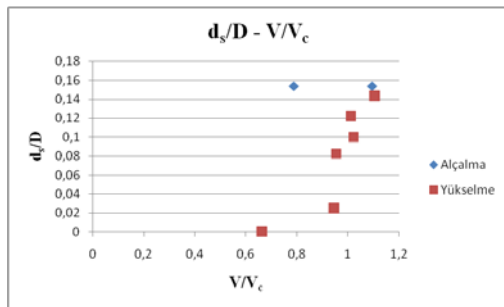
Şekil 4.63 C2 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



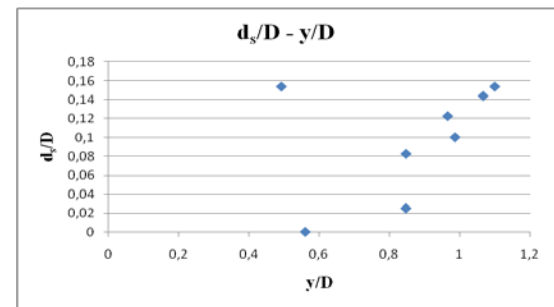
Şekil 4.64 C2 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



Şekil 4.65 C2 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



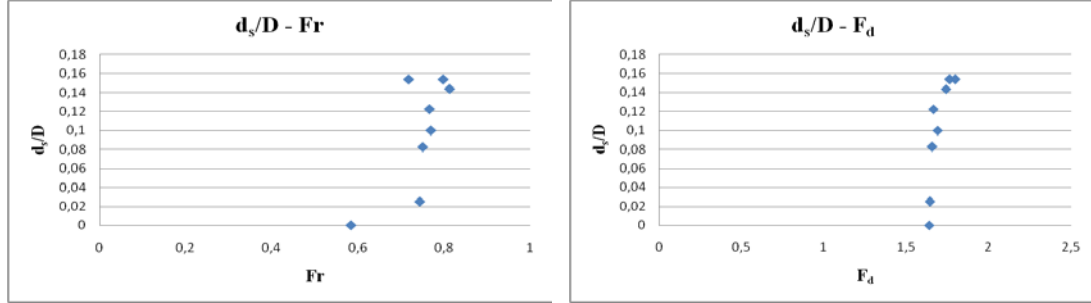
Şekil 4.66 C2 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



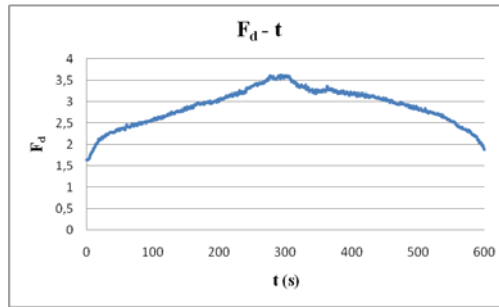
Şekil 4.67 C2 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi

Şekil 4.68'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve

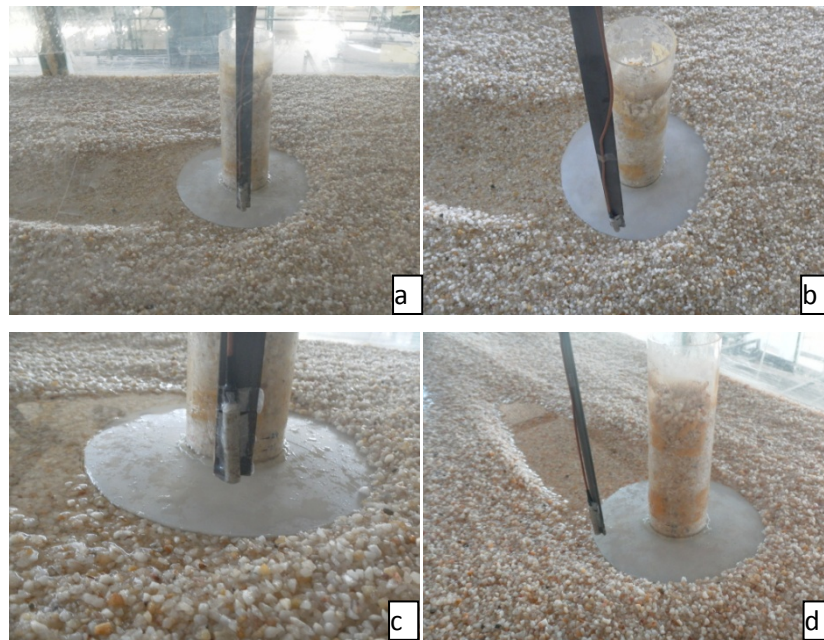
zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.69'da ve Şekil 4.70'te gösterilmiştir. C2 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.71'de görülmektedir.



Şekil 4.68 C2 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Şekil 4.69 C2 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude Froude sayısı ile değişimi sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

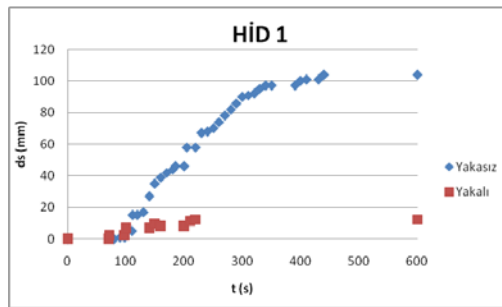


Şekil 4.70 C2 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki

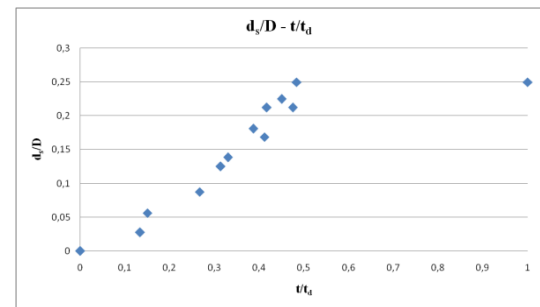


Şekil 4.71(a)(b)(c)(d) C2 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

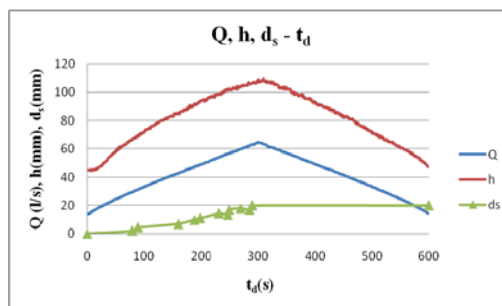
C3 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.72'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinden 1 cm yukarısında olup yakanın kalınlığı 3 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %80,77 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.73'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.74'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.75'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi verilmiştir. Şekil 4.76'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.77'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Deney sonuna doğru su seviyesinin azalması ile yaklaşım akım derinliği de düşmektedir.



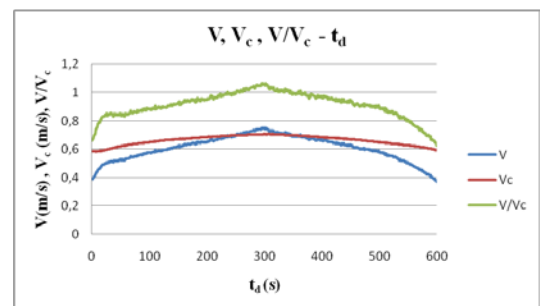
Şekil 4.72 C3 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



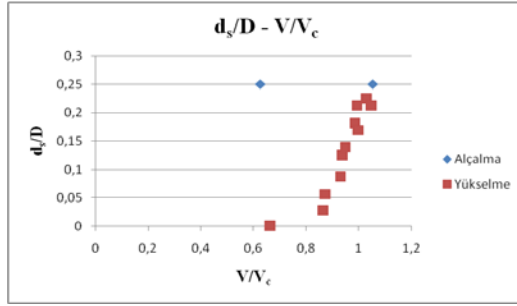
Şekil 4.73 C3 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



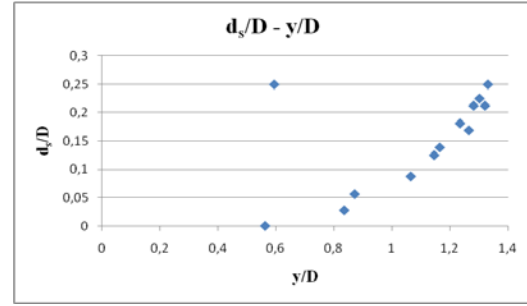
Şekil 4.74 C3 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



Şekil 4.75 C3 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi

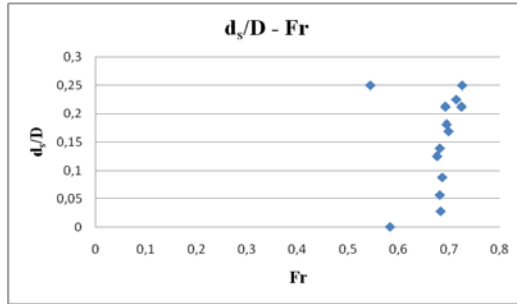


Şekil 4.76 C3 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

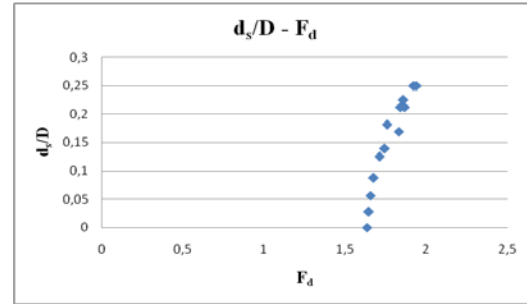


Şekil 4.77 C3 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi

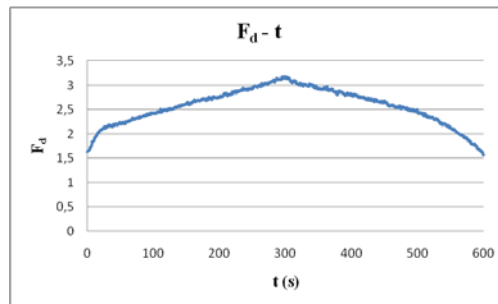
Şekil 4.78'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.79'da ve Şekil 4.80'de gösterilmiştir. C3 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.81'de görülmektedir.



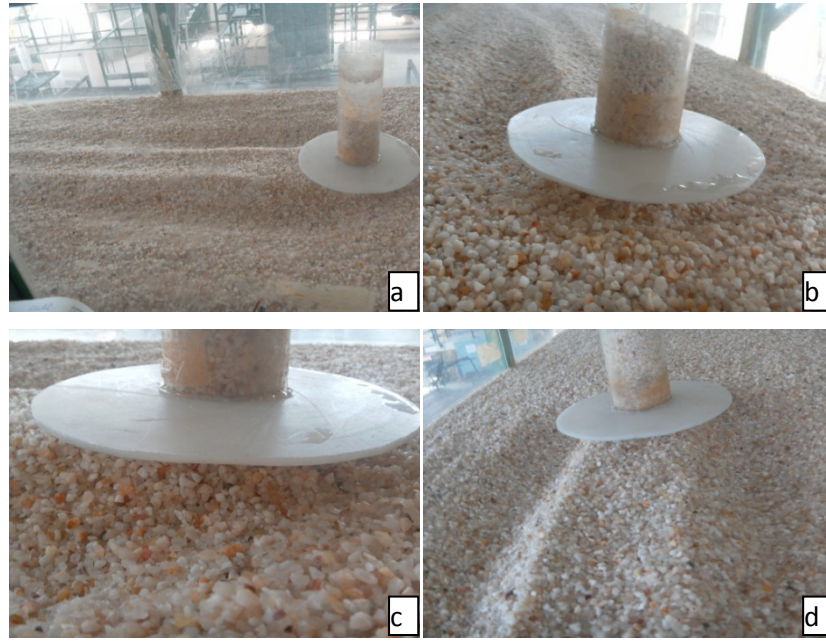
Şekil 4.78 C3 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.79 C3 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısının (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

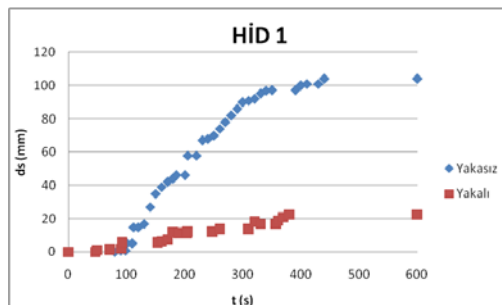


Şekil 4.80 C3 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısının (F_d) ile zaman arasında ilişki

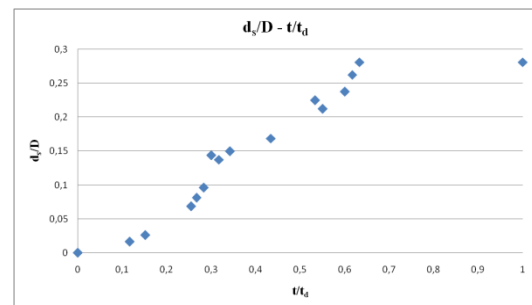


Şekil 4.81(a)(b)(c)(d) C3 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

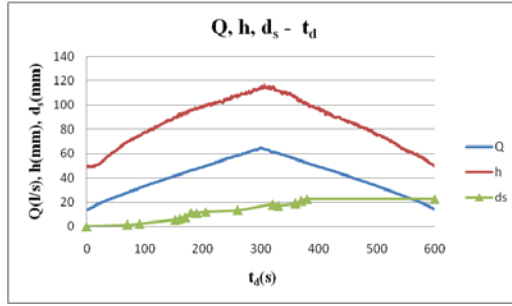
C4 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.82'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 2 cm yukarısında olup yakanın kalınlığı 3 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %78,37 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.83'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.84'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.85'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimine yer verilmiştir. Şekil 4.86'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik değişim grafiği çizilmiştir. Şekil 4.87'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir.



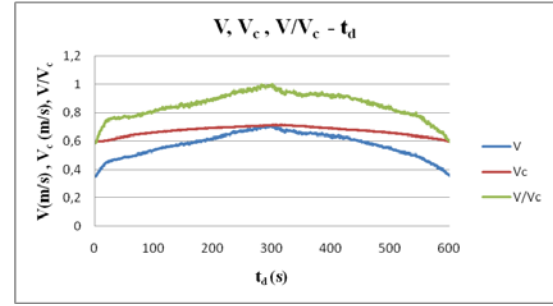
Şekil 4.82 C4 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



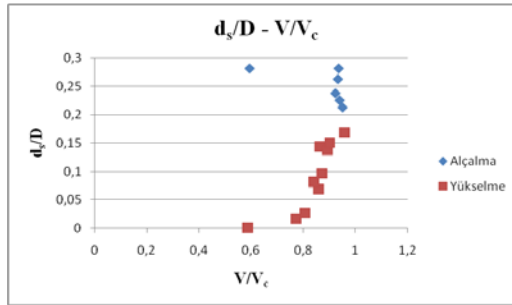
Şekil 4.83 C4 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



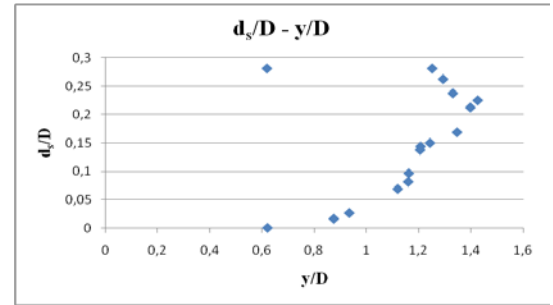
Şekil 4.84 C4 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



Şekil 4.85 C4 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi

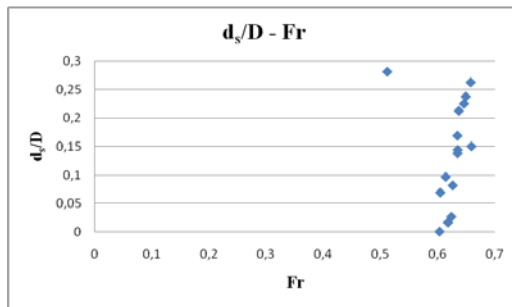


Şekil 4.86 C4 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

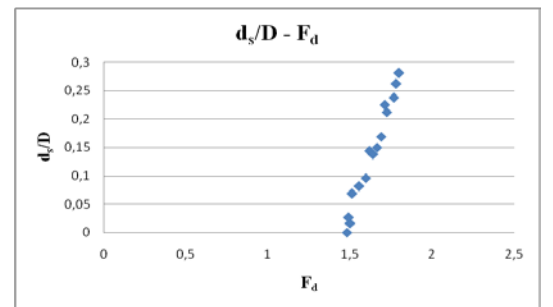


Şekil 4.87 C4 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi

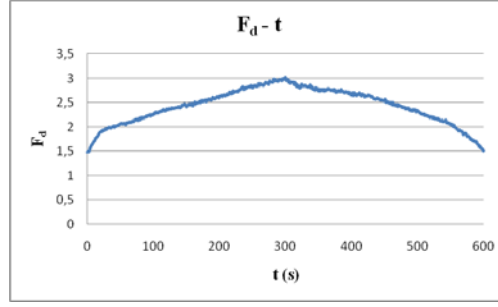
Şekil 4.88'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.89'da ve Şekil 4.90'da gösterilmiştir. C4 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.91'de görülmektedir.



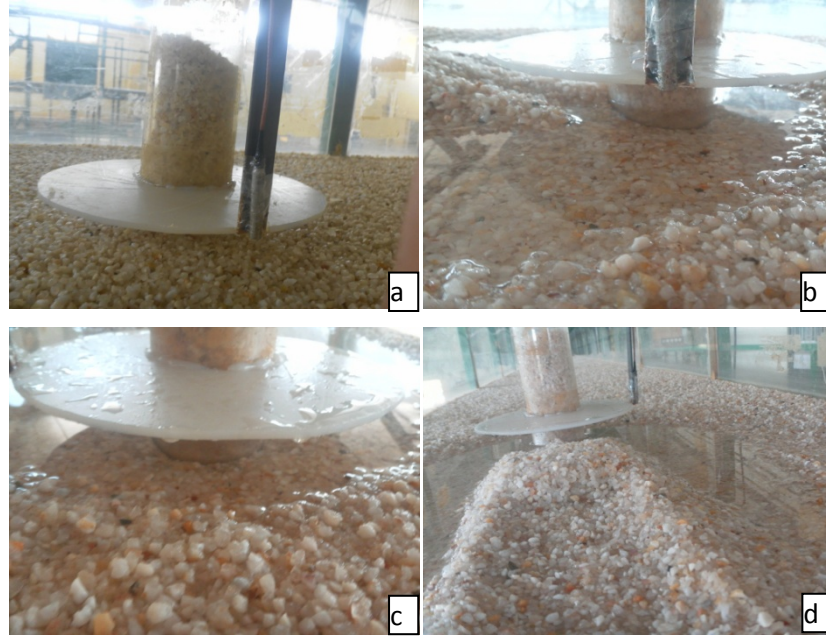
Şekil 4.88 C4 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısının Fr ile değişimi



Şekil 4.89 C4 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısının (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



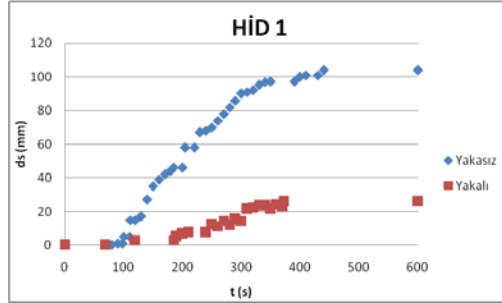
Şekil 4.90 C4 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



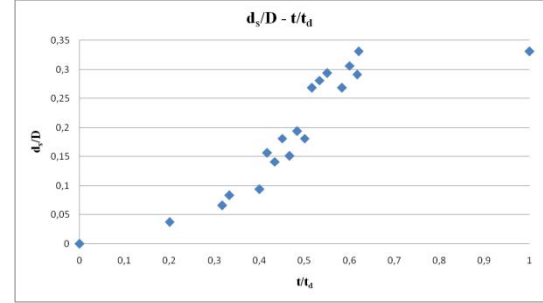
Şekil 4.91(a)(b)(c)(d) C4 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

C5 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.92'de verilmiştir. Yaka taban malzemesiyle aynı seviyede olup yakanın kalınlığı 6 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %74,52 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.93'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.94'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.95'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimine yer verilmiştir. Şekil 4.96'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik değişim grafiği çizilmiştir. Şekil 4.97'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.98'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve

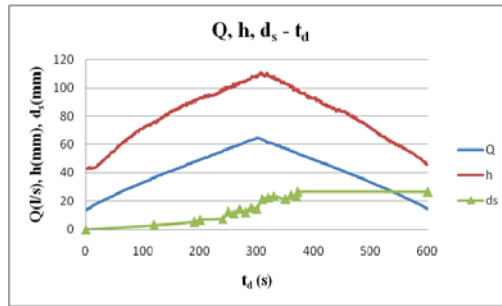
zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.99'da ve Şekil 4.100'de gösterilmiştir. C5 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.101'de görülmektedir.



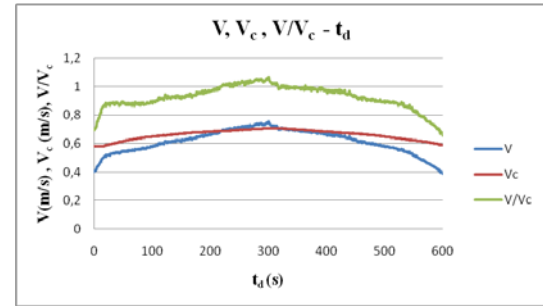
Şekil 4.92 C5 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



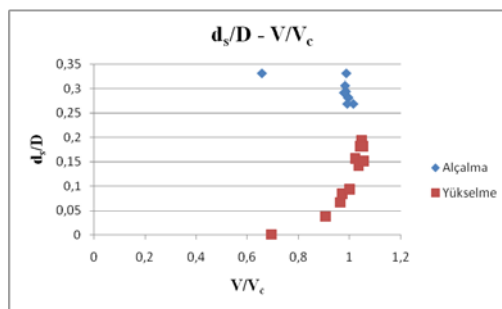
Şekil 4.93 C5 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



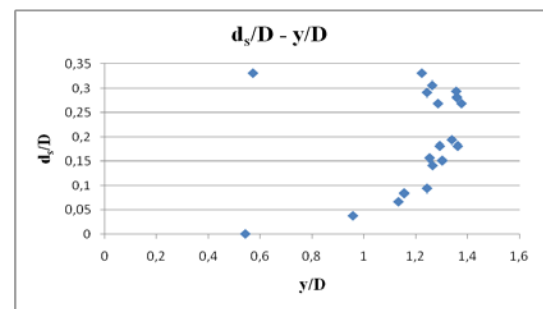
Şekil 4.94 C5 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



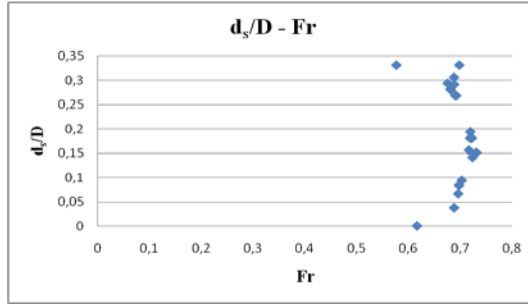
Şekil 4.95 C5 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



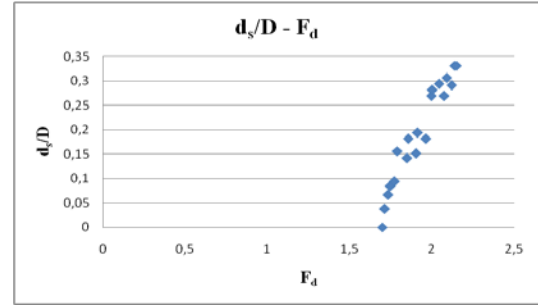
Şekil 4.96 C5 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



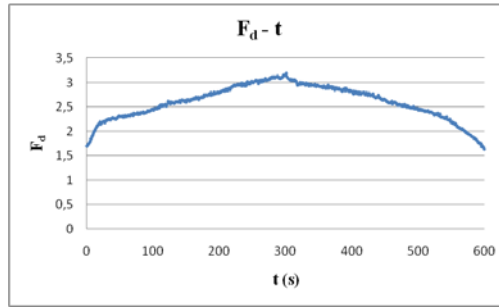
Şekil 4.97 C5 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



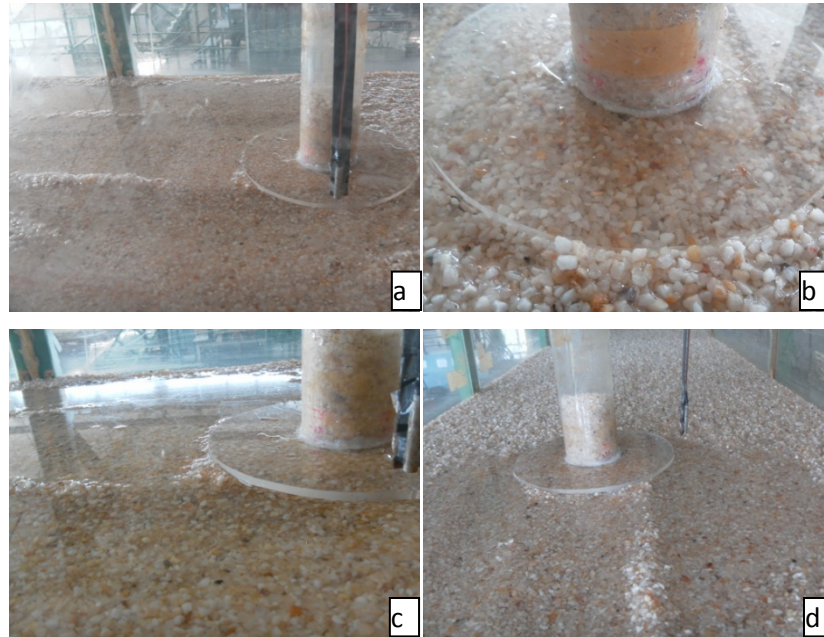
Şekil 4.98 C5 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.99 C5 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

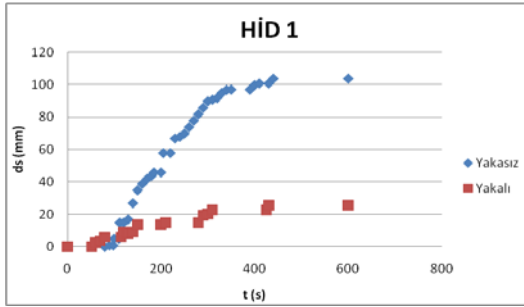


Şekil 4.100 C5 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki

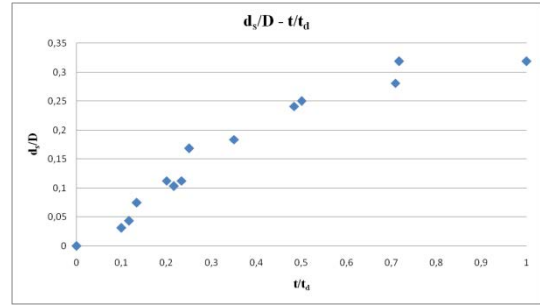


Şekil 4.101 (a)(b)(c)(d) C5 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

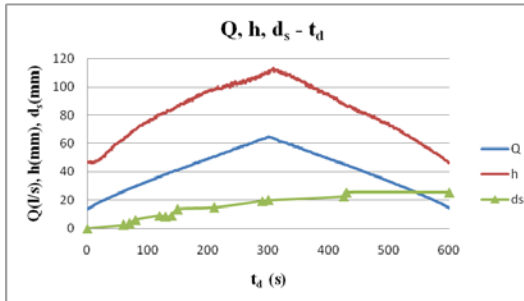
C6 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.102'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinden 1 cm yukarıda olup yakanın kalınlığı 6 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %75,48 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.103'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.104'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.105'te akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimine yer verilmiştir. Şekil 4.106'da yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin ile boyutsuz oyulma derinlik değişim grafiği çizilmiştir. Şekil 4.107'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.108'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.109'da ve Şekil 4.110'da gösterilmiştir. C6 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.111'de görülmektedir.



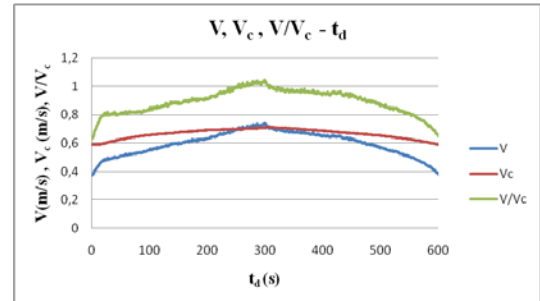
Şekil 4.102 C6 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



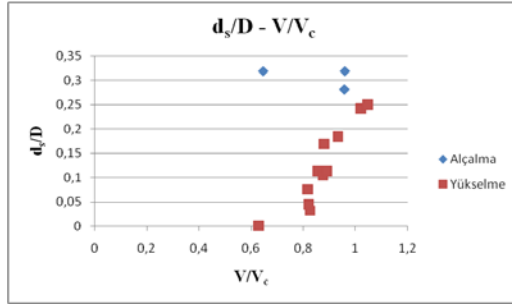
Şekil 4.103 C6 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



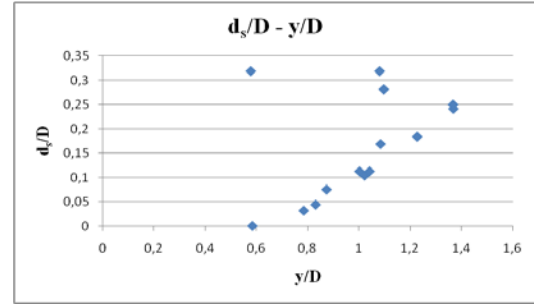
Şekil 4.104 C6 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



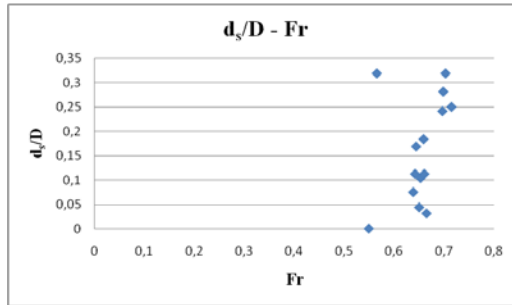
Şekil 4.105 C6 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



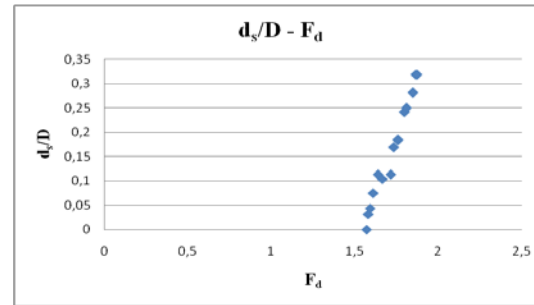
Şekil 4.106 C6 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



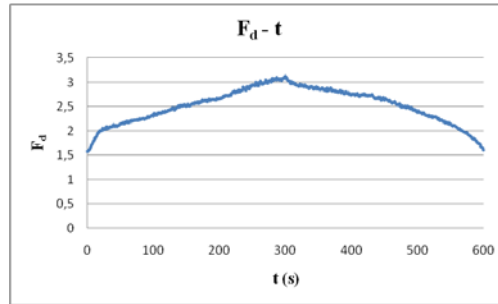
Şekil 4.107 C6 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



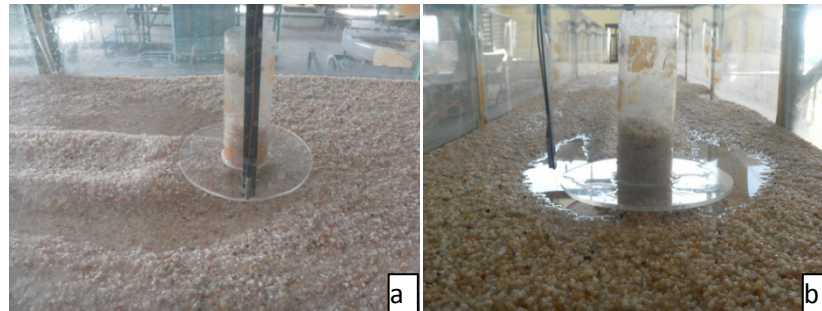
Şekil 4.108 C6 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi

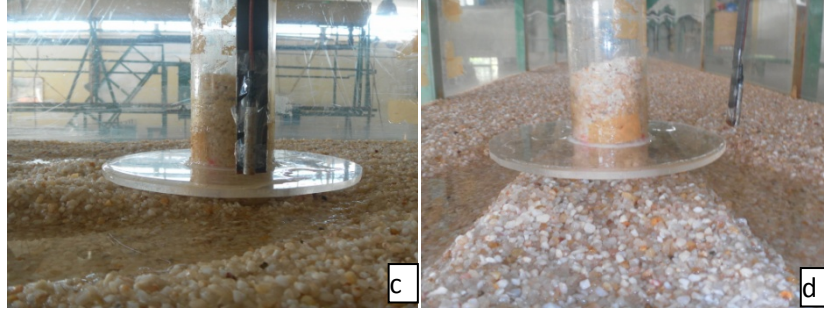


Şekil 4.109 C6 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



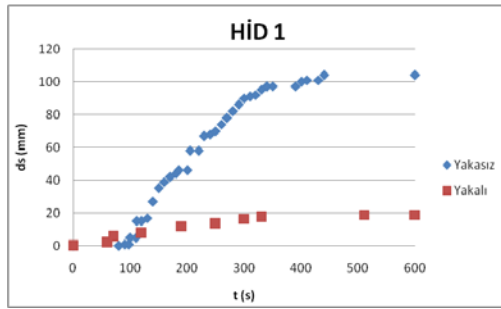
Şekil 4.110 C6 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



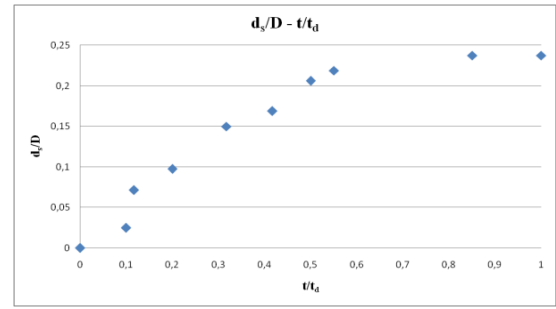


Şekil 4.111 (a)(b)(c)(d) C6 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

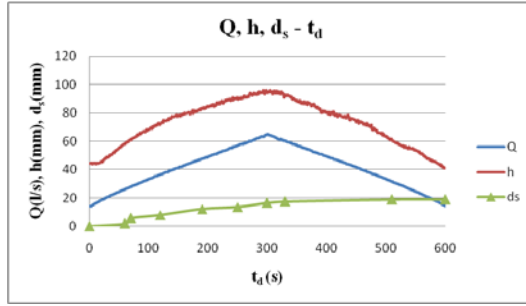
C7 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.112'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinden 2 cm yukarıda olup yakanın kalınlığı 6 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %81,73 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.113'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.114'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.115'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimine yer verilmiştir. Şekil 4.116'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik değişim grafiği çizilmiştir. Şekil 4.117'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.118'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.119'da ve Şekil 4.120'de gösterilmiştir. C7 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.121'de görülmektedir.



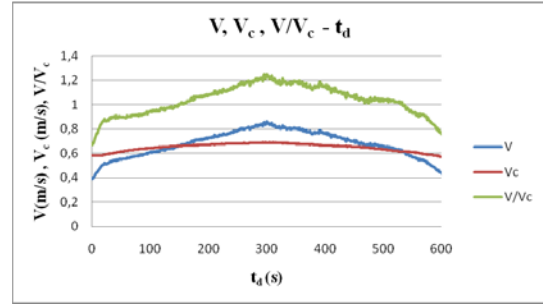
Şekil 4.112 C7 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



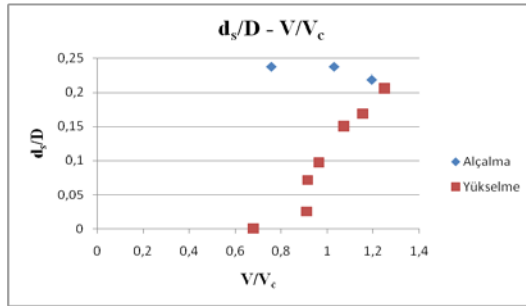
Şekil 4.113 C7 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



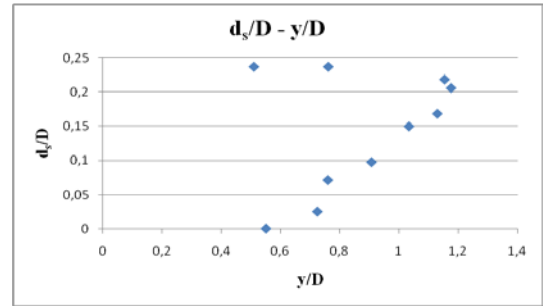
Şekil 4.114 C7 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



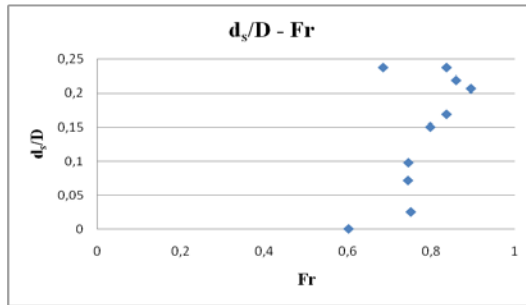
Şekil 4.115 C7 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



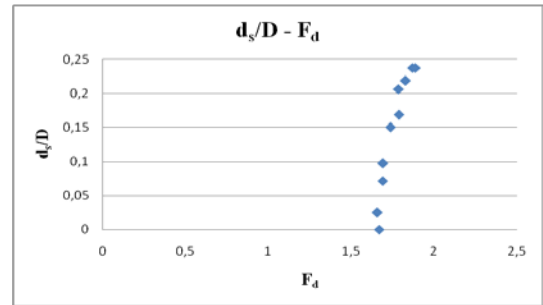
Şekil 4.116 C7 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



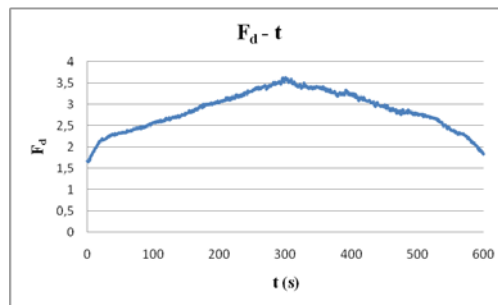
Şekil 4.117 C7 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



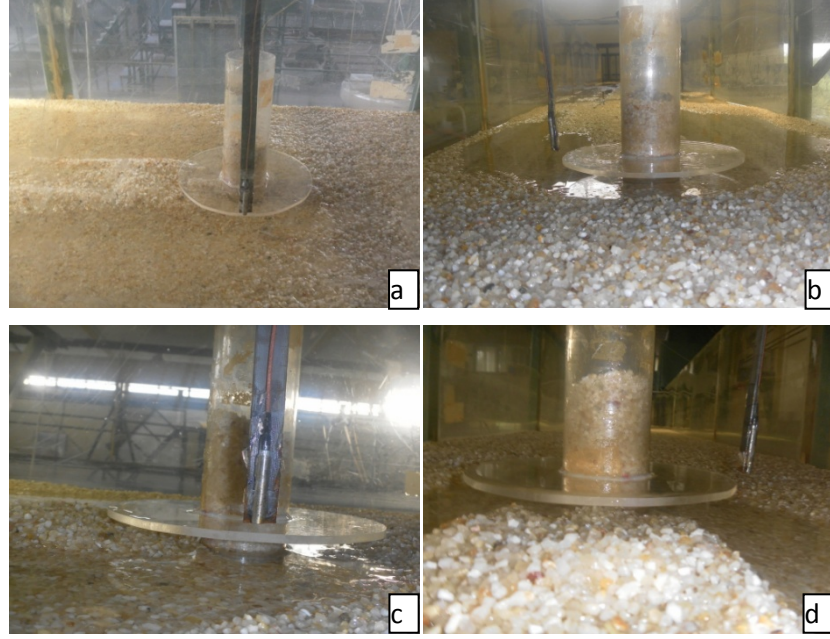
Şekil 4.118 C7 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.119 C7 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

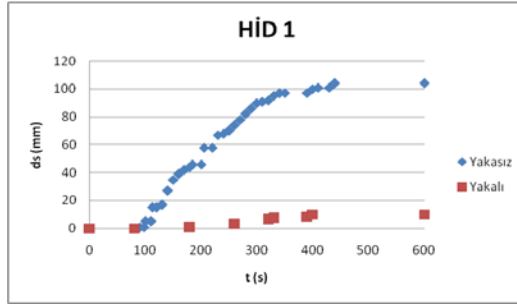


Şekil 4.120 Yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki

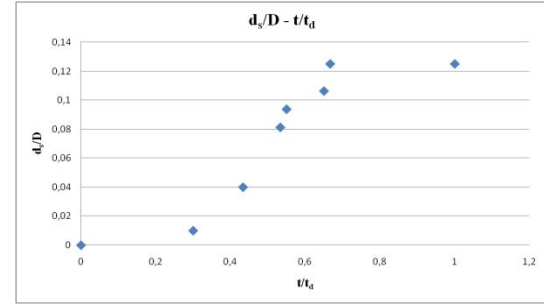


Şekil 4.121 (a)(b)(c)(d) C7 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

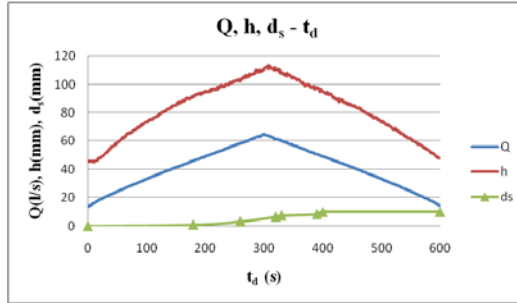
C8 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.122'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 1 cm altına yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 6 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %90,38 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.123'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği bulunmaktadır. Şekil 4.124'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.125'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimine yer verilmiştir. Şekil 4.126'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.127'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.128'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.129'da ve Şekil 4.130'da gösterilmiştir. C8 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.131'de görülmektedir.



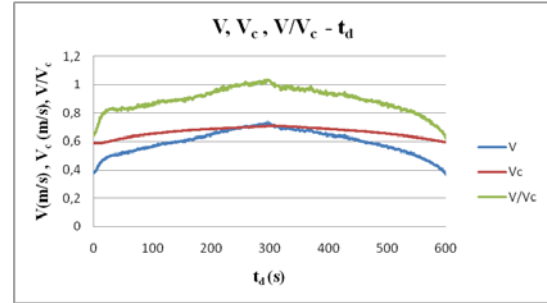
Şekil 4.122 C8 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



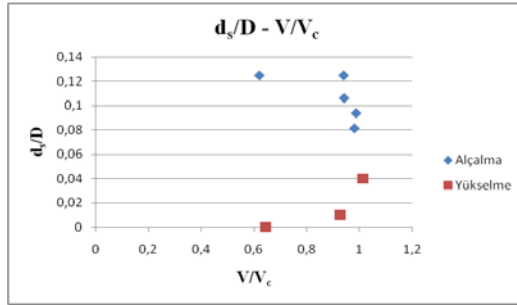
Şekil 4.123 C8 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



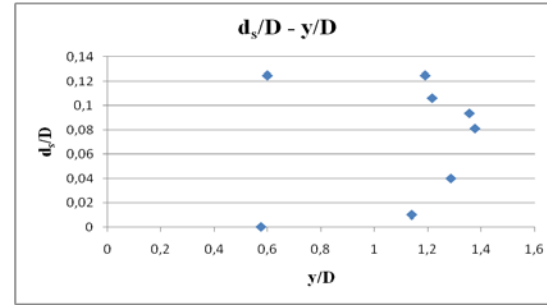
Şekil 4.124 C8 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



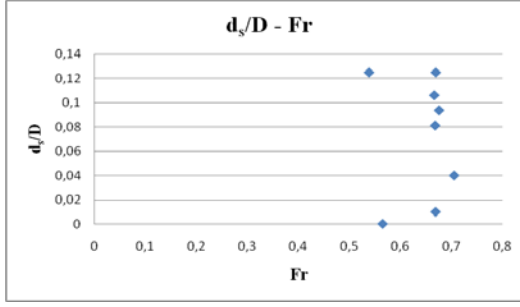
Şekil 4.125 C8 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



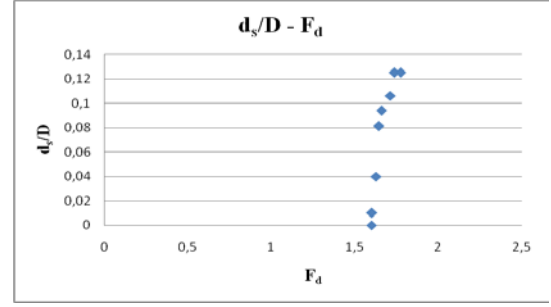
Şekil 4.126 C8 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



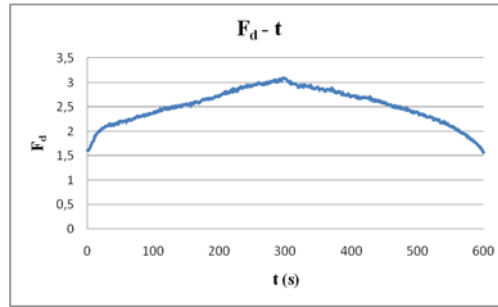
Şekil 4.127 C8 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



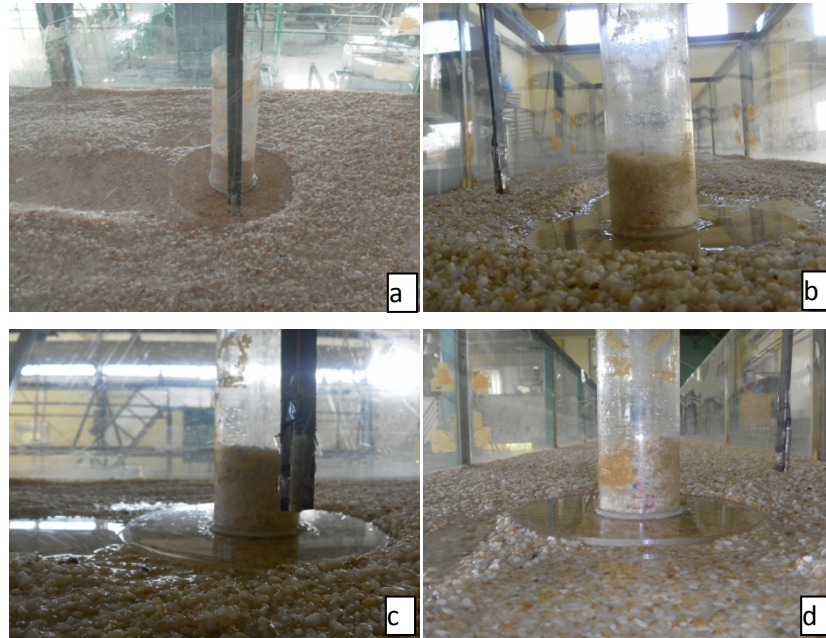
Şekil 4.128 C8 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.129 C8 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



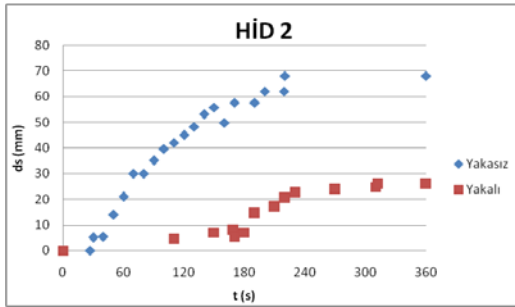
Şekil 4.130 C8 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



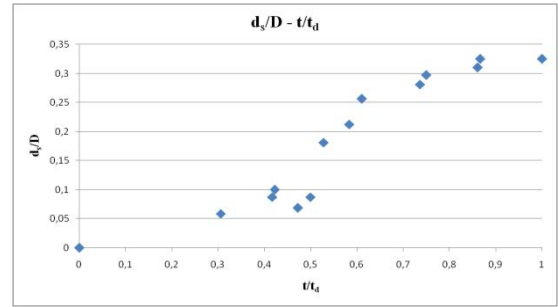
Şekil 4.131 (a)(b)(c)(d) C8 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

C9 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.132'de verilmiştir. Yaka taban malzemesi ile aynı seviyede

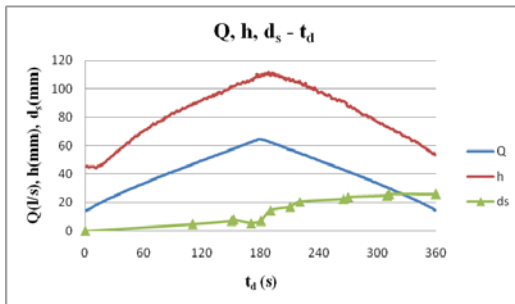
yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 3 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %61,76 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.133'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.134'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.135'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimine yer verilmiştir. Şekil 4.136'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.137'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.138'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.139'da ve Şekil 4.140'ta verilmiştir. C9 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.141'de görülmektedir.



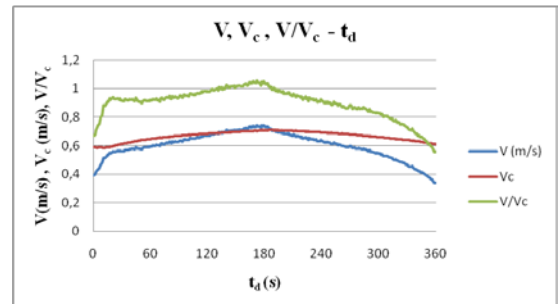
Şekil 4.132 C9 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



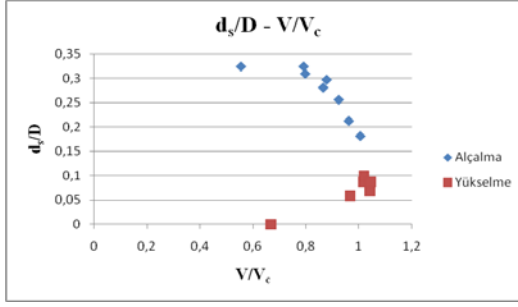
Şekil 4.133 C9 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



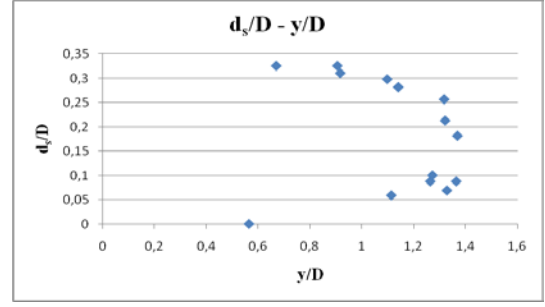
Şekil 4.134 C9 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



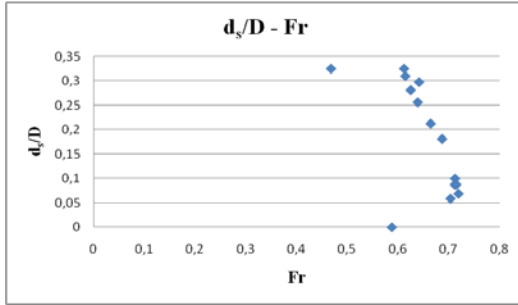
Şekil 4.135 C9 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



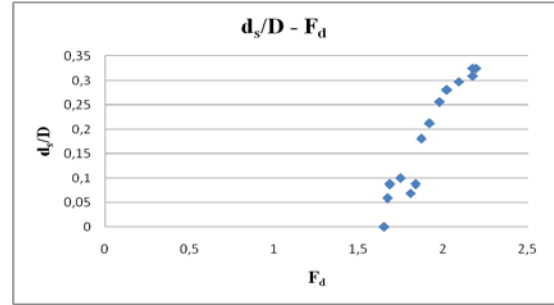
Şekil 4.136 C9 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



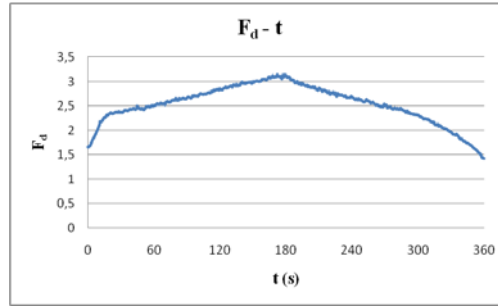
Şekil 4.137 C9 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



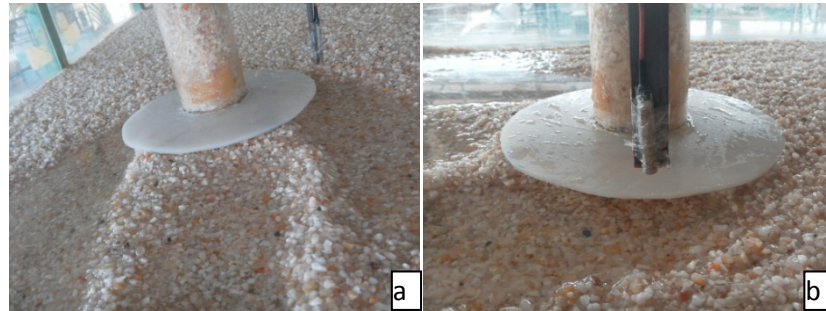
Şekil 4.138 C9 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi

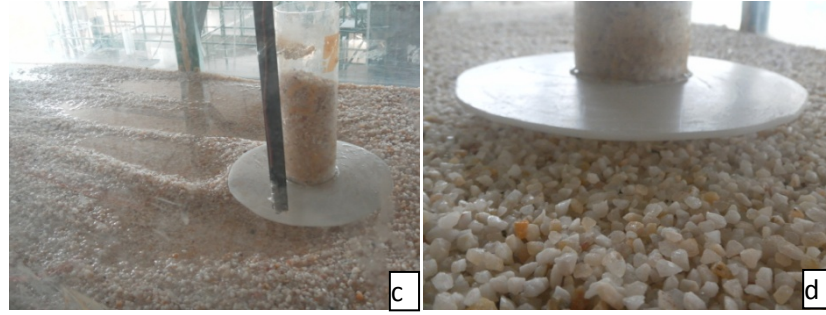


Şekil 4.139 C9 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



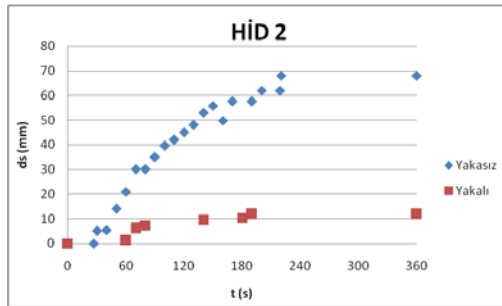
Şekil 4.140 C9 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



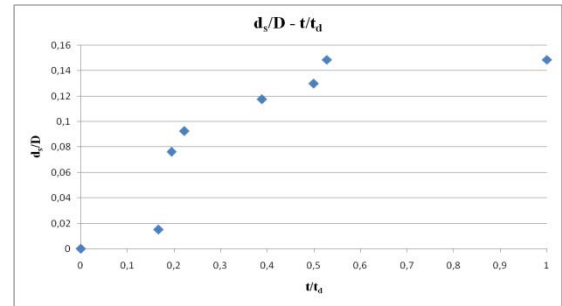


Şekil 4.141(a)(b)(c)(d) C9 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

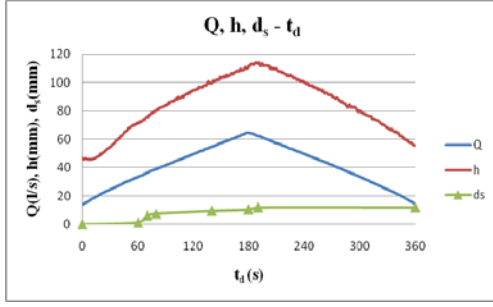
C10 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.142’de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 1 cm altına yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 3 mm’dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %82,50 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.143’te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.144’te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.145’te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.146’da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.147’de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.148’de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği gösterilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.149’da ve Şekil 4.150’de verilmiştir. C10 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.151’de görülmektedir.



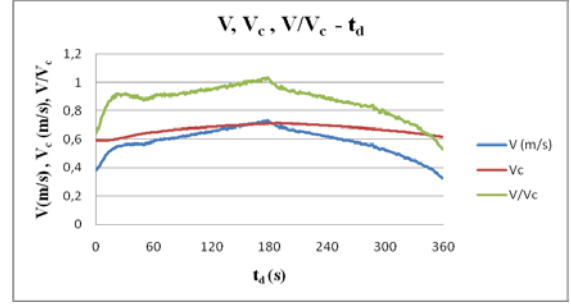
Şekil 4.142 C10 deneyi sonucunda elde edilen oyulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oyulma derinlikleri



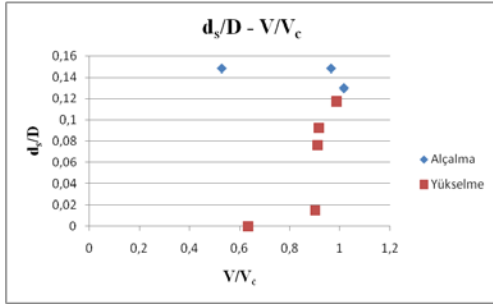
Şekil 4.143 C10 deneyi göreceli oyulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



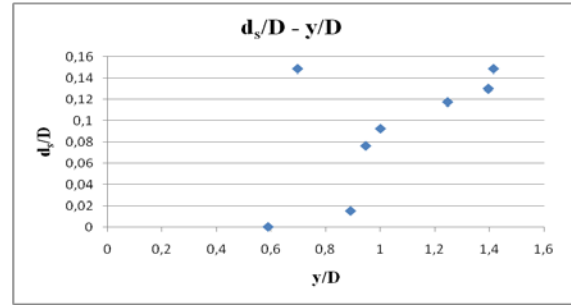
Şekil 4.144 C10 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



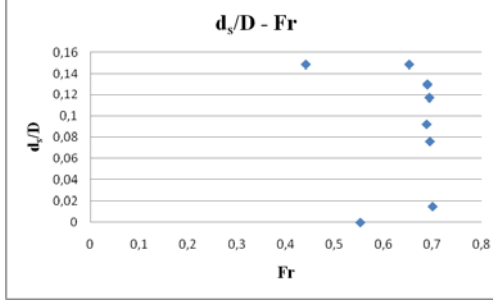
Şekil 4.145 C10 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



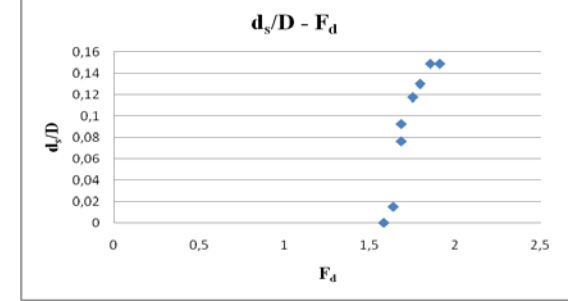
Şekil 4.146 C10 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



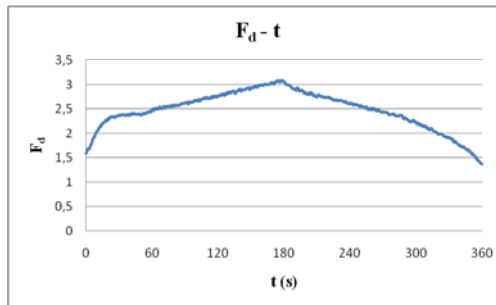
Şekil 4.147 C10 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



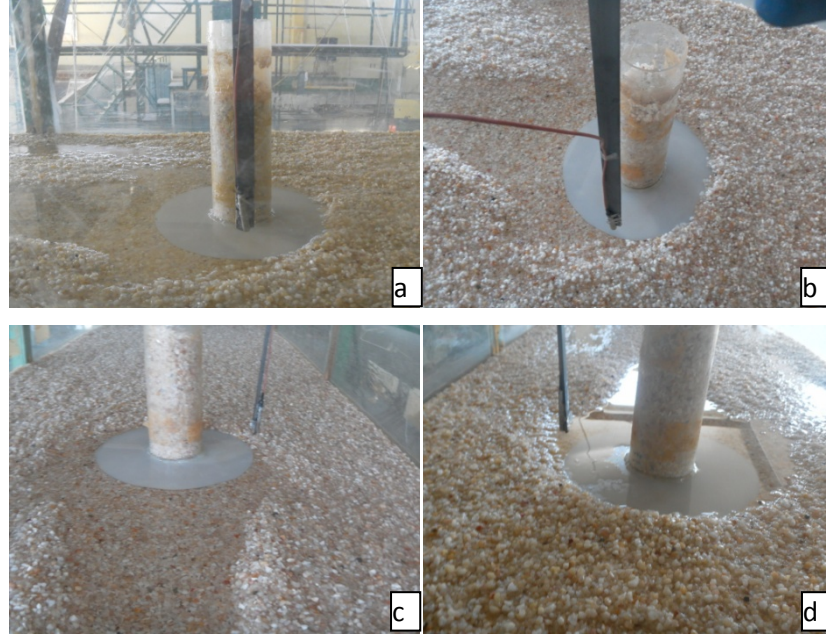
Şekil 4.148 C10 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.149 C10 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

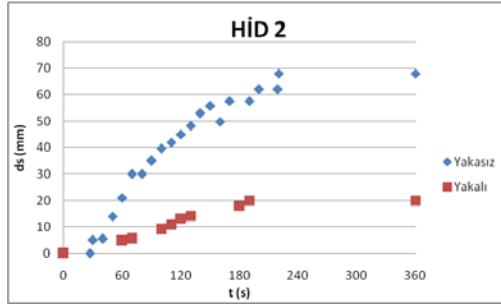


Şekil 4.150 C10 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasındaki ilişki

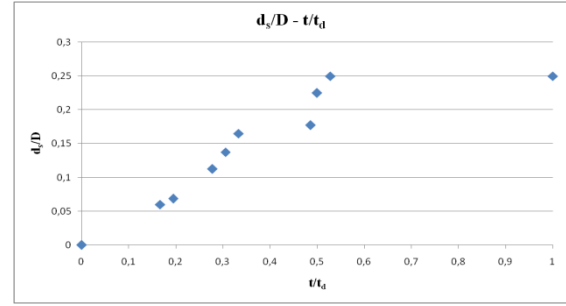


Şekil 4.151(a)(b)(c)(d) C10 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

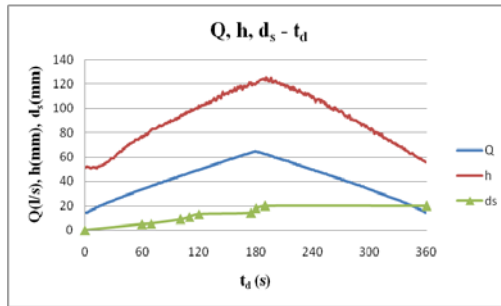
C11 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.152'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 1 cm yukarısına yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 3 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %70,59 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.153'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.155'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.156'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.154'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi verilmektedir. Şekil 4.157'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.158'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği çizilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.159'da ve Şekil 4.160'ta verilmiştir. C11 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.161'de görülmektedir.



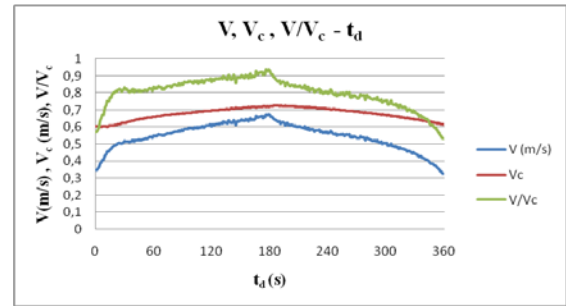
Şekil 4.152 C11 deneyi sonucunda elde edilen oylulma derinlikleri ile köprü ayağı etrafında hiçbir koruyucu önlem yokken ölçülen oylulma derinlikleri



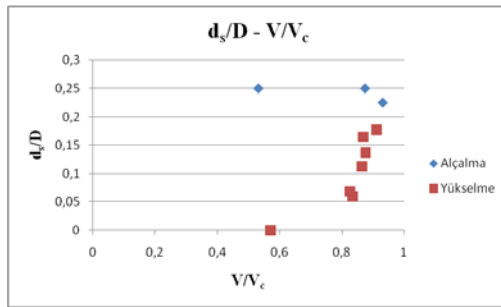
Şekil 4.153 C11 deneyi göreceli oylulma derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



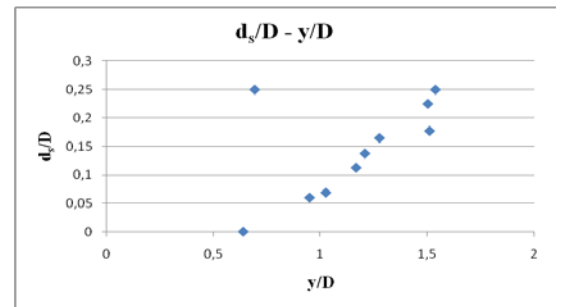
Şekil 4.154 C11 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oylulmanın değişimi



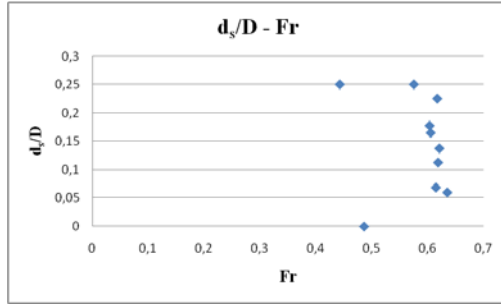
Şekil 4.155 C11 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



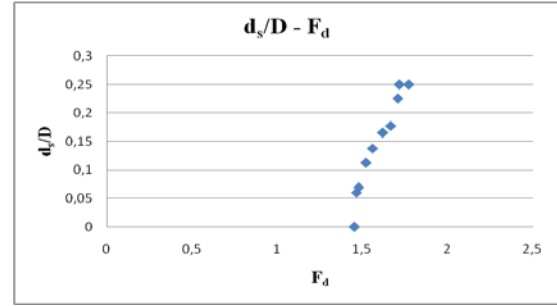
Şekil 4.156 C11 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oylulma derinliği grafiği



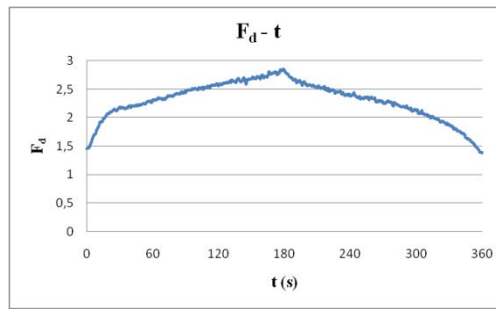
Şekil 4.157 C11 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oylulma derinliği ile ilişkisi



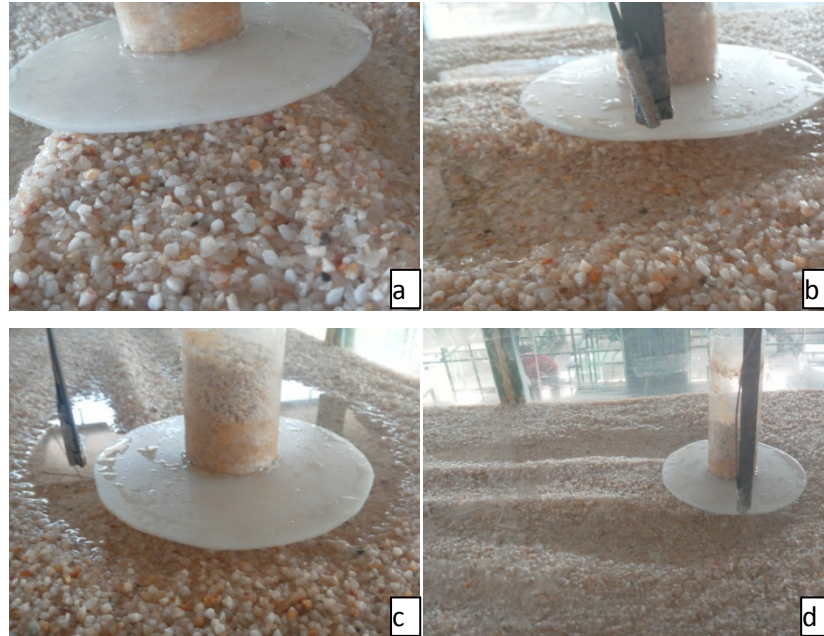
Şekil 4.158 C11 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.159 C11 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

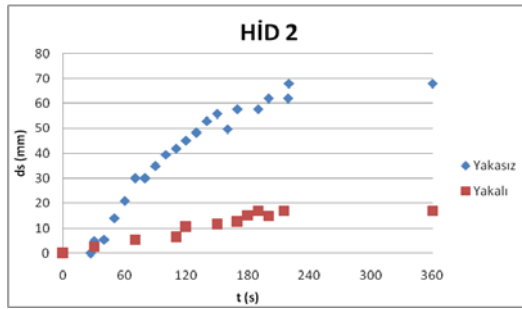


Şekil 4.160 C11 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasındaki ilişki

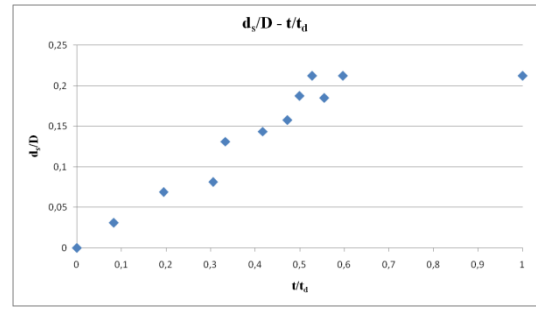


Şekil 4.161(a)(b)(c)(d) C11 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

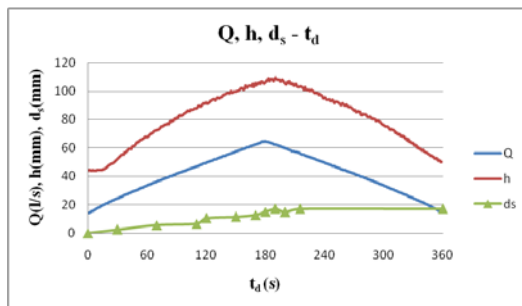
C12 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.162'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 2 cm yukarısına yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 3 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %75 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.163'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.164'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi verilmektedir. Şekil 4.165'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.166'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.167'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.168'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği çizilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.169'da ve Şekil 4.170'te verilmiştir. C12 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.171'de görülmektedir.



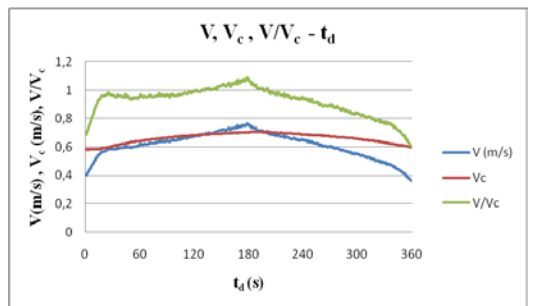
Şekil 4.162 C12 deneyi sırasında ve yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri



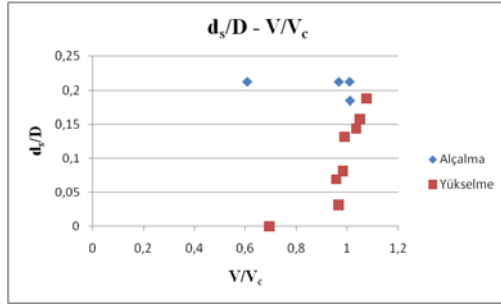
Şekil 4.163 C12 deneyi boyutsuz oyulma ölçülen derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



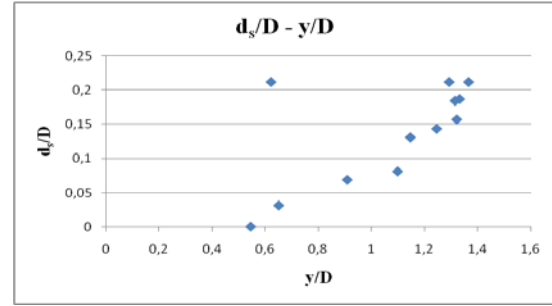
Şekil 4.164 C12 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



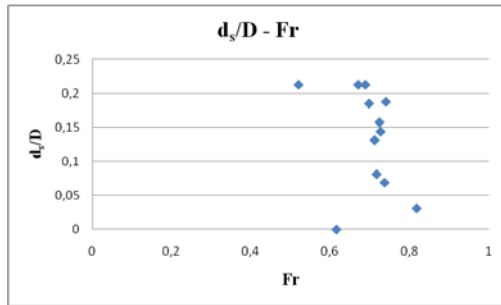
Şekil 4.165 C12 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



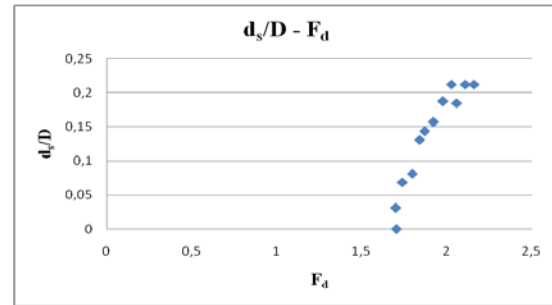
Şekil 4.166 C12 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



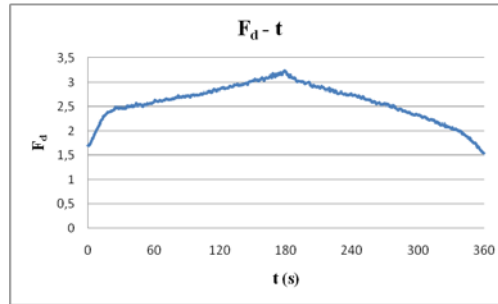
Şekil 4.167 C12 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



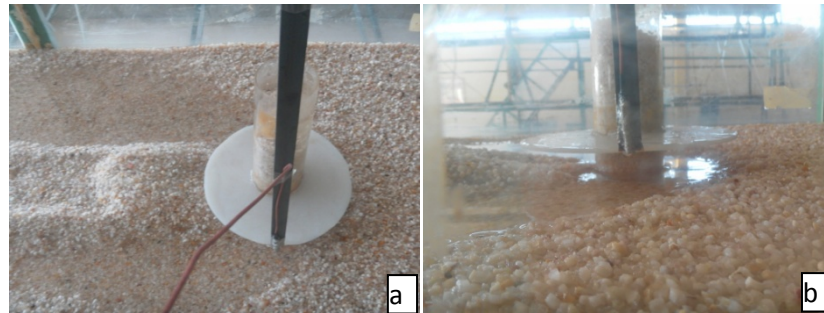
Şekil 4.168 C12 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi

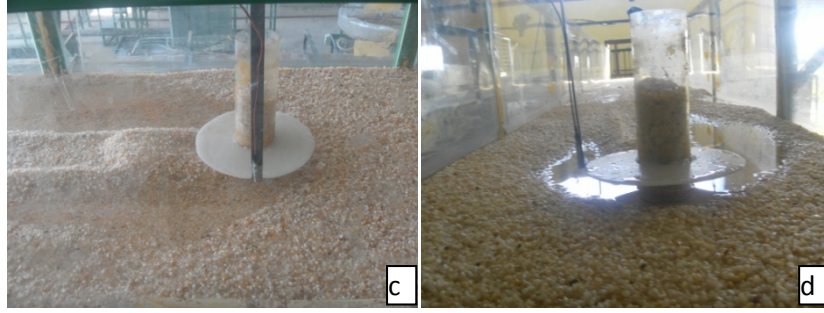


Şekil 4.169 C12 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki



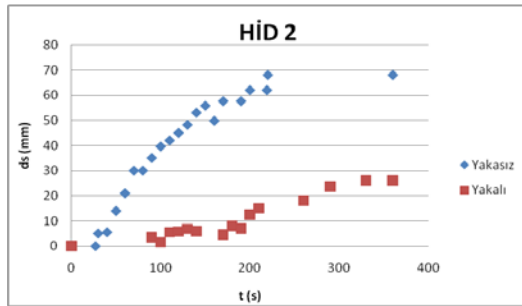
Şekil 4.170 C12 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasındaki ilişki



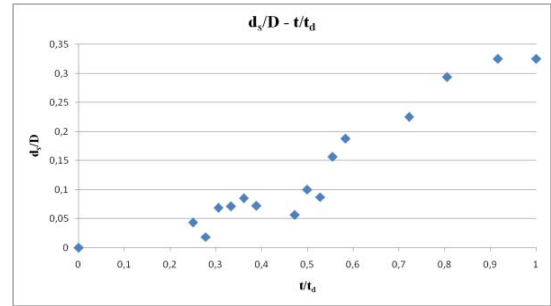


Şekil 4.171(a)(b)(c)(d) C12 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

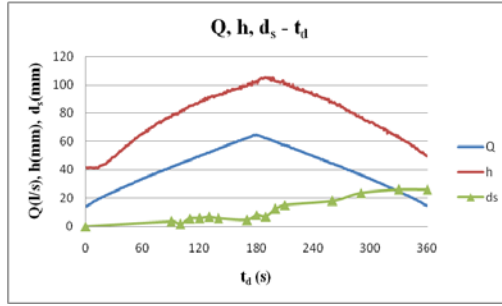
C13 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.172’de verilmiştir. Yaka taban malzemesi ile aynı seviyede yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 6 mm’dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %61,76 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.173’te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.174’te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi verilmektedir. Şekil 4.175’te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.176’da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.177’de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Deney sonunda su seviyesinin düşmesi ile yaklaşım akım derinliği azalmaktadır. Şekil 4.178’de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği çizilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.179’da ve Şekil 4.180’de verilmiştir. C13 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.181’de görülmektedir.



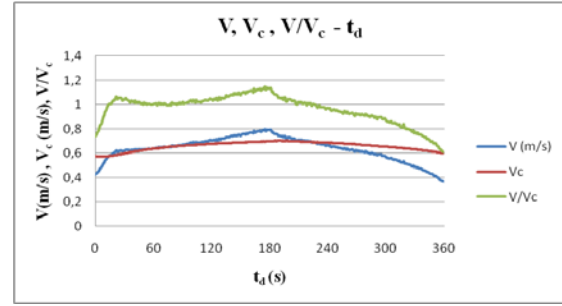
Şekil 4.172 C13 deneyi sırasında ve yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri



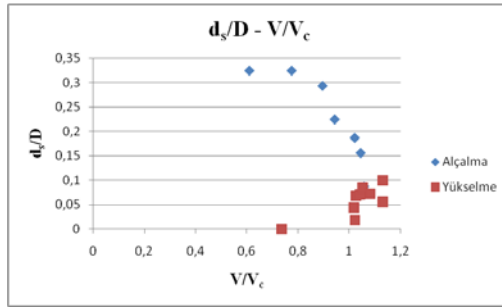
Şekil 4.173 C13 deneyi boyutsuz oyulma ölçülen derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



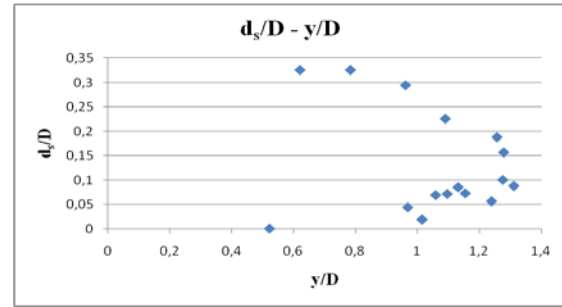
Şekil 4.174 C13 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



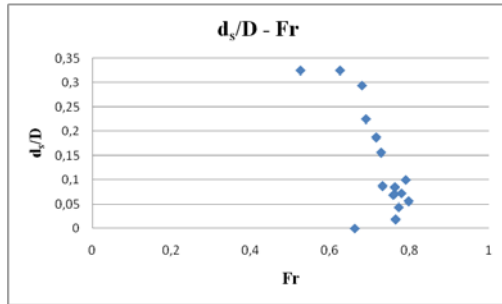
Şekil 4.175 C13 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



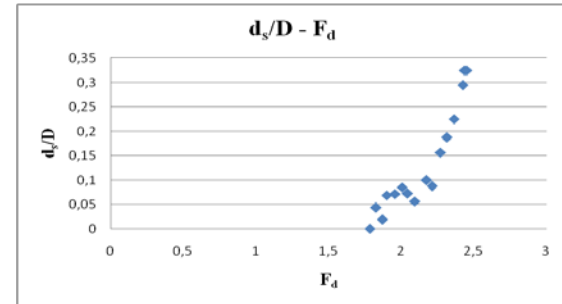
Şekil 4.176 C13 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



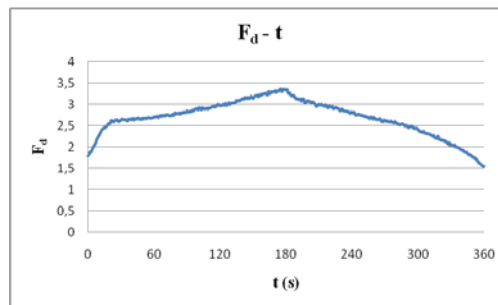
Şekil 4.177 C13 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



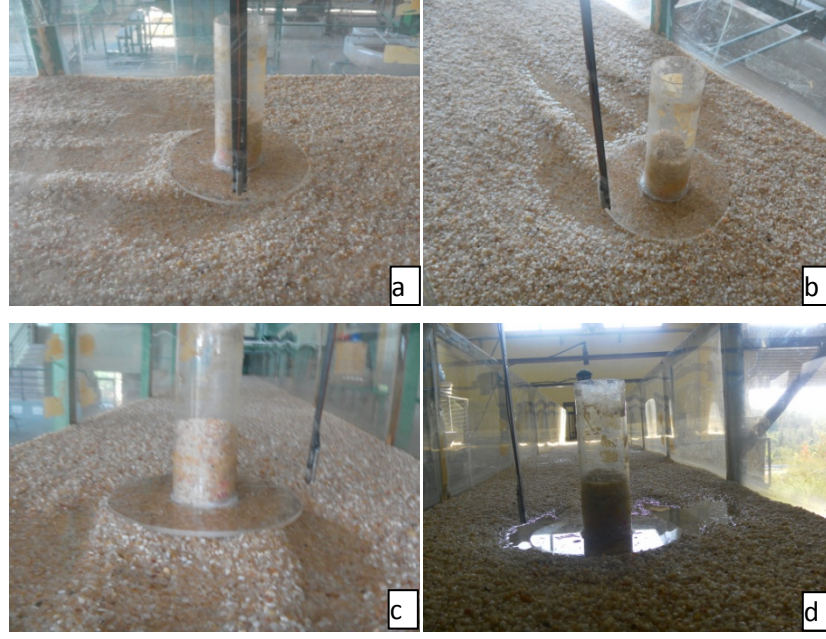
Şekil 4.178 C13 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.179 C13 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği arasındaki ilişki

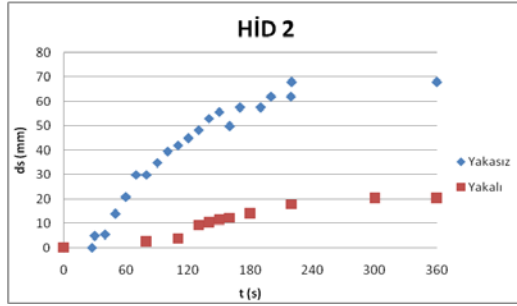


Şekil 4.180 C13 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasındaki ilişki

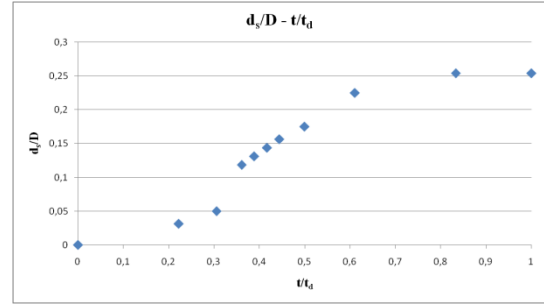


Şekil 4.181(a)(b)(c)(d) C13 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

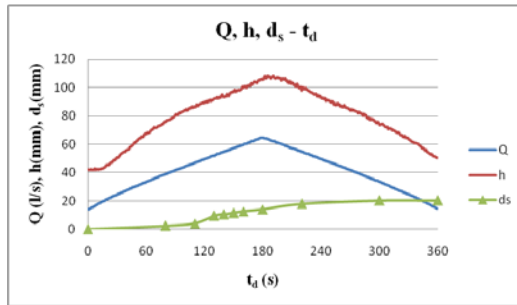
C14 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.182’de verilmiştir. Yaka taban malzemesinden 1 cm yukarısında olup yakanın kalınlığı 6 mm’dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %70,15 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.183’te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.184’te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi verilmektedir. Şekil 4.185’te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi gösterilmiştir. Akım şiddeti deney süresince 1,0 değerine yakın değerler almıştır. Şekil 4.186’da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.187’de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.188’de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği çizilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.189’da ve Şekil 4.190’da verilmiştir. C14 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.191’de görülmektedir.



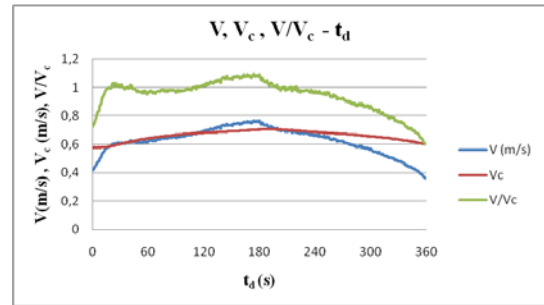
Şekil 4.182 C14 deneyi sırasında ve yaka yokken oyulma derinlikleri



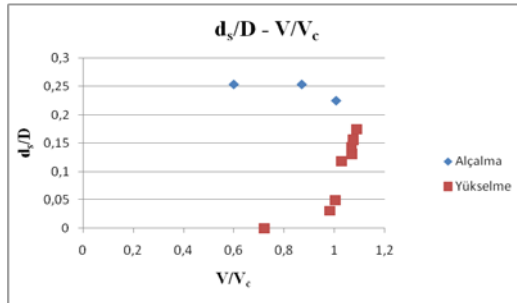
Şekil 4.183 C14 deneyi boyutsuz oyulma ölçülen derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



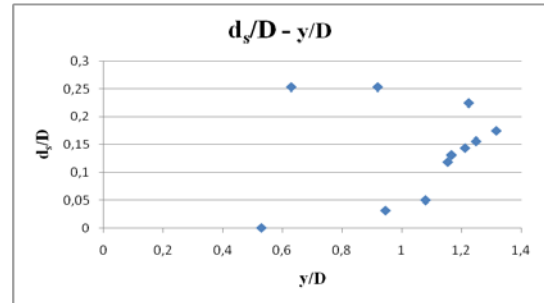
Şekil 4.184 C14 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



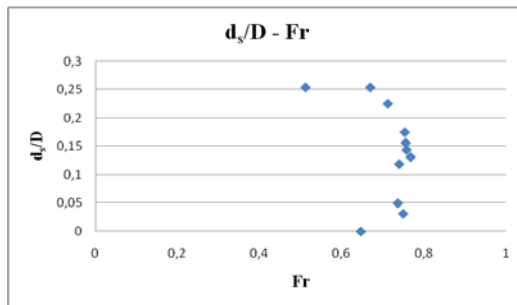
Şekil 4.185 C14 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



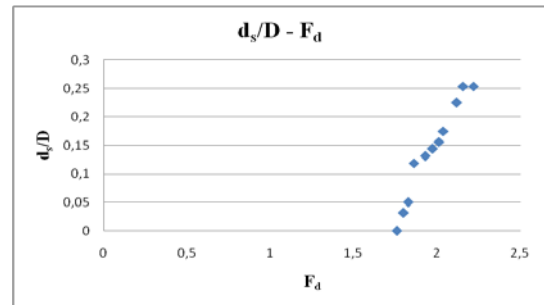
Şekil 4.186 C14 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



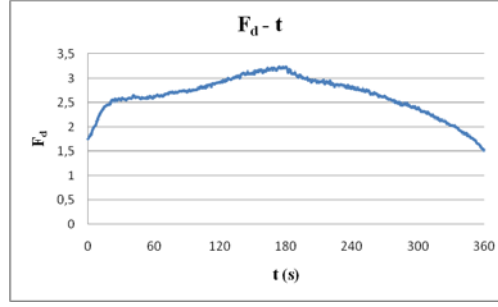
Şekil 4.187 C14 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



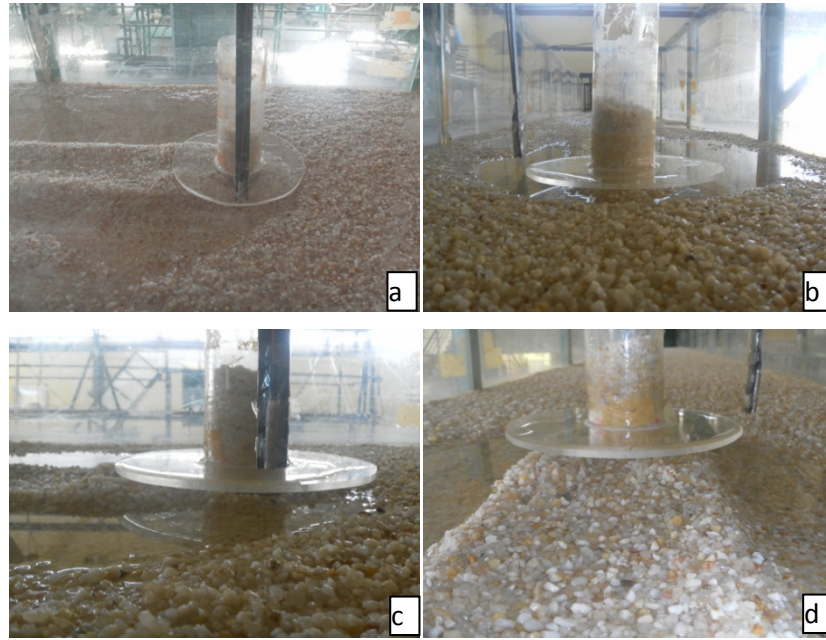
Şekil 4.188 C14 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.189 C14 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



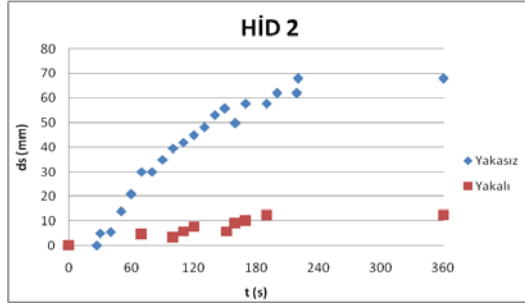
Şekil 4.190 C14 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



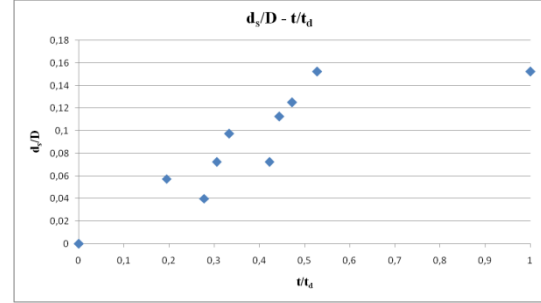
Şekil 4.191(a)(b)(c)(d) C14 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

C15 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.192'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 2 cm yukarısına yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 6 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %82,06 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.193'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.194'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi verilmektedir. Şekil 4.195'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.196'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.197'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.198'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği çizilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve

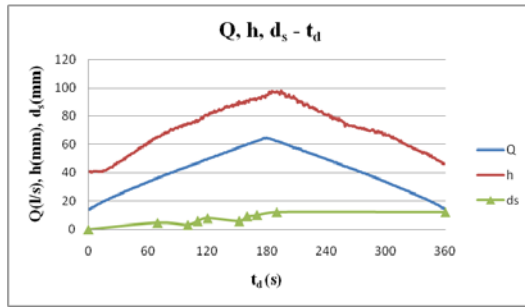
zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.199'da ve Şekil 4.200'de verilmiştir. C15 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.201'de görölmektedir.



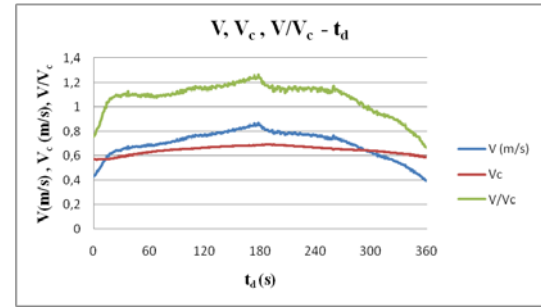
Şekil 4.192 C15 deneyi sırasında ve yaka yokken oyulma derinlikleri



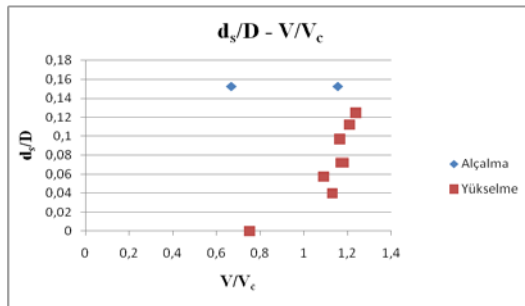
Şekil 4.193 C15 deneyi boyutsuz oyulma ölçölen derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



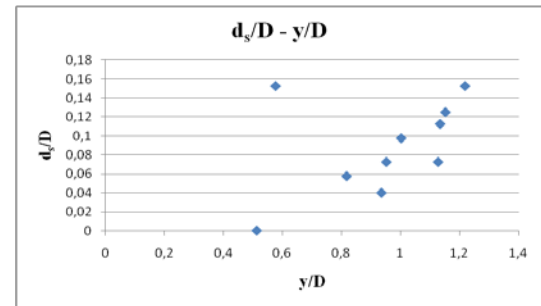
Şekil 4.194 C15 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



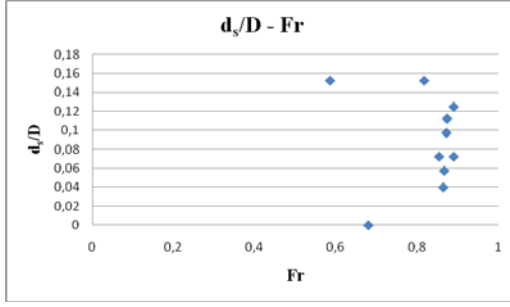
Şekil 4.195 C15 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



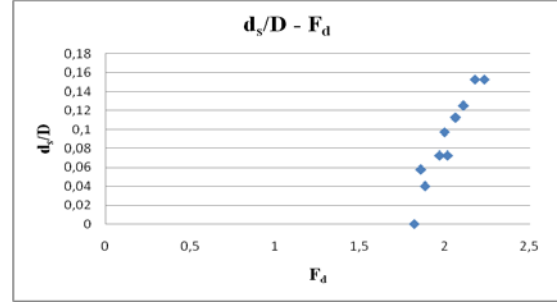
Şekil 4.196 C15 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



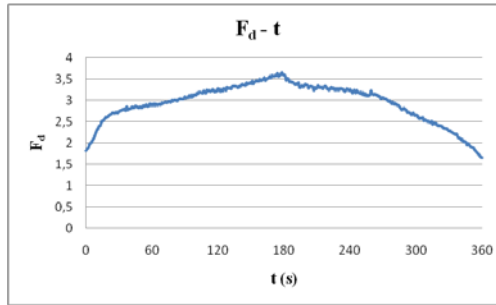
Şekil 4.197 C15 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



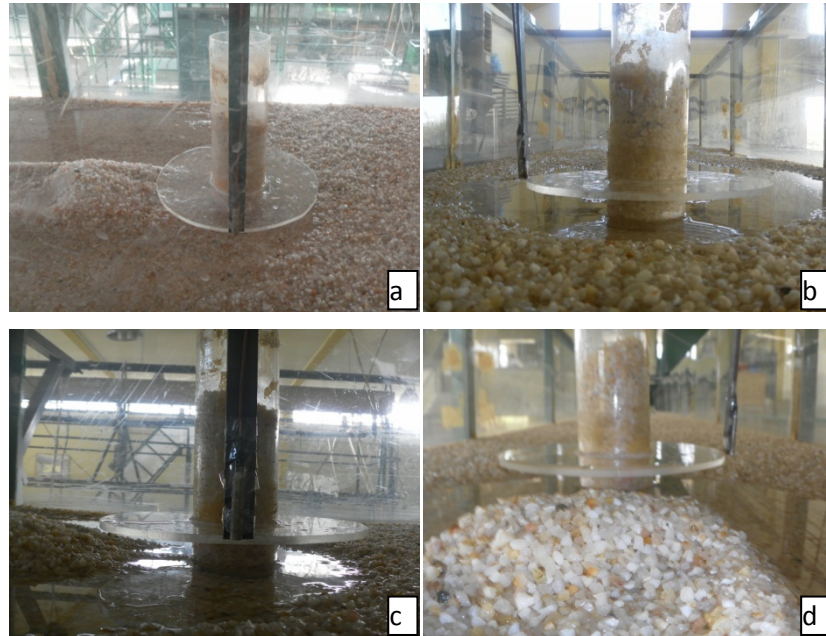
Şekil 4.198 C15 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.199 C15 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



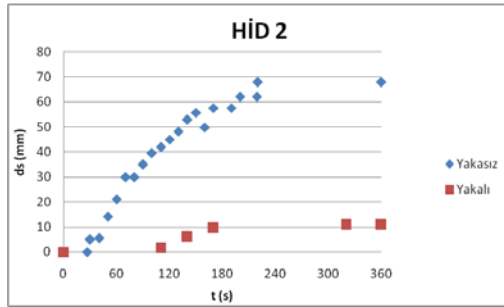
Şekil 4.200 C15 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki



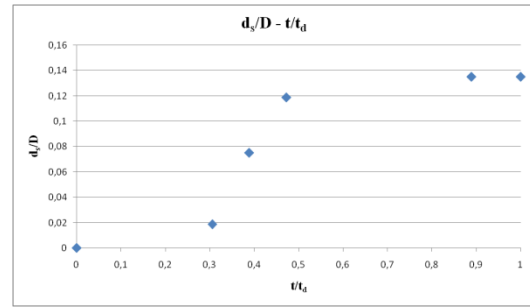
Şekil 4.201 (a)(b)(c)(d) C15 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

C16 deneyi sırasında ölçülen oyulma derinlikleri ile yaka yokken ölçülen oyulma derinlikleri Şekil 4.202'de verilmiştir. Yaka taban malzemesinin 1 cm altına

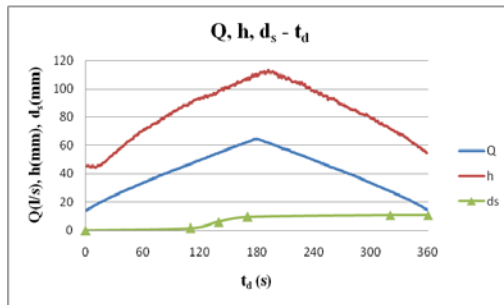
yerleştirilmiş olup yakanın kalınlığı 6 mm'dir. Yakanın köprü ayağı etrafındaki oyulmaları %84,12 azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.203'te boyutsuz oyulma derinliğinin zamanla değişimi grafiği yer almaktadır. Şekil 4.204'te zamana bağlı debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi verilmektedir. Şekil 4.205'te yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.206'da akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.207'de yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliğine göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.208'de Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ile değişimi grafiği çizilmiştir. Yoğunluk esaslı tane Froude sayısının boyutsuz oyulma derinliği ve zamanla değişimi grafikleri Şekil 4.209'da ve Şekil 4.210'da verilmiştir. C16 deneyi sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 4.211'de görülmektedir.



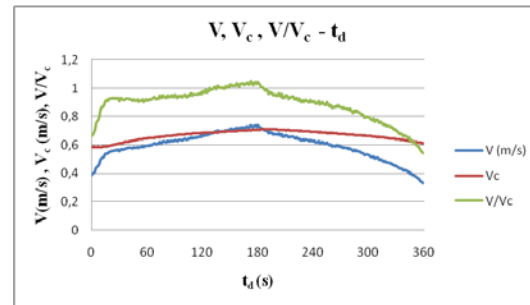
Şekil 4.202 C16 deneyi sırasında ve yaka yokken oyulma derinlikleri



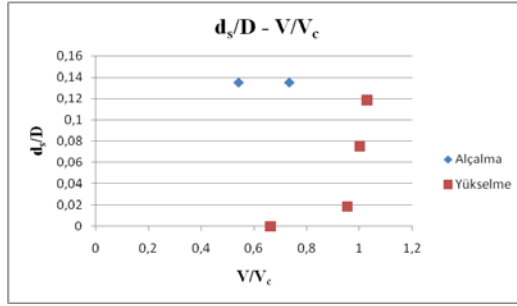
Şekil 4.203 C16 deneyi boyutsuz oyulma ölçülen derinliğinin boyutsuz zaman ile değişimi



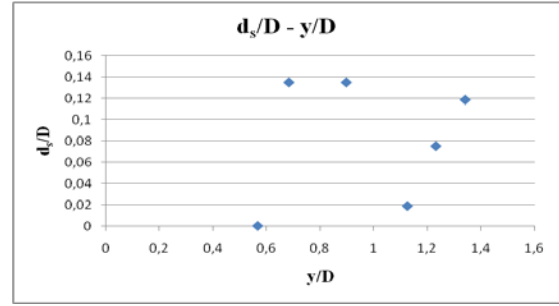
Şekil 4.204 C16 deneyi süresince debi, su seviyesi ve oyulmanın değişimi



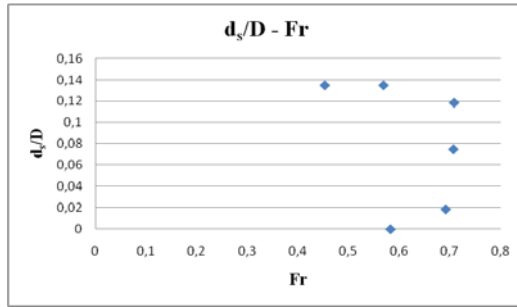
Şekil 4.205 C16 deneyi yaklaşım akım hızı, kritik hız ve akım şiddetinin boyutsuz zaman ile değişimi



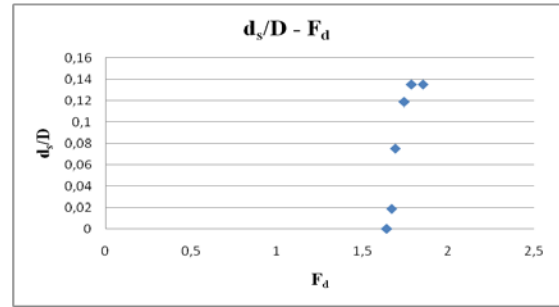
Şekil 4.206 C16 deneyi akım şiddeti ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



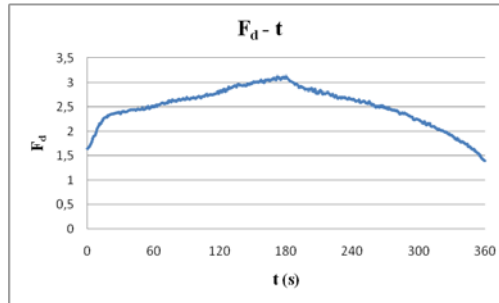
Şekil 4.207 C16 deneyi yaklaşım akım derinliğinin boyutsuz oyulma derinliği ile ilişkisi



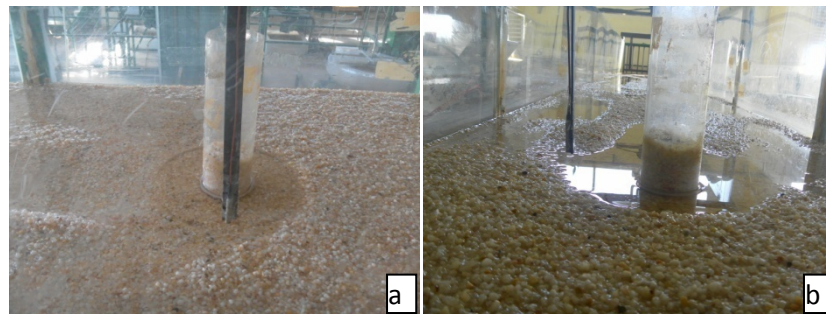
Şekil 4.208 C16 deneyi boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi



Şekil 4.209 C16 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile boyutsuz oyulma derinliği grafiği



Şekil 4.210 C16 deneyi yoğunluk esaslı tane Froude sayısı (F_d) ile zaman arasında ilişki

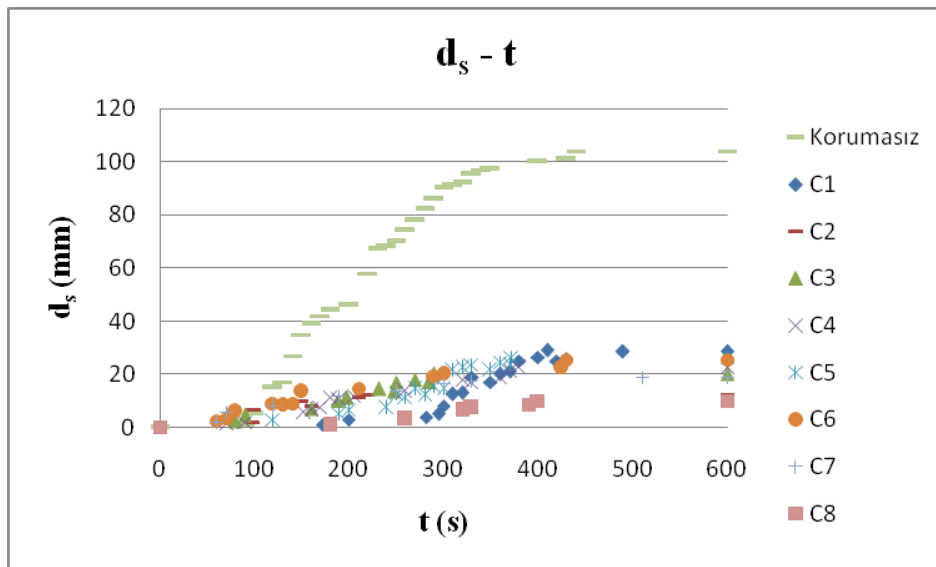




Şekil 4.211(a)(b)(c)(d) C16 deneyi sonrası çekilen fotoğraflar

4.3 Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

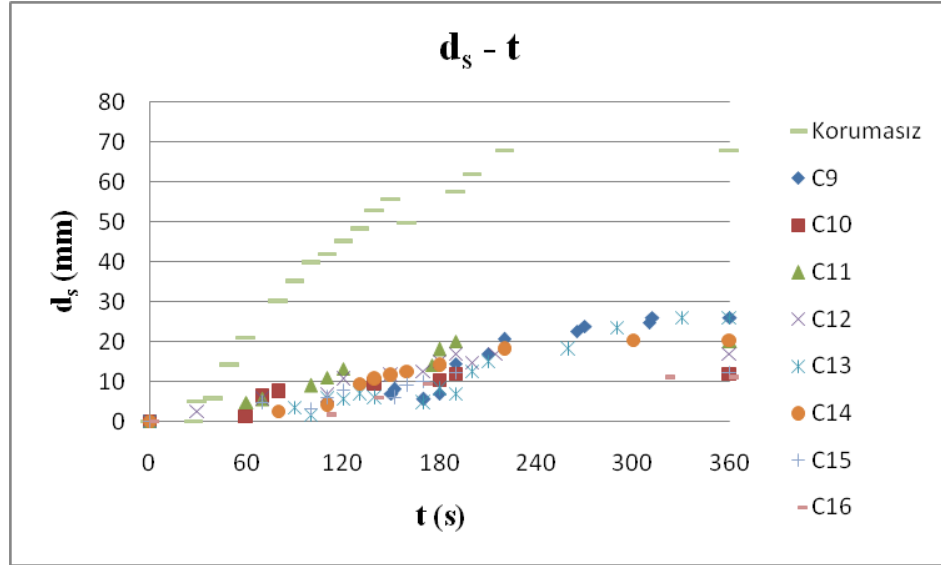
Şekil 4.212'de Hid 1 şartları altında yapılan yaka deneyleri sırasında ölçülen oyulma derinliğinin zamanla değişimi gerçekleştirilen tüm deneyler için verilmiştir. Yakanın taban malzemesinin 1 cm altına gömüldüğü C2 ve C8 deneylerinde oyulmanın diğer deneylere göre çok daha az olduğu gözlemlenmiş ve köprü ayağı etrafındaki oyulma daha geç başlamıştır. En fazla oyulma derinliği ise yakanın taban malzemesinin hemen üzerine yerleştirildiği C1 ve C5 deneyleri sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 4.212 Hid 1 yaka deneylerinde oyulma derinliğinin zamanla değişimi

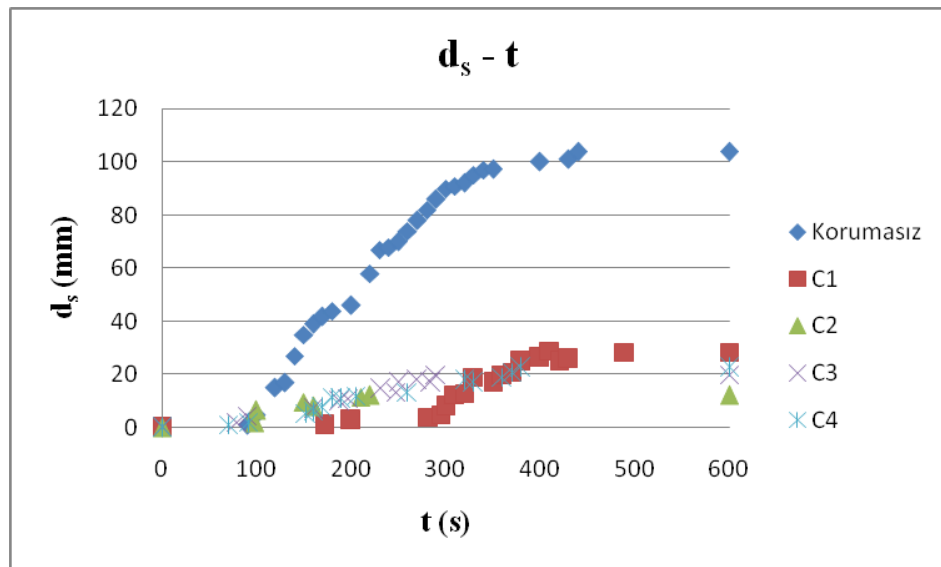
Şekil 4.213'te Hid 2 akım koşullarının geçerli olduğu yaka deneyleri sırasında ölçülen oyulma derinliğinin zamanla değişim grafiği tüm deneyler için gösterilmiştir. Yakanın taban malzemesinin 1 cm altına gömüldüğü C10 ve C16 deneylerinde

oyulmanın diğer deneylere göre çok daha az olduğu gözlemlenmiştir. En fazla oyulma derinliği ise yakanın taban malzemesinin hemen üzerine yerleştirildiği C9 ve C13 deneyleri sonucunda elde edilmiştir.



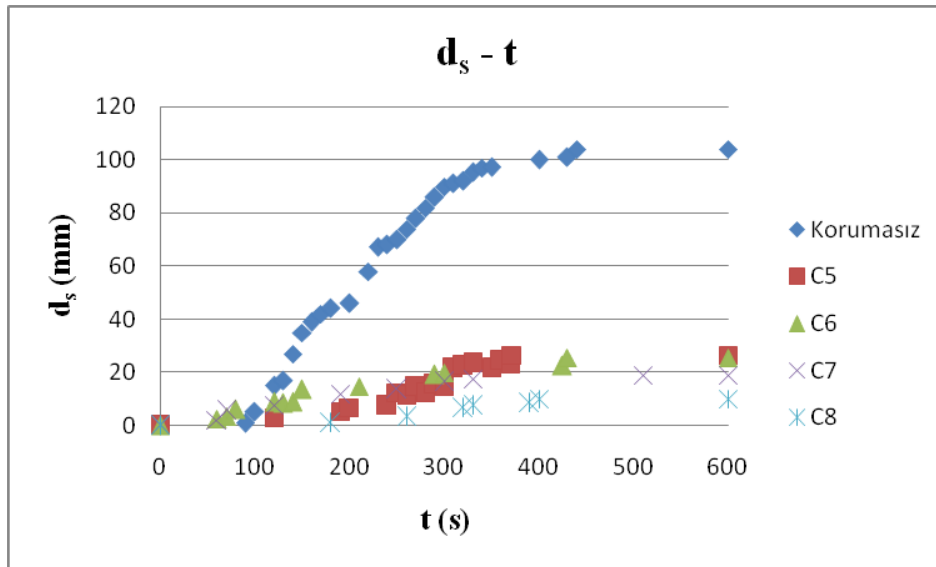
Şekil 4.213 Hid 2 yaka deneyleri sonucu elde edilen oyulma derinliği - zaman değişimi

Şekil 4.214'te Hid 1 akım koşulları altında 3 mm kalınlığa sahip yakanın farklı konumları için deney boyunca ölçülen oyulma derinlikleri verilmektedir. En az oyulma derinliği yakanın taban malzemesinin 1 cm altına yerleştirildiği C2 deneyinde meydana gelmiştir.



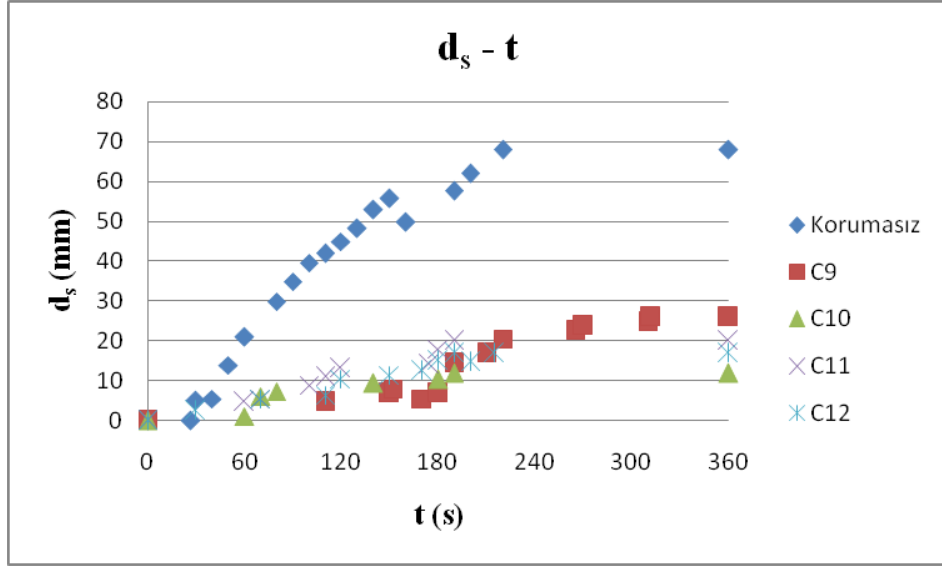
Şekil 4.214 Hid 1 için koruma önlemi alınmamış köprü ayağı, C1, C2, C3 ve C4 deneylerinin oyulma zaman grafiği

Şekil 4.215'te Hid 1 akım koşulları altında 6 mm kalınlığa sahip yakanın farklı konumları için deney boyunca ölçülen oyulma derinlikleri verilmektedir. En az oyulma derinliği yakanın taban malzemesinin 1 cm altına yerleştirildiği C8 deneyinde meydana gelmiştir.



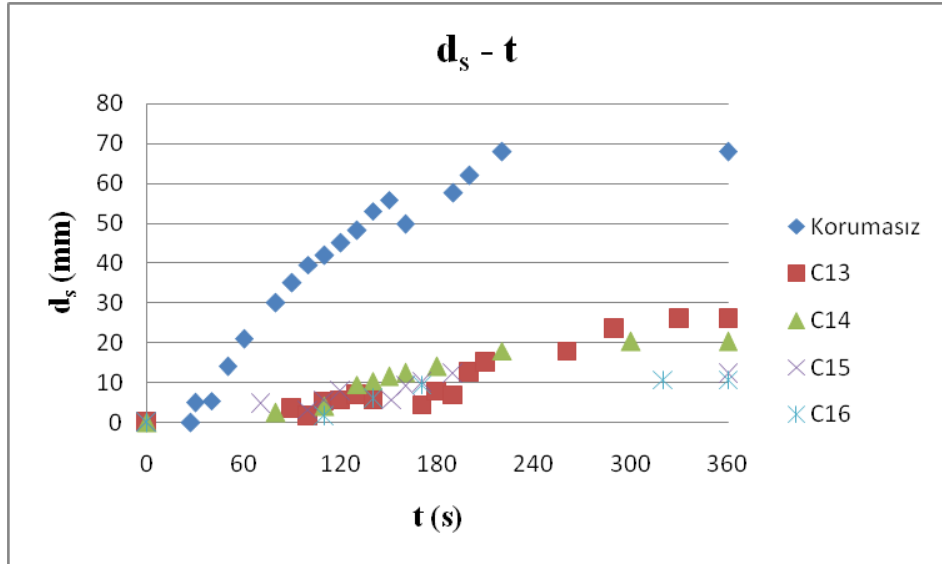
Şekil 4.215 Hid 1 için koruma önlemi alınmamış köprü ayağı, C5, C6, C7 ve C8 deneylerinin oyulma zaman grafiği

Şekil 4.216'da Hid 2 akım koşulları altında 3 mm kalınlığa sahip yakanın farklı konumları için deney boyunca ölçülen oyulma derinlikleri verilmektedir. En az oyulma derinliği yakanın taban malzemesinin 1 cm altına yerleştirildiği C10 deneyinde meydana gelmiştir.



Şekil 4.216 Hid 2 için koruma önlemi alınmamış köprü ayağı, C9, C10, C11 ve C12 deneylerinin oyulma zaman grafiği

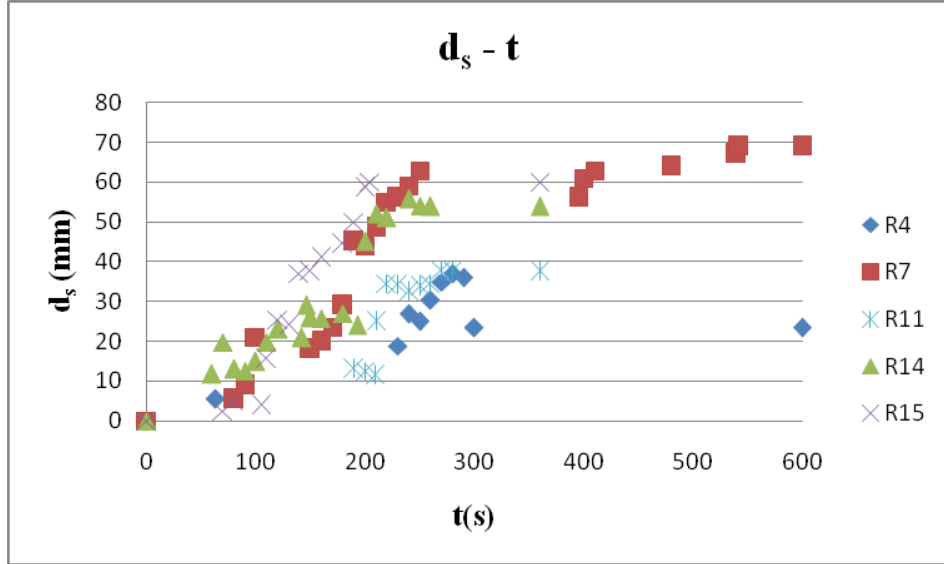
Şekil 4.217'de Hid 2 akım koşulları altında 6 mm kalınlığa sahip yakanın farklı konumları için deney boyunca ölçülen oyulma derinlikleri verilmektedir. En az oyulma derinliği yakanın taban malzemesinin 1 cm altına yerleştirildiği C16 deneyinde meydana gelmiştir.



Şekil 4.217 Hid 2 için koruma önlemi alınmamış köprü ayağı, C13, C14, C15 ve C16 deneylerinin oyulma zaman grafiği

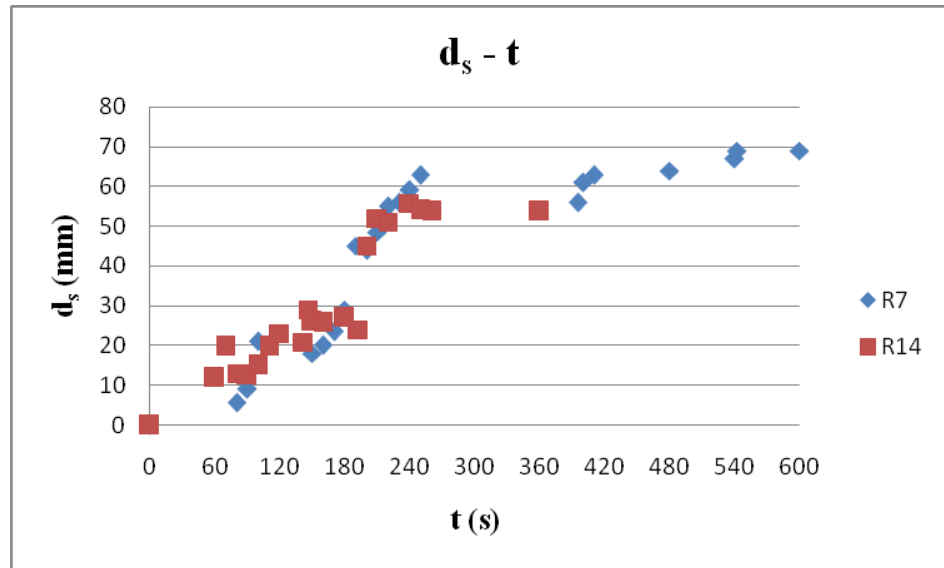
Şekil 4.218'de gerçekleştirilen riprap deneylerinde ölçülen oyulma derinliklerinin zamanla değişimi riprap tabakasının bozulduğu tüm deneyler için görülmektedir. En

az oyulma derinliği riprap çapı 22 mm olan R4 deneyinde gözlenmiştir. R15 deneyinde riprap tabakası kanal genişliği boyunca serilmiş olup oyulma derinliğini çok fazla azaltmadığı görülmektedir.



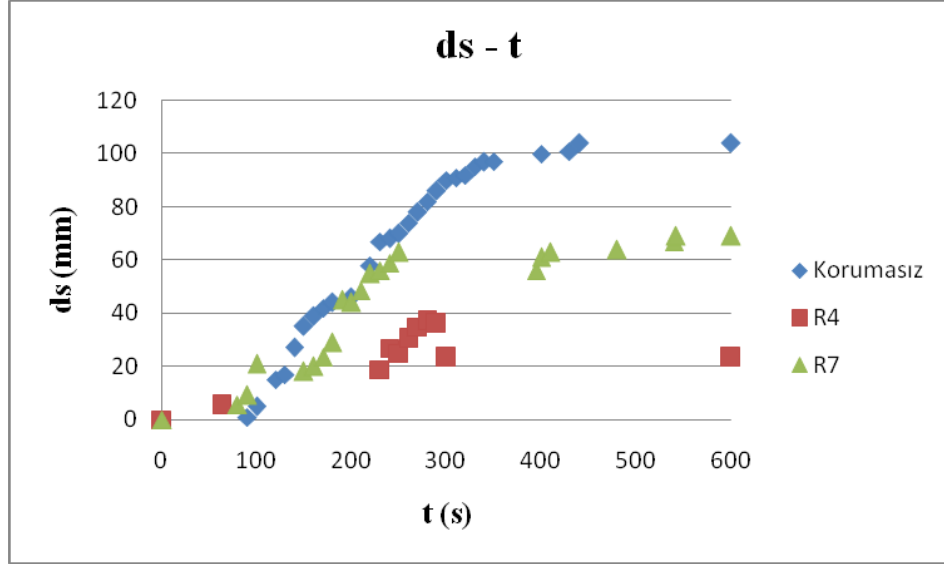
Şekil 4.218 Riprap deneylerinin oyulma zaman grafiği

Şekil 4.219'da riprap ortalama çapı, kalınlığı ve genişliği aynı olan ancak deney süreleri farklı iki deneyin oyulma zaman grafiği verilmektedir. Deney süresi arttıkça oyulma derinliğinin de arttığı görülmektedir.



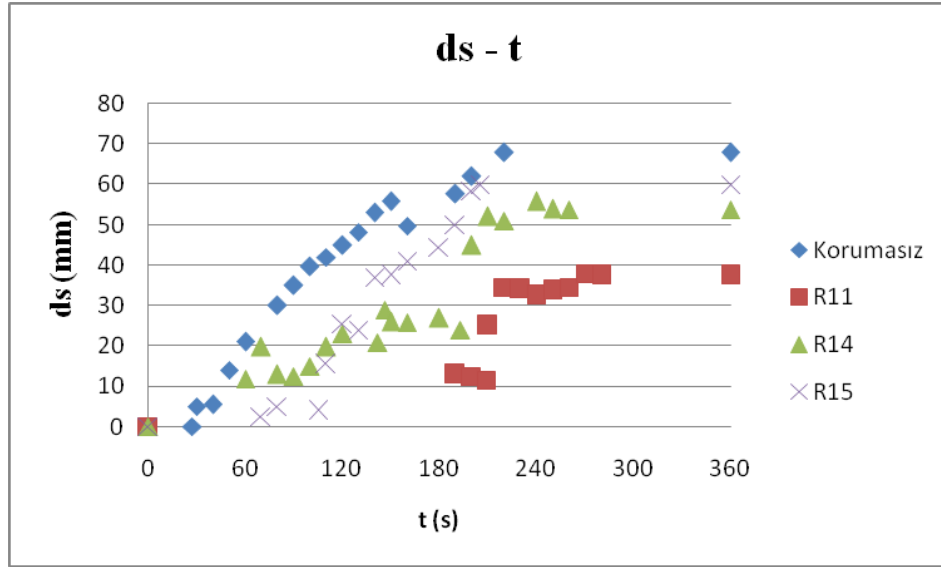
Şekil 4.219 R7 ve R14 deneylerinin oyulma zaman grafiği

Şekil 4.220'de Hid 1 akım koşulları altında tek sıra kalınlığında taban malzemesinin üzerine serilmiş iki farklı riprap çapı için ölçülen oyulma değerleri verilmektedir. R4 deneyinde riprap çapı 22 mm iken R7 deneyinde 7 mm'dir. Kullanılan riprap çapı daha büyük olan R4 deneyinde oyulma daha az gözlenmiştir.



Şekil 4.220 Hid 1 için koruma önlemi alınmamış köprü ayağı, R4 ve R7 deneylerinin oyulma zaman grafiği

Şekil 4.221'de Hid 2 akım koşulları altında tek sıra kalınlığında taban malzemesinin üzerine serilmiş iki farklı riprap çapı için ölçülen oyulma değerleri verilmektedir. R11 deneyinde riprap çapı 22 mm iken R14 ve R15 deneylerinde 7 mm'dir. Kullanılan riprap çapı daha büyük olan R11 deneyinde beklendiği gibi oyulma daha az gözlenmiştir. R14 ve R15 deneylerinde riprap genişliği sırasıyla 40 cm ve 32 cm olup genişliğin fazla olduğu R14 deneyinde oyulma derinliğinin daha az olduğu görülmektedir.

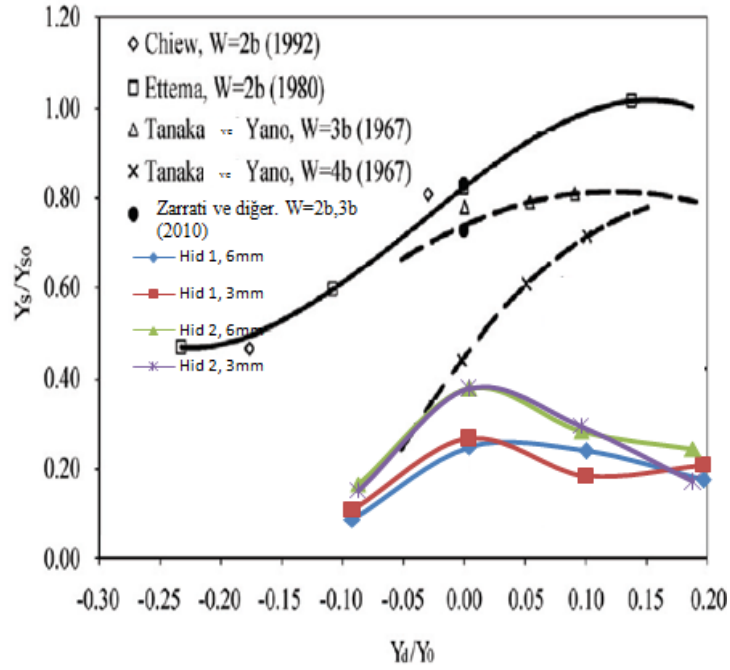


Şekil 4.221 Hid 2 için koruma önlemi alınmamış köprü ayağı, R11, R14 ve R15 deneylerinin oyulma zaman grafiği

Şekil 4.222'de yakanın yerinin oyulma derinliği ile olan ilişkisi literatürde verilen diğer çalışma sonuçlarıyla beraber görülmektedir. Zarrati ve diğer., (2010) deneylerini yaka genişliğini köprü ayak genişliğinin 2 ve 3 katı olarak gerçekleştirmişler ve yakanın oyulma derinliğinin sırasıyla yaklaşık %20 ve %26 azalttığını gözlemlenmişlerdir. Tanaka ve Yano, (1967) yaka genişliğini köprü ayak genişliğinin 3 ve 4 katı, Chiew (1992) ve Ettama (1980) ise 2 katını olarak çalışmalarını yapmışlardır. Deneylerin tümü kararlı akım koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapılırken Hidrograf 1'de pik debinin geçtiği ve su seviyesinin en yüksek olduğu değer alınmıştır.

Burada;

Y_s : Nihai oyulma derinliği, Y_{s0} : Koruyucu önlem olmaması durumunda oyulma derinliği, b : Köprü orta ayağı çapı, Y_0 : Yaklaşım akım derinliği, W : Yaka genişliği ve Y_d : Yakanın taban seviyesinden itibaren konumudur.



Şekil 4.222 Maksimum oyulma derinliğinin yakarın yerine göre aldığı değerler (Zarrati ve diğer., 2010)

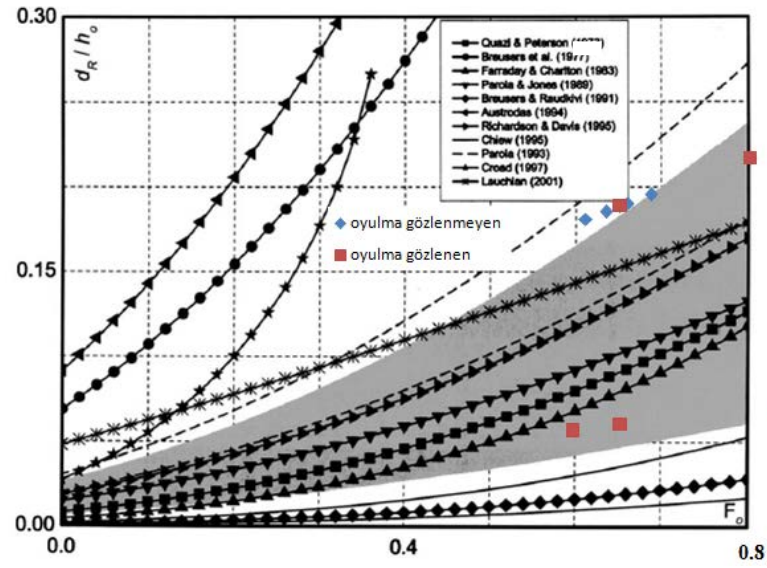
Şekil 4.223'te riprap tabakasının bozulduğu deneyler için boyutsuz riprap dane çapının (riprap dane boyutunun yaklaşım akım derinliğine oranının) Froude sayısı ile değişimi bu çalışma ve literatürde verilen diğer çalışma sonuçları ile verilmektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde riprap çapı 7 ve 22 mm alınmıştır. Bu değerler üniform taban malzemesinin yaklaşık 2 ve 6 katıdır.

Burada;

d_R : Riprap boyutu,

h_0 : Yaklaşım akım derinliği,

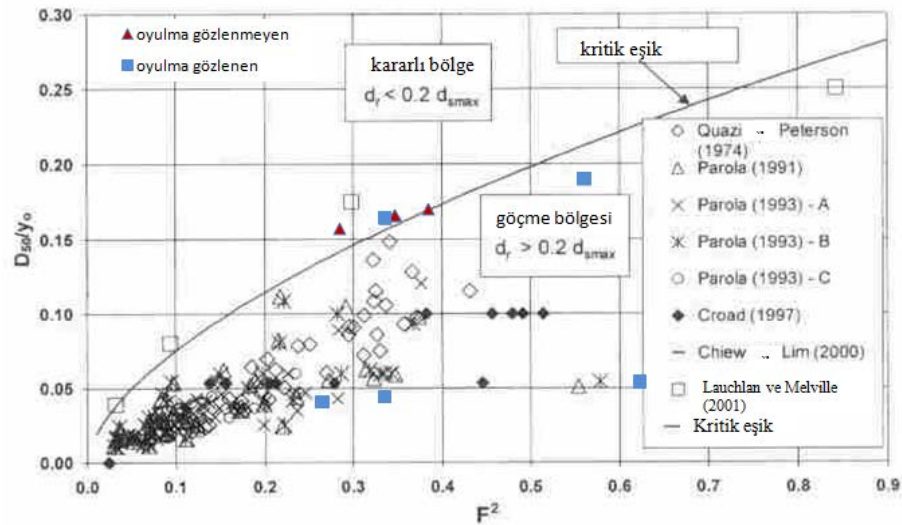
F_0 : Yaklaşım akım Froude sayısıdır.



Şekil 4.223 Sınır riprap değerinin Froude sayısı ile değişimi (Unger ve Hager, 2006)

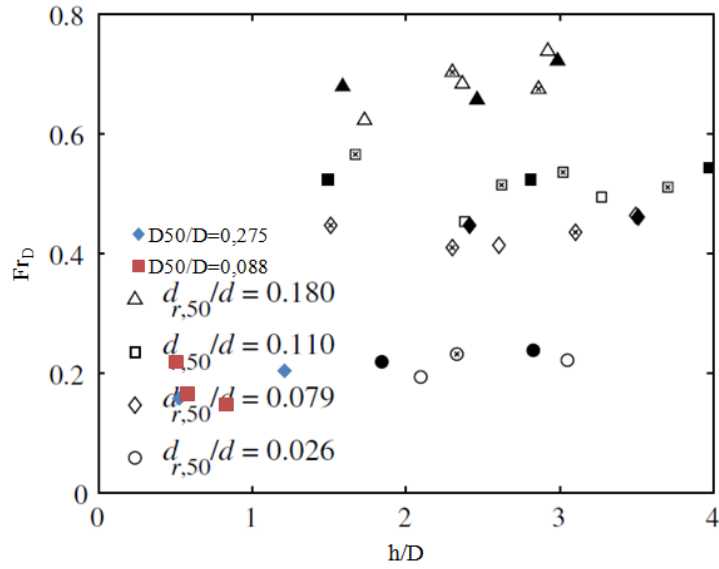
Taban malzemesinin üzerine yerleştirilmiş riprap tabakası için boyutsuz riprap dane çapı (D_{50}/y_0) ile Froude sayısı arasındaki ilişki Şekil 4.224'te verilmektedir. Parola (1993) A deneyinde dikdörtgen köprü ayağının etrafına serilen riprap tabakası taban malzemesini hemen üzerine yerleştirilmiş, B deneyinde riprap taban malzemesi altına gömülmüş, C deneyinde ise köprü ayağı dairesel kesitli seçilmiştir.

Şekilde $F^2 = \frac{U^2}{gy_0}$ Froude sayısının karesidir. U akım hızı ve g yerçekimi ivmesidir.



Şekil 4.224 Zemin yüzeyine yerleştirilmiş riprap tabakası için deney sonuçlarının karşılaştırılması (Lauchlan ve Melville, 2001)

Şekil 4.225'te göreceli yaklaşım akım derinliğinin ayak çapı Froude sayısı $(Fr_D = \frac{V}{\sqrt{gD}}, D$ köprü ayak çapıdır.) ile değişimi görülmektedir. Bu grafikte verilen noktalar riprap tabakasının harekete başladığı ana ait değerlerdir. Tez kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar, ayak gruplarında riprap stabilitesini inceleyen Simarro, Chreties ve Teixeira (2011)'in elde ettiği sonuçlar ile beraber görülmektedir.



Şekil 4.225 Köprü çapı Froude sayısı ile akım yüksekliği kazık çapı oranının değişimi (Simarro ve diğer.,2011)

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

TÜBİTAK 109M637 nolu proje kapsamında yapılan bu tez çalışmasında köprü orta ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmaların önlenmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Koruyucu önlem olarak köprü orta ayağı etrafına riprap ve yaka yerleştirilmiş ve iki farklı hidrograf kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Riprap deneylerinde öncelikle en uygun riprap çapının belirlenmesi için literatürde kabul görmüş bağıntı kullanılmış ve bu çap 22 mm olarak belirlenmiştir. Deneylerde ortalama dane çapı 22 mm ve taban malzemesinin iki katı çapa sahip olan 7 mm çapındaki riprap malzemeleri kullanılmıştır. 22 mm çapındaki riprap malzemesinin köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmaları önlediği gözlenmiştir. Beklenildiği gibi riprap çapı büyüdükçe yerel oyulmaların da azaldığı saptanmıştır. Uygulamada riprap çapını gereksiz arttırmak ekonomik yönden zararlara yol açacağından, literatürde verilen bağıntılar kullanılarak en uygun riprap çapı belirlenmelidir. Dikdörtgen kanalın eni boyunca serilen riprap malzemesi sadece köprü ayağı etrafında oyulmuştur. Deneysel çalışmalarda riprap kalınlığı, riprap malzemesinin 2 katına kadar test edilmiştir. Çift sıra yerleştirilen riprap deneylerinde oyulma daha az meydana gelmiştir.

Yaka deneylerinde yaka genişliği, literatürdeki mevcut çalışmalar sonucunda en uygun yaka genişliği olarak belirtilen köprü ayağı çapının üç katı olarak seçilmiştir. Deneyler sırasında yakanın kalınlığının ve yerinin oyulmaya etkisi araştırılmıştır. 3 mm ve 6 mm kalınlığındaki yakalar kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonrasında yaka kalınlığının oyulma derinliğine çok fazla etki etmediği gözlenmiştir. Yaka, taban malzemesinin hemen üzerine, köprü ayak çapının yaklaşık %10'u olan 1 cm altına ve 1 cm üzerine yerleştirilerek yakanın konumunun etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar yakanın köprü ayak çapının %10'u mertebesinde taban malzemesinin altına gömüldüğünde oyulmanın en az olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmalarda deney süresi arttıkça oyulma derinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında iki farklı süreye sahip hidrograf denenmiş olup farklı sürelerde yeni hidrograflar denenerek mevcut çalışma geliştirilebilir.

Deneyel bulgular aynı zamanda literatürde mevcut diğer deneysel çalışmaların sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Literatürde konuyla ilgili yapılan deneysel çalışma sonuçları genelde kararlı akım koşulları altında elde edilmiş olup gözlenen farklılıkların en büyük sebebi bu çalışmanın sonuçlarının kararsız akım şartlarında elde edilmiş olmasıdır. Bu sebeple karşılaştırma yapılırken deneylerdeki pik debinin geçtiği akım özellikleri kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde riprap çapı taban malzemesi çapının 2 ve 6 katıdır. Bu çalışmanın devamı olarak ara çaplarda riprap malzemesi kullanılarak deneylerin gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca bu tez kapsamında araştırılmayan yaka genişliğinin de oyulma derinliği üzerindeki etkisinin de araştırılması yerinde olacaktır.

KAYNAKLAR

- Alabi, P.D. (2006). *Time development of local scour at bridge pier fitted with a collar*. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Bonasoundas, M. (1973). *Stromungsvorgang und Kolkproblem*. Oscar von miller Institu, Technical University Of Munich, Germany
- Bhalerao, A. R., and Garde, R. J. (2010). Design of riprap for protection against scour around bridge pier. *The Indian Society For Hydraulics Journal Of Hydraulic Engineering*, 16 (1), 79–91
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15 (3), 211-252
- Chabert, J., and Engeldinger, P. (1956). *Etude des affouillements autour des piles de points (Study of scour at bridge piers)*. Bureau Central d.Etudesles Equipment d.Outre-Mer, Laboratoire National d.Hydraulique, France
- Chang, H.H. (1988). *Fluvial processes in river engineering*. John Wiley&Sons
- Cheremisinoff, P. N., Cheremisinoff, N. P., and Cheng, S. L. (1987). *Hydraulic mechanics 2*. Civil Engineering Practice, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, USA
- Chiew, Y. M. (1992). Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 118(9), 1260–1269
- Chiew, Y. M. (1995). Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121 (9), 635–643

- Chiew, Y., and Lim, S. (2003). Protection of bridge piers using a sacrificial sill. *Water & Maritime Engineering Journal, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Journals*, 156(1), 53–62
- Chiew, Y. M. (2004). Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130 (3), 218–226
- Dey, S., and Barbhuiya, A. K. (2004). Clear-water scour at abutments in thinly armoured beds. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130(7), 622–634
- Ettema, R. E. (1980). Scour at bridge piers. Rep. No. 236, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- Fotherby, L. M., and Jones, J. S. (1993). *The influence of exposed footings on pier scour depths*. Proceeding of Hydraulics Conference, ASCE, New York, 922–927
- Gales, R. R. (1938). The principles of river training for railway bridges and their application to the case of the Harding bridge over the Lower Ganges at Sara. *Journal of Civil Engineering*, 10(2), 136–224
- Gümgüm, F. (2011). *Dairesel kesitli köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmalarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye
- Güney, M. Ş., Bombar, G., Aksoy, A. O., ve Doğan, M. (2012). Use of Uvp to investigate the evolution of bed configuration. *Journal of Civil Engineering, KSCE*
- Habername (2012). *Filyos Köprüsü'nü ayakları taşıyamamış*, 06 Aralık 2012, <http://www.habername.com/haber-filyos-koprusu-caycuma-istanbul-teknik-universitesi-itu--77806.htm>
- Hoffmans, G. J. C. M., and Verheij, H. J. (1997). *Scourmanual*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands

- Julien, P. Y., Ruff J. F., and Ji U. (2006). *Alternative designs of pier-scour protection for the Gupo and Subway Bridge on the Lower Nakdong River*. Colorado State University, Colorado, USA
- Kandasamy, J.K. (1989). *Abutment scour*. Rep. No. 458, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand
- Khawairakpam, P., and Mazumdar, A. (2009). Local scour around hydraulic structures. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1 (6), 59–61
- Kumar, V., Raju, K. G. R., and Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (12), 1302–1306
- Lagasse, P.F., and Richardson, E.V. (2001). ASCE compendium of stream stability and bridge scour papers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 127 (7), 531–533
- Laursen, E. M., and Toch, A. (1956). *Scour around bridge piers and abutments*. Iowa Highway Research Board, Bull. No.4, Bureau of Public Roads, Iowa
- Mashahir, M. B., Zarrati, A. R., Rezaei M. J., and Zokaei, M. (2009). Effect of collars and bars in reducing the local scour around cylindrical bridge piers. *IJE Transactions B: Applications*, 22 (4), 333–342
- Masjedi, A., Bejestan, M. S., and Esfandi, A. (2010). Experimental study on local scour around single oblong pier fitted with a collar in a 180 degree flume bend. *International Journal of Sediment Research*, 25(3), 304–312
- Melville, B. W., (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123 (2), 125–136

- Melville, B.W., and Sutherland, A.J., (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of the Hydraulics Division*, 114 (10), 1210–1225
- Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publications, LLC, Colorado, USA
- Melville, B. W., and Lauchlan, C. S. (2001). Riprap protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (5), 412–418
- Met-flow (2002). *UVP monitor model uvp-duo with software version 3 user's guide*. Lausanne, Switzerland
- Neill, C. R. (1973). *Guide to bridge hydraulics*. Roads and Transportation Association of Canada, Univ. Of Toronto Press, Toronto, Canada
- Nohani, E., Bejestan, M. S., Masjedi, A., and Kashkuli, H. A. (2012). *Contemporary Engineering Sciences*, 5 (8), 381–390
- Parola, A.C., (1993). Stability of riprap at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 119 (10), 1080–1093
- Parola, A. C. (1995). *Boundary stresses and stability of riprap at bridge piers*. River Coastal and Shore Line Protections: Erosion Control Using Riprap and Armor Stone, John Wiley & Sons, 149–156
- Posey, C. J. (1974). Tests of scour protection for bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 100(12), 1773–1783
- Raudkivi, A. J. (1986). Functional trends of scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 112(1), 1–12
- Richardson, E. V., Harrison, L. J., and Davis, S. R. (1991). *Evaluating scour at bridges*. Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C

- Richardson, E. V., and Davis, S. R. (1995). Evaluating scour at bridges (3rd ed.) (6.1-6.6). Hydr. Engrg. Circular No. 18 (HEC-18), Rep. No. FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Simarro, G., Chreties, C., and Teixeira, L. (2011). Riprap sizing for pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 137* (12), 1676–1679
- Ting, F. C. K., Briaud, J. L., Chen, H. C., Gudavalli, R., and Perugu, S. (2001). Flume tests for scour in clay at circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 127*(11), 969–978
- Tanaka, S., and Yano, M. (1967). *Local scour around a circular cylinder. proceedings, 12th IAHR Congress, Colorado State University, Colorado, USA*
- Thomas, Z. (1967). *An interesting hydraulic effect occurring at local scour. Proceedings. 12th IAHR Congress, Colorado State University, Colorado, USA*
- 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*
- Unger, J., and Hager, W. H. (2006). Riprap failure at circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132* (4), 354–362
- Yanmaz, A.M. (2002). *Köprü Hidroliği*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık A.Ş.
- Yasser, A. M., Gamal, M. A., Abdelazim, M. N., and Amira, A. F. (2008). *Effect of triangular collar width on local scour at bridge pier under very low Froude numbers*. Ninth International Congress of Fluid Dynamics & Propulsion, ASME, Egypt, 1–6

Zarrati, A. R., Nazariha, M., and Mashahir, M. B. (2006). Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132 (2), 154–162

Zarrati, A. R., Chamani, M. R., Shafaie, A., and Latifi, M. (2010). Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap. *International Journal of Sediment Research*, 25 (3), 313–321