

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA OLUŞAN
YEREL OYULMALARIN HAREKETLİ TABAN
DURUMUNDA DENEYSEL VE NÜMERİK
ARAŞTIRILMASI**

OlcaY MAYDA

Mart, 2013

İZMİR

**KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA OLUŞAN
YEREL OYULMALARIN HAREKETLİ TABAN
DURUMUNDA DENEYSEL VE NÜMERİK
ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik, Hidroloji ve Su Kaynakları Programı

Olçay MAYDA

Mart, 2013

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

OLCAY MAYDA tarafından **PROF. DR. M. ŞÜKRÜ GÜNEY** yönetiminde hazırlanan **“KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA OLUŞAN YEREL OYULMALARIN HAREKETLİ TABAN DURUMUNDA DENEYSEL VE NÜMERİK ARAŞTIRILMASI”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. M. Şükrü GÜNEY

Danışman


Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Davut ÖZDAĞLAR

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Ayşe OKUR
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez 109M637 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneyler ve çalışmalar sonucunda hazırlanmış olup bu çalışmalar sırasında bilgisini ve desteğini almış olduğum, projenin de yürütücüsü olan tez danışmanım sayın Prof. Dr. M. Şükrü GÜNEY'e, teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar ortamında yapılan deney ve çalışmalarda görev aldığım süre içerisinde gerek deneylerin yapılmasında gerek büro çalışmalarında ilgileriyle ve bilgileriyle her zaman bana destek olan Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY'a, Öğr. Gör. Dr. Gökçen BOMBAR'a, deney ve büro çalışmalarında emeği geçen İnş. Müh. Arkadaşım Tanıl ARKIŞ'a çok teşekkür ederim.

Çalıştığım kurum olan DSI'de tez çalışmalarım sırasında gerekli olan zaman için hoşgörülü olan sayın Şube Müdürüm Zeycan ELÇİ'ye, manevi destekçim olan sevgili aileme, müstakbel eşime ve çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Olcay MAYDA

KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDA OLUŞAN YEREL OYULMALARIN HAREKETLİ TABAN DURUMUNDA DENEYSEL VE NÜMERİK ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Bu tez 109M637 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneyler ve çalışmalar sonucunda hazırlanmış olup, dairesel en kesitli köprü ayakları etrafında meydana gelen hareketli taban oyulmaları konu olarak incelenmiştir. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda yapılan deneyler, 80 cm genişliğinde, 18,6 m uzunluğunda ve 75 cm derinliğinde bir kanalda ikizkenar üçgen şeklinde taşkın hidrografları oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı olarak değişen oyulmalar köprü ayağı üzerine dik olarak yerleştirilen UVP (ultrasonic velocity profiler) algılayıcıları ile ölçülmüştür. Debi ölçümü manyetik debimetre ile kanaldaki akış derinlikleri ise ULS (ultrasonic level sensor) cihazı ile ölçümlenmiştir. Deneysel bulgular, literatürde bulunan bağıntılar ile elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak uyumlulukları araştırılmıştır. Hem nihai oyulma derinlik değerleri hem de zamana bağlı oyulma derinlikleri için uygunluk analizi gerçekleştirilerek özgün bir bağıntı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hareketli taban, yerel oyulma, hidrograf, köprü ayağı, katı madde taşınımı

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF LOCAL SCOURS AROUND BRIDGE PIERS IN THE CASE OF LIVE BED

ABSTRACT

In this thesis, live bed scours around circular bridge piers were investigated 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 experiments were performed by generating flood hydrographs in the form of isosceles triangles. Time-dependent scours were measured with UVP (ultrasonic velocity profiler). Sensors were placed at upright position. Flow rates were measured with magnetic flowmeters and channel flow depths were measured by ULS (ultrasonic level sensor). The measured final depths of the scours were compared with those computed by using formulas existing in the literature. Empirical formulas based on experimental findings are obtained for final scour depths as well as time-dependent scour depths.

Keywords: Live bed, local scour, hydrograph, bridge pier, sediment transport

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	1

BÖLÜM İKİ-TEORİK BAKIŞ 3

2.1 Giriş	3
2.2 Oyulma Mekanizmasına Etki Eden Faktörler	6
2.3 Yaklaşım Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi	9
2.4 Harekete Başlatan Kritik Hız	10
2.5 Yaklaşım Akım Hızı	10
2.6 Taban Malzemesi Özelliklerinin Etkisi	11
2.7 Oyulmanın Dengeye Ulaştığı Zaman	12
2.8 Literatürdeki Mevcut Bağıntılar	13
2.8.1 Breusers, Nicollet ve Shen (1977)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı	13
2.8.2 Günyaktı (1988)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı	14
2.8.3 Melville ve Sutherland (1988)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı	14
2.8.4 Johnson (1992)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı	15
2.8.5 Melville (1997)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı	15
2.8.6 Yanmaz (2001)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı	17
2.8.7 Richardson ve Davis (2001)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı	17
2.8.8 Oliveto ve Hager (2002)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı	18
2.8.9 Sheppard (2003)'ün Oyulma Derinliği Bağıntısı	19

2.8.10 Kothyari, Hager ve Oliveto (2007)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı	20
BÖLÜM ÜÇ-DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	22
3.1 Deney Düzeneği ve Deneylerin Yapılışı	22
3.2 Deneysel Bulgular	27
3.2.1 Deneylerde Oluşturulan Hidrograflar	27
3.2.2 Farklı Hidrograflar Altında Oluşan Oyulma Derinliklerinin Zamanla Değişimi	29
3.2.3 Boyutsuz Oyulma Derinliklerinin Boyutsuz Zamanlara Bağlı Olarak Değişimi	35
BÖLÜM DÖRT-DENEYSEL BULGULARIN İRDELENMESİ.....	39
4.1 Akım Şiddeti V/V_c ' nin Zaman ile Değişimi Grafikleri.....	39
4.2 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Akım Şiddetine Bağlı Olarak Değişimi	40
4.3 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Boyutsuz Derinlik ile Değişimi	42
4.4 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Reynolds ve Ayak Reynolds Sayısı ile Değişimi	43
4.5 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Froude Sayısı ile Değişimi.....	46
4.6 Hesaplanan ve Ölçülen Nihai Oyulma Derinliklerinin Karşılaştırılması	47
4.7 Ortalama Değerlere Bağlı Olarak Elde Edilen Bağıntının Açıklanması	49
4.8 Zamana Bağlı Olarak Değişen Oyulma Derinliği	51
4.8.1 Hidrograf Durumunda Değişik Zamanlardaki Oyulma Derinliğinin Hesap Yöntemi	51
4.8.2 Zamana Bağlı Olarak Değişen Oyulma Derinliği Bağıntıları ile Deney Sonrası Gözlenen Oyulma Derinliği Değerlerinin Karşılaştırılması	52
4.8.3 Zamana Bağlı Olarak Değişen Oyulma Derinliği Bağıntısı	55
4.8.4 Zamana Bağlı Oyulma Gelişimini Veren Ampirik Bağıntı.....	56
BÖLÜM BEŞ-SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR	60

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Taşkınlar ve köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar köprülerin yıkılmasında en önemli iki sebep olarak gösterilmektedir. Literatürde bu konuyla ilgili mevcut çalışmaların büyük bir bölümü sabit debide ve temiz su oyulması ile ilgili olup hareketli taban oyulmasına dayanan araştırmalar oldukça sınırlıdır.

Bu tez 109M637 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda üniform taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiş olan deneyler ile köprü orta ayakları etrafında meydana gelen hareketli taban oyulmalarının, deneysel olarak incelenmesi ve deneysel bulguların ilgili literatür bağıntıları kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılması amaçlanarak hazırlanmıştır.

1.2 Geçmişte Yapılan Akademik Çalışmalar

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

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

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

Sheppard (2003), yaptığı deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, üniform taban malzemesi için köprü orta ayağı çevresinde temiz su oyulmasını ve hareketli taban oyulmasını tahmin eden bir bağıntı önermiştir.

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

Kothyari, Hager ve Oliveto (2007), oyulmanın zamana bağlı gelişimini hesaplamak için yeni bir bağıntı önermişlerdir.

BÖLÜM İKİ

TEORİK BAKIŞ

2.1 Giriş

Akarsuların, nehirlerin ya da denizlerin üzerinden ulaşımın devamlılığını sağlamak amacıyla inşa edilen köprüler en önemli ulaşım yapılarından. Köprülerin plan ve projelerinin hazırlanması sırasında yapısal etkenler kadar hidrolik etkenler de göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü köprülerin yüklerini taşıyan köprü ayakları akarsu ya da deniz tabanına oturtulmaktadır. Akarsu tabanına oturtulan köprü ayakları; taşkınlarla oluşan hidrodinamik etkiler, ayaklar etrafında oluşan taban oyulmaları, ayaklar arası açıklığın akımla taşınan malzemelerle dolması ve su seviyesinin yükselmesi, yığılan malzemenin ayaklara yaptığı dinamik kuvvet, açıklığın tasarımının yetersiz olması sebebiyle hidrolik sıçrama, basınçlı ve savak tipinde akımların oluşması gibi problemlere bağlı olarak yıkılmaktadır.

Amerikada yapılan araştırmalara göre köprülerin yıkılması nedenlerinin yaklaşık % 40 ını yerel oyulmalar oluşturmaktadır. (kaynak: Annandale, G. W. Risk analysis of bridge failure, Proceedings of Hydraulic Engineering 93, ASCE, San Francisco, CA, 1993. With permission.)

Başta Karadeniz Bölgesi olmak üzere ülkemizin çeşitli bölgelerinde geçtiğimiz yıl boyunca yaşanan taşkınlar sonucunda da Şekil 2.1’de görüldüğü gibi birçok köprü ve bağlantı yolu zarar görmüş, birçok köprü yıkılmıştır. Yıkılan köprülerde ayakların ya da ayakların oturduğu temellerin oyulduğu gözlemlenmiştir.

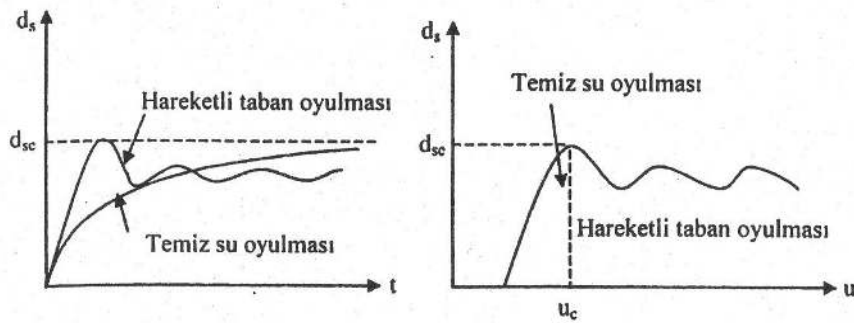


Şekil 2.1 Nisan 2012’de Zonguldak Çaycuma Filyos Çayı’ndaki köprünün şiddetli sel yüzünden yer değiştiren kum çukurlarının köprünün kazık sisteminin altını 5 metreye kadar oyması sebebiyle çökmesi sonucu köprü üstündeki 1 otomobil ve 1 minibüs suya gömüldü. (Aktif haber,2012)

Maximum oyulma derinliği tahmini, olayın karmaşık oluşu, ayaklar etrafındaki türbülanslı akımın üç boyutlu ayrılması, zamanla değişen katı madde taşıyan akımın oyulma çukuruyla etkileşimi ve modelleme ile deney koşullarının farklılığına bağlı olarak çok sayıda ve şekilde olup genel ve tek bir oyulma denklemi yoktur. Akım alanında köprü ayakları etrafında oluşan çevrintilerin sebep olduğu oyulmalara yerel oyulma denilmektedir. Yerel oyulmalarda temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması olarak ikiye ayrılır.

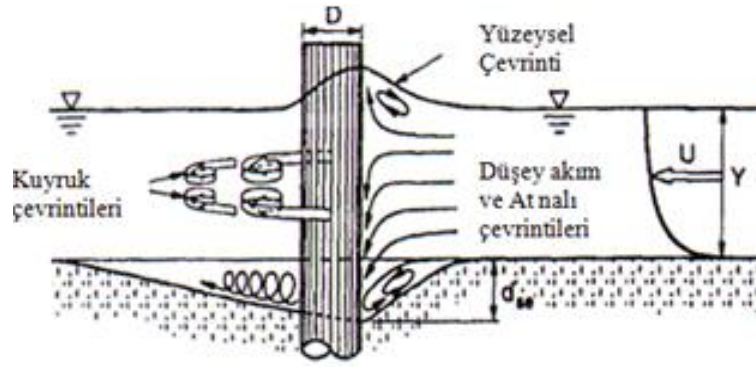
Akım şiddeti arttığı zaman mambadaki kayma gerilmesi taban malzemesinin karşı koyacağı kritik kayma gerilme değerini aştığında mambadan itibaren akım yönünde sediment hareketi başlar. Bu hareket çevrinti etkisiyle oluşan oyulma çukurundaki akımla birleşerek hareketli taban oyulmasını oluşturmaktadır. Oyulma derinliği de başlangıçta hızla artar, zamanla daha yavaş gelişir.

Hareketli taban oyulması durumunda membada oluşan direnç, taban şekilleri nedeniyle zamanla değişim gösterdiğinden, oyulma çukurundaki katı madde taşınımının miktarı membada oluşan ilave kayma gerilmesine bağlıdır. Hareketli taban durumunda, oyulma derinliği kısa sürede maksimum değerine ulaşır. Daha sonra membada değişen taban direnç seviyesine göre katı madde debisinde artma ve azalma olacağından oyulma çukuru birbirini izleyen oyulma ve yığılma olaylarına maruz kalmaktadır. Bu nedenle hareketli taban oyulması durumunda maksimum oyulma derinliğinden sonra artan ve azalan salınımlar görülmektedir. Oyulma derinliği zamanla yavaş yavaş artarak dengeli bir derinliğe (d_{sc}) ulaşır. Köprü ayakları etrafındaki hareketli taban ve temiz su oyulması derinliklerinin zamana (t) ve ortalama yaklaşım akım hızına (u) göre değişimi Şekil 2.2’de görülmektedir. u_c tabanda hareketi başlatan ortalama kritik akım hızını göstermektedir (Yanmaz, 2002).



Şekil 2.2 Köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin değişimi (Yanmaz,2002)

Ayağın mansap tarafında kayma gerilmesi gradyanlarından ötürü kuyruk çevrintileri oluşur. Kuyruk çevrintilerinin etki alanı ayrılma bölgesinin içinde kaldığından, bu etkiyi azaltmak için akım alanına uyumlu ayak geometrisi seçilmelidir. Ayrılma bölgesi sınırı mansaba doğru belli bir mesafe ilerlediğinden kuyruk çevrintilerinin etki uzunluğu at nalı çevrintilerinkinden daha fazladır. Ancak at nalı çevrintilerinin şiddeti kuyruk çevrintilerinin şiddetinden daha fazla olduğundan maksimum oyulmalar ayağın memba yüzünde görülür. Bunun bir başka nedeni de memba yüzünden sökülen tanelerin bir kısmının düşen akım hızı nedeniyle ayağın mansap yönünde birikmesidir (Yanmaz, 2002). Şekil 2.3’te çevrintiler görülmektedir.



Şekil 2.3 Bir köprü ayağı etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru
(Ettema, 1998)

2.2 Oyulma Mekanizmasına Etki Eden Faktörler

Köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar, birden çok etkenin yol açtığı karmaşık olaylardır ve bu nedenle etkili olan parametre sayısı oldukça fazladır. Olayın karmaşıklığından dolayı yapılan çalışmalarda bazı parametreler ihmal edilmiştir. 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 eksenindeki 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_d : 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_f : tane şekil faktörü

v) Köprü ayağı parametreleri

D : ayak genişliği (L)

K_s : ayak şekil 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)

ds : oyulma derinliği (L)

Bu parametreler bir fonksiyon ile ifade edilecek olursa, aşağıdaki hali alır:

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

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

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

Burada;

$$Fr = \text{Froude Sayısı} = \frac{V}{\sqrt{gy}}, \quad Re = \text{Reynolds sayısı} = \frac{Vd_{50}}{\nu}, \quad u_* = \text{kayma hızı},$$

$\Delta = \text{göreceli yoğunluk} = (\rho_s - \rho) / \rho$. Yerel oyulmalar için oluşturulabilecek en genel fonksiyon, tüm etkenler göz önüne alındığında yukarıda belirtilen parametrelerle ifade edilebilir. 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 denklem bağıntı 2.3 şeklinde indirgenebilir.

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

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.

$$\frac{d_s}{D} = f_3 \left(Fr, \frac{y}{D}, \sigma_g, \frac{d_{50}}{D} \right) \quad (2.4)$$

2.3 Yaklaşım Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi

Oyulma çukurunun gelişimi sürecinde derinlik ve ayak şekli, göreceli olarak etkilidir. Sığ sularda oyulma derinliği yaklaşım akım derinliğine daha çok (y) bağlı olup, ayak genişliğine (D) daha az bağlı iken derin sularda ise bu durum tam tersi şekilde ifade edilebilir. Orta derinlikli sularda oyulma çukurunun derinliği, hem ayak geometrisi hem de akım derinliğinden etkilenir (Kandasamy 1989). Melville (1997), yaptığı çalışmalar sonucu $D/y < 0,7$ durumu için oyulma derinliğinin yaklaşım akım derinliğinden, $D/y > 5$ durumu için ise ayak genişliğinden bağımsız olduğunu ileri sürmüştür. $D/y > 3-4$ 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 genişliği kadar ayak şeklinin de oyulma sürecinde etkili olduğu daha önce yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Yapılan deneyler sonucu, ayakların memba tarafındaki ucu daralıp sivrileştikçe akımın daha az oyulmaya yol açtığını gözlenmiştir. Örnek vermek gerekirse, dairesel ayaklar kare ayaklardan daha az oyulurken sivri uçlu ayaklar dairesel ayaklardan daha az oyulur.

2.4 Harekete Başlatan Kritik Hız

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

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5,75 \log \left(5,53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (2.5)$$

Ancak pratik olması açısından Melville (1997), u_{*c} 'yi hesaplamak için $u_{*c} = m/s$ ve $d_{50} = mm$ cinsinden olmak üzere Shields diyagramını aşağıdaki denklem takımına dönüştürmüştür:

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

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

Chiew (1995), ise kritik hızın (V_c) aşağıdaki denklem ile hesaplanmasını önermiştir.

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5,75 \log \frac{y_0}{2d_{50}} + 6 \quad (2.7)$$

Bu ifadedeki u_{*c} değeri kritik kayma hızı olup, d_{50} medyan tane boyutu esas alınarak Shields diyagramından bulunabilir.

2.5 Yaklaşım Akım Şiddeti

Yaklaşım akım hızının kritik hıza oranı, akım şiddeti (V/V_c) olarak ifade edilir. Melville (1997) ve Yanmaz (2002)'ın belirttiği üzere $V/V_c \leq 1$ olduğu durumlarda tabanda malzeme sürüklenmesi gerçekleşmez ve yaklaşım akımının tüm gücü, köprü ayağı etrafındaki oyulma gelişimine harcanır. $V/V_c > 1$ olduğu durumlarda ise tabanda malzeme sürüklenmesi gerçekleşir ve köprü ayağı etrafında oyulma meydana gelirken akım gücünün bir kısmı da malzeme sürüklenmesi için harcanır. Laboratuvar çalışmaları göstermiştir ki, ayak etrafındaki oyulma, yaklaşım akım

şiddeti ile orantılı olarak gelişmektedir. 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).

Köprü ayağı etrafındaki yerel oyulmanın başlaması için, V/V_c değerinin bir eşik değerine erişmesi gerekir. Örneğin Breusers, Nicollet ve Shen (1977) bu değeri 0,5 önermişken, Lai, Chang ve Yen (2009) ise 0,4 olarak vermişlerdir.

2.6 Taban Malzemesi Özellikleri

Tabanda kullanılan malzeme özellikleri, malzemenin çapı, üniform olup olmaması, kohezyonlu olup olmamasına göre değişim gösterir. Malzeme çapı ile oyulmanın ilişkisi hakkında değerlendirme yapabilmek için köprü ayağı genişliğine olan oranını bilmek gerekir ve bu orana göreceli tane çapı denir. Yapılan deneyler sonucu, göreceli tane çapı (D/d_{50}) arttıkça oyulma derinliğinin de arttığı ve bir noktadan sonra tane çapının oyulma derinliğine etki etmediği gözlenmiştir. Ettema (1980) bu noktadaki değeri $D/d_{50} = 50$, Melville (1997), $D/d_{50} = 25$ olarak önermiştir.

Malzemenin üniform olup olmadığı geometrik standart sapma (σ_g) parametresiyle belirlenir ve $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ bağıntısı ile hesaplanır. $\sigma_g < 1,4$ olan malzemeler üniform olarak kabul edilirken 1,4'ten büyük olan malzemeler üniform olmayan malzeme olarak kabul edilirler. Üniform olmayan malzemelerde, malzeme sürüklenmesi ince tanelerde başlar ve en son kalın taneler sürüklenir. İnce malzemeler sürüklenirken kalın taneleri sürükleyebilecek hızda bir akım gelmemişse, kalın malzemeler ayak tabanında bir zırhlanma bölgesi oluşturur ve ayağı oyulmaya karşı korur.

2.7 Oyulmanın Dengeye Ulaştığı Zaman

Melville ve Chiew (1999), denge zaman ölçeği t^* 'ı ve oyulma derinliğinin dengeye ulaştığı zaman olan t_e nin diğer parametrelerle ilişkisini

$$t^* = \frac{V t_e}{D} = f\left(\frac{V}{V_c}, \frac{y}{D}, \frac{d_{50}}{D}\right) \text{ şeklinde tanımlamışlardır.}$$

Yapılan deneyler ve uygun olan bağıntıların ortak olarak değerlendirilmesiyle;

$$\begin{aligned} \frac{y}{D} > 6 \quad ; \quad \frac{t_e (\text{gün})}{D} &= 48,26 \frac{D}{V} \left(\frac{V}{V_c} - 0,4 \right) \\ \frac{y}{D} \leq 6 \quad ; \quad \frac{t_e (\text{gün})}{D} &= 30,89 \frac{D}{V} \left(\frac{V}{V_c} - 0,4 \right) \left(\frac{y}{D} \right)^{0,25} \end{aligned}$$

Bu eşitliklerde D m cinsinden V ise m/s cinsindendir ve bu bağıntılardaki V/V_c değerleri 1 ile 0,4 değerleri arasında olmalıdır. Eğer $y / D < 6$ ise $t_e = 0,64 (y/D)^{0,25}$ kullanmak uygundur. $d_{50} > 0,6 \text{ mm}$, $V=V_c$ ve $y/D > 6$ ise $t_e \text{ max } (\text{gün}) = 28,96 \frac{D}{V}$ ile bulunabilmektedir.

2.8 Literatürdeki Mevcut Bağıntılar

Literatürde bu konuyla ilgili mevcut çalışmaların büyük bir bölümü sabit debide ve temiz su oyulması ile ilgili olup hareketli taban oyulmasına dayanan araştırmalar oldukça sınırlıdır. Literatürde yerel oyulmalarla ilgili mevcut birçok bağıntı verilmiş olmasına rağmen sadece tez konusuyla ilgili bağıntılar aşağıda verilmektedir.

2.8.1 Breusers, Nicollet ve Shen (1977)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Breusers, Nicollet ve Shen (1977), dairesel tipte köprü ayağı için nihai oyulmanın derinliğini tahmin eden ve yaklaşım akım derinliği ile köprü ayağı çapına bağlı olan bir bağıntı önermişlerdir.

$$\frac{d_s}{D} = f_1 \cdot 2 \tanh\left(\frac{y}{D}\right) \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (2.8)$$

f_1 : akım şiddetine bağlıdır. Burada V yaklaşım akım hızı, V_c ise kritik hızdır.

$$\begin{aligned} \frac{V}{V_c} \leq 0.5 \text{ ise } f_1\left(\frac{V}{V_c}\right) &= 0 \\ 0.5 \leq \frac{V}{V_c} \leq 1.0 \text{ ise } f_1\left(\frac{V}{V_c}\right) &= \left(2 \frac{V}{V_c} - 1\right) \\ \frac{V}{V_c} \geq 1.0 \text{ ise } f_1\left(\frac{V}{V_c}\right) &= 1 \end{aligned}$$

f_2 : ayak şekil faktörü; dairesel ayaklar için 1,0, dikdörtgen ayaklar için 1,3 gibi değerler alır.

f_3 : akım ile köprü ayağı aksı arasındaki açı etki faktörü ; dairesel ayaklar için etkisi dikkate alınmaz.

2.8.2 Günyaktı (1988)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı

Günyaktı (1988), dairesel tipte köprü ayakları için temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini veren genel bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{D} = 1,183 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,471} \quad (2.9)$$

2.8.3 Melville ve Sutherland (1988)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Melville ve Sutherland (1988), üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı tipte köprü ayakları etrafında meydana gelen temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliklerini veren bir bağıntı önermişlerdir.

$$\frac{d_s}{D} = K_I K_y K_d K_\sigma K_s K_\theta \quad (2.10)$$

K_I akım şiddeti faktörü, üniform malzemeler için $K_I = 2,4(V/V_c)$ olarak ifade edilmiştir. Burada V yaklaşım akım hızı, V_c ise kritik hızdır.

K_y derinlik boyutu faktörü, göreceli yaklaşım akım derinliğine (y/D) bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$K_y = 1; \quad y/D > 2,6 \quad (2.11 \text{ a})$$

$$K_y = 0,78(y/D)^{0,255}; \quad y/D < 2,6 \quad (2.11 \text{ b})$$

K_d tane boyutu faktörü, göreceli tane çapına (D/d_{50}) bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$K_d = 1; \quad D/d_{50} > 25 \quad (2.12 \text{ a})$$

$$K_d = 0,57 \log(2,24D/d_{50}); \quad D/d_{50} < 25 \quad (2.12 \text{ b})$$

K_σ tane derecelenme (gradasyon) faktörünün 1 alınması önerilmiştir. K_s ayak şekil faktörü, dairesel silindirik ve yuvarlak uçlu ayaklar için 1 olarak tanımlanmıştır. K_θ yaklaşım akımıyla köprü eksenindeki açının etki faktörü, yaklaşım akımı ile ayak ana ekseninde kalan açıya (θ) göre hesaplanır. Dairesel ayaklar için bu değer $K_\theta = 1$ alınabilir.

Melville ve Sutherland'ın bağıntısını köprü orta ayakları için sadeleştirirsek;

$$\frac{d_{se}}{D} = K_I K_d K_y \quad (2.13)$$

Şeklinde olur.

2.8.4 Johnson (1992)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Johnson (1992), dairesel tipte köprü ayakları için hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini veren genel bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{D} = 2,02 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,02} Fr^{0,21} \sigma^{-0,24} \quad (2.14)$$

2.8.5 Melville (1997)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Melville, farklı geometriye sahip ayaklar üzerine çalışmalar yapmış ve nihai oyulma derinliğini veren 6 değişkenli bir bağıntı tanımlamıştır.

$$d_s = K_{yw} K_I K_d K_s K_\theta K_G \quad (2.15)$$

K_{yw} derinlik (y) boyutu faktörü, göreceli yaklaşım akım derinliğine (y/D) bağlı olarak tanımlanmıştır. Orta ayak için bu katsayı, K_{yD} indisi ile gösterilir.

$$K_{yD} = 2,4D ; \quad D/y < 0,7 \quad (2.16 \text{ a})$$

$$K_{yD} = 2\sqrt{yD} ; \quad 0,7 < D/y < 5 \quad (2.16 \text{ b})$$

$$K_{yD} = 4,5y ; \quad 5 < D/y \quad (2.16 \text{ c})$$

K_I akım şiddeti faktörü, üniform malzemeler için $K_I = V/V_c$ olarak ifade edilmiştir. $V/V_c < 1$ ise $K_I = V/V_c$, değilse $K_I = 1$.

K_d tane boyutu faktörü, göreceli tane çapına (D/d_{50}) bağlı olarak tanımlanmıştır.

$$K_d = 0,57 \log(2,24D/d_{50}); \quad D/d_{50} \leq 25 \quad (2.17 \text{ a})$$

$$K_d = 1; \quad D/d_{50} > 25 \quad (2.17 \text{ b})$$

K_s ayak şekil faktörü, dairesel silindirik ve yuvarlak uçlu ayaklar için 1, kare uçlu ayaklar için 1,1, sivri uçlu ayaklar için 0,9 olarak tanımlanmıştır.

K_θ yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü, dairesel ayaklar için $K_\theta = 1$ iken dairesel olmayan ayaklar için ayak boyunun (l), ayak enine (D) olan oranına bağlı olarak değişir. Tablo 2.1’de K_θ değerleri değişik l/D ve θ değerleri için verilmiştir.

Tablo 2.1 Çeşitli l/D ve θ değerleri için K_θ değerleri

l/D	K_θ				
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$
4	1,00	1,50	2,00	2,30	2,50
8	1,00	2,00	2,75	3,30	3,90
12	1,00	2,50	3,50	4,30	5,00

K_G kanal geometrisi faktörü, orta ayaklar için $K_G = 1$ olarak kabul edilmiştir.

Melville'in bağıntısını köprü orta ayakları için sadeleştirirsek;

$$\frac{d_s}{D} = K_I K_d K_{yD} \quad (2.18)$$

Şeklinde olur.

2.8.6 Yanmaz (2001)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Yanmaz (2001), dairesel tipte köprü ayakları için hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini veren genel bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{D} = 1,564 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,405} Fr^{0,413} \quad (2.19)$$

2.8.7 Richardson ve Davis (2001)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Richardson ve Davis (2001), nihai oyulma derinliği tahmini üzerine boyutsuz bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{D} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,35} Fr^{0,43} \quad (2.20)$$

Burada;

$$Fr ; \text{Froude sayısı} = V / (gy)^{1/2}$$

K_1 ayak şekil faktörü dairesel ayaklar için 1 alınır. K_2 yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü, $K_2 = (\cos \theta + l / D \sin \theta)^{0,65}$ ile hesaplanabilir.

K_3 taban şekil faktörü, temiz su oyulması için 1,1, küçük kum birikintileri için 1,1 den 1,2 arasını, büyük kum birikintileri için 1,3 alırız.

K_4 tabanda zırhlanma etkisi faktörü, $d_{50} < 2 \text{ mm}$ ya da $d_{95} < 20 \text{ mm}$ durumu için 1 alınabilir.

d_{se} / D max değerleri $F \leq 0,8$ için 2,4 $F > 0,8$ için 3,0.

bağıntıyı köprü orta ayakları için sadeleştirirsek;

$$\frac{d_{se}}{D} = 2 K_3 \left(\frac{y}{D} \right)^{0,35} Fr^{0,43} \quad (2.21)$$

Şeklinde olur.

2.8.8 Oliveto ve Hager (2002)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı

Oliveto ve Hager (2002)'in, oyulmanın zamana bağlı değişimi üzerine önerdiği bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$Z = z / z_R = 0,068 N \sigma^{-1/2} F_d^{1,5} \log(T) \quad (2.22)$$

Burada;

Z : Boyutsuz oyulma derinliği

z : Oyulma derinliği

F_d : Yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısı (Densimetric particle Froude

Number) $= V_0 / (g' d_{50})^{1/2}$

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

T : Göreceli zaman $T = [(g' d_{50})^{1/2} / z_R] t$

z_R : Referans uzunluğu $(y D^2)^{1/3}$

N : Şekil faktörü; dairesel orta ayak için 1, karesel yan ayak için 1,25 alınabilir.

2.8.9 Sheppard (2003)'ın Oyulma Derinliği Bağıntısı

Sheppard denge oyulma derinliği ve hız şiddetine göre bağıntılar önermiştir.

V_{lp} : hareketli tabanda oyulmanın max. olduğu andaki hızdır.

D^* : $K_s D$ dir. Dairesel orta ayak kullanıldığı için $K_s = 1$ olup, $D^* = D$ alınmaktadır.

Hız şiddeti $0,47 \leq V/V_c \leq 1$ aralığında ise;

$$\frac{d_{se}}{D^*} = 2.5 f_1\left(\frac{y_0}{D^*}\right) f_2\left(\frac{D^*}{d_{50}}\right) \left\{ 1 - 1.75 \left[\ln\left(\frac{V}{V_c}\right) \right]^2 \right\} \quad (2.23)$$

Hız şiddeti $1 < V/V_c \leq V_{lp}/V_c$ aralığında ise;

$$\frac{d_{se}}{D^*} = f_1\left(\frac{y_0}{D^*}\right) \left[2.2 \left(\frac{V/V_c - 1}{V_{lp}/V_c - 1} \right) \right] + 2.5 f_2\left(\frac{D^*}{d_{50}}\right) \left(\frac{V_{lp}/V_c - V/V_c}{V_{lp}/V_c - 1} \right) \text{ dir.} \quad (2.24)$$

$V/V_c > V_{lp}/V_c$ ise;

$$\frac{d_{se}}{D^*} = 2.2 f_1\left(\frac{y_0}{D^*}\right) \quad (2.25)$$

Burda tanımlı f_1 ve f_2 bağıntıları aşağıdaki gibidir.

$$f_1\left(\frac{y_0}{D^*}\right) \equiv \tanh\left[\left(\frac{y_0}{D^*}\right)^{0.4}\right] \quad (2.26)$$

$$f_2\left(\frac{D^*}{d_{50}}\right) \equiv \frac{D^*/D_{50}}{0.4(D^*/d_{50})^{1.2} + 10.6(D^*/d_{50})^{-0.13}} \quad (2.27)$$

2.8.10 Kothyari, Hager ve Oliveto (2007)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı:

Kothyari, Hager ve Oliveto (2007), oyulmanın zamana bağlı değişimini veren yeni bir bağıntı önermişlerdir.

$$Z = z / z_R = 0,272 \sigma^{-1/2} (F_d - F_{d\beta})^{2/3} \log T \quad (2.28)$$

Burada;

Z : Boyutsuz oyulma derinliği

z : Oyulma derinliği

z_R : Referans uzunluğu $(yb^2)^{1/3}$

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

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

$F_{d\beta}$: Oyulma başlangıcı için yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısı

$T = t / t_R$: göreceli zaman $t_R = z_R / [\sigma^{1/3} (g' d_{50})^{1/2}]$

$$F_{d\beta} = \left[F_{di} - 1,26 \Sigma \Sigma_s \Sigma_{ca} \beta^{\Sigma/4} \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} \right] \sigma^{1/3} \quad (2.29)$$

$F_{d\beta}$ 'yi hesaplarken R_h hidrolik yarıçap olmak üzere dairesel silindirik köprü orta ayağı için $\Sigma = \Sigma_s = \Sigma_{ca} = 1$ alınabilir. B = akarsu taban genişliği olmak üzere $\beta = D / B$ bağıntısı ile hesaplanabilir.

F_{di} , yaklaşım akımın yol açtığı taban malzemesinin sürüklenmesinin başlangıç noktasındaki yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısıdır ve üç bölgede incelenir. ν = kinematik viskozite ve D_* = boyutsuz tane boyutu olmak üzere;

$$D_* = (g' / \nu^2)^{1/3} d_{50} \quad (2.30)$$

$$F_{di} = 1,08 D_*^{1/12} \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} \quad ; \quad D_* \leq 10 \quad (2.31 \text{ a})$$

$$F_{di} = 2,33 D_*^{-0,25} \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} \quad ; \quad 10 < D_* < 150 \quad (2.31 \text{ b})$$

$$F_{di} = 1,65 \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} \quad ; \quad D_* \geq 150 \quad (2.31 \text{ c})$$

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

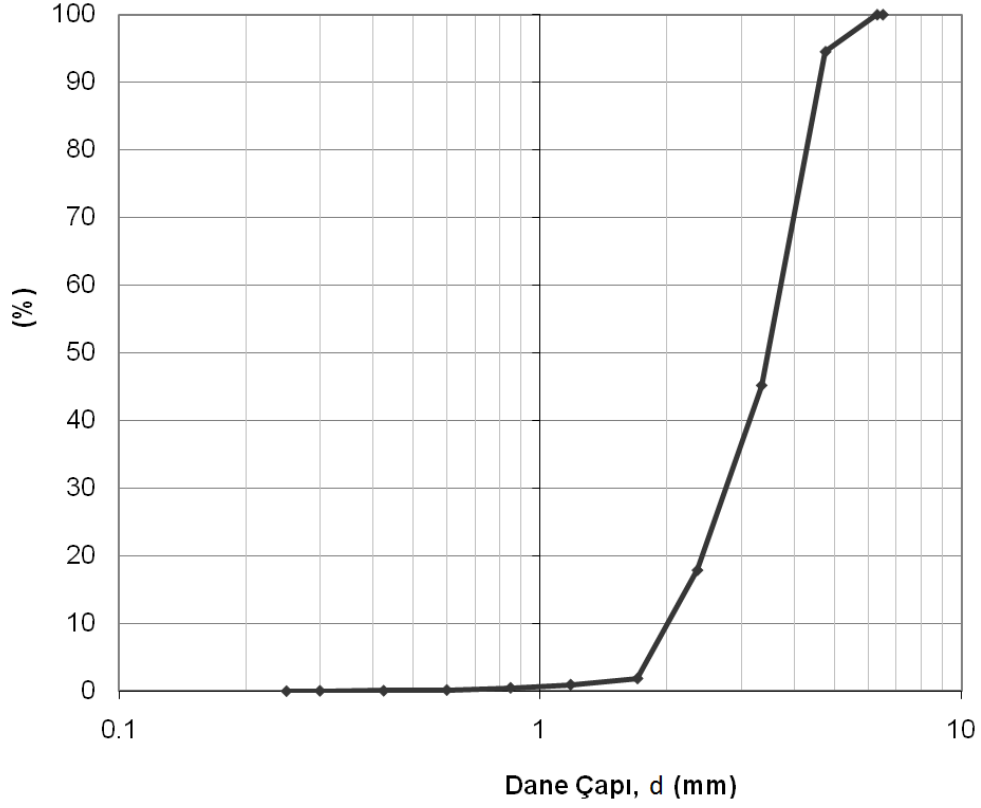
3.1 Deney Düzeneği ve Deneylerin Yapılışı

Deneyler, 106M274 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda inşa edilen 18,6 m uzunluğunda, $b=80$ cm genişliğinde, 75 cm derinliğinde olan kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanalin 7. ve 13. metreleri arasında üniform şekilde ve 25 cm kalınlığında taban malzemesi mevcuttur. Kanalin ilk 6 metresi ve son 5 metresinde kanal tabanında 20 cm yüksekliğinde gaz beton döşeli ve üzerinde 5 cm kalınlığında üniform taban malzemesi serilmiş durumdadır. Şekil 3.1'de deney düzeneğinin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney düzeneğinin genel görünümü

Deneyleerde kullanılan taban malzemesinin granülometri eğrisi, Şekil 3.2’de görülmektedir. Kullanılan malzemenin ortalama çapı (d_{50}) 3,47 mm olup, geometrik standart sapması (σ_g) 1,39’dur.



Şekil 3.2 Taban malzemesinin granülometrik eğrisi

Su 27 m^3 hacimli besleme haznesinden maksimum debisi 100 L/s olan bir pompa vasıtası ile kanala iletilmektedir. Pompa bir hız kontrol cihazına bağlıdır. Bu kontrol ünitesi sayesinde istenirse sabit bir debi veya üçgen şekilli hidrograf veya trapez şekilli hidrograflar oluşturulabilmektedir. Hız kontrol cihazı, bir bilgisayar programı yardımı ile pompa devir sayısını istenilen sürede istenilen değere getirebilmektedir (Şekil 3.3 a-b). Kanalın mansabına ulaşan akım, buradan besleme haznesine savaklanmakta ve devir daim ile yeniden kanala iletilmektedir.



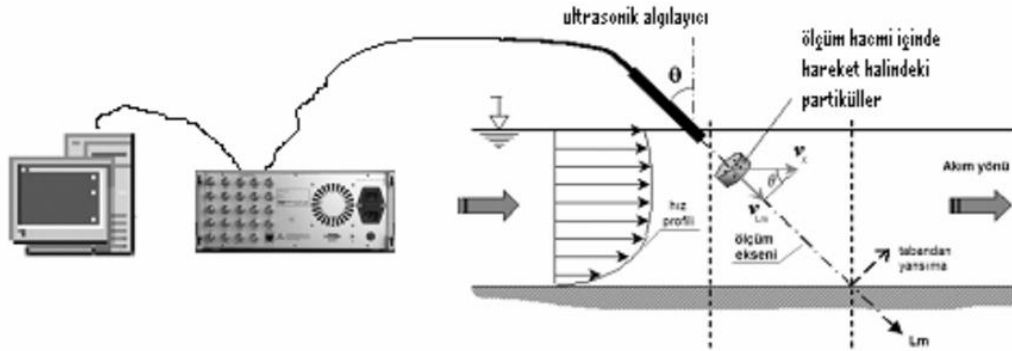
Şekil 3.3 a) Pompa b) Hız Kontrol Cihazı

Şekil 3.4'te gösterilen ve besleme hattı üzerine monte edilmiş OPTIFLUX 1000 elektromanyetik debimetre kullanılarak debi ölçümü yapılmıştır.



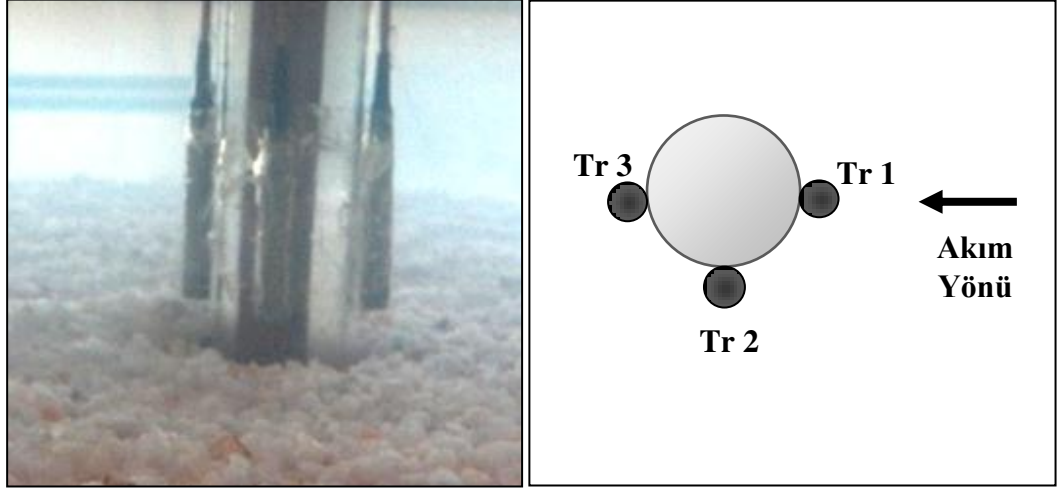
Şekil 3.4 Elektromanyetik debimetre

Deneyler süresince oyulma derinliği, köprü ayağı etrafına yerleştirilen ultrasonic velocity profiler (UVP) algılayıcısı ile zamana bağlı olarak ölçülmüştür. İsviçre firmasının ürettiği bu cihazın asıl amacı akustik yöntemle hız ölçümüdür. UVP yüksek frekanslı ses dalgalarının su içindeki parçacıklara çarptıktan sonra yansırarak geri dönen ses dalgalarının frekanslarındaki değişimini (Doppler prensibi) kullanarak akım hızını bulmaktadır. Bu cihaz ile serbest yüzeyli açık kanal veya basınçlı akım koşullarında enkesit içerisinde noktasal hızları ölçüp hız profili çıkartılabilmektedir. Cihazın ölçtüğü veriler eşzamanlı olarak bilgisayar kaydedilebilmektedir. Cihaza aynı frekanslı olmak koşuluyla, birden fazla algılayıcı bağlanabilmektedir. UVP'nin çalışma prensibi Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 UVP'nin çalışma prensibi (Met-Flow Manuel)

UVP algılayıcıları, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi köprü ayağının etrafına yerleştirilmiştir. UVP algılayıcıları bir doğrultu boyunca hız profilini çıkarmak için kullanılmasına rağmen bu çalışmada tabandan yansıyan dalgalar değerlendirilerek, taban kotundaki değişimlerin ölçülmesinde kullanılmıştır. Kanalın membaından 9,5 m uzaklıktaki köprü ayağı etrafına yerleştirilen UVP'lerin akım doğrultusunda köprü ayağı üzerindeki yerleşimini gösteren fotoğraf Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6 Köprü ayağı ve etrafına yerleştirilen algılayıcıların yerleşimi

Yaklaşım akım derinliği, Şekil 3.7'de gösterilen UltraLab[®] ULS (Ultrasonic Level Sensor) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Hidrolik laboratuvarında cihazın algılayıcısı mevcut olup eş zamanlı olarak 4 farklı kesitten akım derinliği ölçümlerini kaydedebilmektedir. Cihazın hassasiyeti ± 1 mm dir.



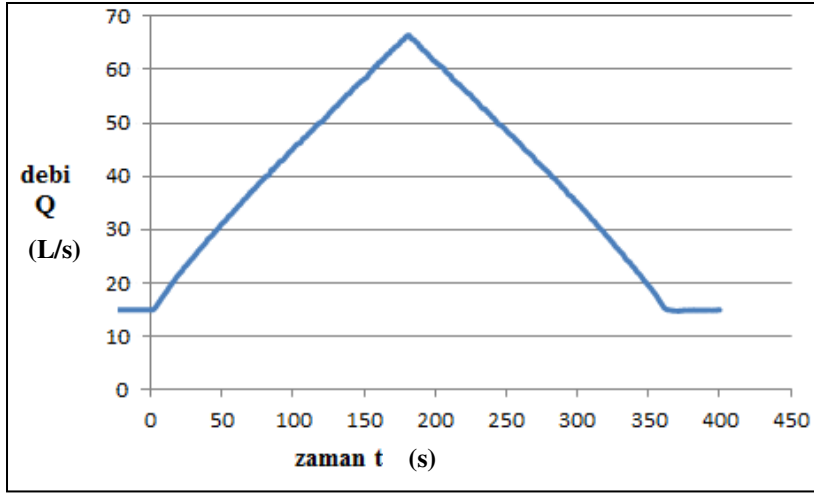
Şekil 3.7 ULS Cihazı

Yaklaşım akım hızı, debimetre ile ölçülen debi ve ULS ile belirlenen yaklaşım akım derinlikleri yardımıyla hesaplanmıştır.

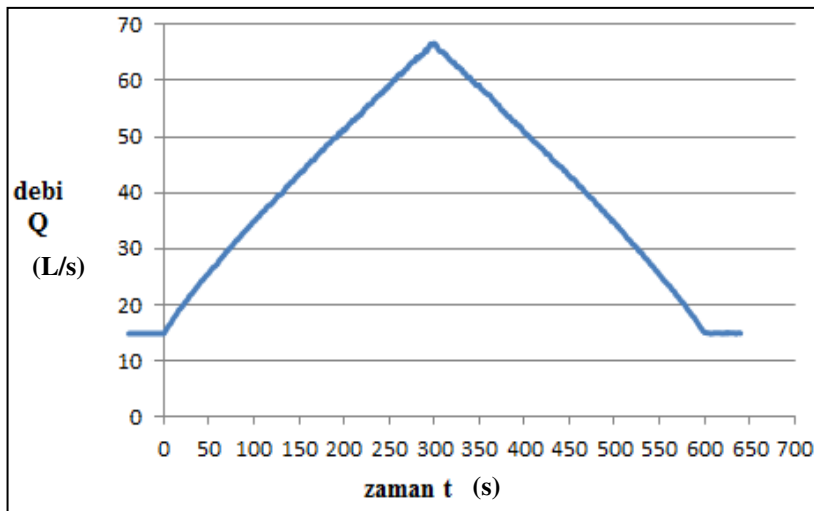
3.2 Deneysel Bulgular

3.2.1 Deneylerde Oluşturulan Hidrograflar

Deneyler, üniform taban malzemesi ve çapları 4, 8, 15 ve 20 cm olan dairesel kesitli köprü ayakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında Şekil 3.8 a’da gösterilen HİD1 ve Şekil 3.8 b de gösterilen HİD2 hidrografları oluşturulmuştur. 6 dakika süreli HİD1 hidrografında taban ve pik debileri sırasıyla $Q_i = 14,94$ L/s ve $Q_p = 66,30$ L/s olup alçalma ve yükselme süreleri eşit ve 180 saniyedir. 10 dakika süreli HİD2 hidrografında taban ve pik debileri sırasıyla $Q_i = 14,85$ L/s ve $Q_p = 66,60$ L/s olup alçalma ve yükselme süreleri eşit ve 300 saniyedir.



Şekil 3.8 a) Deneyler sırasında oluşturulan HİD1 hidrografı



Şekil 3.8 b) Deneyler sırasında oluşturulan HİD2 hidrografı

HİD1 hidrografi için taban debisi durumunda akış derinliği ortalama $y_i = 47$ mm ve akış hızı da ortalama $v_i=0,40$ m/s dir. Pik debi durumunda akış derinliği ortalama $y_p =116$ mm ve akış hızı da ortalama $v_p=0,72$ m/s dir. Froude sayısı sırasıyla 0,58 ve 0,68 mertebesinde olup akış nehir rejimindedir.

HİD2 hidrografi için taban debisi durumunda akış derinliği ortalama $y_i = 42$ mm ve akış hızı da ortalama $v_i=0,44$ m/s dir. Pik debi durumunda akış derinliği ortalama $y_p =112$ mm ve akış hızı da ortalama $v_p=0,75$ m/s dir. Froude sayısı sırasıyla 0,67 ve 0,71 mertebesinde olup akış nehir rejimindedir.

Tablo 3.1'de deneyler sırasında kullanılan köprü ayak çapları, ölçülen taban ve pik debi değerleri, taban ve pik akım derinlikleri verilmektedir.

Tablo 3.1 Deneyler sırasında kullanılan köprü ayağı çapları, taban ve pik debi değerleri, taban debisi ve pik debi sırasında yaklaşım akım derinlikleri

Deney No.	Deney Adı	D (cm)	Q_i (L/s)	Q_p (L/s)	y_i (cm)	y_p (cm)
1	Hid1 D4	4	14,94	66,30	4,7	11,2
2	Hid1 D8	8	14,94	66,30	4,9	11,4
3	Hid1 D15	15	14,94	66,30	4,2	11,5
4	Hid1 D20	20	14,94	66,30	5,0	12,3
5	Hid2 D4	4	14,85	66,60	4,1	10,5
6	Hid2 D8	8	14,85	66,60	4,2	10,3
7	Hid2 D15	15	14,85	66,60	4,6	11,8
8	Hid2 D20	20	14,85	66,60	4,1	12,4

3.2.2 Farklı Hidrograflar Altında Oluşan Oyulma Derinliklerinin Zamanla Değişimi

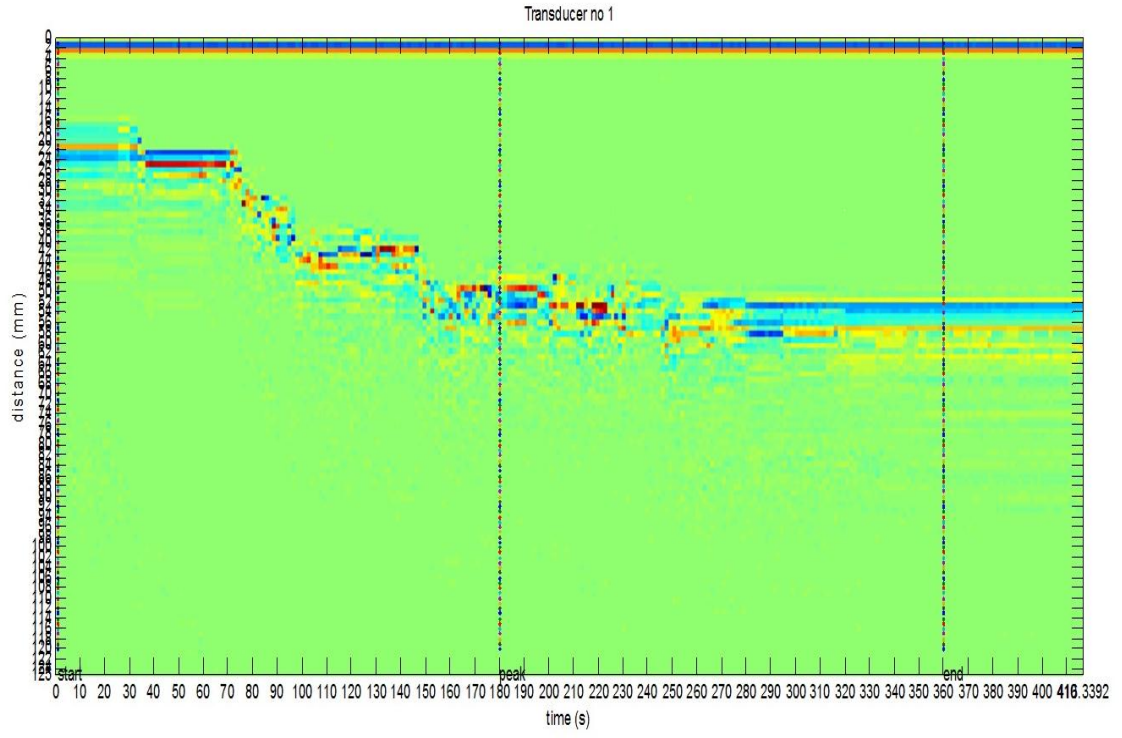
Tablo 3.2’de oyulmanın başladığı zaman t_i , oyulmanın dengeye ulaştığı zaman t_e , 2.5, 2.6 b bağıntılarından yararlanılarak elde edilen V_c değerleri kullanılarak elde edilen akım şiddeti (V/V_c) ile ölçülen nihai oyulma derinliği değerleri verilmektedir. i ve p indisleri sırasıyla başlangıç (taban) debisi ve pik debi durumlarını simgelemektedir.

Tablo 3.2 Deneyler sonrasında elde edilen oyulmanın başlangıç ve denge zamanları, taban ve pik akım şiddetleri ve nihai oyulma değerleri

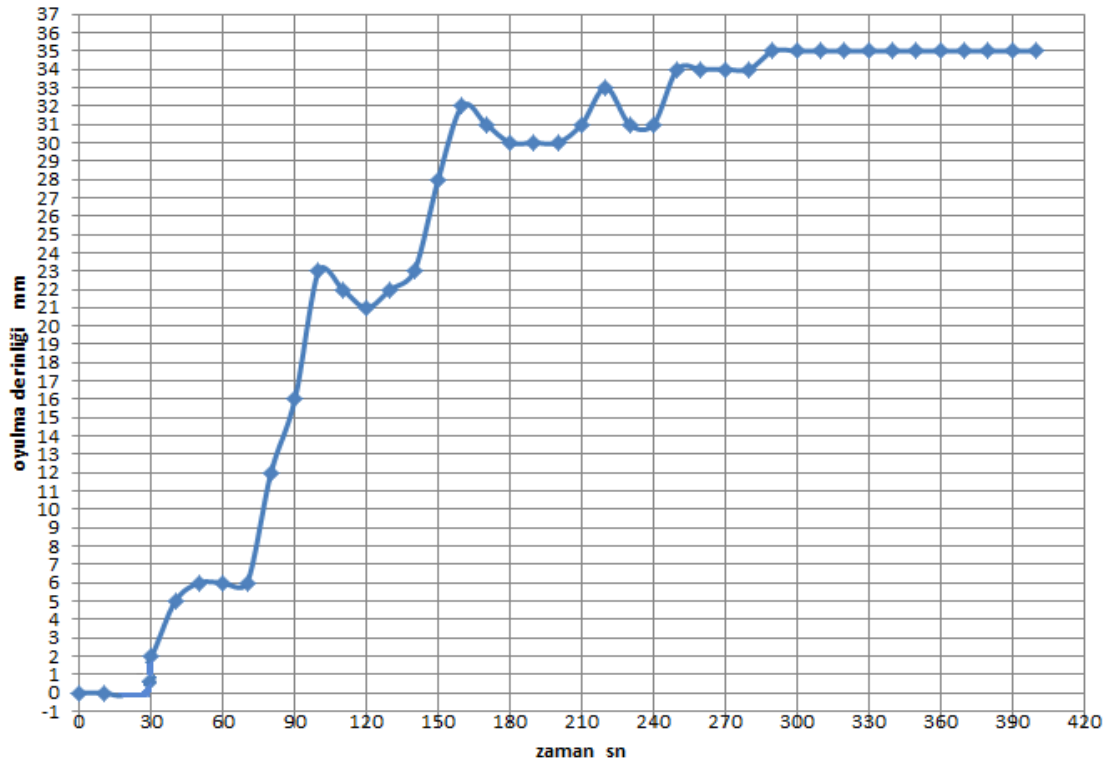
Deney No.	Deney Adı	t_i (s)	t_e (s)	V_i/V_{c_i}	V_p/V_{c_p}	d_s (cm)
1	Hid1 D4	30	290	0,66	1,04	3,5
2	Hid1 D8	100	330	0,63	1,00	6,6
3	Hid1 D15	40	280	0,75	1,00	11,4
4	Hid1 D20	40	310	0,62	0,92	14,2
5	Hid2 D4	80	520	0,77	1,12	3,4
6	Hid2 D8	70	450	0,76	1,15	9,5
7	Hid2 D15	40	420	0,73	0,97	14,5
8	Hid2 D20	30	510	0,79	0,92	16,4

Şekil 3.9’ da hidrograf başlangıcında (start), pikinde (peak) ve sonucunda (end) Tr1 ile ayak memba kısmından ölçülen değerler düşey çizgilerle gösterilmiştir.

Şekil 3.10’ da ise Tr1 ile ayak memba kısmından ölçülen oyulma değerlerinin grafiği örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.9 Hid1D4 deneyinde Tr1 algılayıcısından elde edilen ölçüm değerleri



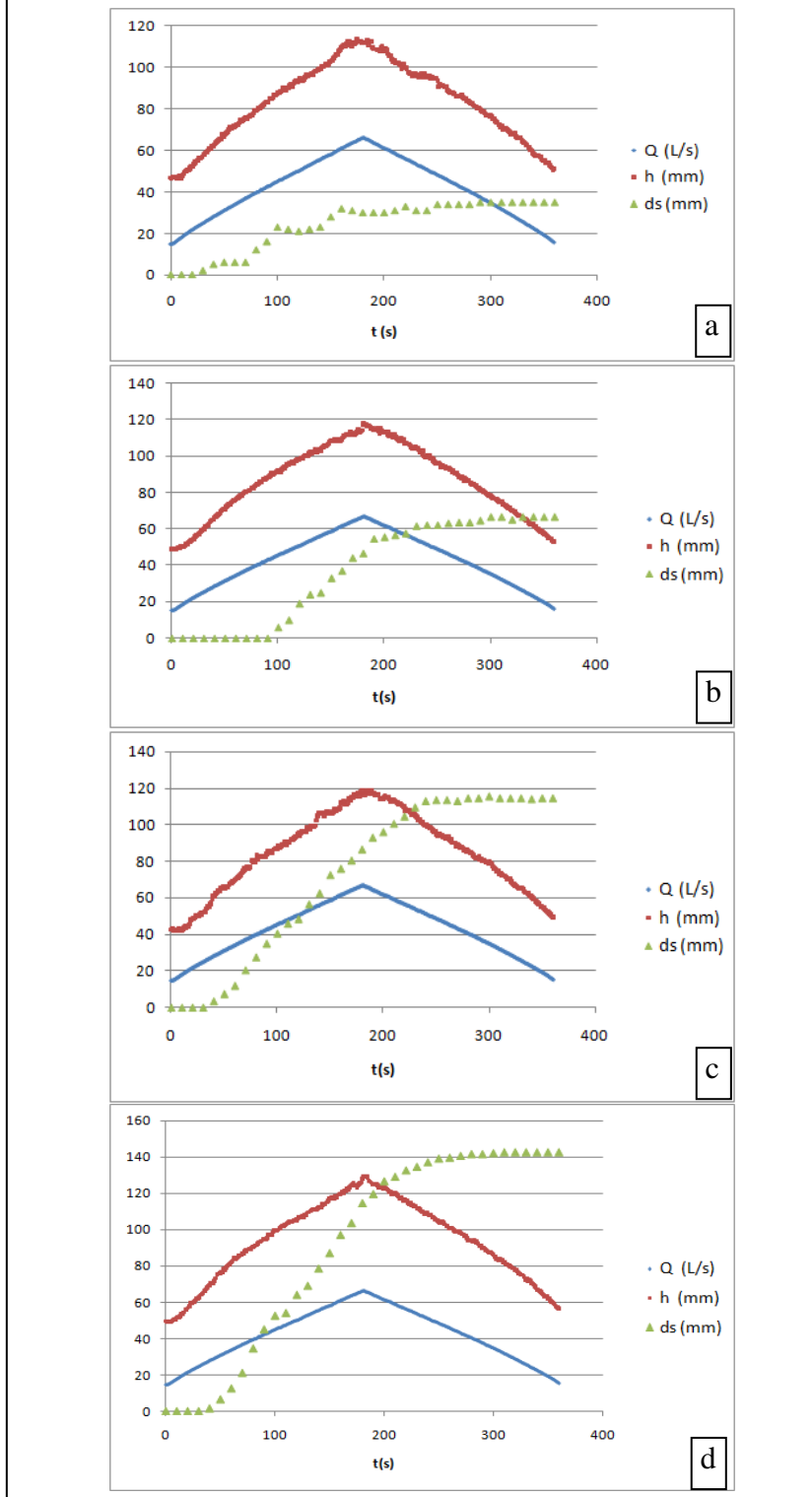
Şekil 3.10 Hid1D4 deneyinde Tr1 algılayıcısından elde edilen oyulma değerleri grafiği

Yapılan Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneyleri sonucunda görüntülenen oyulmalar, Şekil 3.11 a, 3.11 b, 3.11 c ve 3.11 d'de verilmektedir.



Şekil 3.11 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar

Şekil 3.12 a, 3.12 b, 3.12 c, 3.12 d’de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, gözlemlenen debi, derinlik ve ölçülen oyulma derinliklerinin t: deney süreleri ile değişimi gösterilmektedir.



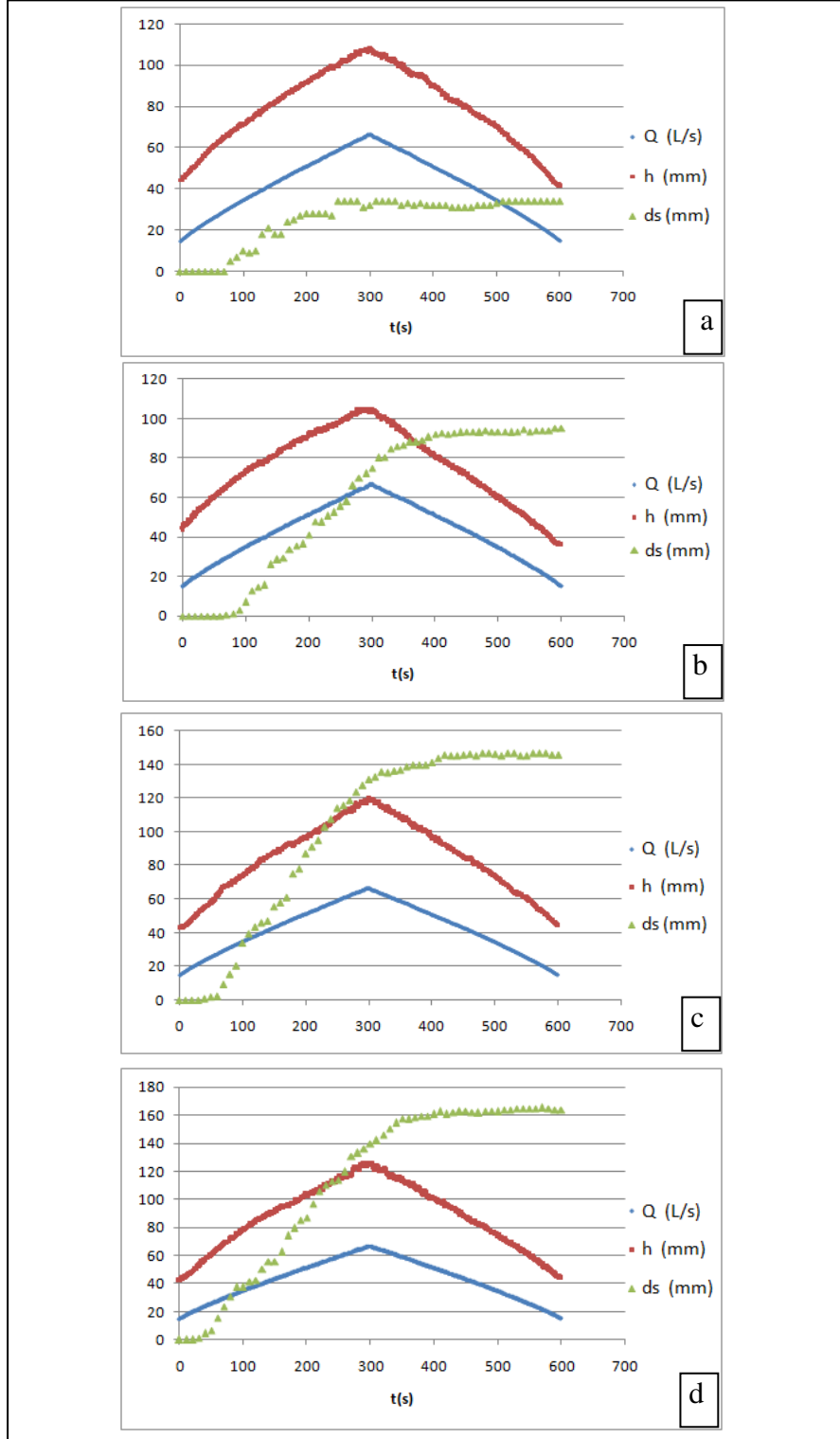
Şekil 3.12 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde Q, y, ds’ nin , t ile değişimi grafikleri

Yapılan Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneyleri sonucunda görüntülenen oyulmalar, Şekil 3.13 a, 3.13 b, 3.13 c ve 3.13 d'de verilmektedir.



Şekil 3.13 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar

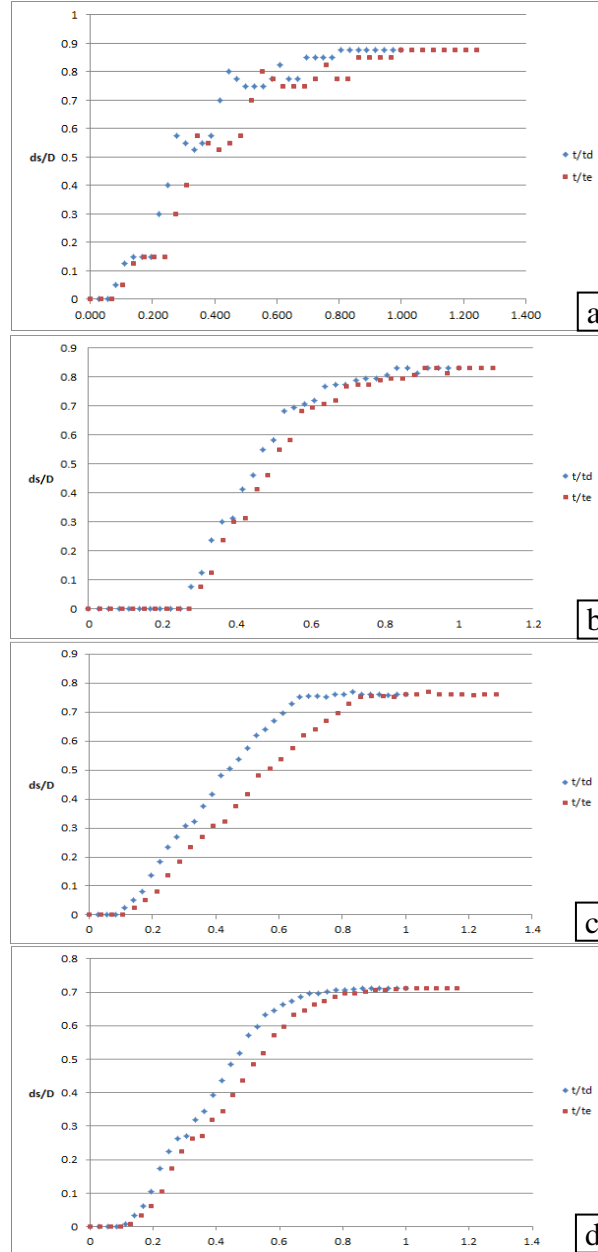
Şekil 3.14 e, 3.14 f, 3.14 g, 3.14 h ‘de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde gözlemlenen debi, derinlik ve ölçülen oyulma derinliklerinin t: deney süreleri ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.14 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde Q, y, ds' nin , t ile değişimi grafikleri

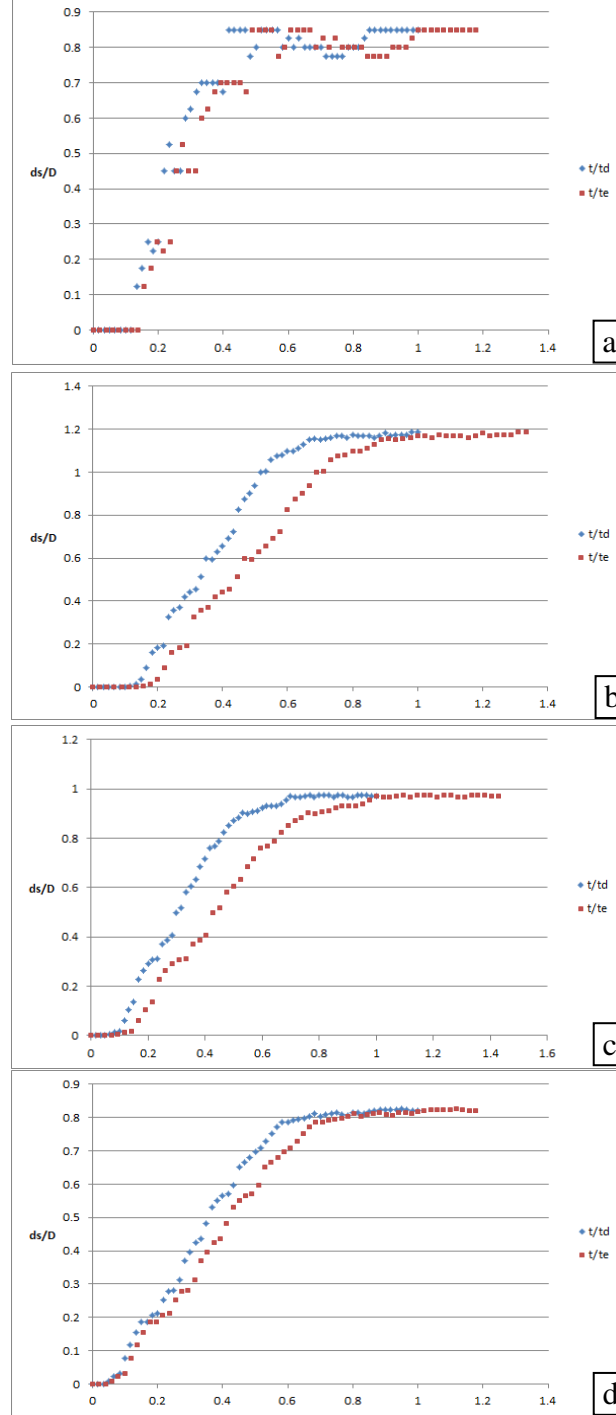
3.2.3 Boyutsuz Oyulma Derinliklerinin Boyutsuz Zamanlara Bağlı Olarak Değişimi

t_e : oyulma derinliğinin denge değerine ulaştığı zaman, t_d : deney süresi olmak üzere, Şekil 3.15 a, 3.15 b, 3.15 c, 3.15 d ' de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, gözlemlenen boyutsuz oyulma derinliklerinin d_s/D boyutsuz t/t_e ve t/t_d zamanlarıyla değişimleri gösterilmiştir.



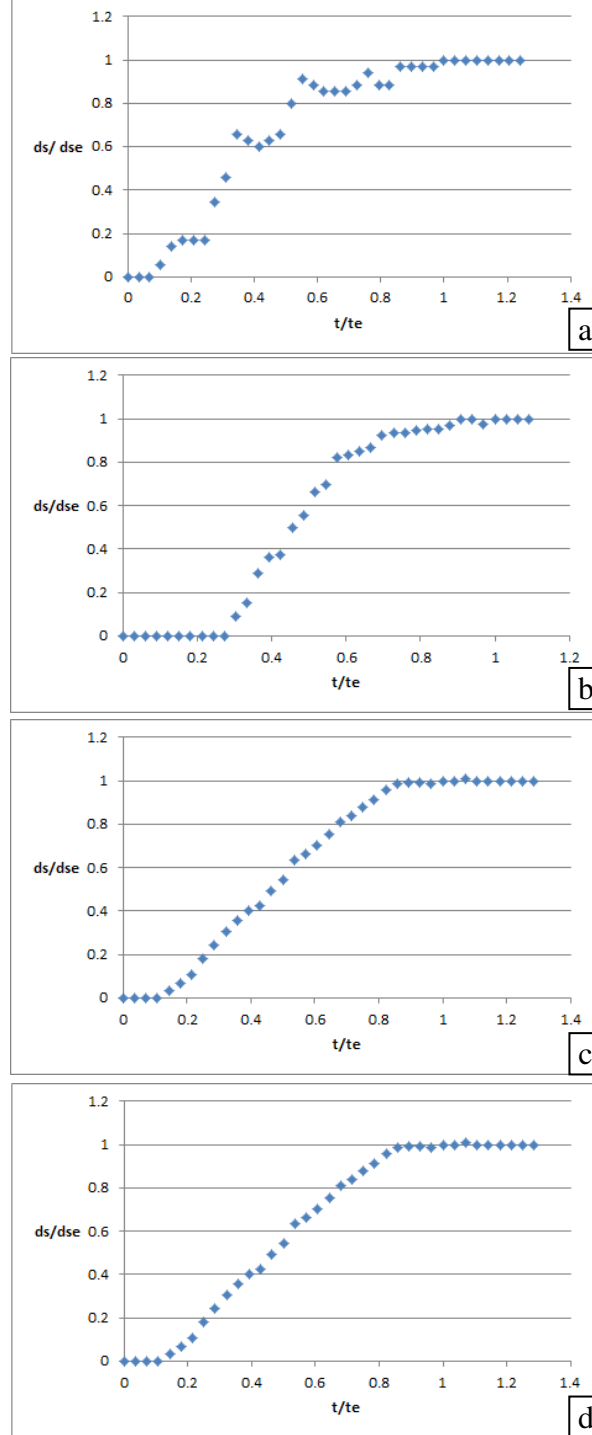
Şekil 3.15 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde d_s/D ' nin t/t_e ve t/t_d ye bağlı olarak değişimi grafikleri

Şekil 3.16 a, 3.16 b, 3.16 c, 3.16 d ‘ de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde, gözlemlenen boyutsuz oyulma derinliklerinin ds/D boyutsuz t/te ve t/td zamanlarıyla değişimleri gösterilmiştir.



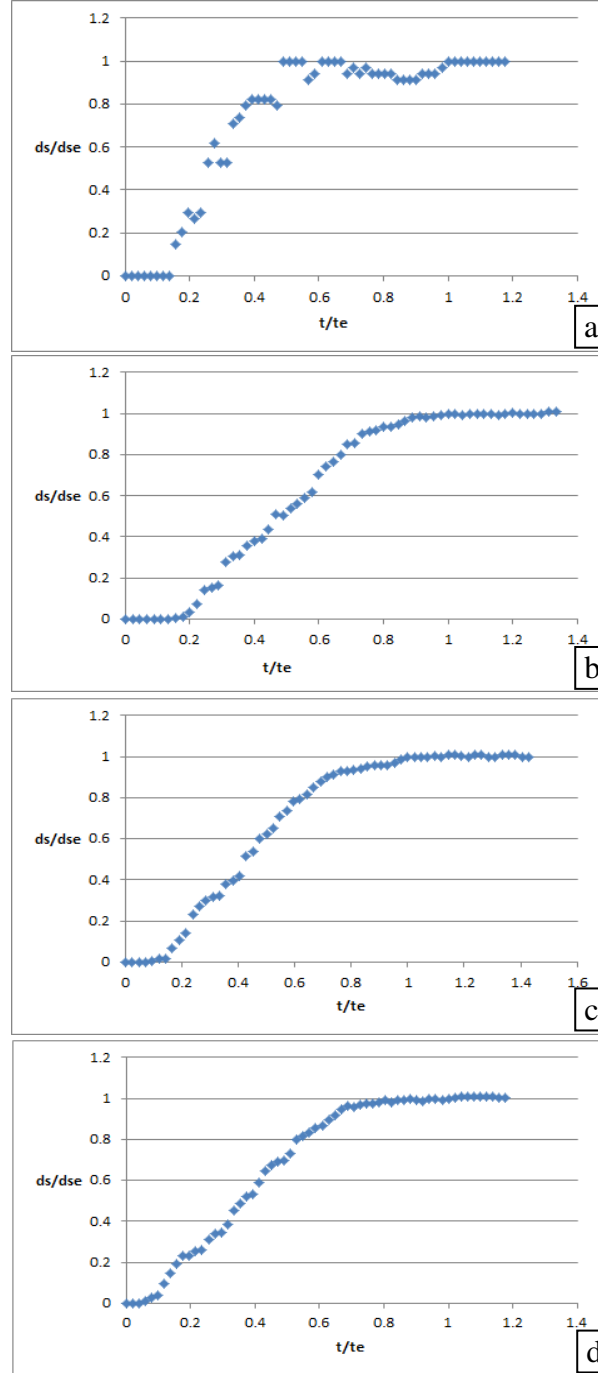
Şekil 3.16 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D ’nin t/te ve t/td ’ye bağlı olarak değişimi grafikleri

Şekil 3.17 a, 3.17 b, 3.17 c, 3.17 d ‘ de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, gözlemlenen boyutsuz oyulma derinliklerinin ds/dse boyutsuz zaman t/te ile değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.17 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/dse ’nin t/te ile değişimi grafikleri

Şekil 3.18 a, 3.18 b, 3.18 c, 3.18 d ‘ de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde, gözlemlenen boyutsuz oyulma derinliklerinin ds/dse boyutsuz zaman t/te ile değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.18 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/dse ’ nin t/te ile değişimi grafikleri

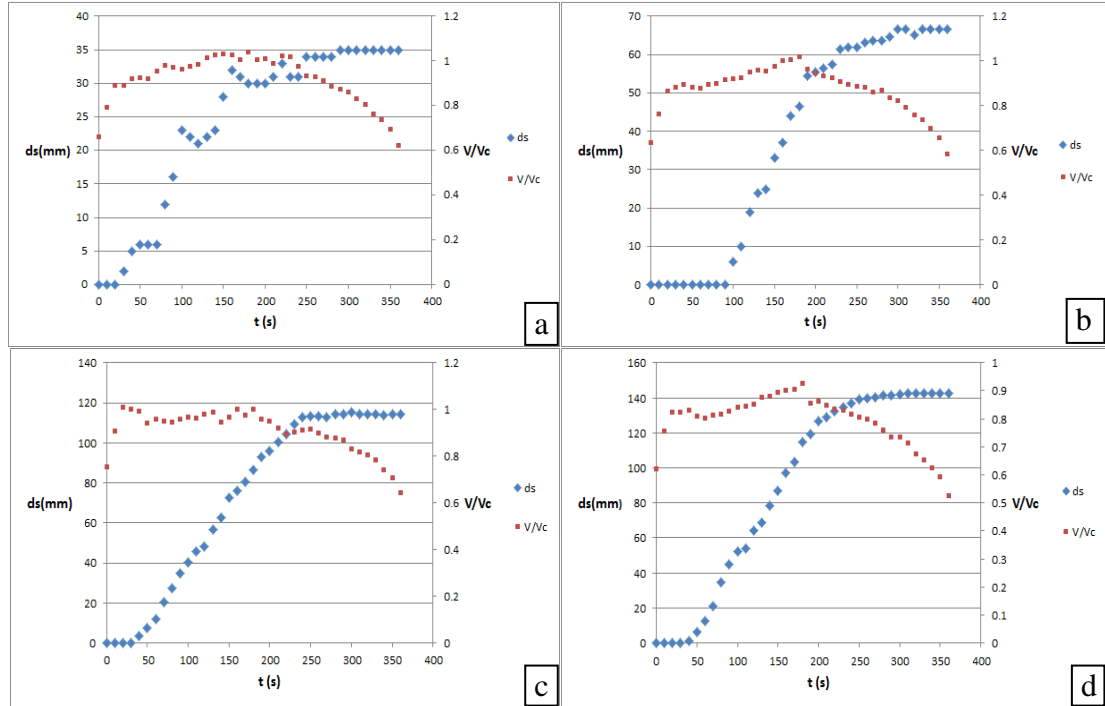
BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL BULGULARIN İRDELENMESİ

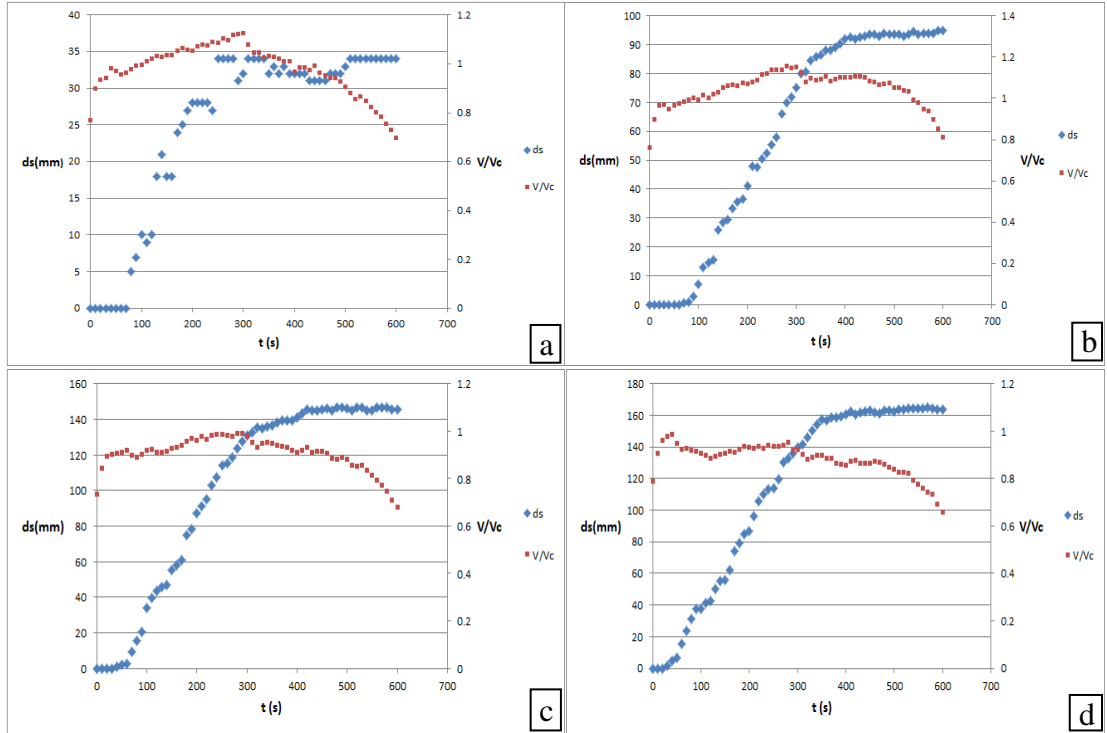
Deneyler iki ayrı hidrograf için yapılmış ve deneysel bulgular yorumlanmıştır. Ayrıca deney şartlarına uyan literatür bağıntısı olmadığından bu deney şartlarına uygun bir bağıntı elde edilmeye çalışılmıştır. Diğer taraftan da ölçülen değerler literatürde verilen formüller kullanılarak elde edilen sayısal değerlerle karşılaştırılmıştır.

4.1 Akım Şiddeti V/V_c ' nin ve ds 'nin Zaman ile Değişimi Grafikleri

Katı madde hareketinin başlamasıyla ilgili kritik hız (V_c) 2.10 ve 2.11 bağıntıları yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 4.1 a, 4.1 b, 4.1 c, 4.1 d 'de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, Şekil 4.2 a, 4.2 b, 4.2 c, 4.2 d 'de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde gözlemlenen oyulmanın ve akım şiddetinin zaman ile değişimi gösterilmektedir.



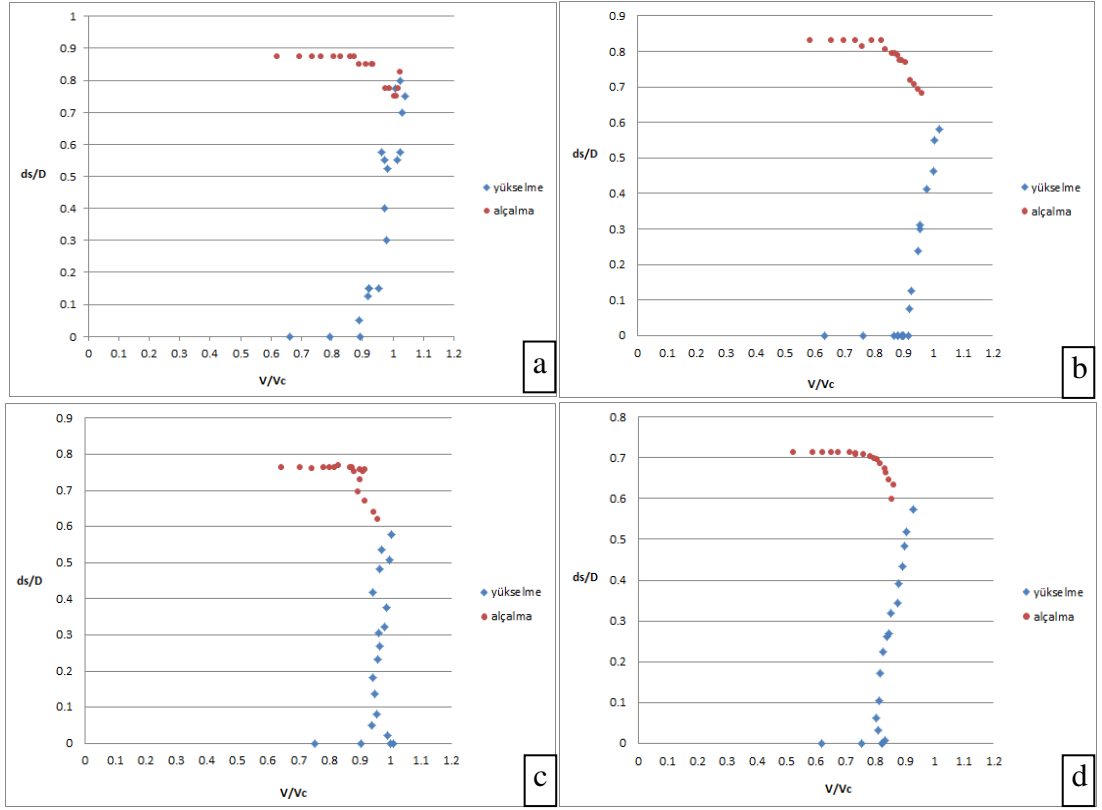
Şekil 4.1 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde ds ve V/V_c 'nin zaman ile değişimi grafikleri



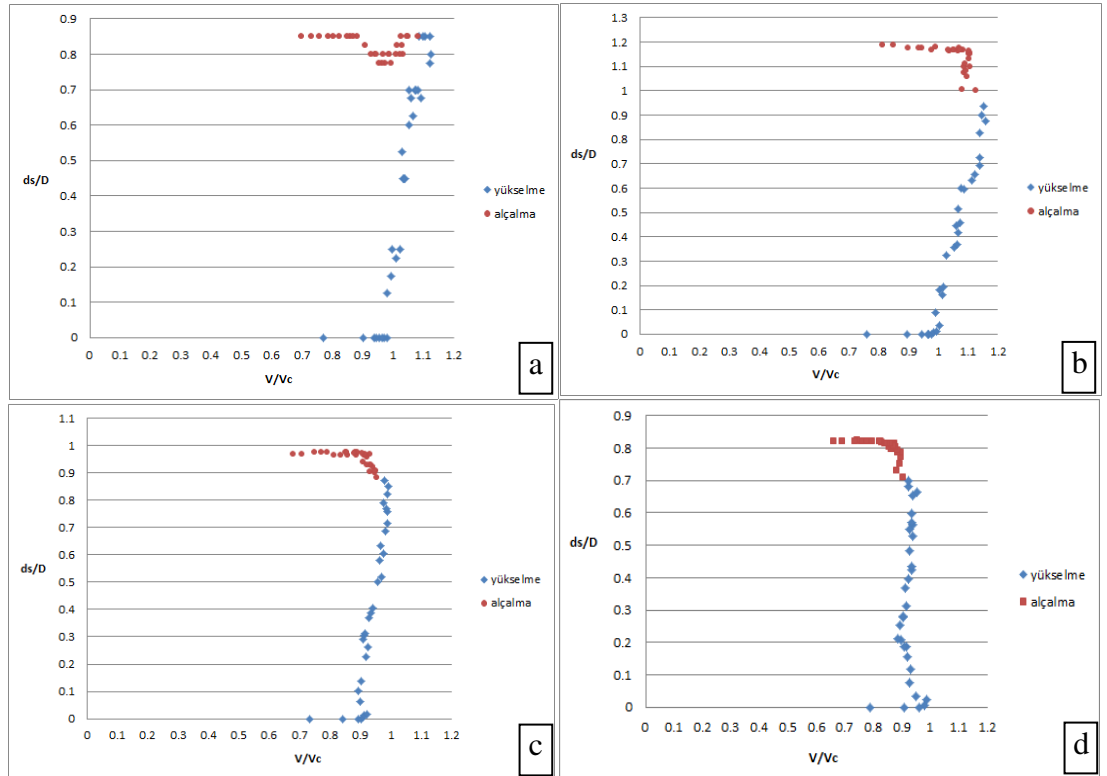
Şekil 4.2 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde ds ve V/V_c 'nin zaman ile değişimi grafikleri

4.2 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Akım Şiddetine Bağlı Olarak Değişimi

Şekil 4.3 a, 4.3 b, 4.3 c, 4.3 d 'de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, Şekil 4.4 a, 4.4 b, 4.4 c, 4.4 d 'de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde gözlemlenen oyulmanın ayak çapına oranıyla elde edilen boyutsuz oyulma derinliği ds/D 'nin V/V_c ile değişimi gösterilmektedir



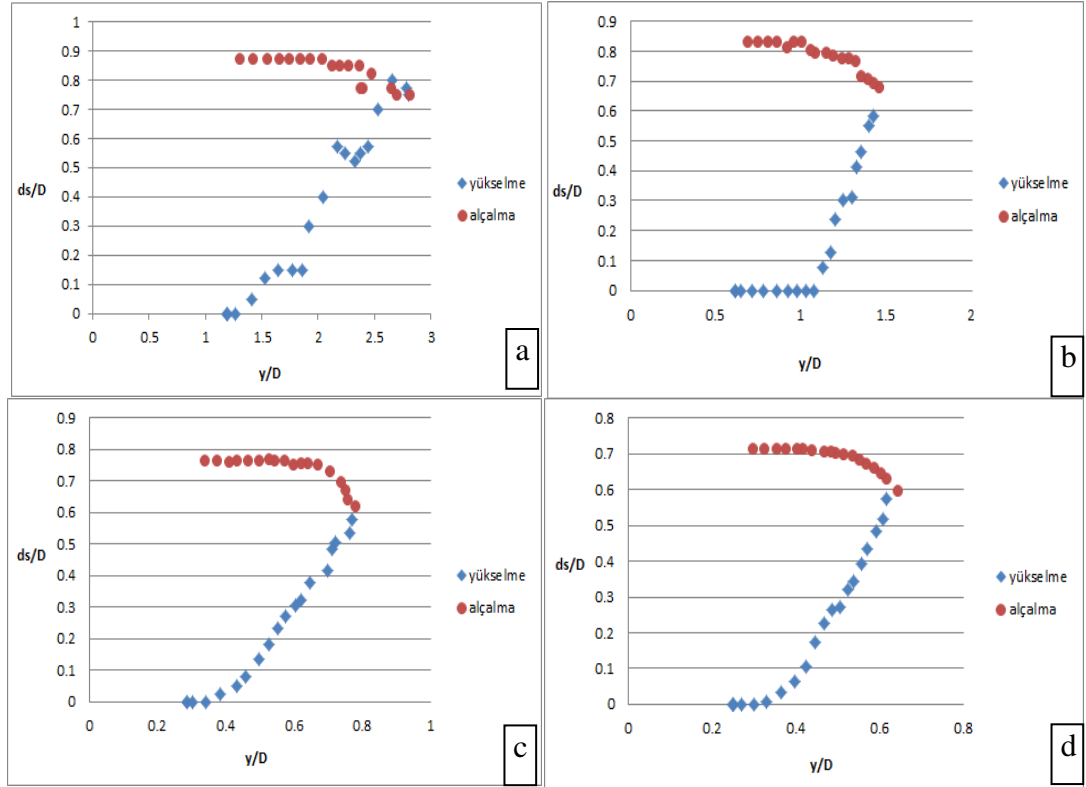
Şekil 4.3 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D ' nin V/V_c ile değişimi grafikleri



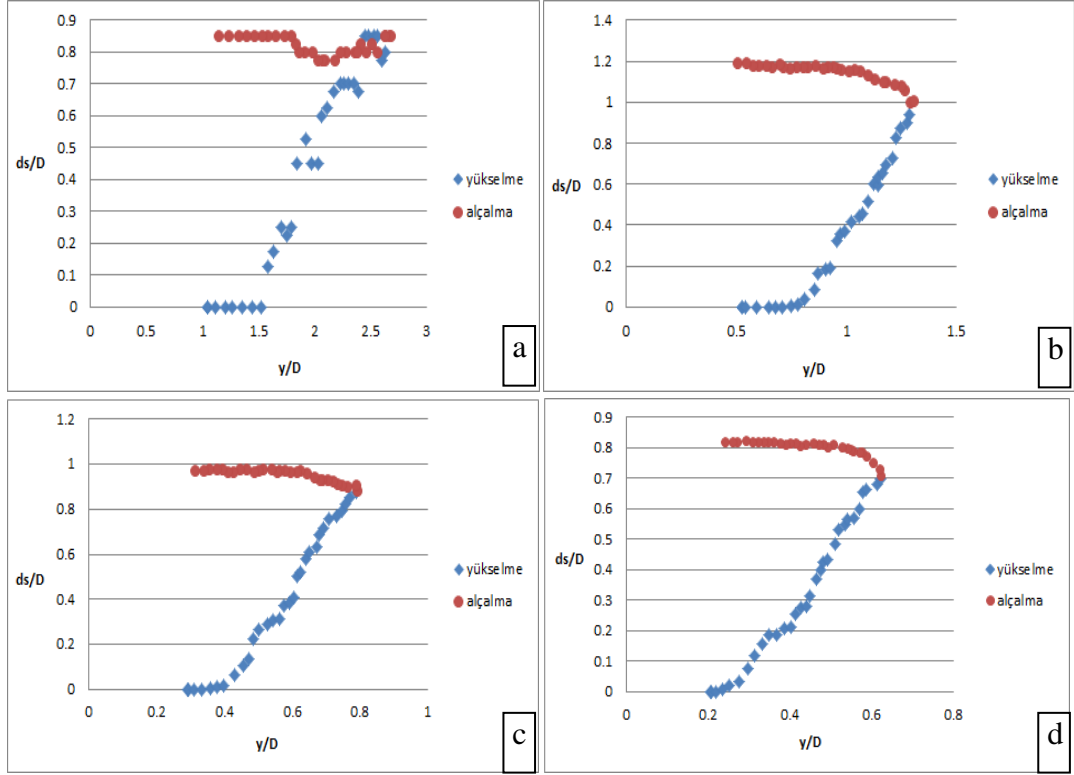
Şekil 4.4 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D ' nin V/V_c ile değişimi grafikleri

4.3 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Boyutsuz Derinlik ile Değişimi

Şekil 4.5 a, 4.5 b, 4.5 c, 4.5 d’de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, 4.6 a, 4.6 b, 4.6 c, 4.6 d’de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde gözlemlenen oyulmanın ayak çapına oranıyla elde edilen boyutsuz oyulma derinliği ds/D ’nin boyutsuz akım derinliği ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.5 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D 'nin y/D ile değişimi grafikleri

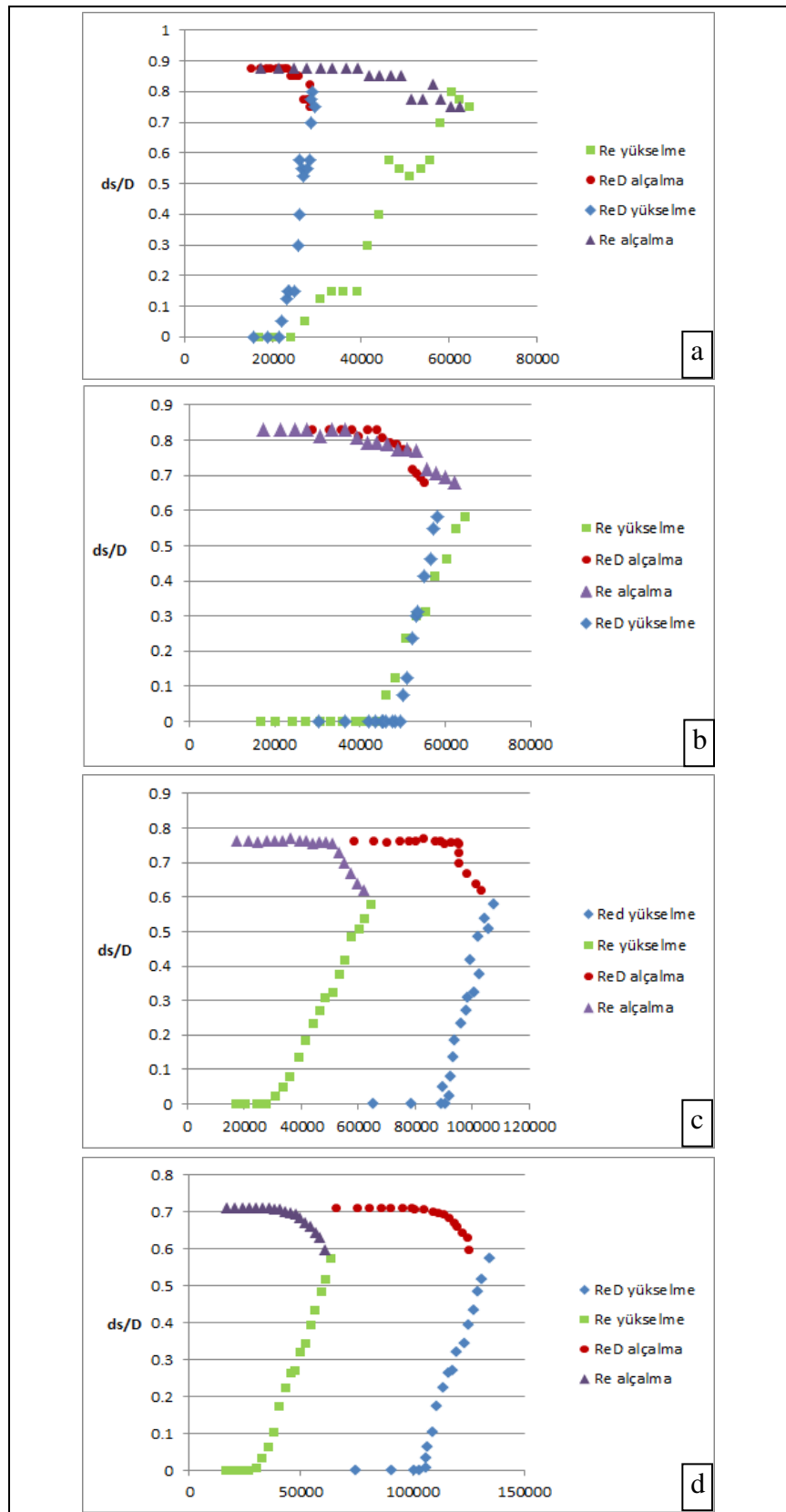


Şekil 4.6 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D 'nin y/D ile değişimi grafikleri

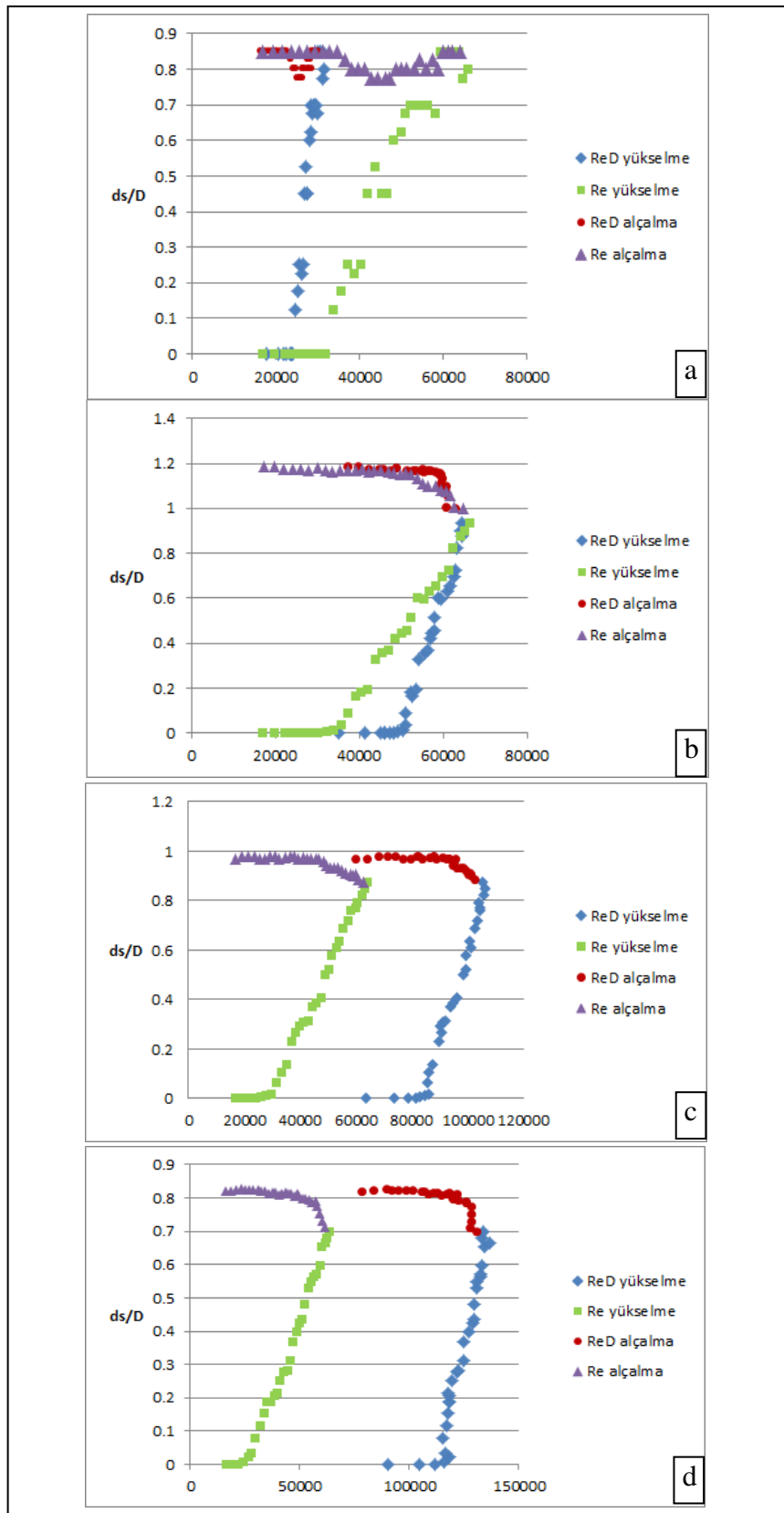
4.4 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Reynolds ve Ayak Reynolds Sayısı ile Değişimi

Şekil 4.7 a, 4.7 b, 4.7 c, 4.7 d ' de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, Şekil 4.8 e, 4.8 f, 4.8 g, 4.8 h 'de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde gözlemlenen Re_D (köprü ayak çapı kullanılarak hesaplanan Reynolds değeri), Re (hidrolik yarıçapa bağlı Reynolds değeri) bağlı olarak boyutsuz oyulma derinlik değişimi gösterilmektedir.

Hesaplarda suyun kinematik vizkozitesi $\nu : 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ alınmıştır. R : Hidrolik yarıçap olup Reynolds sayısı $Re = \frac{VR}{\nu}$ ile ayak Reynolds sayısı $Re_D = \frac{VD}{\nu}$ formülü ile hesaplanmıştır.



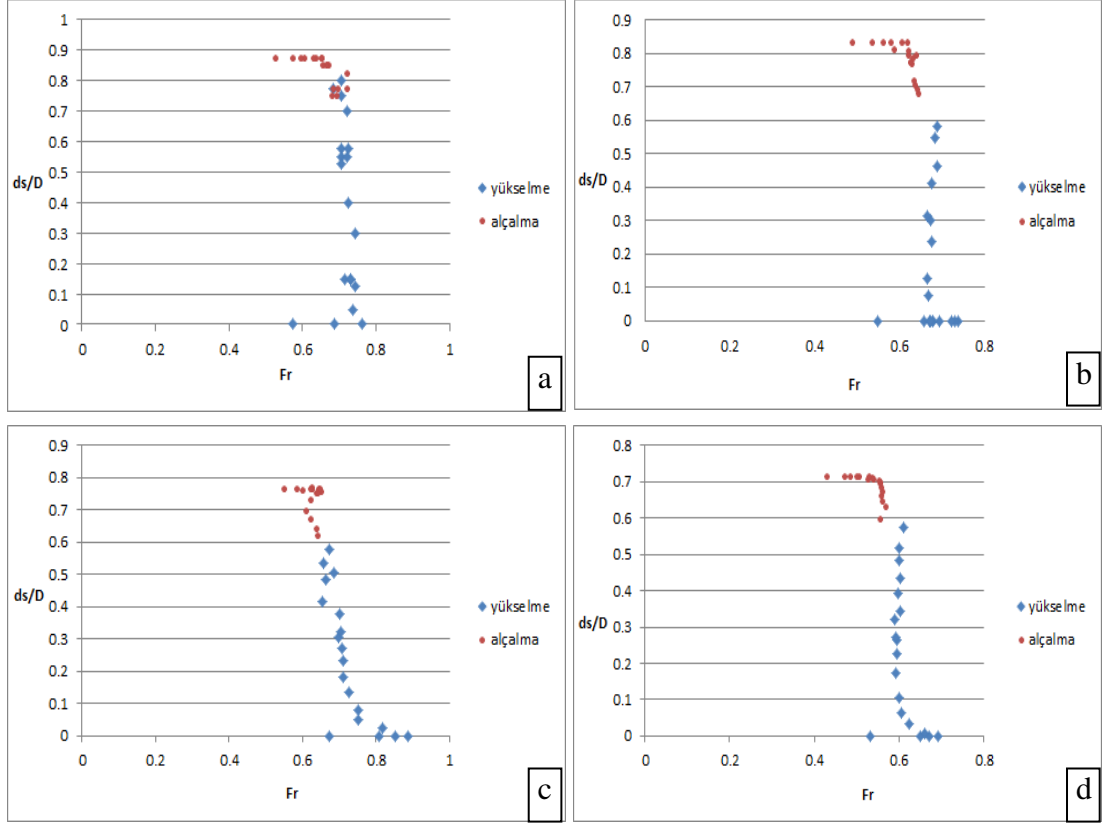
Şekil 4.7 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D 'nin ReD ve Re ile değişimi grafikleri



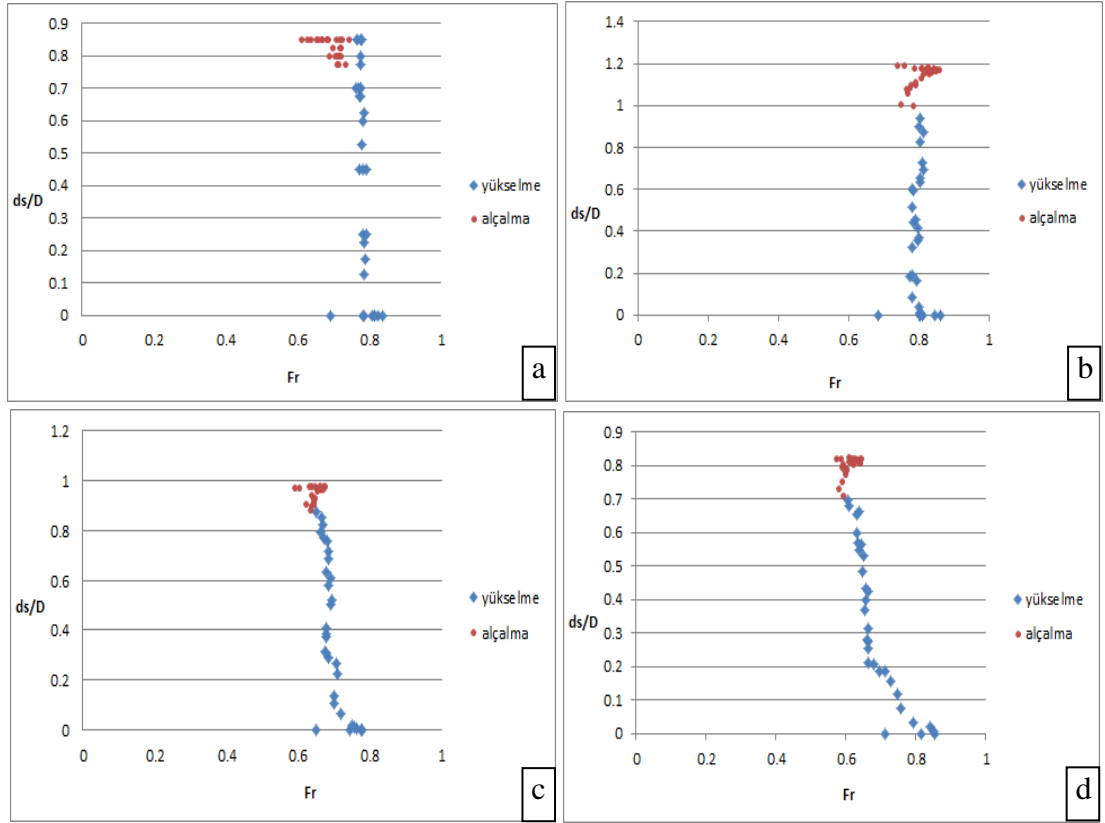
Şekil 4.8 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D ' nin ReD ve Re ile değişimi grafikleri

4.5 Boyutsuz Oyulma Derinliğinin Froude Sayısı ile Değişimi

Şekil 4.9 a, 4.9 b, 4.9 c, 4.9 d 'de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, Şekil 4.10 a, 4.10 b, 4.10 c, 4.10 d ' de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde elde edilen ds/D boyutsuz oyulma derinliğinin, Froud sayısı değerleri ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.9 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D 'nin Fr ile değişimi grafikleri



Şekil 4.10 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde ds/D 'nin Fr ile değişimi grafikleri

4.6 Hesaplanan ve Ölçülen Nihai Oyulma Derinliklerinin Karşılaştırılması

Kullanılan iki hidrograf ile yapılan deney sonuçlarını; sabit debi, sabit hız, sabit derinlik koşullarında uygulanan ve bulunan bağıntılar kullanılarak karşılaştırma yapabilmek için hidrograflar karakterize edilerek Tablo 4.1'de verildiği gibi ortalama değerler alınarak (debi, derinlik için taban ve pik değerlerinin ortalaması) bağıntılarla uyumu araştırılmıştır. Tablo 4.2'de literatürde mevcut bağıntılarla hesaplanan oyulma derinlikleri (cm) verilmiştir.

Tablo 4.1 Hidrograflar için alınan Q_{ort} , y_{ort} ve deneyler sonunda ölçülen oyulma derinlikleri

Deney adı	Q_{ort} (L/s)	y_{ort} (cm)	d_s (cm)
Hid1 D4	40,62	7,95	3,5
Hid1 D8	40,62	8,15	6,6
Hid1 D15	40,62	7,85	11,4
Hid1 D20	40,62	8,65	14,2
Hid2 D4	40,58	7,30	3,4
Hid2 D8	40,58	7,25	9,5
Hid2 D15	40,58	8,20	14,5
Hid2 D20	40,58	8,25	16,4

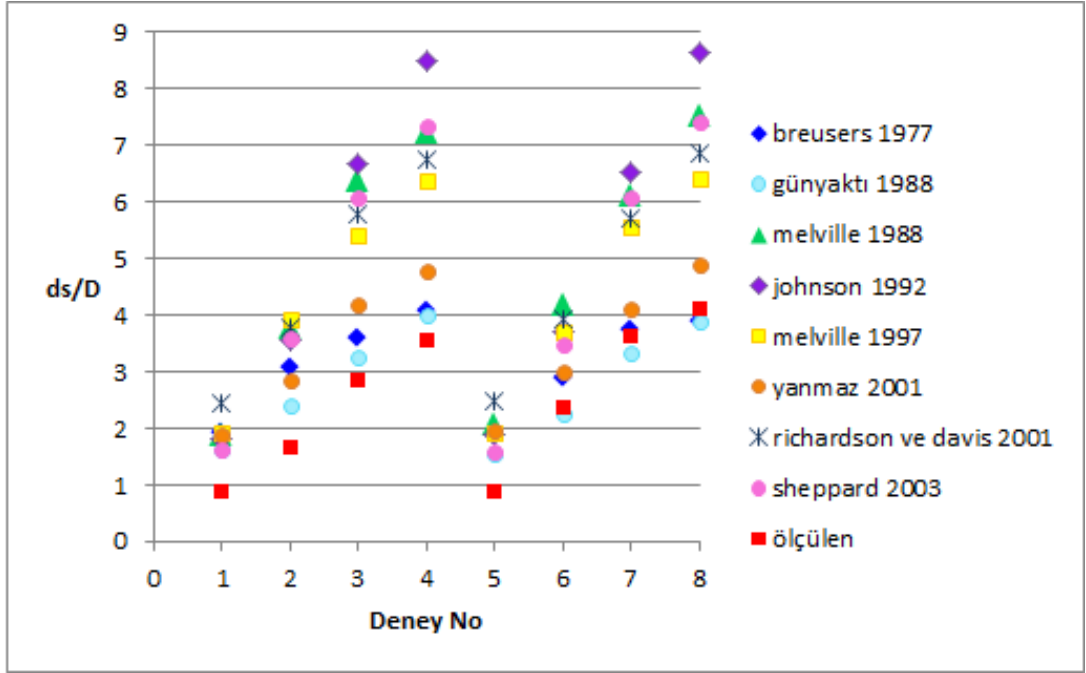
Tablo 4.1’ de görüldüğü gibi hidrograf süresinin artması oyulma derinliğini arttırmıştır.

Tablo 4.2 Mevcut bağlantılarla hesaplanan oyulma derinlikleri (cm)

Deney Adı \ Denklemler No	2.8	2.9	2.13	2.14	2.18	2.19	2.21	2.23
Hid1 D4	7,71	6,54	7,59	7,25	7,73	7,61	9,74	6,54
Hid1 D8	12,31	9,55	15,06	14,18	15,77	11,37	15,17	14,38
Hid1 D15	14,41	13,08	25,53	26,64	21,70	16,79	23,07	24,28
Hid1 D20	16,30	15,94	28,85	33,97	25,51	19,13	27,03	29,38
Hid2 D4	7,59	6,28	8,22	7,50	7,73	7,88	9,98	6,42
Hid2 D8	11,51	9,04	16,82	14,85	14,88	11,94	15,69	14,00
Hid2 D15	14,94	13,35	24,47	26,17	22,18	16,48	22,77	24,34
Hid2 D20	15,62	15,59	30,14	34,61	25,69	19,50	27,40	29,64

Tablo 4.2’ de görüldüğü gibi bağıntılar sonucu elde edilen oyulma derinlikleri, Tablo 4.1’ de görülen deneyler sonucu gözlemlenen oyulma derinliği değerlerinden büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle hidrograf taban ve pik değerlerinin ortalamaları alınarak özgün bir bağıntı elde edilmesi amaçlanmıştır.

Şekil 4.11’de deneyler sırasında ölçülen ve literatürde verilen bağıntılarla hesaplanan oyulma derinliklerinin, köprü ayak çaplarına oranı ile birlikte karşılaştırılmaları görülmektedir. Bağıntıların, bu çalışmanın sonuçları ile uyumlu olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.11 Deneyler sırasında ölçülen ve literatürde verilen bağıntılarla hesaplanan oyulma derinlikleri

4.7 Ortalama Değerlere Bağlı Olarak Elde Edilen Bağıntının Açıklanması

u_* : kayma hızı olup ; $u_* = \sqrt{gRS_f}$ ‘dır.

u_{*p} ; pik debi sırasındaki kayma hızı olarak düşünülmüş ve o an uniform akım olarak kabul edilmiştir. Bu yüzden $u_{*p} = \sqrt{gRS_0}$ şeklinde, hidrografın pik debi sırasındaki akım derinliğine bağlı olarak hidrolik yarıçapa, kanal taban eğimine ve yer çekimi ivmesine bağlı olarak hesaplanmıştır.

y_p : hidrografın pik debideki akım yüksekliğidir. Yapılan deneylerde pik akım derinliği ortalama alınarak 114 mm kabul edilmiştir.

Kanal genişliği 80 cm'dir. Buna bağlı olarak hidrolik yarıçap $R = \frac{0,8 \cdot 0,114}{0,8 + 2 \cdot 0,114} = 0,088$ m dir. Kanal taban eğimi 0,006 olup ;

$u_{*p} = 0,07$ m/s bulunmuştur.

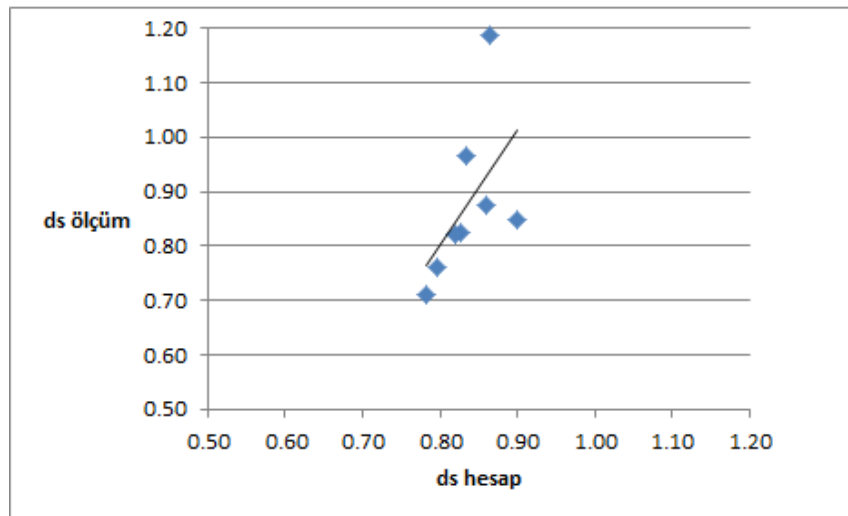
$d_{50} = 3,46$ mm'dir.

t_r : taban debisinden pik debiye çıkılan süreyi saniye cinsinden gösterir. Yapılan deneylerde Hid1 için t_r : 180 s ve Hid2 için t_r : 300 s'dir.

Önerilen denklem aşağıdaki şekildedir. $d_s / D = f(d_{50} / D, t_r u_{*p} / y_p)$ ilişkisini araştırmak üzere bulunan d_s : nihai oyulma derinlikleri denklemlerle hesaplanmıştır ve ölçümlenen değerlerle karşılaştırılarak bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu uygunluk analizi sonucunda ;

$$\frac{d_s}{D} = 0,65 \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{0,058} \left(\frac{t_r u_{*p}}{y_p} \right)^{0,09} \quad (4.1)$$

şeklinde bir bağıntı elde edilmiştir. Şekil 4.12' de hesaplanan ve ölçülen nihai oyulma değerleri görülmektedir.



Şekil 4.12 Bağıntı ile hesaplanan değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması

4.8 Zamana Bağlı Olarak Değişen Oyulma Derinliği

4.8.1 Hidrograf Durumunda Değişik Zamanlardaki Oyulma Derinliğinin Hesap Yöntemi

Oliveto ve Hager (2005), zamana bağlı oyulma derinlikleri için verdikleri 2.22 bağıntısında taşkın hidrografi durumunda farklı zamanlara karşılık gelen oyulma derinliklerini hesaplamak için aşağıdaki yöntemi önermişlerdir.

1. Oliveto ve Hager (2002)'e göre ;

$$\Phi_{\beta} = 1 - (2/3)\beta^{1/4}$$

$$\beta = D/B$$

$$F_{di} = 1,08 D_*^{1/12} (R_h / d_{50})^{1/6} \text{ olmak üzere,}$$

$$t = t_0 \text{ anında sediment hareketi başlar yani } F_d = V/(g' d_{50})^{1/2} \geq \Phi_{\beta} F_{di} \text{ olur.}$$

2. t_e : taşkın hidrografının son değeri yani tüm deney süresi olmak üzere, $t_e - t_0 = n\Delta t$ zaman farkı, n aralığa bölünerek Δt zaman aralıkları tanımlanmıştır. $\Delta t = t_e / 10$ olarak alınmıştır.

3. $t = t_0$ anında $Z = 0$ dır. Oysaki $h_{0,1}$, $n = 1$ için yaklaşım akım derinliğinin ortalaması olmak üzere, t_1 anında $T_1 = [\sigma^{1/3} (g' d_{50})^{1/2} / (h_{0,1} D^2)^{1/3}] \Delta t$ dir. T_1 anındaki boyutsuz oyulma değeri $Z_1 = 0,068 \sigma^{-1/2} F_{d,0,1}^{1,5} \log(T_1)$ dir. Böylece oyulma derinliği $z_1 = (h_{0,1} D^2)^{1/3} Z_1$ dir. Δt sonunda $t = t_1$ anında başlangıç şartları $z(t_1) = z_1$, $Q = Q_1$ ve $h_0 = h_1$ dır.

4. (t_1, t_2) yani $(\Delta t - 2\Delta t)$ aralığında $t = t_1$ için göreceli oyulma derinliği $z_1 = (h_{1,2} D^2)^{1/3}$ dir. Bu formülde $h_{1,2}$ yaklaşım akım derinliğinin ortalamasıdır. Buna karşılık gelen zamanda $E = Z_1 / (0,068 \sigma^{-1/2} F_{d,1,2}^{1,5})$ olmak üzere $T_1 = 10^E$ dir. Boyutsal zaman $t'_1 = [(h_{1,2} D^2)^{1/3} / \sigma^{1/3} (g' d_{50})^{1/2}] T_1$ dir.

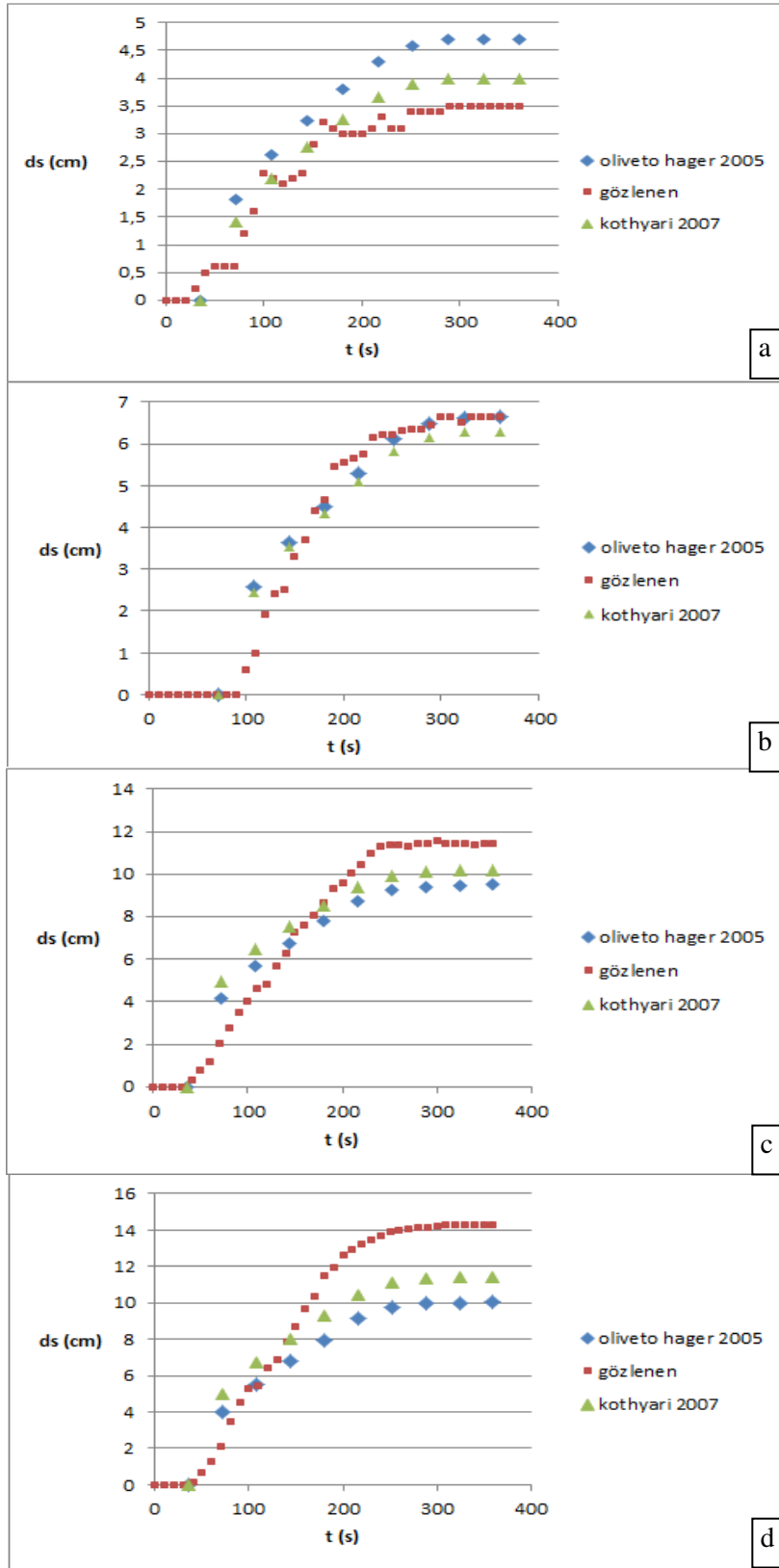
$t'_2 = t'_1 + \Delta t$ alındığında $T_2 = [\sigma^{1/3} (g' d_{50})^{1/2} / h_{1,2} D^2]^{1/3} t'_2$ yazılabilmektedir. Böylece $Z_2 = 0,068 \sigma^{-1/2} F_{d,1,2}^{1,5} \log(T_2)$ yazılabilmektedir ve $z_2 = (h_{1,2} D^2)^{1/3} Z_2$ olmaktadır. t'_1 ve t'_2 zamanları t_1 ve t_2 zamanlarından farklı olup; $z = z_1$ ve $z = z_2$, yaklaşım akım derinliği $h_{1,2}$ ve $F_d = F_{d,1,2}$ olduğu zamandaki sanal zamanlara karşılık gelmektedir. Buna karşılık z_1 ve z_2 ; t_1 ve t_2 gerçek zamanlardaki oyulma derinliklerini simgelemektedir.

5. Bu yapılan işlem $t_e = n\Delta t$ oluncaya kadar yapılmaktadır. Böylece $z(t_e) = z_e$ sonucuna ulaşılmaktadır.

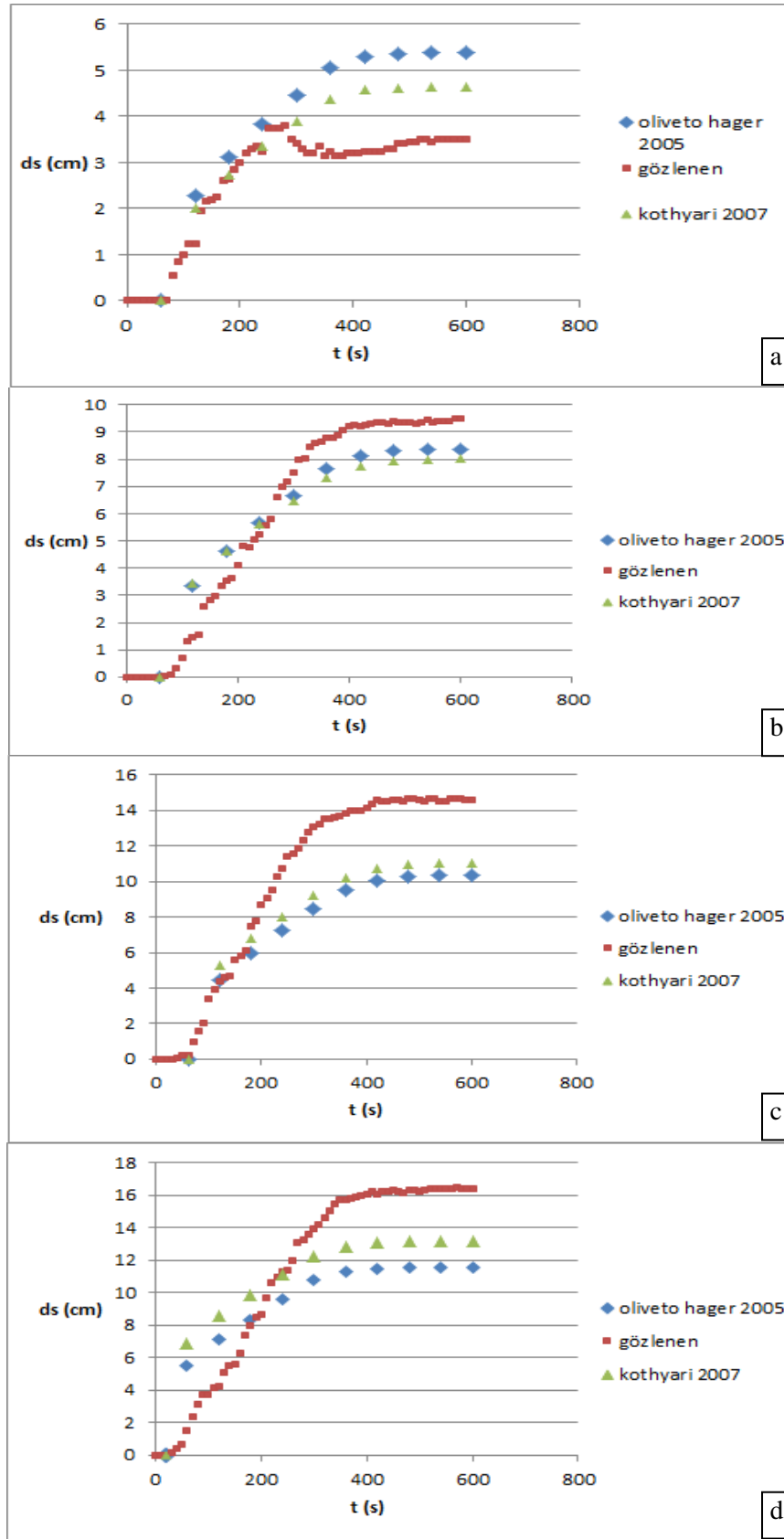
Bu yöntem; deney verilerimize uygulandığında 4.8.2 'de verilen sonuçlar elde edilmektedir.

4.8.2 Zamana Bağlı Olarak Değişen Oyulma Derinliği Bağlıları ile Deney Sonrası Gözlenen Oyulma Derinliği Değerlerinin Karşılaştırılması

Oliveto ve Hager (2005) ile Kothyari, Hager, Oliveto (2007) Δt zaman aralıkları ile çözümlenen ve hidrograf kullanılan deneyler için uygun olan bağıntılar önermişlerdir. Şekil 4.13 a, 4.13 b, 4.13 c, 4.13 d ' de Hid1D4, Hid1D8, Hid1D15, Hid1D20 deneylerinde, Şekil 4.14 a, 4.14 b, 4.14 c, 4.14 d' de Hid2D4, Hid2D8, Hid2D15, Hid2D20 deneylerinde gözlenen oyulma derinlikleri ile bağıntılarla hesaplanan oyulma derinlikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Δt zaman aralıkları Hid1 deneyleri için 36 saniye, Hid2 deneyleri için 60 saniye olarak belirlenmiş ve 10 saniyede bir ölçümlenen deneysel oyulma değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.13 a, 4.13 b, 4.13 c, 4.13 d' de ve Şekil 4.14 a, 4.14 b, 4.14 c, 4.14 d' de görüldüğü üzere değerlerin eğilimlerinin benzer olduğu görülse de sonuçlar birbirinden farklıdır.



Şekil 4.13 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 1 hidrografi ile yapılan deneylerde oyulma derinliklerinin karşılaştırılması



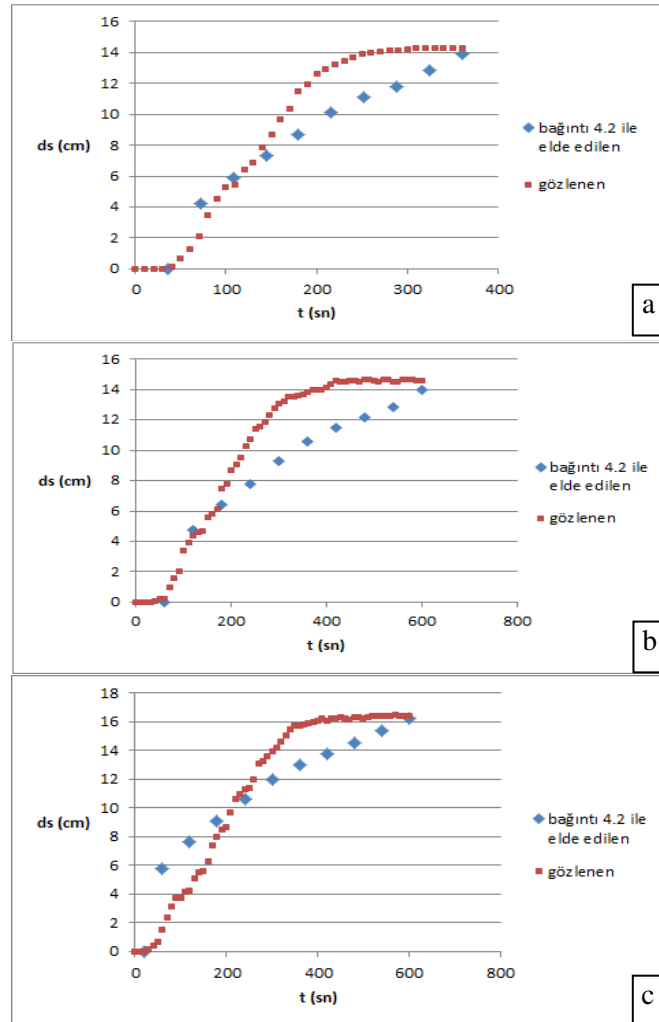
Şekil 4.14 a) 4 cm, b) 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayakları ve Hid 2 hidrografi ile yapılan deneylerde oyulma derinliklerinin karşılaştırılması

4.8.3 Zamana Bağlı Olarak Değişen Oyulma Derinliği Bağıntısı

2.22 bağıntısında yer alan parametrelerin katsayıları yeniden tahmin edilmiş ve en iyi sonuç taban malzemesinin geometrik standart sapma parametresinin (σ), üssü $-1/3$ olarak verildiğinde elde edilmiştir.

$$Z = z/z_R = 0,068 N \sigma^{-1/3} F_d^{1,5} \log(T) \quad (4.2)$$

4.2 bağıntısı ile hesaplanan ve gözlenen zamana bağlı oyulma derinlikleri Şekil 4.15 a, 4.15 b, 4.15 c' de örnek olarak verilmiş ve elde edilen nihai oyulma derinliklerinin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4.15 a) Hid1 D20 b) Hid2 D15 c) Hid2 D20 deneylerinde 4.2 bağıntısı ile elde edilen ve gözlenen nihai oyulma derinliği değerlerinin karşılaştırılması

4.8.4 Zamana Bağlı Oyulma Gelişimini Veren Ampirik Bağntı

Tablo 3.2’de verilen oyulmanın başladığı zaman, oyulmanın nihai derinliği ve bu nihai derinliğe ulaşılması için geçen zaman değerleri kullanılarak;

ds_e : nihai oyulma derinliği ve t_e : bu oyulma derinliğinin oluşması için oyulmanın başladığı zamandan itibaren geçen süre olmak üzere; oyulma derinliğinin (ds) zamana (t) bağlı olarak gelişimini ifade etmek amacıyla;

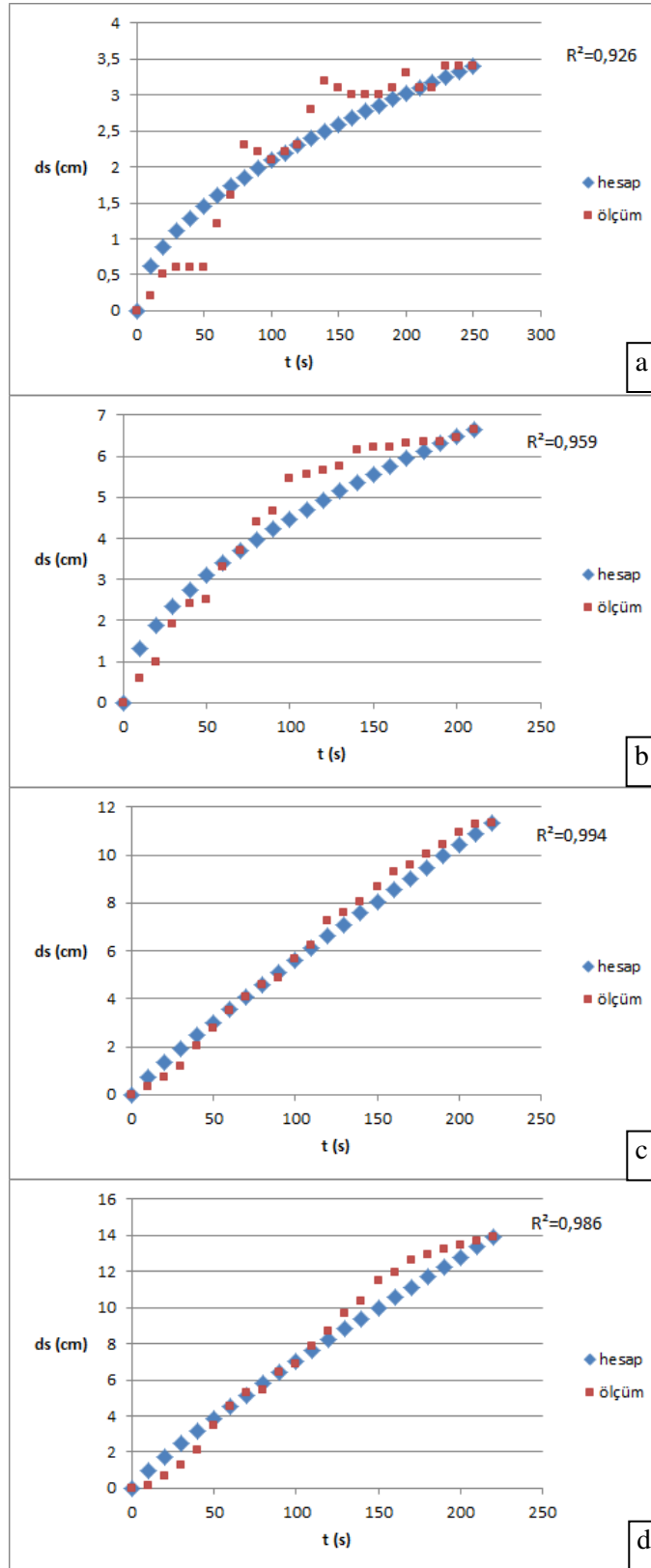
$$d_s = d_{se} \left(\frac{t}{t_e} \right)^a \quad (4.3)$$

şeklinde bir ampirik bağıntı araştırılarak deneysel verilerle en uyumlu olan a üssünün belirlenmesine çalışılmıştır.

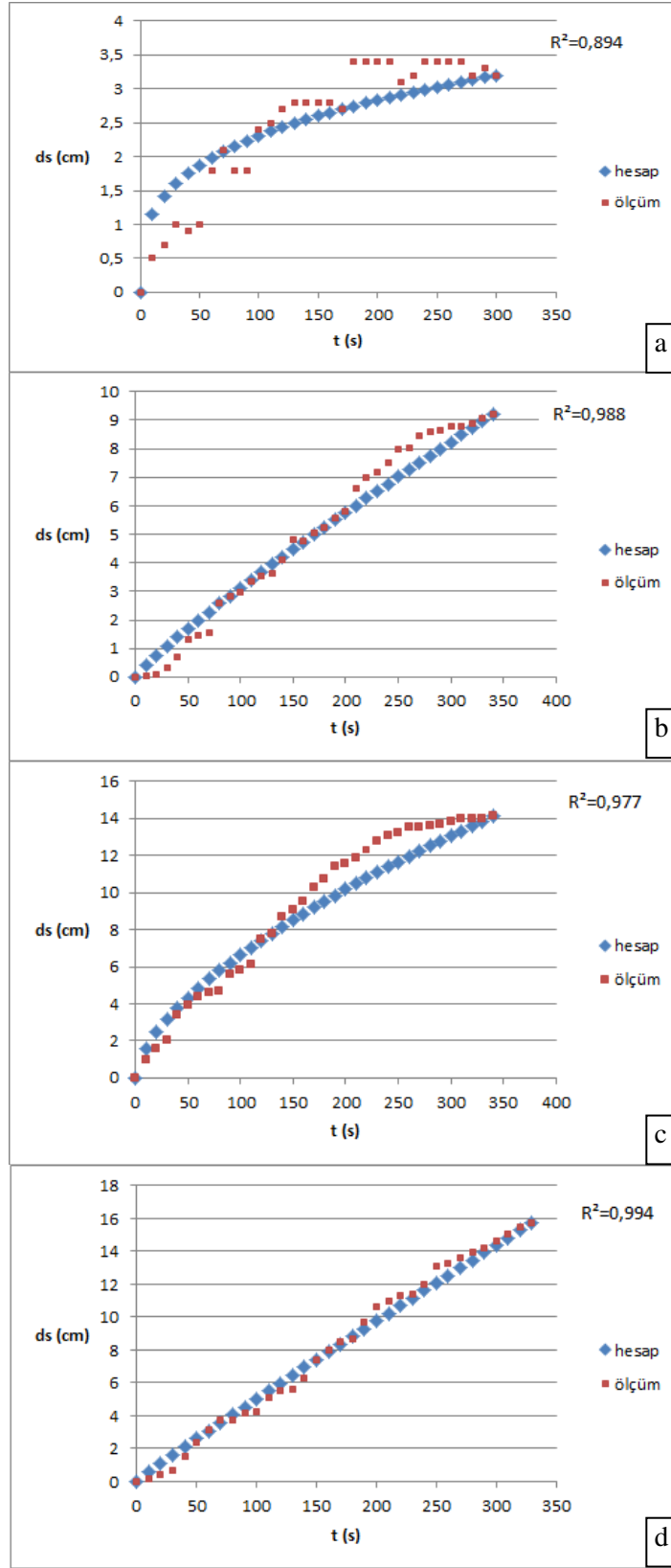
Farklı köprü ayak çapları için gerçekleştirilen bu analiz sonunda elde edilen a üssünün değerleri Tablo 4.3’te; 4.3 ampirik bağıntısıyla elde edilen eğriler deneysel bulgularla beraber HİD1 hidrografi için Şekil 4.16 a, 4.16 b, 4.16 c ve 4.16 d’de; HİD2 hidrografi için ise Şekil 4.17 a, 4.17 b, 4.17 c, ve 4.17 d’de verilmektedir.

Tablo 4.3 Ampirik 4.3 bağıntısında elde edilen a üsleri

Deney Adı	Hid1D4	Hid1D8	Hid1D15	Hid1D20	Hid2D4	Hid2D8	Hid2D15	Hid2D20
a üssü	0,530	0,534	0,893	0,867	0,299	0,882	0,616	0,958



Şekil 4.16 a) Hid1D4 b) Hid1D8, c) Hid1D15, d) Hid1D20 deneylerinde ölçülen ve 4.3 ampirik bağıntısıyla hesaplanan oyulma değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.17 a) Hid2D4 b) Hid2D8, c) Hid2D15, d) Hid2D20 deneylerinde ölçülen ve 4.3 ampirik bağıntısıyla hesaplanan oyulma değerlerinin karşılaştırılması

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneyler esnasında mevcut bilgilere ve önceki çalışmalara uyumlu olarak,

a) Memba tarafında oluşan oyulmanın mansap tarafındaki ve yarlarda oluşan oyulmadan büyük olduğu dolayısıyla en büyük oyulmanın köprü ayağının membaında olduğu

b) Oyulma sırasında akımın kopardığı malzemenin taşınarak mansap bölgesinde yığıldığı

c) Akım şiddeti (V/V_c) arttıkça oyulma derinliğinin arttığı

d) Hız ve derinlik arttıkça ve bunlara bağlı Fr sayısı gibi değerler arttıkça oyulma derinliğinin arttığı

e) Hidrografın süresi arttıkça oyulma derinliğinin arttığı

f) Köprü ayak çapı arttıkça oyulma derinliğinin arttığı

g) V/V_c değeri 1'den küçük olmasına rağmen bütün deneylerde taban hareketinin olduğu

h)Yapılan analiz sonucunda boyutsuz d_s / D parametresi ile d_{50} / D ve $t_r u_{*p} / y_p$ arasında $d_s / D = 0,65 (d_{50} / D)^{0,058} (t_r u_{*p} / y_p)^{0,09}$ ilişkisi elde edilmiştir.

e)Yapılan analiz sonucunda oyulma derinliğinin (d_s) zamana (t) bağlı olarak $d_s = d_{se} (t/t_e)^a$ ilişkisi incelenmiş ve uygun ampirik bağıntılar elde edilmiştir.

Mevcut sınırlı sayıdaki bağıntılar ve deneylerle yapılan analiz sonunda elde edilen bağıntının kontrolü ve daha çeşitli, daha doğru bağıntılar elde edebilmek amacıyla daha çok ve çeşitli hidrograf ile ayrıca zaman ile değişmeyen akımlar da kullanılarak deneyler yapılmalıdır. V_c değerini bulduran farklı bağıntılar elde edilmelidir.

Köprü ayakları civarında oluşan en önemli problemler, suların meydana getirdiği aşınma, dolma ve oyulmalardır. Köprü inşaatlarında köprünün yapılacağı bölgeye uygun deneysel çalışmalar yapılarak oraya uygun köprü ayak tipi belirlenmelidir. Köprü ayakları oyulma derinliğinin altına oturtulmalıdır. Ayrıca köprülerin memba ve mansap kısmından malzeme alınmasına izin verilmemelidir.

KAYNAKLAR

- Aktif haber. (21 Nisan 2012). *Çaycuma'daki köprü neden çöktü?*. 20 Ocak 2013, <http://www.aktifhaber.com/caycumadaki-kopru-neden-coktu-591089h.htm>
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., ve Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), 211-252.
- Chiew, Y. M. (1995). Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 121(9), 635-643.
- Ettema, R. E. (1980). Scour at bridge piers. *Rep. No. 236*, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- Ettema, R. E., Melville, B. W. ve Barkdoll, B. (1998). Scale effect in pier - scour experiments. *Journal of Hydraulic Resources, ASCE*, 124 (6), 639-642.
- Günyaktı, A. (1988). Köprü ayakları etrafında oyulma derinliğinin grafik yöntemle tayini, *Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi, TÜBİTAK*, 12(1), 96-108.
- Kandasamy, I. K. (1989). Abutment scour. *Rep. No. 458*, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand
- Kothyari, U. C., Hager, W. H., ve Oliveto, G. (2007). Generalized approach for clear-water scour at bridge foundations elements. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 133(11).
- Lai, J. S., Chang, W. Y. ve Yen, C. L. 2009. Maximum Local Scour Depth at Bridge Piers under Unsteady Flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135 (7)
- Melville, B. W., Sutherland A.J. (1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 114 (10), 1210-1226

- Melville, B. W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123 (2), 125–136
- Oliveto, G., ve Hager, W. H. (2002). Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(9), 811–820.
- Oliveto, G., ve Hager, W. H. (2005). Further results to time - dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 131(2), 97–105.
- Raudkivi, A. I. (1986). Functional trends of scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 112(1), 1-13.
- Richardson, E. V., ve 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.
- Sheppard, D. M. (2003 a). Large-scale and live-bed local pier scour experiments. Coastal engineering Technical Rep.No:133, Civil and Coastal Engineering Dept., Univ. Of Florida, Gainesville,Fla
- Sheppard, D. M., ve Miller, W. (2006). Live - bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132 (7).
- Yanmaz, A.M. ve Bulut, F., Computer Aided Analysis of Flow Through River Bridges .*"World Water and Environmental Sciences Congress"*, 1, (2001), p.1-10.
- Yanmaz, A.M. (2002) *Köprü Hidroliği* (1.Baskı).Ankara: Özkan Matbaası