

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİRESEL KESİTLİ KÖPRÜ ORTA AYAKLARI
ETRAFINDA MEYDANA GELEN TEMİZ SU
OYULMALARININ DENEYSEL VE NÜMERİK
OLARAK İNCELENMESİ

Fırat GÜMGÜM

Haziran, 2012
İZMİR

**DAİRESEL KESİTLİ KÖPRÜ ORTA AYAKLARI
ETRAFINDA MEYDANA GELEN TEMİZ SU
OYULMALARININ DENEYSEL VE NÜMERİK
OLARAK İNCELENMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik, Hidroloji ve Su Kaynakları


Anabilim Dalı

Fırat GÜMGÜM


**Haziran, 2012
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU


FIRAT GÜMGÜM, tarafından YRD. DOÇ. DR. AYŞEGÜL ÖZGENÇ AKSOY yönetiminde hazırlanan “DAİRESEL KESİTLİ KÖPRÜ ORTA AYAKLARI ETRAFINDA MEYDANA GELEN TEMİZ SU OYULMALARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


.....
Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY


Danışman


.....
Prof. Dr. H. SÜKRÜ GÜNEY

Jüri Üyesi


.....
Prof. Dr. DAVUT ÖZDAĞLAR

Jüri Üyesi


.....
Prof. Dr. Mustafa SABUNCU
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK 109M637 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, çalışmanın her aşamasında elinden gelen emek ve gayreti esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY'a öncelikle teşekkürlerimi sunarım.

Teorik konularda engin bilgi birikimini paylaşmakta beis görmeyen değerli hocam Prof. Dr. M. Şükrü GÜNEY'e, deneysel çalışmalar süresince beni aydınlatan ve yönlendiren hocam Öğr. Gör. Dr. Gökçen BOMBAR'a, çalışmalarım süresince bana hep pozitif enerji veren Araş. Gör. Mustafa DOĞAN'a ve laboratuvar teknisyeni İsa ÜSTÜNDAĞ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca çalışma saatleri konusunda her türlü esnekliği ve desteği sunan işverenim ALTER Uluslararası Müh. ve Müş. Hiz. Ltd. Şti.'ne, proje müdürümüz Sayın Dr. İ. İlker ATIŞ'a ve beni büyütüp bugüne getiren aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Fırat GÜMGÜM

DAİRESEL KESİTLİ KÖPRÜ ORTA AYAKLARI ETRAFINDA MEYDANA GELEN TEMİZ SU OYULMALARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZ

TÜBİTAK 109M637 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, dairesel en kesitli köprü ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmaları incelenmiştir. Deneyler, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda, 80 cm genişliğinde, 18,6 m uzunluğunda ve 75 cm derinliğinde bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda ölçülen nihai oyulma derinlikleri ile literatürde konu ile ilgili verilen bağıntı sonuçları karşılaştırılmış ve deneylerde ölçülen oyulma derinliklerinin akım şiddeti, göreceli tane boyutu, yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısı gibi olaya etkin parametrelerle olan ilişkisi irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Köprü ayağı, temiz su oyulması, üniform taban malzemesi

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF CLEAR WATER SCOUR AROUND CIRCULAR BRIDGE PIERS

ABSTRACT

In this thesis, clear water scour around bridge piers were investigated within the scope of the TUBİTAK 109M637 project. The experiments were carried out with uniform sediments with median diameter of 3.47 mm and the geometric standard deviation 1.39 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 effective parameters on scour process such as flow intensity, sediment size ratio and densimetric particle Froude number were investigated. The measured final depths of the scours were compared with those computed by using formulas given available literatures. A new empirical formula was proposed at the end of the study.

Keywords: Bridge pier, clear water scour, uniform sediment

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 | 4 |
| 2.3 Yaklaşan Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi | 7 |
| 2.4 Yaklaşan Akım Hızının Etkisi..... | 8 |
| 2.5 Taban Malzemesi Özelliklerinin Etkisi | 8 |
| 2.6 Literatürdeki Mevcut Bağlıntılar | 9 |
| 2.6.1 Laursen (1958)'in oyulma derinliği bağıntısı..... | 9 |
| 2.6.2 Hancu (1971)'nin oyulma derinliği bağıntısı | 10 |
| 2.6.3 Breusers, Nicollet ve Shen (1977)'in oyulma derinliği bağıntısı..... | 10 |
| 2.6.4 Günyaktı (1988)'in oyulma derinliği bağıntısı..... | 10 |
| 2.6.5 Melville ve Sutherland (1958)'in oyulma derinliği bağıntısı..... | 10 |
| 2.6.6 Yanmaz (1989)'un oyulma derinliği bağıntısı | 12 |
| 2.6.7 Melville (1997)'nin oyulma derinliği bağıntısı | 12 |
| 2.6.8 Richardson ve Davis (2001)'in oyulma derinliği bağıntısı | 13 |
| 2.6.9 Oliveto ve Hager (2002)'in oyulma derinliği bağıntısı | 14 |
| 2.6.10 Sheppard, Odeh ve Glasser (2004)'in oyulma derinliği bağıntısı..... | 15 |
| 2.6.11 Kothyari, Hager ve Oliveto (2007)'nin oyulma derinliği bağıntısı..... | 16 |
| 2.6.12 Lai, Chang ve Yen (2009)'in oyulma derinliği bağıntısı | 17 |

| | |
|--|-----------|
| BÖLÜM ÜÇ – DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 19 |
| 3.1 Deney Düzenegi | 19 |
| 3.2 Deneysel Bulgular | 23 |
| | |
| BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL BULGULARIN İRDELENMESİ..... | 27 |
| | |
| BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 35 |

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Köprülerin yıkılmasında en önemli iki neden olarak taşkınlar ve köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar gösterilmektedir. Yerel oyulmaların meydana geliş sebepleri oldukça karmaşık olup konuyla ilgili birçok çalışma olmasına rağmen hala araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

TÜBİTAK 109M637 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasında köprü orta ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar, üniform taban malzemesi kullanılarak deneysel olarak incelenmiş ve ilgili literatür bağıntılarıyla deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda mevcut olan deney düzeneğinde ilgili deneyleri gerçekleştirilmiştir.

1.2 Geçmişte Yapılan Akademik Çalışmalar

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

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

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

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

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

Oliveto ve Hager (2005), 2002'deki çalışmalarına ek olarak yan ayaklar ve mahmuzlar etrafında oluşan yerel oyulmaları deneysel olarak 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), temiz su oyulmasının zamana bağlı gelişimini hesaplamak için yeni bir bağıntı önermişlerdir. Deneyler, 1 m ve 0,50 m genişliklerine sahip, 11 metre uzunluğunda iki ayrı dikdörtgen kanalda gerçekleştirilmiştir.

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

BÖLÜM İKİ

TEORİK BAKIŞ

2.1 Giriş

Oyulma kavramı genel olarak, akışkanın tabandan ya da köprü ayağı çevresinden taban malzemesi koparması ve sürüklenmesi ile ifade edilir. Köprü orta ya da yan ayağı çevresinde oluşan oyulmalara ise yerel oyulmalar denir (Richardson and Davis, 2001). Köprülerin başlıca yıkılma sebepleri arasında, köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar önemli bir yer tutar.

Köprü ayaklarında meydana gelen yerel oyulmaların dinamiğini ayak etrafında şekillenen çevrıntiler oluşturur. Yaklaşan akım ayağa varır ve bu noktada su derinliğinde artış oluşur. Artan derinlikle birlikte yüzeyde yüksek basınç oluşurken tabanda düşük basınç mevcuttur ve bu basınç farkından dolayı yüzeyden tabana bir akım oluşur. Bu düşey akıma yaklaşan akımın etkimesi ile ayağın memba yüzünde, adını yol açtığı oyulma çukurunun şeklinden alan at nalı çevrıntisi oluşur. At nalı çevrıntıleri ile memba yüzünden koparılan malzeme, mansabın birkaç ayak çapı kadar ötesine sürüklenir. Ayağın mansap tarafında ise kayma gerilmesi değişiminden dolayı kuyruk çevrıntıleri oluşur. Kuyruk çevrıntilerin yol açtığı oyulma çukuru daha uzun olsa da, at nalı çevrıntilerinin daha şiddetli olmasından ve mansaba malzeme sürüklenmesinden dolayı memba yüzünde meydana gelen oyulma çukuru daha derindir. (Yanmaz, 2002)

Yerel oyulmalar, temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması olarak iki ana başlık altında incelenir. Yaklaşan akımın taban malzemesini sürükleyebilmesi için yaklaşan akım hızının bir eşik değerine ulaşmış olması gerekir ve bu eşik değeri kritik hız olarak adlandırılır. Akışkanın sahip olduğu hızın kritik hızdan yüksek olduğu durumlarda taban malzemesinin kayma gerilmesi aşılır ve akarsu tabanında malzeme sürüklenmesi başlar. Bu tür yerel oyulmaya hareketli taban oyulması adı verilir. Yaklaşan akım hızının kritik hızı aşmadığı durumlarda ise akarsu tabanında malzeme sürüklenmesi gerçekleşmez ve sadece ayak etrafında oluşan çevrıntilerden

dolayı bu bölgede oyulma başlayabilir. Bu tür yerel oyulmalara ise temiz su oyulması adı verilir.

Bu tez kapsamında dairesel en kesitli köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmaları, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

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 : yaklaşan akım derinliği (L)

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

θ : akım ve ayak eksenini arasındaki açı

u_* : kayma hızı (LT^{-1})

iii) Akarsu parametreleri

S_0 : taban eğimi

B : akarsu genişliği (L)

C_c : daralma katsayısı

K_θ : yaklaşan 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

b : ayak genişliği (L)

K_s : ayak şekli faktörü

K_g : ayak grup etki faktörü

K_r : ayak yüzeyi pürüzlülük faktörü

K_v : ayak yüzeyiyle düşey açı arasındaki etkisi

vi) Zaman parametresi

t : akım süresi (T)

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

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

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

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

Burada;

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

yoğunluk, u_* kayma hızıdır. Yerel oyulmalar için oluşturulabilecek en genel fonksiyon, tüm etkenler göz önüne alındığında yukarıda belirtilen parametrelerle 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 =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 aşağıdaki hale indirgenebilir:

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

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 yaklaşan 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.

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

Bazı araştırmacılar (Oliveto ve Hager, 2002; Kothiyari, Hager ve Oliveto, 2007) boyut analizi sonucu boyutsuz yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısını (Densimetric particle Froude Number) ($F_d = V_0 / (g' d_{50})^{1/2}$) elde ederek bu boyutsuz parametrenin de olaya olan etkisini araştırmışlardır.

2.3 Yaklaşan Akım Derinliği ve Ayak Geometrisinin Etkisi

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

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

2.4 Yaklaşan Akım Hızının Etkisi

Yaklaşan 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 yaklaşan akımın tüm gücü, köprü ayağı etrafındaki oyulma gelişimine harcanır. $V/V_c > 1$ olduğu durumlarda ise tabanda malzeme sürüklenmesi gerçekleşir ve köprü ayağı etrafında oyulma meydana gelirken akım gücünün bir kısmı da malzeme sürüklenmesi için harcanır. Laboratuvar çalışmaları göstermiştir ki temiz su koşullarına ayak etrafındaki oyulma, yaklaşan akım hızı orantılı olarak gelişmektedir. Fakat $V/V_c > 1$ durumunda akım gücünün bir kısmı malzeme sürüklenmesine harcanacağından ve sürüklenen taban malzemesinin bir kısmı oyulma çukuruna taşınacağından hareketli taban koşullarında temiz su koşullarına göre köprü ayağı etrafında daha az oyulma gerçekleşecektir (Yanmaz, 2002).

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

2.5 Taban Malzemesi Özelliklerinin Etkisi

Tabanda kullanılan malzeme özellikleri, malzemenin çapı, üniform olup olmaması, kohezyonlu olup olmama durumu gibi alt başlıklar altında genellenebilir. Malzeme medyan çapının oyulma gelişimine olan etkisi hakkında değerlendirme yapabilmek için köprü ayağı genişliğine olan oranını bilmek gerekir ve bu orana göreceli tane çapı denir. Yapılan deneyler sonucu, göreceli tane çapı (b/d_{50}) arttıkça oyulma derinliğinin de arttığı ve bir noktadan sonra tane çapının oyulma derinliğine etki etmediği gözlenmiştir. Ettema (1980) bu noktadaki değeri $b/d_{50} = 50$, Melville (1997), $b/d_{50} = 25$ olarak önermişlerdir.

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.

2.6 Literatürdeki Mevcut Bağlılar

Literatürde yerel oyulmalarla ilgili mevcut bir çok bağıntı verilmiş olmasına rağmen sadece tez konusuyla ilgili bağıntılar aşağıda verilmektedir.

2.6.1 Laursen (1958)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Laursen (1958), dairesel tipte köprü ayağı için temiz su oyulmasının nihai derinliğini veren bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{b} = 1,11 \left(\frac{y}{b} \right)^{0,5} \quad (2.5)$$

Burada;

d_s : Nihai oyulma derinliği,

b : Köprü orta ayağı çapı,

y : Yaklaşan akım derinliğidir.

2.6.2 Hancu (1971)'nin Oyulma Derinliği Bağıntısı

Hancu (1971), dairesel tipte köprü ayağı için temiz su oyulmasının nihai derinliğini veren bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{b} = 2,42 \left(\frac{y}{b} \right)^{1/3} Fr^{2/3} \quad (2.6)$$

Burada, Fr : Froude sayısı'dır.

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

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

$$\frac{d_s}{b} = 2 \tanh \left(\frac{y}{b} \right) \quad (2.7)$$

2.6.4 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.

$$\frac{d_s}{b} = 1,183 \left(\frac{y}{b} \right)^{0,471} \quad (2.8)$$

2.6.5 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.

$$\frac{d_s}{b} = K_I K_y K_d K_\sigma K_s K_\theta \quad (2.9)$$

K_I akım şiddeti faktörü, üniform malzemeler için $K_I = 2,4(V/V_c)$ olarak ifade edilmiştir. Burada V yaklaşan akım hızı, V_c ise kritik hızdır. Melville ve Sutherland (1988), kritik hızın (V_c) aşağıda verilen denklem ile hesaplanmasını önermişlerdir.

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5,75 \log \left(5,53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (2.10)$$

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 Shields diyagramını aşağıdaki denklem takımına dönüştürmüştür:

$$u_{*c} = 0,0115 + 0,0125d_{50}^{1,4}; \quad 0,1 \text{ mm} < d_{50} < 1 \text{ mm} \quad (2.11 \text{ a})$$

$$u_{*c} = 0,0305d_{50}^{0,5} - 0,0065d_{50}^{-1}; \quad 1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ mm} \quad (2.11 \text{ b})$$

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

$$K_y = 1; \quad y/b > 2,6 \quad (2.12 \text{ a})$$

$$K_y = 0,78(y/b)^{0,255}; \quad y/b < 2,6 \quad (2.12 \text{ b})$$

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

$$K_d = 1; \quad b/d_{50} > 25 \quad (2.13 \text{ a})$$

$$K_d = 0,57 \log(2,24b/d_{50}); \quad b/d_{50} < 25 \quad (2.13 \text{ b})$$

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 yaklaşan akımıyla köprü eksenindeki açının etki faktörü, yaklaşan akım ile ayak ana ekseninde kalan açıya (θ) göre hesaplanır. Dairesel ayaklar için bu değer $K_\theta = 1$ alınabilir.

2.6.6 Yanmaz (1989)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

Yanmaz (1989), dairesel tipte köprü ayakları için temiz su oyulmasının nihai derinliğini veren bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{b} = 0,85 \left(\frac{y}{b} \right)^{0,686} \quad (2.14)$$

2.6.7 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 yaklaşan akım derinliğine (y/b) bağlı olarak tanımlanmıştır. Orta ayak için bu katsayı, K_{yb} indisi ile gösterilir.

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

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

$$K_{yb} = 4,5y; \quad b/y > 5 \quad (2.16 c)$$

K_I akım şiddeti faktörü, üniform malzemeler için $K_I = V/V_c$ olarak ifade edilmiştir. V_c kritik hızını hesaplamak için gereken yöntem, Melville ve Sutherland (1988)'de verilmiştir.

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

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

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

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

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

| l/b | 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.

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

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

$$\frac{d_s}{b} = 2 K_s K_\theta K_b K_z \left(\frac{y}{b} \right)^{0,35} Fr^{0,43} \quad (2.18)$$

Burada;

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 yaklaşan akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü, $K_\theta = (\cos\theta + l/b \sin\theta)^{0,65}$ ile hesaplanabilir.

K_b taban şekil faktörü, temiz su oyulması için 1,1 verilmiştir.

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

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

2.6.9 Oliveto ve Hager (2002)'in Oyulma Derinliği Bağıntısı

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

$$Z = d_s / z_R = 0,068 N \sigma^{-1/2} F_d^{1,5} \log(T) \quad (2.19)$$

Burada;

Z : Boyutsuz oyulma derinliği

d_s : 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 $(y b^2)^{1/3}$

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

2.6.10 Sheppard, Odeh ve Glasser (2004)'ün Oyulma Derinliği Bağıntısı:

Sheppard, Odeh ve Glasser (2004), dairesel ve kare kesitli ayaklar için denge oyulma derinliğinin (d_s) efektif ayak çapına (b^*) oranını veren 3 değişkenli, boyutsuz bir bağıntı tanımlamıştır.

$$\frac{d_s}{b^*} = 2,5 f_1 \left(\frac{y}{b^*} \right) f_2 \left(\frac{V}{V_c} \right) f_3 \left(\frac{b^*}{d_{50}} \right) \quad (2.20)$$

$b^* \equiv K_s w$ şeklinde hesaplanabilir. w değeri ayak çapı (b) olup, dairesel ayak için $K_s = 1$, kare uçlu ayak için $K_s = 1,23$ alınabilir.

$$f_1 \left(\frac{y}{b^*} \right) = \tanh \left[\left(\frac{y}{b^*} \right)^{0,4} \right] \quad (2.21)$$

$$f_2 \left(\frac{V}{V_c} \right) = 1 - 1,75 \left[\ln \left(\frac{V}{V_c} \right) \right]^2 \quad (2.22)$$

$$f_3 \left(\frac{b^*}{d_{50}} \right) = \left(\frac{b^* / d_{50}}{0,4(b^* / d_{50})^{1,2} + 10,6(b^* / d_{50})^{-0,13}} \right) \quad (2.23)$$

V_c kritik hızını hesaplariken Melville (1997)'in önerdiği kritik hız bağıntısı dikkate alınmıştır.

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

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

$$Z = d_s / z_R = 0,272 \sigma^{-1/2} (F_d - F_{d\beta})^{2/3} \log T \quad (2.24)$$

Burada;

Z : Boyutsuz oyulma derinliği

d_s : Oyulma derinliği

z_R : Referans uzunluğu $(\gamma b^2)^{1/3}$

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 $t_R = z_R / [\sigma^{1/3} (g' d_{50})^{1/2}]$

$$F_{d\beta} = \left[F_{di} - 1,26 \Sigma \Sigma_s \Sigma_{ca} \beta^{\Sigma/4} \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} \right] \sigma^{1/3} \quad (2.25)$$

$F_{d\beta}$ 'yi hesaplariken 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 $\beta = b / B$ bağıntısı ile hesaplanabilir.

F_{di} , yaklaşan 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;

$$D_* = (g' / \nu^2)^{1/3} d_{50} \quad (2.26)$$

$$F_{di} = 1,08 D_*^{1/12} \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} ; D_* \leq 10 \quad (2.27 a)$$

$$F_{di} = 2,33 D_*^{-0,25} \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} ; 10 < D_* < 150 \quad (2.27 b)$$

$$F_{di} = 1,65 \left(\frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} ; D_* \geq 150 \quad (2.27 c)$$

2.6.12 Lai, Chang ve Yen (2009)'in Oyulma Derinliği Bağantısı:

Lai, Chang ve Yen (2009), oyulma derinliğinin zamanla değişimi ve denge oyulma derinliği üzerine bir bağıntı önermiştir.

$$\frac{d_s}{b} = \alpha K \left(\frac{b}{d} \right) K \left(\frac{y}{b} \right) \left(\frac{V}{V_c} - I_{vc} \right) \quad (2.28)$$

Burada;

d_s : Oyulma derinliği

I_{vc} : Köprü orta ayağı etrafındaki oyulma başlangıcı için V/V_c 'nin eşik değeri

α : Denge durumu oluşmayan oyulma denklemi için bir katsayı.

Lai, Chang ve Yen (2009) çalışmalarında $I_{vc} = 0,4$ için α değerini 3,9 olarak önermişlerdir.

$K \left(\frac{b}{d} \right)$ ve $K \left(\frac{y}{b} \right)$ katsayılarını hesaplamak için Chiew (1995)'in önerdiği yöntem dikkate alınmıştır.

$K \left(\frac{b}{d} \right)$, sediment tane boyutunun oyulma derinliği üzerine etkisini gösteren bir düzeltme katsayısıdır ve aşağıdaki denklem takımı yardımı ile hesaplanır.

$$K\left(\frac{b}{d}\right) = 0,398 \ln\left(\frac{b}{d_{50}}\right) - 0,034 \left[\ln\left(\frac{b}{d_{50}}\right) \right]^2; \quad 1 \leq \frac{b}{d_{50}} < 50 \quad (2.29 \text{ a})$$

$$K\left(\frac{b}{d}\right) = 1; \quad \frac{b}{d_{50}} \geq 50 \quad (2.29 \text{ b})$$

$K\left(\frac{y}{b}\right)$, akım derinliğinin (y) oyulma derinliği üzerine etkisini gösteren bir düzeltme katsayısıdır ve aşağıdaki denklem takımı yardımı ile hesaplanır.

$$K\left(\frac{y}{b}\right) = 0,783 \left(\frac{y}{b}\right)^{0,322} - 0,106; \quad 0 < \frac{y}{b} < 3 \quad (2.30 \text{ a})$$

$$K\left(\frac{y}{b}\right) = 1; \quad \frac{y}{b} \geq 3 \quad (2.30 \text{ b})$$

Bu tez kapsamında farklı sabit debilerle çalışılarak temiz su oyulması incelendiğinden deneysel bulgular, zamanla değişen oyulma formülleriyle karşılaştırılırken deney süresine karşılık gelen zamandaki değerler kullanılmıştır.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

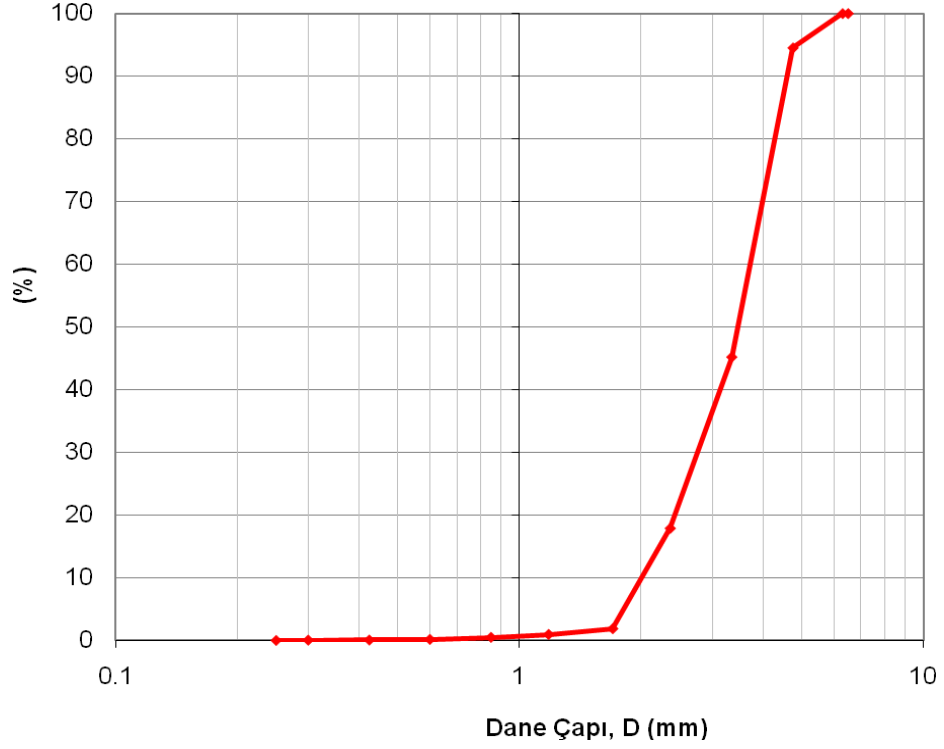
3.1 Deney Düzenegi

Deneyler, DEÜ Hidrolik Laboratuar'ında TÜBİTAK 106M274 nolu proje kapsamında inşa edilen 18,6 m uzunluğunda, 80 cm genişliğinde, 75 cm derinliğinde olan kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanalın 7. ve 13. metreleri arasında 25 cm kalınlığında üniform taban malzemesi mevcuttur. Kanalın ilk 6 metresi ve son 5 metresinde kanal tabanına öncelikle 20 cm yüksekliğinde gaz beton döşenmiş ve üzerine 5 cm kalınlığında üniform taban malzemesi serilmiştir. Şekil 3.1'de deney düzeneginin genel görünümü verilmiştir.



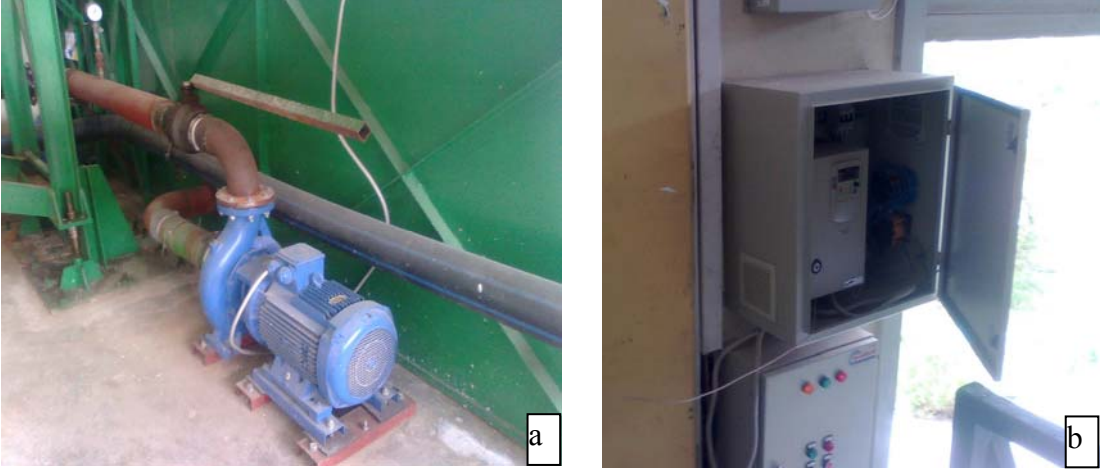
Şekil 3.1 Deney düzeneginin genel görünümü

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

Akım kanala bir hız kontrol cihazına bağlı, maksimum debisi 100 l/s olan bir pompa ile iletilmektedir. 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 27 m³ hacimli bir hazneye savaklanmakta ve devir daim ile yeniden kanala iletilmektedir.



Şekil 3.3 a) Pompa b) Hız kontrol cihazı

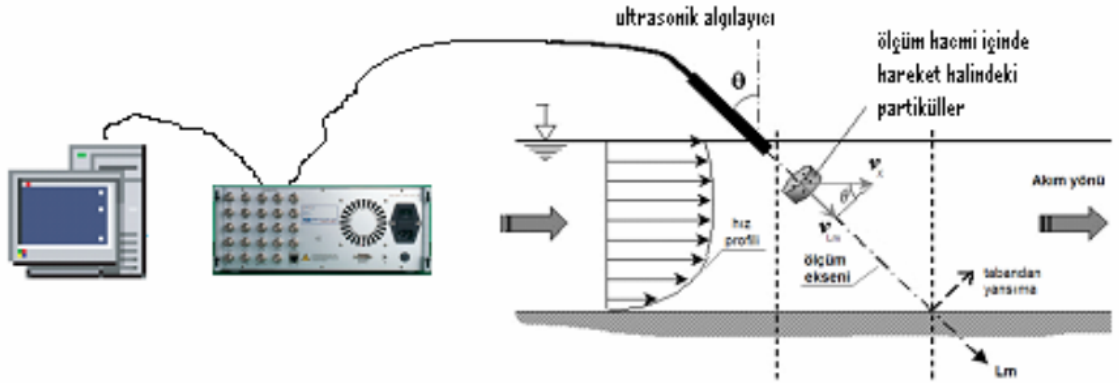
Şekil 3.4'te gösterilen OPTIFLUX 1000 elektromanyetik debimetrenin montajı besleme hattı üzerine yapılmıştır.



Şekil 3.4 Elektromanyetik debimetre

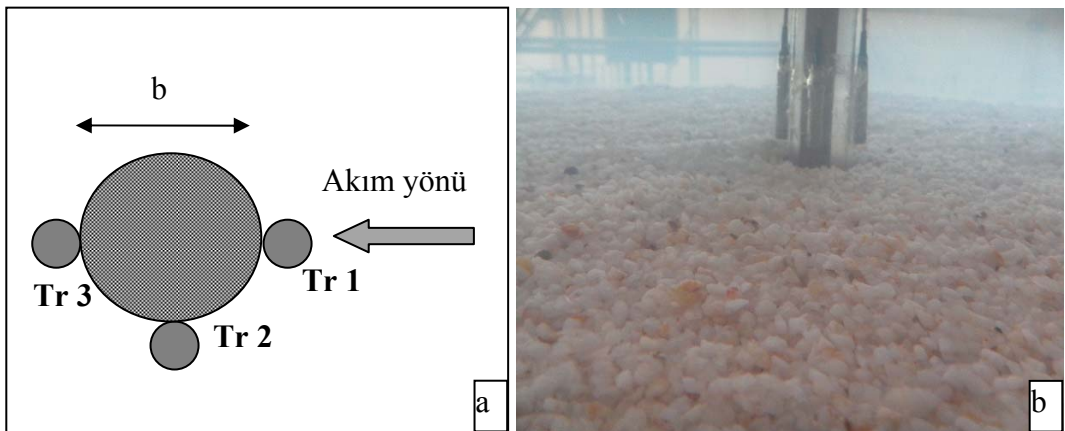
Deneyler süresince oyulma derinliği, köprü ayağı etrafına yerleştirilen ultrasonic velocity profiler (UVP) algılayıcısı ile zamana bağlı olarak ölçülmüştür. İsviçre Met-Flow firmasının ürettiği bu cihazın asıl amacı akustik yöntemle hız ölçümüdür. UVP yüksek frekanslı ses dalgalarının su içindeki parçacıklara 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

Bu çalışmada UVP algılayıcıları, Şekil 3.6 a'da gösterildiği gibi köprü ayağı etrafına yerleştirilmiştir. Her ne kadar UVP algılayıcıları bir doğrultu boyunca hız profilini çıkarmak için kullanılmaktaysa da bu çalışmada tabandan yansıyan dalgalar değerlendirilerek, taban kotundaki değişimlerin ölçülmesinde kullanılmıştır. Kanalın memba ucundan 11,5 m uzaklıktaki köprü ayağı etrafına yerleştirilen UVP'leri gösteren fotoğraf Şekil 3.6 b'de verilmektedir.



Şekil 3.6 a) ve b) Köprü ayağı ve etrafına yerleştirilen algılayıcılar

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



Şekil 3.7 ULS cihazı

Yaklaşan akım hızı, debimetre ile ölçülen debi ve ULS ile belirleyen yaklaşan akım derinlikleri yardımıyla hesaplanmıştır.

3.2 Deneysel Bulgular

Deneyler, üniform taban malzemesi ve çapları 4, 8, 15 ve 20 cm olan dairesel kesitli köprü ayakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.1'de deneyler sırasında ölçülen debi, yaklaşan akım derinliği ve köprü ayağı çap değerleri verilmektedir. 2.10 ve 2.11 bağıntılarından yararlanılarak elde edilen V_c değerleri

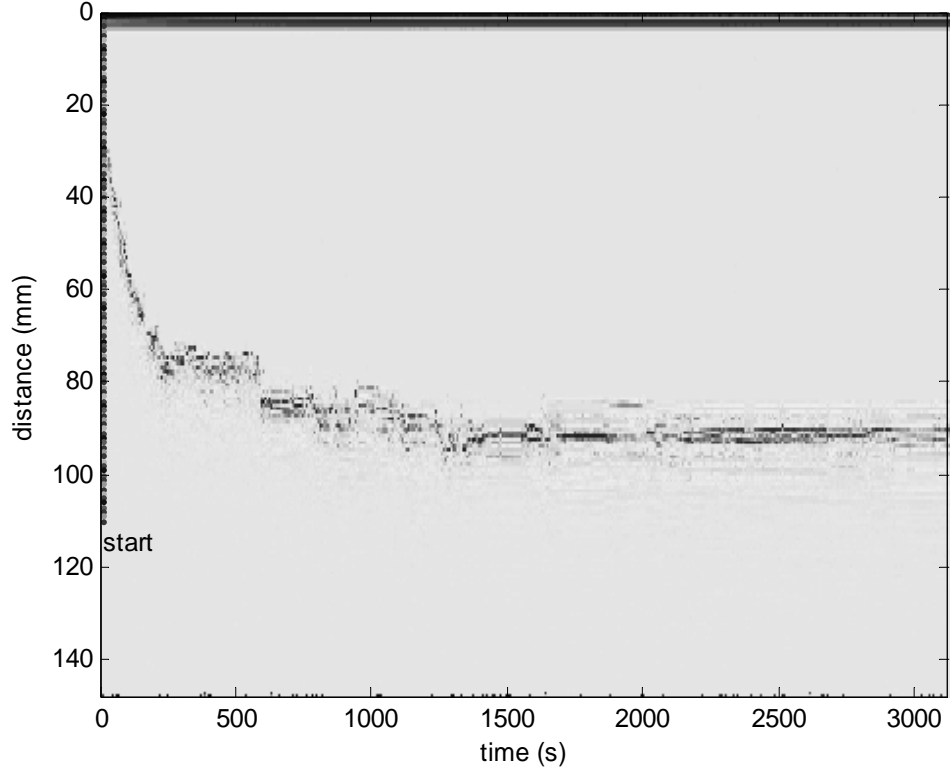
kullanılarak elde edilen akım şiddeti (V/V_c), $\frac{V}{\sqrt{gy}}$ bağıntısı kullanılarak elde edilen

Froude sayısı değerleri, ($F_d - F_{dB}$) ile ölçülen oyulma derinliği değerleri aynı tabloda verilmektedir.

Tablo 3.1 Deneyler sırasında ölçülen debi, yaklaşan akım derinliği, köprü ayağı çapları değerleri, hesaplanan akım şiddeti, Froude sayısı, F_d-F_{dB} ve ölçülen oyulma derinliği değerleri.

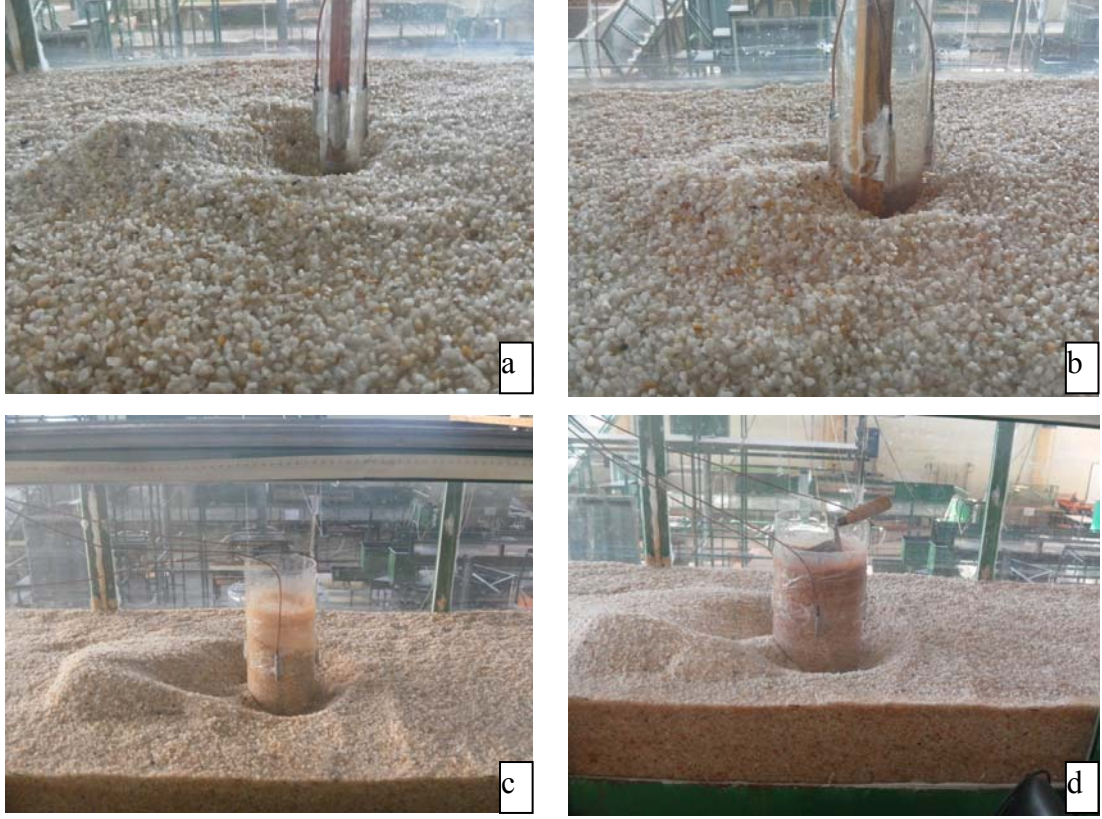
| Deney No. | b (cm) | Q (l/s) | y (cm) | V/Vc | Fr | F_d-F_{dB} | d_s (cm) |
|-----------|--------|---------|--------|------|------|--------------|------------|
| D4-1 | 4 | 52 | 13,9 | 0,63 | 0,40 | 0,080 | 2,20 |
| D4-2 | 4 | 59 | 14,4 | 0,69 | 0,43 | 0,260 | 3,40 |
| D4-3 | 4 | 66 | 15,0 | 0,73 | 0,45 | 0,410 | 3,50 |
| D4-4 | 4 | 72 | 15,8 | 0,75 | 0,46 | 0,481 | 4,60 |
| D8-1 | 8 | 52 | 13,9 | 0,63 | 0,40 | 0,301 | 2,50 |
| D8-2 | 8 | 59 | 14,6 | 0,68 | 0,42 | 0,449 | 4,00 |
| D8-3 | 8 | 66 | 15,6 | 0,70 | 0,43 | 0,536 | 4,35 |
| D8-4 | 8 | 72 | 16,3 | 0,72 | 0,44 | 0,625 | 5,70 |
| D15-1 | 15 | 51 | 15,9 | 0,53 | 0,32 | 0,232 | 5,90 |
| D15-2 | 15 | 58 | 16,3 | 0,58 | 0,35 | 0,413 | 8,60 |
| D15-3 | 15 | 61 | 14,8 | 0,69 | 0,43 | 0,727 | 10,70 |
| D15-4 | 15 | 66 | 15,3 | 0,72 | 0,44 | 0,823 | 12,00 |
| D20-1 | 20 | 51,5 | 15,8 | 0,54 | 0,33 | 0,384 | 6,00 |
| D20-2 | 20 | 57 | 17,2 | 0,54 | 0,30 | 0,399 | 8,70 |
| D20-3 | 20 | 61 | 17,5 | 0,56 | 0,33 | 0,487 | 11,45 |
| D20-4 | 20 | 67,5 | 17,6 | 0,62 | 0,36 | 0,671 | 12,95 |

Şekil 3.8’de D15-2 nolu deney sırasında UVP algılayıcısının ölçtüğü değerler örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.8 D15-2 deneyinde UVP algılayıcılarından elde edilen oyulma değerleri

D4-1, D8-1, D15-1 ve D20-1 nolu deneyler sonrasında çekilen fotoğraflar, Şekil 3.9 a, 3.9 b, 3.9 c ve 3.9 d'de verilmektedir.



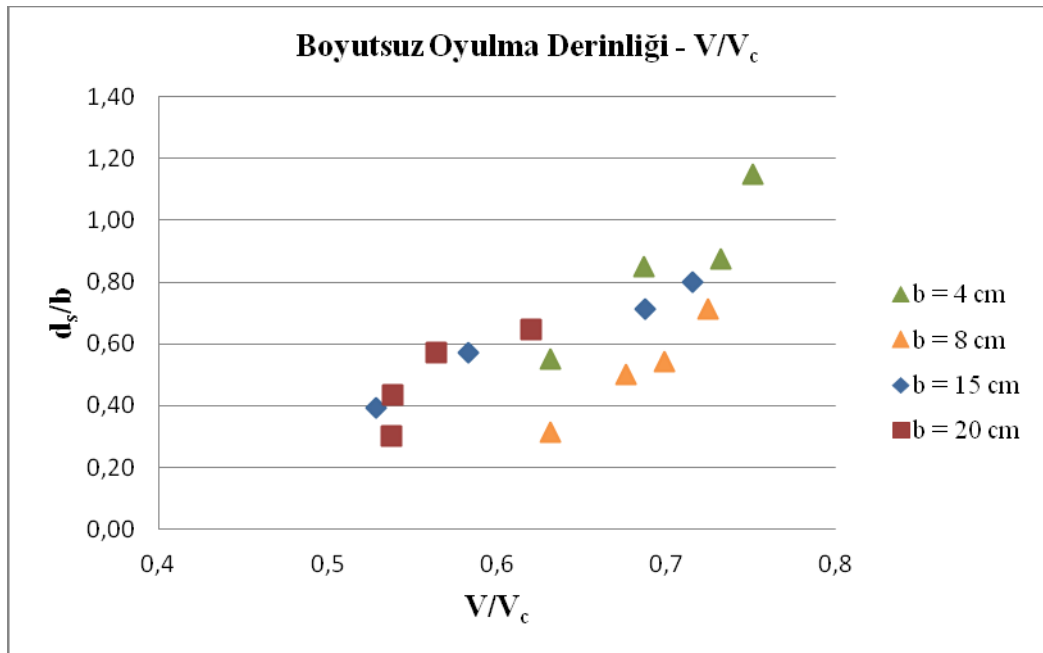
Şekil 3.9 a) b = 4 cm, b) b = 8 cm, c) 15 cm, d) 20 cm çapındaki köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmalar

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL BULGULARIN İRDELENMESİ

Deneysel bulgular, bir taraftan değişik deney şartları göz önüne alınarak kendi aralarında yorumlanmış, diğer taraftan da ölçülen değerler literatürde verilen formüller kullanılarak elde edilen sayısal değerlerle karşılaştırılmıştır.

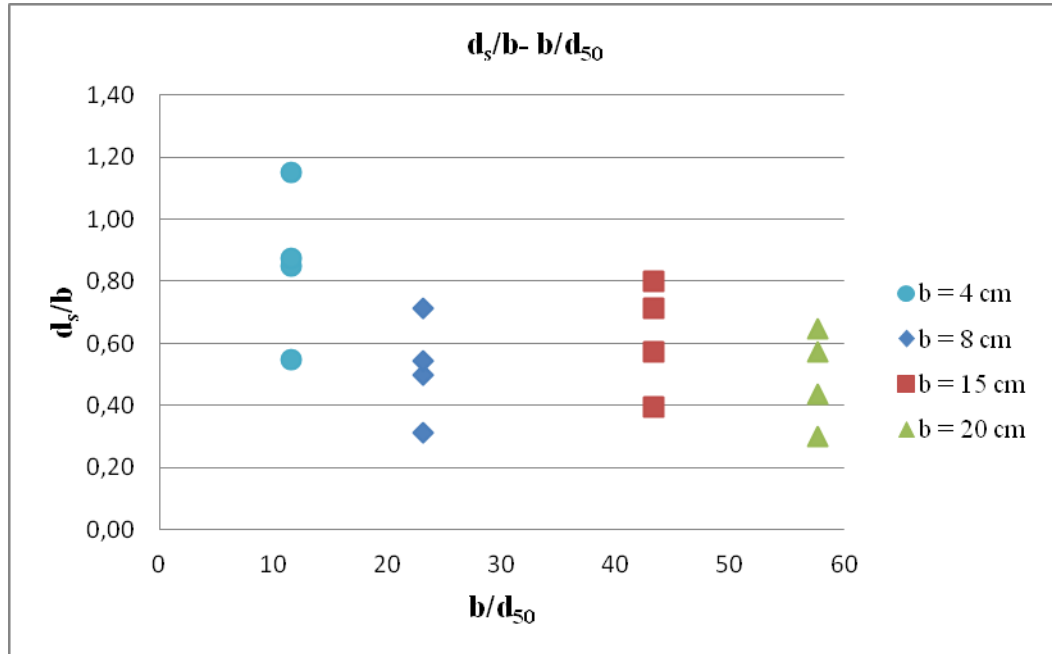
Şekil 4.1'de bu çalışmanın sonucunda elde edilen akım şiddeti ile ölçülen boyutsuz oyulma derinliğinin değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi aynı köprü ayağı çapında akım şiddeti arttıkça oyulma derinliğinin arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.1 Deneylerde elde edilen boyutsuz oyulma derinliğinin akım şiddeti ile karşılaştırılması

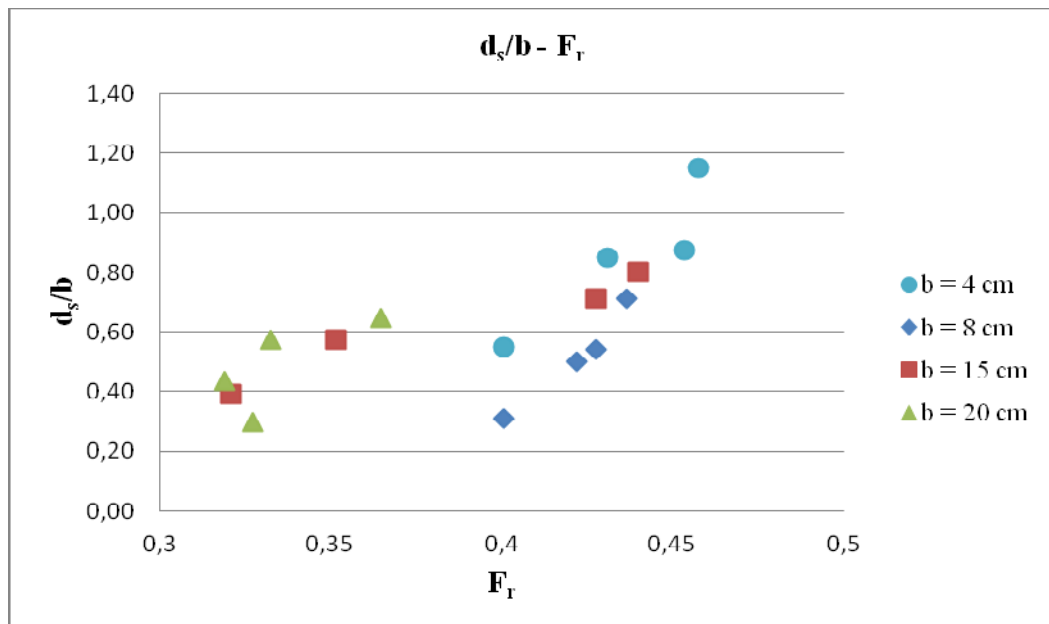
Göreceli tane boyutu (b/d_{50}) ile ölçülen boyutsuz oyulma derinliklerinin değişimi Şekil 4.2'de verilmektedir. Melville (1997), oyulma derinliğinin, b/d_{50} 'nin 25'ten büyük değerlerinde tane çapından bağımsız olduğunu söylemiştir. Bu değer Ettema (1980)'nin yaptığı çalışma sonucunda 50 olarak verilmektedir. Şekil 4.2'te görüldüğü

üzere $b/d_{50} > 25$ değerlerinde oyulma derinliğinin etkilendiği görülmektedir. Deneysel bulgularımız Melville (1997) 'in önerisiyle uymamaktadır.



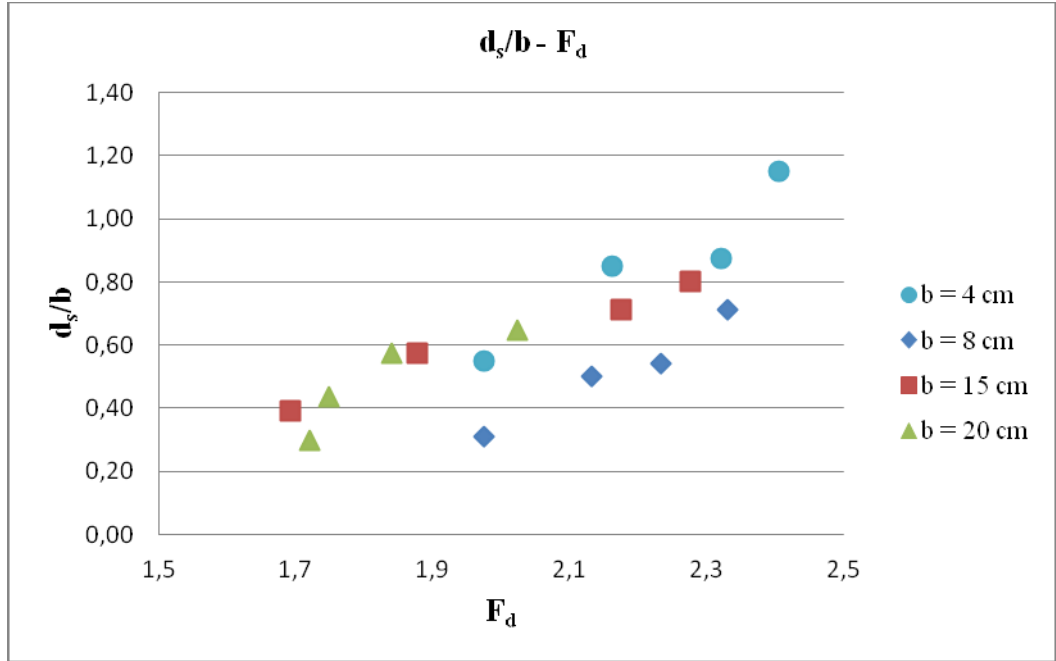
Şekil 4.2 Deneysel bulguların elde edilen boyutsuz oyulma derinliğinin göreceli tane boyutu ile karşılaştırılması

Beklenildiği gibi ve Şekil 4.3'ten de görüldüğü gibi akım Froude sayısı arttıkça oyulma derinliği de artmaktadır.



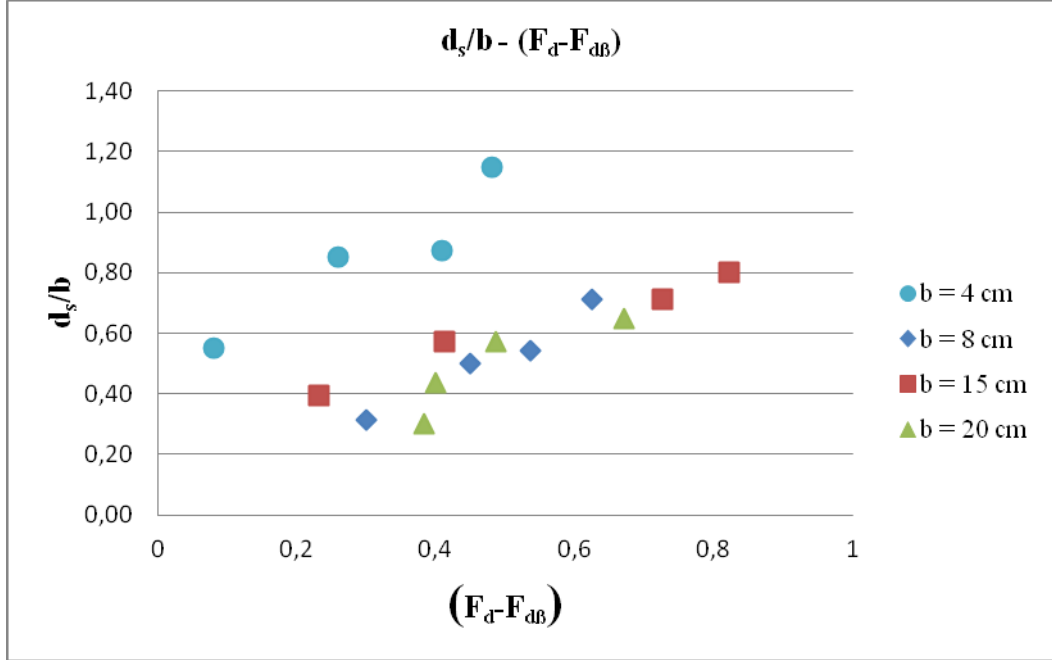
Şekil 4.3 Deneysel bulguların elde edilen boyutsuz oyulma derinliğinin Froude sayısı ile karşılaştırılması

Şekil 4.4'te yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısının (F_d) boyutsuz oyulma derinliğine olan etkisi görülmektedir. Grafikten de görüleceği gibi bu parametre arttıkça oyulma derinliği de artmaktadır. Bu eğilim tüm köprü ayak çapları için ortak bir özellik olarak karşımıza çıkmıştır.



Şekil 4.4 Deneilerde elde edilen boyutsuz oyulma derinliğinin F_d ile karşılaştırılması

Şekil 4.5'te ($F_d - F_{d\beta}$) parametresinin boyutsuz oyulma derinliğine olan etkisi görülmektedir. Burada; $F_{d\beta}$: Oyulma başlangıcı için yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısı, F_d ise yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısıdır. Grafikten de görüleceği gibi bu parametre arttıkça oyulma derinliği de artmaktadır.



Şekil 4.5 Deneylerde elde edilen boyutsuz oyulma derinliğinin $(F_d - F_{d\beta})$ ile karşılaştırılması

4 cm çaplı köprü ayağı durumunda çapı aşan, diğer çaplar durumunda ise köprü ayak çapının altında kalan derinlikler gözlenmiştir.

Tablo 4.1'de literatürde mevcut bağıntılarla hesaplanan ve deneyler sonrasında ölçülen oyulma derinlikleri, cm cinsinden verilmiştir. Bu değerler toplu olarak Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

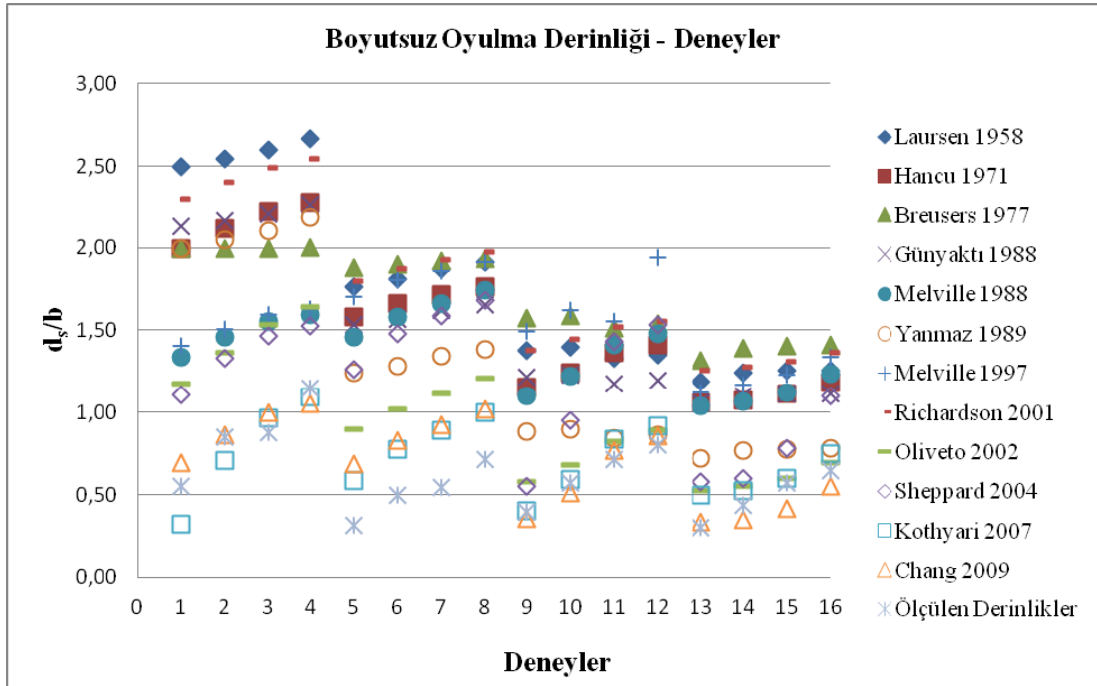
Tablo 4.1 Mevcut bağlantılarla hesaplanan ve deneyler sonrası ölçülen oyulma derinlikleri

| Denklem No Deney No | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 2.14 | 2.15 |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| D4-1 | 9,99 | 7,97 | 7,98 | 8,51 | 5,36 | 7,99 | 5,61 |
| D4-2 | 10,17 | 8,46 | 7,99 | 8,65 | 5,83 | 8,19 | 6,04 |
| D4-3 | 10,38 | 8,88 | 7,99 | 8,82 | 6,22 | 8,42 | 6,39 |
| D4-4 | 10,65 | 9,09 | 7,99 | 9,04 | 6,38 | 8,72 | 6,53 |
| D8-1 | 14,13 | 12,64 | 15,04 | 12,28 | 11,68 | 9,93 | 13,62 |
| D8-2 | 14,48 | 13,31 | 15,19 | 12,56 | 12,66 | 10,27 | 14,44 |
| D8-3 | 14,97 | 13,73 | 15,37 | 12,96 | 13,31 | 10,75 | 14,86 |
| D8-4 | 15,30 | 14,13 | 15,47 | 13,23 | 13,95 | 11,08 | 15,32 |
| D15-1 | 20,69 | 17,35 | 23,57 | 18,24 | 16,53 | 13,27 | 22,37 |
| D15-2 | 20,95 | 18,60 | 23,87 | 18,45 | 18,37 | 13,50 | 24,35 |
| D15-3 | 19,97 | 20,51 | 22,68 | 17,63 | 21,13 | 12,63 | 23,29 |
| D15-4 | 20,30 | 21,14 | 23,10 | 17,91 | 22,17 | 12,92 | 29,12 |
| D20-1 | 23,82 | 21,25 | 26,34 | 21,17 | 20,80 | 14,46 | 22,42 |
| D20-2 | 24,85 | 21,48 | 27,85 | 22,04 | 21,29 | 15,33 | 23,38 |
| D20-3 | 25,07 | 22,22 | 28,16 | 22,22 | 22,42 | 15,51 | 24,56 |
| D20-4 | 25,14 | 23,68 | 28,26 | 22,28 | 24,68 | 15,57 | 26,73 |

Tablo 4.1 Mevcut bağlantılarla hesaplanan ve deneyler sonrası ölçülen oyulma derinlikleri (devamı)

| Denklem No Deney No | 2.18 | 2.19 | 2.20 | 2.24 | 2.28 | Ölçülen d_s |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|
| D4-1 | 9,18 | 4,71 | 4,43 | 1,27 | 2,78 | 2,20 |
| D4-2 | 9,59 | 5,45 | 5,31 | 2,82 | 3,45 | 3,40 |
| D4-3 | 9,95 | 6,14 | 5,88 | 3,87 | 3,99 | 3,50 |
| D4-4 | 10,17 | 6,58 | 6,09 | 4,37 | 4,22 | 4,60 |
| D8-1 | 14,41 | 7,16 | 10,12 | 4,69 | 5,48 | 2,50 |
| D8-2 | 14,99 | 8,16 | 11,85 | 6,21 | 6,65 | 4,00 |
| D8-3 | 15,43 | 8,92 | 12,70 | 7,13 | 7,38 | 4,35 |
| D8-4 | 15,81 | 9,64 | 13,48 | 8,01 | 8,13 | 5,70 |
| D15-1 | 20,66 | 8,65 | 8,30 | 6,00 | 5,28 | 5,90 |
| D15-2 | 21,68 | 10,18 | 14,30 | 8,88 | 7,62 | 8,60 |
| D15-3 | 22,79 | 12,33 | 21,49 | 12,57 | 11,53 | 10,70 |
| D15-4 | 23,35 | 13,34 | 23,05 | 13,78 | 12,80 | 12,00 |
| D20-1 | 25,06 | 10,52 | 11,62 | 9,96 | 6,64 | 6,00 |
| D20-2 | 25,53 | 11,06 | 11,96 | 10,49 | 6,89 | 8,70 |
| D20-3 | 26,15 | 11,99 | 15,64 | 12,04 | 8,25 | 11,45 |
| D20-4 | 27,27 | 13,86 | 22,03 | 14,92 | 11,09 | 12,95 |

Şekil 4.6'da deneyler sırasında ölçülen ve literatürde verilen bağıntılarla hesaplanan oyulma derinliklerinin köprü ayağı çapına oranı görülmektedir. Lai, Chang ve Yen (2009) ve Kothiyari, Hager ve Oliveto (2007)'nin verdiği bağıntıların, bu çalışmanın sonuçları ile en iyi mertebede uyumlu oldukları görülmektedir. Lai, Chang ve Yen (2009)'in verdikleri bağıntıda, akım şiddeti (V/V_c), yaklaşan akım derinliği etkisi (y/b) ve göreceli tane çapının etkisini (b/d_{50}) dikkate almışlardır. Kothiyari, Hager ve Oliveto (2007)'nin ise yoğunluk esaslı tane Froude sayısını (F_d) ve oyulma başlangıcı için yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısını ($F_{d\beta}$) göz önüne almışlardır.



Şekil 4.6 Deneyler sırasında ölçülen ve literatürde verilen bağıntılarla hesaplanan oyulma derinlikleri

Boyutsuz oyulma derinliğinin çeşitli parametrelerle ilişkisini araştırmak üzere regresyon analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizler sonucu elde edilen bağıntılar, determinasyon katsayıları ile birlikte verilmiştir:

$d_s/b = f(V/V_c, y/b)$ ilişkisini araştırmak üzere bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{d_s}{b} = 1,603 \frac{V}{V_c}^{2,28} \frac{y}{b}^{0,015} \quad (R^2 = 0,57) \quad (4.1)$$

$d_s / b = f(V / V_c, F_d - F_{d\beta}, b / d_{50}, y / b)$ parametreleri göz önüne alındığında ise

$$\frac{d_s}{b} = 10^{-4,99} \cdot \left(\frac{V}{V_c}\right)^{3,59} \cdot (F_d - F_{d\beta})^{-0,252} \cdot \left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{3,24} \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^{3,22} \quad (R^2 = 0,76) \quad (4.2)$$

bağıntısı elde edilmiştir.

Benzer şekilde

$d_s / b = f(F_d - F_{d\beta}, b / d_{50}, y / b)$ için;

$$\frac{d_s}{b} = 10^{-2,62} \cdot (F_d - F_{d\beta})^{0,357} \cdot \left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{1,46} \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^{2,03} \quad (R^2 = 0,64) \quad (4.3)$$

$d_s / b = f(V / V_c, b / d_{50}, y / b)$ için;

$$\frac{d_s}{b} = 10^{-3,98} \cdot \left(\frac{V}{V_c}\right)^{2,34} \cdot \left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{2,52} \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^{2,71} \quad (R^2 = 0,74) \quad (4.4)$$

$d_s / b = f(V / V_c, F_d - F_{d\beta}, y / b)$ için;

$$\frac{d_s}{b} = 10^{-0,002} \cdot \left(\frac{V}{V_c}\right)^{0,96} \cdot (F_d - F_{d\beta})^{0,268} \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^{0,298} \quad (R^2 = 0,60) \quad (4.5)$$

$d_s / b = f(V / V_c, F_d - F_{d\beta}, b / d_{50})$ için;

$$\frac{d_s}{b} = 10^{0,350} \cdot \left(\frac{V}{V_c}\right)^{1,56} \cdot (F_d - F_{d\beta})^{0,173} \cdot \left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{-0,148} \quad (R^2 = 0,58) \quad (4.6)$$

Yukarıdaki bağıntılardan en yüksek determinasyon katsayısı 0,76 ile bağıntı (4.2) ile elde edilmiştir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneyle esnasında mevcut bilgilere ve önceki çalışmalara uyumlu olarak,

- a) En büyük oyulmanın köprü ayağının yan bölgelerinde oluştuğu
- b) Memba tarafında oluşan oyulmanın mansap tarafındaki oyulmadan büyük olduğu
- c) Oyulma sırasında akımın kopardığı malzemenin taşınarak mansap bölgesinde yığıldığı
- d) Akım şiddeti arttıkça oyulma derinliğinin arttığı
- e) Göreceli tane boyutu arttıkça oyulma derinliğinin azaldığı
- f) Froude sayısı ve yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısı arttıkça oyulma derinliğinin arttığı görülmüştür.
- g) Yapılan regresyon analizi sonucunda boyutsuz oyulma derinliği ile çeşitli parametreler arasında ilişkiler incelenmiş ve farklı determinasyon katsayılarına sahip bağıntılar önerilmiştir.

Bu çalışma, laboratuardaki pompa vb. diğer ölçüm aletlerinin performansı dahilinde gerçekleştirilmiştir. Daha güçlü bir pompa temin edilerek çok daha farklı akım şartlarında deneyler gerçekleştirilmesi uygun olacaktır.

Bu çalışmanın devamı olarak köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmaların kararlı ve kararsız akım koşullarında zamana bağlı değişiminin incelenmesi yerinde olacaktır.

Göreceli tane boyutunun etkisi, hem köprü ayak çapı hem de taban malzemesi değiştirilerek daha detaylı incelenebilir. Bu çalışmada b/d_{50} oranının en büyük değeri 57'dir. Ettema (1980), oyulma derinliğinin göreceli tane boyutu değerinin 50'den büyük olması durumunda tane çapından bağımsız olduğunu söylemiştir. Bu duruma karşılık gelen tek bir değere sahip olmamız nedeni ile karşılaştırma yapılamamıştır. Kanal genişliğinin limitleri doğrultusunda 50'den büyük b/d_{50} oranları oluşturularak deneyler gerçekleştirilmesi yerinde olacaktır.

Mevcut sınırlı sayıdaki verilerle yapılan regresyon analizi sonunda elde edilen bağıntının kontrol edilmesi ve hatta daha sağlıklı bir bağıntı elde edilmesi amacıyla daha çok sayıda deneyler yapılarak elde edilecek çok sayıdaki veriler ile bir regresyon analizinin gerçekleştirilmesi yerinde olacaktır.

KAYNAKLAR

- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Resources*, 15(3), 211-252.
- Chiew, Y. M. (1995). Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(9), 635-643.
- Ettema, R. E. (1980). *Scour at bridge piers. Rep. No. 236*, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- Günyaktı, A. (1988). Köprü ayakları etrafında oyulma derinliğinin grafik yöntemle tayini, *Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi, TÜBİTAK*, 12(1), 96-108.
- Hancu, S. (1971). Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts. Proc., 14th /AHR Congr., Int. Assn. for Hydr. Res. (IAHR), Paris, France, 3, 299-313.
- Kandasamy, I. K. (1989). *Abutment scour. Rep. No. 458*, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand
- Kothyari, U. C., Hager, W. H., and Oliveto, G. (2007). Generalized approach for clear-water scour at bridge foundations elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11).
- Lai, J. S., Chang, W. Y. and Yen, C. L. (2009). Maximum Local Scour Depth at Bridge Piers under Unsteady Flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135 (7)
- Laursen, E. M. (1958). Scour at bridge crossings. *Bull. No.8*, Iowa Hwy. Res. Board, Ames, Iowa.

- Melville, B. W., Sutherland A.J. (1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (10), 1210-1226
- Melville, B. W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (2), 125–136
- Oliveto, G., and Hager, W. H. (2002). Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), 811–820.
- Oliveto, G., and Hager, W. H. (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 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., 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.
- Sheppard, D. M., Odeh, M., and Glasser, T. (2004). Large scale clear-water local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (10)
- Yanmaz, A. M. (1989). *Time dependent analysis of clear water scour around bridge piers*, Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.