

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKARSU KÖPRÜLERİNİN ORTA AYAKLARINDA OLUŞAN  
OYULMALARIN NEDENLERİ VE OYULMALARI ÖNLEYİCİ UYGULAMA  
ÇALIŞMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ömer BERK**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı**

**TEMMUZ 2020**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKARSU KÖPRÜLERİNİN ORTA AYAKLARINDA OLUŞAN  
OYULMALARIN NEDENLERİ VE OYULMALARI ÖNLEYİCİ  
UYGULAMA ÇALIŞMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ömer BERK  
(501841078)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Ali UYUMAZ**

**TEMMUZ 2020**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501841078 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ömer BERK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AKARSU KÖPRÜLERİNİN ORTA AYAKLARINDA MEYDANA GELEN OYULMALARIN NEDENLERİ VE OYULMALARI ÖNLEYİCİ UYGULAMA ÇALIŞMALARI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**     **Dr. Ali UYUMAZ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**     **Prof. Dr. Necati AĞIRALIOĞLU** .....  
Antalya Bilim Üniversitesi

**Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**     **15 Mayıs 2020**

**Savunma Tarihi :**     **6 Temmuz 2020**     iii





*Eşim'e, Kızım'a ve merhum Babam'a,*



## ÖNSÖZ

Akarsu Köprülerinin Orta Ayaklarında Meydana Gelen Oyulmaların Nedenleri Ve Oyulmaları Önleyici Uygulama Çalışmaları adlı tez çalışmasında tez danışmanlığımı yürüten değerli Hocam, Sayın Dr. Ali UYUMAZ'a, sonsuz teşekkür, şükran ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam süresince Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Program Koordinatörü, Sayın Prof. Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK'a ve tez teslim süresince değerli katkıları ile yardımını esirgemeyen Araştırma Görevlisi Sayın Mehmet Melih KOŞUCU'ya sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Tez çalışmam boyunca her anında desteğini esirgemeyen Eşim'e ve Kızım'a çok teşekkür ederim.

Temmuz 2020

Ömer BERK  
(İnşaat Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                                                                         |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                                                              | vii   |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                                                                       | ix    |
| KISALTMALAR .....                                                                                                                       | xi    |
| SEMBOLLER .....                                                                                                                         | xiii  |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                                                                                    | xvii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                                                                      | xix   |
| ÖZET .....                                                                                                                              | xxiii |
| SUMMARY .....                                                                                                                           | xxv   |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                                                          | 1     |
| 1.1 Tezin Amacı .....                                                                                                                   | 2     |
| 1.2 Araştırma Yöntemi ve Problemi .....                                                                                                 | 3     |
| 1.3 Araştırma Konusuna Kavramsal Bir Yaklaşım.....                                                                                      | 3     |
| 1.4 Araştırma Konusunun Önemi .....                                                                                                     | 4     |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI .....                                                                                                             | 7     |
| 2.1 Akarsu Köprülerinde Oyulmalara Dair Yapılan Literatür Çalışmanın Kapsamı.....                                                       | 7     |
| 2.2 Literatür Çalışmasının Yöntemi .....                                                                                                | 9     |
| 2.3 Literatür Araştırması Kapsamında Akarsu Köprüleri Ayaklarında Oluşan Oyulmaların Yapılan Çalışma Kapsamında Değerlendirilmesi ..... | 9     |
| 3. KÖPRÜ ORTA AYAKLARINDAKİ OYULMALAR İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR VE OYULMAYA NEDEN OLAN ETMENLER .....                               | 11    |
| 3.1 Oyulma Kavramı .....                                                                                                                | 11    |
| 3.1.1 Akım derinliğinin etkisi, $h / D$ .....                                                                                           | 21    |
| 3.1.2 Sediment kalınlığının etkisi, $D/d_{50}$ .....                                                                                    | 25    |
| 3.1.3 Taban tortusunun geometrik düzensizliğinin etkisi, $\sigma_g$ .....                                                               | 26    |
| 3.1.4 Köprü ayak şeklinin etkisi.....                                                                                                   | 30    |
| 3.1.5 Köprü ayaklarının akım ile hizalamasının(saldırı açısı) etkisi, $\alpha$ .....                                                    | 32    |
| 3.1.6 Akım yoğunluğunun etkisi, $U / U_c$ .....                                                                                         | 36    |
| 3.1.7 Froude sayısı $Fr$ ve Reynolds sayısı $Re$ 'nin etkisi .....                                                                      | 38    |
| 3.1.8 Ayak boyutunun etkisi .....                                                                                                       | 39    |
| 3.1.9 Ayakların grup etkisi.....                                                                                                        | 39    |
| 3.1.10 Daralmanın etkisi .....                                                                                                          | 43    |
| 3.1.11 Ayakların akım doğrultusunda düşeyle eğimli olarak teşkil edilmesinin oyulma üzerindeki etkisi .....                             | 45    |
| 3.1.12 Oyulma derinliğinin zamansal değişimi .....                                                                                      | 46    |
| 3.2 Denge Oyulma Derinliğinin Tahmini .....                                                                                             | 49    |
| 3.2.1 Orta ayak oyulmalarını etkileyen faktörlerin genel değerlendirmesi.....                                                           | 55    |
| 3.3 Köprü Yapımı Aşamasında Hasar Ve Oyulmaların İncelenmesi ve Köprü Yapım Aşamasının Analizlerle Desteklenmesi.....                   | 60    |
| 4. ÇORLU KINIK KÖPRÜSÜ OYULMA HESABI .....                                                                                              | 65    |
| 4.1 Melville (1997) İle Oyulma Derinliğinin Hesabı.....                                                                                 | 68    |

|                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2 HEC-18 ile Oyulma Derinliğinin Hesabı .....                                                                                     | 69         |
| 4.3 Oyulma Derinliğinin Ayak Uç Geometrisi İle Değişiminin İrdelenmesi .....                                                        | 70         |
| 4.4 Oyulma Derinliğinin Debi İle Değişiminin İrdelenmesi .....                                                                      | 70         |
| 4.5 Oyulma Derinliğinin Atak Açısı İle Değişiminin İrdelenmesi .....                                                                | 74         |
| <b>5. ORTA AYAKLARDAKİ OYULMALARI ÖNLEYİCİ UYGULAMALAR.</b>                                                                         | <b>79</b>  |
| 5.1 Riprap Uygulamaları İle Oyulmanın Azaltılması .....                                                                             | 79         |
| 5.2 Akım Değiştirme Uygulamaları İle Oyulmanın Azaltılması .....                                                                    | 86         |
| 5.2.1 Ayaklar üzerinde yuvalar oluşturarak oyulmaların azaltılması.....                                                             | 86         |
| 5.2.2 Yaka kullanılarak ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması.....                                                            | 87         |
| 5.2.3 Öncü kazıklar kullanılarak ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması ..                                                     | 89         |
| 5.2.4 Akıntıya karşı yerleştirilen palplanşlar veya batık betonarme prizmalar ile ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması ..... | 90         |
| 5.2.5 Keson temeller ile ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması.....                                                           | 91         |
| 5.2.6 Pasif delta kanatları ile ayaklar etrafındaki yerel oyulmaların azaltılması                                                   | 92         |
| 5.2.7 Batık kanatlar ile ayaklar etrafındaki yerel oyulmaların azaltılması.....                                                     | 92         |
| 5.2.8 Ayakların önünde teşkil edilen eğimli kanatlar yerel oyulmaların azaltılması.....                                             | 93         |
| 5.3 Geotekstil Filtreli Taş Gabion ile Yerel Oyulmaların Azaltılması.....                                                           | 93         |
| 5.4 Kenetli Betonarme Bloklar(ACB) İle Yerel Oyulmaların Azaltılması .....                                                          | 94         |
| 5.5 Prefabrik Beton Zırh Birimleri İle Yerel Oyulmaların Azaltılması .....                                                          | 96         |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                                                   | <b>97</b>  |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                                               | <b>101</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                                               | <b>107</b> |

## **KISALTMALAR**

|                |                                                         |
|----------------|---------------------------------------------------------|
| <b>DSİ</b>     | : Devlet Su İşleri                                      |
| <b>EİE</b>     | : Elektrik İşleri Etüt İdaresi                          |
| <b>HEC-RAS</b> | : Hydrologic Engineering Center – River Analysis System |
| <b>CSU</b>     | : Californiya State University                          |
| <b>SDU</b>     | : San Diego University                                  |
| <b>ACB</b>     | : Articulated concrete blocks                           |
| <b>YSA</b>     | :Yapay sinir ağı                                        |
| <b>ADV</b>     | : Acoustic Doppler Velocitymeter                        |



## SEMBOLLER

|                  |                                                       |
|------------------|-------------------------------------------------------|
| $\alpha$         | : Asal gerilme doğrultusundan sapma açısı             |
| $\rho$           | : Yoğunluk                                            |
| $Q$              | : Debi                                                |
| $V$              | : Su hızı                                             |
| $A$              | : Islak alan                                          |
| $P$              | : Islak çevre                                         |
| $R$              | : Hidrolik yarıçap                                    |
| $J$              | : Akarsu yatak eğimi                                  |
| $V_s$            | : Çökelme hızı                                        |
| $D_g$            | : Dane yoğunluğu                                      |
| $g$              | : Yerçekimi ivmesi                                    |
| $\mu$            | : Suyun viskozitesi                                   |
| $\tau$           | : Suyun sürüklenme gücü                               |
| $\gamma$         | : Suyun özgül ağırlığı                                |
| $h$ veya $y$     | : Dere yatağı derinliği                               |
| $h_{cr}$         | : Kritik su yüksekliği                                |
| $h_0$ veya $y_1$ | : Memba su yüksekliği                                 |
| $\theta$         | : İçsel sürtünme açısı                                |
| $L$              | : Köprü ayak uzunluğu                                 |
| $Re_D$           | : Ayak Reynolds sayısı                                |
| $D/\delta$       | : Yatak sınır tabakası kalınlığının ayak çapına oranı |
| $a$              | : Kare kesitli köprü ayağının çapı                    |
| $A_0$            | : $t=0$ anında ilk çevrintinin kesit alanı            |
| $A_{st}$         | : $t$ anında oyulma çukurunun çapı                    |

|                            |                                                                   |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>At</b>                  | : t anında tekil çevrintinin çapı                                 |
| <b>b</b>                   | : Ayaklar arası uzaklık                                           |
| <b>Co</b>                  | : Çevrintinin şiddeti                                             |
| <b>D*</b>                  | : Üniform olmayan ayakta etkili ayak çapı                         |
| <b>D</b>                   | : Dairesel kesitli köprü ayağının çapı                            |
| <b>d<sub>50</sub></b>      | : Malzeme parçacıklarının çapı                                    |
| <b>d<sub>0</sub></b>       | : Yaklaşan akım derinliği                                         |
| <b>d<sub>s</sub></b>       | : Yerel oyulma derinliği                                          |
| <b>dse</b>                 | : Genel oyulma Derinliği                                          |
| <b>d<sub>semax</sub></b>   | : Maksimum denge oyulma derinliği                                 |
| <b>d<sub>st</sub></b>      | : Oyulma derinliği                                                |
| <b>e</b>                   | : Alt yüzey yatak malzemesinin porozitesi                         |
| <b>F</b>                   | : Froude sayısı                                                   |
| <b>F<sub>D</sub></b>       | : Sedimenti dışarı çıkaran ajitasyon kuvveti                      |
| <b>F<sub>di</sub></b>      | : Başlangıç Froude sayısı                                         |
| <b>Fr</b>                  | : Yaklaşım kesitindeki Froude sayısı                              |
| <b>Fr<sub>c</sub></b>      | : Froude Sayısının Kritik değeri                                  |
| <b>h</b>                   | : Akım derinliği                                                  |
| <b>H</b>                   | : Akıntının ters yönünde akıntı derinliği                         |
| <b>H<sub>d0</sub></b>      | : $\alpha = 0^\circ$ için oyulma derinliği                        |
| <b>H<sub>d\alpha</sub></b> | : $\alpha$ atak açısındaki oyulma derinliği                       |
| <b>H<sub>e</sub></b>       | : Üniform D çaplı ayakta yatak seviyesi üzerinde etkili yükseklik |
| <b>D<sub>r</sub></b>       | : Riprap büyüklüğü                                                |
| <b>D<sub>r50</sub></b>     | : Riprap büyüklüğü medyan çapı                                    |
| <b>K<sub>i</sub></b>       | : Ayak oyulmasını etkileyen etmen faktörleri                      |
| <b>K<sub>s</sub></b>       | : Ayak burun şekli için düzeltme faktörü                          |
| <b>K<sub>\alpha</sub></b>  | : Akımın açısı için düzeltme faktörü                              |
| <b>K<sub>b</sub></b>       | : Akarsu yatak özellikleri için düzeltme faktörü                  |

$K_z$  :Zırhlanma etkisi için düzeltme faktörü  
 $U$  :Akım hızı





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 3.1 :</b> Köprü ayak genişliğinin akım derinliğine oranının yerel oyulma üzerindeki etki fonksiyonu (Melville ve Coleman (2000)). | 23 |
| <b>Çizelge 3.2 :</b> Köprü ayaklarının şekil faktörü (Richardson ve Davis, 2001).                                                            | 31 |
| <b>Çizelge 3.3 :</b> Köprü ayaklarının şekil faktörü (Breusers ve Raudkivi, 1991).                                                           | 31 |
| <b>Çizelge 3.4 :</b> Farklı araştırmacıların ayak şekil faktörleri ( Diab, 2011).                                                            | 32 |
| <b>Çizelge 3.5 :</b> Saldırı açısına bağlı ayak düzeltme faktörü, $K_a(=K_2)$ (Richardson ve Davis, 2001).                                   | 33 |
| <b>Çizelge 3.6 :</b> Farklı yatak taban koşulları altında denge oyulma derinliğinin değişimi (Richardson ve Davis, 2001).                    | 37 |
| <b>Çizelge 3.7 :</b> Dairesel köprü ayak veya kazık gruplarında, atak açısı faktörü (Melville, 1997).                                        | 43 |
| <b>Çizelge 3.8 :</b> Orta ayaklar etrafındaki oyulma bağıntıları (Yanmaz,2002).                                                              | 52 |
| <b>Çizelge 5.1 :</b> Riprap sınıfları için malzeme dağılım değerleri (Lagasse ve ark., 2007).                                                | 80 |
| <b>Çizelge 5.2 :</b> Grout harcı karışım reçetesi ( $0.765 \text{ m}^3$ Grout harcı için) (Lagasse ve ark., 2007).                           | 85 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 : Köprü oyulmalarının şematik gösterimi (Deng ve Cai, 2009). ....                                                                                   | 4  |
| Şekil 1.2 : Köprü orta ayak oyulması sonucu göçme ile sonuçlanan Ordu Sarıgöl<br>Köprüsü fotoğrafı(Basın). ....                                               | 5  |
| Şekil 3.1 : Akarsu yatağındaki sediment hareketi (Sullivan, 2015). ....                                                                                       | 11 |
| Şekil 3.2 : Oyulmaların Sınıflanması (Melville ve Coleman,2000). ....                                                                                         | 13 |
| Şekil 3.3 : Silindirik köprü ayağında yerel oyulmalara neden olan akımlar (Sheppard<br>ve Renna, 2010). ....                                                  | 15 |
| Şekil 3.4 : Uyanık(Von Karman girdabı)girdap oluşumunun akustik doppler hız ölçer<br>ile gösterimi (Oertel ve ark.,2009). ....                                | 16 |
| Şekil 3.5 : Sabit akımda dairesel kesitli ayak etrafındaki akım rejimleri ve girdap<br>oluşumu, (Sümer ve Fredsoe, 1997). ....                                | 18 |
| Şekil 3.6 : Dairesel Köprü ayağı etrafındaki akımın Reynolds sayısı ile değişimi<br>(Mills, 1998). ....                                                       | 20 |
| Şekil 3.7 : İkili silindir ayak arasındaki mesafenin akım rejim davranışındaki etkisi<br>(Sumner, 2010). ....                                                 | 20 |
| Şekil 3.8 : İkili dairesel kesitli ayak arasındaki oyulma davranışı (Nazariha, 1996). ....                                                                    | 21 |
| Şekil 3.9 : Akım sıklığına bağlı olarak yerel oyulma derinliği değişimi (Melville ve<br>Coleman, 2000). ....                                                  | 24 |
| Şekil 3.10 : Tortu kalınlığının yerel oyulma üzerindeki etkisi (Melville ve<br>Coleman,2000). ....                                                            | 26 |
| Şekil 3.11 : Temiz su koşullarında köprü ayaklarında yerel oyulma üzerinde tortu<br>homojenliğinin etkisi (Melville ve Coleman, 2000). ....                   | 27 |
| Şekil 3.12 : Lokal oyulma derinliğinin tortu homojenlik değişimi ile değişmesi<br>(Melville ve Coleman,2000). ....                                            | 28 |
| Şekil 3.13 : Köprülerde yaygın olarak kullanılan ayak geometrik şekilleri<br>(Richardson ve Davis, 2001). ....                                                | 30 |
| Şekil 3.14 : Kama burunlu dikdörtgen ayak (Breusers ve Raudkivi, 1991). ....                                                                                  | 31 |
| Şekil 3.15 : Köprü ayaklarının, akım ile $\alpha$ açısı ile hizalamasının oyulma üzerindeki<br>etkisi (Melville ve Coleman, 2000). ....                       | 33 |
| Şekil 3.16 : Dairesel kesitli köprü ayaklarının akım ile hizalanma değişiminin<br>oyulma üzerindeki etkisi (Laursen ve Toch; 1956). ....                      | 34 |
| Şekil 3.17 : Uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli köprü ayaklarının akım ile<br>hizalanma değişiminin oyulma üzerindeki etkisi (Laursen ve Toch; 1956). .. | 35 |
| Şekil 3.18 : Akım ile hizalanma değişiminin oyulma üzerindeki etkisi ve etkin ayak<br>genişliği (Laursen ve Toch; 1956). ....                                 | 35 |
| Şekil 3.19 : Ayak genişliğinin eşdeğer çap dönüşümü (FDOT). ....                                                                                              | 36 |
| Şekil 3.20 : Akım yoğunluğu ile oyulma derinliğinin değişimi, U/Uc ( Melville ve<br>Coleman, 2000). ....                                                      | 37 |
| Şekil 3.21 : Oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi (Ettema ve ark., 2006). ....                                                                      | 39 |
| Şekil 3.22 : Ayakların akım ile hizalanması ( $\alpha=0^\circ$ ) (Lança, 2013). ....                                                                          | 40 |

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.23 :</b> $\alpha=0^\circ$ ve $a>40D$ için ayaklardaki grup etkisi (Başak ve ark., 1977). ....                                                                                                                                             | 41 |
| <b>Şekil 3.24 :</b> $\alpha=0^\circ$ ve $a<40D$ için ayaklardaki grup etkisi (Başak ve ark., 1977). ....                                                                                                                                             | 41 |
| <b>Şekil 3.25 :</b> $\alpha=90^\circ$ ve $a>7D$ için ayaklardaki grup etkisi (Başak ve ark., 1977). ....                                                                                                                                             | 42 |
| <b>Şekil 3.26 :</b> Dairesel ayak veya kazık grubunun akım ile $\alpha$ açısı ile hizalanması (Lanç, 2013). ....                                                                                                                                     | 42 |
| <b>Şekil 3.27 :</b> Daralma oyulmasının sınır faktörleri (Yanmaz, 2002). ....                                                                                                                                                                        | 44 |
| <b>Şekil 3.28 :</b> Düşey ve akım yönünde düşeyden eğimli teşkil edilen silindirik ayak etrafında gelişen akım şekli (Kırca ve ark, 2017) ....                                                                                                       | 45 |
| <b>Şekil 3.29 :</b> Düşey ve düşeyden eğimli teşkil edilen silindirik ayak etrafında gelişen oyulma ve tortu birikimi ( $a=0^\circ, b=14^\circ, c=30^\circ, d=42^\circ$ ) (Kırca ve ark, 2017) ...                                                   | 46 |
| <b>Şekil 3.30 :</b> Oyulma derinliğinin zamansal değişimi (Melville ve Chiew, 1999). ....                                                                                                                                                            | 47 |
| <b>Şekil 3.31 :</b> Deneysel modelleme ve matematik modelleme ile amprik formülasyon gelişimi (Nagata ve ark., 2005). ....                                                                                                                           | 49 |
| <b>Şekil 3.32 :</b> YSA'dan yararlanılarak denge oyulma miktarının modellemesi (Batani ve ark., 2007). ....                                                                                                                                          | 50 |
| <b>Şekil 3.33 :</b> Köprü orta ayağında meydana gelen oyulma çukuru (HEC-18). ....                                                                                                                                                                   | 55 |
| <b>Şekil 3.34 :</b> Dairesel ve kare kesitli ayak etrafında gelişen kayma gerilmesi gelişimi (Tseng ve ark., 2000). ....                                                                                                                             | 56 |
| <b>Şekil 3.35 :</b> Silindirik köprü ayağında meydana gelen oyulma çukurundaki akım şekli (Richardson ve Davis, 2001'den uyarlanmıştır). ....                                                                                                        | 57 |
| <b>Şekil 3.36 :</b> Köprü açıklığında taban oyulması (Yanmaz, 2002). ....                                                                                                                                                                            | 57 |
| <b>Şekil 3.37 :</b> Dairesel bir köprü ayağındaki hız dağılımı (Yanmaz, 2002). ....                                                                                                                                                                  | 58 |
| <b>Şekil 3.38 :</b> Köprü ayakları etrafında akımın ayrılması ve basınç gradyanı değişimi (Yanmaz, 2002). ....                                                                                                                                       | 58 |
| <b>Şekil 3.39 :</b> Hareketli su ve temiz su oyulmaları grafiği (Raudkivi, 1986). ....                                                                                                                                                               | 60 |
| <b>Şekil 3.40 :</b> Yerel oyulma derinliğinin akım hızının fonksiyonu olarak değişim grafiği (Raudkivi, 1986). ....                                                                                                                                  | 61 |
| <b>Şekil 3.41 :</b> Üniform yatak malzemeli bir silindirik köprü ayağındaki hız değişimi ile oyulmanın değişimi (Raudkivi, 1986). ....                                                                                                               | 62 |
| <b>Şekil 3.42 :</b> Oyulma derinliğinin silindirik köprü ayağındaki oluşan akım profilinin gelişimi (Raudkivi, 1986). ....                                                                                                                           | 62 |
| <b>Şekil 4.1 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü yerleşim planı. ....                                                                                                                                                                                          | 65 |
| <b>Şekil 4.2 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü akım değerleri ( $Q=404.6 \text{ m}^3/\text{sn}$ için SDU'den yararlanarak çözülmüştür). ....                                                                                                                 | 66 |
| <b>Şekil 4.3 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü plan ve kesiti. ....                                                                                                                                                                                          | 67 |
| <b>Şekil 4.4 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü dairesel burunlu orta ayak oyulmasının $Q=404.6 \text{ m}^3/\text{sn}$ için hesabı $\alpha=10^\circ$ (S.D.U. HEC-18 programından hesaplanmıştır). ..                                                          | 69 |
| <b>Şekil 4.5 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü kare köşe uçlu orta ayağın oyulmasının $Q=404.6 \text{ m}^3/\text{sn}$ için hesabı $\alpha=10^\circ$ (S.D.U. HEC-18 programından hesaplanmıştır) ....                                                         | 70 |
| <b>Şekil 4.6 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü akım değerleri ( $Q=200 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=300 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=500 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=600 \text{ m}^3/\text{sn}$ için SDU'den yararlanarak hesaplanmıştır). ....                | 71 |
| <b>Şekil 4.7 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü dairesel uçlu orta ayak oyulmasının $Q=200 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=300 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=500 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=600 \text{ m}^3/\text{sn}$ için hesabı ( $\alpha=10^\circ$ ). ....     | 72 |
| <b>Şekil 4.8 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü kare köşe burunlu orta ayak oyulmasının $Q=200 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=300 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=500 \text{ m}^3/\text{sn}$ , $Q=600 \text{ m}^3/\text{sn}$ için hesabı ( $\alpha=10^\circ$ ). .... | 73 |
| <b>Şekil 4.9 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü oyulma değerinin debi ve ayak uç geometrisi ile değişimi ( $\alpha=10^\circ$ ). ....                                                                                                                          | 74 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.10 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü dairesel burunlu orta ayak oyulmasının $Q=200$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=300$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=404,6$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=500$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=600$ m <sup>3</sup> /sn için hesabı ( $\alpha=20^\circ$ ). ....    | 75 |
| <b>Şekil 4.11 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü kare burunlu orta ayak oyulmasının $Q=200$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=300$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=404,6$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=500$ m <sup>3</sup> /sn, $Q=600$ m <sup>3</sup> /sn değeri için hesabı ( $\alpha=20^\circ$ ). .... | 76 |
| <b>Şekil 4.12 :</b> Çorlu Kınık Köprüsü oyulma değerinin debi ve ayak uç geometrisi ile değişimi ( $\alpha=20^\circ$ ). ....                                                                                                                                           | 77 |
| <b>Şekil 5.1 :</b> Köprü ayakları etrafında uygulanan kaya riprap detayı (Yanmaz, 2002). ....                                                                                                                                                                          | 82 |
| <b>Şekil 5.2 :</b> Ayaklar etrafında oluşturulan riprap ve filtre yerleşimi (Lagasse ve ark., 2007). ....                                                                                                                                                              | 82 |
| <b>Şekil 5.3 :</b> Riprap uygulamasında kenar oyulması a) Mansap ve menbadaki kenar oyulması b) Akım doğrultusunda sağ ve sol kenar oyulması ....                                                                                                                      | 84 |
| <b>Şekil 5.4 :</b> Riprap uygulamasında ayak ve riprap kaplamanın etrafında oluşan akım döngüsü (Peterson ve Sümer, 2014) ....                                                                                                                                         | 84 |
| <b>Şekil 5.5 :</b> Riprap uygulamasında çimento şerbeti uygulaması (Lagasse ve ark., 2007). ....                                                                                                                                                                       | 85 |
| <b>Şekil 5.6 :</b> Riprap uygulamasında atak açısı durumu (Kumar ve ark., 2005). ....                                                                                                                                                                                  | 86 |
| <b>Şekil 5.7 :</b> Köprü ayağında yuva teşkil edilmesi (Beg ve Beg, 2013). ....                                                                                                                                                                                        | 87 |
| <b>Şekil 5.8 :</b> Akım yönünde düzenlenmiş ikili ayağın tabanında yaka uygulaması ve oyulma farklılığı. ....                                                                                                                                                          | 88 |
| <b>Şekil 5.9 :</b> Akım ile hizalanmış ayağın tabanında iki farklı yaka uygulaması (Chen ve arkadaşları, 2018). ....                                                                                                                                                   | 88 |
| <b>Şekil 5.10 :</b> Ayak etrafında yaka uygulamalarının deneysel çalışması ve akım hızı değişiminin ADV ile modellenmesi (Chen ve arkadaşları, 2018). ....                                                                                                             | 89 |
| <b>Şekil 5.11 :</b> Öncü(kurban) kazık uygulamasının ayaklar ile konumlanması. ....                                                                                                                                                                                    | 90 |
| <b>Şekil 5.12 :</b> Dikdörtgen ve dairesel ayak önünde palplanş kazıklarının konumlanması(a), batık betonarme prizma ile oyulmaların azaltılması(b). ...                                                                                                               | 90 |
| <b>Şekil 5.13 :</b> Keson temel ayaklarının yerel oyulma üzerindeki etkisi ("Köprü Hidroliği Kılavuzu", TAC'daki şekle dayanarak). ....                                                                                                                                | 91 |
| <b>Şekil 5.14 :</b> Delta kanadı sistemin köprü ayaklarında konumlandırılması (Gangadharia ve Gupta, 1992). ....                                                                                                                                                       | 92 |
| <b>Şekil 5.15 :</b> Batık kanatların yerleşimi (Parker ve ark., 1998'den sonra). ....                                                                                                                                                                                  | 92 |
| <b>Şekil 5.16 :</b> Ayaklara konumlanmış kanatlar (Parker ve ark., 1998). ....                                                                                                                                                                                         | 93 |
| <b>Şekil 5.17 :</b> Oyulmalara karşı Gabion paspas ve uygulama şekilleri (HEC-23). ....                                                                                                                                                                                | 94 |
| <b>Şekil 5.18 :</b> Birbirlerine kilitli(a) ve kablo ile bağlanmış(b) mafsallı beton blok(ACB) örnekleri, (HEC-23). ....                                                                                                                                               | 95 |
| <b>Şekil 5.19 :</b> Köprü ayaklarında oyulmalara karşı birbirlerine kablo ile bağlanmış mafsallı beton blok (ACB) yerleşimi (HEC-23). ....                                                                                                                             | 95 |
| <b>Şekil 5.20 :</b> Prefabrik zırh birimleri (a) ,oluşturulmuş bağlantı detayı(b), köprü ayağı etrafında konumlandırılması(c)(Parker ve ark.,1998). ....                                                                                                               | 96 |



# **AKARSU KÖPRÜLERİNİN ORTA AYAKLARINDA OLUŞAN OYULMALARIN NEDENLERİ VE OYULMALARI ÖNLEYİCİ UYGULAMA ÇALIŞMALARI**

## **ÖZET**

Köprüler; özellikle mühendislik yapıları olmaları açısından önemli ayrıntılara ve tasarım kriterlerine sahip yapılardır. Bununla birlikte, ulaşımı sürekli sağlayan önemli bir görevi üstlenmektedirler. Ulaşım sürekliliğinin sağlanması, şehirleşmenin geliştiği çağımızda, son derece önemli olduğu görülmektedir. Şehirleşme ve ulaşımın öncelendiği yaşam çerçevesinde önemli bir yere sahip olan köprülerin, akarsuları geçerek işlevselliğini büyük oranda arttırdığı söylenmektedir. Akarsuları geçen köprülerin birçok fonksiyona hizmet vermesi sebebi ile tasarımı son derece önemlidir. Ancak bu kadar önem sahibi köprülerin mimarlık ve mühendislik açısından tasarım aşamasında yapısal olarak göz ardı edilen birçok etkene sahip olması, büyük hasarlara yol açabilmektedir. Tasarım, mimari ve öncelikle de mühendislik eserleri olarak anlamlandırdığımız köprülerin, yapısal anlamda inşaat öncesi birçok önlemleri ve tasarım kriterlerini barındırması gerekmektedir.

Yapılan araştırmalar ve ayrıntılı incelemeler sonucu mühendislik ve mimari tasarım aşamalarında göz ardı edilen birçok unsurun, köprülerin yapısal anlamda zarar görmelerine sebebiyet verecek sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Bu unsurlar tasarıma bağlı nedenler olabileceği gibi çoğunlukla doğal sebeplerin göz ardı edilmesinden kaynaklanmaktadır. Deprem, rüzgâr yükü, hidrolik etkenler, inşa edildiği yerel koşullar ve taşkın başlıca doğal sebepler arasında yer almaktadır. Deprem sonrası hasarlar, aşırı rüzgâr yüküne maruz kalmak ve taşkın gibi unsurların meydana getireceği hasarların kestirilememesi köprülerde geri dönülemez hasarlar yaratmaktadır.

Özellikle yüksek akımlı taşkınlara maruz kalan akarsu köprülerinin ayakları etrafında oluşan aşırı oyulmalar nedeniyle büyük hasarlar oluşmakta ve yıkımla sonuçlanmaktadır. Bu yıkımlar zaman zaman büyük can ve ekonomik kayıplara sebebiyet vermektedir. Bunların önlemlerinin alınması köprü tasarım ve inşasında ehemmiyetle önerilmektedir. Bu sebeple köprü tasarım öncesi ön araştırmaların ve

etütlerin yapılması, gerektiğinde de yeni ve etkin yöntemlere başvurulması önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalar, köprü ayaklarında meydana gelen oyulmaların birçok sebebini açıklamaktadır. Bu sebepler arasında, mühendislik hataları, doğal süreç içerisinde oluşan meteorolojik ve hidrolojik değişkenlikler, hesaba katılmayan yükler, köprü ayaklarının inşa edildiği yerel koşulların olduğu yönünde bulgulara işaret etmektedir.

Araştırma ve tasarım süreci bu sebeplere dayandırılarak detaylı bir şekilde çalışıldığında daha net ve hata ve kusurlardan olabildiğince arındırılmış sonuçlara ulaşılmaktadır. Köprülerin orta ayaklarında meydana gelen oyulmalar sonucu hasarlanması veya yıkılması, mühendislik çalışmalarının tasarım ve uygulama aşamasında birtakım önlemlerinde ele alınması gibi araştırmaların geliştirilmesine önayak olmuştur. Köprü ayaklarında oyulmalar sonucu köprünün yıkılmasını önleyici en iyi tedbir, tasarım aşamasında oluşabilecek maksimum oyulma miktarını öngörmek ve ayakların bu oyulmalardan etkilenmeyecek şekilde derinde teşkil etmektir. Ancak, gerek yerel zemin koşulları, gerekse akarsuyun akım şartları ve ekonomik sebepler ile bu uygulamalar çoğu kez yapılamamaktadır. Oyulmaları önleyici ve azaltıcı bazı mühendislik çalışmaları, köprülerin yıkılması veya hasarlanması ile sonuçlanacak oyulmaları önleyici veya geciktirici yönde bazı ekonomik olumlu sonuçlar verebilmektedir. Bu çalışmada, akarsu köprü ayaklarında meydana gelen oyulmaların nedenleri ve bunları önleyici/azaltıcı bazı mühendislik uygulamalar hakkında bilgilendirmelere yer verilmektedir.

# **THE REASONS OF THE SCOURING OF THE RIVER BRIDGES IN THE MIDDLE PIERS AND THEIR PREVENTIVE IMPLEMENTATION STUDIES**

## **SUMMARY**

Bridges; are structures that have important details and design criterias especially in terms of being engineering structures. Nevertheless, they take on an important task that ensures transportation. It is seen that ensuring continuity of transportation is extremely important in our age when urbanization is developing. It has been said that the bridges, which have an important place in the framework of life where urbanization and transportation are prioritized, greatly increase the functionality by crossing the rivers. The bridges crossing the rivers' design is very important because they serve many functions. However, the fact that bridges of such importance have many structural factors that are neglected in the design phase in terms of architecture and engineering can cause great damage. Bridges, which we designated as design, architectural and primarily engineering works, must contain many structural precautions and design criterias before construction.

As a result of the researches and detailed examinations, many factors that are ignored in the engineering and architectural design stages can yield results that will cause structural damage to the bridges. These factors may be reasons related to design or mostly due to ignoring natural reasons. Earthquake, wind load, hydraulic factors, local conditions and flood are among the main natural causes. Inability to predict damage caused by post-earthquake damages, being exposed to excessive wind loads and floods cause irreversible damage to bridges.

The most important hydraulic factors that negatively affect the safety of the bridges are the bridges built on alluvial-based rivers. Because this feature increases the carvings that can occur in the river bed. Factors related to other hydraulic factors such as these are seen as the bridges exposed to flood and flood events cause accumulation in the bridge opening of the rough material carried during this process and cause blockage and increase the scoring potential together with the speed effect.

In this study, the reasons of the undulations occurring in the middle piers of the river bridges, depending on both the severity of the flow, other characteristics of the flow and the river are given. In addition to scoring predictions and calculations, information about flow changing systems, one of the engineering studies to reduce or prevent scoring, is given.

The amount of scouring may differ depending on the characteristics of the place where the bridge piers are located because the flow and other local characteristics of each river are different. Likewise, preventive-reducing engineering application choices may differ. The engineer should calculate the amount of scouring under predictability at the design stage and aim to design the feet so as not to lose their stability as a result of this scoring. In case of topographic-geological and hydrological obstacles that will prevent this situation, it should apply the most suitable or a few of the scour reduction engineering applications shown above. The fact that some of these applications can be applied on existing bridge legs provides a great advantage for reducing the scouring.

Major damages occur and result in destruction, especially due to excessive scoring around the feet of river bridges exposed to high current floods. These destructions occasionally cause lots of life and economic losses. Taking precautions is highly recommended in bridge design and construction. For this reason, it is important to conduct preliminary research and studies before the bridge design, and to use new and effective methods when necessary. Researches explain many causes of carvings occurring in bridge legs. Among these reasons, engineering errors, meteorological and hydrological variations occurring in the natural process, loads that are not taken into account, and local conditions in which the bridge legs are built indicate that there are local conditions.

The research and design process is based on these reasons, and when studied in detail, the results are clearer and more free from errors and defects. Damage or demolition of bridges as a result of carvings occurring in the middle piers has led to the development of researches such as engineering studies to be handled in some precautions during the design and implementation phase. The best prevention the bridge from collapsing as a result of scourings on the feet is to predict the maximum

amount of carvings that may occur during the design phase and to form the feet in such a way that they will not be affected by these carvings.

However, these applications are often not performed due to local ground conditions, the rivers flow conditions and economic reasons. Some engineering studies that prevent and reduce scouring can give some economic positive results in the direction of preventing or retarding scoring which will result in the collapse or damage of the bridges. In this study, information is given about the causes of scouring on the river bridge legs and some preventing/reducing engineering applications.





## 1. GİRİŞ

Akarsu köprüleri şehirleşme ve ulaştırma açısından büyük öneme sahip ve sürekli ulaşımı sağlaması gereken en önemli mühendislik yapılarından biridir. Bu yüzden tasarım aşamasından itibaren, mühendislik kapsamı içerisinde ele alınarak ayrıntılı biçimde incelenmesi gereken önemli bir konu haline gelmiştir. Geçmişten günümüze köprülerin detaylı araştırmaya ihtiyaç duyulmasının en önemli sebeplerinden biri ise, ani köprü yıkılmalarının oluşturduğu maddi ve manevi büyük kayıpların olmasından dolayıdır. Akarsu köprüleri ve bu tip stabilite riskleri ve birçok değişken sebeplere maruz kalan ve de büyük öneme sahip yapıların tüm etkenlerinin öncesinde belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle, akımın debi ve hızlarının belirlenmesi, köprünün stabilitesinin korunması anlamında büyük öneme sahiptir.

Köprü ve akarsu köprülerinde stabilitesinin korunumunu etkileyen faktörler arasında taşıt ve yaya trafiğinin tasarım öncesinde hesaplanması gerekmektedir. Bununla birlikte rüzgâr, deprem ve taşkın gibi yıkıcı etkilere sahip faktörlerin önceden mertebelerinin belirlenmesi pek de mümkün olmamaktadır. Bu sebeple özellikle akarsu köprülerinde, mühendislik mimari tasarım aşamalarında, tasarımsal ve yapısal yaklaşımından daha çok hidrolik anlamda tasarımının belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Buna göre, köprünün hidrolik tasarımı, yapısal tasarımdan daha çok öncelendiği bir durum yaratmaktadır.

Akarsu köprülerinde ani yıkılmalara sebebiyet veren hidrolik nedenlerin arasında köprü ayakları etrafında gerçekleşen yerel oyulmalar veya köprü geçişinde ayak açıklığının gerekenden dar olması sebebiyle ortaya çıkabilecek hidrolik sıçramaların etkileri başta sayılabilir.

Akarsularda meydana gelen ani alçalma ve yükselmelerin yapıya etkisi, özellikle nehir yataklarının taban seviyesinde oluşmaktadır ve köprü yapısında hasar oluşturmakta ve yapısal tehlike yaratmaktadır(Yanmaz, 2002).

## 1.1 Tezin Amacı

ABD’de yapılan 1989 ve 2000 yılları arasında akarsu köprülerinin ani yıkılmalarının veya ciddi hasarlar görme sebepleri araştırıldığında, köprülerin taşkına maruz kalmalarının sonucu olduğu ortaya çıkmıştır. K. Wardhana ve F. Hadipriono 500’ün üzerinde köprünün yapısal sorunlarını incelemiştir. Köprü yaşları 1 ile 157 yaş aralığında ve ortalama 52,5 yaşındaki köprüler incelendiğinde aşağıda açıklanan sonuçlar ortaya konulmuştur. Taşkınların ani köprü yıkılmalarında %53 etkisinin olduğu gözlemlenilmiştir. Ağır taşıt araçlarının ve diğer yanal yüklerin köprü hasarlarına %20 etkisinin olması, yapısal olarak en büyük hasara sebep olan hidrolik faktörlerin ele alınarak incelenmesine yola açmıştır.

Taşkınların köprü ayaklarında aşırı oyulmalara ve buna bağlı olarak ağır hasarlar almalarına ve yıkılmalarına ana sebep olarak gösterilmektedir. Bununla birlikte akarsuyun hidrolik hızının, köprü tasarım aşamasında, doğru olarak belirlenememesi sebebi ile koruyucu yöntemlerin araştırılması üzerinde durulmuştur. Özellikle 1993 yılında meydana gelen sel felaketinin Amerika’daki akarsu köprülerinin %53’ünün yıkılmasında ana neden olması, konunun önemini arttırmıştır(K.Wardhana ve F. Hadipriono, 2003). Geçmişten bu yana akarsu köprülerinin stabilitesinin korunumu üzerine pek çok araştırma yapılmıştır. Hem yabancı, hem de yerel literatür, konu üzerinde yapılan araştırmaların zenginliğinden dolayı oldukça gelişme sağlandığını göstermektedir. Ancak günümüzde halen, köprü geometrisi, akarsu köprülerinde orta ayak geometrisinin önemi ve oyulmaların sebebi araştırma konusu olarak büyük öneme sahip olarak yerini korumaktadır.

Hidrolik akarsu hızının önceden kestirilememesi ve köprü yapısının karmaşık bir mekanizmaya sahip olması, yapılan araştırmaların sonucunda evrensel ortak bir dil ve yöntem geliştirilmesinde zorlanılmıştır. Bu sebeple halen tam olarak çözüme ulaştırılamamış ve konunun önemi günümüzde de yerini ve önemini korumaya devam etmektedir. Günümüzde artan ve gelişen fiziksel laboratuvar deney imkânları ve matematiksel teknolojik çözüm yöntemleri oyulma mekanizmasının değişik yönleriyle hala üzerinde çalışıldığı bir konudur(Yanmaz, 2002). Aynı zamanda, oyulmaları önleyici ve azaltıcı mühendislik çalışmaları, günümüz Su Yapıları Mühendislik dalının araştırma konusu olmaya devam etmektedir.

## **1.2 Araştırma Yöntemi ve Problemi**

Bu araştırma, akarsu köprülerinin orta ayaklarında meydana gelen oyulmaların nedenlerini ve bunları önleyici/azaltıcı mühendislik çalışmalarına yer verilmektedir. Yapılan yabancı ve yerel literatür araştırmaları göz önünde bulundurularak, hidrolik verilerin önemi göz önünde tutulmuştur. Sorunun karmaşık ve büyük olması sebebi ile literatür araştırması üstünde durularak, birçok çözüm yöntemine başvurulduğu gözlemlenmiştir. Çözüm yöntemi arasında zemin iyileştirme ve bu konuda önceden alınan pek çok önlem önemli olmuştur. Bununla birlikte, akarsu köprülerinin orta ayak geometrik şeklinin tasarlanması ve ayaklardaki oyulmaları azaltıcı koruma tabakası geliştirmeyi önermektedir. Araştırmada başlıca yöntem olarak deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş matematiksel modellemeler sonucu elde edilmiş amprik formüller ile oyulma miktarlarının öngörülmesi, yapılacak hesaplamalar ve araştırmacıların deney sınır şartları hakkında bilgilendirilme yapılması amaçlanmaktadır. Her akarsuyun gerek akım, gerek jeolojik koşullarının farklı olması, deneysel sonuçlar sonucu elde edilen amprik oyulma formülleri ile gerçek oyulma miktarları arasında farklılıklar gösterebilmektedir. Bu çalışma ile oyulmaya neden oluşturan etmenlerin, tasarlanan köprü ayaklarında oluşan oyulmalar ile koordine edilebilme ve sınır şartları üzerinde kıstas oluşturabilmesi yönünde katkı sağlaması hedeflenmektedir. Her uygulamada bu öngörülebilirlik yaklaşımında başarı sağlanamamasının, bazı mühendislik uygulamaları ile köprü yapımı aşamasında veya sonrasında oyulmalara neden olan faktörleri azaltıcı yönde yapılan uygulamalar hakkında bilgilendirilmeye çalışılmıştır.

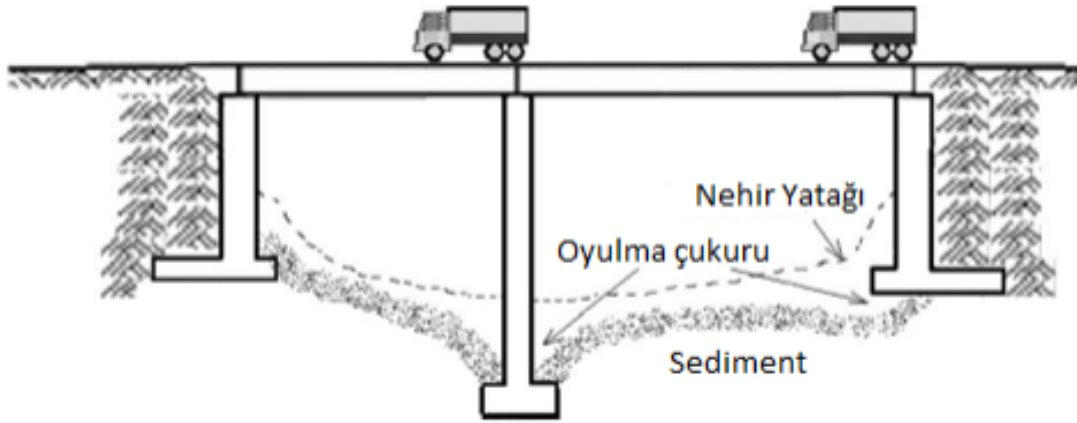
## **1.3 Araştırma Konusuna Kavramsal Bir Yaklaşım**

Geçmişten günümüze yapılan araştırmalar, akarsu köprülerinin, ani yıkılmalarındaki ana neden olarak hidrolik etkenlerin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu hidrolik sebeplerin en başında taşkınların olduğu süreçte, özellikle akarsu köprülerinin taşıyıcı ayaklarının etrafında oyulmalar meydana gelmekte ve bu oyulmalar sonunda ani yıkımlara sebebiyet vermektedir.

Feyezan anında sel suları, köprünün kenar veya orta ayakları civarındaki yatak malzemelerini sürükler ve bu bölgede oyulmalar meydana getirirler. Bu oyulmalar yüzünden köprü ayakları yapısal anlamda taşıma kabiliyetlerini kaybederler.

Stabilitesini kaybeden köprü ayakları, yük taşıyamaz hale gelmekte ve sonunda ani yıkımlara neden olmaktadır. Bu karmaşık sorunun çözümü olarak pek çok yöntem geliştirilmiştir. Deneysel, fiziksel, sayısal ve buna benzer pek çok daha örnekler literatürde görmek mümkündür. Bu soruna çözüm bulmayı amaçlayan birçok hidrolik modelleme laboratuvarları geliştirilmiştir.

1950 ve 1960'lı yıllar akarsu köprülerinde meydana gelen yıkım ve hasarlar, konunun araştırılmasının başlangıcı olarak görülmektedir. Akarsu köprülerinde orta ayak ve kenar ayaklarında oyulma sebebi ve oyulma miktarlarının hesaplanması üzerine pek çok yöntem geliştirilmiştir. (Choudhury, Jamilur ve Hasnat, Ariful, 2015). Öncelikle akarsuyun akım, jeoloji ve yatak morfolojisinin belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra ise, akarsu köprüsünün dere ile konumlanması ve bu hizmet sınıfına cevap verecek şekilde köprü ayaklarının geometrik şeklinin tasarım aşamasında belirlenmesi gerekmektedir. Sonrasında ise köprünün ayakları etrafında oluşacak oyulmalar, köprünün fiziksel ömrü boyunca oluşabilecek risklerin tahmini ve oluşabilecek oyulma etken parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir (Yanmaz, 2002). Şekil 1.1'de bir akarsu köprüsünün kenar ve orta ayaklarında meydana gelen oyulma profili şematik olarak gösterilmektedir.



**Şekil 1.1 :** Köprü oyulmalarının şematik gösterimi (Deng ve Cai, 2009).

#### **1.4 Araştırma Konusunun Önemi**

Literatürde 1950'li yıllardan bu yana araştırılan bir konudur. Buna karşın, problemin karmaşık yapısı net bir çözümün ortaya konmasına engel teşkil etmiştir. Bununla beraber köprü ayakları etrafında ortaya çıkabilecek en büyük oyulma derinliğinin hesaplanması, köprü stabilitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Yapılan bu

hesaplamalar, maddi manevi can ve mal kayıplarını engelleyeceği için ayrıca önemlidir. Köprü ayaklarındaki oyulmalarının büyük bir bölümü, taşkın gibi değişken akım koşulları altında meydana gelir. Bununla birlikte, oyulma problemi genel olarak akım karakterine, yatak malzemesi özelliklerine (boyut, şekil, alüvyal veya kohesif olma) ve köprü ayaklarının geometrisine göre değişkenlik gösterirler (Raudkivi, 1986).

Köprü ayaklarında özellikle akarsu köprüleri tabanlarında meydana gelen oyulmalar, birçok köprünün yıkılmasında en büyük etken olarak gösterilmektedir. Oyulmaya dayalı zaman içinde yıkılan köprüler büyük maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır. Köprü ayaklarında meydana gelen oyulmalar kenar ayak veya orta ayak gibi farklı konu başlıklarını barındırmaktadır. Bu sebeple ayaklarda meydana gelen oyulmalar ve oyulma derinlikleri bu farklı başlıklar altında incelenmektedir. Bu çalışmada ise, köprülerin orta ayaklarında meydana gelen oyulmaların nedenleri ile bunlara karşı alınacak mühendislik önlemleri hakkında yapılan çalışmalara yer verilmektedir. Orta ayaklarda oyulma sonucu Ordu Sarıgöl Köprüsündeki çökme Şekil 1.2’de görülmektedir.



**Şekil 1.2 :** Köprü orta ayak oyulması sonucu göçme ile sonuçlanan Ordu Sarıgöl Köprüsü fotoğrafı(Basın).

Ülkemizde de yakın zamana kadar köprülerin yıkılma sebebi olarak deprem, taşkınlar ve başka yapısal sebepler ileri sürülmüştür. Her ne kadar oyulmanın sebeplerinden birisi taşkınlar da olsa bu eksik teknik anlayış içerisinde, oyulmanın

etkisi doğrudan ihmal edilmiştir. Bu konuda yeterince yerli ve yabancı araştırma yapılmış olmasına rağmen oyulma, Ülkemizde köprü yıkımlarındaki ana sebep olarak göz ardı edilmiştir. Örnek vermek gerekirse 1998 yılında meydana gelen Zonguldak-Devrek'te ağır hasar gören köprünün, yapısal sebeplerle değil oyulma sebebiyle oluştuğu sonradan ortaya çıkmıştır (Yurtseven M.L.,2005).



## **2. LİTERATÜR TARAMASI**

Bu bölümde; akarsu köprüleri ve ayaklarındaki oyulmalara ilişkin yürütülmüş çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

### **2.1 Akarsu Köprülerinde Oyulmalara Dair Yapılan Literatür Çalışmanın Kapsamı**

Akarsu köprülerinde, taşkın esnasında bazen su yüksekliği köprüyü aşmaktadır. Bu durum köprü ayaklarının basınçlı akıma maruz kalmasına sebep olmaktadır. Köprü tabliyesinin altından geçen akımın artması, akarsu tabanındaki kayma gerilmelerini de arttırmaktadır. Buna bağlı olarak akarsu tabanında meydana gelen sediment tortu hareketi de artmaktadır. Akarsu yatak tabanında meydana gelen bu durum, basınçlı akım oyulması olarak ifade edilmektedir. Günümüze kadar literatürde, taşkın sebebiyle basınçlı akıma maruz kalan ve köprü tabliyeleri altında meydana gelen oyulmayı inceleyen çalışma sayısı oldukça azdır. Bu sebeple, tez çalışmasında var olan koşullar altında çalışmalar ve kaynaklar elde edilmiştir.

1991 Yılında Abed, basınçlı akım durumunda köprü tabliyesinin altındaki ayaklarda meydana gelen değişimleri incelemesi, bu konudaki ilk çalışmalardandır. Bu çalışmalarda, yapılan deneyler Abed tarafından analizlere dönüştürülmüştür. Yapılan deneylerde 3 yaklaşım derinliği ve farklı kanal eğimleri için gerçekleştirilmiştir. Araştırmacının yaptığı bu deneylerde, serbest akım ve köprü tabliyesinin suya tamamen gömülü olduğu basınçlı akım durumunu göz önünde bulundurmıştır. Buna göre incelemelerde, iki durumda da farklı sonuçları ortaya koymaktadır. Basınçlı akım durumunda köprü ayaklarında meydana gelen oyulma, serbest akım durumunda meydana gelen oyulma ile karşılaştırıldığında, 2.3 ile 10 kat arasında daha büyük oyulmaya sebep olmaktadır.

1998 Yılında Umbrell, akarsu köprülerinde, yatak içinde köprü ayaklarının olmadığı bir durum altında meydana gelen basınçlı akım sonucu oluşan oyulmayı incelemiştir. Umberll'in gerçekleştirdiği deneylerde, akım derinliği 0.305 m sabit hesaplanmıştır.

Suyun köprü tabliyesi üstünden 6 farklı derinlikte savaklanması durumunda akarsu tabanında oluşan oyulma çukur derinlikleri ölçülmüştür.

1998 Yılında Arneson ve Abed, farklı bir deney yöntemi geliştirerek dane çapını da analiz kriterleri arasında incelemişlerdir. Araştırmacılar, dört farklı taban dane çapı için ve farklı akım derinlikleri ile akım hızlarında, basınçlı akım durumu için deneyler yapmışlardır. Araştırmacılar deney verilerini kullanarak maksimum oyulma derinliği için bir regresyon eşitliği ile köprü açıklığında taban malzemesi için kritik sürüklenme hızını veren bir eşitlik önermişlerdir (Abed, L.M., "Local Scour Around Bridge Piers in Pressure Flow," Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1991),

2012 yılında ise Shan ve diğer araştırmacılar, deney yöntemlerini bilgisayar ortamında sayısal olarak modelleyen bir yazılım üzerinde çalışarak gerçekleştirmiştir. Shan ve diğer araştırmacılar bu deney yönteminde, önceden yapılmış deney verilerinden yararlanmışlardır. Basınçlı akım durumunda, köprü ayaklarındaki oyulmaların değerini sayısal olarak modelleyen yazılım yapmışlardır. Ayrıca, 'Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(Computational Fluid Dynamics - CFD)' yazılımının ve hesap metotlarının geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır.

M. Koçyiğit ve O. Karakurt, 4. Su Yapıları Sempozyumu için geliştirdikleri deneyde ise; debi hızı, yaklaşım derinliği ve basınçlı ve savak olma durumunda köprü ayaklarında meydana oyulmalara etkisi incelemişlerdir. M. Koçyiğit ve O. Karakurt tarafından geliştirilen deneylerde, yaklaşık olarak 10 metre uzunluğunda, genişliği ve yüksekliği birer metre olan dikdörtgen kesitli bir açık kanalda deneylerini gerçekleştirmiştir. Deneylerini, 22 kW'lık pompalar ile depodan kanala devridaim ile su verilerek sağlanmıştır. Pompalardan gelen suyun akım enerjisinin kırılması ve mümkün olduğunca düzgün akım elde edilebilmesi için yükleme havuzuna susturucular yerleştirilmiştir.

'Federal Highway of Administration'' tarafından 2012 yılında basılan ''Pier Scour in Clear-Water Conditions with Non-Uniform Bed Materials'' adlı teknik yazısında, akarsu köprülerinde meydana gelen oyulmaları farklı bir yaklaşım ile sunmaktadır. Araştırmacılara göre önceden yapılmış deneyleri tekrarlamak yerine, Laursen, Richardson ve Davis, Melville ve Chiew, Oliveto ve Hager, Sheppard ve Miller ve

Sheppard gibi araştırmacıların katkıları ve geliştirdikleri sayısal yöntemler ile oyulmanın meydana geldiği köprü ayaklarına odaklanmıştır.

## **2.2 Literatür Çalışmasının Yöntemi**

Akarsu köprüleri ayaklarında meydana gelen oyulmaların incelenmesi için geçtiğimiz yıllarda birçok çalışma ve deney yapılmıştır. Bu çalışmalar günümüzde incelendiğinde, deneysel amaçlı seçilen köprü ayaklarının genelinin dairesel kesitli olduğu gözlenmektedir. Birçok araştırmacı köprü ayaklarında oluşan oyulmaları inceleme konusu olarak ele almaktadır.

Bu tez çalışması, akarsu köprü ayaklarında meydana gelen oyulmaların ana nedenleri, ayak kesit değişimleri, konumları ve akım tiplerine göre etkilerini ve etki miktarlarını incelemektedir. Kare kesitli bir köprü ayağı ile dairesel kesitli köprü ayağında meydana gelen oyulma derinliğinin farklılıkları üzerinde durulmaktadır. Bununla birlikte ayaklar arası mesafe ve maruz kaldıkları akım tiplerine göre değişen oyulma şekillerinin literatürde yer verilmiş yorumları da içermektedir.

Çalışma kapsamında deney yapılmasının olanaksızlığı sebebi ile literatürde yer verilmiş köprü ayakları ve oyulma derinliği üzerine yapılan araştırmalar incelenerek, üretilen formüller üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Ayrıca, bu oyulmaları azaltıcı veya önleyici yönde yapılan uygulamalar bu çalışmada ele alınmıştır.

## **2.3 Literatür Araştırması Kapsamında Akarsu Köprüleri Ayaklarında Oluşan Oyulmaların Yapılan Çalışma Kapsamında Değerlendirilmesi**

Tezin 2. bölümünde yapılan literatür araştırması kapsamında, yerli ve yabancı kaynaklar göz önünde bulundurulmuş ve incelenmiştir. Buna bağlı olarak, çalışmanın 3. bölümünde yapılan literatür araştırması kapsamında, akarsu köprülerinde meydana gelen oyulmaların nedenlerine yer verilmiştir. Yapılan tez çalışmasının kapsam bakımından büyüklüğü, bu çalışmada farklı yaklaşımlara yer vermeye yönlendirmiştir.

Taşkına maruz kalan akarsu köprülerinde, ayaklarında meydana gelen oyulmaların nedenleri, 3. Bölüm de incelenmektedir. Bu bölümde ilk olarak yapılan literatür taraması ile genel oyulma kavramı incelenmektedir. Oyulma tahmini ve denklemlerle araştırmaların sonucu incelenmeye çalışılmıştır. Yapılan literatür araştırması

kapsamında, çalışmalarda kullanılan deneyler ve analizler üzerine genel bilgi verilmektedir. Taraması yapılan birçok çalışma arasından oyulmalara sebebiyet veren etmenler üzerine odaklanılmıştır. Bunlar yerli ve yabancı kaynaklar tarafından araştırılan ve bizzat yapılan deneylerin sonuçlarını içeren ve amprık bağıntılarla formüle edilen çalışmalardır. Sonrasında kendi denklemlerini geliştiren araştırmacıların deney sınır şartları altında, köprü orta ayaklarında meydana gelen oyulmaların miktarını öngören formüller üzerinde değerlendirmeler ele alınmıştır.

Bölüm 4 de ise Çorlu Kınık Köprüsü'nün oyulma hesabı 2 farklı araştırmacının geliştirdiği amprık formüller ile hesaplanmıştır. Ayrıca köprü ayak geometrik şeklinin değişmesi halinde oyulma değerleri irdelenmiştir. Ayak geometrik şekil değişimi ile debi değişiminin oyulma üzerindeki etkileri hesaplamalar yapılarak analiz edilmiştir. Atak açısının değişiminin ve debinin değişiminin oyulma miktarı üzerindeki etkisi de ayrıca bu bölümde irdelenmiştir.

Bölüm 5 de ise, oyulmalara sebep olan etmenlerin önlenmesi veya azaltılması çalışmaları ele alınmıştır. Son olarak, bu oyulmaları azaltıcı-önleyici çalışmalar ışığı altında, oyulmalar üzerine yapılan sonuç değerlendirmesi ile bu çalışma sonuçlandırılmıştır.

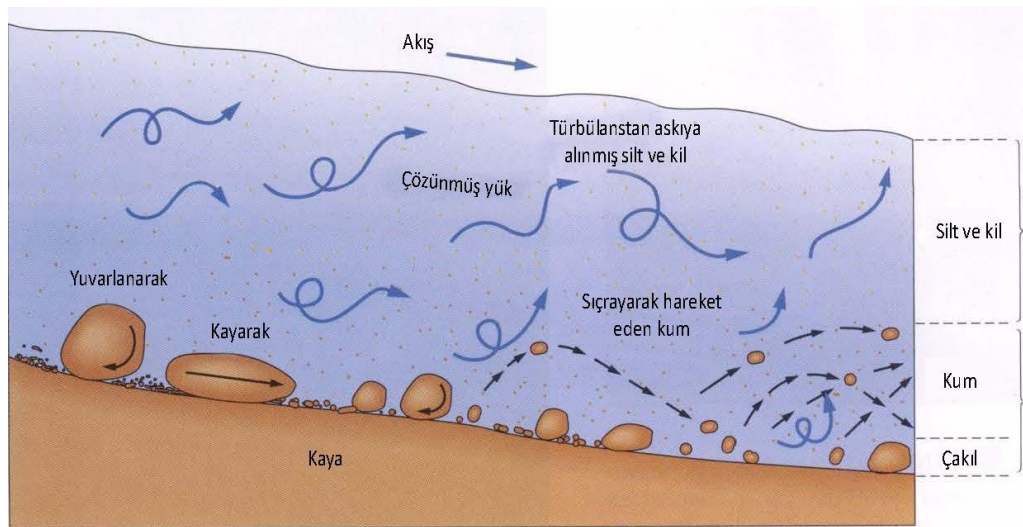
### 3. KÖPRÜ ORTA AYAKLARINDAKİ OYULMALAR İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR VE OYULMAYA NEDEN OLAN ETMENLER

#### 3.1 Oyulma Kavramı

Oyulma ve bu süreç üzerinde etkisi olan parametrelere daha yakından bakmadan önce, parçacık hareketinin temelleri kısaca açıklanmalıdır. Bir engelin (örneğin bir köprü ayağının) etrafındaki oyulmanın, tortu taşınması durumu sonucunda olması nedeniyle, sınır tabakası akımı ile ilgili tortu taşınımının temelleri ele alınmalıdır. Parçacık hareketinin temelini kendi içinde çok karmaşık bir konudur.

Parçacıkları orijinal kaynaklarından veya akarsu havzasından (örneğin bir nehir yatağından veya nehir kıyısından) taşıma ve çıkarma işlemi, erozyon olarak da bilinen su ve tortu arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Bir nehirde, su akarsu yatağında ve/veya havzasındaki malzemeyi aşındırır. Genellikle parçacık hareketi üç şekilde gerçekleşir. Bu hareket Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

- yuvarlanma ve/veya kayma
- sıçrama veya yuvarlanma
- askıya alınarak (asılı) taşınma.



Şekil 3.1 : Akarsu yatağındaki sediment hareketi (Sullivan, 2015).

Yatak malzeme yükü, sadece nehir yatağından alınan malzemelerini içermekle birlikte, asılı yük aynı zamanda yıkama yükü adı verilen toplama alanından getirilen ince parçacıkları da içerebilir. Hem yatak yükü hem de asılı yük aynı anda meydana gelebilir (Van Rijn, 1993). Oyulma kavramı, taşkın gibi belirli bir akım, basınç ve hızı olan suyun, köprü ayaklarında bulunan yatak malzemelerini aşındırıcı etkisiyle taşıması ve ayakların stabilitesine zarar vermesi ile meydana gelen problemi kapsamaktadır. Bu probleme yıllardır çözümler üretilmeye çalışılmış ve araştırılması halen devam etmektedir. Çeşitli araştırmalar sonucu akarsu köprülerinde meydana gelen oyulmaları engelleyebilecek farklı yöntemler üretilmiş ve denenmiştir. Deng ve Cai'nin 2009 da yayınladıkları tezde oyulmaları engellemeyi amaçlayan iki farklı yöntem sunmuşlardır. Bunları genel olarak zemini güçlendirme çalışmaları ve akım koşullarını değiştirme çalışmaları şeklinde iki farklı başlık altında toplayabiliriz. Zemin güçlendirme yöntemi şöyle tanımlanabilir. Akarsu yatağına oyulmaları önleme amacı ile eklenen koruma tabakası, ortaya çıkabilecek hidrolik kayma gerilmelerini önleyecek şekilde çalışır ve böylelikle akarsu tabanında zeminin aşınarak yer değiştirmesi engellenmiş olur (Deng ve Cai, 2009).

Oyulma kavramı birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösteren bir kavramdır. Bir köprü ayağındaki oyulmanın asıl başlama sebebinin çeşitli bölgelerde oluşan çevrıntiler olduğunu söyleyebiliriz. Oyulmayı tanım olarak üç farklı başlığa ayırabiliriz. Bunlar; köprü yatağında akarsu tarafından meydana gelen oyulmalar, köprü kesitinde daralmalardan ötürü meydana gelen oyulmalar ve son olarak akarsuyun akım hızına bağlı köprü ayakları ile olan etkileşimine bağlı oyulmalar olarak adlandırılabilir (Raudkivi, 1986).

Oyulma, bir hidrolik yapının etrafından malzeme taşınması olgusudur. Breusers ve ark. (1977), oyulma maddesi taşınmasının, akan suyun aşındırıcı etkisinin bir sonucu olarak tanımlamaktadır; Melville ve Coleman'a (2000) göre ise, oyulmanın bir köprü'nün temellerini ortaya çıkarma eğilimi vardır. Bu tanımda, oyulmanın başlamasından önce nehir yatağının normal seviyesinin olduğu varsayılmaktadır.

Cheremisnoff ve ark. (1987), oyulmanın normal akımlardan veya sel olaylarından kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Bir taşkın olayı sırasında, yüksek akım hızı nedeniyle oyulma oranı, normal akım koşulundan daha fazladır. Richardson ve Davis (2001), bir otoyol köprü geçişindeki toplam oyulmanın uzun süreli ağırlaşma ve

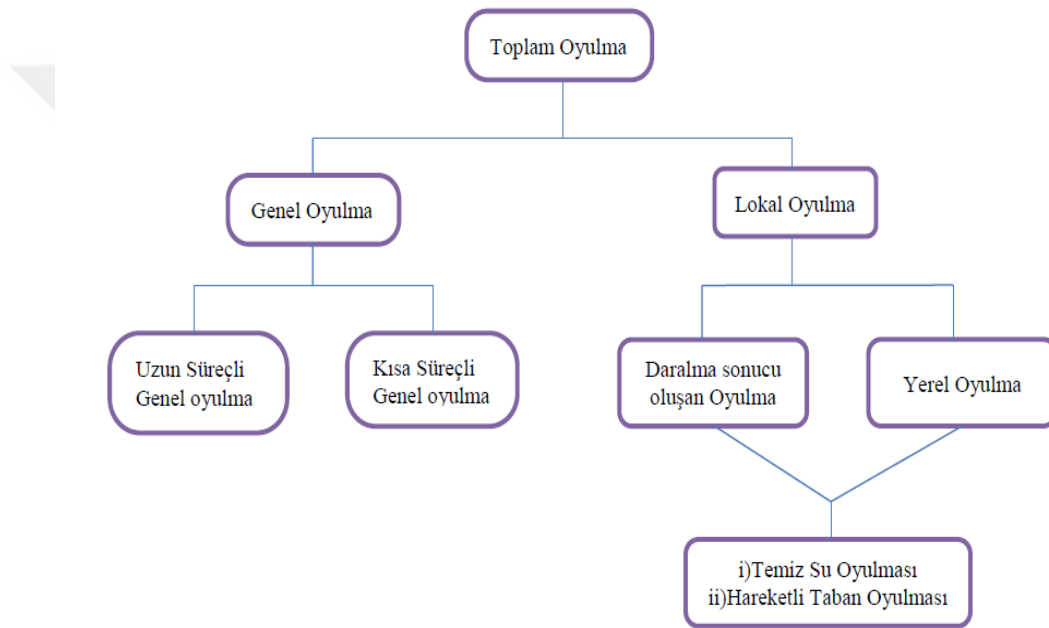
bozunma, genel oyulma ve yerel oyulma olmak üzere üç bileşenden oluştuğunu açıklamışlardır. Ayrıca, Melville ve Coleman (2000), bir köprü geçişinde meydana gelebilecek çeşitli oyulma tiplerinin şu genelleme ile tanımlanabileceğini ileri sürmüşlerdir:

a)Genel oyulma,

b)Daralma oyulması

c) Yerel oyulma.

Oyulma tiplerinin genel hali Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.2 :** Oyulmaların Sınıflanması (Melville ve Coleman,2000).

Melville ve Coleman (2000)'a göre, oyulma ile ilgili araştırmalarında, doğal veya insan kaynaklı nedenlerden dolayı nehir yatağındaki değişiklikler ele alınmaktadır.

Genel(doğal)oyulma, temel olarak nehrin genel biçiminin ve tüm havzanın karakteristikleriyle ilişkili sebeplerden oluşur. Bunlar; akarsu yatağının bozulması, akarsu kenar şevlerinin stabilitesini yitirerek göçmesi, akarsuyun yön değiştirmesi (bükülmesi) erozyon ile oluşan katı madde taşınması sonucu oluşan oyulmaları ifade eder. Bu oyulma şeklinin bir kısmının akarsuyun havzasında değişiklikler sebebi ile insanlar tarafından oluşturulduğunu da belirtmek gerekir. Genel oyulma nedeniyle, nehir kanalı boyunca yatak profili aşağıya düşer. Oyulma, akarsuyun akım

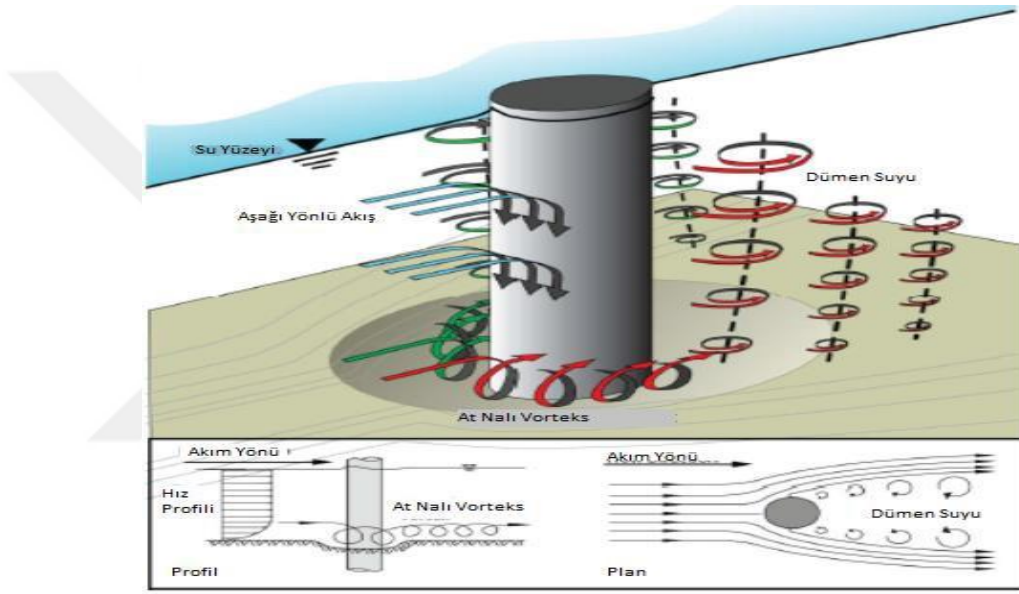
rejimindeki bir değişiklik yoluyla oluşur ve bu da akarsuyun yatak seviyesinin bozulmasına neden olur. Genel oyulma, köprünün varlığına bakılmaksızın gerçekleşir ve uzun süreli oyulma veya kısa süreli oyulma şeklinde ortaya çıkabilir. Kısa süreli oyulma, tek bir sel veya birkaç yakın aralıklı sel nedeniyle oluşur. Öte yandan, uzun süreli oyulma, oldukça geniş bir zaman ölçeğine sahiptir.

Daralma oyulması, doğal oyulma ile karşılaştırıldığında yerel ve fiziki etmenlerin sonucudur. Köprü kenar ayakları(ambuatmanlar) ve orta ayaklar arasındaki akım kısıtlamasının sonucu oluşan oyulma şeklidir. Bu kısıtlama nedeniyle, akım hızı ve kayma gerilimi artar ve yatak malzemesi akım yatağı genişliğinin tamamını veya çoğunu alır. Büzülme oyulması yatak malzemesinin akım koşullarına göre direncinin dikkate alınmasıyla tahmin edilebilir. Büzülme oyulması, hem temiz su hem de canlı yatak koşullarında ortaya çıkabilir. Kritik akım hızı  $U_{kritik}$ , yatak malzemesinin hareketsiz temiz su ve hareketli canlı yatak olması arasındaki eşiğı tanımlar. Temiz su oyulması, ortalama akım hızı olan  $U$ , kritik ortalama hız  $U_{kritik}$ 'ten daha az olduğunda ve nehir yatağında yatak malzemesi taşınması olmadığında ortaya çıkar. Buna karşılık, canlı yatak koşullarında yatak malzemesi köprü kesitinin üst tarafından taşınır ve daha sonra içine akar. Bununla birlikte, akım malzemesi köprü kesiti boyunca süspansiyon içinde taşınırsa, temiz su oyulması meydana gelebilir (Richardson ve Richardson, 2008). Kritik hızın tortu hareketi eşiğı için bir kriter olarak kullanılması birçok araştırmacı tarafından eleştirilmiştir(Dey ve Papanicolaou, 2008). Bununla birlikte, akım hızı, özellikle de akım hızının kritik akım hızına  $U / U_{kritik}$  veya Froude sayısına oranı, oyulma gelişimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve genellikle hidrolik modelleme uygulamasında ve dolayısıyla oyulma denklemlerinde de bir hayli fazla şekilde kullanılır. Kritik akım hızının belirlenmesindeki belirsizlikler, alandaki yerel oyulma derinliğinin farklı tahminlerinden de sorumlu tutulabilir.

Oyulma işlemi zamana bağlıdır ve Zanke (1978)'ye göre dört farklı aşamaya ayrılabilir ve aşamaları şu şekilde tanımlanır:

1) İlk aşama: Bu aşamada oyulma işlemi, ayaklarda  $40^{\circ}$  ila  $55^{\circ}$  'lik bir dar açı altında yanal erozyon ile başlar. Akım şekli iki ana girdap ile karakterize edilir: at nalı girdabı ve uyanık girdap.

- 2) Başlangıç aşaması: Bu aşama, ayakların önündeki ilk iki oyuğun birleşmesiyle açıklanır. En derin oyulma noktası ayakların menba tarafında, yani önündedir. Ayakların arkasında; aşınmış malzeme olan kumullar, canlı yatak koşulları veya temiz su koşulları altında hareketlenmeye başlar. Oyulma derinliği gelişimi çok hızlı şekilde gerçekleşir.
- 3) Gelişme aşaması: Ayakların önündeki maksimum derinliğe ulaşıldıktan sonra, oyulma gelişimi yavaşlar.
- 4) Denge aşaması: Burada, oyulma içindeki erozyon(oyulma) önemsizdir. Oyulma ayrıca maksimum derinliğe ve genişlemeye ulaşır.



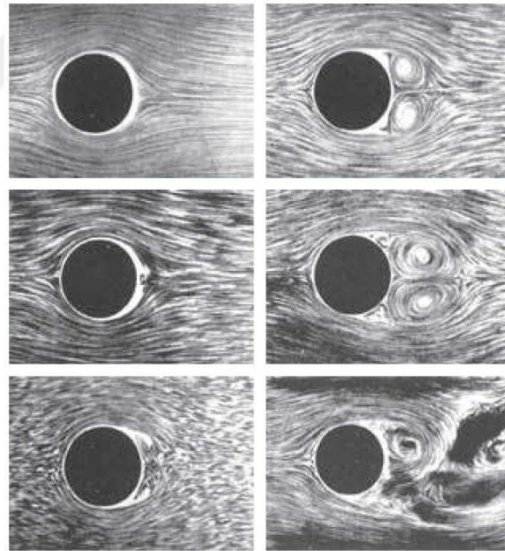
**Şekil 3.3 :** Silindirik köprü ayağında yerel oyulmalara neden olan akımlar (Sheppard ve Renna, 2010).

Lokal(yerel) oyulma, akımı engelleyen ve bölen yerel fiziksel engeller ile doğrudan bağlantılıdır. Bu tip oyulma, yapıların yerel akım koşullarını(hız ve türbülans) ve karmaşıklığını arttırması sebebi ile bu engellerin yakın çevresinde meydana gelir. Bu yapılara yakın akım koşulları ve akım ile yatak malzemesi arasındaki etkileşim çok karmaşıktır. Oyulmadan sorumlu olan yerel etmenleri bulmak için, çok fazla araştırma yapıldı ve günümüzde de fiziksel model deneyleri ile birçok araştırma yürütülmektedir. Bu nedenle, temiz su ve canlı yatak oyulması için denge oyulma derinliğini tahmin etmek ve tasarım aşamasında oyulma derinliğini karakterize etmek için çok sayıda formül mevcuttur.

Dairesel köprü ayaklarının etrafındaki akım; aşağı yönlü akım, at nalı girdabı, uyanık girdaplar ve yay dalgası olarak dört bileşene ayrılmaktadır. Şekil 3.3'de bu akım şeklinin şematik gösterimi yer almaktadır.

Melville arkadaşları (1977), köprü ayakları etrafında gelişen girdap sisteminin (at nalı çevrintisi), köprü ayakları çevresindeki oyulmanın başlıca nedeni olduğunu bildirmiştir. At nalı çevrintisi(girdap), yatağın ayakları yakınındaki suyun hızını artırır. Bu durum, akımın taban malzemesi taşıma kapasitesinde bir artışa neden olur. Girdap sistemi, tortunun askıya alınmış durumunu korur ve aynı zamanda bir çekim kuvveti oluşturur ve yatak malzemesinin, girdaplar tarafından aşağı yönde taşınmasını sağlar.

Girdaplar, akımın hidrolik yapısının arkasında oluşan bir olaydır. Sıvı akımı bir engelle bozulduğunda, engelin arkasında girdaplar oluşur ve zaman içerisinde ayrılır. Bu ayrılma nedeniyle kararsız akım oluşur. Şekil 3.4'de bu oluşumun akustik doppler hız ölçer ile elde edilmiş akım gelişimi görülmektedir.



**Şekil 3.4 :** Uyanık(Von Karman girdabı)girdap oluşumunun akustik doppler hız ölçer ile gösterimi (Oertel ve ark.,2009).

Sümer ve Fredsoe (1997)'e göre, girdap oluşması, Reynolds sayısı ( $Re$ )>40 olan köprü ayaklarının etrafında oluşan en önemli olaydır.  $Re$  arttıkça, akım rejimleri değişir. Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, ayrılma bölgesi, ayakların arkasında ve ( $D$ ) çapıyla karşılaştırılabilir olan bir mesafe boyunca uzanırken, sınır tabakası çok küçük bir kalınlık ( $\delta$ ) üzerine uzanır.

Sümer ve Fredsoe (1997) tarafından yapılan araştırmada,  $Re < 5$  için sınır tabakası ayrılmasının meydana gelmediği belirtilmektedir.  $Re$  aralığı 5 ile 40 arasında olduğunda, silindirin ardından bir çift girdap oluşur.  $Re$  değerindeki artış, girdap oluşumunun uzunluğunu da arttırır.  $Re$  değerinde daha fazla artış, düzensiz bir akım ile sonuçlanır. Sonunda başka girdaplar üretilir ve dönüşümlü olarak silindirin her iki tarafına da oluşur.  $Re$  değer aralığı 40 ile 200 arasında olduğunda, oluşan girdap dökülmesine laminar girdap dökülmesi denir.  $Re$ 'nin değer aralığının 200 ve 300 arasında olması, türbülansa geçişi meydana getirir.  $Re > 300$  için, akım tamamen çalkantılıdır. Bununla birlikte silindir üzerindeki sınır tabakası,  $Re$  değeri,  $3 \times 10^5$  'in altına kadar laminar kalır. Bu rejim, subkritik akım rejimi olarak bilinir.  $Re$ 'nin  $3,5 \times 10^5$  'den daha fazla artmasıyla, sınır tabakası silindirin sadece bir tarafında çalkantılı hale gelir ve diğer taraftaki sınır katmanı laminar kalır. Bu tür bir akım rejimine kritik akım rejimi denir.  $Re$ ;  $3,5 \times 10^5$  ile  $1,5 \times 10^6$  arasında olduğunda, bu rejime, silindirin her iki tarafında türbülanslı sınır tabakası ayrımının meydana geldiği süper kritik akım rejimi denir.  $Re$  değerinin  $1,5 \times 10^6$  'dan daha büyük olması rejimi tamamen çalkantılı hale getirir. Bu akım rejiminde, sınır tabakası kısmen laminar ve kısmen türbülanslıdır. Bu rejime,  $Re$ 'den  $4 \times 10^6$  küçük olana kadar var olan üst geçiş akımı rejimi denir. Son olarak,  $4 \times 10^6$ 'dan büyük  $Re$  değeri için rejime trans kritik rejim denir.

|    |                                                                                    |                                                                                       |                                                                  |
|----|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| a) |   | Ayrılma yok                                                                           | $Re < 5$                                                         |
| b) |   | Sabit bir çift girdap oluşumu                                                         | $5 < Re < 40$                                                    |
| c) |   | Laminer girdap oluşum döngüsü                                                         | $40 < Re < 200$                                                  |
| d) |   | Türbülansa geçiş                                                                      | $200 < Re < 300$                                                 |
| e) |   | Aktif türbülans<br>A:Laminer sınır tabakasından ayrılma                               | $300 < Re < 3 \times 10^5$<br>Subkritik döngü                    |
| f) |   | A:Laminer sınır tabakasından ayrılma<br>B:Sınır tabakasından ayrılma(Laminer durumda) | $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$<br>Kritik alt geçiş       |
| g) |   | Sınır tabakasından ayrılma,kısmen türbülans,kısmen laminar akım mevcut.               | $3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$<br>Süperkritik döngü    |
| h) |   | C:Sınır tabakasından ayrılma,bir tarafta tamamen türbülanslı akım mevcut.             | $1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$<br>Üst geçiş akış döngüsü |
| ı) |  | C:Sınır tabakasından ayrılma, her iki tarafta tamamen türbülanslı akım mevcut.        | $4 \times 10^6 < Re$<br>Trans kritik akış döngüsü                |

**Şekil 3.5 :** Sabit akımda dairesel kesitli ayak etrafındaki akım rejimleri ve girdap oluşumu, (Sümer ve Fredsoe, 1997).

Unger(2006)'de, silindirik bir köprü ayağının etrafındaki girdap sistemini araştırmıştır. Araştırmacı, oyulma derinliği gelişimi için dört aşama tanımlamaktadır. Bununla birlikte ayakların etrafındaki yatay ve dikey akım modellerinin de geliştirilmesine odaklanmıştır. İlk olarak, dikey akım oluşumunu dört aşamada açıklamaktadır.

1.Aşama: Oyulma işlemi, ayaklarda  $75^\circ$  'lık bir dar açı altında yanal erozyon ile başlar. Ayakların hemen önünde, durgunluk noktasında, akım iki dikey akıma ayrılır. Yukarı akım, su seviyesine ulaşır ve yüzeyde çevrinti(girdap) oluşturur. Aşağı akım ise nehir yatağı yüzeyinde ilk girdabı oluşturur. Durgunluk noktası, yukarı akım, yüzey silindiri ve aşağı akım tüm aşamalarda bulunur. Ayaklarda yanal erozyon, ayağın etrafındaki akımın hızlanması nedeniyle meydana gelirken, ilk girdabın aşındırıcı etkisi yoktur.

2.Aşama: Bu aşamada, ilk iki yanal oyulma ayakların menba tarafında, yani önünde birleşir. İlk girdap kaybolur ve akım, ayakların etrafından dolaşarak, akımın güçlü

şekilde hızlanmasına neden olur. Böylece, oyulma derinliği ayakların yan tarafına doğru artar ve ayakların önündeki artan oyulma derinliği, yanal erozyonun neden olduğu malzeme kaymaları sebebi ile oluşur.

3.Aşama: At nalı girdabı oluşur. Bu aşamanın başlangıcında, sadece bir ana girdap vardır ve bu oluşum, oyulmanın dibindeki kritik kayma hızını artırır. Maksimum oyulma derinliği, ayakların önündeki simetri eksenine geçer. Aşağıda ise, oyulma gelişiminin hızı, enine oyulma alanının büyümesi nedeniyle azalmaktadır.

4.Aşama: At nalı girdabının oyulma işlemi üzerindeki etkisi artar. Oyulma çukurunun genişlemesi ile at nalı girdabının çapı da büyür. Ana at nalı girdabının yanı sıra ek alt girdaplar da oluşur.

Dikey akım için dört aşamaya paralel olarak, yatay akım formu da araştırmacılar tarafından 4 aşamada tanımlanmaktadır.

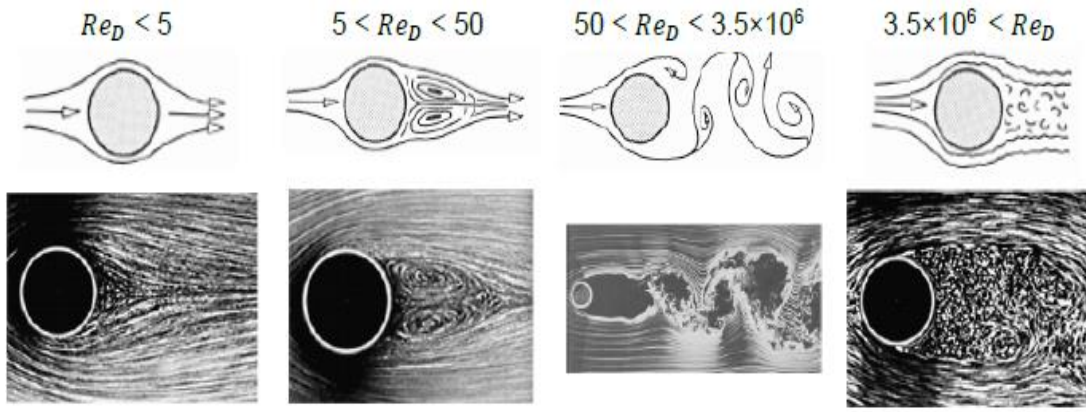
1.Aşama: Ana akım ayaklara ulaşır ve kanalın yatağın yanlarına doğru sapar. Bu aşamada akım hızlanır ve yatak malzemesinin erozyonu  $75^{\circ}$  'lik bir açı ile başlar. Akımın kırılma noktası  $75^{\circ}$  ile  $110^{\circ}$  arasındadır ve uyanık girdapların başladığı noktayı işaretler. Oyulmanın bu aşamada akım modeli üzerinde bir etkisi yoktur.

2.Aşama: Ayağın etrafındaki erozyon yatay akım şeklini etkiler. Su yüzeyinin yakınındaki akım çizgileri, birinci aşamadaki aynı özelliklere sahiptir. Burada, yatak seviyesine yakın kırılma noktası, ayağın aşağı akım kısmına  $125^{\circ}$  açıyla hareketlenir. Bu nedenle, uyanık girdaplar küçülür.

3.Aşama: At nalı girdabı oluşur. Oyulma çevresindeki yatak seviyesine yakın akım çizgileri, Coanda akımı diye adlandırılan bir şekle dönüşür. Kırılma noktası, ayağın aşağı akım ucuna yakındır. Unger (2006), bunun iki sebebi olduğunu söylemektedir. Birinci neden; oyulma içindeki artan hidrolik basınçtır. İkinci neden ise, oyulmanın geometrisidir.

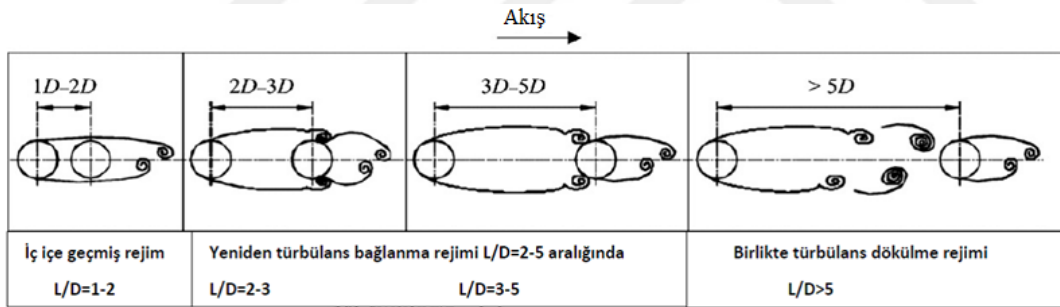
4.Aşama: At nalı girdabı tamamen gelişmiştir ve ayağın etrafında, yatak seviyesine yakın yerlerde bir akım ayrışımı yoktur. Gelişmiş oyulma geometrisi ve artan enine kesit nedeniyle, ayağın etrafındaki akımın hızı önemli ölçüde azalır.

Dairesel ayak etrafındaki akım çizgilerinin değişiminin akustik doppler hız ölçer ile elde edilmiş görüntüsü ve Reynolds sayısı ile değişim ilişkisi, Şekil 3.6'da görülmektedir(Mills, 1998).



**Şekil 3.6 :** Dairesel Köprü ayağı etrafındaki akımın Reynolds sayısı ile değişimi (Mills, 1998).

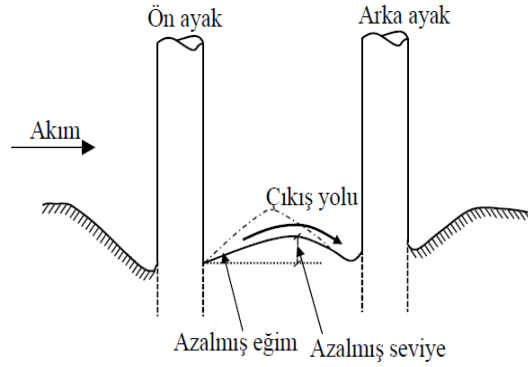
Sumner (2010) tarafından, Şekil 3.7’de gösterildiği gibi, iki tandem dairesel ayak için akım rejimlerinin basitleştirilmiş bir şekli gösterilmektedir. Bu şema ile, tandem ayaklar arasındaki mesafenin, akımın değişimine olan katkıları açıklanmaktadır. Bu tür ayakların etkileşimli olmasının, akım rejimleri üzerinde yaratmış olduğu akım formu temel olarak; iç içe geçmiş türbülans rejimi, yeniden türbülans bağlanma rejimi ve birlikte türbülans dökülme rejimi olarak sınıflandırılır.



**Şekil 3.7 :** İkili silindir ayak arasındaki mesafenin akım rejim davranışındaki etkisi (Sumner, 2010).

Siperlenme mekanizmasında, ön ayağın varlığı arka ayağa etki edecek olan akarsu yaklaşım hızını düşürür. Ön ayak etrafından taşınan taban malzemesi, arka ayağın membaında birikir. Bu durum, akımın tabandan yukarıya ve arka ayağın etrafına yönlendirilmesine neden olur. Bu şekilde önlenen akım, arka ayağın çevresindeki atnalı çevrintilerinin şiddetini azaltır. Dolayısıyla, azalan yaklaşım hızı ve kuvvetini yitiren atnalı çevrintileri, arka ayağın memba tarafında daha düşük oyulma derinliğine yol açar. Siperlenme mekanizmasının etkinliği, ayaklar arası mesafe arttıkça giderek azalır ve sonra kaybolur. Şekil 3.8’de ayaklar arasındaki mesafe ve siperlenme

faktörünün ayaklar üzerindeki oyulma değişkenliği göstermesinin bir şematik hali gösterilmektedir.



**Şekil 3.8 :** İkili dairesel kesitli ayak arasındaki oyulma davranışı (Nazariha, 1996).

Laursen ve Toch (1956) gibi birçok araştırmacı tarafından, köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulma derinliğini etkileyen faktörleri incelemek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Ettema (1980); Raudkivi ve Ettema (1983); Chiew (1984); Melville ve Sutherland (1988); Yanmaz ve Altınbilek (1991); Melville ve Coleman (2000); ve Ettema ve ark. (2011), bu konu üzerinde çalışmalar yapan araştırmacıların başında gelmektedir. Ettema ve arkadaşlarının(2011) de yaptığı çalışmalar, köprü ayakları etrafındaki oyulma üzerindeki farklı parametrelerin etkilerini tarif etmeyi amaçlamış olsa da, oyulma mekanizmasının ve oyulma derinliğinin tahmininde genel olarak önemli bilimsel boşluklar bulunmaktadır. Bunun nedeni, büyük geometrik ölçeklerde laboratuvar akım deneylerinin yapılmasındaki zorluklar veya güvenilir alan verilerinin yetersizlikleri olabilir. Melville ve Coleman (2000), köprü ayaklarındaki oyulmayı etkileyen faktörleri açıklayan birçok kapsamlı araştırmalar yayınlamışlardır. Araştırmacıların yaptığı çalışmalar ışığında, oyulmaların gelişimini etkileyen bu faktörler açıklanmaktadır.

### 3.1.1 Akım derinliğinin etkisi, $h / D$

Su derinliğinin ayak genişliğine göreceli oranı, oyulma derinliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Akım derinliğinin azalmasıyla, yüzey çevrintilerinin nehir yatağı üzerindeki etkisi, taban girdabını artırarak gelişir. Böylece sıkı akıntılar için lokal oyulma derinliği azalır (Melville ve Sutherland, 1988; Melville ve Coleman, 2000). Dietz (1972), su derinliğinin etkisinin  $h/D > 2$  ile 2.5 arasında olması halinde ihmal edilebileceği sonucuna varmıştır. Breusers ve ark.(1977) ise, deneysel veri

sonuçlarına göre, su derinliğinin ayak genişliğine göre etkisinin  $h/D > 3$  olması halinde ihmal edilebileceği sonucuna varmışlardır. Ettema (1980), araştırmalarında ayakların etrafındaki yerel oyulma derinliğinin akımdan bağımsız olduğu sonucuna varmıştır. Araştırmacı; akım derinliğinin ayak genişliğine oranı olan,  $h/D > 3$  değeri için ve  $h/D < 1$  için oyulmanın, akım derinliğinden bağımsız olduğunu ifade etmektedir. Araştırmacı aynı zamanda, oyulma derinliği ve su derinliği arasındaki ilişkinin farklı  $D/d_{50}$  oranına bağlı olduğunu ifade etmektedir. Clark ve ark. (1982), derinlik ile oyulma çapı oranı için sınırlayıcı koşulun  $h/D > 2$  olduğunu araştırmalar sonucu bulduklarını ifade etmektedirler. Daha küçük değerler olması durumunda, oyulma mekanizması ve çevresindeki akım paterni bozulmuştur. Melville ve Sutherland (1988),  $h/D > 2,6$  ise oyulma derinliğinin, su derinliğinden bağımsız olduğunu ifade etmektedir. Breusers ve Raudkivi (1991), ayakların boyutuna göre tortu ne kadar ince olursa, akım derinliğinin etkisi o kadar küçük olacağını söylemektedir. İnce çökelti için oyulma derinliği  $h/D \geq 2$  olduğunda, oyulmanın akım derinliğinden neredeyse bağımsız olabilirken, bu oran nispeten iri çökelti için oyulmanın akım derinliğinden etkilenmediği durumun  $h/D > 6$  olduğunu ifade etmektedir. Whitehouse (1998); oyulma üzerinde su derinliğinin etkisinin olmaması için,  $h/D \geq 4$  olmasını önermektedir. Raikar ve Dey (2009); zırh oluşumu için nehir yataklarındaki su derinliğinin etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca nehir yatağının,  $h/D$  oranı ile farklı zırhlama dereceleri arasında bir bağlantı kurmuşlardır. Neredeyse üniform sayılabilecek yatak malzemesi için su derinliğinin oyulma üzerindeki etkisi,  $h/D > 3$  için ihmal edilebilirken, tamamen zırh kaplı nehir yatağında ise, su derinliğinin oyulma üzerindeki etkisinin,  $h/D > 5$  olması durumunda ihmal edilebilir olduğunu söylemektedir.

Bahsedilen yazarların aksine; Link (2006) deneylerinde, yıkama(oyulma) derinliğinin azalan su derinliği ile arttığını deneylerinde gözlemlediğini ifade etmektedir.

Raudkivi (1998)'e göre, oyulma derinliği, akım derinliğinin ayak çapının üç katından daha büyük olduğu durumda oyulmanın, akım derinliğinden bağımsız olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca akım derinliğindeki azalma, yüzeyde oluşan çevrinti(yay dalgası) akımını ve gücünü azaltır. Dolayısıyla, oyulmanın akım derinliğine kesin bir bağımlılığı olmadığı sonucuna varmıştır.

Akım derinliği parametresi olan  $h/D$ , akım derinliğinin köprü ayağı genişliğine göre etkisini temsil eder. Melville ve Coleman (2000),  $h/D$  oranına göre (Çizelge 3.1)'de gösterildiği gibi üç farklı kategoride oyulma ile akım derinliği arasındaki ilişkiyi sınıflandırmıştır. Akım derinliğinin, yerel oyulma derinliği üzerindeki etkisini tanımlayan fonksiyonel  $f(D, h)$  ilişkisini tanımlamak için aynı laboratuvar verilerini kullanmıştır. Dar köprü ayağı ve derin akım için, yani ayak genişliğine kıyasla büyük akım derinliği durumu için, oyulma derinliği ayak genişliği ile doğru orantılıdır ve akım derinliğinden bağımsızdır. Tersine, sığ akım ve geniş ayak durumu için, oyulma derinliği, akım derinliği ile doğru orantılıdır ve ayak genişliğinden bağımsızdır. Ara akım derinliği için, oyulma derinliği hem akım derinliğine hem de ayakların genişliğine bağlıdır.

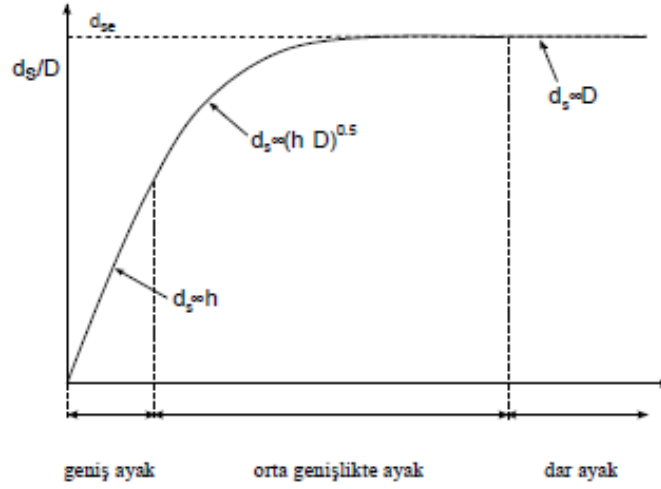
Lokal oyulmada; taban malzemesinin hareketinin yaklaşma akım derinliğine bağımlılığı, girdap hareketlerinin girişimine bağlıdır (Yanmaz, 2002). Dairesel köprü ayaklarının birbirine akım etkisi yok ise, yerel oyulma derinliği, akım derinliğinden bağımsızdır. Yani, akım derinliği yeterince büyük olduğunda, girdaplar arasındaki girişim yoğunluğunu kaybeder (Raudkivi, 1991).

Melville ve Coleman (2000) ise, köprü ayaklarındaki yerel oyulma işlemini sınıflandırmaktadır. Çizelge 3.1'de ayakların genişliği ile derinlik arasındaki orana göre yerel oyulmanın fonksiyonel değerlendirmesi görülmektedir. Ayrıca, bir akım derinliği ile  $a$  boyutu faktörü olan,  $K_{yb}$  faktörü için, aşağıdaki sınır şartları altında denklem (3.1)'deki formülasyonu önermektedirler.

$$\left. \begin{aligned} \frac{D}{h} < 0,7 \text{ ise } K_{yb} &= 2,4D \\ 0,7 < \frac{D}{h} < 5 \text{ ise } K_{yb} &= 2,0\sqrt{hD} \\ \frac{D}{h} > 5 \text{ ise } K_{yb} &= 4,5h \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

**Çizelge 3.1 :** Köprü ayak genişliğinin akım derinliğine oranının yerel oyulma üzerindeki etki fonksiyonu (Melville ve Coleman (2000)).

| Ayak Sınıflaması | D/h             | Yerel Oyulma Fonksiyonu  |
|------------------|-----------------|--------------------------|
| Dar              | $D/h < 0,7$     | $d_s \propto D$          |
| Orta genişlikte  | $0,7 < D/h < 5$ | $d_s \propto (Dh)^{0,5}$ |
| Geniş            | $D/h > 5$       | $d_s \propto h$          |



**Şekil 3.9 :** Akım sıklığına bağlı olarak yerel oyulma derinliği değişimi (Melville ve Coleman, 2000).

Çizelge 3.1’de gösterilen sınır şartları için akım derinliğinin ayak genişliğine oranına bağlı olarak yerel oyulma derinliğinin değişim grafiği Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Melville (1997)’ye göre akım şiddeti faktörü  $K_I$ , temiz su oyulması durumunda denklem (3.2) ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 K_I &= \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} \\
 U_a &= 0.8U_{ca} \\
 U_{ca} &= 5.75 \log 5.53(y/D_{50}) \\
 D_{50} &= D_{\max}/1.8 \text{ (Dane dağılımının karışık olması halinde), (mm)} \\
 K_I > 1 \text{ ise, } K_I &= 1
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

$U$  : Ortalama akım hızı (m/sn)

$U_a$ : Canlı yatak hareketinin hemen başlangıcında akım yukarısındaki ortalama akım hızı (üniform çökelti için),

$U_a = U_c$ ; (üniform olmayan çökelti için,  $U_a > U_c$ );(m/s)

$U_c$  : Kritik ortalama kayma hızı, yani yatak hareketinin başlangıcındaki hız (m/s)

$U_{ca}$  : Dane dağılımı düzgün olmayan bir akarsu yatağında zırhlamanın mümkün olmadığı ortalama kayma hızı (m/s)

Temiz su koşullarında üniform taban malzeme dağılımı( $\sigma < 1.3$  için)  $K_I = U/U_c$

Hareketli taban durumunda  $K_I=1$  ( $\sigma_g \geq 1.3$ ,  $K_I > 1$  için)

### 3.1.2 Sediment kalınlığının etkisi, $D/d_{50}$

$D/d_{50}$  parametresi, akım sınırının nispi kalınlığını temsil eder. Melville ve Coleman (2000)'e göre, homojen taban malzemesi için, yerel oyulma derinlikleri, taban malzemesi kalınlığından etkilenmez. Bununla birlikte, daha büyük tortu boyutu lokal oyulma derinliğini etkiler. Sediment kabalık oranı,  $D/d_{50}$  değeri 50'den azsa, lokal oyulma derinliğinin üzerinde tortu boyutunun etkisi vardır. Sediment kabalık oranı ile lokal oyulma derinliği arasındaki ilişki Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Ettema ve ark. (2011), homojen sediment için, sedimentin nispeten büyük veya küçük olması durumunda, yerel oyulma derinliğinin tortu kalınlığından etkilendiğini ifade etmektedir. Tortu kabalık oranının değeri ne kadar küçük ise, parçacık boyutu da o kadar büyük olur. Bu nedenle, kaba ve gözenekli yatak, aşağı akımın enerjisinin bir kısmını dağıttığından dolayı oyulma azalır. Araştırmacı; tortu kabalık oranı,  $D/d_{50} < 8$  değerinden az olduğunda, tortu parçacıklarının ayakların boyutuna göre çok büyük olduğunu ifade etmektedir. Bu durumda; oyulma, esas olarak köprü ayağının kenarlarındaki erozyondan kaynaklanır. Bu nedenle, oyulma derinliğinde bir azalma oluşur.

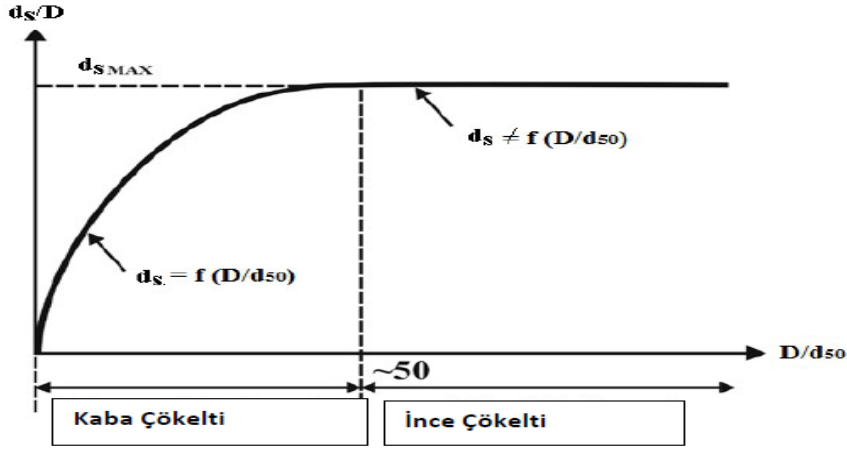
Ettema (1980), göreceli boyut parametresi  $D/d_{50}$ 'nin, denge oyulma derinliğinin gelişimini dört değer bölgesi için tanımlamaktadır.

**$D/d_{50} \geq 130$  ise:** Aşağı akım akıntıları birbirleri ile çarpışarak oluşan at nalı girdabı tortuyu sürüklemeye başlar.

**$130 < D/d_{50} \leq 30$  ise:** Tortu orta büyüklüktedir. Tortu sürüklenme bölgesi, aşağı akım tarafından ayağın üst kısmı çevresinde oluşan bir oluk ile sınırlıdır.

**$30 < D/d_{50} \leq 8$  ise:** Tortu, ayak genişliğine göreceli olarak büyüktür. Oyulma içindeki yatak yüzeyinin pürüzlülüğü, denge oyulma derinliğinde bir azalmaya neden olur.

**$D/d_{50} < 8$  ise:** Sediment, ayak genişliğine kıyasla çok(ıridir) kabadır. Ayak etrafında oyulma oluşmaz. Erozyon ve oyulma, esas olarak ayağın yanlarındaki akımın hızlanması nedeniyle oluşur.



**Şekil 3.10 :** Tortu kalınlığının yerel oyulma üzerindeki etkisi (Melville ve Coleman,2000).

Ettema (1980), Breusers ve Raudkivi (1991), Melville ve Chiew (1999) ve Melville ve Coleman(2000)'a göre, temiz su oyulması için maksimum oyulma derinliği,  $D/d_{50}$ 'nin partikül büyüklüğünden etkilenme şartını 25 olarak belirlemişlerdir. Melville ve Chiew (1999) ise, bu sınırı 50 olarak belirlemiştir. Melville ve Sutherland (1988) ise bu sınırı 25'olarak ifade etmektedirler ve dane çapı düzeltme faktörü Denklem (3.3) ve (3.4) de gösterilmiştir.

$$d/D_{50} \leq 25 \text{ için; } K_d = 0.57 \log \left( 2.24 \frac{D}{d_{50}} \right) \quad (3.3)$$

$$d/D_{50} > 25 \text{ için; } K_d = 1 \quad (3.4)$$

### 3.1.3 Taban tortusunun geometrik düzensizliğinin etkisi, $\sigma_g$

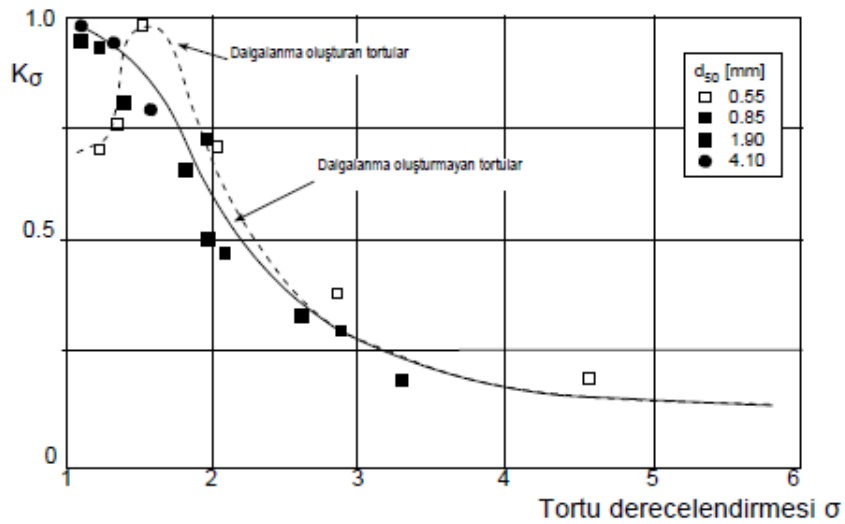
Tortu homojenliği, tortu partiküllerinin geometrik standart sapması,  $\sigma_g$  kullanılarak karakterize edilir. Şarlak ve Tiğrek (2011), geometrik standart sapmayı denklem (3.5) ile ifade etmektedir.

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (3.5)$$

Ettema ve ark. (2011) 1990 yılından bu yana, tortu tekdüzeliğinin yerel oyulma derinliği üzerindeki etkisine ilişkin araştırmalar yapmıştır. Ettema(1976) ve diğer araştırmacılar tarafından yapılan laboratuvar çalışmalarındaki değerlendirme ve sonuçlar önemli ölçüde güncellenememiştir. Ettema(1980), Chiew(1984) ve Baker (1986)' nin yaptığı araştırmalarda, bir zırh tabakasının oluşumuna bağlı olarak taban

tortusunun homojenlikten uzaklaşması  $\sigma_g$  ile oyulma derinliğinin önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Diğer bir bulgu,  $\sigma_g=1,5$  civarında, dalgalanma oluşturan çökelti için oyulma davranışının, dalgalanma oluşturmeyen çökeltilerden farklı olduğudur. Araştırmacının yaptığı deneyler sonucu elde ettiği veriler Şekil 3.11'de gösterilmektedir.

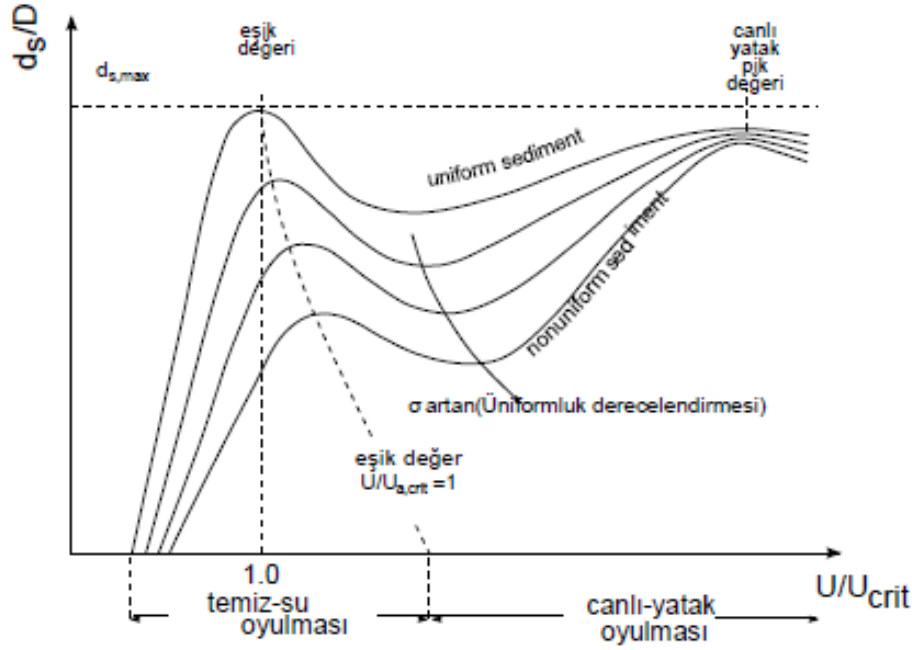
Oyulma derinliğinin azalmasının nedeni, yaklaşma yatağında ve oyulma çukurunun içinde bir zırh tabakasının oluşmasıdır. Baker (1986), canlı yatak koşulları için, yüksek akım hızlarında ( $U/U_{kritik}>4$ ) olması halinde, oyulma derinliğinin  $\sigma_g$  'den neredeyse bağımsız hale geldiğini ifade etmektedir. Baker (1986)'ın sonuçları Melville ve Coleman (2000) tarafından tekrarlanmıştır. Araştırmacılar berrak su koşulları altında, tortu homejenliği ve buna karşılık gelen oyulma derinliğinin gelişimini Şekil 3.11'de göstermektedir.



**Şekil 3.11 :** Temiz su koşullarında köprü ayaklarında yerel oyulma üzerinde tortu homojenliğinin etkisi (Melville ve Coleman, 2000).

Melville ve Coleman (2000), Ettema (1976) ve Chiew (1984) tarafından, hareketli yatak koşullarında homojen olmayan tortu için de bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmişlerdir. Deney, kullanılan tortu için eşik hareket koşulunda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan,  $\sigma_g$  değeri arttıkça oyulma oranının ve denge oyulma derinliğinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, muntazam olmayan bir tortu malzemesi için, eşik koşulu etrafında,  $U/U_c \sim 1$  için, oyulma deliğinin tabanında zırhlamanın meydana geldiğini ve yerel oyulma derinliğinde önemli ölçüde azalma olduğunu ifade edilmektedir. Akımın, tortu partiküllerinin çoğunu sürükleyebildiği

zaman, daha yüksek  $U/U_c$  değerleri için tortu malzemesinin homojen olmama etkisi daha küçüktür.  $U/U_c$  ara değerlerinde, tortu homojenliğinin etkisi, bu iki sınır arasındaki artan akım hızı ile azalır, çünkü taneler, akım tarafından taşınır. Bu akım yoğunluğu ve  $U/U_c$ 'nin lokal oyulma derinliği üzerindeki etkisini içeren verileri şematik olarak özetleyen grafik Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.12 :** Lokal oyulma derinliğinin tortu homojenlik değişimi ile değişmesi (Melville ve Coleman,2000).

Tortu bir zırh katmanını oluşturma eğiliminde ise yani;  $\sigma_g > 1,3$  ise (muntazam olmayan malzeme),  $U - U_a > 1,0$  olduğunda, canlı yatak oyulması meydana gelir. Burada  $U_a$ , temiz su ve canlı yatak koşulları arasındaki geçiş hızını ifade eder. Homojen çökeltiler için kullanılan  $U_{kritik}$ 'e eşdeğerdir.

Zırh tepe hızı  $U_a$ 'yı hesaplamak için, homojen olmayan tortudaki en büyük tane boyutlarının bilgisi gereklidir. Uygulamada, bilinmesi olası olmayan  $d_{max}$  yerine  $d_{90}$  kullanılabilir. Böyle bir durumda,  $d_{50}$ ,  $a = d_{max}/1.8$ , zırh tortusu  $U_{kritik}(=U_{critik})$  için kritik hızı hesaplamak için kullanılabilir,  $U_a$ ;  $U_{kritik}$  bilindiğinde, zırhlanma tepe hızını ifade eder.

$U_a = 0.8U_{kritik,a}$  şeklinde hesaplanır (Melville ve Coleman, 2000).

$K_z$ , Müller ve Jones (1999) tarafından önerilen yatak malzemesi boyutunun tabanda zırhlanması için düzeltme faktörü olarak tariflemektedir.  $d_{50}$  değeri 2,0 mm'den büyük ise veya  $d_{95}$  20 mm'ye eşit veya daha büyük olan yatak malzemesine sahip akarsuda oyulma derinliği azalır. Zırhlanma faktörü olan  $K_z$ , denklem (3.6) ile hesaplanmalıdır. Çökelti  $d_{50}$ , 2.0 mm'den küçük ve  $d_{95}$ , 20 mm'den küçükse,  $K_z = 1$  alınır.  $K_z$ 'nin minimum değeri 0.4'tür ve yalnızca  $U < U_{ic,d50}$  ise kullanılmalıdır.

$$d_{50} < 2 \text{ mm veya } d_{95} < 20 \text{ mm ise } K_z = 1$$

$$d_{50} \geq 2 \text{ mm ve } d_{95} \geq 20 \text{ mm ise } K_z = 0.4 U_R^{0.15}$$

$$U_R = \frac{U - U_{ic,d50}}{U_{c,d50} - U_{ic,d95}} > 0 \quad (3.6)$$

$$U_{ic,dx} = 0,645 \left( \frac{d_x}{D} \right)^{0,053} U_{c,dx}$$

$$U_{c,dx} = K_u y_1^{(1/6)} d_x^{(1/3)} = 6.19 y_1^{(1/6)} d_x^{(1/3)}$$

$U_{ic,dx}=d_x$  için ayaktaki oyulmayı başlatmak için gerekli akım hızı[m / s],

$U_{c,dx}$  = tane büyüklüğü  $dx$  olan malzeme başlangıç hareketi için kritik hız [m / s],

$D$  = ayak genişliği [m],

$d_x$  = yatak malzemesinin % x' inin daha ince olduğu tane boyutu [m]

$U$  = ayakların hemen yukarısındaki yaklaşım akımının hızı [m / s]

$y_1$  = kabarma hariç, ayağın akım yukarısındaki ortalama akım derinliği [m]

$K_u = 6.19$  (Sabit sayı, SI)

Richardson ve Davis(2001), çalışmaları ABD dâhil en yaygın olarak kullanılan araştırmacılarıdır. Literatürde CSU denklemi olarak ta bilinen bu denklem, HEC-18 oyulma hesap yazılımında standart olarak kullanılmaktadır. Tabandaki zırhlanma faktörü denklem (3.6)'dan hesaplanabilir.  $K_z$  faktörünün minimum 0.4 olması önerilmektedir.

Araştırmacılarından bir diğeri olan Raudkivi(1986) ise,  $5,0 \geq \sigma_g \geq 1$  için  $K_z$  olarak tanımlanan taban malzemesi gradasyon düzeltme faktörünü yani taban zırhlanma faktörü, denklem (3.7) ile aşağıdaki şekilde verilmektedir.  $K_z$ ; aynı zamanda bazı literatürlerde  $K_\sigma$  olarak ta tanımlanmaktadır.

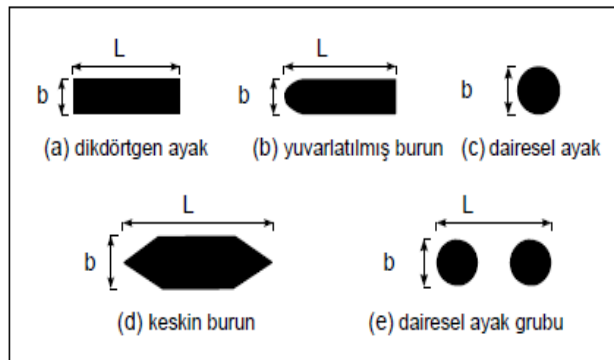
$$K_z = 0,013462\sigma_g^5 - 0,2232\sigma_g^4 + 1,4066\sigma_g^3 - 4,0864\sigma_g^2 + 5,007\sigma_g - 1,1179 \quad (3.7)$$

Bu araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre, taban malzemesi tane dağılımı büyük olan bir akarsuda, canlı yatak taban oyulması sırasında oluşan oyulma, üniform tane dağılımına sahip olan bir akarsuya göre daha az olmaktadır. Ettema ve ark. (2011) ve diğer araştırmacılar, tortu homojenliğinin oyulma üzerindeki etkisinin, çoğunlukla akım şiddeti faktörü olan  $U/U_{kritik}$  ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir.

### 3.1.4 Köprü ayak şeklinin etkisi

Köprü ayakları, çeşitli temel geometrik şekillerde yapılır. Bu geometrik formlar şekil 3.13’de gösterilmektedir. Çoğu araştırmacı, yerel oyulma derinliğinin akım içindeki engellemeye bağlı olduğuna söylemektedir. Melville ve Coleman (2000) tarafından, köprü ayaklarının şekil etkileri genellikle belirli bir ayak şekli ile basit dairesel silindirik bir ayak arasındaki yerel oyulma farkını açıklayan bir çarpım faktörü olarak verilir. Bu şekil faktörleri, Laursen ve Toch(1956), Chabert ve Engeldinger(1956), Melville ve Coleman(2000), Richardson ve Davis(2001), Sheppard ve Miller(2006) ve Ettema ve arkadaşları (2011) tarafından çeşitli deneysel araştırmalardan elde ettikleri sonuçlar ile açıklamışlardır.

Richardson ve Davis (2001) tarafından, dairesel ayaklar için ve bazı ana geometrik formlar için  $K_{sh}$  şekil faktörlerinin değerini vermektedir. Ayrıca, bu faktörlerin bir iskeleye sadece akımla hizalandığında uygulanabileceğini ifade etmektedirler. Çizelge 3.2’de; araştırmacıların yaptığı çalışmalara dayanarak, köprü ayak şekli ile oyulma arasında kurulan oyulma şekil faktörü sayısı değerlerini göstermektedir.



**şekil 3.13 :** Köprülerde yaygın olarak kullanılan ayak geometrik şekilleri (Richardson ve Davis, 2001).

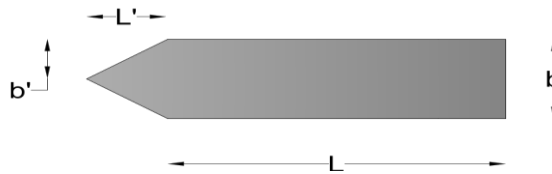
**Çizelge 3.2 : Köprü ayaklarının şekil faktörü (Richardson ve Davis, 2001).**

| Şekil | Köprü Ayak Şekli      | Şekil Faktörü, $K_s$ |
|-------|-----------------------|----------------------|
| 1     | Dairesel              | 1.0                  |
| 2     | Yuvarlatılmış Burunlu | 1.0                  |
| 3     | Kare Burunlu          | 1.1                  |
| 4     | Keskin Burunlu        | 0.9                  |

Ayak geometrisinin etkisi  $K_s$  faktörü ile temsil edilebilir (Raudkivi, 1991). Şekil faktörü, atak açısını 5 dereceden az olması geçerlidir. Daha büyük atak açısı altında  $K_s=1$  alınır. Ayak şekil faktörü  $K_s$  azaldığında, tahmini oyulma derinliği de azalır. Farklı geometrideki ayaklar için şekil faktörleri Çizelge 3.3'de verilmektedir. Çizelgedeki boyutlar arasındaki ilişki Şekil 3.14'de tanımlanmıştır.

**Çizelge 3.3 : Köprü ayaklarının şekil faktörü (Breusers ve Raudkivi, 1991).**

| Ayak Geometrisi                         | $b / L$ | $b' / L'$ | $K_s$ |
|-----------------------------------------|---------|-----------|-------|
| Silindir                                |         |           | 1.00  |
| Dikdörtgen                              | 1:1     |           | 1.22  |
|                                         | 1:3     |           | 1.08  |
|                                         | 1:5     |           | 0.99  |
| Yarım dairesel burunlu dikdörtgen kesit | 1:3     |           | 0.90  |
| Kama burunlu                            | 1:5     |           | 0.86  |
| Köşeleri pahlanmış dikdörtgen           | 1:4     |           | 1.01  |
| Kama burunlu dikdörtgen kesit           | 1:3     | 1:2       | 0.76  |
|                                         |         | 1:4       | 0.65  |



**Şekil 3.14 : Kama burunlu dikdörtgen ayak (Breusers ve Raudkivi, 1991).**

Ayak şeklinin oyulma derinliği üzerinde önemli bir etkisi vardır (Breusers ve ark., 1977). Farklı yazarlar, kama burunlu bir dikdörtgen ayağın, dairesel veya yuvarlak burun formunda bir ayağa göre, ayağın konumlanmasının akıma göre düz olduğunda % 25'lik bir oyulma derinliği azalması elde edilebileceği sonucuna varmışlardır. Bu

pozitif etki,  $10^\circ$  ile  $15^\circ$ 'den daha büyük atak akım açılarında ortadan kalkar. Öte yandan, dikdörtgen formlu ayaklarda ise, oyulma derinliği için referans olan dairesel kesitli ayaktaki oyulmaya kıyasla, % 40'a varabilen artışlar olabilmektedir. Bazı araştırmacıların ayak şekil faktörlerini veren değerler Çizelge 3.4'de görülmektedir.

**Çizelge 3.4 :** Farklı araştırmacıların ayak şekil faktörleri ( Diab, 2011).

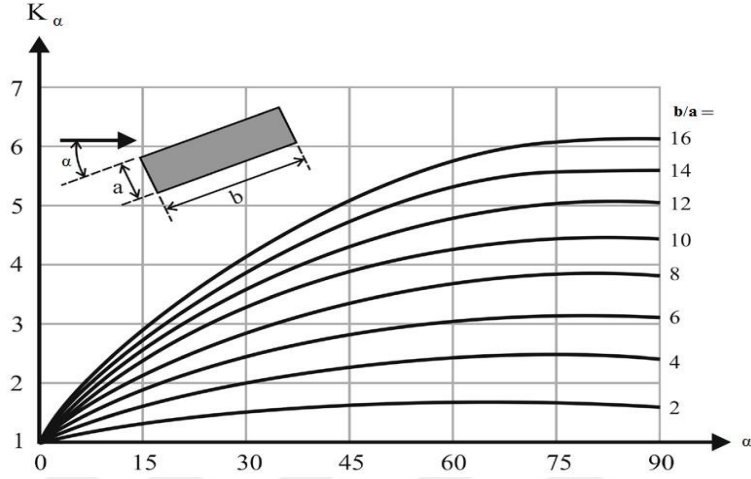
| Referans                      | $K_s$ : Silindir Dikdörtgen |           | Yuvarlak burun | Merceksi  | Keskin burun | Eliptik   |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------|
| Tison (1940)                  | 1.00                        | 1.40      | –              | 0.41–0.67 | –            | –         |
| Chabert ve Engeldinger (1956) | 1.00                        | 1.11      | –              | 0.73      | –            | –         |
| Breusers ve ark. (1977)       | 1.00                        | 1.30      | –              | 0.75      | –            | –         |
| Melville (1997)               | 1.00                        | 1.00      | 1.00           | –         | 0.9          | –         |
| Hoffmans ve Verheij (1997)    | 1.00                        | 1.00–1.20 | 0.90           | 0.70–0.80 | 0.65–0.76    | 0.60–0.80 |
| Richardson ve Davis (2001)    | 1.00                        | 1.10      | 1.00           | –         | 0.90         | –         |
| Olivetto ve Hager (2002)      | 1.00                        | 1.20      | –              | –         | –            | –         |

Ettema ve Neill(1980) ise, ayakların menba tarafındaki ucunun daha keskin hatlı olması halinde, sel döküntülerinin (ağaç, çalı vs.) keskin uçlarca daha çok yakalanma durumu olduğunu ve böyle durumda yerel oyulma derinliğinin daha fazla artabileceği değerlendirmesi yapmaktadır. Ayakların mansap akım tarafındaki uç geometrisinin etkisi, maksimum lokal oyulma derinliği için çok az önem ifade eder. Neill(1978), küt uç şeklinin neden olduğu yay dalgasının, kalıntıları uzaklaştırabilme eğiliminde olduğunu belirtmiştir.

### 3.1.5 Köprü ayaklarının akım ile hizalanmasının(saldırı açısı) etkisi, $\alpha$

Köprü ayak hizalanması, aynı zamanda, köprü ayaklarının, uzunlamasına eksenine ile akım yönü arasındaki açıyı temsil eder ve hizalanma açısı olarak da adlandırılır. Melville ve Coleman (2000)'a göre, dairesel formdaki ayaklar hariç, tüm köprü ayak şekilleri için, lokal oyulma derinliğinin, hizalanma açısından etkisini, Şekil 3.15'de göstermektedir. Bu şekilde verilen grafikte, bu açıdaki artışın, oyulma derinliğindeki artış ile sonuçlandığını göstermektedir. Burada gösterilen  $K_\alpha$  çarpan faktörünün, mevcut ayak oyulma denklemlerinin çoğunda kullanılması tavsiye edilmektedir. Ayakların öngörülen genişliği, akım açısının artmasıyla tasarımda arttırılır. Böylece oyulma derinliğinde azalma görülür. Ayakların akım ile hizalanması durumu verilen grafikten veya denklem (3.8)'den hesaplanabilir. Melville ve Coleman (2000), akım açısı sıfır ise, ayak uzunluğunun oyulma derinliği üzerinde hiçbir etkisi olmadığını, oysa akım açısının sıfırdan sapması, yani ayakların akıma çarpık olduğunda ise,

ayaklar üzerinde önemli bir etki yaratacağını ifade eder. En-boy oranı sekiz olan dikdörtgen bir ayak için, oyulma derinliğinin, sıfır akım açısına sahip aynı durum ile karşılaştırıldığında, 30 ° 'lik bir akım açısı altındaki oyulmaya kıyasla neredeyse üç, dört kat arttığını deney verileri ile elde ettiği sonuçlara göre ifade etmektedir.



**Şekil 3.15 :** Köprü ayaklarının, akım ile  $\alpha$  açısı ile hizalamasının oyulma üzerindeki etkisi (Melville ve Coleman, 2000).

$$K_2 = K_\alpha = (\cos \alpha + \frac{b}{a} \sin \alpha)^{0,65} \quad (3.8)$$

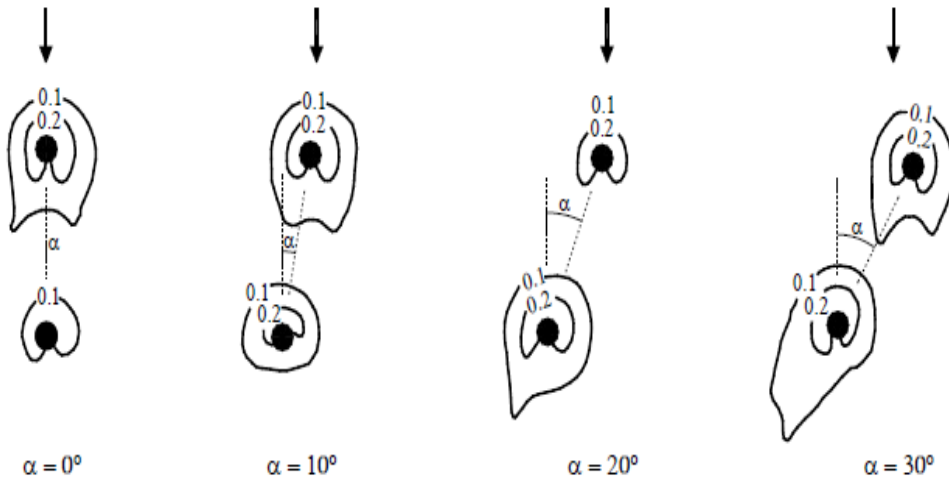
Richardson ve Davis (2001)'in yaptığı çalışmada,  $K_\alpha$ ; saldırı açısı ile ayağın uzunluk ve genişlik oranına bağlı olarak Çizelge 3.5' de gösterilmiştir. Düzeltme faktörü  $K_\alpha$ , akımın atak açısını dikkate alır ve açı 90 dereceden fazla olduğunda maksimum  $K_\alpha=5$  alınır.  $K_\alpha$  için hesaplanan değerler sadece ayağın tüm uzunluğu akımın saldırı açısına maruz kaldığında uygulanmalıdır.  $K_\alpha$  etkisi oyulma üzerinde önemli olmaktadır. Bu gibi durumlarda  $K_\alpha$  faktörünü azaltmak için ayak etkin uzunluğu azaltılmalıdır veya  $L/b$  oranı küçültülmesi için ayak genişliği olan  $b$  değeri artırılmalıdır.

**Çizelge 3.5 :** Saldırı açısına bağlı ayak düzeltme faktörü,  $K_\alpha(=K_2)$ (Richardson ve Davis, 2001).

| $\alpha$ | $L/b=4$ | $L/b=8$ | $L/b=12$ |
|----------|---------|---------|----------|
| 0        | 1.0     | 1.0     | 1.0      |
| 15       | 1.5     | 2.0     | 2.5      |
| 30       | 2.0     | 2.75    | 3.5      |
| 45       | 2.3     | 3.3     | 4.3      |
| 90       | 2.5     | 3.9     | 5.0      |

$\alpha$  =saldırı açısı,  $L$ =ayak uzunluğu [m],  $b$  yak genişliği [m]

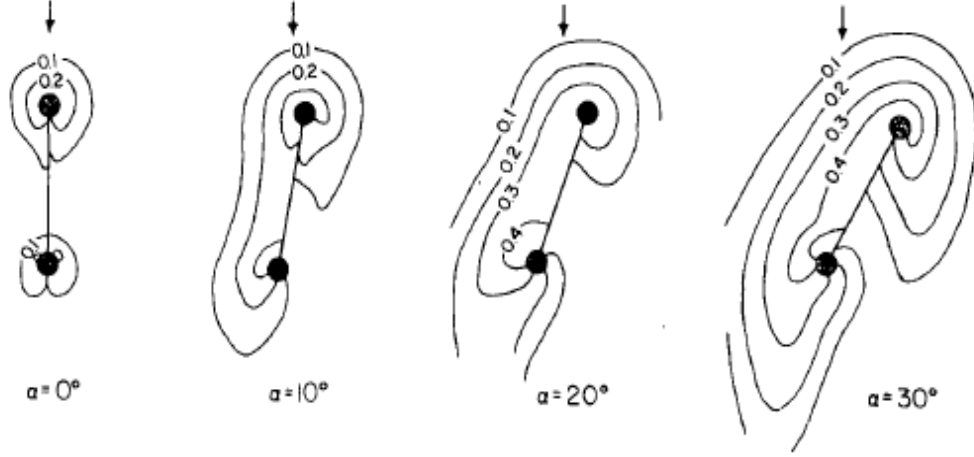
Breusers ve Raudkivi (1991)'e göre oyulma derinliği, ayak genişliğinin bir fonksiyonudur. Ayrıca, akım açısı atak etkisinin,  $5^\circ$  ila  $10^\circ$  'ye kadar olan değeri için pratik olarak göz ardı edilebileceğini öne sürdüler. Ettema ve ark. (2011),  $h/D$  ve  $D/d_{50}$  gibi bazı parametrelerin etkisine bağlı olarak, oyulma derinliğinin, öngörülen genişlikteki bir artışla artmayabileceğini ifade etmişlerdir. Saldırı açısı değişikliğinin oyulma miktarının artmasında etkili olmadığını, ancak oyulma paterninin, yani oyulma deseni ve alanında değişiklik yaratacağını söyleyen araştırmacılar da bulunmaktadır. Dairesel kesitli ayaklar için, saldırı açısı değişiminin; oyulma alan ve deseninin gelişimini değiştirdiğini, buna karşın oyulma derinliğinde bir artış yaratmadığı söylenmektedir. Her ne kadar akım açısının etkisinin, akım derinliği ve tortunun ortalama tane büyüklüğünün etkileri, birbirleri ile oyulma derinliği üzerinde ilişkili olsa da, oyulma derinliğinin tahmini üzerine yapılan son çalışmalarda, oyulma üzerinde etkili olan birbirinden bağımsız parametreler olarak kabul etmişlerdir. Laursen ve Toch (1956), iki ayaklı köprüdeki oyulma deseni ve derinliği konusunda öncü çalışmalar yürüttüler. İki ayağın birbirinin önüne yerleştirildiği ve saldırı açısında küçük eğiklikler olması halinde ( $0^\circ$  ile  $10^\circ$ ), arka ayağın ön ayak tarafından korunduğunu ve sonuç olarak, arka ayakta daha küçük bir oyulma derinliğinin görüleceğini Şekil 3.16'da açılanan şekilde değerlendirmişlerdir. Açı arttıkça, koruma kaybolur ve aşağı akım, yukarı akımdan gelen uyanık girdaplara maruz kalır. Bu durum, en derin oyulma bölgesini, aşağı akımın olduğu yere kaydırır. Daha yüksek saldırı açılarında siperlenme etkisi pratik olarak kaybolur.



**Şekil 3.16 :** Dairesel kesitli köprü ayaklarının akım ile hizalanma değişiminin oyulma üzerindeki etkisi (Laursen ve Toch; 1956).

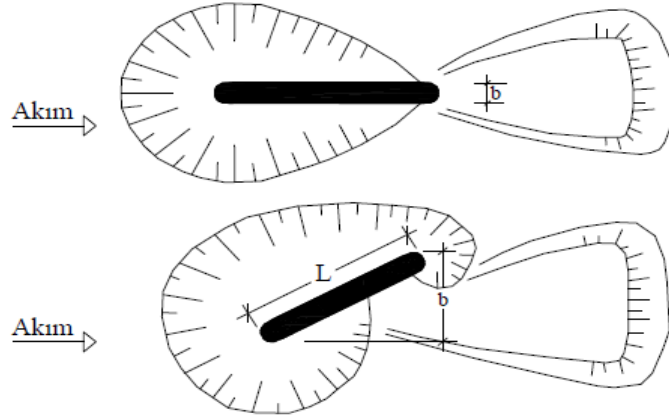
Başları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli bir köprü ayağında yapılan deneyde ise, oyulma derinliği ve desenindeki değişim Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Burada da görüleceği üzere, saldırı açısının küçük olduğu ( $0^\circ$  ile  $10^\circ$  arasında) durumlarda,

oyulma deseninde(alanında) değişiklik olup oyulma derinliğinde bir değişim olmamaktadır. Bu açıdan daha büyük saldırı açılarında, oyulma miktarlarında 30°'de 2 kat, 45°'de ise, 2,5 kat artan değerler olduğu gözlenmektedir. Bu kesitin köşeli uçlara sahip olması durumunda, oyulma miktarında %15 oranında bir artış görülmektedir.

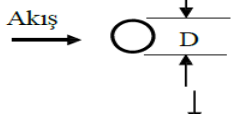
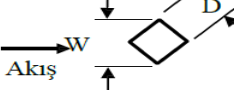


**Şekil 3.17 :** Uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli köprü ayaklarının akım ile hizalanma değişiminin oyulma üzerindeki etkisi (Laursen ve Toch; 1956).

Uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli bir ayağın, akım ile hizalanmasındaki değişiminin, oyulma desenindeki değişimi ve oyulmadaki etkin ayak genişliği Şekil 3.18'de görülmektedir. Ayak şekillerinin akım ile konumlanmasının, eşdeğer dairesel ayak genişliği Şekil 3.19'da görülmektedir.



**Şekil 3.18 :** Akım ile hizalanma değişiminin oyulma üzerindeki etkisi ve etkin ayak genişliği (Laursen ve Toch; 1956).

| Ayak kesit şekli                                                                  | Genişlik    | Eşdeğer<br>çap<br>$D^*$          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------|
|  | $W = D$     | $D^* = D$                        |
|  | $W = D$     | $D^* = 1.23 W$<br>$D^* = 1.23 D$ |
|  | $W = 1.4 D$ | $D^* = W$<br>$D^* = 1.2 D$       |

**Şekil 3.19 :** Ayak genişliğinin eşdeğer çap dönüşümü (FDOT).

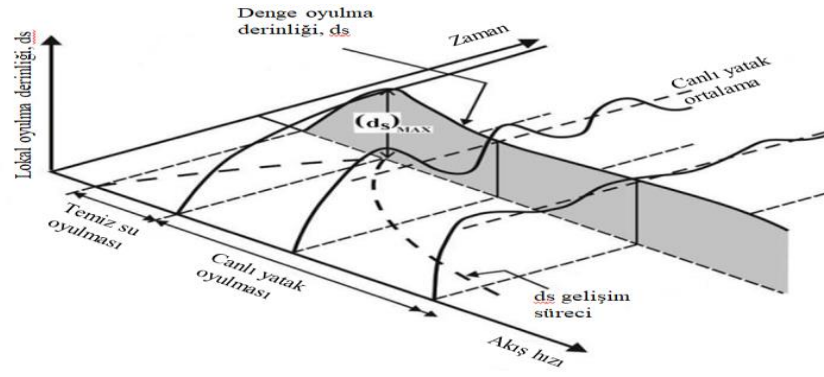
### 3.1.6 Akım yoğunluğunun etkisi, $U / U_c$

Oyulma araştırmalarında, nehir yatağına etki eden hidrolik kuvvetleri tanımlamak için kullanılan merkezi bir parametre ise, akım yoğunluğu parametresi  $U/U_{kritik}$ 'tir.  $U$  değeri, bozulmamış yaklaşma akımının ortalama akım hızını,  $U_{kritik}$  ise,  $d_{50}$  yatak malzemesi için kritik ortalama akım hızını tarif eder (Melville ve Coleman, 2000). Akım yoğunluğuna bağlı olarak, ayaklardaki yerel oyulma; 1) Temiz su koşulunda yerel oyulma 2) Canlı yatak koşulu altında yerel oyulma olarak sınıflandırılabilir. Eşik koşulu, yani  $U/U_c \approx 1$ 'e kadar olan akım hızları için temiz su oyulması meydana gelir. Bu durumda, oyulma çukurunda tortu kaynağı yoktur. Tortu malzemelerinin hareketi, sadece köprü ayakları gibi engeller etrafında gerçekleşir. Bununla birlikte, canlı yatak oyulması durumunda, oyulma çukuruna, menba akım tarafından sürekli olarak tortu verilir. Canlı yatak oyulma durumunda,  $U/U_c$  oranı 1'den büyüktür. Akım yoğunluğu olan köprü ayaklarındaki oyulma derinliğinin, hız-zaman ve akım koşulları ile değişimi, grafik olarak Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

$U/U_c < 0,3-0,5$ ; ise oyulma olmaz; yaklaşma akım hızı, köprü ayaklarında aşındırıcı işlemi başlatmak için yeterli değildir. Literatürde;  $0,5U_{kritik}$  (Zanke, 1982a) değeri, Chiew (1995) ile Mia ve Nago (2003) tarafından bulunan  $0,3U_{kritik}$  Jones ve Sheppard (2000) tarafından bulunan  $0,4U_{kritik}$  den daha geçerlidir.

$0,5 < U/U_c \leq 1$  ise; temiz su oyulması meydana gelir, ancak yukarı akımdan oyulma bölgesine hiçbir nehir yatağı malzemesi taşınmaz. Oyulma derinliği  $U$  ile neredeyse doğrusal olarak artar. Üniform bir malzemede, maksimum denge oyulma derinliği oluşur.

$1 < U/U_c$  ise; canlı yatak oyulma işlemi, genel tortu taşınması koşulları altında meydana gelir. Oyulma derinliği  $U$  ile daha fazla artmaz ve hareketli yatak malzemesinin etkisi nedeniyle oyulma zamanla değişim gösterir. Bazen artan  $U$  ile oyulma miktarı olan  $d_{se}$ 'de hafif bir azalma da görülebilir.



**Şekil 3.20 :** Akım yoğunluğu ile oyulma derinliğinin değişimi,  $U/U_c$  ( Melville ve Coleman, 2000).

**Çizelge 3.6 :** Farklı yatak taban koşulları altında denge oyulma derinliğinin değişimi (Richardson ve Davis, 2001).

| Yatak Taban Koşulu | Akarsu taban malzeme katman kalınlığı $H$ [m] | $K_b$     |
|--------------------|-----------------------------------------------|-----------|
| Temiz su oyulması  | -                                             | 1,1       |
| Düz yatak          | -                                             | 1,1       |
| Küçük dalgalanma   | $0.6 \leq H < 3$                              | 1,1       |
| Orta dalgalanma    | $3 \leq H < 9$                                | 1.1 – 1,2 |
| Büyük dalgalanma   | $9 \leq H$                                    | 1.3       |

Çizelge 3.6'da yatak düzeltme faktörü olan  $K_b$ , akarsuyun yatak yüzey formuna ve taban malzemesinin katman kalınlığına bağlı olarak araştırmacı tarafından gösterilmiştir.

Unger (2006), akımın hidrolik koşullarını tanımlamak için  $U/U_{kritik}$  yerine, kritik olan  $F_r/F_{r,kritik}$  kullanmıştır.  $F_{r,kritik}$ , yatak materyalinin pürüzsüz ve türbülanslı akım koşulları arasındaki geçiş alanı içinde olduğu zaman, parçacık hareketinin başlangıcındaki viskoz etki ve malzeme yoğunluğunu içerir. Denge oyulma derinliği  $d_{se}$ ,  $U=U_{kritik}$ 'te meydana gelir (Melville, 1997). Sonuç olarak, denge oyulma derinliği  $U>U_{kritik}$  olduğunda güçlü taşkınlarda meydana gelebilecek, muhtemelen ulaşılabilir maksimum oyulma derinliği  $d_{se}$ 'ye eşit değildir. Araştırmacılar, oyulmadan kaynaklanan köprü arızalarının çoğunun, feyezan sırasında önemli bir tortu miktarının taşındığı taşkınlarda meydana gelmesine rağmen, temiz su akım koşulu altında en çok oyulma derinliğine ulaşıldığı ifade etmektedirler.

Yatak düzeltme faktörü  $K_b$ , düz yatak koşuluna sahip akarsu için oluşan maksimum oyulma miktarının, hesaplanandan %10 daha fazla olabileceği gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Taşkın akımı sırasında büyük kumullara sahip bir akarsuyun mevcut olması durumunda, maksimum ayak oyulmasının hesaplanan değerden %30 daha fazla olacağını göstermektedir. Bu sadece tabanı büyük kumul kaplı olan büyük nehirlerde meydana gelebilmektedir. Taşkın akımı sırasında, kumul yatağı konfigürasyonuna sahip küçük akarsularda ise, yatak konfigürasyonunun maksimum oyulma üzerindeki etkisi, sadece %10 ila %20 daha fazla olmaktadır(Richardson ve ark., 2002).

### 3.1.7 Froude sayısı $Fr$ ve Reynolds sayısı $Re$ 'nin etkisi

Ettema ve arkadaşları (1998) ile Ettema ve diğerleri (2006), yaptıkları araştırmalarla oyulmalar üzerinde Froude sayısı ve Reynolds sayısının etkilerini araştırdılar.

Froude sayısı; denklem (3.9);

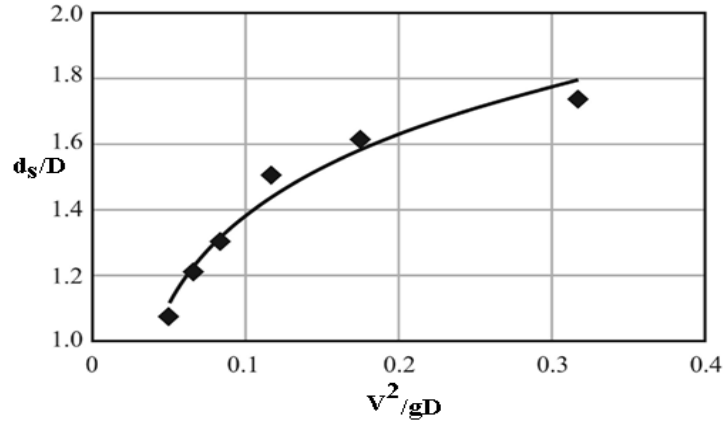
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (3.9)$$

Reynolds sayısı denklem (3.10) ;

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (3.10)$$

ile ifade edilirler.

Bu değerler, türbülans ve girdap oluşma sıklığı ile ilişkili akım enerjisini karakterize eden türbülans parametreleridir. Araştırmacılar; viskozite açısından Reynolds sayısının, köprü ayaklarındaki oyulma derinliğinde etkisinin olmadığını öne sürmüşlerdir. Bununla birlikte, Reynolds sayısı ise türbülansın sıklığını etkiler. Ayak boyutu ne kadar darsa, Froude sayısı o kadar büyük olur ve bu nedenle oyulma derinliği o kadar az olur. Ettema ve ark. (2006) laboratuvar ölçekli testlerde Froude sayısı etkisini açıklamak için kullanılabilecek düzeltme faktörünü tanımlamıştır. Şekil 3.21, oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimini göstermektedir.



**Şekil 3.21 :** Oyulma derinliğinin Froude sayısı ile değişimi (Ettema ve ark., 2006).

### 3.1.8 Ayak boyutunun etkisi

Denge yerel oyulma derinliği,  $b$  ile tanımlanan ayak boyutu ile doğru orantılıdır (Ettema, 1980). Göreli ayak büyüklüğü  $b/d_{50} < 50$  değeri için, taban malzemesinin oldukça iri olduğu ve tabanda menba tarafında birikmesi sonucu akım enerjisini sönmülediğini, böylece ayaklar etrafında oyulmanın azalacağını ifade etmektedir (Breusers ve Raudkivi, 1991). Göreli ayak büyüklüğü olan  $b/D_{50} \geq 50$  için ise oyulma derinliğinin dane çapından etkilenmediği ifade etmiştir. Yani, göreli ayak büyüklüğü değeri olan düzeltme faktörü değeri  $K_D = 1$  olmaktadır. Ayak boyutunun ise, temiz su oyulma sürecinde, taban maddesinin oyulması için gereken süreyi etkilediğini bulunmuştur. Ayak çapları ne kadar büyük olursa oyulmaya muhatap olan etki alanı o kadar uzun olur. Göreceli oyulma derinliğinin büyüklüğü  $d_{se}/D$ ; göreceli derinlik olan  $h/D$  ve göreceli tane büyüklüğü olan  $b/d_{50}$  hariç tutulursa, ayak boyutundan etkilenmez. Ayağın menba tarafında oluşan yerel oyulma çukurunun hacmi, öngörülen eşdeğer ayak genişliği veya çapının küpü ile orantılıdır (Raudkivi, 1998).

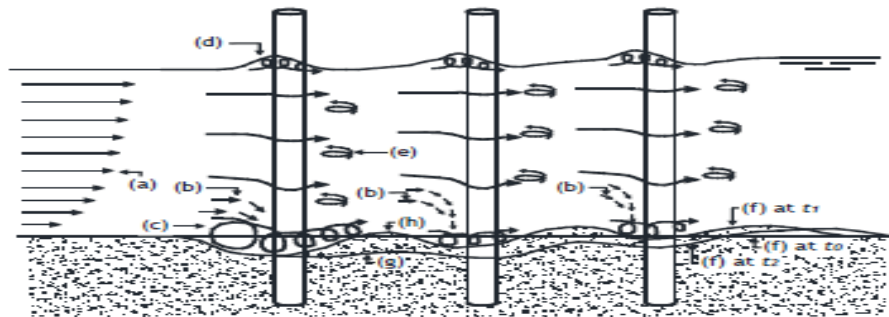
### 3.1.9 Ayakların grup etkisi

Yapısal nedenlerden dolayı, büyük bir köprü ayağı yerine, birbiri ardına düzenlenen bir grup köprü ayağı inşa edilebilir. Bu durumda, ayakların etrafındaki akımın birbirine karışması nedeniyle negatif akım koşulları oluşabilir. Grup etkisi, akım yönünde hizalanmış ve/veya akıma dik olarak hizalanmış bir grup köprü ayağının konumlanmasından oluşur. Grup etkisi, esas olarak ayaklar arasındaki mesafeye, ayakların yönü ve konumuna bağlıdır. Başak ve arkadaşları (1975), dikdörtgen köprü ayak gruplarını incelemiş ve 1977 yılında silindirik ayak gruplarını inceleyerek araştırmasını geliştirmiştir. Çeşitli deneyler yaparak aç ve aralarındaki mesafe gibi

bazı parametreleri değiştirerek silindirik köprü ayak grupları çevresinde yerel oyulma derinliğini araştırmıştır (Sabit  $Fr=0.55$ ). Eşit mesafelerde lineer bir eksende düzenlenmiş eşit büyüklükteki silindirik ayaklardan oluşan grupta, ayaklar arasındaki mesafeye, ayakların büyüklüğüne, sayısına ve akım ile yaptığı açıya bağlı olarak, grubu oluşturan her bir ayağın tüm yüzeylerinde gözlenen oyulma derinliğinin değişimi incelemiştir (Başak ve ark., 1977).

Akım yönü, ayak grubu eksenine ( $\alpha=0^\circ$ ) paralel olduğunda, maksimum oyulma derinliği, grubu oluşturan ayakların sayısından bağımsız olarak, ilk ayağın membaında gerçekleşir. Her zaman tek bir ayağın oyulması birbirine eşittir. Ön ayaklar ilk başta akıma maruz kaldıklarından ve sonraki ayakları akıma karşı koruduklarından, akımın gücü arka ayaklarda azalır. Şekil 3.22’de, ( $\alpha=0^\circ$  için) grup etkisi altındaki ayaklar etrafında oluşan akım ve oluşan oyulma şekli gösterilmektedir.

Akım yönünün eksenine karşı bir açı oluşturması durumunda ayak grubu ( $\alpha>0^\circ$ ) ise, grup etkisi, oyulma derinliğini artırma eğilimindedir ve oyulma tek bir ayağın oyulma miktarından daha fazla olur. Ayrıca akım; ayak grubunun eksenine dik ( $\alpha=90^\circ$ ) olduğunda, maksimum oyulma derinliği tek bir ayağın oyulmasından daha da fazla olmaktadır.



(a) Yaklaşım akımı

(b) Aşağı akım

(c) Atnalı girdap

(d) Yay dalgası

(e) Uyanık girdap

(f) Oyulma şekli

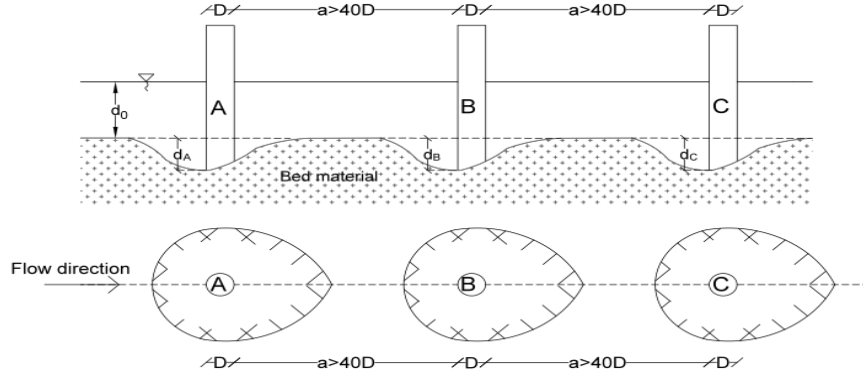
(g) Etkileşimsiz oyulma şekli

(h) Siperlenme yığıntısı

**Şekil 3.22 :** Ayakların akım ile hizalanması ( $\alpha=0^\circ$ ) (Lança, 2013).

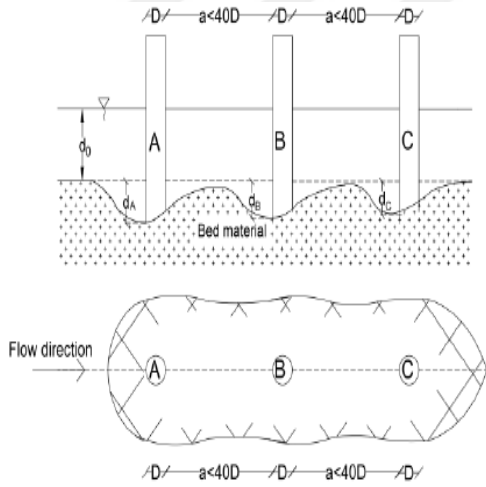
Deney sonuçlarına göre; Başak, köprü ayakları arasındaki mesafe  $D>40$  ise, ayak grubunu oluşturan tüm ayakların  $\alpha=0^\circ$  olduğunda oyulmaların birbirinden bağımsız

ve yaklaşık eşit miktarlarda olduğunu gözlemlemiştir. Şekil 3.23’de gösterilen konfigürasyondaki bir ayak grubunda oluşan oyulma paterni görülmektedir.



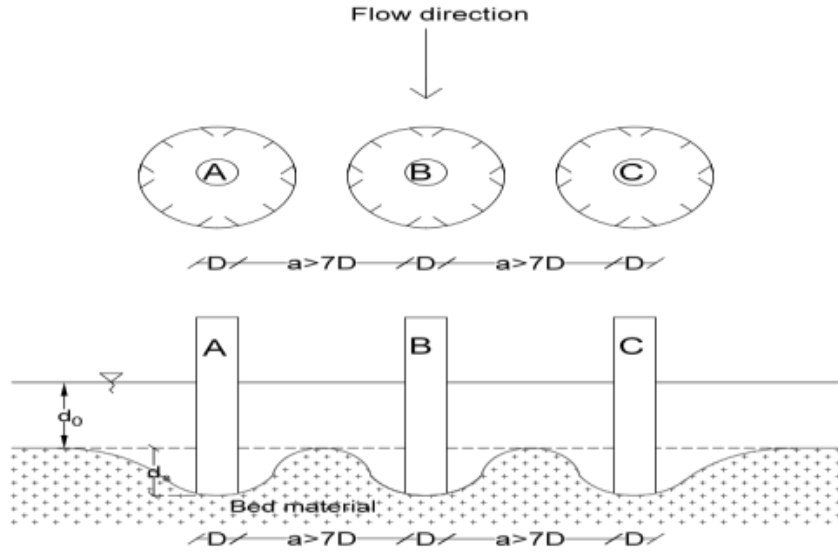
**Şekil 3.23 :**  $\alpha=0^\circ$  ve  $a>40D$  için ayaklardaki grup etkisi (Başak ve ark., 1977).

Akımın ayaklar ile hizalandığı ve ayaklar arası mesafenin  $a<40D$  olduğu durumda ise, en büyük oyulma menba tarafında gerçekleşir. Bu oyulma durumu Şekil 3.24’de gösterilmektedir. Bu ara uzaklık sınırları içerisinde her bir ayağın oyulma alanı birbirleri ile girişim yaparak gelişir.



**Şekil 3.24 :**  $\alpha=0^\circ$  ve  $a<40D$  için ayaklardaki grup etkisi (Başak ve ark., 1977).

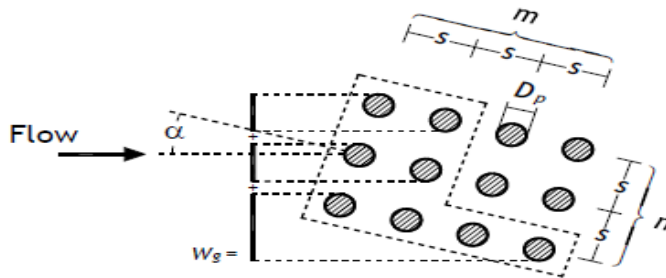
$\alpha=90^\circ$  , ayak grubu arasındaki mesafe  $D>7$  ise her bir ayak, birbirini etkilemeden ve eşit oyulma süreci yaşarlar. Etraflarında ayrı oyulma delikleri oluşur ve grup etkisi gözlenmez. Bu oyulma durumu Şekil 3.25’de gösterilmektedir (Başak ve ark., 1977).



**Şekil 3.25 :**  $\alpha=90^\circ$  ve  $a>7D$  için ayaklardaki grup etkisi (Başak ve ark., 1977).

Ayaklar arasındaki mesafe  $\alpha=0^\circ$ , ayak grubu arasındaki mesafe  $D=1$  olması durumunda, tek bir oyulma deliği oluşur. Oyulma, en fazla menba tarafına yakın ayaklarda daha fazla olacak şekilde gelişir.

Akıma çarpık birden fazla köprü ayağı için, oyulma derinliği, ayaklar arasındaki mesafeye bağlıdır. Akım açısı düzeltme faktörü, tek ayaklı bir köprünün için olandan daha küçük olacaktır.  $S/D_p$ , ayak merkezleri arasındaki mesafenin dairesel ayağın çapına oranını ifade etmektedir ve Şekil 3.26’da gösterilmiştir. ‘n’ değeri ise akım yönüne dik sıralanmış ayak veya kazık grup sayısını ifade eder. Burada  $n=1$  ise, akım yönüne dik yan yana 2 adet dairesel kolonu veya kazığı,  $n=2$  ise 3 adet dairesel ayak veya kazığın var olduğunu açıklamaktadır. Çizelge 3.7’de ise, dairesel kesit için atak açısı faktörünün, ayak grup sayısının farklı olması durumundaki değişimi gösteren tablo bulunmaktadır. Bu tablo, eşdeğer dairesel kesitli köprü ayakları veya oyulma sonucu açığa çıkmış kazık grupları için geçerlidir.



**Şekil 3.26 :** Dairesel ayak veya kazık grubunun akım ile  $\alpha$  açısı ile hizalanması (Lança, 2013).

**Çizelge 3.7 :** Dairesel köprü ayak veya kazık gruplarında, atak açısı faktörü (Melville, 1997).

| Ayak veya kazık grup sayısı(n) | S/D | K $\alpha$         |                               |                     |
|--------------------------------|-----|--------------------|-------------------------------|---------------------|
|                                |     | $\alpha < 5^\circ$ | $\alpha = 5^\circ - 45^\circ$ | $\alpha = 90^\circ$ |
| 1                              | 2   | 1.12               | 1.40                          | 1.20                |
|                                | 4   | 1.12               | 1.20                          | 1.10                |
|                                | 6   | 1.07               | 1.16                          | 1.08                |
|                                | 8   | 1.04               | 1.12                          | 1.02                |
|                                | 10  | 1.00               | 1.00                          | 1.00                |
| 2                              | 2   | 1.50               | 1.80                          | -                   |
|                                | 4   | 1.35               | 1.50                          | -                   |

Raudkivi, hizalama durumlarının etkilerini araştırırken, silindirik formdaki ayakların kullanımının daha sık bir oyulma ürettiğini gözlemlemiştir. Araştırmada, 5D çaplı aralıklarla yerleştirilmiş köprü ayağındaki yerel oyulmanın, tek bir silindirdeki yerel oyulmanın yaklaşık 1,2 katı olduğunu gözlemlemiştir. Köprü ayakları arasındaki mesafenin 5D'den büyük olması durumunda enkaz yığılmasının akım rejimine etkisinin olmadığını da söylemektedir.

### 3.1.10 Daralmanın etkisi

Clark ve ark. (1982), daralmanın etkisini kanal genişliği ile ayak çapının oran sınırlamasına bağlamışlardır. Deneysel sonuçlara dayanarak kanal genişliği ile ayak çapının sınırlama oranını yaklaşık  $W/D \leq 5$  olarak saptamışlardır.  $W/D \geq 7$  durumu olması halinde, oyulmalar üzerinde daralmanın etkisinin artacağını, bu nedenle dikkatle ele alınmasını önermektedir. Whitehouse (1998) ise, ayakların genişliğinin kanal genişliği oranının 1/6'dan daha az olmasını önermektedir. Chiew ve Ettema (2003) tıkanma etkilerini ihmal etmek için kanal genişliğinin % 8-10'dan daha küçük bir değerde olmasını önermektedir. Mia ve Nago (2004), kanal genişliğinin %10-12'sinden daha büyük bir ayak çapının, akım daralması nedeniyle ayak yakınındaki akımı etkileyeceğini belirtmektedir. Bu konu üzerinde araştırmaların çoğaltılması ihtiyacı bulunmaktadır.

Bu konudaki çalışma yapan Laursen (1960) ve daha sonra bunu geliştiren Richardson ve Davis (2001) tarafından, daralmanın fonksiyonunu tanımlayan  $\beta = W_1/W_2$  daralma sayısına bağlı olarak temiz su koşulları altında daralma oyulması formülü geliştirdiler. İlk olarak Laursen (1960) tarafından ortaya konan formülasyon,

Richardson ve Davis (2001) tarafından düzenlenmiş hali; denklem (3.11) ile ve sınır faktörlerini gösteren şema ise Şekil 3.27’de gösterilmiştir.

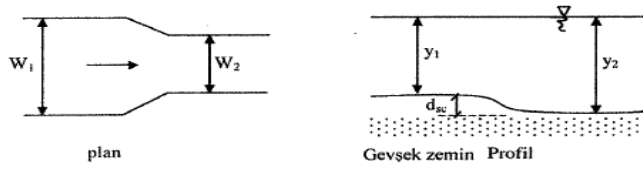
$$y_2 = \frac{0.0235Q^2}{d_{50}^{2/3}W^2} \quad (3.11)$$

$d_{sc}$ : Daralma oyulması sonucu oluşan oyulma,

$Q$ : Daralmış kesitteki debi ( $m^3/sn$ ),

$W$ : Köprü geçiş aksındaki ayak genişlikleri çıkarılmış kanal genişliğidir (m).

$d_{50}$ : Taban malzemesi dane medyan çapı(m).



**Şekil 3.27 : Daralma oyulmasının sınır faktörleri (Yanmaz, 2002)**

Bu araştırmacıların dışında, Komura (1966), temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması için deneysel metotlardan elde ettiği amprik formül geliştirmiştir.

Temiz su oyulması için denklem (3.12);

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.6F_{r1}^{0.2}\beta^{0.67}\sigma^{-0.5} \quad (3.12)$$

Hareketli taban oyulması için ise denklem (3.13)’de tanımlanmıştır.

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.45F_{r1}^{0.2}\beta^{0.67}\sigma^{-0.5} \quad (3.13)$$

$\sigma_g$  : Taban malzemesi dane dağılım standart sapması,

$Fr_1$ : Yaklaşım kesitindeki Froude sayısı,

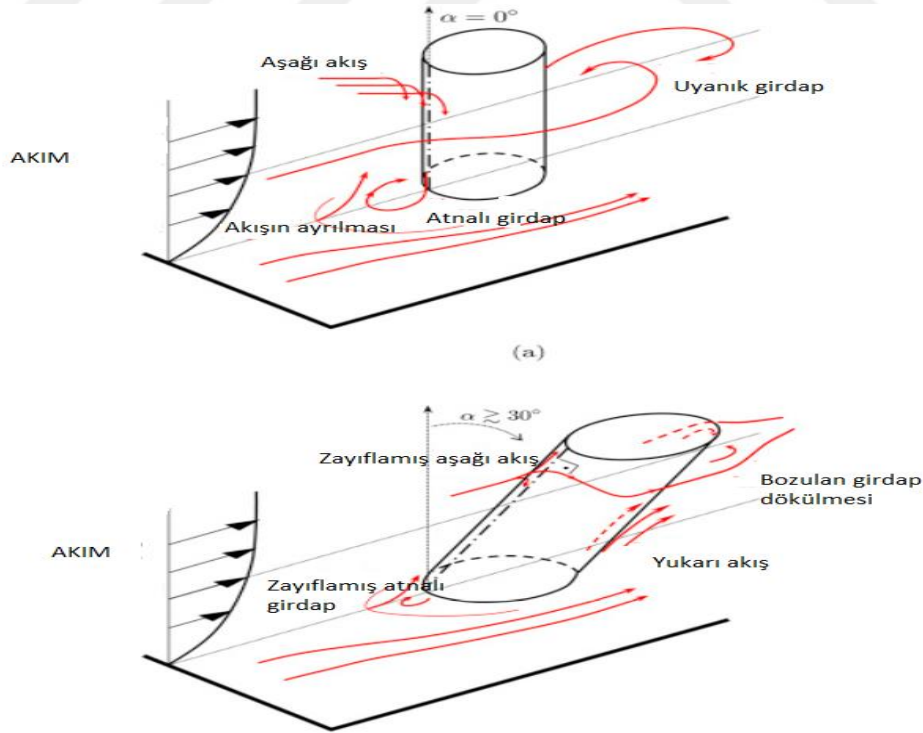
$W_1$ : Yaklaşım kesitindeki kanal genişliği (m),

$W_2$ : Daralmış kesitteki ayak genişlikleri çıkarılmış kanal genişliği (m),

$\beta=W_1/W_2$

### 3.1.11 Ayakların akım doğrultusunda düşeyle eğimli olarak teşkil edilmesinin oyulma üzerindeki etkisi

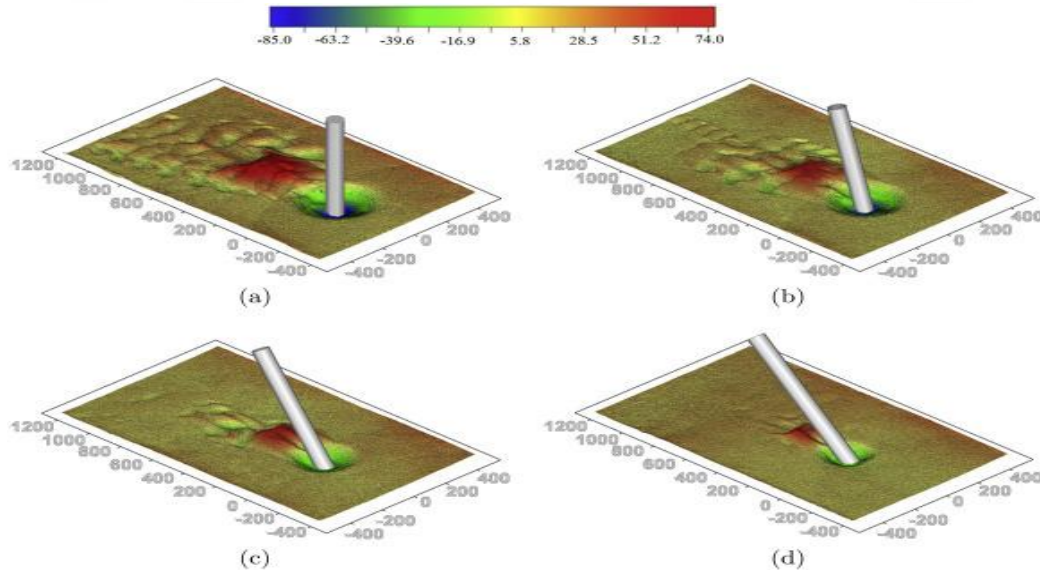
Köprü ayakları veya temelini teşkil eden kazıklar, her zaman dik olarak yerleştirilemez. Kıyı ve açık deniz mühendisliği uygulamalarında ayaklar genellikle, eğimli olarak veya daha karmaşık formlara sahip şekilde olabilirler. Örneğin, okyanuslarda, tripod rüzgâr türbini temeli, üç adet eğimli yapısal kirişlerle bağlanan silindir şeklinde bir ayağı içerir. Benzer şekilde, daha fazla sağlamlık ve yanal dalga yüklerine karşı daha fazla mukavemet için kazık destekli iskele, eğimli kazık grupları ile tasarlanabilir. Eğimli kazıkların var olması halinde, düz yerleşimli ayaklara kıyasla akışkan, daha farklı akım etkileşimine girer. Bu tür ayak yerleşiminde, oluşan akım şekilleri silindir ayak üzerindeki yükleri önemli ölçüde değiştirmektedir. At nalı girdabı dik silindir olması durumuna göre daha güçlü gelişemez. Sümer ve ark., (1995), yukarı doğru ve akım doğrultusunda azalan konik kesitli bir ayaktaki yatak kayma gerilmesi ölçümleri ile benzer sonuca ulaşmışlardır. Ölçümlerinde, atnalı girdabının oluşturduğu kayma gerilmelerinin, eğimli yüzeyde önemli ölçüde azaldığını göstermişlerdir. At nalı girdap oluşumunun zayıflamasına ek olarak, diğer oyulmayı artırıcı akım mekanizmasında da azalma gözlemlenir. Şekil 3.28’ de dik konumlanmış ayak ile düşeyde eğimli teşkil edilmiş ayak etrafında gelişen ve değişen akım şekli gösterilmektedir (Kırca ve ark.,2017).



**Şekil 3.28 :** Düşey ve akım yönünde düşeyden eğimli teşkil edilen silindirik ayak etrafında gelişen akım şekli (Kırca ve ark, 2017)

Kırca ve arkadaşları; yapmış olduğu deneysel çalışmalarda, düşey ve düşeyle  $14^\circ, 30^\circ$  ve  $42^\circ$  açı ile akım doğrultusunda konumlanmış dairesel ayak etrafındaki oyulma ve tortu birikmesini incelemiştir ve Şekil 3.29'da gösterilmektedir. Yapılan çalışmada, düşeyle  $0^\circ$  olan ayağa göre, eğimli teşkil edilen ayak etrafındaki oyulma miktarı ve oyulma paterninin eğim arttıkça azaldığını göstermektedir. Buna karşılık tortu birikme yığılma yüksekliğinde her üç açı durumu için de %35 miktarında azalma gözlemlenmiştir.

Ayakların veya kazıkların menba tarafına doğru düşeyle eğim teşkil edecek şekilde yapılması durumunda ise bu konu ile ilgili araştırma bulunmamaktadır. Ancak bu yerleşim şeklinde, girdap oluşumu ve akım davranışının, ayakların yatak seviyesindeki düşey izdüşümünden önce gelişmesi sebebi ile oyulmaları artırıcı yönde etkisinin olacağı düşünülmektedir.

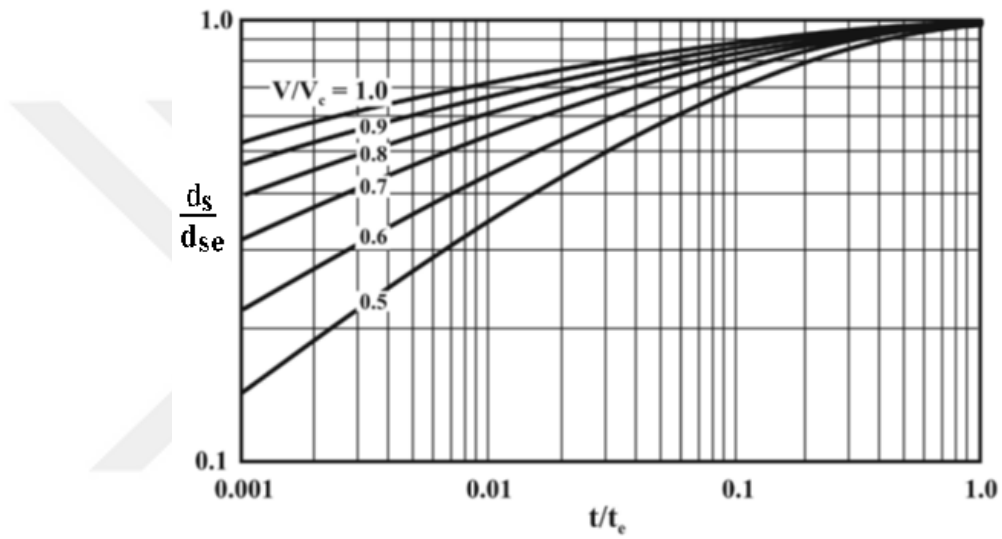


**Şekil 3.29 :** Düşey ve düşeyden eğimli teşkil edilen silindirik ayak etrafında gelişen oyulma ve tortu birikimi ( $a=0^\circ, b=14^\circ, c=30^\circ, d=42^\circ$ ) (Kırca ve ark, 2017)

### 3.1.12 Oyulma derinliğinin zamansal değişimi

Breusers ve ark.(1977) ve Melville ve Chiew (1999)'a göre; temiz su koşulları altında yerel oyulma derinliği, zamanla denge durumuna ulaşacağını ifade etmektedirler. Denge yıkama derinliğinin oluşma süresi ise sonsuz olabilir. Ancak, canlı yatak oyulma durumunda, oyulma derinliği denge durumuna çok daha hızlı ulaşır. Şekil 3.30'da temiz su ve canlı yatak hareketli taban koşulları altındaki oyulma derinliğinin zamansal değişiminin temel fonksiyonunu göstermektedir. Oyulma işleminin farklı etmenlere bağımlılığı ve karmaşıklığı nedeniyle, belirli bir zaman dilimi içinde oluşacak maksimum oyulma derinliğinin tahmini çok zordur. Bu

nedenle, farklı araştırmacılar, oyulma derinliğinin zamansal değişimi arasındaki ilişkiyi çözmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Köprü ayaklarının güvenli ve ekonomik tasarımı için oyulma derinliğinin zamanla değişimini bilmek çok önemlidir. Köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin zamansal değişiminin ilk araştırma çalışmaları Chabert ve Engeldinger (1956) gibi çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmıştır; Hannah (1978); Ettema (1980); Yanmaz ve Altınbilek (1991); Kothiyari ve ark. (1992); Nazariha (1996); Melville ve Chiew (1999); Melville ve Coleman (2000); Oliveto ve Hager (2002); Mia ve Nago (2003); ve Kothiyari ve ark. (2007) bu konu üzerinde araştırma yapan diğer araştırmacılarıdır.



**şekil 3.30 :** Oyulma derinliğinin zamansal değişimi (Melville ve Chiew, 1999).

Chabert ve Engeldinger (1956), köprü ayaklarında, zaman ve hızın temiz su ve canlı yatak oyulması üzerine etkisini araştırmak için deneysel çalışmalar yapan ilk araştırmacılarıdır. Birkaç saatten güne kadar farklı kanallar, ayak boyutları kullanarak yaklaşık 300 deneysel çalışma gerçekleştirdiler.

Ettema (1980), tarafından bir köprü ayağının etrafındaki denge oyulma derinliğine ulaşma süresinin yaklaşık 14 gün olduğunu deneysel araştırmaları sonucu elde etmiştir. Oyulma çukuru oluşumunun, üç farklı aşamasını şu şekilde sınıflandırmıştır: başlangıç aşaması, erozyon aşaması ve denge aşaması. İlk başlangıç aşamasında, oyulma çukuru hızlı bir şekilde oluşmaya başlamaktadır. Erozyon fazında, oyulma çukurunun gelişimi, at nalı girdabının büyüklüğüne ve gücüne bağlı kalmaktadır. Son olarak denge fazın da ise, belirli bir boyuttaki ayakta, tortu ve akım durumu için denge oyulma derinliği oluşmaktadır. Yanmaz ve Altınbilek(1991), köprü ayaklarının etrafındaki oyulma çukurlarının zamana bağlı olarak belirlenmesi için bir

dizi deneysel test yapmıştır. Deneyler; 5 dakika, 20 dakika, 60 dakika ve 150 dakika gibi farklı test süreleri için gerçekleştirilmiştir. Oyulma derinliğini zamanın bir fonksiyonu olarak belirlemek için tortu sürekliliği denklemine dayanan yarı ampirik bir diferansiyel denklem geliştirmişlerdir.

Kothyari ve ark. (1992), sabit ve kararsız berrak su akımı altında düzgün, üniform olmayan ve tabakalı yataklara yerleştirilmiş dairesel bir köprü ayağı etrafındaki oyulma derinliğinin zamansal değişimi üzerinde bazı deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadan, ayak önündeki birincil girdabın oyulmaya neden olan ana etmen olduğu gerçeğine dayanarak, deney koşulları altında oyulma derinliğinin zamansal değişimini hesaplamak için bir metot geliştirmişlerdir. Nazariha (1996), oyulma derinliğinin zamansal değişimini incelemek için uzun süreli deneysel testler gerçekleştirmiştir. Deneylerini 90 saat boyunca gerçekleştirmiştir. Deneyinden, en fazla tortu gideriminin ilk yarım saat içinde meydana geldiği sonucunu elde etmiştir. Bundan sonra ise oyulma oranı yavaşlamıştır. Ayrıca, toplam oyulma oluşumunun yaklaşık %83'ünün ilk iki saat içinde gerçekleştiği sonucuna varmıştır.

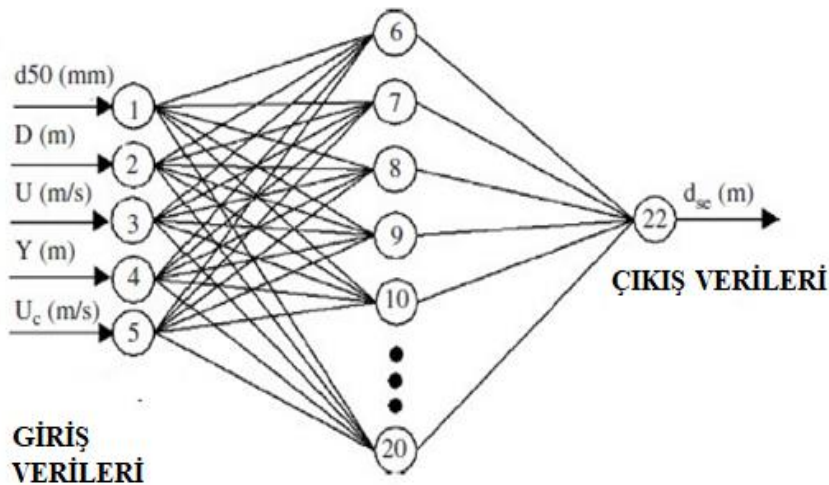
Melville ve Chiew (1999), düzgün kum yataklarındaki silindirik köprü ayaklarında temiz su yerel oyulmasının zamansal gelişimi için bir dizi deneysel test gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, oyulma derinliğinin zamanla gelişiminin, denge oyulma derinliğine ulaşmasının sonsuz zaman alabileceğini belirtmişlerdir. Böyle bir zorluğun üstesinden gelmek için denge oyulma derinliğine yeni bir zaman tanımı getirdiler: Bu zaman tanımı, “oyulma çukurunun, oluşumundaki artış oranının % 5'i aşmadığı bir derinliğe kadar geliştiği zaman” olarak tanımlamışlardır. Bunu izleyen 24 saatlik dönemdeki oyulma miktarının ise, köprü ayak çapının % 80'i olacağını ifade etmişlerdir.

Oyulma derinliğinin zamansal değişimi ile ilgili yukarıdaki tüm araştırmacılar ortak bir sonucu varmışlardır. Bu da yerel oyulma derinliğinin zamanla asimptotik olarak arttığını ve son olarak denge değerine ulaştığını belirtirler. Bununla birlikte, hiçbir araştırmacı denge oyulma derinliğine ulaşmak için gerekli tam zamanı tanımlayamamıştır. Denge oyulma derinliğini geliştirmek için zamanı tahmin etmek için geliştirilmiş çeşitli denklemler vardır. Denge temiz su oyulma derinliğinin oluşması çok uzun (belki de sonsuz) bir zaman alabilir (Melville ve Chiew, 1999). Denge oyulma derinliğine ulaşmadan önce, oyulma derinliği, özellikle başlangıçta,

### 3.2 Denge Oyulma Derinliğinin Tahmini

Son yıllarda ampirik denklemlerden farklı bir yaklaşım metodu geliştirilmiştir. Köprü ayak oyulmalarını tahmin etmek için, ‘Yapay Sinir Ağları(YSA)’ uygulaması

birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. YSA'lar, bilinmeyen çeşitli değişkenlere bağlı fonksiyonları yakın hale getirmek için kullanılan, biyolojik sinir ağlarından (yani beyin sinir yapısından) esinlenen tahmini matematiksel modellerdir. YSA'lar birçok bilim dalına uygulanmıştır. Bu metot; su mühendisliği alanında, yağmur yoğunluğu, nehir taşkınları, gelgit ve deprem kaynaklı sivilaşma tahminini gibi çeşitli bilimsel değerlendirmelerde kullanılmıştır (Lee ve ark., 2007). Geleneksel ampirik denklemlerle yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında, YSA'lar girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki karmaşık doğrusal olmayan ilişkiyi esnek bir şekilde gerçekleştirme yeteneğine sahiptir. Ayrıca yöntem, daha önce birbirleri ile açık bir ilişkinin varsayılmasının gerekmediği ve altta yatan ana mekanizma hakkında bilgi gerekmediği durumlarda kullanılan veri odaklı bir yaklaşımdır. YSA ile modellemede, Şekil 3.32'de gösterilen beş girdi değişkeni seçilmiştir. Bunlar; ortalama partikül çapı, ayak çapı, ortalama akım hızı, akım derinliği ve kritik hızdır. Daha sonra ise optimum doğrusal olmayan bir ilişki kurulur (Bateni ve ark., 2007). Bir regresyon analizinde olduğu gibi, fonksiyon giriş ve çıkış nöronlarını ilişkilendirmek için ayarlanmış bir dizi kalibrasyon sayısını içerir. Daha sonra ağ, nöronların transfer fonksiyonu tarafından gizli katmandan girişleri işlediği ve çıktılar ürettiği yeni bir veri kümesinde doğrulanır veya uygulanır. Bateni ve ark., (2007) çalışmasında, 3 farklı deneyden 180 veri ve doğrulama için de 83 veri kullanmıştır. Giriş veri süreci hesaplama açısından yoğun olabilir, ancak en uygun işlev belirlendikten sonra çıktılar hızla üretilir.



**Şekil 3.32 :** YSA'dan yararlanılarak denge oyulma miktarının modellemesi (Bateni ve ark., 2007).

Melville ve Coleman (2000); başlangıçta Melville (1997) tarafından önerilen ve aşağıdaki çizelgede gösterilen formüle ilave olarak, daha sonra Melville ve Chiew (1999) tarafından çalışmaya bir zaman faktörü ekleyerek değiştirilmiş bir oyulma derinliği tahmin denklemi formunu sunmuşlardır. Denklem, oyulma derinliğini etkileyen çeşitli parametrelerin etkileri için çeşitli çarpma faktörlerinden oluşur. Denklem, oyulma derinliği tahmini için Melville(1997) de görülen denklemin geliştirilmiş halidir. Bu denklem yalnızca denge yerel oyulma derinliğini tahmin etmek için geçerlidir. Bu çalışmada, Çizelge 3.8’de verilen ve en çok kullanılan (deneysel çalışmalardan elde edilen)amprik iki formül üzerinde açıklamada bulunulacaktır. Bunlar, Melville (1997) denklemi ile HEC-18 olarak ta isimlendirilen Richardson ve Davis (2001) denklemleridir.

**Çizelge 3.8 : Orta ayaklar etrafındaki oyulma bağıntıları (Yanmaz,2002).**

| Araştırmacı              | Standart Denklemler                                                                    | Geçerlilik Şartı                                   |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Laursen 1958             | $\frac{d_z}{b} = 1.34 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.5}$                              | Dairesel Ayak, Max. Temiz Su                       |
| Carsten 1966             | $\frac{d_z}{b} = 0.546 \left( \frac{N_s^2 - 1.64}{N_s^2 - 5.02} \right)^{5/6}$         | Dairesel Ayak, Hareketli Taban (Sediment)          |
| Laursen 1963             | $\frac{d_z}{b} = 1.11 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.5}$                              | Dairesel Ayak, Hareketli Taban                     |
| Hancu 1971               | $\frac{d_z}{b} = 2.42 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{1/3} F_r^{2/3}$                    | Dairesel Ayak, Max. Temiz Su                       |
| Neil 1973                | $\frac{d_z}{b} = K_z$                                                                  | Ks=1.5(dairesel),<br>Ks=2(dikdörtgen)              |
| Bresusers ve Diğer. 1977 | $\frac{d_z}{b} = 2.0 \tanh \left( \frac{d_0}{b} \right)$                               | Dairesel Ayak, Maksimum Temiz Su                   |
| Jain ve Fisher 1980      | $\frac{d_z}{b} = 2.0 (F_r - F_{rc})^{0.25} \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.5}$         | Dairesel Ayak, Hareketli Taban<br>Fr-Frc > 0.2     |
| Günyaktı 1988            | $\frac{d_z}{b} = 1.183 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.471}$                           | Dairesel Ayak, Genel Oyulma                        |
| Günyaktı 1988            | $\frac{d_z}{b} = 1.484 \left( \frac{d_0}{b_t} \right)^{0.569}$                         | Dairesel Olmayan Ayak, Genel Oyulma                |
| Yanmaz 1989              | $\frac{d_z}{b} = 0.85 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.686}$                            | Dairesel Ayak, Max. Temiz Su<br>(2.26 ≥ Ns ≥ 1.16) |
| Yanmaz 1989              | $\frac{d_z}{b} = 1.11 \left( \frac{d_0}{b_t} \right)^{0.654}$                          | Kare Ayak, Max. Temiz Su<br>(2.26 ≥ Ns ≥ 1.16)     |
| Johnson 1992             | $\frac{d_z}{b} = 2.02 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.02} F_r^{0.21} \sigma_s^{-0.24}$ | Dairesel Ayak, Hareketli Taban                     |
| Melvill 1997             | $D_z = K_{yb} K_I K_d K_z K_a$                                                         | Genel Oyulma                                       |
| Richardson ve Davis 2001 | $\frac{d_z}{b} = 2.0 K_z K_a K_b K_t \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.35} F_r^{0.43}$   | Genel Oyulma                                       |
| Yanmaz 2001              | $\frac{d_z}{b} = 1.564 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.405} F_r^{0.413}$               | Dairesel Ayak, Hareketli Taban                     |
| Yanmaz 2001              | $\frac{d_z}{b} = 2.748 \left( \frac{d_0}{b} \right)^{0.556} F_r^{0.859}$               | Dairesel Olmayan Ayak, Hareketli Taban             |

$K_{yb}$  : Akım derinliği ve ayak genişliği oranına bağlı düzeltme sayısı, (Denklem 3.1)

$K_I$  : Akım şiddeti düzeltme sayısı, (Denklem 3.2)

$K_d$  : Akarsu en kesit etkisini gösteren sayı, (Denklem 3.3,Denklem3.4)

$K_s$  : Ayak şekil faktörü, (Çizelge 3.2,Çizelge 3.3)

$K_a$  :Yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü, (Denklem 3.8,Çizelge 3.4)

$K_b$  : Membada taban pürüzlülüğünü gösteren sayı , (Çizelge 3.5)

$K_z$  : Tabandaki zırlanma etkisi faktörü, (Denklem 3.6,Denklem 3.7)

$K_G$  : Akarsu kanal geometri faktörü.

$K_t$  : Zaman faktörü.

b veya(D): Ayak genişliği (m)

bc veya (Dc) : Eşdeğer ayak genişliği

bs veya (Ds) : Sömel genişliği

U : Akım hızı

U<sub>c</sub> : Kritik akım hızı (m/sn)

(Denklem 3.3)

y<sub>1</sub> veya (h) : Su yüksekliği (m)

h<sub>1</sub> : Temel üst kotu ile zemin kotu arasındaki mesafe (m)

h<sub>2</sub> : Temel alt kotu ile oyulmuş zemin kotu arasındaki mesafe (m)

d<sub>s</sub> : Oyulma derinliği (m)

**Melville (1997) formülü:**

Melville (1997) denklemi, orta köprü ayağı veya kenar ayak üzerindeki maksimum yerel oyulma derinliğini hesaplar. Formül, her biri yerel oyulmaya katkıda bulunan faktörleri değerlendiren denklem (3.14)'de gösterildiği gibi, beş ampirik değişken K'nin tanımlanmasına dayanmaktadır. Bu denklem, daralma oyulmasının ihmal edilebilir olduğu durumlardaki ayakların lokal oyulmasını hesaplar. Melville ve Coleman (2000) ise; bu formülü kenar ayakların etki faktörlerini de (K<sub>G</sub>) katarak denklem (3.15)'de gösterilen altı değişkenli bir formül geliştirdiler.

$$d_s = K_{yb} \cdot K_l \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_\alpha \quad (\text{Melville, 1997}) \quad (3.14)$$

$$d_s = K_{yb} \cdot K_l \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_\alpha \cdot K_G \quad (\text{Melville ve Coleman, 2000}) \quad (3.15)$$

Melville formülünde, K<sub>yb</sub> ile akım derinliği ile ayak genişliğinin oranına bağlı olan bir sayı tanımlamıştır. Bu sayı denklem (3.1)'de tanımlanmıştır.

Akım şiddeti faktörü ile ilgili olarak, iki tip lokal oyulma maddesi arasında ayırım yapmak gerekir: (1) temiz su altında  $(F-F_c) \leq 0.2$  ve (2) canlı yatak altında  $(F-F_c) > 0.2$  durumu göz önüne alınır. Temiz su altında oyulma, yatağın hareketine başlamadan önce gerçekleşir ve hareketin başlamasından sonra canlı yatağın altında oyulur. Temiz su altında oyulma tipik olarak taşkın yatağında meydana gelir. Canlı yatağın altında oyulma ise, oyulma çukurunun yakınında tortu taşınması olduğunda ortaya çıkar. Tortu üniform ise, yani derecelendirme sayısı  $\sigma_g \leq 1.3$  ise, zırhlanma oluşmaz. Tersine, tortu üniform değilse, yani derecelendirme sayısı  $\sigma_g > 1.3$  ise, oyulma çukurunun derinliğini azaltan zırhlanma etkili bir şekilde oluşur. Derecelendirme sayısı  $\sigma_g$ , Denklem (3.5)'te verilmiştir. Akım yoğunluğu faktörü K<sub>I</sub>, Denklem (3.2)'den hesaplanır.

Sediment büyüklüğü  $K_d$  faktörü Denklem (3.3) ve Denklem (3.4)'den hesaplanır. Şekil faktörü  $K_s$ , Çizelge 3.2 veya Çizelge 3.3'den yararlanılarak bulunur. Ayağın akım ile hizalanma faktörü  $K_a$ , Çizelge 3.4'den hesaplanır.

İskele şeklindeki köprü durumunda, kanalın geometrisi oyulma miktarını etkilemez. Bu nedenle, iskele köprüünün geometri faktörü  $K_G=1$ 'dir. Abutment durumunda ise,  $K_G$  geometrisi her iki kenar geometrisine bağlı olarak hesaplanır. Melville ve Coleman (2000), temel geometrisinin oyulma üzerindeki etkisini değerlendirmek için etkin ayak genişliğini tarif etmişlerdir. Maksimum oyulma derinliğinin temel üst kotunun altına inmesi durumunda, ayak genişliği ve keson veya temel genişliğinin ağırlıklı etkisi göz önüne alınarak hesaplanan etkin genişlik önermişlerdir. Böyle bir durumda Melville (1997)'de önerilen düzeltme sayılarını hesaplarken, ayak genişliği  $b$  yerine,  $b_e$  değeri kullanılacaktır. Denklem (3.16)'da eşdeğer ayak genişlik formülü verilmektedir. Burada  $y$  değeri, oyulma sonucu oluşan talveg çizgisi ile temel veya kesonun üst seviyesi arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır. Oyulma, temel veya kesonun üzerinde kalıyor ise  $y$  (+) pozitif olarak; oyulma temel veya kesonun üst seviyesinin üzerinde altında kalıyor ise,  $y(-)$  negatif alınır. Bu formülde  $b_s$ , keson veya temelin, köprü ayağı genişliği doğrultusundaki genişliğini ifade etmektedir.

$$b_c = b \cdot \left( \frac{y_1 - y}{y_1 + b_s} \right) + b_s \cdot \left( \frac{b_s + y}{b_s + y_1} \right) \quad (3.16)$$

#### **HEC-18 formülü (Richardson ve Davis (2001):**

HEC-18 formülü kumlu akarsu yataklarındaki maksimum oyulma derinliğini hesaplar aynı zamanda Richardson ve Davis (2001), formülü olarak ta bilinir. Formül, ABD Ulaştırma Bakanlığı'nın Federal Karayolu İdaresi'nin (FHWA) 18 No.lu Hidrolik Mühendisliği Genelgesi'nden(HEC-18) alınmıştır ve denklem (3.17)'de gösterilmektedir. Akım ve oyulma bağıntıları arasındaki ilişki Şekil 3.33'de verilmiştir.

$$\frac{d_s}{y_1} = 2.0 K_s K_a K_b \left( \frac{a}{y_1} \right)^{0.35} F_r^{0.43} \quad (3.17)$$

$y_1$  veya  $(h)$  : Akarsuyun menba tarafındaki su yüksekliği (m)

$d_s$  : Oyulma derinliği (m)

$V_1$  : Köprü'nün menba tarafındaki akım hızı (m/sn)

$a$  : Köprü ayak genişliği (m)

$F_r$  :Froude sayısı  $= V_1/(g \cdot y_1)^{1/2}$

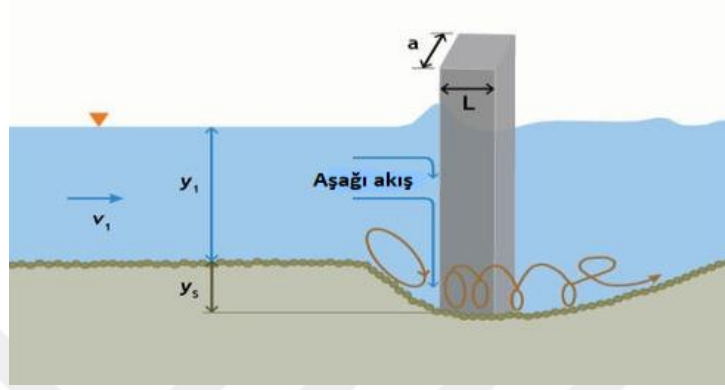
$K_s$  : Ayak şekil faktörü,

(Çizelge 3.7)

$K_a$  :Yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü, (Denklem 3.8, Çizelge 3.4)

$K_b$  : Membada taban pürüzlülüğünü gösteren sayı

(Çizelge 3.5)

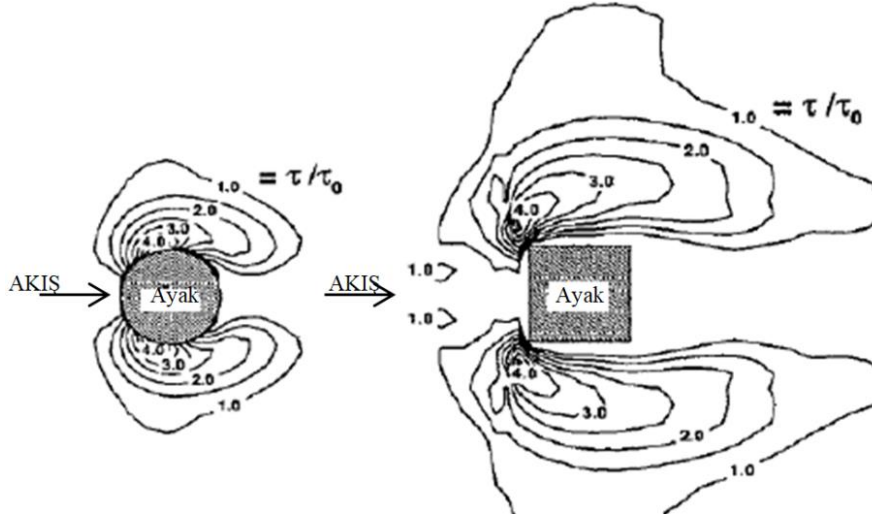


**Şekil 3.33** : Köprü orta ayağında meydana gelen oyulma çukuru (HEC-18).

Tasarım aşamasında bu ampirik formüllerin kullanılmasında en önemli faktörlerden birisi de; deney sınır şartlarının, tasarlanan yapı için geçerli koşullara uygunluğunun tam olmasıdır. Diğer dikkat edilecek olan bir başka konu ise, hangi formül kullanılacak ise araştırmacının kendi deneysel çalışmalarından elde ettiği sabit sayı ve ampirik formüllerin kullanılmasına dikkat edilmelidir.

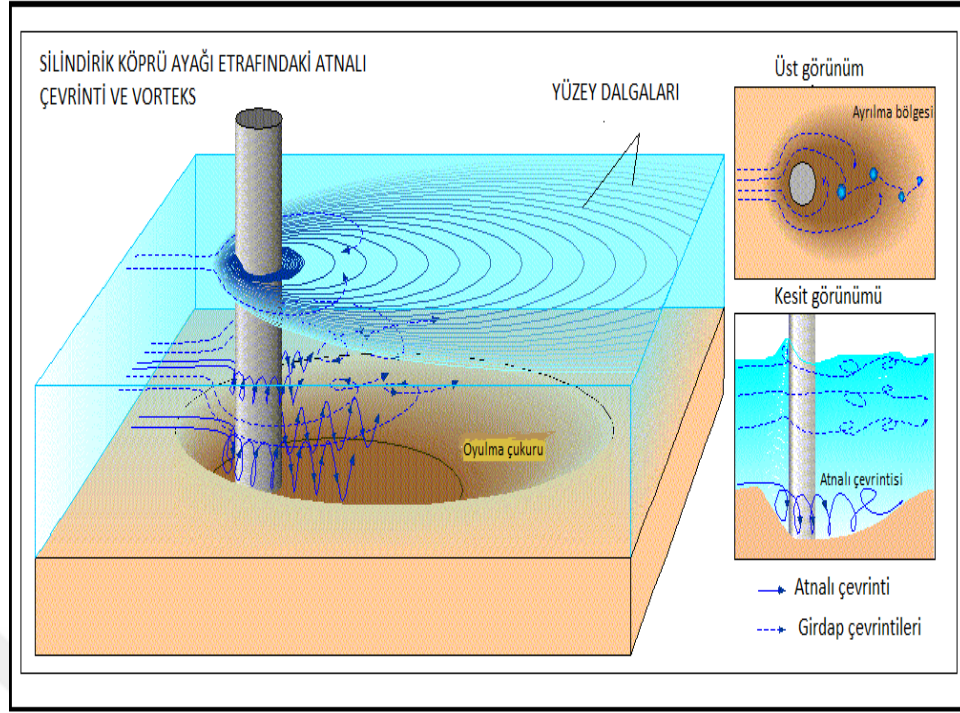
### 3.2.1 Orta ayak oyulmalarını etkileyen faktörlerin genel değerlendirmesi

Kare kesitli köprü ayaklarında, daire kesitli köprü ayaklarına göre daha şiddetli oyulmalar görülmektedir. Bunun sebebi kare kesitli köprü ayağı, akarsu akımının yapısını daha çok bozmakta, köşe ve kenarların oyulmaya etkileri için içine girerek oyulma derinliğini artırıcı etki yaratmaktadır(M. Yurtseven; Köprü Ayakları Arkasında Oluşan Oyulmaların İncelenmesi,2005). Şekil 3.34'de, dairesel ve kare kesitli ayak etrafında farklı şekilde gelişen kayma gerilmesi değişimi gösterilmektedir (Tseng ve ark., 2000).

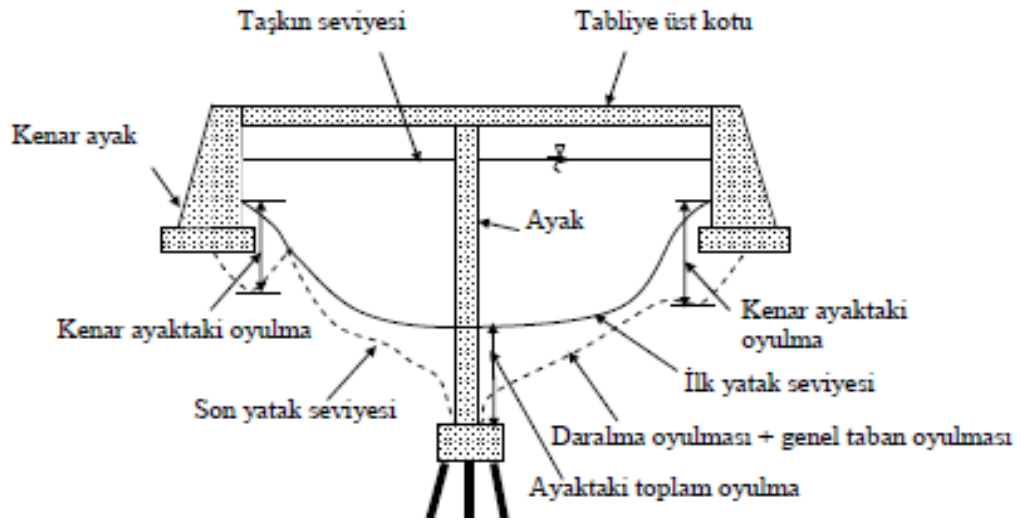


**Şekil 3.34 :** Dairesel ve kare kesitli ayak etrafında gelişen kayma gerilmesi gelişimi (Tseng ve ark., 2000).

Akarsu köprülerinde, taşkın esnasında oluşan akıntı ve köprü ayaklarının geometrik şekilleri dışında, oyulmayı etkileyen bir diğer faktör de taban malzemesinin yapısıdır. Her ne kadar köprü ayaklarında meydana gelen oyulmalarda etkin rol oynayan akım hızı ve ayakların geometrik şekil faktör kadar önemli olmasa da, köprü taban malzeme yapısı oluşturabileceği zırlama dolayısıyla oyulmayı belli ölçülerde azaltmaktadır. Oyulma hesap bağıntılarında etkili diğer bir etmenin ise zaman faktörü olduğu görülmektedir. Yanmaz(1989) ve Melville ve Chiew(1999), meydana gelen oyulmaların %50 ile %80 arasındaki derinliğinin 10 ile 15 yıllık bir zaman sürecinden oluştuğunu ifade etmektedirler. Türkiye’de de köprü oyulmalarına özellikle 2000’li yıllardan sonra önem verilmeye başlanmıştır. Bu konuda birçok deney ve araştırma mevcuttur ve yapılmaya devam edilmektedir. Şekil 3.35’de dairesel ayak etrafındaki oyulma ve akımın şematik gösterimi bulunmaktadır (Richardson ve Davis, 2001’den uyarlanmıştır).



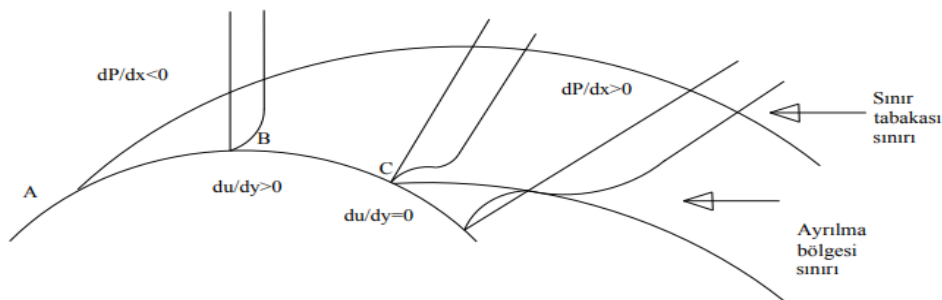
**Şekil 3.35 :** Silindirik köprü ayağında meydana gelen oyulma çukurundaki akım şekli (Richardson ve Davis, 2001’den uyarlanmıştır).



**Şekil 3.36 :** Köprü açıklığında taban oyulması (Yanmaz, 2002).

Oyulma tanımı, temel malzemesinin akarsu akımının oluşturduğu hıza maruz kalarak, akarsu taban malzemesinin taşınması olarak basitçe tanımlanabilir. Bu taşınma sonucu ortaya çıkan çukurlar oyulmaları oluşturmaktadır. Şekil 3.36’da oyulma oluşumunun şematik gösterimi ifade edilmektedir(Yanmaz, 2002).

Oyulmaların daha iyi değerlendirilebilmesi için, akarsu akım hızına ek olarak basınç ve dağılımın da incelenmesi gerekmektedir. Köprü ayaklarında oluşan oyulmalar

[illegible]

Şekil 3.38’de ise, dairesel ayak etrafında oluşan akımın değişimi ve ayak etrafında oluşturduğu basınç gradyan değişimi gösterilmektedir.

58

ayaklarının yapı malzemesine, geometrik şekline bağlı olarak, çeşitli faktörler sebebiyet verdikleri açıklanmıştır.

Akarsu akımının hızı ve malzeme taşıma gücünün, oyulmaların miktarının hesaplandığı amprik formüllerde en önemli fonksiyon bileşeni olduğu görülmektedir. Taşkın, akarsularda oluşan ve katı malzeme taşıma gücünün pik değerlere çıktığı süreçtir. Akarsu köprü ayaklarında oluşan oyulmalarda, bu ana etmenlere ek olarak akarsu kesit alanının daralmasının da belirli sınır şartlar altında etkin bir parametre olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.8’de görüleceği üzere, geçmişten günümüze köprü ayaklarındaki oyulmalarla ilgili sayısız araştırma ve bunlardan elde edilen deneysel amprik formüller geliştirilmiştir. Bu ve buna benzer diğer ampirik formüller, yapılan deneylerin sınır şartları da göz önünde bulundurularak, elde edilen sonuçlara göre değişiklik göstermektedir. Bu amprik formüllerin değişiklik göstermesinin sebeplerinden biri, araştırmacıların kurdukları deney model yapısının birbirlerinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Araştırmacıların dikkate aldıkları parametrelerin farklı olması, formüllerin de farklı olmasında önemli bir etkindir.

Amprik formüllerde kullanılan Froude sayısı, boyutsuz olma özelliğini taşıması nedeniyle, hem yaklaşan akım hızı değerini, hem de yaklaşan akım derinliği etkilerini beraber tanımlamaktadır. Oyulma derinliği hesaplanırken Froude sayısının kullanılmasının oyulma derinliği hesaplanmasında, gerçeğe daha yakınsak sonuçlar vermesi ve pratik olmasından dolayı daha çok tercih edilmektedir(N. Kalkan, Boyutsuz Sayılar ve Fiziksel Anlamları,2004).

İçerisinde Colorado State Üniversitesi çalışmalarının da yer aldığı araştırmalarda en isabetli sonuçlara, Melville ve Sutherland (1988) amprik denklemiyle ulaşılmıştır.

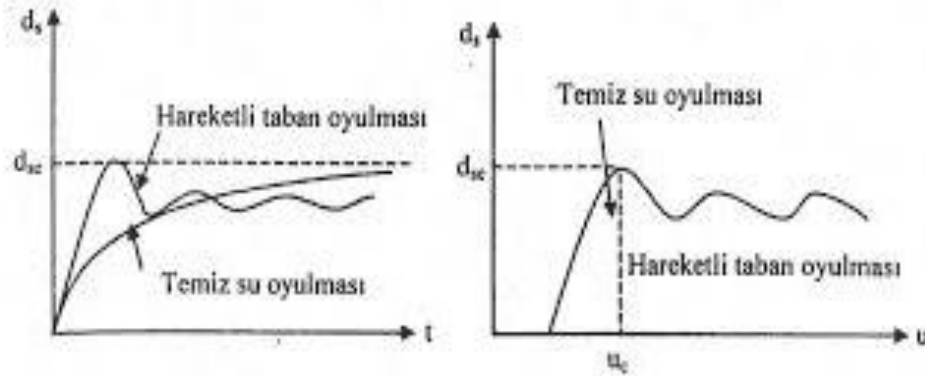
Hesaplanan ve gözlemlenen oyulma değerleri karşılaştırıldığında ise, kullanılan hiçbir amprik denklemin tam olarak gerçekçi tahmin yapamadığı görülmüştür.

Sonuç olarak, yapılan çalışmalar, farklı yaklaşımlar doğurmuş olsa da, yapılmış analizlere göre ortaya çıkan değerlerin, gerçekleşen oyulma değerinden daha büyük değerleri hesapladığı görülmektedir. Yine de bu fazlalık için genel olarak kabul edilebilir olduğu söylenmektedir.

Genel olarak, laboratuvar bazlı formüllerle hesaplanan oyulma derinliği tahmini hesaplamasında, oyulmayı etkileyen yüksek sayıda belirsiz parametrenin varlığı nedeniyle oyulma miktarı öngörüsü oldukça zordur. Tam boyutlu yapılarda oluşması beklenen maksimum oyulma derinliğinin öngörülmesindeki yöntem, bu formüllerden elde edilen değerlerin en üst değerini alarak üst limit tahminini yapmak yaklaşımı olmalıdır.

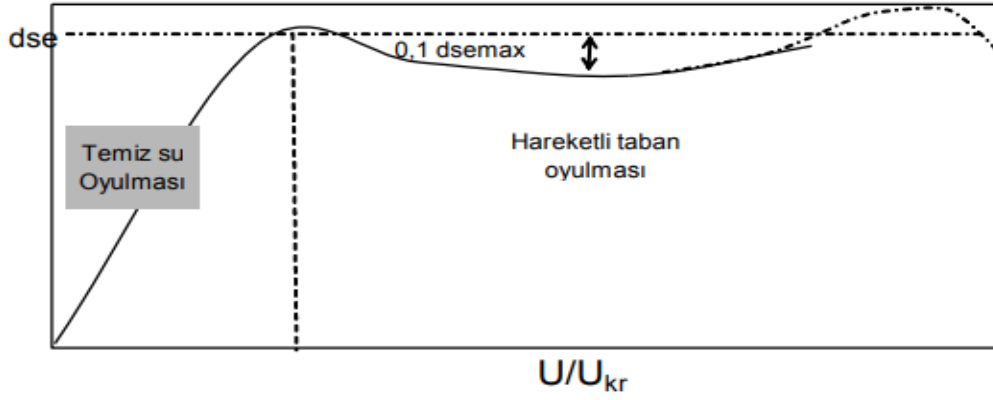
### 3.3 Köprü Yapımı Aşamasında Hasar Ve Oyulmaların İncelenmesi ve Köprü Yapım Aşamasının Analizlerle Desteklenmesi

Akarsu köprülerinde oluşan oyulma çukurları, su akım hızının yani  $V(=U)$  değerinin sediment hareketi için gereken eşik değerini aşması yani  $V_c(=U_c)$  değerini aşması üzerine çukurlar oluşmaya başlamaktadır. Akarsu yataklarında meydana gelen akım hızının eşik değerini aşması ile birlikte yatak malzemeleri su tarafından taşınmakta ve köprü ayaklar etrafında oyulmalara sebep olmaktadır. Bu duruma hareketli taban oyulması adı verilmektedir(Raudkivi, 1986). Akım hızının eşik değerini geçmediği durumlarda, ayak etrafında oluşan oyulmalar ise sediment taşınması ile oluşmamaktadır. Bu oyulmalara temiz su oyulması adı verilmektedir. Bu oyulma durumlarını gösteren grafik Şekil 3.39’da gösterilmektedir(Raudkivi, 1986).



**Şekil 3.39 :** Hareketli su ve temiz su oyulmaları grafiği (Raudkivi,1986).

Her ne kadar mantık olarak farklı görünse de temiz su oyulması, hareketli taban oyulmasından daha fazla değere sahip olarak bilinmektedir. Bu değer diğerine göre %10 daha fazladır. Temiz su oyulması ile hareketli taban oyulması arasındaki değişimin akım hızı ile gösterimi Şekil 3.40’da gösterilmektedir(Raudkivi, 1986).



**Şekil 3.40 :** Yerel oyulma derinliğinin akım hızının fonksiyonu olarak değişimi grafiği (Raudkivi, 1986).

Bu şekle dayanarak,  $D/d_{50}$  değeri sabit olduğunda;

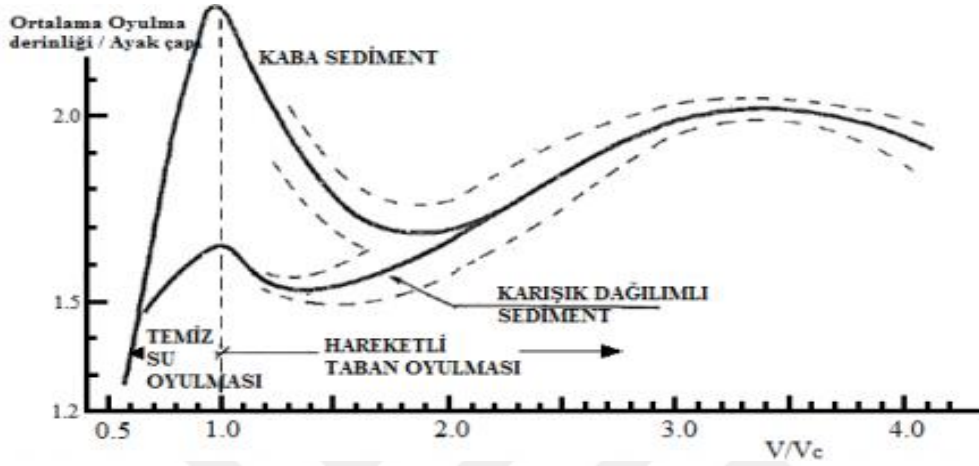
- a)  $U/U_{cr} \leq 0.5$  ise; oyulma yoktur,
- b)  $0.5 \leq U/U_{cr} \leq 1$  ise; temiz su oyulması vardır. Bu değişim aralığında, oyulma derinliği lineer olarak değişim gösterir,
- c)  $U/U_{cr} \geq 1$  ise; devamlı malzeme hareketi ve oyulma vardır.

Akarsu köprüleri ayaklarında oluşan oyulma çukurlarının en önemli sebebi ise akım hızına dayalı suyun köprü ayağına çarptıktan sonra akımın, ayağın sömel kısmına doğru hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu akım at nalı çevrelemesi ile bir araya gelerek, oluşan at nalı şeklindeki oyulma çukurunun içinde daha da etkili bir oyulma mekanizması oluşturmaktadır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde, temiz oyulmasının dengeli hale gelmesi yaklaşık 50 saatlik bir zaman sürecine tekabül etmekte olduğu görülmektedir (Raudkivi, 1986).

Dairesel bir kesite sahip olan köprü ayakları çevresi, üniform sediment ve akım şartları altında meydana gelen oyulmalar ve genel özellikleri Şekil 3.41’de gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere; oyulma derinliğinin hareketli taban oyulmasının başlaması ile artış hızında azalma görülse bile, oyulma derinliğinin kısa bir zaman sonra artmaya geçtiği anlaşılmaktadır.

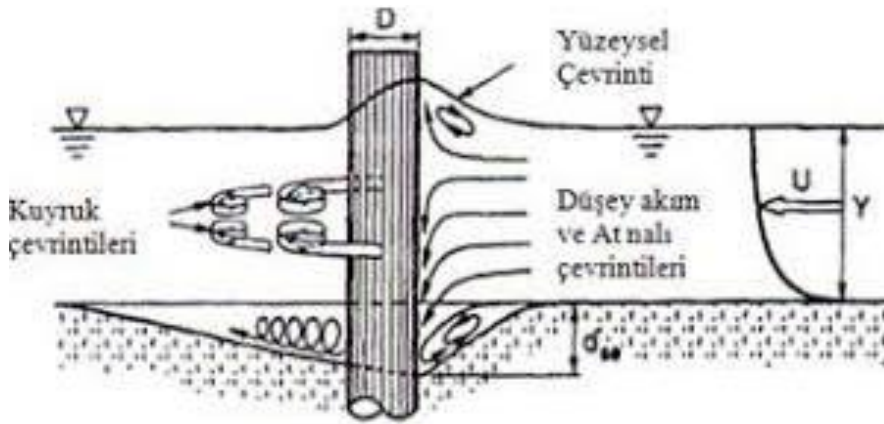
Oyulma çukurunun şeklinde meydana gelen yüzeysel dalgalanmalar, köprü ayak çapına bağlı bir faktörü olduğu algısının doğru olmadığını, daha çok akarsuyun yatak özelliklerinden kaynaklanan bir durum olarak ele alınması gerektiği araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır. Oyulma çukurunun derinliğinin artışın hızındaki azalma, ani sediment taşınmasından da kaynaklanmaktadır. Bunun bir sebebi,

sediment malzemenin oyulma çukurlarını doldurmasıdır. Ancak, oyulma çukurlarının derinliğinde artış görüldüğünde, oyulma hızının sediment taşınım hızından daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Genel yatak oyulması ve daralma oyulmasına ek olarak, bir de yerel oyulma tabiri, diğer oyulma çukuru oluşumunun bir aşamasıdır.



**Şekil 3.41 :** Üniform yatak malzemeli bir silindirik köprü ayağındaki hız değişimi ile oyulmanın değişimi (Raudkivi,1986).

Genellikle ayaklar arasında kum tepecikleri, birikme bölgeleri oluşturmaktadır. Bu bölgeler akımın davranışını değiştirmeleriyle bilinmektedir. Su akımı, birikme bölgelerine çarparak kıvrımlı bir hale dönüşür. Akımın şekil değiştirmesi yatak seviyesinde farklılıklara sebep olmaktadır. Bunun ile ilgili, yatakta meydana gelen gelişim Şekil 3.42’de görülmektedir. Meydana gelen bu farklılıklar, taşkın zamanlarında daha fazla görülmektedir. Yatak seviyesindeki farklılıklar ile birlikte oluşan yerel oyulmalar, oldukça önemli bir hale gelmektedir (Raudkivi, 1986).



**Şekil 3.42 :** Oyulma derinliğinin silindirik köprü ayağındaki oluşan akım profilinin gelişimi (Raudkivi,1986).

Genel olarak bu çalışmamda da açıklandığı üzere, köprü orta ve kenar ayaklarında meydana gelen oyulma sebepleri ve süreçleri birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemli olanları, taban malzemesinin kalınlığı ve köprü ayaklarının geometrik şekilleridir. Reynolds sayısı, taşkın sebebiyle oluşan akıntı hızına bağlı değişiklikler göstermektedir. Bu değişiklikler aynı zamanda köprü ayaklarının farklı geometrik şekillere sahip olmasından da kaynaklandığı görülmektedir. Yani bir başka deyişle, köprü ayaklarının farklı boyutlarda ve farklı şekillerde olması oyulma derinliğini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte, canlı yatak koşulları altında, hem homojen hem de homojen olmayan taban malzemesi için, akım yoğunluğu, lokal oyulma derinliğinin değişmesi açısından önemsiz olduğu araştırmacıların elde ettiği sonuçlardan birisidir.

Akarsu köprü geçişlerinde, köprü kenar ayakları veya varsa köprü orta ayakları sebebiyle akarsuyun net geçiş açıklığında daralma olabilir. Bu daralma sebebiyle membada kabarma ve hızda artış meydana gelir (Mete Köken, 4.Su Yapıları Sempozyumu Sempozyum Bildirileri, 2015). Hızda meydana gelen artmalar akarsu tabanındaki kayma gerilmelerinin de artmasına neden olur. Eğer tabandaki kayma gerilmelerinin artışı fazla olursa tabanda ciddi miktarda oyulmalar meydana gelebilir. Eğer köprü ayağı yerleştirildiği kesitte ciddi miktarda daralmaya sebep olursa, akım büzülmesine bağlı olarak köprünün mansap noktasındaki oyulma köprünün menba tarafındaki oyulmadan fazla olabilir (Bölüm 3.1.10). Bu durumda öncelikle daralma sonucu oluşacak oyulmalar hesaplanıp, daha sonra ayak etrafındaki oyulma hesabına geçilmelidir. Ayrıca, zaman içerisinde nehir tabanındaki önemli derecede alçalma etkisi de, köprü temellerinin hidrolik kaynaklı yanal etkilere ve oyulmalara karşı daha fazla zayıflamasına sebebiyet verebilir. Bu durumu önlemek amacı ile köprü geçişinin mansap tarafında set oluşturarak akım derinliğinin artırılıp hızın düşürülmesi de yapılacak uygulamalar arasında yer alır.



#### 4. ÇORLU KINIK KÖPRÜSÜ OYULMA HESABI

İstanbul-Çorlu arasında yer alan Çorlu Kınık Köprüsü, plan ve kesiti Şekil 3.32’de gösterilmektedir. Kınık Deresi, akım ve hidrolik veriler altında, Melville (1997) formülü ile ve Richardson ve Davis (2001) tarafından geliştirilen CSU (Colorado State University) formülü diye de adlandırılan HEC-18 ile oyulma miktarı hesaplanacaktır. Öncelikle projelendirmeye esas ayak formu ve hidrolik verileri altında oyulma miktarı hesaplanacaktır. Ayrıca HEC-18 ile yapılan çözümlemelerde; ayak uç şeklinin değişimi, debinin değişimi, atak açısının değişimi gibi faktörler ele alınarak oyulma miktarının değişimi hakkında öngörülerde bulunulmaya çalışılacaktır. Çorlu Kınık köprüsü yerleşim planı Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1 : Çorlu Kınık Köprüsü yerleşim planı.

Kınık Köprüsü akım değerleri, hidrolik ve taban malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir.

$$Q_{500}=404.60 \text{ m}^3/\text{sn}$$

$$Q_{100}=270.70 \text{ m}^3/\text{sn}$$

$$J=0.00566 \text{ (Akarsu taban eğimi, talveg eğim çiziminden)}$$

$$n= 0.025 \text{ (Pürüzlülük sayısı, tablodan) veya } n=(D_{50})^{1/6}/21.14 \text{ (Strickler,1923)}$$

$$D_{50}=3 \text{ mm}$$

$$\alpha= 10^\circ \text{ (Ayaklar ile akımın hizalanma açısı, saldırı açısı)}$$

Şekil 4.2’de, akım ve yatak değerleri altındaki hesaplamalar görülmektedir.

$$A= 83.55 \text{ m}^2 \text{ (Akım alanı)} \quad P=40.93 \text{ m (Islak çevre)} \quad R=A/P=2.041 \text{ m (Hid. yarıçap)}$$

$$y_1=2.367 \text{ m (akım derinliği)} \quad U_1= 4.843 \text{ m/sn (akım hızı)} \quad F_1=1.067$$

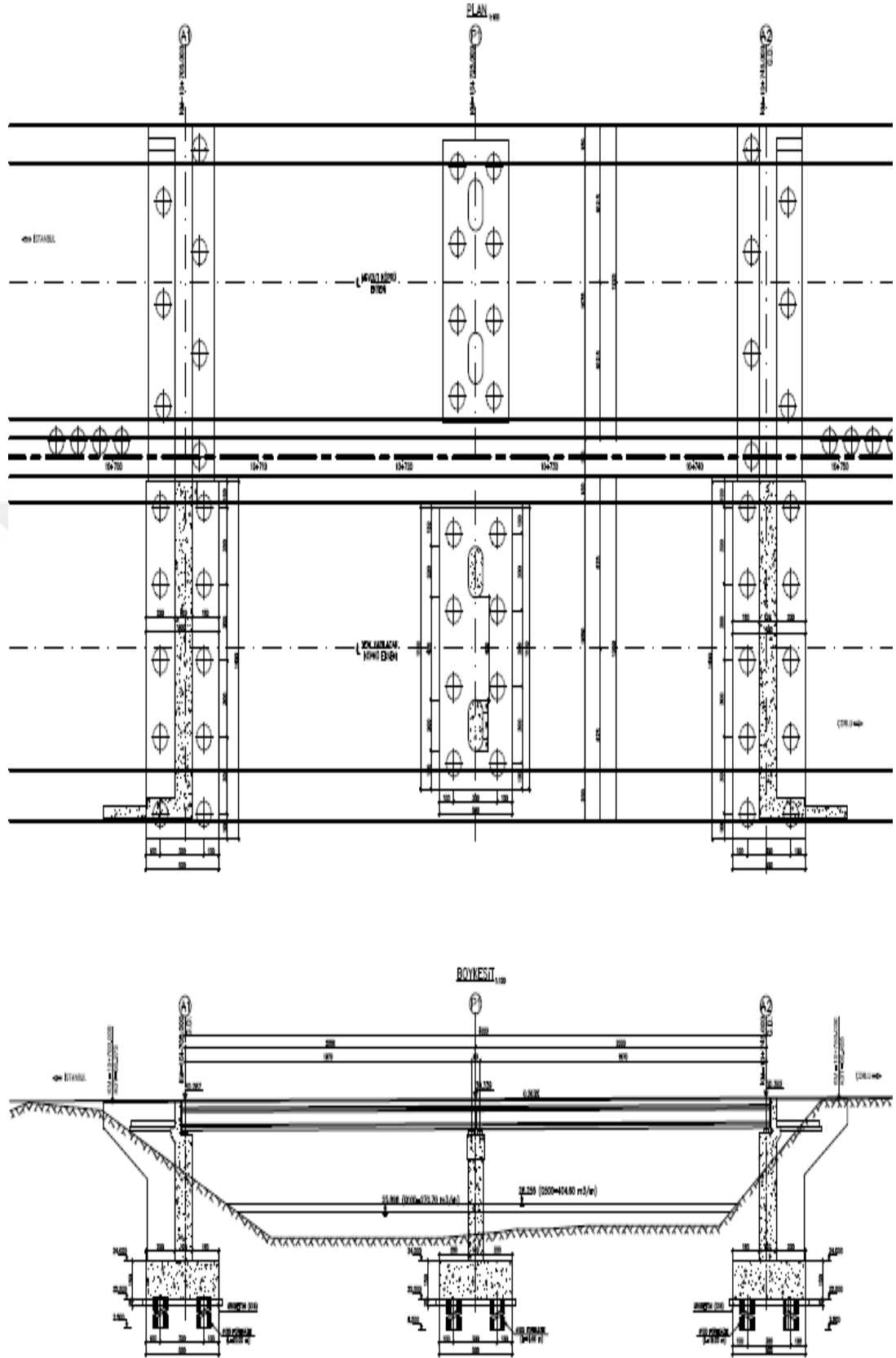
| Normal depth formulas        |  | Critical depth formulas   |  |
|------------------------------|--|---------------------------|--|
| $A = y(b + zy)$              |  | $F^2 = (Q^2 T) / (g A^3)$ |  |
| $P = b + 2y(1 + z^2)^{1/2}$  |  | $F = 1$                   |  |
| $T = b + 2zy$                |  | $(Q^2/g)T - A^3 = 0$      |  |
| $R = A/P$                    |  | $A = y(b + zy)$           |  |
| $D = A/T$                    |  | $T = b + 2zy$             |  |
| $Q = (k/n) AR^{2/3} S^{1/2}$ |  | $V = Q/A$                 |  |
| $V = Q/A$                    |  | $D = R/T$                 |  |
| $F = V/(gd)^{1/2}$           |  |                           |  |

Definition sketch for a prismatic channel

| INPUT DATA:                                                                                                  | INTERMEDIATE CALCS (normal depth):                        | OUTPUT (normal depth):                    | INTERMEDIATE CALCS (critical depth):                      | OUTPUT (critical depth):                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Select: <input type="button" value="SI units (metric)"/> <input type="button" value="U.S. Customary units"/> | Units selected: SI (metric)                               | Depth $y_n$ : 2.367 m                     | Units selected: SI (metric)                               | Depth $y_c$ : 2.466 m                     |
| Flow discharge $Q$ : <input type="text" value="404.6"/> $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$                           | Gravitational acceleration $g$ : $9.806 \text{ m s}^{-2}$ | Velocity $V_n$ : $4.843 \text{ m s}^{-1}$ | Gravitational acceleration $g$ : $9.806 \text{ m s}^{-2}$ | Velocity $V_c$ : $4.624 \text{ m s}^{-1}$ |
| Bottom width $b$ : <input type="text" value="30.85"/> m                                                      | Units constant $k$ : 1                                    | Froude number $F_n$ : 1.067               | Flow area $A_c$ : $87.49 \text{ m}^2$                     | Froude number $F_c$ : 1                   |
| Side slope $z$ : <input type="text" value="1.88"/>                                                           | Flow area $A_n$ : $83.55 \text{ m}^2$                     |                                           | Wetted perimeter $P_c$ : $41.351 \text{ m}$               |                                           |
| Bottom slope $S$ : <input type="text" value="0.00566"/>                                                      | Wetted perimeter $P_n$ : $40.93 \text{ m}$                |                                           | Top width $T_c$ : $40.121 \text{ m}$                      |                                           |
| Manning's $n$ : <input type="text" value="0.025"/>                                                           | Top width $T_n$ : $39.75 \text{ m}$                       |                                           | Hydraulic radius $R_c$ : $2.116 \text{ m}$                |                                           |
|                                                                                                              | Hydraulic radius $R_n$ : $2.041 \text{ m}$                |                                           | Hydraulic depth $D_c$ : $2.181 \text{ m}$                 |                                           |
|                                                                                                              | Hydraulic depth $D_n$ : $2.102 \text{ m}$                 |                                           |                                                           |                                           |

**Şekil 4.2 :** Çorlu Kınık Köprüsü akım değerleri( $Q=404.6 \text{ m}^3/\text{sn}$  için SDU'den yararlanarak çözülmüştür).



Şekil 4.3 : Çorlu Kımık Köprüsü plan ve kesiti.

#### 4.1 Melville (1997) İle Oyulma Derinliğinin Hesabı

$$d_s = K_{yb} \cdot K_l \cdot K_d \cdot K_s \cdot K_\alpha$$

$$D/y_1 = 1.0/2.102 = 0.48 < 0.7 \text{ ise,} \quad K_{yb} = 2.4D = 2.4 \quad \text{Denklem (3.1)'den}$$

$$K_l = (U - (U_a - U_c)) / U_c \quad U_a = 0.8U_{ca} \quad U_{ca} = 5.75 \log 5.53(y/D_{50}) \quad \text{Denklem (3.2)'den}$$

$$U_{ca} = 5.75 \log 5.53(2.102/3) = 3.38 \text{ m/sn} \quad U_a = 0.8 \cdot 3.38 = 2.70 \text{ m/sn}$$

$$K_l = (4.843 - (2.70 - 4.624)) / 4.624 > 1 \text{ ise} \quad K_l = 1$$

$$d/D_{50} \leq 25 \text{ mm için;} \quad K_d = 0.57 \log \left( 2.24 \frac{D}{d_{50}} \right) \quad \text{Denklem (3.3)'den}$$

$$d/D_{50} > 25 \text{ mm için;} \quad K_d = 1 \quad \text{Denklem (3.4)'den}$$

$$d/D_{50} = 1\text{m}/0.003\text{m} > 25 \quad K_d = 1$$

$$K_s = 1 \quad (\text{Çizelge 3.2})'den$$

$$\alpha = 10^\circ \text{ için} \quad K_\alpha = (\cos \alpha + (b/a) \sin \alpha)^{0.65} \quad \text{Denklem (3.8)'den}$$

$$K_\alpha = (\cos 10 + (2/1) \sin 10)^{0.65} = 1.20$$

$$Q = A \cdot R^{(2/3)} \cdot J^{(1/2)} / n \text{ (Manning formülü)} \quad (3.18)$$

$$d_s = 2.4 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.2 = 2.88 \text{ m}$$

#### HEC-18 formülü (Richardson ve Davis (2001):

Bölüm 3.2'de anlatıldığı üzere ilgili formül tekrar ifade edilir ise;

$$\frac{d_s}{y_1} = 2.0 K_s K_\alpha K_b \left( \frac{a}{y_1} \right)^{0.35} F_r^{0.43} \quad (3.19)$$

Şeklindedir. Buradaki değerler,

$y_1$  veya  $(h)$  : Akarsuyun menba tarafındaki su yüksekliği (m)

$d_s$  : Oyulma derinliği (m)

$V_1$  : Köprünün menba tarafındaki akım hızı (m/sn)

$a$  : Köprü ayak genişliği (m)

$F_r$  : Froude sayısı =  $V_1 / (g \cdot y_1)^{1/2}$

$K_s$  : Ayak şekil faktörü, (Çizelge 3.7)

$K_\alpha$  : Yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü, (Denklem 3.8, Çizelge 3.4)

$K_b$  : Membada taban pürüzlülüğünü gösteren sayı (Çizelge 3.5)

#### 4.2 HEC-18 ile Oyulma Derinliğinin Hesabı



**Formula:**

$$Fr_1 = v_1 / (g y_1)^{1/2}$$

$$y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} Fr_1^{0.43}$$

[ SI Units (metric):  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in m ]  
 [ U.S. Customary Units:  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in ft ]  
 [  $Fr$  = Froude number;  $g$  = gravitational acceleration ]

**Reference:**  
 Evaluating Scour at Bridges,  
 FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,  
 Fifth Edition, 2012.

**INPUT DATA:** [Description] [Sample Input]

Select: SI units (metric)  
 U.S. Customary units

Flow depth  $y_1$  : 2.367 m

Flow velocity  $v_1$  : 4.843 m/s

Pier width  $a$  : 1 m

Pier length  $L$  : 2 m

Angle of attack  $\theta$  of the flow (degrees): 10 Degrees

Pier nose shape: Square nose  
 Round nose  
 Circular cylinder  
 Sharp nose  
 Group of cylinders

Bed condition: Clear-water scour  
 Plane bed and antidune flow  
 Small dunes  
 Medium dunes  
 Large dunes

**OUTPUT:**

System of units: SI units (metric)

Pier nose shape: Round nose

Bed condition: Clear-water scour

---

♦ Scour depth  $y_s$  : 3.5915 m

**Şekil 4.4 :** Çorlu Kınık Köprüsü dairesel burunlu orta ayak oyulmasının  $Q=404.6$  m<sup>3</sup>/sn için hesabı  $\alpha=10^\circ$  (S.D.U. HEC-18 programından hesaplanmıştır).

HEC-18 programı esas alınarak yapılan hesaplama Şekil 4.4’de görülmektedir( S.D. Üniversitesi on-line programını kullanılarak hesaplanmıştır). Çözümlemede araştırmacıların oyulma ile ilgili çalışmalardan elde ettiği en büyük oyulma miktarını veren temiz su oyulma kombinasyonu ele alınmıştır. Hesaplamalardan görüldüğü üzere Melville(1997) ile yapılan çözümlemede  $y_s=2,88$  m, HEC-18 ile yapılan çözümlemede ise 3,59 m oyulma derinliği hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, orta ayak temel üst kotu yataktan en az 3.6 metre aşağıda teşkil edilmesi en uygunu olacaktır.

Bundan sonraki evrelerde ise köprü aksı en kesit değerleri sabit kalması kaydı ile, köprü ayağı uç şeklinin, ayak genişliğinin, debinin ve saldırı açısının değişimi ile ilgili çözümlemeler yapılarak oyulma derinliği üzerindeki etkisi irdelenecektir.

#### 4.3 Oyulma Derinliğinin Ayak Uç Geometrisi İle Değişiminin İrdelenmesi

Aynı akım verileri altında, on-line programı kullanarak ayak uç şeklinin dikdörtgen köşeli olması halinde oyulma miktarı hesaplanmıştır ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Aynı debi ve akım koşulları altındaki oyulma değerleri kare köşeli ayak şekli için  $y_s=3.9506$  m değeri bulunmaktadır.



**Formula:**

$$Fr_1 = v_1 / (g y_1)^{1/2}$$
$$y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} Fr_1^{0.43}$$

[ SI Units (metric):  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in m ]  
[ U.S. Customary Units:  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in ft ]  
[  $Fr$  = Froude number;  $g$  = gravitational acceleration ]

**Reference:**  
Evaluating Scour at Bridges,  
FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,  
Fifth Edition, 2012.

**INPUT DATA:** [Description] [Sample Input]

Select: SI units (metric)  
U.S. Customary units

Flow depth  $y_1$  :  m

Flow velocity  $v_1$  :  m/s

Pier width  $a$  :  m

Pier length  $L$  :  m

Angle of attack  $\theta$  of the flow (degrees):  Degrees

Pier nose shape: Square nose  
Round nose  
Circular cylinder  
Sharp nose  
Group of cylinders

Bed condition: Clear-water scour  
Plane bed and antidune flow  
Small dunes  
Medium dunes  
Large dunes

**OUTPUT:**

System of units: SI units (metric)

Pier nose shape: Square nose

Bed condition: Clear-water scour

---

♦ Scour depth  $y_s$  : 3.9506 m

**Şekil 4.5 :** Çorlu Kınık Köprüsü kare köşe uçlu orta ayağın oyulmasının  $Q=404.6$  m<sup>3</sup>/sn için hesabı  $\alpha=10^\circ$  (S.D.U. HEC-18 programından hesaplanmıştır)

Çorlu Kınık Köprüsü akım debi değeri farklı debi değerleri altında hesaplar yenilenecektir ve debi artışı ve uç faktörü etkisi irdelenecektir.

#### 4.4 Oyulma Derinliğinin Debi İle Değişiminin İrdelenmesi

Bu hesaplama evresinde; proje debisinden farklı olarak, gerek kare burunlu, gerekse dairesel uç formuna sahip köprü ayağının debi değeri  $Q=200$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=300$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=500$  m<sup>3</sup>/sn ve  $Q=600$  m<sup>3</sup>/sn değeri altında oyulma değerleri HEC-18 programı kullanılarak hesaplanacak ve irdelemelerde bulunulacaktır. Aynı akarsu yatak enkesit değerleri altında debinin değişimi akım derinliğini de artıracaktır. Öncelikle, aynı

enkesit değerleri altında akarsuyun akım değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu akım değerlerinin hesabı Şekil 4.6’da görülmektedir.



**Şekil 4.6 :** Çorlu Kınık Köprüsü akım değerleri(Q=200 m<sup>3</sup>/sn, Q=300 m<sup>3</sup>/sn, Q=500 m<sup>3</sup>/sn, Q=600 m<sup>3</sup>/sn için SDU’den yararlanarak hesaplanmıştır).

Bu akım verileri altında ise HEC-18 programından yararlanarak yuvarlak ve kare burunlu ayak şekilleri için hesaplar yenilenmiştir. Dairesel burunlu ayak için atak açısı  $\alpha=10^\circ$  altında oyulma hesapları yapılmış ve Şekil 4.7’de, kare burunlu ayak için oyulma hesabı ise Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1(g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in m]<br/>         [U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in ft]<br/>         [Fr = Froude number, g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>         Evaluating Scour at Bridges,<br/>         FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>         Fifth Edition, 2012.</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1(g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in m]<br/>         [U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in ft]<br/>         [Fr = Froude number, g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>         Evaluating Scour at Bridges,<br/>         FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>         Fifth Edition, 2012.</p> |
| <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="text" value="SI units (metric)"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="1.57"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="3.79"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="10"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="text" value="Round nose"/></p> <p>Bed condition: <input type="text" value="Clear-water scour"/></p>   | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>Scour depth <math>y_s</math>: 3.0579 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="text" value="SI units (metric)"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="2.976"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="5.532"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="10"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="text" value="Round nose"/></p> <p>Bed condition: <input type="text" value="Clear-water scour"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>Scour depth <math>y_s</math>: 3.9223 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1(g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in m]<br/>         [U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in ft]<br/>         [Fr = Froude number, g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>         Evaluating Scour at Bridges,<br/>         FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>         Fifth Edition, 2012.</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1(g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in m]<br/>         [U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, a</math> and <math>L</math> in ft]<br/>         [Fr = Froude number, g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>         Evaluating Scour at Bridges,<br/>         FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>         Fifth Edition, 2012.</p> |
| <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="text" value="SI units (metric)"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="1.994"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="4.374"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="10"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="text" value="Round nose"/></p> <p>Bed condition: <input type="text" value="Clear-water scour"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>Scour depth <math>y_s</math>: 3.3589 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="text" value="SI units (metric)"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="2.687"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="5.212"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="10"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="text" value="Round nose"/></p> <p>Bed condition: <input type="text" value="Clear-water scour"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>Scour depth <math>y_s</math>: 3.7039 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

**Şekil 4.7 :** Çorlu Kınık Köprüsü dairesel uçlu orta ayak oyulmasının  $Q=200$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=300$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=500$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=600$  m<sup>3</sup>/sn için hesabı ( $\alpha=10^\circ$ ).

Yukarıda yapılan hesaplamalardan ( $\alpha=10^\circ$ );

|                                        |                                          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| $Q=200$ m <sup>3</sup> /sn debi için   | Dairesel burunlu ayak için, $y_s=3.06$ m |
| $Q=300$ m <sup>3</sup> /sn debi için   | Dairesel burunlu ayak için, $y_s=3.36$ m |
| $Q=404,6$ m <sup>3</sup> /sn debi için | Dairesel burunlu ayak için, $y_s=3.59$ m |
| $Q=500$ m <sup>3</sup> /sn debi için   | Dairesel burunlu ayak için, $y_s=3.70$ m |
| $Q=600$ m <sup>3</sup> /sn debi için   | Dairesel burunlu ayak için, $y_s=3.92$ m |

Olarak hesaplanmıştır. Proje debisi olan  $Q=404.6$  m<sup>3</sup>/sn için hesaplama Şekil 4.4’de verilmiş idi.



**Formula:**

$$F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$$

$$y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\theta / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$$

[SI Units (metric):  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in m]  
 [U.S. Customary Units:  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in ft]  
 [Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]

**Reference:**  
 Evaluating Scour at Bridges,  
 FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,  
 Fifth Edition, 2012.

**INPUT DATA:** [Description] [Sample Input]

Select:

Flow depth  $y_1$ :  m

Flow velocity  $V_1$ :  m/s

Pier width  $a$ :  m

Pier length  $L$ :  m

Angle of attack  $\theta$  of the flow (degrees):  Degrees

Pier nose shape:

Bed condition:

**OUTPUT:**

System of units: SI units (metric)

Pier nose shape: Square nose

Bed condition: Clear-water scour

Scour depth  $y_s$ : 3.3636 m



**Formula:**

$$F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$$

$$y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\theta / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$$

[SI Units (metric):  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in m]  
 [U.S. Customary Units:  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in ft]  
 [Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]

**Reference:**  
 Evaluating Scour at Bridges,  
 FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,  
 Fifth Edition, 2012.

**INPUT DATA:** [Description] [Sample Input]

Select:

Flow depth  $y_1$ :  m

Flow velocity  $V_1$ :  m/s

Pier width  $a$ :  m

Pier length  $L$ :  m

Angle of attack  $\theta$  of the flow (degrees):  Degrees

Pier nose shape:

Bed condition:

**OUTPUT:**

System of units: SI units (metric)

Pier nose shape: Square nose

Bed condition: Clear-water scour

Scour depth  $y_s$ : 3.5555 m



**Formula:**

$$F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$$

$$y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\theta / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$$

[SI Units (metric):  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in m]  
 [U.S. Customary Units:  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in ft]  
 [Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]

**Reference:**  
 Evaluating Scour at Bridges,  
 FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,  
 Fifth Edition, 2012.

**INPUT DATA:** [Description] [Sample Input]

Select:

Flow depth  $y_1$ :  m

Flow velocity  $V_1$ :  m/s

Pier width  $a$ :  m

Pier length  $L$ :  m

Angle of attack  $\theta$  of the flow (degrees):  Degrees

Pier nose shape:

Bed condition:

**OUTPUT:**

System of units: SI units (metric)

Pier nose shape: Square nose

Bed condition: Clear-water scour

Scour depth  $y_s$ : 4.0743 m



**Formula:**

$$F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$$

$$y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\theta / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$$

[SI Units (metric):  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in m]  
 [U.S. Customary Units:  $y_s, y_1, a$ , and  $L$  in ft]  
 [Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]

**Reference:**  
 Evaluating Scour at Bridges,  
 FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,  
 Fifth Edition, 2012.

**INPUT DATA:** [Description] [Sample Input]

Select:

Flow depth  $y_1$ :  m

Flow velocity  $V_1$ :  m/s

Pier width  $a$ :  m

Pier length  $L$ :  m

Angle of attack  $\theta$  of the flow (degrees):  Degrees

Pier nose shape:

Bed condition:

**OUTPUT:**

System of units: SI units (metric)

Pier nose shape: Square nose

Bed condition: Clear-water scour

Scour depth  $y_s$ : 4.3145 m

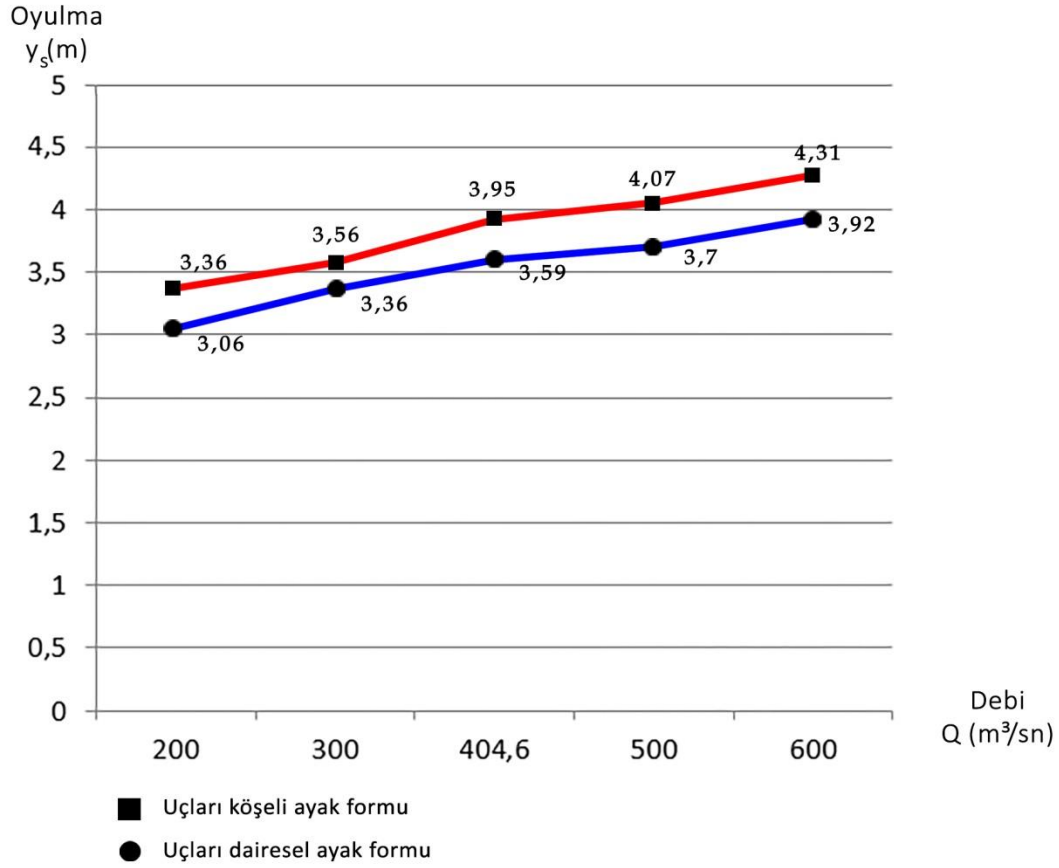
**Şekil 4.8 :** Çorlu Kınık Köprüsü kare köşe burunlu orta ayak oyulmasının Q=200 m<sup>3</sup>/sn, Q=300 m<sup>3</sup>/sn, Q=500 m<sup>3</sup>/sn, Q=600 m<sup>3</sup>/sn için hesabı ( $\alpha=10^\circ$ ).

Yukarıda yapılan hesaplamalardan( $\alpha=10^\circ$ );

|                                      |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Q=200 m <sup>3</sup> /sn debi için   | Kare burunlu ayak için, $y_s=3.36$ m |
| Q=300 m <sup>3</sup> /sn debi için   | Kare burunlu ayak için, $y_s=3.55$ m |
| Q=404,6 m <sup>3</sup> /sn debi için | Kare burunlu ayak için, $y_s=3.95$ m |
| Q=500 m <sup>3</sup> /sn debi için   | Kare burunlu ayak için, $y_s=4.07$ m |
| Q=600 m <sup>3</sup> /sn debi için   | Kare burunlu ayak için, $y_s=4.31$ m |

Proje debisi olan Q=404,6 m<sup>3</sup>/sn için oyulma hesabı Şekil 4.5’de verilmiş idi.

Hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre,  $\alpha=10^\circ$  olan atak açısı için, uçları köşeli olan ayak ile dairesel uç formundaki ayak arasındaki oyulmanın debi ile değişimi Şekil 4.9’daki grafikte gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda S.D. University on-line programı alan HEC-18 çözümlmelerinden yararlanılmıştır.



**Şekil 4.9 :** Çorlu Kınık Köprüsü oyulma değerinin debi ve ayak uç geometrisi ile değişimi ( $\alpha=10^\circ$ ).

#### 4.5 Oyulma Derinliğinin Atak Açısı İle Değişiminin İrdelenmesi

Çorlu Kınık Köprüsü saldırı açısının 20 dereceye çıkarılması halinde hem kare burunlu, hem de dairesel burunlu ayak uç formuna sahip köprü ayağının debi değeri  $Q=200 \text{ m}^3/\text{sn}$ ,  $Q=300 \text{ m}^3/\text{sn}$ ,  $Q=500 \text{ m}^3/\text{sn}$  ve  $Q=600 \text{ m}^3/\text{sn}$  için oyulma değerleri hesaplanmıştır. Dairesel burunlu ayak için atak açısı  $\alpha=20^\circ$  altında oyulma hesapları yapılmış ve Şekil 4.10’da, kare burunlu ayak için oyulma hesabı ise Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\alpha / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>Evaluating Scour at Bridges<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012.</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\alpha / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>Evaluating Scour at Bridges<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012.</p> |
| <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="button" value="SI units (metric)"/> <input type="button" value="U.S. Customary units"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="1.57"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="3.79"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="20"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="button" value="Square nose"/> <input type="button" value="Round nose"/> <input type="button" value="Circular cylinder"/> <input type="button" value="Sharp nose"/> <input type="button" value="Group of cylinders"/></p> <p>Bed condition: <input type="button" value="Clear-water scour"/> <input type="button" value="Plane bed and antidune flow"/> <input type="button" value="Small dunes"/> <input type="button" value="Medium dunes"/> <input type="button" value="Large dunes"/></p>   | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>• Scour depth <math>y_s</math>: 3.1452 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="button" value="SI units (metric)"/> <input type="button" value="U.S. Customary units"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="1.994"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="4.374"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="20"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="button" value="Square nose"/> <input type="button" value="Round nose"/> <input type="button" value="Circular cylinder"/> <input type="button" value="Sharp nose"/> <input type="button" value="Group of cylinders"/></p> <p>Bed condition: <input type="button" value="Clear-water scour"/> <input type="button" value="Plane bed and antidune flow"/> <input type="button" value="Small dunes"/> <input type="button" value="Medium dunes"/> <input type="button" value="Large dunes"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>• Scour depth <math>y_s</math>: 3.8202 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\alpha / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>Evaluating Scour at Bridges<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012.</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\alpha / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>Evaluating Scour at Bridges<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012.</p> |
| <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="button" value="SI units (metric)"/> <input type="button" value="U.S. Customary units"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="2.387"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="4.843"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="20"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="button" value="Square nose"/> <input type="button" value="Round nose"/> <input type="button" value="Circular cylinder"/> <input type="button" value="Sharp nose"/> <input type="button" value="Group of cylinders"/></p> <p>Bed condition: <input type="button" value="Clear-water scour"/> <input type="button" value="Plane bed and antidune flow"/> <input type="button" value="Small dunes"/> <input type="button" value="Medium dunes"/> <input type="button" value="Large dunes"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>• Scour depth <math>y_s</math>: 4.0847 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="button" value="SI units (metric)"/> <input type="button" value="U.S. Customary units"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="2.687"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="5.212"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="20"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="button" value="Square nose"/> <input type="button" value="Round nose"/> <input type="button" value="Circular cylinder"/> <input type="button" value="Sharp nose"/> <input type="button" value="Group of cylinders"/></p> <p>Bed condition: <input type="button" value="Clear-water scour"/> <input type="button" value="Plane bed and antidune flow"/> <input type="button" value="Small dunes"/> <input type="button" value="Medium dunes"/> <input type="button" value="Large dunes"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>• Scour depth <math>y_s</math>: 4.2885 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\alpha / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>Evaluating Scour at Bridges<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012.</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p><b>Formula:</b></p> $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (\alpha / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, \alpha</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[Fr = Froude number; g = gravitational acceleration]</p> <p><b>Reference:</b><br/>Evaluating Scour at Bridges<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012.</p> |
| <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="button" value="SI units (metric)"/> <input type="button" value="U.S. Customary units"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="2.978"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="5.532"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="20"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="button" value="Square nose"/> <input type="button" value="Round nose"/> <input type="button" value="Circular cylinder"/> <input type="button" value="Sharp nose"/> <input type="button" value="Group of cylinders"/></p> <p>Bed condition: <input type="button" value="Clear-water scour"/> <input type="button" value="Plane bed and antidune flow"/> <input type="button" value="Small dunes"/> <input type="button" value="Medium dunes"/> <input type="button" value="Large dunes"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>• Scour depth <math>y_s</math>: 4.4609 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p><b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]</p> <p>Select: <input type="button" value="SI units (metric)"/> <input type="button" value="U.S. Customary units"/></p> <p>Flow depth <math>y_1</math>: <input type="text" value="2.978"/> m</p> <p>Flow velocity <math>V_1</math>: <input type="text" value="5.532"/> m/s</p> <p>Pier width <math>a</math>: <input type="text" value="1"/> m</p> <p>Pier length <math>L</math>: <input type="text" value="2"/> m</p> <p>Angle of attack <math>\theta</math> of the flow (degrees): <input type="text" value="20"/> Degrees</p> <p>Pier nose shape: <input type="button" value="Square nose"/> <input type="button" value="Round nose"/> <input type="button" value="Circular cylinder"/> <input type="button" value="Sharp nose"/> <input type="button" value="Group of cylinders"/></p> <p>Bed condition: <input type="button" value="Clear-water scour"/> <input type="button" value="Plane bed and antidune flow"/> <input type="button" value="Small dunes"/> <input type="button" value="Medium dunes"/> <input type="button" value="Large dunes"/></p> | <p><b>OUTPUT:</b></p> <p>System of units: SI units (metric)</p> <p>Pier nose shape: Round nose</p> <p>Bed condition: Clear-water scour</p> <p>• Scour depth <math>y_s</math>: 4.4609 m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

**Şekil 4.10 : Çorlu Kınık Köprüsü dairesel burunlu orta ayak oyulmasının  $Q=200$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=300$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=404,6$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=500$  m<sup>3</sup>/sn,  $Q=600$  m<sup>3</sup>/sn için hesabı ( $\alpha=20^\circ$ ).**

Yukarıda yapılan hesaplamalardan( $\alpha=20^\circ$ );

$Q=200$  m<sup>3</sup>/sn debi için

Dairesel burunlu ayak için,  $y_s=3.15$  m

Q=300 m3/sn debi için

Dairesel burunlu ayak için,  $y_s=3.82$  m

Q=404,6 m3/sn debi için

Dairesel burunlu ayak için,  $y_s=4.09$  m

Q=500 m3/sn debi için

Dairesel burunlu ayak için,  $y_s=4.29$  m

Q=600 m3/sn debi için

Dairesel burunlu ayak için,  $y_s=4.46$  m

Olarak hesaplanmıştır.

| Formula:                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Formula:                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, a</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, a</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[<math>F_{r1}</math> = Froude number, <math>g</math> = gravitational acceleration]</p> <p>Reference:<br/>Evaluating Scour at Bridges,<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012</p> |  | $F_{r1} = V_1 / (g y_1)^{1/2}$ $y_s / y_1 = 2 K_1 K_2 K_3 (a / y_1)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$ <p>[SI Units (metric): <math>y_s, y_1, a</math>, and <math>L</math> in m]<br/>[U.S. Customary Units: <math>y_s, y_1, a</math>, and <math>L</math> in ft]<br/>[<math>F_{r1}</math> = Froude number, <math>g</math> = gravitational acceleration]</p> <p>Reference:<br/>Evaluating Scour at Bridges,<br/>FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 18,<br/>Fifth Edition, 2012</p> |
| <b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]                                   | <b>OUTPUT:</b><br>Systems of units: SI units (metric)<br>Pier nose shape: Square nose<br>Bed condition: Clear-water scour<br>Scour depth $y_s$ : 3.4597 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]                                   | <b>OUTPUT:</b><br>Systems of units: SI units (metric)<br>Pier nose shape: Square nose<br>Bed condition: Clear-water scour<br>Scour depth $y_s$ : 4.2022 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]                                   | <b>OUTPUT:</b><br>Systems of units: SI units (metric)<br>Pier nose shape: Square nose<br>Bed condition: Clear-water scour<br>Scour depth $y_s$ : 4.4931 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]                                   | <b>OUTPUT:</b><br>Systems of units: SI units (metric)<br>Pier nose shape: Square nose<br>Bed condition: Clear-water scour<br>Scour depth $y_s$ : 4.7173 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>INPUT DATA:</b> [Description] [Sample Input]                                   | <b>OUTPUT:</b><br>Systems of units: SI units (metric)<br>Pier nose shape: Square nose<br>Bed condition: Clear-water scour<br>Scour depth $y_s$ : 4.9070 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Şekil 4.11 : Çorlu Kımık Köprüsü kare burunlu orta ayak oyulmasının Q=200 m3/sn, Q=300 m3/sn, Q=404.6 m3/sn, Q=500 m3/sn, Q=600 m3/sn değeri için hesabı ( $\alpha=20^\circ$ ).

Yukarıda yapılan hesaplamalardan( $\alpha=20^\circ$ );

$Q=200$  m<sup>3</sup>/sn debi için      Kare burunlu ayak için,  $y_s=3.46$  m

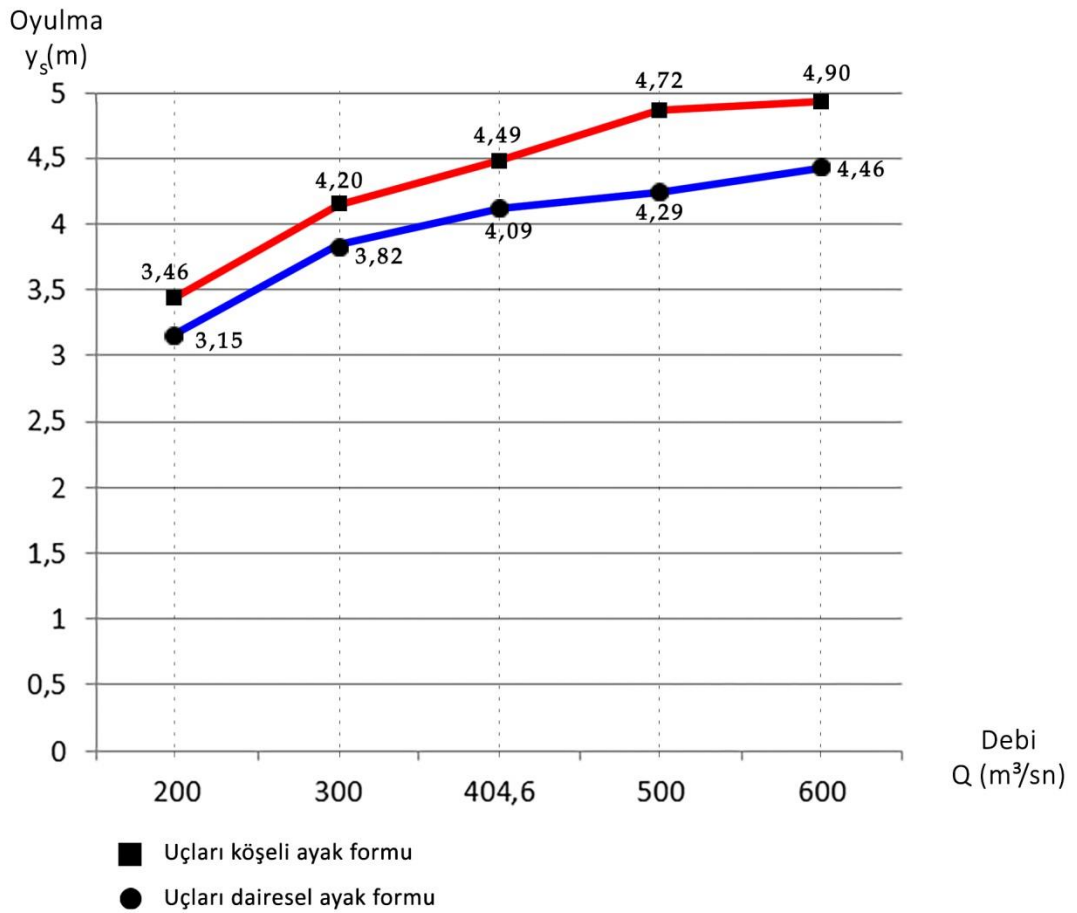
$Q=300$  m<sup>3</sup>/sn debi için      Kare burunlu ayak için,  $y_s=4.20$  m

$Q=404,6$  m<sup>3</sup>/sn debi için      Kare burunlu ayak için,  $y_s=4.49$  m

$Q=500$  m<sup>3</sup>/sn debi için      Kare burunlu ayak için,  $y_s=4.72$  m

$Q=600$  m<sup>3</sup>/sn debi için      Kare burunlu ayak için,  $y_s=4.90$  m

Olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.12 :** Çorlu Kınık Köprüsü oyulma değerinin debi ve ayak uç geometrisi ile değişimi ( $\alpha=20^\circ$ ).

Sonuç olarak ayak uç formunun değişimi, köprü tasarımında en önemli etkenlerden biridir. Bölüm 3’de anlatıldığı gibi, köprü ayak uç formunun dairesel veya kare burunlu olmasının, oyulma üzerinde %10-20 arasında etkisinin olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca atak açısı, ayağın  $L/b>1$  olması halinde oldukça önem arz etmektedir. Yukarıda çözümlemeleri verilen örneklerde atak açısının  $\alpha=10^\circ$  den ,

$\alpha=20^\circ$  ye çıkarılması halinde %15-20 değerlerinde artış gözlenmektedir. Tasarımda yukarıda örnekleme verilen hesaplamalardan gerek ayak uç geometrisi gerek se atak açısının değişiminin etkilerinin toplam değer artışı %37 mertebesine gelmektedir. Köprü geçiş aksının atak açısının  $\alpha \leq 10^\circ$  nin altında tutulması önemlidir. Bunun için, köprü geçiş aksının değiştirilmesi veya yatağın değiştirilerek atak açısının minimize edilmesi, bu da mümkün değil ise atak açısından etkilenmeyecek dairesel kolon tasarımı ile köprü dizayn edilmelidir.



## 5. ORTA AYAKLARDAKİ OYULMALARI ÖNLEYİCİ UYGULAMALAR

Yerel oyulma, köprü ayaklarının yapısal bütünlüğünü tehdit etme potansiyeline sahiptir ve sonuçta köprü taşıyıcı ayak temeli zayıfladığında da göçmelerle sonuçlanır. İnsan kaybının yanı sıra, köprü hasarları, ulaşımın kesintiye uğramasıyla birlikte, onarım-tamirat ya da yeniden inşa maliyetleri gibi sonuçlara sebebiyet verir. Tafarojnoruz, Ali ve ark.(2010), Barbhuiya (2004), Wardhana ve Hadipriono (2003), Hoffmans ve Verheij(1997) ve diğerleri, maksimum oyulma derinliğini tahmin etmek ve köprü ayaklarında oluşan oyulmayı azaltmaya ve önlemeye yönelik iyileştirme yolları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Köprü ayaklarındaki oyulmaya karşı mühendisin tasarım aşamasında yapacağı en iyi yöntem, maksimum oyulma miktarını en iyi şekilde öngörecektir hesaplar yapmak ve köprü ayak temellerini bu oyulmadan etkilenmeyecek derinlikte teşkil etmek olmalıdır. Ancak çoğu zaman teknik olanakların elvermemesi, ya da maliyet gibi unsurlar, mühendisin yapacağı bu çalışmayı kısıtlayabilmektedir. Araştırmacılar bu nedenle, farklı teknik uygulamalar ile oyulma miktarını azaltıcı-önleyici çalışmalara da yönlenmişlerdir. Bu çalışmalardan elde edilen en etkili yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.

### 5.1 Riprap Uygulamaları İle Oyulmanın Azaltılması

Tasarım koşullarına göre çoğu zaman riprap kullanımı, rijit kaplamalara göre daha pratik ve ekonomik sonuçlar vermektedir. Riprap kaplamanın esnek özelliğinden dolayı en çok tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Riprap tasarımında göz önüne alınması gereken en önemli teknik iki parametre ise; riprap ağırlığı ve riprap taşlarının birbiriyle olan kenetlenme etkisidir. Riprap kaplamanın en önemli avantajlarından birisi, proje uygulama alanına yakın ve kaliteli bir taş ocağının bulunması halinde uygulamanın ekonomik olmasıdır. Bunun yanında, akım etkisiyle riprap malzemesinin sürüklenmesi halinde yerine yeni malzemelerin kolaylıkla temin edilerek konulması da büyük bir avantaj sağlamaktadır. Kullanılacak riprap malzemenin büyüklüğünün tayin edilmesinde, akarsuyun köprü ayakları çevresindeki taban malzemesinin özellikleri, akarsuyun akım koşulları, köprünün ayak büyüklüğü

ve köprü ayaklarının akım ile hizalanması gibi faktörler göz önüne alınmalıdır. Temel malzemesiyle riprap arasında bir filtre uygulanması en önemli teknik detaylar arasındadır. Filtre tabaka malzemesi olarak, kum-çakıl karışımı malzeme veya geotekstil uygulaması yapılmalıdır. Riprap kaplamada, taşın şekli ve özgül ağırlığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Küresel yığıntı şeklinde yapılan riprap uygulaması, akım etkisiyle kayma ve yuvarlanma hareketi yapma eğilimindedir. Riprap malzemesinin akım ile sürüklenmesinin önlenmesi için ise, uygulamanın daha fazla kenetlenme etkisi yaratmak amacı ile riprapın nispeten düzensiz boyutta seçilmesi gerekmektedir. Riprap kaplamasında kullanılan malzeme tanesinin geometrik formundaki en büyük, orta ve kısa kenar uzunlukları sırasıyla A, B, C ile gösterilir. Bu sınıflandırmaya göre gerekli riprap büyüklüğü  $A/C < 3,0$  şartı sağlanacak şekilde seçilmelidir. Riprap ağırlığı olan W, denklem (4.1) ile şu ifade önerilmiştir (Lagasse ve ark., 2007).

$$W = 0.85 \gamma_r D_B^3 \quad (4.1)$$

Burada  $\gamma_r$ , riprap malzemesinin özgül ağırlığıdır. Minimum özgül ağırlık değerinin 25 kN/m<sup>3</sup> olması önerilmektedir. Riprap kaplama malzemesinin üzerinde çatlaklar olmamalı ve su emme miktarının az olması gerekmektedir. Formülde kullanılan  $D_B$ , yukarıda tanımlanan B cinsinden riprap büyüklüğüdür. Uygulamada, hem malzemenin sürüklenmemesi, hem de ekonomik olarak kayıp yaşamamak için, geniş ve iyi derecelendirilmiş bir tane dağılımı gerekmektedir. Lagasse ve arkadaşlarının (2007) önerdiği riprap malzemesinin malzeme dağılım değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Riprap sınıfları için malzeme dağılım değerleri (Lagasse ve ark., 2007).

| Sınıf | $D_B$<br>(mm) | $D_{r100}$<br>(mm) | $D_{r15}$<br>(min.) | $D_{r15}$<br>(maks.) | $D_{r50}$<br>(min.) | $D_{r50}$<br>(maks.) | $D_{r85}$<br>(min.) | $D_{r85}$<br>(maks.) |
|-------|---------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| I     | 152.4         | 304.8              | 94.0                | 132.1                | 144.8               | 175.3                | 198.1               | 233.7                |
| II    | 228.6         | 457.2              | 139.7               | 198.1                | 215.9               | 266.7                | 292.1               | 355.6                |
| III   | 304.8         | 609.6              | 185.42              | 266.7                | 292.1               | 355.6                | 393.7               | 469.9                |
| IV    | 381.0         | 762.0              | 233.7               | 330.2                | 368.3               | 444.5                | 495.3               | 584.2                |
| V     | 457.2         | 914.4              | 279.4               | 393.7                | 431.8               | 520.7                | 596.9               | 698.5                |
| VI    | 533.4         | 1066.8             | 330.2               | 469.9                | 508.0               | 609.6                | 698.5               | 825.5                |
| VII   | 609.6         | 1219.2             | 368.3               | 533.4                | 584.2               | 698.5                | 787.4               | 939.8                |
| VIII  | 762.0         | 1524.0             | 469.9               | 660.4                | 723.9               | 876.3                | 990.6               | 1168.4               |
| IX    | 914.4         | 1828.8             | 558.8               | 800.1                | 863.6               | 1054.1               | 1193.8              | 1409.7               |
| X     | 1066.8        | 2133.6             | 647.7               | 927.1                | 1016.0              | 1231.9               | 1384.3              | 1638.3               |

Bu çizelgede,  $D_{ri}$  değerleri i yüzdesinden küçük riprap malzeme büyüklüğüdür. Kullanılacak malzeme dağılımının belirlenmesinde, üniformluk sayısının 1,5 ile 2,5 arasında değişmesi önerilmektedir. Böylece geniş dağılımlı ve düzenli derecelenmiş malzeme kullanılarak tabanda zırhlama etkisi yaratılmaktadır. Böylece, küçük tanelerin, üzerini kaplayan büyük ve ağır tanelerin varlığı ile akım etkisiyle kolayca hareket edemeyeceği için küçük tanelerin akım ile sürüklenmesi engellenmiş olur.

Riprap büyüklüğünün tayini için literatürde deneysel olarak elde edilmiş birçok formülasyon sunulmuştur. Bu formüllerin ortak özelliği, riprap medyan çapının ( $D_{r50}$ ) akım derinliği, görelî yoğunluk ve Froude sayısına bağılı olarak değişmesidir. Ancak bu bağıntıların verdiği değerler, deneysel çalışma koşullarının farklı olmasından dolayı farklılıklar arz etmektedir. Bu nedenlerden dolayı, uygulamada daha emniyetli tarafta kalan denklemlerin kullanılması önerilmektedir.

HEC-23 yönteminde ise ,riprap uygulaması için önerilen Isbach denklem (4.2) ile verilmektedir(Lagasse ve ark., 2001).

$$D_{r50} = \frac{0,69U_d^2}{2g\Delta} \quad (4.2)$$

Denklemde;

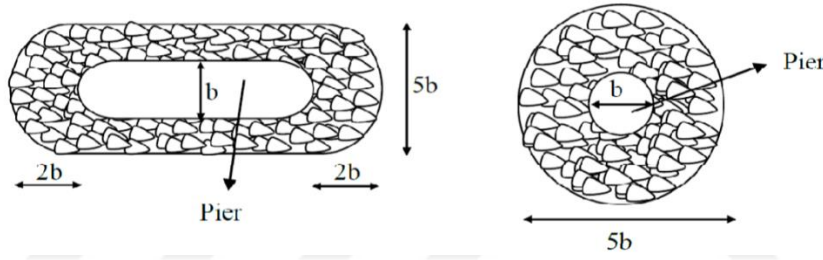
$U_d(=V_d)$ ,=ayak önündeki yerel tasarım akım hızı(m/sn),

$g$  =yerçekimi ivmesi(m/sn<sup>2</sup>),

$\Delta$  = 1.65 olarak alınabilen sabit ve görelî yoğunluktur.

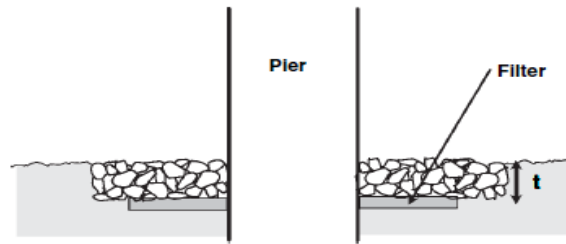
Denklem ile hesaplanan  $D_{r50}$  değerinin karşı geldiği riprap sınıfı ve dağılım detayları Çizelge 4.1 yardımıyla bulunabilir. Riprap kaplama bölgesinin ayak etrafından itibaren akım ve akıma dik yönlerde ayak genişliğinin 2 katı olarak alınması deneysel olarak elde edilen verilere göre önerilmektedir. Riprap zırhlama kaplaması yapılması aşamasında uygulama yüzeyden rasgele malzeme boşaltılarak yapılmamalıdır. Aksi halde, özensiz yerleşmiş taşların birbirleri ile amacına uygun kenetlenerek bağlanması mümkün olmayacaktır. Bu durum; taban seviyesinde artan pürüzlülük sebebi ile ayaklar etrafındaki akımın düzensizleşmesine sebebiyet vermektedir. Ayrıca, akarsuda taşınan ağaç parçaları ve moloz malzemenin köprü ayakları arasında yığılması durumunda, köprü ayakları etrafında akım hızlanmaktadır. Bu durum rasgele yerleştirilmiş taşların akımla sürüklenmesine olanak sağlamaktadır.

Bu nedenle riprap, uygulama alanı içinde tabakalı şekilde ve özenle yerleştirilmelidir. Riprap koruma-zırhlama tabakasının üst kotunun en fazla akarsuyun talveg kotuna kadar olmasına dikkat edilmelidir. Böylece, ayaklar etrafında ilave bir türbülans etkisi yaratılmamış olacaktır. Riprap tabaka kalınlığı en az  $3D_{r50}$  kadar olmalıdır. Daralma oyulmasının miktarı fazla ise, tabaka kalınlığı en az daralma oyulma derinliği kadar olmalıdır. Taşkınlar esnasında tabanda ilave dalgaların oluşması bekleniyorsa, kaplama alanı ve tabaka kalınlığı daha fazla alınmalıdır. Kaplama üst kotu da talveg kotunun altına indirilmelidir. Riprap uygulamasının düşük akım dönemlerinde yapılması önerilir. Ancak oyulma riskinin önlenmesi amacı ile yüksek akım sürecinde uygulama yapılıyor ise, tabaka kalınlığı %50 artırılması önerilmektedir(Lagasse ve ark., 2007). Şekil 5.1’de iki farklı köprü ayak şekli için riprap yerleşimi gösterilmektedir.



**Şekil 5.1 :** Köprü ayakları etrafında uygulanan kaya riprap detayı (Yanmaz, 2002).

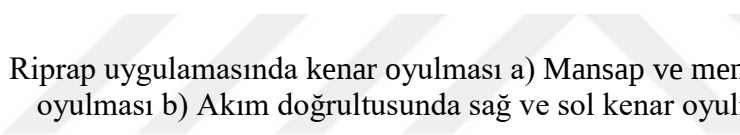
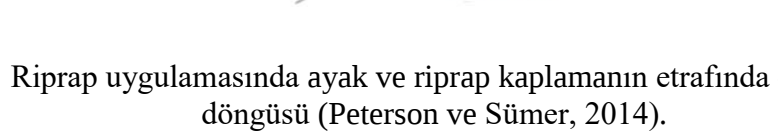
Köprü ayakları etrafındaki akım rejiminin türbülanslı, tabanda ise hareketli ve dalgalı olması durumunda, filtre malzemesinin geotekstil olarak kullanılması önerilmektedir. Riprap uygulamasında filtre yerleşimi Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Zira ayaklar etrafındaki hareketli taban akımı durumunda, taban dalgasının zamanla değişken hareket etmesi sebebiyle, riprap tabakası ile alttaki kum-çakıl filtre arasında, göreceli bir hareket oluşabilir. Bu durumda riprap uygulamasındaki malzemenin dengesi ve yerleşimi bozulabilir.



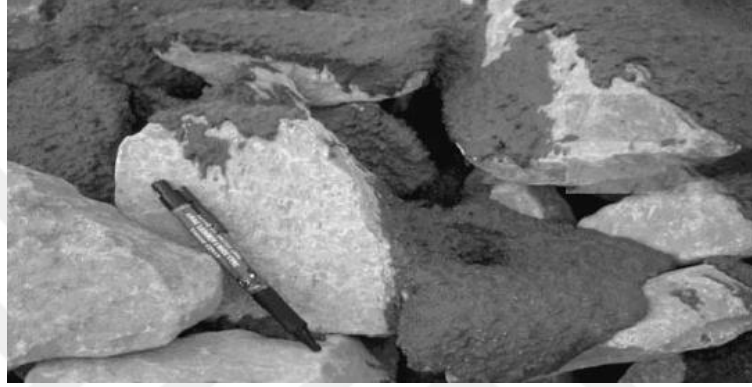
**Şekil 5.2 :** Ayaklar etrafında oluşturulan riprap ve filtre yerleşimi(Lagasse ve ark., 2007).

Tabanda aktif dalgaların oluşma ihtimalinin olmadığı öngörüldüğünde, minimum filtre tabaka kalınlığı  $4D_{50f}$  olacak şekilde kum-çakıl filtre malzemesi kullanılabilir.  $D_{50f}$ , filtre malzemesi medyan çapıdır. Minimum filtre kalınlığının 15 cm'den az olmamasına dikkat edilmelidir. Filtre tabakasının uygulamasının su içerisinde yapılma zorunluluğu bulunuyor ise, kalınlığı %50 artırılabilir. Heibaum (2004) tarafından verilen filtre malzemesi dağılım kriterinde, filtre malzemesi medyan çapının yatak temel malzemesi medyan çapına oranına bağlıdır ve bu iki malzemenin ünlformluk sayısına göre değişmektedir. Örneğin, yatak taban malzemesinin ve filtre malzemesinin her ikisinin de ünlformluk sayısının 2 olması halinde, filtre malzemesi medyan çapının temel toprağı medyan çapına oranı 10 olmaktadır. Filtre malzemesi hidrolik iletkenliğinin toprak hidrolik iletkenliğinden çok daha fazla olması, örneğin 10 katı kadar olması önerilmektedir. Filtre malzemesi olarak geotekstil kullanılması halinde dikkatli bir şekilde uygulanması gereklidir. Geotekstilin uçlarından fazla çekilmeden ve yırtılmamasına özen göstererek titizlikle uygulanmalıdır. Parçalı uygulamadan mümkün olduğunca kaçınılmalı, mecbur kalındığında ise serilecek geotekstilin memba tarafındaki parçasının mansap tarafındaki parçanın üstüne gelecek şekilde yerleştirilmesine özen gösterilmelidir. Filtre uygulanacak temel toprağının çamur ve organik madde içermemesi gerekmektedir. Gerektiğinde sıyırma kazısı yapılarak yüzeyde mevcut kalitesiz toprak kazınmalıdır. Riprap, ayak etrafına özenle yerleştirilmelidir. Derin sularda uygulama yapılması gerektiğinde, arzu edilen kalitede kaplama yapabilmek için ayak etrafı bir batardo ile çevrilerek daha elverişli çalışma alanı yaratılabilir.

Riprap tabakasının kararlılığı, taşların boyutları ve bu taşların oluşan kayma gerilmelerine göstereceğı direnç ile doğrudan alakalıdır. Riprap tabakası da akarsu yatağında meydana gelen oyulma mekanizması ile karşı karşıyadır. Araştırmacılar riprap tabakasında meydana gelen bozulmaları üç ana başlık altında toplamışlardır (Chiew, 1995). Bunlar kayma gerilmesi bozulması, savrulma bozulması ve kenar bozulmasıdır. Chiew (1995), riprap tabakasında meydana gelen bu üç tip kararsızlığı şu şekilde açıklar: Kayma gerilmesinden dolayı bozulmanın sebebi, yerleştirilen taşların yeterince büyük veya ağır olmaması sebebi ile akım kayma gerilmesinin bu tabakayı yerinden oynatmasıdır. İkinci kararsızlık tipi olan savrulma bozulmasının sebebi ise, riprap tabakasının altında kalan ince yatak malzemelerinin, bu tabakada bulunan boşluklardan sızmasıdır. Kenarda meydana gelen bozulmanın sebebi, ince

[illegible]

Kullanılacak riprap büyüklüğünün, yakın taş ocağından elde edilebilecek ekonomik riprap çapından fazla olması durumunda, daha küçük riprap malzemesinin kısmi ara bağlayıcı malzeme olarak kullanılarak ayaklar etrafına serilmesi yoluna gidilebilir. Bu uygulamaya gidilemediği durumda ripraplar arasındaki boşlukların yaklaşık olarak %50 miktarı çimento şerbetiyle doldurulması önerilir. Riprap malzemesinin çimento şerbeti uygulaması Şekil 5.5’de gösterilmektedir.



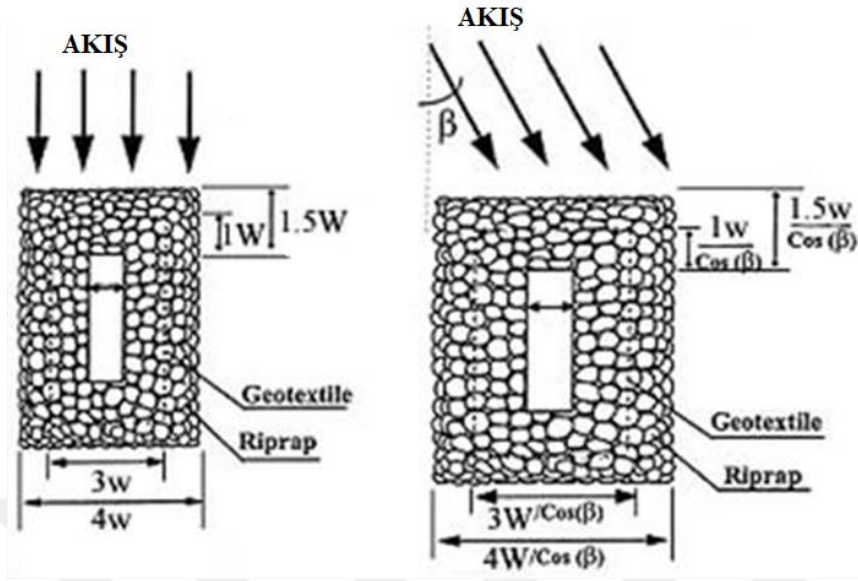
**Şekil 5.5 :** Riprap uygulamasında çimento şerbeti uygulaması(Lagasse ve ark., 2007).

**Çizelge 5.2 :** Grout harcı karışım reçetesi ( $0.765 \text{ m}^3$  Grout harcı için) (Lagasse ve ark., 2007).

| Malzeme                                       | Ağırlık Miktarı |
|-----------------------------------------------|-----------------|
| Normal Portland Çimentosu                     | 336 ila 345 kg  |
| Beton agregası(kum), kuru                     | 535 ila 545 kg  |
| 1/4" kırmataş ,kuru                           | 536 ila 545 kg  |
| Su                                            | 190 ila 205 kg  |
| Hava sürükleyici(çimento ağırlığının)         | 5% ila 7%       |
| Katkı malzemesi<br>(Su altında uygulama için) | 2.7 ila 3.7 kg  |

Kısmi çimentolu riprap uygulamasının, enjeksiyonlu veya akıtma yöntemi kullanılarak yapılması durumunda, Çizelge 5.2’de Lagasse tarafından verilen grout harcı karışımı verilmektedir. Riprap sınıflamasının II, III veya IV’ün kullanılarak hesaplama yapılması araştırmacı tarafından önerilmektedir. Sınıf II’den daha küçük riprap malzemesinin kullanılması halinde, boşluk hacminin küçük olması nedeniyle hazırlanan şerbetin yeterince nüfus etmesi güçleşecektir. Diğer taraftan sınıf IV’ten

daha büyük riprap kullanılması halinde boşluk hacmi fazla olduğundan şerbetin amacına uygun şekilde tutulması zorlaşacaktır (Lagasse ve ark., 2007).



**Şekil 5.6 :** Riprap uygulamasında atak açısı durumu (Kumar ve ark., 2005).

Akımın ayaklara göre atak açısının olması halinde Şekil 5.6’da görüleceği gibi riprap genişliğinde artım yapılarak uygulama yapılmalıdır.

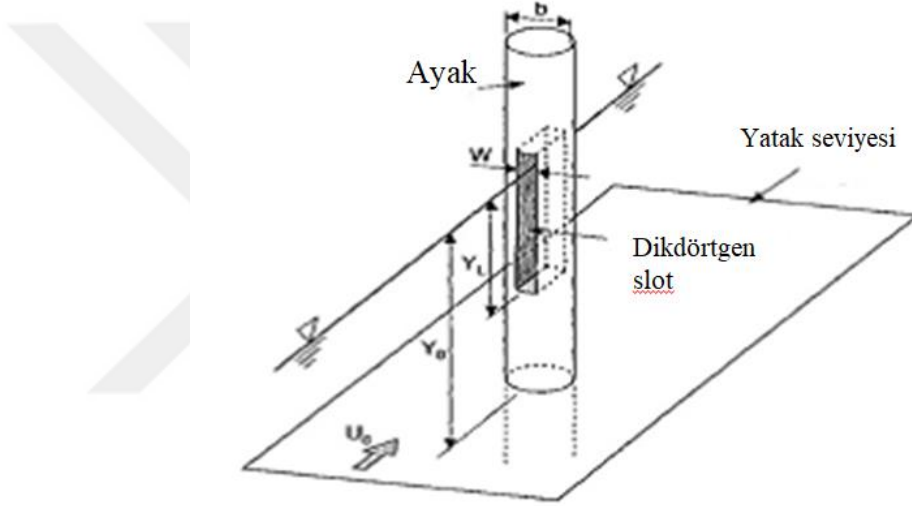
## 5.2 Akım Değiştirme Uygulamaları İle Oyulmanın Azaltılması

Akım değiştirme, çeşitli mühendislik aparatları kullanarak, akarsu yatağındaki kayma gerilmeleri düzenlenerek ayaklar etrafındaki oyulma derinliği azaltılır. Akım değiştirici mühendislik uygulamalarını geliştirmek amacı ile çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Schneible, 1951; Chabert ve Engeldinger, 1956; Thomas, 1967; Tanaka ve Yano, 1967; Ettema, 1980; Odgaard ve Wang, 1987 ; Chiew, 1992; Gupta ve Gangadhariah, 1992; Chiew, 1992, Vittal ve ark., 1994; Melville ve Hadfield, 1999; Kumar ve ark., 1999; ve Zarrati ve ark., 2004, 2006).

### 5.2.1 Ayaklar üzerinde yuvalar oluşturarak oyulmaların azaltılması

Oyulmaların dolaylı yöntemle azaltılması, ayakların yapımı sırasında oluşturulan bir yarık kullanılarak elde edilebilir. Akımın büyük bir kısmını uygun bir basınç dengesi ile geçmek çok daha az oyulma hasarına neden olacak şekilde bırakılması bu uygulamadaki esas prensiptir (Chiew, 1992; Vittal ve ark., 1994; Kumar ve ark., 1999). Bir yuva kullanmanın temel prensibi ya aşağı akımı yataktan uzağa yönlendirmek ya da yatağa çarpan aşağı akımı azaltmaktır. Yuvanın genişliği,

uzunluğu ve yeri önemli parametrelerdir. Yarık yatağın yanına yerleştirildiğinde, alt sınır katmanındaki yaklaşan akım yarık boyunca yatay bir jet olarak hızlanır. İskeledeki aşağı akım oluşan su jetine dik olduğundan, aşağı akımı yatağından uzaklaştırarak oyulma potansiyelini azaltır. Ayaklarda yuvanın kullanımında bazı sınırlamalar vardır. Kalıntılar ve yüzen malzemeler nedeniyle yuva boşluğunun tıkanarak amacına hizmet etmekten uzaklaşma tehlikesi çok yüksektir. Ayrıca ayakların kesit alanını küçülterek taşıma kapasitesini azaltır. Bu nedenle, iyi oyulma koruma cihazı olarak düşünülemezler. Chiew (1992), oyulma azaltması için dikey bir yuva önermiştir. Çeşitli araştırmacılar tarafından üzerinde çalışılan yuva teşkili Şekil 5.7' de gösterilmektedir.



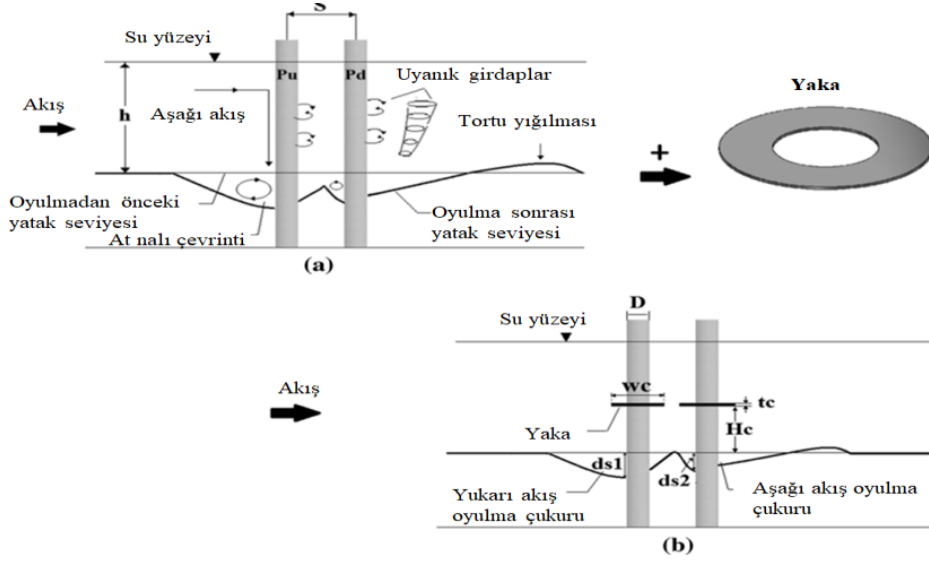
**Şekil 5.7 :** Köprü ayağında yuva teşkil edilmesi (Beg ve Beg, 2013).

### 5.2.2 Yaka kullanılarak ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması

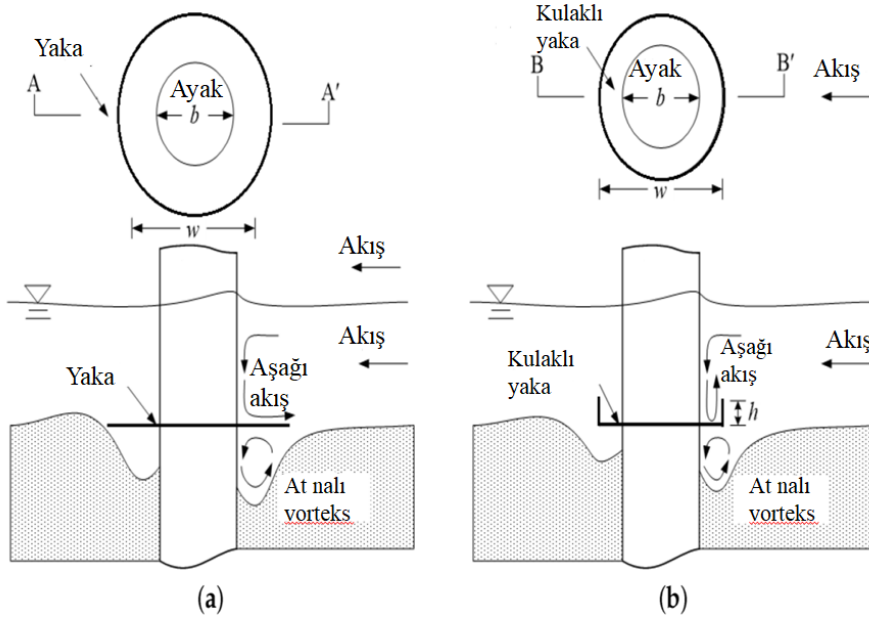
Köprü ayakları etrafına bir bilezik(yaka) takıldığında, akımın dere yatağı üzerindeki doğrudan etkisi önlenir. Bu sadece maksimum oyulma derinliğinde azalmaya neden olmaz, aynı zamanda oyulma oranı da (alan büyüklüğü) önemli ölçüde azalır. Oyulma oranındaki azalma, feyezan süresi kısa olduğunda köprünün hasar riskini azaltır.

Yakaların oyulmaların azaltılması yönündeki etkinliği birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarında tespit edilmiştir (Zarrati ve ark., 2010; Kumar ve ark., 1999; Chiew, 1992; Ettema, 1980; Tanaka ve Yano, 1967; Thomas 1967; Schneible, 1951). Zarrati ve ark. (2010), akıma hizalanmış iki dairesel ayaktan oluşan bir ayak

grubunun yaka uygulanarak düzenlemesi Şekil 5.8’ de gösterilmektedir. Dairesel bir ayağın yatak seviyesinde konumlanmış ve biri düz diğeri ise kulaklı olan iki farklı yaka uygulaması Şekil 5.9’ da gösterilmektedir. Kulaklı yaka uygulaması düz olana göre, oyulmaya karşı daha başarılı sonuç verdiği deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiştir.



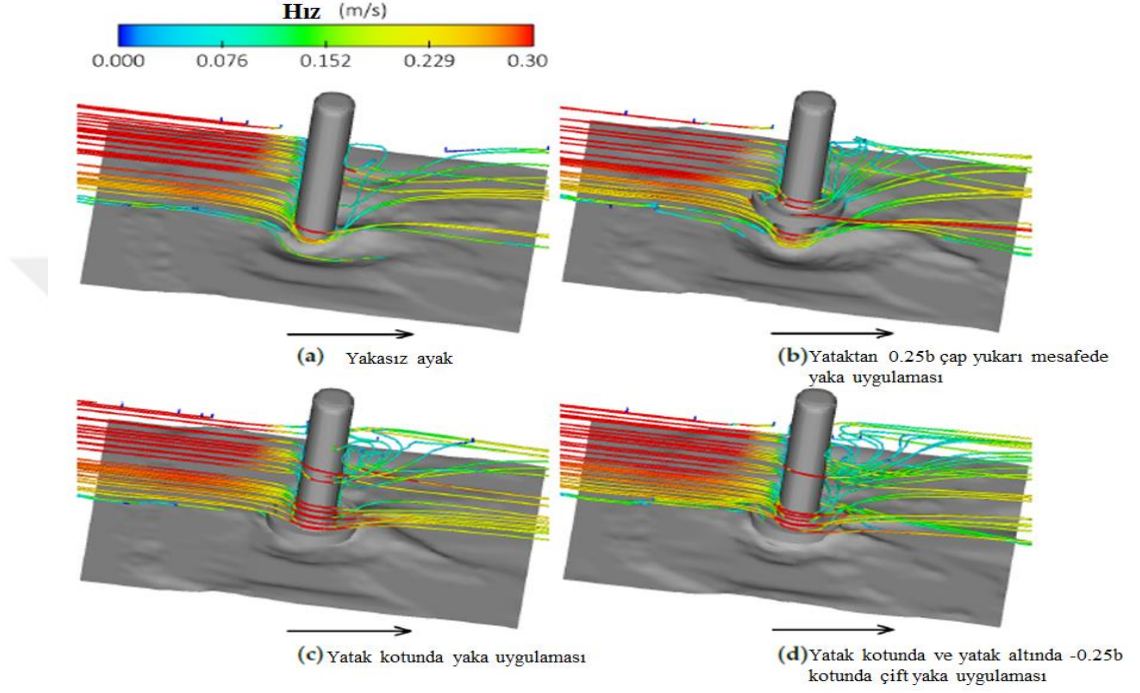
**Şekil 5.8 :** Akım yönünde düzenlenmiş ikili ayağın tabanında yaka uygulaması ve oyulma farklılığı.



**Şekil 5.9 :** Akım ile hizalanmış ayağın tabanında iki farklı yaka uygulaması (Chen ve arkadaşları, 2018).

Kumar ve arkadaşları (1999), dairesel köprü ayakları etrafındaki oyulma kontrolünü yapmak için yakanın etkinliği üzerine bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Yaka

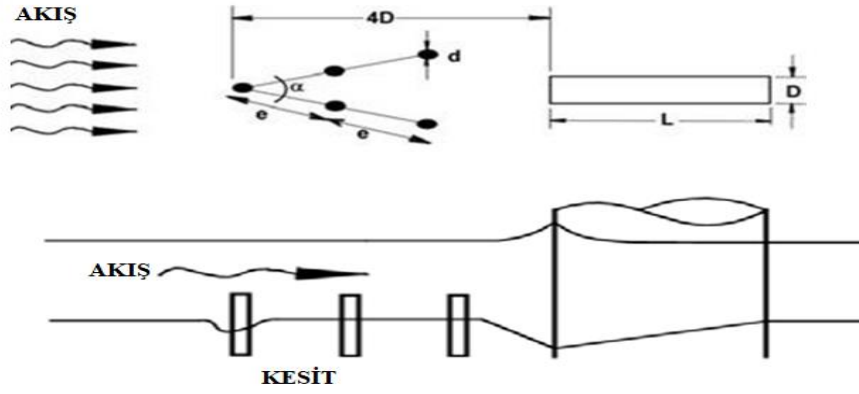
genişliği  $W$  değerinin,  $4b$  olması halinde, yatakta ayakların önünde ve yanlarında oyulma olmayacağını, ancak ayakların mansap tarafında derin bir oyulma çukuru oluştuğu sonucuna varmışlardır. Bu konu üzerine yapılan deneysel çalışmanın ADV ile örnekleneceği Şekil 5.10' da gösterilmektedir. Yaka uygulamasının yatak seviyesinde veya farklı düzeyde teşkil edilmesi, ayaklardaki oyulma miktarını değiştirmektedir. Yaka uygulamasının, akarsu taban seviyesinin altında uygulanması halinde de oyulma miktarında azalmalar gözlenmektedir.



**Şekil 5.10 :** Ayak etrafında yaka uygulamalarının deneysel çalışması ve akım hızı değişiminin ADV ile modellenmesi (Chen ve arkadaşları, 2018).

### 5.2.3 Öncü kazıklar kullanılarak ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması

Öncü kazıkları sadece akımın kazık veya köprü ayakları ile hizalanmış olması ve nispeten düşük akım yoğunlukları için (yani temiz su oyulma koşulları altında) tavsiye edilir. Kazıkların ayakların yukarısına yerleştirilmesi önerilen konfigürasyon Şekil 5.11' de gösterilmiştir. Melville ve Hadfield (1999) tarafından oyulmaya karşı önlem olarak öncü kazık gruplarının etkinliğinin; akım hızına, akım açısına ve akım yoğunluğuna bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Çünkü öncü kazık grupları, canlı yatak koşullarında oyulma önlemi olarak etkisizdir.

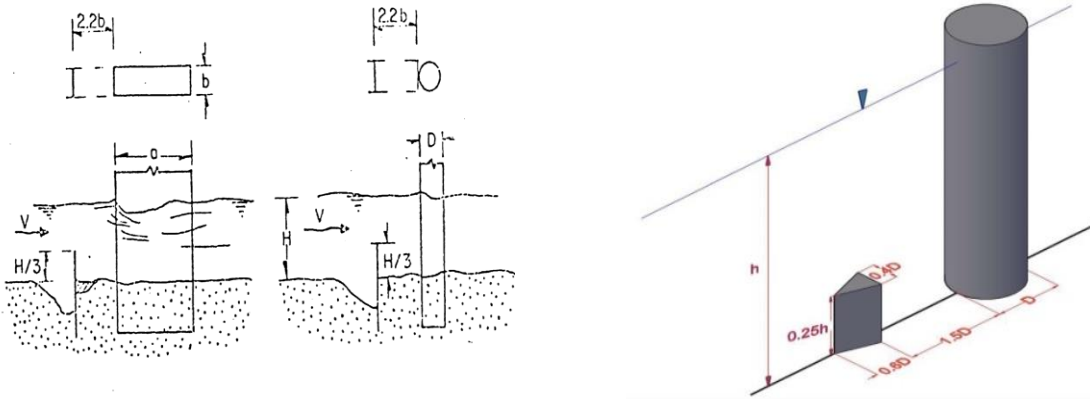


**Şekil 5.11 :** Öncü(kurban) kazık uygulamasının ayaklar ile konumlanması.

Öncü kazıkları oyulma derinliğinde orta derecede bir azalma sağlar. Araştırmacılar, akım ile hizalanmış kalmadıkça ve akım yoğunluğu küçük olmadığı sürece oyulmaya karşı etkisinin kısıtlı olduğu sonucuna varmışlardır.

#### 5.2.4 Akıntıya karşı yerleştirilen palplanşlar veya batık betonarme prizmalar ile ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması

Akıntıya karşı yerleştirilen palplanş uygulaması ve batık betonarme prizma topuklar, ayaklar etrafındaki oyulmayı durdurmak için köprü ayaklarının menba tarafına yerleştirilir. Şekil 5.12 (a)' da önerilen yapılandırmayı göstermektedir. Sac palplanş kazıkların genişliği, köprü ayaklarının genişliğine eşit olmalı ve nehir yatağının üzerindeki derinliğin sadece üçte birini kadar çıkıntı yapmalıdır.



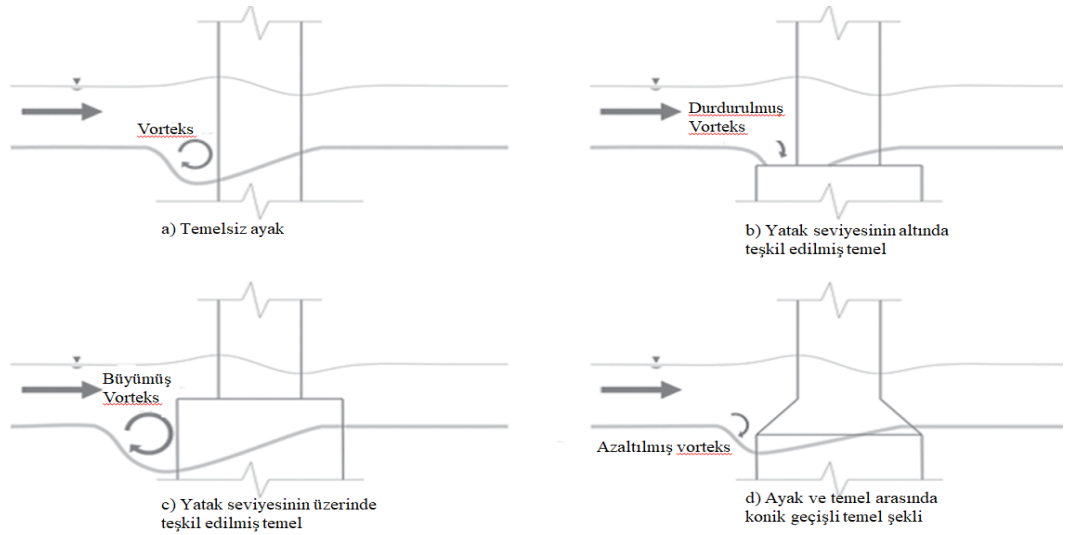
**Şekil 5.12 :** Dikdörtgen ve dairesel ayak önünde palplanş kazıklarının konumlanması(a), batık betonarme prizma ile oyulmaların azaltılması(b).

Batık prizma ile yapılan deneysel çalışmalarda oyulmalar oldukça azaldığı gözlenmiştir. Batık prizma; aşağı akım, at nalı girdabı ve iskele etrafında uyanık girdap gibi karmaşık girdap sistemlerini değiştirerek ayakların etrafındaki oyulmaları

azaltır. Şekil 5.12 (b)' de bu uygulamanın şematik gösterimi bulunmaktadır. Çöp ve yüzen malzemeler, kısa yükseklikleri sebebi ile her iki uygulama yöntemi tarafından engellenmemektedir. Batık prizma ve palplanş uygulaması, ayakların etrafındaki yerel oyulma derinliğini ve hacmini azaltmak için hem yeni hem de mevcut köprü yapılarında uygulanabilir. Bu uygulamalar ile oyulma derinliğinde %40, oyulma hacminde ise %60 azalma olduğu gözlemlenmiştir (Ranjbar-Zahedani ve ark.).

### 5.2.5 Keson temeller ile ayaklar etrafındaki oyulmaların azaltılması

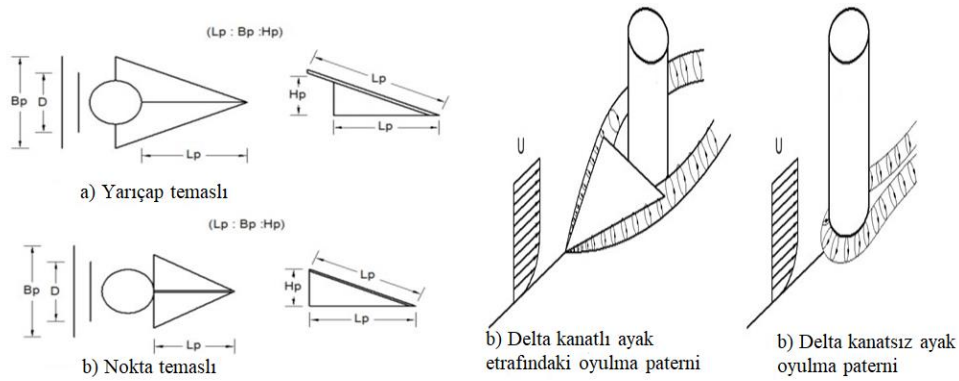
Chabert ve Engeldinger (1956), dairesel keson üzerine kurulmuş dairesel bir ayağın etrafındaki oyulmaları incelediler. Araştırmaların sonucunda en iyi sistemin, ayak çapının üç katı çapa sahip bir keson ve doğal yatağın altındaki keson çapının yarısından daha derinde olduğu durumun olduğu sonucuna vardılar. Sadece ayağın varlığı ile oluşan oyulma derinliğini üçte bir oranında düşürdülerse ve Schneider (1969), dikey çevrelenen kesonun kullanıldığı sistemin bir varyantını araştırdı. Ana fikir, at nalı girdabının yan tarafta aşağı akıma kaçmasına izin veren bir sistem yaratmaktır. Keson ile ayak arasında oluşturulan lineer geçiş kesiti aynı zamanda kesonun boyutlarında da bir azalmaya izin verir. Bu tür uygulamaların uygulama çeşitliliği Şekil 5.13' de gösterilmektedir.



**Şekil 5.13 : Keson temel ayaklarının yerel oyulma üzerindeki etkisi**  
("Köprü Hidroliği Kılavuzu", TAC'daki şekle dayanarak).

### 5.2.6 Pasif delta kanatları ile ayaklar etrafındaki yerel oyulmaların azaltılması

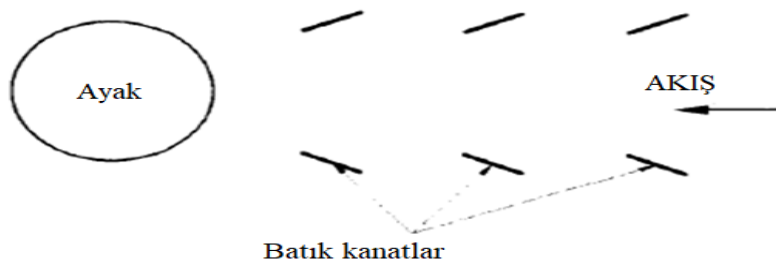
Pasif delta kanatları, Şekil 5.14' de ayaklara konumlandırılması ve akım üzerindeki etkisini göstermektedir. Delta-kanat aerodinamik ana akım teoremi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu cihaz ayakların ön kenarına takıldığında, at nalı girdabı dönme biçimini ve yönünü değiştirir. Bu şekilde at nalı girdapların ayaktan uzağa taşınmasını ve ayak çevresinde oluşan tortu hareketinin azalmasını sağlamışlardır. Gangadhariah ve Gupta (1992) oyulmaların azaltılması için ayakların önünde delta kanat benzeri bir cihaz kullanılmasını önermişlerdir.



**Şekil 5.14 :** Delta kanatlı sistemin köprü ayaklarında konumlandırılması (Gangadhariah ve Gupta, 1992).

### 5.2.7 Batık kanatlar ile ayaklar etrafındaki yerel oyulmaların azaltılması

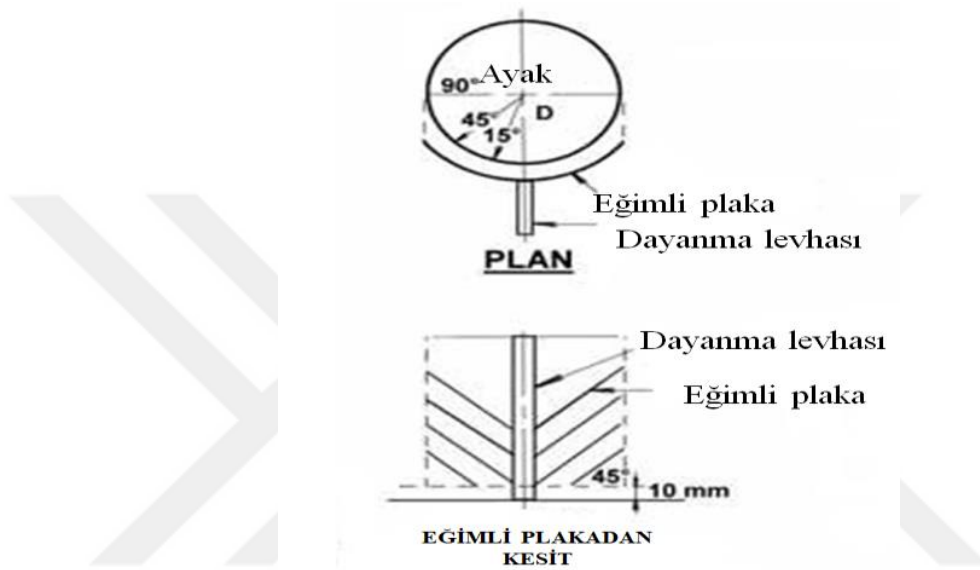
Çeşitli kanatlı dikdörtgen plakalar yatay akım yönünde bir açıda tutulmuştur. Bu uygulama ile akımı bir tarafa yönlendirdiler ve arkalarında uç girdaplarının oluşmasına neden oldular. Bu uç girdaplar, at nalı girdabını hareket döngüsünü bozarak oyulma derinliğinde azalma sağlamışlardır. Ayakların menba tarafına yerleştirilen kanatçık dizisi, oyulma çukurundaki aşınmış tortu hareketini azaltır ve böylece oyulma işlemini geciktirir. Köprü ayaklarının önündeki boyutları ve plan düzenini gösteren durum Şekil 5.15' de gösterilmiştir.



**Şekil 5.15 :** Batık kanatların yerleşimi (Parker ve ark., 1998'den sonra).

### 5.2.8 Ayakların önünde teşkil edilen eğimli kanatlar yerel oyulmaların azaltılması

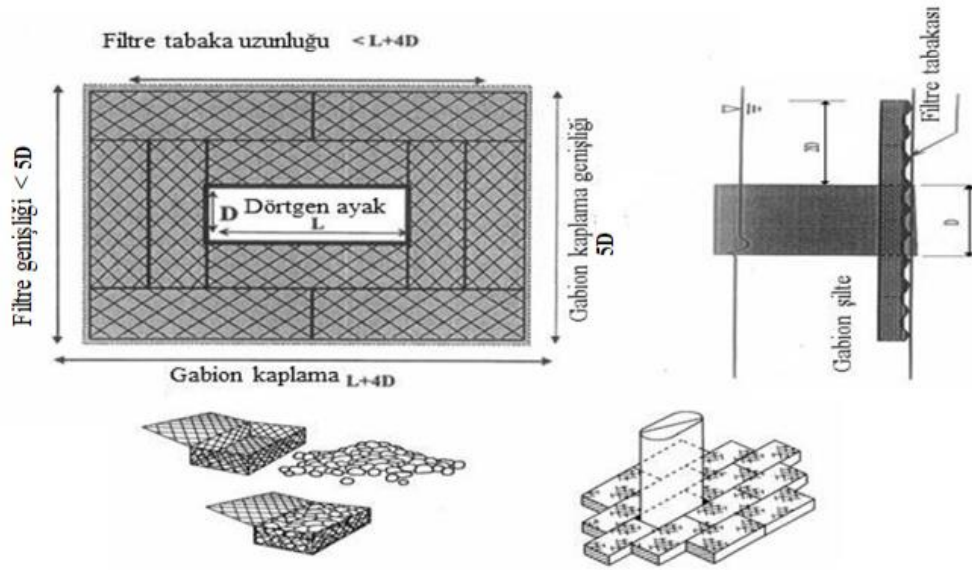
Aşağı doğru yönlendirmiş eğimli kanatlar, ayırma plakasının her iki tarafına ayakların menba yüzüne simetrik şekilde yerleştirilir. Kanatçığin detayları Şekil 5.16' da gösterilmiştir. Bu uygulamanın tasarım prensibi, at nalı girdabının genişleme bölgesini bastırmaktır. Bu cihazın kullanımı için daha fazla deneyin yapılması gerekmektedir.



Şekil 5.16 : Ayaklara konumlanmış kanatlar (Parker ve ark., 1998).

### 5.3 Geotekstil Filtreli Taş Gabion ile Yerel Oyulmaların Azaltılması

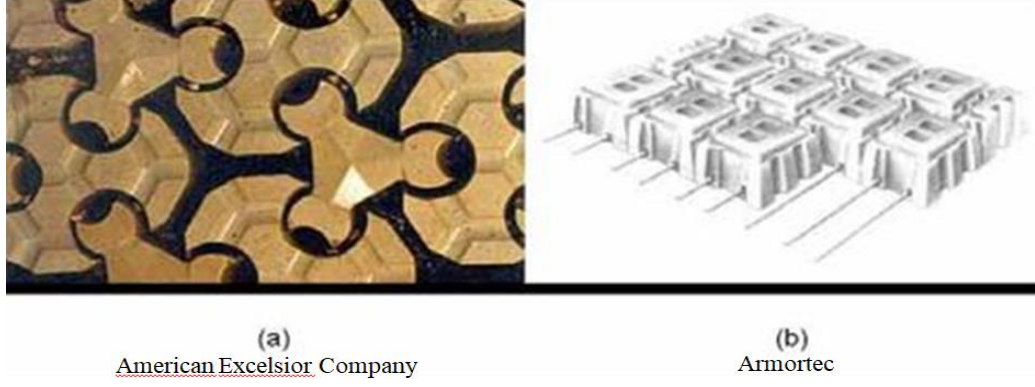
Taş gabionlar; kablolu bağlantısı bulunan, kutuya yerleştirilmiş taş demetlerinden oluşur ve her gabion modülü birbirine bağlanır. Kalınlıkları 20 cm ile 50 cm arasındadır. Oyulma miktarına göre birkaç kat yerleşim yapılabilir. Geotekstil filtre, taş gabionun altında kullanılır. Bu sistemde filtre, ortaya çıkan akıntı reaksiyonları nedeniyle, yataktaki taban malzemesinin gabiondan emilmesini durdurmak için gereklidir. Geotekstil filtre dokuma olmayan tiptedir. Gabion paspas uygulaması Şekil 5.17' de gösterilmektedir. Çalışma prensibi, riprap uygulamasının prensibi ile aynıdır. Ancak ayak etrafındaki yatak tabanının düz olması halinde uygulanabilir. Feyezan akımı durumunda, malzemenin sürüklenerek yok olmasını önleyici formu avantaj sağlar.



**Şekil 5.17 : Oyulmalara karşı Gabion paspas ve uygulama şekilleri (HEC-23).**

#### **5.4 Kenetli Betonarme Bloklar(ACB) İle Yerel Oyulmaların Azaltılması**

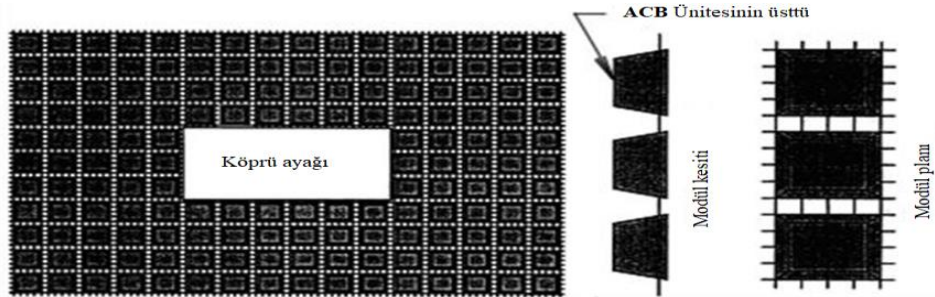
Mafsallı ve kenetli beton bloklar (ACB), nehir yatağı üzerinde ve köprü ayakları etrafında sürekli bir battaniye veya paspas oluşturmak için yerleştirilirler. Birbirine kenetlenen veya çelik çubuklar- kablolar ile bir arada tutulan veya birbirine bitişik olan önceden oluşturulmuş birimlerden oluşur. ACB'ler, yaklaşık % 25 yüzey plan alanı açık olan bitişik bloklarla birbirine kenetlenen tek bir hücresel blok tabakasından oluşur. Kilitleme güç sağlar ve %25 boşluk yüzey alanına çakıl ile doldurularak bu kilitlenme artırılabilir. ACB'ler bir geotekstil veya granül filtre üzerine serilir. Ayrıca “yapay riprap” olarak da bilinir ve kaya riprapın alternatifi olarak kullanılır, Özellikle, aşırı hidrolik kuvvetlere maruz kalan yerlerde, kısa taşın mesafeli bir kaya riprap kaynağı bulunamadığında veya büyük kaya boyutları gerektiğinde tercih edilir. Bu birimler, birbirine kenetlenme özellikleri nedeniyle riprap ile karşılaştırıldığında daha fazla stabiliteye sahiptir. ACB'ler fabrikada prefabrik beton üniteler halinde üretilebilir. Son yıllarda erozyon kontrolü için esas olarak kaplamalar olarak kullanılırlar, ancak köprü ayaklarında oyulmaların azaltılması amaçlı da kullanılırlar. Şekil 5.18’ de, birbirine kenetlenen ve kablo bağlantılı blok sistemlerinin örneklerini göstermektedir.



**Şekil 5.18 :** Birbirlerine kilitli(a) ve kablo ile bağlanmış(b) mafsallı beton blok(ACB) örnekleri, (HEC-23).

Kablo bağlı bloklar veya şilteler, ACB'lerin en popüler formlarıdır. Şekil 5.19' da gösterildiği gibi, bir şilte oluşturmak için çelik kablolarla birbirine bağlanmış beton blokların köprü ayakları etrafında konumlandırılması gösterilmektedir. Kablolar galvanizli çelik veya polyester malzemeden üretilir. Birbirine bağlanan yönetilebilir bloklar, erozyona ve nehir tabanındaki oyulmalara karşı koruma sağlamak için şiddetli bir selin hareket kuvvetlerine direnme yeteneğine sahiptirler.

Kablo bağlı bloklar, akımların kaba şiddetlendiğinde ve büyük taşları taşıyabildiğinde ABD Ordusu Mühendisler Birliği tarafından başarıyla kullanılmıştır. Avantajları arasında güçlü akımlara dayanma yeteneği ve buza karşı direnç göstermesidir. Blok boyutu; taşkın hızı, nehir yatağının eğimi ve yan eğimler esas alınarak tasarlanmıştır. Kabloya bağlı blok üniteleri arasındaki boşluk, yatağa akım esnasında oluşacak hareket esnekliği sağlamak için yeterli miktarda olmalıdır. Kablolulu betonarme paspaslar olarak ta adlandırılan sistemler, sığ su derinliklerine makine ile yerleştirilebilir. Bununla birlikte, küçük veya kapalı alanlar ile nehir tabanının kayalık olduğu ve yeterince düz olmadığı durumlar için çok uygun değildir.

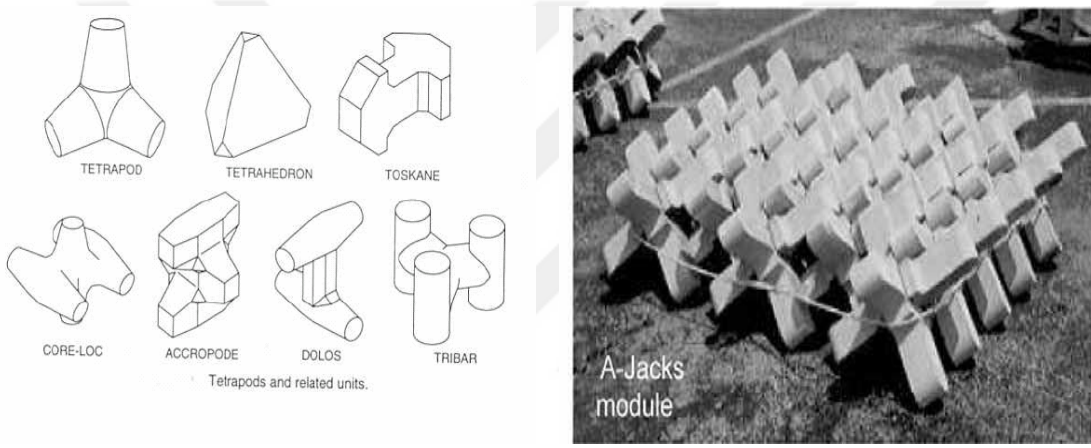


**Şekil 5.19 :** Köprü ayaklarında oyulmalara karşı birbirlerine kablo ile bağlanmış mafsallı beton blok (ACB) yerleşimi (HEC-23).

## 5.5 Prefabrik Beton Zırh Birimleri İle Yerel Oyulmaların Azaltılması

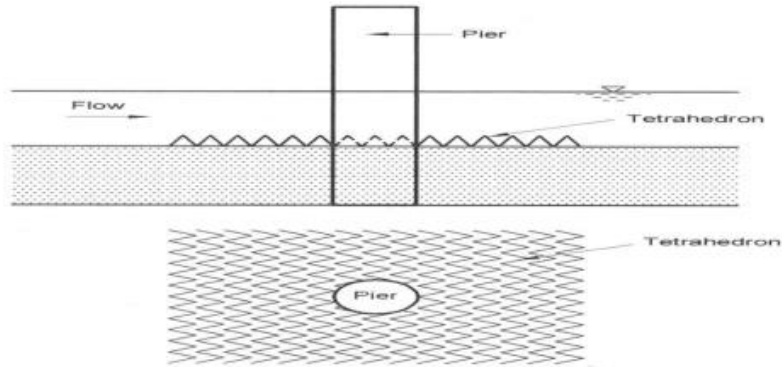
Riprap kullanılabilirliğinin sınırlı olduğu veya aşırı hidrolik kuvvetlere direnmek için büyük kaya boyutlarının gerekli olduğu ortamlarda kullanılırlar. Armortec üç boyutlu betonarme zırh üniteleri köprü ayaklarının oyulmalara karşı korunması için kullanılmıştır. Ayrıca, kıyı koşullarında dalga saldırısına direnmek için de kullanılırlar.

Yaygın olarak kullanılan beton zırh bloklarından; Armortec Company tarafından geliştirilen tetrapodlar (a), A-jak modülü diye adlandırılan zırh uygulama modülünün bağlantı düzenlemesi(b) ile, tetrahedron modül tipinin köprü ayaklarının etrafında konumlandırılması ise (c) ile, Şekil 5.20' de gösterilmiştir.



(a)

(b) Ayres Associates (1999)



(c)

**Şekil 5.20 :** Prefabrik zırh birimleri (a) ,oluşturulmuş bağlantı detayı(b), köprü ayağı etrafında konumlandırılması(c)(Parker ve ark.,1998).

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Köprü ayaklarında meydana gelen oyulma, köprünün güvenliği üzerinde oynayabileceği rol nedeniyle önemli bir mühendislik kaygısı olarak görülmektedir. Bu konunun önemi nedeniyle, birçok araştırmacı bu kritik konuda çalışmıştır. Ancak çoğu araştırmacı, çalışmalarını temiz su oyulması ve dengeli oyulma derinliğinin tahmini üzerine odaklamıştır. Mevcut köprü temel tasarımı da dengeli oyulma derinliğine dayanmaktadır. Yeni çalışmalar, köprü temel tasarımının dengeli oyulma derinliğine dayalı olarak genellikle daha muhafazakâr tasarıma yol açtığını göstermektedir. Çünkü sel dönemlerinin pik noktalara geldiği zaman süreçleri genellikle denge koşullarına ulaşmak için çok kısadır.

Oyulma, köprü ayaklarının tabanında yer alan sedimentin akım sebebi ile sürüklenerek ayakların çevresinden ve köprü yapı yanlarından ayrıştırılması olarak tanımlanmaktadır. Oyulma çukurlarına bağlı köprü yıkımları, sele bağlı yatak malzemesinin sürüklenerek tabandan çıkarılması ve temelin altındaki malzemeyi boşaltması ile ayakların stabilitesinin bozulması olarak neticelenmektedir. Oyulma, su yüzünden köprü etrafında oluşan erozyon teriminin mühendislik açıklamasıdır.

Ülkemizde de yıkılan köprülerin sebebi olarak depremler, taşkınlar ve başka yapısal sebepler olarak gösterilmektedir. Bu gibi sebeplerden dolayı, oyulmanın etkisi ihmal edilmiş ve bu konuda yeterince araştırma yapılmış olmasına rağmen oyulma köprü yıkımlarındaki ana sebep olarak göz ardı edilmiştir. 1998 yılında Zonguldak-Devrek'te ağır hasar gören köprünün yapısal sebeplerle değil oyulma nedeniyle olduğu ortaya çıkmıştır.

Köprülerin yapısal emniyetini olumsuz etkileyen en önemli hidrolik faktörlerin başında, alüvyon tabanlı akarsular üzerinde inşa edilen köprüler gelmektedir. Çünkü bu özellik akarsu yatağında meydana gelebilecek oyulmaları arttırmaktadır. Bunun gibi diğer hidrolik faktörlere bağlı etkenler, taşkın ve sel olaylarına maruz kalan köprülerin bu esnada taşınan kaba malzemenin köprü açıklığında birikmeye sebep olması ve tıkanmaya yol açarak oyulma potansiyelini akımın da hız etkisiyle beraber arttırması olarak görülmektedir.

İkinci bir sebep olarak ise su akımının yükseldiği durumlarda memba su seviyesi artmaktadır. Bu durum köprü tabliyesinin alttan kaldırılma kuvvetine maruz kalmasına ve yükselen bu su seviyesinin tabliyeden savaklanma yaratmasına sebep olmaktadır. Akarsularda meydana gelen oyulmalar; daralma oyulması, yerel oyulma ve uzun dönemli taban oyulması olarak üç ana başlık altında incelenmektedir. Yerel oyulma, ayaklar etrafında oluşan akım çevrintileri nedeniyle meydana gelmektedir. Başlangıçta nispeten düz bir çizgide ilerleyen akım, köprü ayakları çevresinde değişime uğrayarak ayağın memba yüzünde oluşan durgunluk basınç düzlemiyle karşılaşır. Bu çalışmada, akarsu köprülerinin orta ayaklarında meydana gelen oyulmaların, gerek akımın şiddeti, gerekse akımın ve akarsuyun diğer özelliklerine bağlı olarak nedenlerine yer verilmiştir. Bunlara ilaveten; oyulma öngörü ve hesaplamalarına ek olarak, oyulmaları azaltıcı zırhlanma uygulamaları ile önleyici mühendislik çalışmalarından biri olan akım değiştirme sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Akım değiştirme cihazları, diğer uygulamaların ekonomik ve teknik olarak uygulama zorluğunun olması durumunda kullanılabilecek seçenekler arasındadır. Köprü alanının yakınında riprap malzemesinin temin edilebileceği yer mevcut değil bu tür uygulama ekonomik olmayabilir. Bununla birlikte, köprü ayaklarındaki oyulma derinliğini azaltmak için bu akım değiştirme cihazlarının kullanımında bazı sınırlamalar vardır. Ayaklarda bir yarı kullanmanın temel prensibi ya aşağı akımı yataktan uzağa yönlendirmek ya da yatağa çarpma sırasında aşağı akımı azaltmaktır. Kumar ve arkadaşları, yaklaşma akımının yuvaya yüksek bir eğime sahip olması durumunda yuvanın pratik olarak etkisiz olacağı sonucuna varmışlardır. Melville ve Coleman tarafından belirtildiği gibi, enkaz varlığı yuvayı engelleyebilir ve akım ile konumlanma açısı uygulamayı etkisiz hale getirebilir. Beg ve Beg, yuvanın varlığının ayak yapısının mukavemetini azalttığı ve enkaz ve yüzen malzemelerden dolayı yuvanın boğulma olasılığının çok yüksek olduğunu değerlendirmiştir. Bu nedenle, yuvanın bir oyulma koruma cihazı olarak kabul edilemeyeceğini belirtmiştir. Aşağı doğru akımı yönlendiren, dere yatağını doğrudan akım etkisinden koruyan yatak seviyesindeki veya altındaki köprü ayaklarının etrafında dönen ince yaka plakası oyulmaya karşı çok etkili bir koruma aracıdır. Iowa kanatları, Odgaard ve Wang tarafından yerel oyulmaya karşı önlem olarak önerilmiştir. Iowa kanatları, iskelenin hemen yukarısındaki akım yatağına monte edilen ve dışa doğru açılı dikey plakalardır. Bu cihazlar, ayaklara yaklaşan akımı

saptırmaktadır. Lauchlan (1999), oyulma azalımı için Iowa kanatçıklarının kullanımını canlı yatak koşulları altında araştırmıştır. Bazı testlerde maksimum oyulma derinliğinin % 30 ila % 50 arasında azaltılmasına karşın, verilerde belirgin bir eğilim olmadığı sonucuna varmıştır. Melville ve Hadfield, bir köprü iskelesinin yukarısına yerleştirilmiş bir grup kurban (öncü) kazıkları önermişlerdir. Bu kazıklar akımı saptırır ve köprü ayaklarının arkasında uyanık bölge oluşturur. Akıma hizalanmış olarak kaldığında ve akım yoğunluğunun nispeten küçük olduğu durumlarda, öncü kurban kazıklarının kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, kurban kazıklarının büyüklüğü ve şekli çalışmalarında yeterli çalışmalar yapılamamıştır. Ayrıca, kurban kazıklarının sel olayları sırasında döküntüleri tutabileceği ve büyük bir daralma üretebileceği veya köprü açıklığını bloke edebileceği için kurulum yeri, kazık sayısı, konfigürasyonları ve batma derecesi daha fazla deneysel araştırmaya ihtiyaç duymaktadır. Dey ve arkadaşları, dişli bir ayağın (sarmal teller veya ayakların üzerine spiral şeklinde sarılmış kablolar), etrafındaki yerel oyulma derinliğini azaltabileceğini tespit etmişlerdir. Ranjbar, Zahedani ve arkadaşları, bir üçgen prizmanın etkili bir akım değiştirme cihazı olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışmalarının sonuçları, önerilen prizmanın akım yapısını önemli ölçüde etkilediğini, hem aşağı akım, hem de at nalı vortekslerinin gücünü azalttığını ve akım çizgilerini ayaklardan uzağa yönlendirdiğini ve sonuç olarak iskelenin etrafındaki yerel oyulmayı azalttığını göstermiştir. Bu yapının boyunun tam derinlikli olması halinde çevresinde enkaz ve yüzen malzeme birikme olasılığı vardır. Bu sorunu çözmek için Ranjbar, Zahedani ve arkadaşları etkili oyulmaya karşı önlem olarak, kısa bir prizma topuk önermişlerdir. Önerilen prizma modeli, maksimum oyulma derinliğinde, %40 ve oyulma hacminde %60 azalma ile iyi bir performans göstermiştir. Oyulma miktarları, her akarsuyun akım ve diğer yerel özelliklerinin farklı olması sebebi ile köprü ayaklarının konumlandığı yerin özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Aynı şekilde önleyici-azaltıcı mühendislik uygulama seçimleri de farklılık gösterebilmektedir.

Mühendis, tasarım aşamasında, oyulma miktarını en iyi şekilde öngörülebilirlik altında hesaplamalı ve ayakların bu oyulma sonucu stabilitesini kaybetmeyecek şekilde tasarlamayı amaçlamalıdır. Bu duruma mani olacak, topoğrafik-jeolojik ve hidrolojik engellerin olması durumunda, yukarıda gösterilen oyulma azaltıcı mühendislik uygulamalarının en uygun olanını veya bir kaçını birlikte uygulamalıdır. Bu uygulamaların bazılarının mevcut köprü ayaklarında da uygulanabilmesi oyulmaların azaltılması amacı için büyük avantaj sağlamaktadır.

Sonuç olarak; Bölüm 3’de anlatılan oyulmaya neden olan akım faktörlerinin yanında, köprünün inşa edildiği yerin topoğrafik, jeolojik vb. lokal faktörlerin de göz önüne alınarak oyulma hesap öngörülerini en yakınsak olarak hesaplanmalıdır. Bu çözümlemelerin ve belirsizliklerin yeterli yakınsaklıkta öngörülememesi durumunda, oyulmaları önleyici çalışmaları inşa başlangıcında veya daha sonra uygulamaktan kaçınılmamalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abed, L., Gasser, M. M.** (1993). Model Study of Local Scour Downstream Bridge Piers. In National Conf. on Hydraulic Engineering (pp. 1738– 1743). ASCE.
- Arneson, L.A., Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F., Clopper, P.E.,** (2012). Evaluating Scour at Bridges , Report No: FHWA-HIF-12-003 HEC-18 Fifth Edition, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, ABD.
- Arkış, T.,** (2013). Köprü Uç ve Orta Ayakları Etrafındaki Yerel Oyulmalara Karşı Koruyucu Önlemlerin Araştırılması, Y.L. Tezi, DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Barbhuiya, A. K., Dey, S.,**(2004). Turbulent Flow Measurement by the ADV in the Vicinity of a Rectangular Cross-section Cylinder Placed at a Channel Sidewall, Flow Measurement and Instrumentation, 15:221-237.
- Barbhuiya, A. K., Dey, S.,** (2004). Velocity and Turbulence at a Wing-Wall Abutment, Sadhana, 29: 35–56.
- Başak V., Başlamışlı Y., Ergün Ö.,** (1977). Doğrusal Eksenli ve Dairesel Kesitli Kazık Grubu Etrafındaki Yerel Oyulma Derinlikleri”, D.S.İ., T.A.K.K Dairesi Başkanlığı, Yayın No. HI-641.
- Başak V., şentürk F., Aksoy ř., Başlamışlı K. Y., Ergün Ö.,** (1975). Bir Doğru Üzerinde Yer alan Kazık Grubu Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalar, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara. Yayın No.HI-583.
- Bateni, S.M., Borghei, S.M., Jeng, D.S.,** 2007. Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. Engineering Applications of Artificial Intelligence, **20**(3), pp. 401–414.
- Beg, M., Beg, S.,** (2013). International Journal of Engineering Inventions e-ISSN: 2278-7461, p-ISSN: 2319-6491 Volume 2, Issue 7 (May 2013) PP: 07-15.
- Breusers, H.N.C., Nicollet, G., Shen, H.W.,** (1977). Local Scour Araund Cylindrical Piers, Journal of the Hydraulics Research, IAHR, 15(3), 211-252.
- Breusers H.N.C., Raudkivi A.J.,** (1991). “Scouring”, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Brunner, G. W.,** (2002). HEC-RAS River Analysis System User’s Manual Version 3.1, California: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC).

- Chabert, J., Engeldinger, P.,**(1956). Laboratoire National d’Hydraulique (Chatou, F.,France. Bureau central d’études pour les équipements d’outre-mer. Etude des affouillements autour des piles de ponts. Chatou, France: Laboratoire National d’Hydraulique.
- Chang Wen-Yi, Lai Jihn-Sung, Yen Chin-Lien,** 2004. “Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.130, No. 9, September 1, 2004.
- Chen, Su-Chin, Tfwala, S., Wu, T.Y., Chan,H.C., Chou, H.T.,** (2018). A Hooked-Collar for Bridge Piers Protection: Flow Fields and Scour, <http://dx.doi.org/10.3390/w10091251>, Water 2018, 10, 1251, Tayvan.
- Chiew, Y..M,** (1995). Mechanics of Riprap Failure at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering, 121(9), 635–643. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:9(635)
- Chiew, Y.M.,** (1992). Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 118(9), 1260–1269.
- Demiral, D.,** (2016). Dalga Etkisi Altında Kazık Ve Palplanş Çevresinde Akım Ve Oyulma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Deng, L., Cai, C. S.,** (2009). Bridge scour: Prediction, modeling, monitoring, and countermeasures—Review. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 15(2), 125–134.
- Durgun, K.,** (1964). Laminer Üç Boyutlu Sınır Tabakası Denklemlerinin İnvariant Özellikleri ve Bir Bağlama Ayağı Etrafındaki Laminer Üç Boyutlu Sınır Tabakasının Etüdü, Doktora Tezi, İ.T.Ü., İstanbul.
- Ettema, R., Kirkil, G., Muste, M.,** (2006). Similitude of Large-scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders. Journal of Hydraulic Engineering, 132(1): 33–40. doi:10.1061/ (ASCE)0733-9429(2006)132:1(33).
- Guo, J., Suaznabar, O., Shan, H., and Shen, J.,** (2012). Pier Scour in Clear-Water Conditions with Non-Uniform Bed Materials, Publication No. FHWA-HRT-12-022, Federal Highway Administration, Washington D.C, ABD.
- Gupta, A.K., Gangadharaiah, T.,**(1992). Local scour reduction by a delta wing-lick passive device, 1992, Proc., 8th Congr. of Asia and Pacific Reg. Div., 2, CWPRS, Pune, Hindistan, pp. B471-B481.
- Jain, S.C., Fischer, E.E.,** (1979). Scour Around Bridge Piers at High Froude Numbers, Rapor No: F.H.W.A.R.D.:79-104, Federal Highway Administration, Washington D.C, ABD.
- Jain, S.C., Fischer, E.E.,** (1980). Scour Around Bridge Piers at High Flow Velocities, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 106(HY11), 1827-1842.
- Johnson, P.A.,** (1992). Reliability-based Pier Scour Engineering, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(10): 1344-1358.

- Johnson, P.A.,** (1995). Comparison of Pier-Scour Equations Using Field Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(8), 626–629. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:8(626)
- Johnson, P. A., Ayyub, B. M.,** (1996). Modeling uncertainty in prediction of pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(2), 66–72.
- Kitsikoudis, V., Kırca, V. Ö., Yağcı, O., Çelik, M. F.,** (2017). Clear-water scour and flow field alteration around an inclined pile. *Coastal Engineering*, 129, 59-73.
- Köken, M.,** (2015). Köprü Yan Ayaklarının Oluşturduğu Daralmanın Atnalı Vorteks Sistemi ve Oyulmaya Etkisinin DES Modellemesi ile İncelenmesi, İMO 4. Su Yapıları Sempozyumu, Sempozyum Bildirileri, Antalya.
- Kumar Agrawal, A., Khan, M.A., Yi, Z.,** (2005). *Handbook of Scour Countermeasures Designs*, City College of the City University of New York Region 2 Transportation Research Center, ABD.
- Lagasse, P. F.,** (1997). Instrumentation for Measuring Scour at Bridge Piers and Abutments. Transportation Research Board.
- Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Zevenbergen, L. W., Girard L. G.,** (2007). Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour, NCHRP Report 593 Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., Schall, J. D., Clopper, P. E.,** (2001). Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures - Experience, Selection, and Design Guidelines, Hydraulic Engineering Circular (HEC-23) No. 23, Second Edition. FHWA Report No. FHWA NHI 01-003. Washington D.C.
- Lança, R.M.M.,** (2013). Clear-water scour at single piers and pile groups, Doktora Tezi, UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, Engenharia, Brezilya.
- Lauchlan, C. S.** (1999). Pier Scour Countermeasures (Doktora Tezi). Auckland Üniversitesi, Auckland, Yeni Zelanda.
- Laursen, E. M., Toch, A., Iowa Institute of Hydraulic Research.** (1956). Scour around bridge piers and abutments. [S.l.]: Iowa Inst. of Hydraulic Research.
- Laursen, E.M.,** (1958) Scour at Bridge Crossings, Bulletin No:8, Iowa Highway Research Board, Ames, Iowa, ABD.
- Laursen, E.M.,** (1963) ( An analysis of Relief Bridge Scour, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, 89(HY3), 93-118.
- Melville, B. W., Chiew, Y. M.** (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), 59–65.
- Melville, B.W.,** (1997). Pier and Abutment Scour: Integrated Approach, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(2), 125-136.
- Melville, B.W., Coleman, S.E.,** (2000). *Bridge Scour*, Water Resources Publications, LLC, Colorado, ABD.

- Melville, B. W., Raudkivi, A. J.** (1977). Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(4), 373–380. doi:10.1080/00221687709499641
- Melville, B. W., Sutherland, A. J.** (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210–1226.
- Meyering H.**, (2012). Effect of sediment density in bridge pier scour experiments, Doktora Tezi, Faculty of Engineering University of Florence, İtalya.
- Mills, A.F.**, (1998). Heat Transfer. 2nd Edition. Prentice Hall: Londra.
- Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y.**, (2005). Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, pp. 1074-1087.
- Nazariha, M.**, (1996). Design Relationships for maximum Local Scour Depth for Bridge Pier Groups. Doktora Tezi, Faculty Engineering University of Ottawa-K1N 6N5, Kanada.
- Neill, C.R.**, (1973). Guide to Bridge Hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Kanada.
- Oertel, H., Böhle, M., and Dohrmann, U.**, (2009). Strömungsmechanik: Grundlagen-Grundgleichungen-Lösungsmethoden- Softwarebeispiele. Strömungsmechanik. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 5 edition, Almanya
- Özalp, M.C.**, (2013). Experimental Investigation of Local Scour Araund Bridge Pier Groups, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara.
- Parker, G., Toro-Escobar, C., Voigt, R.L., Jr.**, (1998). Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour, Users Guide (revised1999) and Final Report, NCHRP Project 24-7, prepared for Transportation Research Board by St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, ABD.
- Petersen, T.U., Sümer, B.M., Fredsøe, J., Raaijmakers, T.C., Schouten, J.**, (2014). Experimental and field investigation of flow and edge scour around scour protections at offshore wind turbine foundations, Offshore Engineer, Deltares, Delft Hydraulics, Rotterdamseweg 185, 2629 HD, Elsevier.
- Ponce, V. M.**, (2019). Bridge Scour, San Diego University (181125), [http://ponce.sdsu.edu/bridge\\_scur.html](http://ponce.sdsu.edu/bridge_scur.html), ABD.
- Ranjbar-Zahedani, M., Keshavarzi, A., Khabbaz, H., Ball, J.**, (2019). Flow Structures Around a Circular Bridge Pier with a Submerged Prism at Upstream, Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19), Rome, Italy – April, 2019 Paper No. ICGRE 124 DOI: 10.11159/icgre19.124.
- Raudkivi, A. J.**, (1986). Functional trends of scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(1), 1–13.
- Raudkivi, A. J., Ettema, R.** (1977). Effect of Sediment Gradation on Clear Water Scour. Proceedings, ASCE, Vol. 103, No. HY10, 1209–1213.

- Raudkivi, A. J., Ettema, R.**, (1983). Clear Water Scour at Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109: 338-350.
- Richardson, E. V., Davis, S. R.**, (2001). Evaluating Scour at Bridges. Third Edition. Federal Highway Administration Hydraulic Engineering Circular No. 18: FHWA-IP-90-017, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 203.
- Roulund, A., Sümer, M., Fredsoe, J., Michelsen, J.**, (2005). Numerical and Experimental Investigation of Flow and Scour Around a Circular Pile, J. Fluid Mech., 534: 351-401.
- Shan, H., Kilgore, R., Shen, J., Kerenyi, K.**, (2016). Pier Scour Equations for Noncohesive Soils, Updating HEC-18, Publication NO. FHWA-HRT-16-045, Federal Highway Administration, Washington D.C, ABD.
- Shan, H. W., Schneider, V. R., Karaki, S.** (1969). Local Scour around Bridge Piers Proceedings, ASCE, Vol. 95, No. HY6, 1919–1940.
- Shan, H. W., Schneider, V. R., Karaki, S. S.** (1966). Mechanics of Local Scour: Data Supplement. Civil Engineering Department, Engineering Research Center, Colorado State University, ABD.
- Shrestha, C. Kumar** (2015). Bridge Pier Flow Interaction and Its Effect on the Process of Scouring, Doktora Tezi, University of Technology Sydney (UTS), Avusturalya.
- Sheppard, D., Miller, W.** (2006). Live-Bed Local Pier Scour Experiments. Journal of Hydraulic Engineering, 132(7), 635–642. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:7(635)
- Sheppard, D., Odeh, M., Glasser, T.** (2004). Large Scale Clear-Water Local Pier Scour Experiments. Journal of Hydraulic Engineering, 130(10), 957–963. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(957).
- Sheppard, D.M., Renna, R.**, (2010). 'Florida bridge scour manual'. Florida Department of Transportation, Tallahassee.
- Sullivan, N.E.**, (2015). Introductory Geology, GEOL 101, Section 1, Presentation Transcript.
- Sumner, D.**, 2010. Two circular cylinders in cross-flow: a review. Journal of Fluids and Structures, 26, 849-899.
- Sumner, D.; Price, S.J.; Paidoussis,** (2000). M.P. Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross-flow. J. Fluid Mech.
- Sümer, B. M.** (2013). Lecture notes on turbulence.
- Sümer, B. M., Petersen, T. U., Locatelli, L., Fredsøe, J., Musumeci, R. E., Foti, E.**, (2013). Backfilling of a scour hole around a pile in waves and current, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 139(1), 9-23. doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000161.
- Sümer, B. M., Bundgaard, K., Fredsoe, J.**, (2005). Global and Local Scour at Pile Groups, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 15(3), 204-209.

- Sümer, B. M., Fredsoe, J.,** (1997). Hydrodynamics Around Cylindrical Structures, Advanced Series on Ocean Engineering-Volume 12, Singapore: World Scientific.
- Sümer, B. M. and Fredsoe, J.,** (1994). Advanced Series on Ocean Engineering. In L. Philip, F. Lu, (Eds.), The Mechanics of Scour in the Marine Environment, (2nd. ed., Vol.3, Singapore: World Scientific.
- Sümer, B. M. and Fredsoe, J.,** (2002). The Mechanics of Scour In The Marine Environment. World Scientific.
- Sümer, B. M., Ünsal, I., Bayazit, M.,** (1982). Hidrolik. Birsen Yayınevi.
- Tseng, M.H., Yen, C.L. and Song, C.C.S.,** (2000). Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. International Journal for Numerical Methods in Fluids, **34**, pp. 207-227.
- Uyumaz, A.,** (1988). Scour Downstream of Vertical Gate. Journal of Hydraulic Engineering, 114.
- Vonkeman, J.K.,** (2019). Coupled Fully Three-Dimensional Hydro-Morphodynamic Modelling of Bridge Pier Scour in An Alluvial Bed, Doktora Tezi, Stellenbosch University, G.Afrika.
- Yanmaz, A. M.,** (2002). Köprü Hidroliği. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş, Ankara.
- Yanmaz, A. M.,** (1989). Time- Dependent Analysis of Clear Water Scour Around Bridge Piers, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Yanmaz, A. M.,** (2006). Temporal Variation of Clear Water Scour at Cylindrical Bridge Piers, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 33, No: 8, 1098-1102.
- Yanmaz, A. M., Altınbilek, H.D.,** (1991). Study of Time-Dependent Local Scour around Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering, 117(10), 1247–1268.
- Yeleğen, M.Ö.,** (2014). Köprü Ayaklarında Meydana Gelen Yerel Oyulmaların Veri Analiz Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldırım, M.S.,** (2013). Computer Assisted Design Methodology for Armoring Type Bridge Scour Countermeasures, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara.
- Yıldırım, I.,** (2016). Altıgen Dizili Silindir Grupları Etrafındaki Yerel Oyulma Desenlerinin DeneySEL Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yücel, A., Namlı, R.,** (2007). Su ve Diğer Faktörlerin Köprü Ayakları Etrafındaki Bozulmalara Etkisinin Araştırılması, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları.
- Zarrati, A. R., Chamani, M. R., Shafaie, A., Latifi, M.,** (2010). Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap. International Journal of Sediment Research, 25(3), 313–322.doi:10.1016/S1001-6279(10)60048-0

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Ömer Berk  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 14.04.1962 Kırşehir  
**E-posta** : omer.berk@yahoo.com.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 1984, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat

### MESLEKİ DENEYİM :

- 1984-1999 yılları arasında çeşitli inşaat firmalarında ve proje-taahhüt hizmeti veren kendi şirketinde Yönetici Mühendis.
- 1999-2016 yıllarında Sinpaş A.Ş proje grubunda Yönetici Mühendis.
- 2016-2018 yıllarında Doğuş İnşaat A.Ş UUCM Metro İnşaatında Yönetici Müh.