

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖPRÜ AYAKLARI ARKASINDA OLUŞAN
OYULMALARIN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. M.Levent YURTSEVEN**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : HİDROLİK VE SU KAYNAKLARI MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2005

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1.GİRİŞ	1
1.1 Konunun Önemi	1
1.2.Köprü Ayaklarında Hız ve Basınç Değişiminin İncelenmesi	2
1.3. Köprü Ayaklarında Oyulma Kavramı	7
1.4.Çalışmanın Hedefi ve Çalışma Planı	11
2.KÖPRÜ AYAKLARI ARKASINDA OLUŞAN OYULMALAR HAKKINDA ORTAYA ATILAN TEORİLER, YÖNTEMLER VE YAPILAN DENEYLER	12
2.1. Dairesel Kesitli Köprü Ayaklarındaki Oyulmanın çevrintiler ve Reynolds Sayısıyla ilişkisi	12
2.2. Köprü Ayaklarında Oyulma Derinliklerinin Belirlenmesi	21
2.3. Düzenli Akımlarda Daire Kesitli Köprü Ayağı Oyulmaları	28
2.4. Farklı Kesitli Köprü Ayaklarının Oyulma Derinliğine Etkilerinin İncelenmesi	34
2.5. Zemin Dik Olmayan Köprü Ayaklarındaki Oyulmalar	39
2.6. Oyulmaların Evrimsel Süreci	44
2.7. Oyulmalarda Temel Geometrisinin Önemi	49
2.8. Ölçek Etkisi	55
2.9. Kusur Ağacı Analizi	60
2.10.Zırhlama ile Köprü Ayakları Arkasında Oyulmanın Sınırlandırılması	69
2.11. Kanatlarla Köprü Ayakları Arkasında Oyulmanın Sınırlandırılması	79
2.12. Değişken Akımlı Kanallardaki Ayaklarda Riprap Dayanımının İncelenmesi	84
2.13. Oyulma- Zaman ilişkileri	87
3. FARKLI KESİTLİ KÖPRÜ AYAKLARI ARKASINDA OLUŞAN OYULMALARIN İNCELENMESİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	90
3.1.Kanal oyulması ve ayak oyulmalarının etkilendiği kavramlar	90
3.2. Daire kesitli ayaklar için çıkarılan oyulma formülleri	93

3.3. Kare Kesitli Ayaklar İçin Çıkarılan Oyulma Formülleri	96
3.4. Daire ve Kare Kesitli Köprü Ayakları İçin Bulunan Oyulma Derinliği Değerleri	100
3.5. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	105
KAYNAKLAR	107
EK1:KARE VE DAİRE KESİTLİ AYAKLARDA OYULMA DERİNLİĞİ, OYULMA ÇUKURU HACİMLERİ İÇİN YAZILMIŞ PROGRAMLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	113

ÖNSÖZ

Köprüler ulaşım ağlarının vazgeçilmez öğelerinden biridir. Bir köprünün tasarlanmasında sadece statik ve betonarme hesaplamalar çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bunun en önemli sebebi hidrolik sebeplerin tasarım aşamasında incelenmesi zorunluluğudur. Çünkü yapılan araştırmalar sonucu köprü yıkılmalarının çoğunun su taşkını, sel, oyulma vb. hidrolik sebeplerden ileri geldiği görülmüştür. Bu yıkımlarda meydana gelen can ve mal kaybının azaltılması için araştırmacılar uzun zamandır çok farklı araştırmalar yapmaktadırlar. Bu yüksek lisans tezine konu olan oyulma mevzuu da yaklaşık elli yıldır önem kazanan bir konudur. Oyulma kavramının son derece karmaşık olmasından dolayı, her ne kadar bu konuda yazılmış bir sürü makale olsa da, araştırmacılar tarafından deneyler sonucu oluşturulan farklı ve hatta birbiriyle bağlantısı neredeyse çok az olan formüller hakkında net bir kanı mevcut değildir.

Bu yüksek lisans tezi çalışmamda köprü ayakları arkasında oluşan oyulmaları, farklı oyulma tiplerini, bunlara etkiyen etkenleri, bunlar hakkında yapılan deneyleri, farklı debi ve malzeme tiplerine göre deney sonuçlarının değişimini, ayak şekli ve konumuna göre oyulma derinliğinin değişimini incelemeye çalıştım. Araştırmacıların bulduğu ampirik formüllere ek olarak farklı deneylerden faydalanarak kendim de oyulma derinliğini ve onu etkileyen faktörleri ilişkilendirerek ampirik formüller elde etmeye çalıştım. Bu verilerin ve bunlardan elde edilen formüllerin doğruluğu tartışmaya açık olmakla birlikte gelecekte bu konuda yapılacak araştırmalar için yol gösterici veya ipucu olabilme vazifesi görebilmesi açısından önemlidir.

1. bölümde ise konuya kısa bir giriş yapılarak oyulma en genel şekilde tanıtılmış ve bu tezde uygulanacak olan çalışma planından bahsedilmiştir. 2. Bölümde konu ile ilgili geçmişte yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmalardan yapılan deneyler, bu deneylerin sonucu elde edilen ampirik formüller mevcuttur. 3. Bölüm ise şu ana kadar köprü ayakları arkasında meydana gelen oyulmaların incelenmesi hakkında yapılmış mevcut deney verilerinden çıkartılan sonuçlara yer verilmiştir ve bu deney verilerinden faydalanılarak teorik ve pratik sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmalarımdaya benden hiçbir desteğini esirgemeyen başta danışmanım, öğretim görevlisi Y. Doç. Dr. Ali Uyumaz' a, kaynak konusunda bana yardımcı olan Doç. Dr. Hayrullah Ağaçcioğlu'na , Y.Doç.Dr. Şevket Çokgör' e ve değerli arkadaşım Araş. Gör. Veysel Özkök' e teşekkürü bir borç bilirim.

İstanbul,2005

M.Levent YURTSEVEN

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Etterna (1976)'nın elde ettiği sonuçlar	24
Tablo 2.2. Maksimum denge oyulma derinliklerinin ayak çapına bağlı değişimi...	25
Tablo 2.3. Çeşitli ayak şekilleri için şekil katsayısı.....	25
Tablo 2.4. Çeşitli ayak tipleri için atak açısına bağlı şekil faktörü değişimi.....	26
Tablo 2.5. Matematiksel modelleme çalışmaları	34
Tablo 3.1. Genişliği değişen üniform olmayan yapıda ayaklar için şekil faktörleri.	93
Tablo 3.2. Akım doğrultusuna dik ayaklar için şekil faktörleri	93
Tablo 3.3. Daire ve kare kesitli köprü ayakları için oluşan oyulma değerleri.....	101

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Dairesel bir köprü ayağı çevresindeki hız dağılımı.....	4
Şekil 1.2 : Köprü ayağı etrafında akımın ayrılması ve basınç gradyanı değişimi	6
Şekil 1.3 : Daralma oyulmasının oluşması.....	9
Şekil 2.1 : Köprü ayağı etrafında oluşan çevrinti sistemleri.....	14
Şekil 2.2 : Strouhal sayısı ile daire kesitli ayaklar için iki boyutlu akımda Reynolds sayısı değişimi.....	15
Şekil 2.3 : Chabert ve Engeldinger (1956)'in geleneksel oyulma derinliğinin akım hızının fonksiyonu olarak değişimi.....	17
Şekil 2.4 : Maksimum oyulma derinliğinin U/U_{cr} ile değişimi.....	20
Şekil 2.5 : Rölatif oyulma derinliğinin çevrinti yayılma frekansı ile değişimi.....	21
Şekil 2.6 : Şekil katsayısının çeşitli atak açılarındaki değişimi.....	27
Şekil 2.7 : Üniform sedimentte oyulma derinliği ve Shields parametresi ilişkisi.....	29
Şekil 2.8 : Sınır tabakası kalınlığının atnalı çevrintisi üzerine etkisi.....	30
Şekil 2.9 : Ayak geometrisi ve oyulma derinliği arası ilişki.....	31
Şekil 2.10 : Ayak uzunluğu ve oyulma derinliği arası ilişki.....	31
Şekil 2.11 : Ayak yüksekliği etkisi.....	32
Şekil 2.12 : Alınmanın oyulma derinliğine etkisi.....	33
Şekil 2.13 : Oyulma derinliğinin nümerik modellerde ve deneylerdeki karşılaştırılması	35
Şekil 2.14 : Farklı kesitteki köprü ayaklarında oluşan oyulmalar.....	39
Şekil 2.15 : Tipik bir eğri köprü ayağı modeli.....	42
Şekil 2.16 : Üniform olmayan temel tipleri.....	54
Şekil 2.17 : Daire kesitli ayakta akım ve yerel oyulmanın temel nitelikleri ...	63
Şekil 2.18 : Basit kusur ağacı.....	66
Şekil 2.19 : Köprülerde oyulma ve kanal düzensizliği için ana kusur ağacı...	66
Şekil 2.20 : Dairesel kesitli ayaklardaki yerel oyulma için kusur ağacı.....	69
Şekil 2.21 : Zırh tabasının yapısı.....	72
Şekil 2.22 : Zırh tabakası arasında sediment emilimi.....	75
Şekil 2.23 : Emilim deney düzeneği.....	76
Şekil 2.24 : Taşlar arası çukurda akımın gelişimi ve çukurdaki parçacık hareketi.....	77
Şekil 2.25 : Akım hızının yatay ve düşey bileşenlerinin zamanla değişim grafiği.....	78

Şekil 2.26	: $\theta - \frac{d}{D}$ grafikleri.....	79
Şekil 2.27	: Zırh taşlarının aşağı doğru yerleşmesi azar azar θ artması sonucu artması.....	80
Şekil 2.28	: Tipik bir kanat yapısı.....	
Şekil 2.29	: Kanat yapıları için deney düzeneği	81
Şekil 2.30	: Ayak modeli ve riprap tabakası.....	84
Şekil 2.31	: İlk çevrintinin $t=0$ ve t anındaki durumları.....	87
Şekil 3.1	: Köprü ayaklarındaki oyulma çukuru için idealleştirilmiş tanımsal çizim.....	89
Şekil 3.2	: Kare kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerleri.....	
Şekil 3.3	: Daire kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerleri	100
Şekil 3.4	: Daire kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerlerinden bulunan nihai eşitlik grafiği.....	104
Şekil 3.5	: Kare kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerlerinden bulunan nihai eşitlik grafiği.....	105
		106

SEMBOL LİSTESİ

Re_D : Ayak Reynolds sayısı.

$\frac{\delta}{D}$: Yatak sınır tabakası kalınlığının ayak çapına oranı.

1 : Kanal üst yolu

2 : Çekilmiş bölge.

A : Çevrinti çekirdeğinin alanı.

a : Kare kesitli köprü ayağının çapı.

A : Yaklaşan akış yönüne paralel kesit alanı

A₀ : t=0 anında ilk çevrintinin kesit alanı

A_{st} : t anında oyulma çukurunun çapı

A_t : t anında tekil çevrintinin çapı

b : Ayak genişliği

b : Ayaklar arası uzaklık .

b_t : Ayaklar arası izdüşüm genişliği.

C : Deneylerden elde edilen sabit

Co : Çevrintinin şiddeti.

D* : Üiform olmayan ayakta etkili ayak çapı

D : Dairesel kesitli köprü ayağının çapı.

d : Kıyı boyunca ayağın akım tersi köşesinden olan proje uzaklığı

d₅₀ : Malzeme parçacıklarının çapı.

d₀ : Yaklaşan akım derinliği

d_s : Yerel oyulma derinliği

d_{se} : Genel oyulma Derinliği

d_{semax} : Maksimum denge oyulma derinliği.

d_{st} : Oyulma derinliği.

D_v : İlk çevrintinin çapı

é : Zırh bölgesinin porozitesi

e : Alt yüzey yatak malzemesinin porozitesi

F : Froude sayısı

F_D : Sedimenti dışarı çıkaran ajitasyon kuvveti.

F_{di} : Başlangıç Froude sayısı.

F_R : Ajitasyon kuvvetine karşı oluşan direnç kuvveti.

F_r : Yaklaşım kesitindeki Froude sayısı

F_{rc} : Froude Sayısının Kritik değeri

g' : Azaltılmış yerçekimi ivmesi

g : Yerçekimi ivmesi

h : Akım derinliği.

H : Akıntının ters yönünde akıntı derinliği

h₁ : Ayak yüksekliği

H_{do} : $\alpha = 0^\circ$ için oyulma derinliği.

H_{da} : α atak açısındaki oyulma derinliği.

H_e : Üiform D çaplı ayakta yatak seviyesi üzerinde etkili yükseklik

k_1	: Yatak maddesi ve taşınmasına bağlı üslü değer
K_{1-4}	: Şekil, Yatak formu, malzeme çekilmesi, akıntı yapısı için düzeltme faktörü
K_3	: Yatak hareketleriyle ilgili bir bir faktör
K_{a1}	: Ayak temeli şekil sabiti
K_{a2}	: Ayak temeli eğrilik sabiti
K_b	: Yatak durumu faktörü
K_d	: D/d etkilerini bize gösteren eğrilere bağlı faktör
K_d	: Tane büyüklüğü için düzeltme faktörü
K_i	: U/U_c etkilerini bize gösteren eğrilere bağlı faktör
K_l	: Akım şiddeti düzeltme faktörü
K_s	: Ayak şekli faktörü
k_s	: Eşdeğer kum pürüzlülüğü
K_s	: Şekil düzeltme faktörü
K_Y	: Y/D etkilerini bize gösteren eğrilere bağlı faktör
K_{yb}	: Akım derinliği ve ayak çapına göre düzeltme faktörü
K_a	: Şekil katsayısı.
K_a	: Yaklaşım açısı düzeltme faktörü
K_σ	: Gradasyon etkisi düzeltme katsayısı
L ve b	: Dikdörtgen kesitli ayağın köşe uzunlukları
L	: İki komşu taş arası mesafe.
L_b	: Ayak boyu
m	: Verilere bağlı sabit.
n	: Manning pürüzlülük katsayısı
n	: Çevrinti yayılma frekansı
N_s	: Tane sayısı
P_a	: En küçük taşınamayan parçacığa göre yüzey altı yatak malzemesinin ondalık fraksiyonu.
Q	: Akım yüzdesi
Q_1	: Memba toplam debisi
Q_2	: Daralan kesitteki debi
q_{vt}	: Birim genişlikteki oyulma çukuru hacmi.
r	: Radyal koordinat.
r	: Katlı lineer regresyonlarda korelasyon katsayısı
r_1	: Silindirik ayağın yarıçapı.
r_o	: Çevrintinin çapı.
S	: Hidrolik sabit
s_ϕ	: Kontrol hacminden çıkan sürüntü yükü.
s_g	: Kontrol hacmine giren sürüntü yükü.
S_h	: Strouhal sayısı.
So	: Uzun ayaklar için oyulma derinliği.
s_t	: t zamanında boyutsuz bölgesel kuvvet
t	: Zaman.
t_R	: Referans zamanı.
u^*	: Kayma hızı.
u^*_c	: Kritik hareketlilikteki hız.
u^*_t	: Ayak burun kısmında yatak kesme hızı.
U	: Akım hızı.
U	: Akım yönü tersindeki akım hızı.
u	: Akım ortalama hızı.
$u_{0.6D}$	: Taban seviyesindeki ortalama akım hızı.

U_{∞}	: Akımın tersi yönündeki hız.
u_a	: Büyük malzemeli akarsudaki maksimum oyulma hızı.
u_c	: Kritik ortalama akım hızı.
U_c	: Yatak yüzeyindeki partikül hareketine bağlı olarak U hızının kritik değeri.
U_{ca}	: Zırhlama mümkün olmadığı zaman yaklaşan akım ortalama hızı.
U_k	: Gelen akım hızına göre derinlik ortalaması.
U_{cr}	: Kritik akım hızı.
U_o	: Çevrintinin hızı.
u_o	: Membada daralmamış kesitteki hız.
U_a	: Zırhlama en yüksekken yaklaşan ortalama akım hızı.
V	: Tabandaki kontrol elemanının hacmi.
V	: Ortalama akım hızı.
V_o	: Yaklaşan akım hızı
V_R	: Referans hızı
W	: Kanal genişliği
W_1	: Normal kanal kesiti
W_2	: Daralmış kanal kesiti
Y	: Akım derinliği
y	: Ana kanaldaki ortalama derinlik
y_o	: Oyulma öncesi çekilmiş bölge mevcut derinliği
y_s	: Ayak oyulması
Z	: Yatak seviyesi üzerinden zemin yüksekliği.
α	: Akımın atak açısı.
β	: Ayak uyum açısı
δ^*	: Bozulmamış sınır tabakasının yerdeğiştirme genişliği.
Δ	: Zırhlı bölge kalınlığı
θ	: Açısal koordinat.
θ	: Sürüntü malzemesinin kayma açısı.
θ_{su}	: Shields parametresinin emilim için kritik değeri.

KÖPRÜ AYAKLARI ARKASINDA OLUŞAN OYULMALARIN İNCELENMESİ

ÖZET

Oyulma kavramı bir çok faktöre bağlı olarak değişiklik gösteren bir kavramdır. Bir köprü ayağındaki oyulmanın asıl başlama sebebinin çeşitli bölgelerde oluşan çevrıntiler olduğunu söyleyebiliriz. Genel olarak oyulma prosedürü malzeme kalınlığına, Reynolds sayısına, ayakların geometrik şekillerine, akıntı hızına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Oyulma derinliği hesaplanırken araştırılırken yaklaşan akımın hızı gibi boyutlu bir değişkenin kullanılmasından çok Froude sayısı gibi hem boyutsuz olan ve hem yaklaşan akım hızı hem yaklaşan akım derinliği etkilerini bir arada bulunduran bir etkinin kullanılması daha kesin sonuçlar vermesi ve pratik olmasından dolayı tercih edilmektedir. Oyulma derinliğinin değişiklik göstermesinin diğer bir sebebi de ayakların farklı geometrik şekillere sahip olmasındandır. Ayak boyutlarının farklı olması da oyulma derinliğini etkilemektedir. Örneğin kare ve daire kesitli köprü ayaklarında oyulmalar karşılaştırıldığı zaman kare kesitli köprü ayağı akımın yapısını daha çok bozmakta, köşe ve kenarların oyulmaya etkileri işin içine girerek oyulma derinliğini artırıcı etki yapmaktadır. Taban malzeme yapısı da oyulmayı etkileyen faktörler içinde çok önemli olmasa da oluşturabileceği zırlama dolayısıyla oyulmayı belli ölçülerde azaltmaktadır. Bunun haricinde oyulma sürecine en önemli etkilerden biri de zamandır. Yanmaz (1989) ve Melville&Chiew (1999) deneylerine bakarsak genelde %50-%80’lik bir oyulma derinliğine yaklaşık %10-%15’lik bir zaman diliminde ulaşıldığı görülmüştür. Kalan zamanda ise dengeli bir oyulma derinliğine ulaşılması için gerekli olan çok uzun bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizde de özellikle 2000 yılından sonra köprü oyulmaları konusu önem kazanmış, bunun hakkında bir çok araştırma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir.

RESEARCH OF SCOUR AT THE BACK OF THE BRIDGE PIERS

ABSTRACT

Scour in bridge piers is a concept that shows changeability according to many different factors. It can be said that the actual reason which causes scour in bridge piers are vortices that occurs in different areas of channel. Generally scour depth changes depending on the thickness of material, the Reynolds number, the geometrical shape of the piers and the magnitude of the flow velocity. For evaluating the depth of scour, instead of using the approaching flow velocity, using nondimensional Froude number which contains both approaching flow velocity and approaching flow depth affects together is more preferable since it gives more accurate results and it is more practice. Another reason that cause differences in scour depth is the difference in the geometrical shapes of each piers. Differences in dimensions of piers affect the scour depth as well. For example, when circular cross-sectioned piers and square cross-sectioned piers are compared it is seen that square cross-sectioned piers disturbs the shape of flow more than circular cross-sectioned piers, and corners' and sides' affects of square cross-sectioned piers make an increasing effect to scoure depth. However it is not a very important effect, the materials on the bottom of the river reduces the depth of scour since they can have an armoring effect. Also time is one the most important factors that affects the period of scour. When we see the experiments of Yanmaz(1989) and Melville&Chiew (1999), scour depth of 50-80% is reached in a 10-15% time period. The left time is a very long time to reach a balanced scour depth. In our country especially after the year 2000 the issue of scour in bridges has begun to get much more attention, a lot of researches have been made and new researches are going on to be made.

1.GİRİŞ

1.1. Konunun Önemi:

Köprü ayakları arkasında meydana gelen oyulmalar zaman içinde köprülerin yıkılmasına, büyük maddi hasarlar meydana gelmesine sebep teşkil etmektedir. Köprü ayağı oyulmaları olarak kenar ayaklarda ve orta ayaklardaki oyulma derinlikleri farklı başlıklar altında fakat birbirleriyle her zaman etkileşimle incelenmelidir. Türkiye'deki köprüler de akarsuların debi ve akım hızlarının yüksek; sürüntü malzemelerinin ince olması sebebiyle oyulma tehlikesiyle karşı karşıyadır. Her ne kadar senelerdir ülkemizde de oyulma hakkında araştırmalar yapılmış olsa da , şu ana kadar ülkemizde yıkılan köprülerin yıkılma sebebi olarak taşkınlar, depremler ve yapısal sebepler gösterilmiş; oyulmanın etkisi ihmal edilmiştir. Örneğin 1998 yılında Zonguldak-Devrek'te ağır hasar gören köprü hasarının yapısal sebeplerle değil oyulma sebebiyle oluştuğu ortaya çıkmıştır. Bu konuda dünyada en yoğun Amerikada araştırmalar yapılmakta olup, 1950'den beri 825 köprü yıkılmasının sebebinin %60'ının oyulma kaynaklı olduğu görülmüştür. (Melville ve Chiew(1999)) Köprü tasarımlarında hidrolik-yapısal faktörlerin tam anlamıyla açıklığa kavuşmamış olması özellikle oyulmalar ve taşkınlar süresince olumsuzluklara; köprü hidrolik tasarımında belirsizliklere sebep olmaktadır. Oyulma konusunun karmaşıklığı, araştırmacıların bulduğu birbiriyle ilişkisi çok az olan veya hiç olmayan formüller yığınının varlığından ve her formülün kendi içinde şartlara göre değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır. Ama şu bir gerçektir ki; köprü ayakları arkasında oluşan oyulmaların en önemli kısmını yerel oyulmalar oluşturmaktadır.

1.2.Köprü Ayaklarında Hız ve Basınç Değişiminin İncelenmesi:

Oyulma kavramı temel malzemesinin akım hızının etkisiyle taşınması ve bu taşınmanın etkisiyle çukur oluşması kavramıdır. Bu kavram bir çok faktöre bağlı olarak değişiklik gösteren bir kavramdır. Köprü ayakları etrafındaki oyulmanın nasıl oluştuğu hakkında bir fikir sahibi olabilmek için köprü ayakları etrafındaki hız ve basınç dağılımının incelenmesi gerekli ve önemlidir. Bir akarsu tabanına dik olarak yerleştirilmiş dairesel enkesitli bir köprü ayağının etrafındaki hız dağılımını incelemek için potansiyel akım teorisinden faydalanmak gerekir.

Potansiyel akım teorisine göre hızın radyal ve açısal bileşenleri sırasıyla şu şekilde yazılabilir.

$$u_r = -u_o \left(1 - \left(\frac{r_l}{r} \right)^2 \right) \cos \theta \quad (1.1)$$

$$u_\theta = -u_o \left(1 + \left(\frac{r_l}{r} \right)^2 \right) \sin \theta \quad (1.2)$$

Burada u_o membada daralmamış kesitteki hız, r_l silindirin yarıçapı, r radyal koordinatı, θ açısal koordinatı ifade etmektedir.

$$u_1 = \sqrt{u_r^2 + u_\theta^2} \quad (1.3)$$

Denklem (1.1) ve (1.2)'yi denklem (1.3)'te yerine koyarsak;

$$u_l = \left[u_o^2 \left(1 - 2 \left(\frac{r_l}{r} \right)^2 + \left(\frac{r_l}{r} \right)^4 \right) \cos^2 \theta + u_o^2 \left(1 + 2 \left(\frac{r_l}{r} \right)^2 + \left(\frac{r_l}{r} \right)^4 \right) \sin^2 \theta \right]^{1/2} \quad (1.4)$$

denklemini elde edilir. Sadeleştirmeler yapılsa;

$$u_l = u_o \left[1 - 2 \left(\frac{r_l}{r} \right)^2 \cos 2\theta + \left(\frac{r_l}{r} \right)^4 \right]^{1/2} \quad (1.5)$$

Şekil 1.1’de 0 ve 1 numaralı kesitlerde yük kaybı ihmal edilerek enerji denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{P_o}{\chi} + \frac{u_o^2}{2g} + z_o = \frac{P_1}{\chi} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 \quad (1.6)$$

Burada z_o ve z_1 sırasıyla 0 ve 1 noktalarındaki taban seviyeleridir. Bu seviyeler arası fark ihmal edilerek denklem yeniden düzenlenirse;

$$\frac{P_o - P_1}{\chi} = \frac{u_o^2 - u_1^2}{2g} \quad (1.7)$$

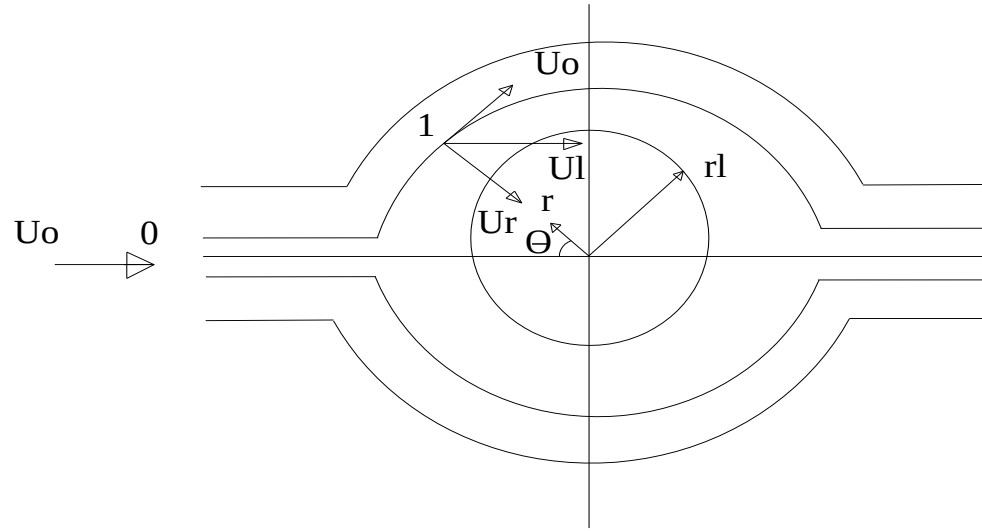
denklemi elde edilir. Silindir yüzeyinde $r=r_1$ olduğundan, Denklem (1.1) ve (1.2)’den $u_r = 0$ ve $u_\theta = 2 u_o \sin \theta$ elde edilir. Buna göre $u_l = u_\theta$ ifadesi gerçekleşmiş olur. Buna göre şu ifade elde edilir.

$$P_1 - P_o = \frac{\rho^* u_o^2}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (1.8)$$

Köprü ayağının memba yüzünde $\theta=0^\circ$ olduğundan Denklem (1.8) şu hale dönüşür;

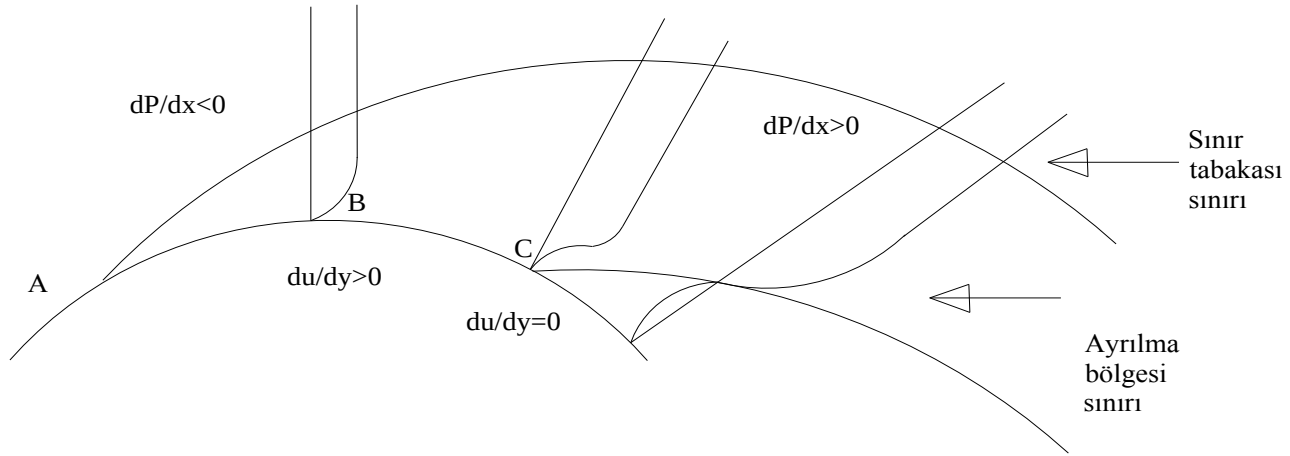
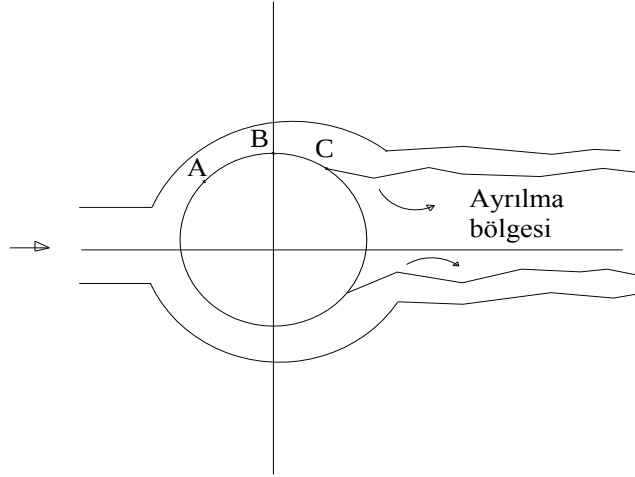
$$P_1 = P_o + \frac{\rho^* u_o^2}{2} \quad (1.9)$$

Şekil 1.1 dairesel kesitli köprü ayağındaki hız dağılımını göstermektedir.



Şekil 1.1: Dairesel bir köprü ayağı çevresindeki hız dağılımı. (Yanmaz, 2002)

Bu denklemden de anlaşılacağı üzere köprü ayağının memba yüzeyindeki basınç, 0 numaralı kesitteki nazaran daha fazladır. Burada $\rho \cdot u_0^2 / 2$ ifadesi durgunluk basıncını ifade eder. Köprü ayağında meydana gelen basınç dağılımını daha iyi anlayabilmek için ayrılma bölgesi ve sınır tabakası konusunu açıklamak gereklidir (Yanmaz,2002) Şekil 1.2 de görüldüğü üzere A noktasından B noktasına kadar kesit daralması sebebiyle hız artışı ve buna bağlı olarak Bernoulli prensibine göre basınç artışı görülür. B noktasından sonra ise tam tersi kesit genişlemekte; bu sebeple basınç artmakta ve hız azalmaktadır. Bu basınç artışı sebebiyle bu sınır tabası içindeki bir taneye etki eden sürtünme kuvvetlerine ek olarak basınç kuvveti de etkimektedir. Bu da doğal olarak tanenin hareketini zorlaştırmaktadır. Bu durumda C noktasından sonra sınır tabakasındaki akışkanın bir kısmı esas akım doğrultusuna zıt doğrultuda bir akım meydana getirecektir. Yüzeyden uzaklaştıkça sürtünme etkisi azalacağından sınır tabakası içindeki ikinci ayrılma sınırının üzerindeki akım genel akımla aynı yönde olacaktır. Türbülanslı yüksek akımlarda akım hızı ile enerji doğru orantılı olarak artacağından; A ve C noktalarında meydana gelen ilk ve ikincil ayrılmalar düşük türbülanslı akımlara kıyasla daha mansapta oluşacaktır. Sınır tabasının şekli ve kalınlığı köprü ayağının geometrik şekline bağlı olarak değişiklik gösterir. Küt burunlu ayaklarda ayrılma daha çok olmakta; buna bağlı olarak da hem yük kaybı fazlalığı hem de ayrılma bölgesinde çevrintilerin artışı akım alanında daha fazla negatif faktörler oluşacaktır. Bu sebeple eğriliği fazla olan ayak geometrilerinin mümkün mertebe tercih edilmemesi gerekmektedir. (Yanmaz, 2002) Şekil 1.2. bize Köprü ayağı etrafında akımın ayrılması ve basınç gradyanı değişimini göstermektedir.



Şekil 1.2: Köprü ayağı etrafında akımın ayrılması ve basınç gradyanı değişimi. (Yanmaz, 2002)

1.3. Köprü Ayaklarında Oyulma Kavramı:

Akarsularda akım rejimine, malzeme cinsine, akarsu kesit özelliklerine ve güzergahına bağlı olarak tabanda oyulmalar meydana gelmektedir. Akımın katı madde taşıma gücünün arttığı yerlerde, örneğin taban eğiminin arttığı, köprünün varlığından dolayı kesit alanının daraldığı yerlerde veya bir barajın mansabında alüvyonlu tabanda oyulmalar oluşur. Alüvyonlu bir kanalda maddenin korunumu süreklilik denklemini yazmak istersek;

$$\frac{dV}{dt} = s_{\check{c}} - s_g \quad (1.10)$$

denklemini yazabiliriz. Burada;

V = Tabandaki kontrol elemanın hacmi.

t = Zaman.

$s_{\check{c}}$ = Kontrol hacminden çıkan sürüntü yükü.

s_g = Kontrol hacmine giren sürüntü yükü.

Bu denkleme göre $s_{\check{c}} > s_g$ olduğu zaman köprü açıklığındaki sürüntü yükü miktarı membadakinden fazladır. Bu durumda (1.10) denklemine göre $dV/dt > 0$ olacak ve taban seviyesinde alçalma olacaktır. Köprü mansabında ise akım yönündeki sürüntü yükü azalacağından $s_{\check{c}} < s_g$ olacaktır. Bu durumda $dV/dt < 0$ olacak ve köprü açıklığından sürüklenen katı madde mansapta yığılmaya neden olacaktır. (Chee, 1982) Membadan sürüntü yükü taşınıp taşınmamasına bağlı olarak alüvyonlu akarsularda başlıca iki tip oyulma meydana gelmektedir. Akım koşulları tabanda kritik kayma gerilmelerini aşmayan gerilmeler meydana getiriyorsa sürüntü yükü hareketi başlamamıştır. Ancak ayak etrafında oluşan çevrtintilerden dolayı köprü ayakları etrafında oyulmalar başlayabilir. Bu tip oyulma temiz su oyulması olarak adlandırılır. Örneğin bir barajın dip savak veya dolu savağındaki oyulma da temiz su oyulmasına örnektir. Uyumaz (1988) dolu savaklardaki oyulmalar hakkında yaptığı çalışmalarda temiz su oyulmasını dikkate almıştır. Oyulma çukurundaki akım ayak şekli ve akımın ataletinden etkilenir. Bazı durumlarda da akım sonucu oluşan kayma gerilmeleri bu kritik değeri aşar ve bu etkinin de devreye girmesiyle oyulma çukurunun gelişiminde hem çukur çevresinde hem memba çevresindeki akım önem kazanır. Bu oyulmaya hareketli taban oyulması denir. Bu tip oyulmada oyulma derinliği, çok kısa bir sürede pik değerine ulaşır daha sonra akımın değişken yapısına uygun olarak salınımlı bir yapı gösterir. Temiz su oyulmasında ise

oyulmanın çok yüksek bir kısmı kısa bir zamanda gerçekleşir; daha sonra uzun zamanda çok az miktarlarda bununla ilgili göreceli bir artış görülür. En genel oyulma şekilleri tanımlandıktan sonra bu konuyu biraz daha açalım. Köprü geçişlerinde kesit daralması sebebiyle tabanda oyulma meydana gelir. Bu tip oyulma kayma gerilmeleri ve kanaldaki hızları yüksek oranda artırır. Bu tip oyulmaya daralma oyulması denir. Daralma oyulmasının mertebesi;

$$\beta = \frac{W_1}{W_2} \quad (1.11)$$

cinsinden açıklanabilir. Burada W_1 normal kanal kesiti, W_2 daralmış kanal kesitidir. Bu mertebe esas alınarak araştırmacıların ortaya attığı formüller sırasıyla; Richardson&Davis (1995)'in hareketli taban oyulması için önerdiği formül,

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1} \quad (1.12)$$

Hareketli taban oyulması formülünde Q_1 memba toplam debisi, Q_2 daralan kesitteki debi, W_1 normal kanal kesiti, W_2 daralmış kanal kesiti, k_1 katsayıdır. Daralma oyulması hakkındaki Şekil 1.3'te görülmektedir.

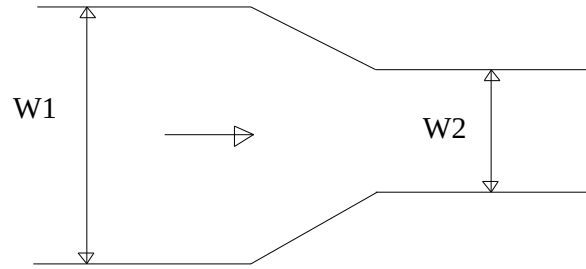
Richardson&Davis (1995)'in temiz su oyulması için önerdiği formül,

$$y_2 = 0,0235 \frac{Q^2}{D_{50}^2} 3W^2 \quad (1.13)$$

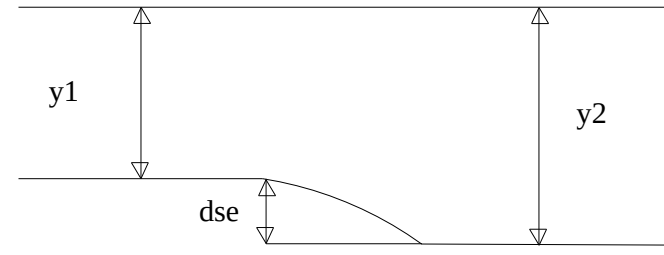
Temiz su oyulmasında ise Q köprü açıklığından geçen debi, D_{50} tane medyan çapıdır.

Komura (1966)'nın hareketli taban oyulması için önerdiği formül,

$$\frac{y_2}{y_1} = 1,6 Fr^{10,2} \beta^{0,67} \sigma_g^{-0,5} \quad (1.14)$$



Plan



Gevşek
Zemin

Profil

Şekil 1.3: Daralma oyulmasının oluşması. (Yanmaz,2003)

Komura (1966)'nın temiz su oyulması için önerdiği formül,

$$\frac{y_2}{y_1} = 1,45 Fr^{10,2} \beta^{0,67} \sigma_g^{-0,5} \quad (1.15)$$

hareketli taban oyulması ve temiz su oyulması formüllerinde σ_g taban malzeme dağılımının standart geometrik sapması, Fr yaklaşım kesitindeki Froude sayısı 1.6 ve 1.45 değerleri birer katsayıdır.

Gill (1981)'in hareketli taban oyulması için önerdiği formülü,

$$\frac{y_2}{y_1} = \beta^{\frac{6}{7}} \left(\frac{\tau_c}{\tau_1} \right)^{-\frac{3}{7}} \quad (1.16)$$

Gill (1981)'in temiz su oyulması için önerdiği formül;

$$\frac{y_2}{y_1} = \beta^{\frac{6}{7}} \left[\frac{\beta_1}{m} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_1} \right) + \left(\frac{\tau_c}{\tau_1} \right) \right]^{-\frac{3}{7}} \quad (1.17)$$

Gill (1981)'in formüllerinde ise τ_c taban malzemesi kritik kayma gerilmesi , τ_1 kesitteki kayma gerilmesi ve “m” ise bir üstür.

Bilindiği gibi belirli bir debiye sahip akarsulara yerleştirilen köprü ayaklarının akım alanının bir kısmını işgal etmesi sebebiyle ortalama hız ve buna dayanarak malzeme taşıma kapasitesi artar. Bir köprü ayağındaki oyulmanın asıl başlama sebebinin çeşitli bölgelerde oluşan çevrıntiler olduğunu söyleyebiliriz. Tabii bu çevrıntilerin neden ve nasıl oluştuğunu, çeşitlerini ve isimlerini bilmemiz köprü ayakları arkasında oluşan yerel oyulmaları bilmemiz için son derece gereklidir. Öncelikle akım hızında herhangi bir azalma sebebiyle memba tarafında su seviyesinde artış görülür. Bu da yüzeyde oluşan basınç artışını beraberinde getirir. Buna göre tabandan yüzeye doğru artan bir basınç grafiği oluşur. Bu da alttan üste doğru düşey doğrultuda akım oluşur. Bu akım suyun yataydaki akımı ile karşılaşınca ayağın memba tarafında at nalı

çevrintileri oluşur. Bu düşey akım yüzünden ayak zeminindeki malzeme yer değiştirir ve at nalı çevrintileri tarafından sürüklenir. Oyulmanın başlangıcı böyle özetlenebilir. Tüm bu oyulma prosedürü malzeme kalınlığına, Reynolds sayısına, ayakların geometrik şekillerine, akım hızı ve su derinliğine bağlı olarak değişiklikler gösterir. Bu çevrintiler belirli bir ilerlemeden sonra etkisiz hale gelir. Elbetteki ayağın memba tarafında olduğu gibi ayağın mansap tarafında da hız artışına binaen kayma gerilme artışlarının meydana getirdiği çevrintiler oluşur. Bu çevrintilerin etkisini azaltmanın en iyi ve en genel yolu akım alanına uygun ayak tasarımı yapmaktır. Bu sayede yerel oyulmanın doğurabileceği bir çok kötü sonuç bertaraf edilebilir.

1.4.Çalışmanın Hedefi ve Çalışma Planı:

Geçmiş yıllarda yapılan köprü ayak oyulmaları hakkındaki çalışmalar incelendiği zaman bunların büyük bir çoğunluğunda ayak kesitlerinin dairesel seçilmesi dikkat çekici olmaktadır. Bu konu bir çok araştırmacı tarafından da incelenmiştir. (Larras(1972); Başak(1975) vs.) Bu çalışmada köprü ayakları arkasında meydana gelen oyulmaların kesit değişimlerine göre nasıl bir şekil aldığı dairesel ve kare kesitli köprü ayaklarında oyulma değişimlerine göre oyulma çukuru hacimlerinin nasıl değiştiği, aralarındaki ilişkiler ve bu ilişkiler gözönüne alınarak yapılan yorumları içermektedir. Bu çalışmada aynı zamanda köşe etkisinin oyulma artışına olan etkileri gözönüne alınmaktadır.

Deney yapma imkanımızın olmaması sebebiyle dairesel kesitli köprü ayağı için çıkarılan formüllerden yola çıkılarak daha farklı kesitteki ayakları için değişik oyulma formülleri bulunarak ve bu formüllerin rehberliğinde farklı parametrelere göre bir çok ayak çukuru hacmi verileri elde edilmiştir. Bu verilerin karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan sonuçlarının gelecekte daha farklı araştırmalara ışık tutması hedeflenmiştir.

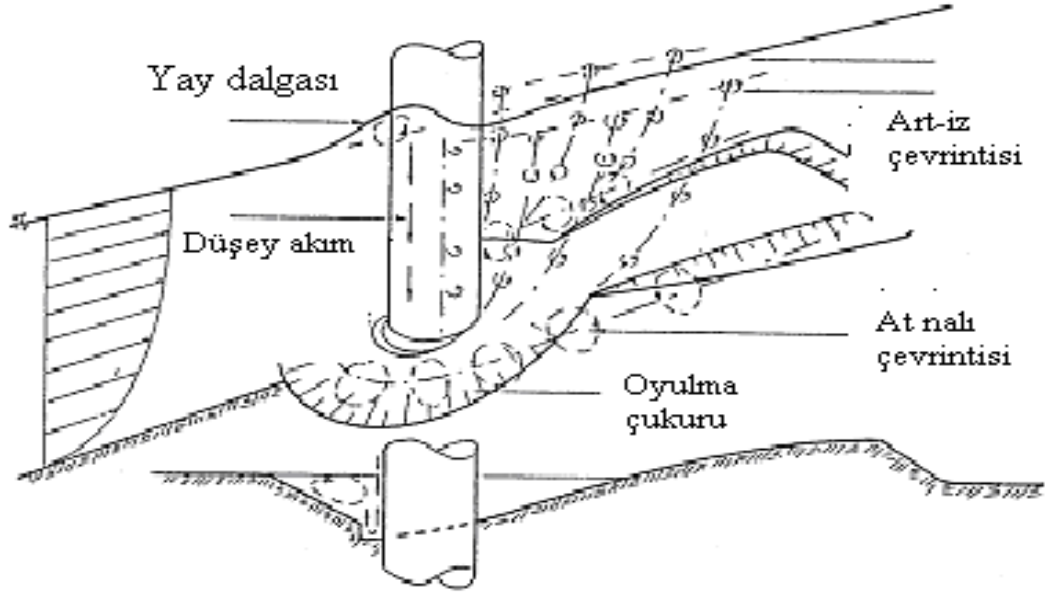
2. KÖPRÜ AYAKLARI ARKASINDA OLUŞAN OYULMALAR HAKKINDA ORTAYA ATILAN TEORİLER, YÖNTEMLER VE YAPILAN DENEYLER

2.1. Dairesel Kesitli Köprü Ayaklarındaki Oyulmanın Çevrintiler ve Reynolds Sayısıyla İlişkisi:

Köprü ayağı oyulmaları, taşkın dalgalarının akarsularda meydana getirdiği akımın doğurduğu doğal olaylardır. Köprü çevresinde, oyulmanın bir sonucu olarak köprü temellerinin desteği azalır ve ayaklar öncekine göre daha da fazla zorlanır. Oyulma derinliği yatak malzemesinin özelliklerine (boyutu, şekli, büyüklüğü, kohezif veya alüvyonlu vs.), köprü temel geometrisine ve akımın özelliklerine göre değişiklik gösterir. Oyulma derinliğinin, köprü ayağının Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyon olarak birçok eşitliği mevcuttur. Melville ve Coleman (2000)'ın yaptıkları araştırmalarda tüm köprü oyulması tiplerini tahmin etmeye yönelik yöntemler içeren çok geniş kapsamlı çalışmaları vardır. Bunun haricinde Richardson ve Davis (1995), Lagasse (1995) 'ninde oyulma tahmini metodlarının geliştirilmesinde büyük katkıları mevcuttur. Fakat, köprü ayaklarında oyulmalara bağlı eşitliklerde, farklı bir sürü parametrenin de etkisi ile benzerlik çok azdır veya hiç yoktur. Köprü ayağı yakınında oluşan akımın baskın özelliği, büyük ölçekli girdapsal bir yapı olması ve ayak çevresinde gelişen çevrintiler sistemini içermesidir. Bu çevrinti sistemi, yerel oyulmanın temel mekanizmasıdır ve uzun zamandan beri bir çok araştırmacı tarafından da bilinmektedir. Bunlardan bazıları Tison (1940), Keutner (1932), Posey (1949), Neill (1964), Roper ve diğerleri (1967) vs. Roper ve diğerleri (1967)'ne göre bu çevrinti sistemleri ayak tipine ve serbest akım koşullarına bağlı olup; üç ana çevrinti mevcuttur. Bunlar;

- Sürüklenen çevrinti sistemi.
- At nalı çevrinti sistemi ve
- Art-iz çevrinti sistemi.

Bu çevrintiler Şekil 2.1 de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Köprü ayağı etrafında oluşan çevrinti sistemleri. (Raudkivi,1986)

Çevrinti sistemlerinin ayağın yakınından geçen akım hızının yatay bileşeninin değişiminde büyük etkisi bulunmaktadır. Çevrinti çizgileri, akımı iki boyutlu bozulmamış hız alanlarına ayırır. Bu alanlar, küt burunlu köprü ayaklarının varlığı yüzünden yoğunlaşarak atnalı çevrintilerini meydana getirirler. Bu tip mekanizmalarda basınç alanı köprü ayağı tarafından yönlendirilir. Eğer basınç yeterince kuvvetliyse; sınır tabakası üç boyutlu olarak ayrılır ve dönüşte ayak çevresindeki döngü atnalı çevrintisini meydana getirir. Atnalı çevrintisinin meydana gelmesi için iki faktörün gerekliliği aşikardır. İlki δ kalınlıklı bir sınır tabakasının olması gerekliliği; ikincisi ise basınç gradyanının yeterince güçlü olup, yatak üzerindeki sınır tabakasının ayrılmasını ve atnalı çevrintisinin oluşmasını sağlamasıdır. Atnalı çevrintisinin oluşmasında silindirik şeklindeki küt burunlu köprü ayakları, yeterli büyüklükte basınç eğriliğine sahip olup, yukardaki çevrintileri meydana getirir. Sivri kenarlı olarak tabir edilen öteki kesim ayaklarda ise bu tarz çevrintiler meydana gelmez. Art çevrinti sisteminde yoğunlaşan çevrinti, ayak tarafından meydana getirilir. Bu sistem ayak yüzeyinde meydana gelen düzensiz kayma gerilmesi tabakalarının sarması sonucu oluşur. Bu sistem, ayağın öteki yüzünden büyük ayak Reynolds sayılarına sahip ayrılma tabakasıyla ayrılmıştır. Bu çevrintiler düzensiz ve yayılmış durumda olup, akım yönüne bağlıdır. Bu çevrintilerin gücü büyük ölçüde akışkan hızına ve ayağın şekline bağlı değişiklik gösterir. Shen ve diğerleri (1966)'nin deneylerinde atnalı çevrinti sistemleri meydana gelmediği veya uygun kontrol edilmediği zaman, ayaklarda akım yönünde de büyük

oyulma çukurlarının meydana geldiği görülmüştür. Art çevrinti sistemi vakumlu temizleyiciye benzer bir şekilde çalışarak yatak malzemesini uzaklaştırır ve bu malzeme akım yönünde taşınır. Çevrinti yayılımı büyük bir ayak Reynolds sayısı aralığında periyodik bir değişim olup Strouhal sayısı ile karakterize edilebilir.

$$S_h = n \frac{D}{U} \quad (2.1)$$

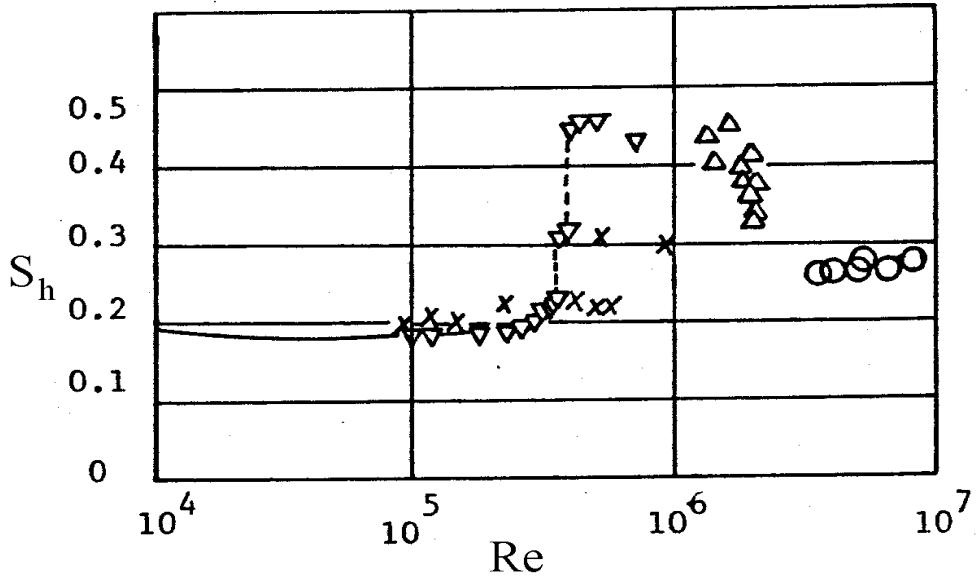
Burada;

n =çevrinti yayılma frekansı

D = Köprü ayağı çapı.

U = Akım yönü tersindeki akım hızı.

İki boyutlu akım koşullarında Strouhal sayısı ile daire kesitli ayaklar için Reynolds sayısı değişimi Şekil 2.2 de gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Strouhal sayısı ile daire kesitli ayaklar için iki boyutlu akımda Reynolds sayısı değişimi. (Hancu, 1971)

Şekil 2.2' den $Re < 2.5 \times 10^5$ ve $Re > 10^6$ olduğu zaman $Sh=0.2$; $2.5 \times 10^5 < Re < 10^6$ olduğu zaman $Sh=0.4$ olmaktadır. Shen ve diğerleri (1966) atnalı çevrinti sisteminin gücünü silindirik ayaktaki durağan düzlemdeki bir kontrol hacminde çözmeye çalışmışlardır. Bu gücü ayak Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak şu şekilde bulmuşlardır.

$$\frac{\omega A}{\nu} = f\left\{\frac{U_{\infty} D}{\nu}\right\} = f(Re) \quad (2.2)$$

Burada;

ω = Çevrinti çekirdeğinin döngüsel hızı.

A = Çevrinti çekirdeğinin alanı.

ν = Kinematik viskozite.

D = Ayak çapı.

U_{∞} = Akımın tersi yönündeki hız.

Re = Köprü Ayağı Reynolds sayısı.

olarak ifade edilmektedir.

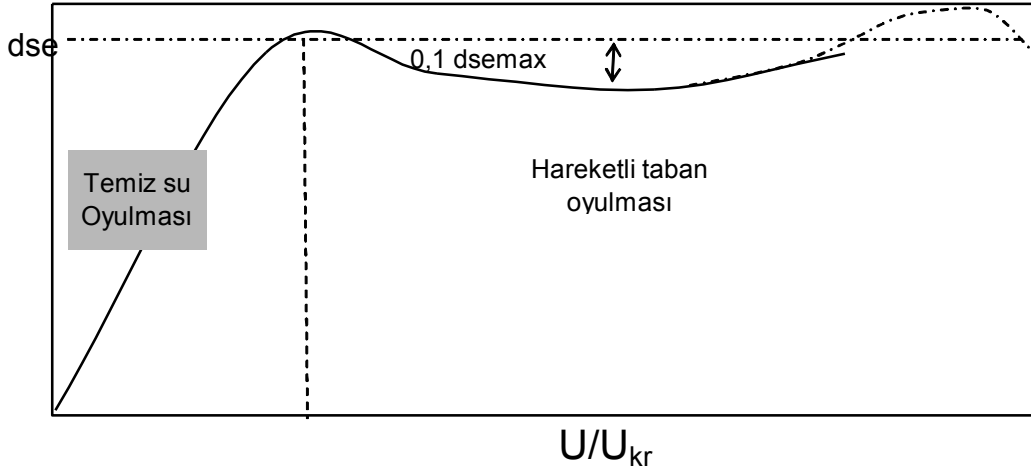
Atnalı çevrintisi bir yerel oyulma mekanizmasıdır ve atnalı çevrintisinin şiddeti köprü ayağı Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyondur. O zaman oyulma derinliği de Reynolds sayısı ile doğrudan ilişkilidir.

$$d_{se} = f(Re) \quad (2.3)$$

Burada d_{se} oyulma derinliğini ifade etmektedir. Üç ve Ağaçoğlu (2001) bu konuda yaptıkları deneysel çalışmalar sonucu oyulma derinliği ve Reynolds sayısı arasında aşağıdaki üslü ifadeyi bulmuşlardır.

$$d_{se} = 0.000222 R_e^{0.619} \quad (2.4)$$

Bu eşitlik tüm Reynolds sayıları için geçerlidir. Oyulma derinliğinin akım hızına bağlı olduğu da bilinen bir gerçektir. Şekil 2.3 Chabert ve Engeldinger (1956)'in geleneksel oyulma derinliğinin değişimini kayma veya akım hızının fonksiyonu olarak göstermektedir.



Şekil 2.3 Chabert ve Engeldinger (1956)'in geleneksel oyulma derinliğinin akım hızının fonksiyonu olarak değişimi.

Bu şekle dayanılarak, D/d_{50} sabit olduğunda;

1. $\frac{U}{U_{cr}} \leq 0.5$ oyulma yok,
2. $0.5 \leq \frac{U}{U_{cr}} \leq 1$ temiz su oyulması mevcut. Bu aralıkta oyulma derinliği hızla lineer olarak değişim gösterir.
3. $\frac{U}{U_{cr}} \geq 1$ devamlı malzeme hareketiyle oyulma.

Burada U akımın ortalama hızı, U_{cr} kritik hız ve d_{50} %50'si ince olan malzeme büyüklüğü olarak tanımlanabilir. Oyulma derinliği hız ile direkt olarak artmaz; çünkü oyulma çukurundan taşınan malzeme ile kaynak arasındaki dinamik eşitlik taşınma yüzdesinin büyüklüğünden etkilenmez. Chee (1982) ve Chiew (1984), yüksek akım hızının ($\frac{U}{U_{cr}} \gg 1$) etkisiyle oyulma derinliğinin değişimi hakkında

deneyler yapmışlardır. Bu araştırmaların önemli sonuçları;

1. $U/U_{cr} = 1$ durumunda oyulma derinliği en yüksek değerdedir.
2. $U/U_{cr} = 1.2 - 2.0$ aralığında oyulma derinliğinde azalma görülür.

3. $U/U_{cr} = 2.0 - 5.0$ aralığında oyulma derinliğinde tekrar bir artış görülür.
4. $U/U_{cr} \cong 5.0$ aralığında oyulma derinliğinde yine bir düşüş mevcuttur.
5. Şekil 2.3'te iki tane pik noktası mevcut olup ilki $U/U_{cr}=1$ ve ikincisi $U/U_{cr}=5$ değerlerinde olup ilk pik değeri ikincisinden büyüktür.

Baker (1979) çalışmalarında ise atnalı çevrintisinin üç tane boyutsuz parametreye bağlı olduğu kanısına varmıştır. Bunlar $\frac{\delta}{D}$, Re_D , Re_δ , *Şekil* 'dir. Burada;

$$\frac{\delta}{D} = \text{Yatak sınır tabakası kalınlığının ayak çapına oranı.}$$

Re_D = Ayak Reynolds sayısı

$$Re_D = \frac{UD}{\nu} \text{ şeklinde yazılabilir.}$$

Re_δ = Yatak sınır tabakası için Reynolds sayısı

$$Re_\delta = \frac{U\delta}{\nu}$$

Reynolds sayısı formüllerindeki U =Yatak sınır tabakasının dış kısmındaki hız olarak tanımlanmaktadır. Yatak sınır tabakasının ayrılması ve oluşan atnalı çevrintisinin büyüklüğü $\frac{\delta}{D}$ değerinin büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Hatta bazen $\frac{\delta}{D}$ değeri o kadar küçük olur ki; sınır tabakası ayrılması ve atnalı çevrintisi oluşması olayları görülmez. Benzer olarak Re sayısında da, eğer bu değer küçükse laminar sınır tabakası ayrılmasında gecikmeler yaşanır. Çünkü Reynolds sayısı küçük olduğu zaman, sınır tabakasında ayrılmaya karşı daha büyük direnç yaşanacağı bilinmektedir. Doğal olarak da daha küçük atnalı çevrintisi oluşacaktır. Baker (1979) çalışmalarında atnalı çevrintisinin laminar sınır tabakasında ayak merkezinden uzaklık değişimlerini ölçmüştür. Burada x_v büyüklüğü atnalı çevrintisinin uzunluk ölçeğini temsil etmektedir. Baker, ölçümleri sonucu aşağıdaki ifadeyi bulmuştur.

$$U\delta^* = \int_0^\infty (U - u) dy \quad (2.5)$$

Burada δ^* bozulmamış sınır tabakasının yerdeğiştirme genişliği olarak tanımlanabilir. Eğer sınır tabakası türbülanslı yapıya sahip olursa Reynolds sayısının rolü laminarın tabakadaki rolünün tersi olup, Reynolds sayısı arttığı zaman atnalı çevrintisinin

büyüklüğü azalacaktır. Bu olay akışkanın tabakaları arasında momentum artışı esnasında gözlenen bir olaydır. Ayağın var olması da zıt basınç gradyanını etkilemektedir. Çizgisel kesitli bir ayak küçük ölçekte zıt basınç gradyanı, kare kesitli ayak kare kesitli ve akıma dik olursa büyük zıt basınç gradyanı meydana gelir. Ayak yüksekliğinin de zıt basınç gradyanı üzerinde doğru orantılı etkisinin bulunduğunu da eklemek gerekir. Laminer atnalı çevrintisi ve türbülanslı atnalı çevrintisi karşılaştırılmak istenirse $\frac{\delta}{D}$ ve Re_D 'nin çok küçük değerleri için atnalı çevrintisi laminer rejimdedir. Baker(1986) araştırmalarında laminer atnalı çevrintisinin salınımlardan sonra tamamen türbülanslı hale geldiğini bildirmektedir. Baker(1991)'in deneylerinde ilk salınımlar(ayrılmış akım sistemlerinde meydana gelen salınımlar ;

$$Re_D \left(\frac{\delta^*}{D} \right)^{0,5} = 800 \quad (2.6)$$

ikincil salınımlar ise (çevrinti çekirdeğinde oluşanlar);

$$Re_{\delta^*} = 150 \quad (2.7)$$

aralığında geçerli olmaktadır.

Qadar (1981) atnalı çevrintisinin şiddetinin oyulma üzerinde etkili bir parametre olduğunu bulmuştur. Bu çalışmasında durağan kanal yatağında çevrintinin gücünün maksimum oyulma derinliğine etkisini incelemiş ve sonuçta bu iki kavram arasında şu eşitliği bulmuştur.

$$d_{se\max} = 538(C_o)^{1,28} \quad (2.8)$$

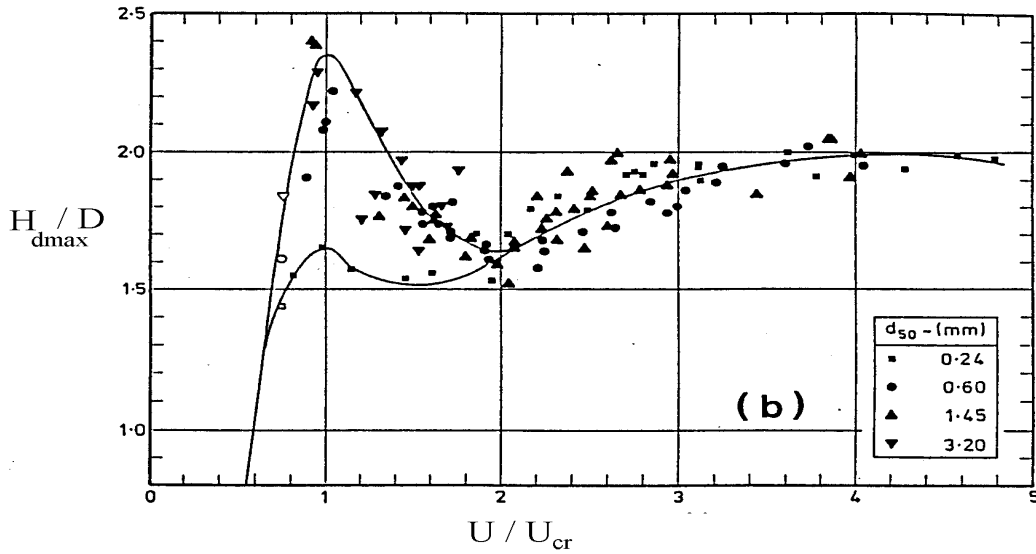
C_o burada çevrintinin şiddetini ifade etmektedir. Bu şiddet ifadesi de;

$$C_o = U_o \cdot r_o \quad (2.9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada U_o çevrintinin hızı ve r_o çevrintinin çapıdır. Çevrintinin çapı da;

$$r_0=0.1D \quad (2.10)$$

Burada da D ayak çapıdır. Sonuç itibariyle yukarıdaki tüm ifadeleri birleştirecek;



Şekil 2.4: Maksimum oyulma derinliğinin U/U_{cr} ile değişimi. (Raudkivi,1986)

$$\frac{d_{se\ max}}{D} = 1.332 \frac{U_o^{1.0624}}{D^{0.36}} \quad (2.11)$$

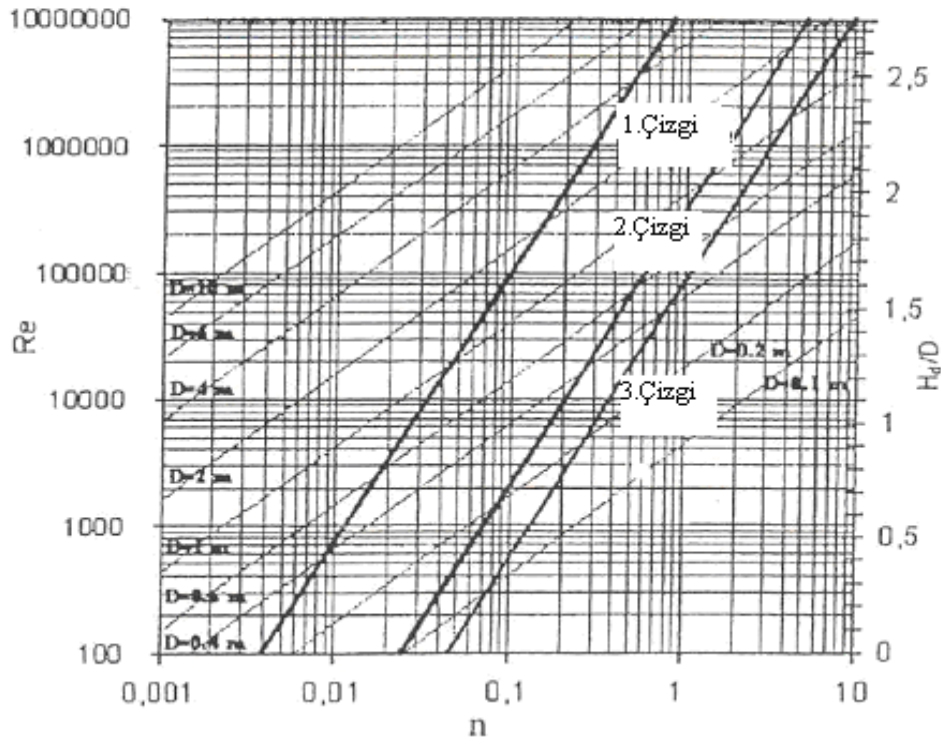
oyulma derinliği için boyutsuz ifadesi elde edilir.

Üç(1988) , gerek kendi yaptığı deneysel çalışmalar ve gerekse literatürden elde ettiği deneysel ve prototip sonuçları kullanarak, Reynolds sayısının üç ayrı aralığı için rölatif oyulma derinliğinin çevrinti yayılma frekansı ile değişimini incelemiştir. Üç (1988), Reynolds sayısının üç farklı bölgesinde birbirinden farklı ancak birbirlerine yaklaşık olarak paralel üç bağıntı elde etmiştir. Üç (1988) bu çalışması sonucunda, kolay ve pratik bir uygulama imkanı sağlamak amacı ile Reynolds sayısının üç ayrı bölgesi için elde ettiği üç ayrı bağıntıyı bir arada çizerek Şekil 2.5 'teki diyagramı elde etmiştir.

$$\frac{H_d}{D} = 1.22 \log f + 1.60 \quad (\text{Re} < 2.5 \cdot 10^5 \text{ için}) \quad 3.\text{Çizgi} \quad (2.12)$$

$$\frac{H_d}{D} = 1.22 \log f + 1.95 \quad (2.5 \cdot 10^5 < \text{Re} < 1.0 \cdot 10^6 \text{ için}) \quad 2.\text{Çizgi} \quad (2.13)$$

$$\frac{H_d}{D} = 1.22 \log f + 2.82 \quad (\text{Re} > 1.0 \cdot 10^6 \text{ için}) \quad 1.\text{Çizgi} \quad (2.14)$$



Şekil 2.5: Rölatif oyulma derinliğinin çevrinti yayılma frekansı ile değişimi. (Üç ve Ağaçoğlu, 1999)

Bu diyagramın elde edilmesinde, araştırmacı hem kendi deneysel çalışma sonuçlarını ve hem de literatürden elde ettiği çok sayıdaki deneysel çalışma datası ile 37 prototip veriyi birlikte değerlendirmeye tabi tutmuştur. Dolayısıyla, Şekil 2.5' de verilen diyagram, gerek laboratuvar ve gerekse prototip şartlarda maksimum denge oyulma derinliklerinin çevrinti yayılma frekansına bağlı olarak kolay ve güvenli bir şekilde elde edilmesinde kullanılabilir.

Bu çalışmada çevrintinin yayılma frekansı oyulmaya etkiyen bir parametre olarak tesbit edilmiştir. Daha sonra Reynolds sayısının fonksiyonel ifadesi ile oyulma derinliği arasındaki ilişki araştırılmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Yıldız Teknik Üniversitesi laboratuvarında yapılan deneylerde 0.9 m genişlikte, 0.6 m yükseklikte ve 14 m uzunluğunda dikdörtgensel yaklaşım kesiti olan bir kanal modeli kullanılmıştır. Yatak malzemesi olarak üç farklı granulometrede kuavers tipi malzeme kullanılmıştır. Bunun haricinde deneylerde 5 farklı dairesel kesitli ayak kullanılmış olup çapları sırasıyla 3.8, 5.6 , 6.5, 8.4 ve 11 dir. Bu deneyde sürtünme etkisini en aza indirmek amacıyla camdan ayaklar kullanılmıştır. Deneyler esnasında her bir ortalama kritik oyulma derinliği değeri sürekli malzeme hareketi için hesaplanmıştır ve önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

2.2.Köprü Ayaklarında Oyulma Derinliklerinin Belirlenmesi:

Hareketli tabanlı akarsular üzerine inşa edilen köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmalar, köprülerin stabilitesinin bozulmasına ve bunun sonucunda da yıkılmasına sebep olmaktadır. Ayaklar etrafında oluşan oyulma derinliklerinin önceden tahmin edilmesi ve buna göre boyutlandırma yapılması, proje mühendisleri açısından çok büyük önem taşımaktadır. Oyulma olayına etkili çok sayıdaki parametre arasında en önemlisi ayaklar etrafında oluşan çevrinti sistemlerdir. Hareketli tabanlı bir akıma yerleştirilen ayaklar etrafındaki yerel oyulmalar ilk defa Tison (1940) tarafından incelenmiş, daha sonra oldukça hızlı bir gelişim göstererek güncel bir konu olmuştur. Buna rağmen, oyulma olayına etkili parametrelerin çok olması sebebiyle bugüne kadar kesin bir matematiksel çözüm elde edilememiştir. Olayı ele alan her bir araştırmacı parametrelerin çokluğundan dolayı kendilerince önemsiz gördükleri parametreleri ihmal etmişler, bu sebeple hemen tümü deneysel çalışmalara dayanılarak elde edilen ampirik bağıntılar arasında tam bir uyum sağlanamamıştır.

Oyulma olayına etkili çok sayıda parametrenin bulunması, pratikte de kullanılabilecek uygun sonuçların elde edilememesine neden olmaktadır. Konu ile ilgili yapılan çalışmaların hemen hepsinin laboratuvar şartlarında deneysel olarak gerçekleştirilmiş olması sebebiyle, elde edilen ampirik bağıntıların sonuçları uygulamada çok farklı sonuçlar elde edilmesine yol açmaktadır. Bir proje mühendisi için tayin edilmesi gereken en önemli büyüklük maksimum oyulma derinliğinin belirlenmesidir. Bu çalışmada, proje mühendislerinin pratik de kolaylıkla uygulayabileceği prototipten elde edilen bağıntılarla maksimum oyulma

derinlikleri belirlenmiştir. Ayrıca, belli bir atak açısı ile doğrusal olarak sıralanmış ayak gruplarındaki oyulma derinliklerinin tayini amaçlanmıştır.

Kararlı ve üniform akıma sahip bir akarsudaki köprü ayağı etrafındaki oyulma olayına etki eden boyutsuz parametreler;

$$\frac{d_{se\max}}{D} = f\left(\frac{U}{U_{kr}}, \frac{h}{D}, \frac{d}{D}, \alpha, K_\alpha\right) \quad (2.15)$$

olarak elde edilir (Üç ve Ağaçcıoğlu,1999). Bu bağıntıda $d_{se\max}$, maksimum denge oyulma derinliğini, U , akım hızını, U_{kr} , kritik akım hızını, h , akım derinliğini, D , ayak çapını, α akımın atak açısını, K_α , şekil katsayısını ve d , taban malzemesi malzeme çapını göstermektedir. Bu bağıntıdan görüleceği üzere, akım hızı, derinliği, taban malzemesinin çapı, ayak şekli ve akımın atak açısı, maksimum denge oyulma derinliğine etki eden temel parametreler olarak bulunur. Bu parametrelerin etkisi tek tek incelenmiştir.

Akım derinliğinin ise belli bir değerinden sonra oyulmaya etkili olmadığı tüm araştırmacıların ortak görüşüdür. Bunun nedeni, akım derinliğinin artması ile oyulmanın esas faktörü olan atnalı çevrintisi fazla etkilememesi, buna karşılık düşük akım derinliklerinde atnalı çevrintisinin daha fazla etkilenmesidir. Akım derinliğinin oyulma derinliğine etkisi ile ilgili literatürde verilen kriterler aşağıda sıralanmıştır.

$$\frac{h}{D} \geq 1 \quad (\text{Hancu,1971})$$

$$\frac{h}{D} \geq 2 \quad (\text{Questnot, 1970})$$

$$\frac{h}{D} \geq 1 \quad (\text{Büyük taban malzemesi için}) \quad (\text{Raudkivi,1985})$$

$$\frac{h}{D} \geq 6 \quad (\text{Küçük taban malzemesi için}) \quad (\text{Raudkivi,1985})$$

Ancak Breusers (1977)'in başkanlığında oluşturulan bir komite tarafından yapılan değerlendirmede, $h/D > 3$ değerinden sonra akım derinliğinin oyulma derinliğine etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Taban Malzemesi Malzeme Çapının Oyulma Derinliğine Etkisi hakkında iki farklı görüş mevcuttur:

1-) Oyulma derinliği malzeme çapından bağımsızdır. (Larras,1972)

2-) Oyulma derinliği malzeme çapının belli sınırları arasında malzeme çapı ile artmakta, bu sınırlar dışında ise bağımsızdır Etterna(1976) 'nın elde ettiği sonuçlar Tablo 2.1' de verilmiştir.

Tablo 2.1: Etterna (1976)'nın elde ettiği sonuçlar.

d_{50} (mm)	0.55	0.70	0.85	1.90	4.10	6.00
H_{dmax}/D	1.47	1.75	2.00	2.05	2.10	2.20

Sonuç olarak, temiz su oyulması halinde oyulma derinliği malzeme çapının özelliklerinden etkilenir. Fakat, hareketli taban halinde malzeme çapının oyulma derinliğine etkili olup olmadığı kesin olarak bilinmemektedir. (Üç ve Ağaçoğlu,1999).

Nicollet (1971) ise granülometrinin etkisini belirlemek için üç farklı çapa sahip taban malzemesini önce ayrı göz önüne almış ve daha sonra bu üç malzemeyi eşit oranda birbirleriyle karıştırarak oyulma derinliğinin etkisini incelemiştir. Karışım için elde edilen Hamak, ayrı alınmış malzemeler için elde edilen oyulma derinliğinden yaklaşık olarak %25 daha az olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, taban malzemesi granülometrisinin maksimum oyulma derinliğine etkili olduğu tespit edilmiştir.

Kütü burunlu ayaklar etrafında oluşan oyulma derinliklerinin, sivri burunlu ayaklara göre daha fazla olduğu bilinmektedir. Akım yönünden etkilenmeyen tek ayak şekli dairesel silindirik ayaklardır. Bu sebeple araştırmacılar, dairesel silindirik ayaklarda oluşan oyulma derinliklerine göre diğer ayaklardaki oyulmaları kıyaslamalardır. Ayak çapına bağlı olarak literatürde verilen bazı ampirik formüller Tablo 2.2'de verilmiştir. Bu formüllerin hepsi daimi sürüntü maddesi taşınması halindeki oyulma hali için geçerli olup maksimum denge oyulma derinliklerini vermektedir. Aynı boyuttaki dairesel silindirik ayaklar için elde edilen oyulma derinliklerini, şekil katsayısı olarak adlandırılan bir katsayı ile çarparak, o ayak şekline ait oyulma derinlikleri bulunabilir. Dairesel kesitli ayaklar için şekil katsayısı $K_s=1.0$ 'dir, Diğer ayak tipleri için şekil katsayıları $K_s= 0.41\approx1.40$ arasında değişmekte olup Tablo 2.3'de sıralanmışlardır. Ayrıca ayak uzunluğu da oyulma derinliğine etkilidir. Ayak uzunluğu arttıkça oyulma

derinliği azalmaktadır. Bu konuda $n=L/D$ narinlik oranı tanımlanmakta ve narinlik oranı arttıkça oyulma derinliği azalmaktadır Oyulma derinliğine ayak şeklinin ve ayak boyutunun etkisi olduğu bilindiğine göre, akımın atak açısının da oyulma derinliğine etkili olması tabiidir. Ayağın akıma dik boyutu ne kadar büyük ise oyulma derinliği de aynı oranda büyük olacaktır. Larras(1972)'ın, bu konuda yaptığı deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 2.4'de verilmiştir. Tablo 2.4'den görüleceği üzere, akım yönünden etkilenmeyen dairesel silindirik ayaklar haricindeki diğer tüm ayaklarda atak açısı arttıkça, şekil katsayısı K_a değerleri yani oyulma derinlikleri artmaktadır. Dolayısıyla, aynı boyuttaki dairesel silindirik ayaklar için elde edilen oyulma derinlikleri atak açısına bağlı olarak verilen K_a katsayıları ile çarpılarak diğer ayak şekilleri için oyulma derinlikleri bulunabilir. ( ve Ağacıoğlu,1999).

Tablo 2.2: Maksimum denge oyulma derinliklerinin ayak çapına bağlı olarak değişimi.

Larras (1963)	$H_{do} = 1.05D^{0.75}$
Breuser (1965)	$H_{do} = 1.40D$
Shen(1969)	$H_{do} = D^{0.619}$
Başak(1975)	$H_{do} = 0.558D^{0.586}$
Coleman (1971)	$H_{do} = 1.40D^{3/10}(U^2/2g)^{1/10}$
 (1979)	$H_{do} = 0.61D^{0.766}$

Tablo 2.3.: Çeşitli ayak şekilleri için şekil katsayısı.

Ayak tipi	Larras	Dietz	Başak
	şekil katsayısı K_r		
Daire	1.00	1.00	1.00
Jukowski	0.80	0.41-0.80	----
Elips	0.83	0.83-0.99	----
Mercek	0.41-0.91	----	----
Tıraşlı dikdörtgen	1.01	----	----
Dikdörtgen	1.40	1.22-0.99	1.20
Oblonik	1.00	0.90	0.90

Tablo 2.4: Çeşitli ayak tipleri için atak açısına bağlı olarak şekil katsayısının değişimi.

Ayak tipi	Şekil katsayısı K_α					
	0°	10°	15°	20°	30°	45°
Dairesel	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mercek	0.8	0.98	1.05	1.24	1.3	2.0
Jukowski	0.86	---	1.09	---	1.4	1.97
Oblonik	1.0	1.02	1.15	1.24	1.55	---
Dikdörtgen	1.11	---	1.4-2.4	---	1.55-3.4	1.65-4.1

Laursen ve Toch (1956) çeşitli narinlik oranlarında ($n=L/D$), $\alpha=0^\circ-90^\circ$ arasındaki atak açılarında dikdörtgen şekilli ayaklar için K_α katsayılarını veren bir diyagram geliştirmişlerdir. Üç (1984) ise konu ile ilgili literatürdeki çalışmalardan faydalanarak K_α katsayısını veren ampirik bir bağıntı geliştirmiştir. Bu bağıntı;

$$K_\alpha = \lambda^{\sqrt{\sin \alpha}} \left(1 + \sin \frac{\alpha}{3} * 0.05 \right)^{\frac{-\sin \alpha}{6.6}} \quad (2.16)$$

şeklindedir. Burada α atak açısı olup, λ katsayısı;

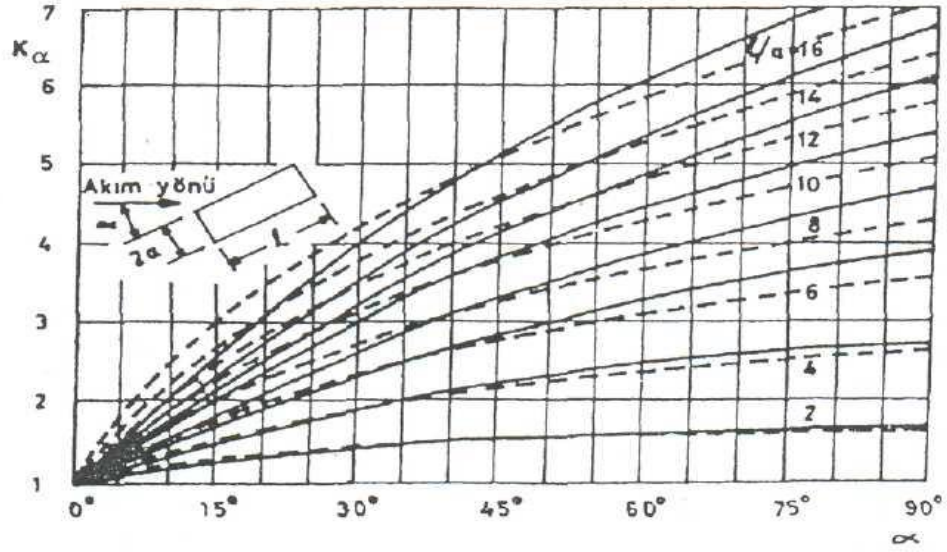
$$\lambda = \frac{n-1}{\sqrt{n}} - 0.2 \frac{n-1}{n} \quad (2.17)$$

olarak verilmektedir. Buna göre, her durumdaki ayaklar etrafında oluşabilecek oyulma derinlikleri;

$$\frac{H_{d\alpha}}{H_{do}} = K_\alpha \quad (2.18)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Burada H_{do} , $\alpha = 0^\circ$ için oyulma derinliğini, $H_{d\alpha}$, α atak açısındaki oyulma derinliğini ifade etmektedir. Üç(1984) tarafından, çeşitli α ve $n=L/D$ değerleri için (2) bağıntısından elde edilen K_α değerleri, Laursen ve

Toch (1956) tarafından deneysel olarak elde edilen K_α değerleri ile birlikte Şekil 2.6' da verilmiştir (Üç ve Ağaçcıoğlu,1999).



----- Üç (1984)

_____ Laursen ve Toch (1956)

Şekil 2.6: Şekil katsayısının çeşitli atak açılarındaki değişimi.(Üç ve Ağaçcıoğlu,1999)

Uygulamada genellikle köprü ayakları birden fazla ve doğrusal bir eksen üzerinde teşkil edilmektedir. Bu sebeple, oyulma derinliklerinin bu gibi hallerde nasıl bir değişim göstereceğinin bilinmesi oldukça önemlidir. Ayakların bir grup halinde birbirini peşi sıra yerleştirilmesi halinde ayaklar etrafında oluşan çevrintiler ve sekonder akımlar ayaklar arası uzaklığa ve akımın atak açısına bağlı olarak çok önemli değişikliklere uğrar. Bunun sonucunda da ayaklar etrafındaki yerel oyulmalar büyük bir değişim gösterir ve memba taraftaki ayaklar kendinden sonra gelen ayakları oyulmaya karşı korurlar.

Doğrusal bir eksen üzerine sıralanmış köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliğine etki eden en önemli iki parametre;

1-) Ayaklar arasındaki uzaklık,

2-) Ayak gruplarının ekseni üe genel akım arasındaki atak açısı,

olarak sıralanabilir. Bununla ilgili ilk çalışma Başak (1975) ve arkadaşları tarafından deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ayak gruplarının genel akıma paralel ve belli bir atak açısı yapması halleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Üç (1984) ise Başak (1975) ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçlarından yararlanarak $\alpha = 0^\circ$ ve $\alpha > 0^\circ$ için geçerli ayrı ayrı bağıntılar geliştirmiştir.

$\alpha = 0^\circ$ için verilen bağıntılar,

$$\frac{H_{dn}}{H_{do}} = (1 - 0.28\lambda) \left(\frac{b}{D} \right)^{-0.115\lambda} \quad (0.05 < b/D < 4) \quad (2.19)$$

$$\frac{H_{dn}}{H_{do}} = (1 - 0.58\sqrt{\lambda}) \left(\frac{b}{D} \right)^{0.23\lambda} \quad (4 < b/D < 40) \quad (2.20)$$

şeklindedir. Burada, b, ayaklar arası uzaklık olarak verilmektedir. Ayak ekseninin genel akımla belli bir açı yapması hali için de,

$$K_\alpha = \lambda^{\sqrt{\sin \alpha}} \left(1 + \sin \frac{\alpha}{3} * 0.05 \right) \left(\frac{b_t}{D} \right)^{\frac{-\sin \alpha}{6.6}} \quad (2.21)$$

bağıntısı verilmiştir. Burada b_t , ayaklar arası izdüşüm genişliğidir. (2.18) bağıntısı hem atak açısı ve hem de ayak grupları için verilmiş en genel ifadedir, Ayak gruplarındaki oyulma derinliklerinin belirlenmesinde yukardaki (2.16) ve (2.17) nolu bağıntılar kullanıldığında, λ değeri (2.18) nolu bağıntıdan bulunmalıdır. Ancak bu halde (2.18) nolu bağıntıdaki n değeri, ayak sayısı olarak göz önüne alınmalıdır.

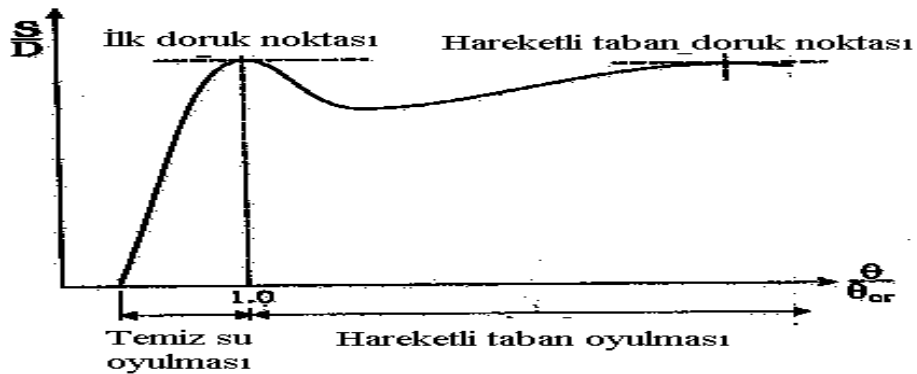
Sonuç olarak;

1-) Maksimum denge oyulma derinliği ile ilgili olarak laboratuvar çalışmalarına göre, laboratuvar $Re < 2.5 \cdot 10^5$ değerine kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla bu bağıntılar Reynolds sayısının belirtilen aralıklarında geçerli olabilmektedir.

2-) Tabiattaki akarsularda ise taşkın esnasında daha büyük reynolds sayılarına ulaşılabilir. Buna göre daha büyük Reynolds sayılarına göre Şekil 2.5'den faydalanılmalıdır.

2.3. Düzenli Akımlarda Daire Kesitli Köprü Ayağı Oyulmaları:

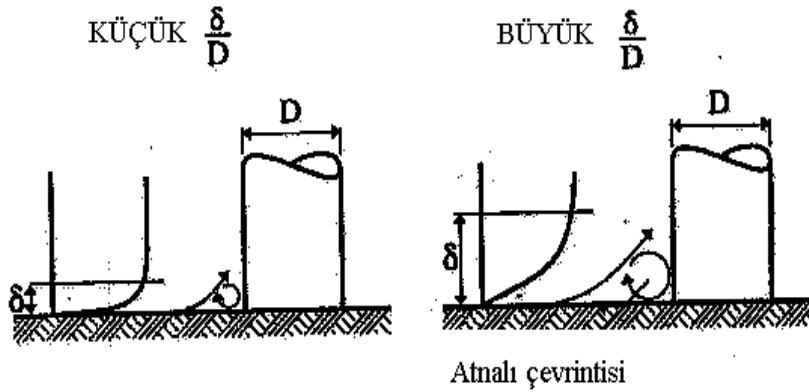
Düzenli akımlarda da köprü ayağı oyulmasının anahtar elemanı atnalı çevrintisidir. Buna bir de yan köşelerde akım çizgilerinin daralması eklenince; bu çevrintiler toplamı ayağa komşu malzemenin önemli bir kısmını aşındırır ve kesik koni şeklinde bir oyulma çukuru meydana getirir. Araştırmalar oyulma çukurunun akım yönünün tersi eğimini içsel sürtünme açısından büyük veya küçük eşit olabileceğini, akım yönünde ise daha az dik olduğunu göstermektedir. Bu, yerçekimi etkisinden kaynaklanmaktadır. Oyulma derinliğinin Melville ve Sutherland (1989) , Raudkivi (1986), Richardson ve Davis (1995), Yanmaz ve Altınbilek (1991) vs. gibi araştırmacıların çalışmalarında bir çok faktörden etkilendiği ve bu faktörlerin Shields parametresi, malzeme boyutları, sınır tabakası derinliği ve ayak büyüklüğü oranı, sediment büyüklüğü ve ayak büyüklüğü oranı, şekil faktörü ve alignman faktörü olarak tanımlanabilir. Shields parametresi olan θ artarsa, temiz su oyulması da artacaktır ($\theta < \theta_{cr}$); hareketli taban oyulmasında ise , yani θ kritik değeri aşıyorsa, oyulma derinliği maksimum değerine ulaştıktan sonra yavaş yavaş azalır.



Şekil 2.7: Üniform sedimentte oyulma derinliği ve Shields parametresi ilişkisi.

(Sümer ve Fredsoe,2002)

Bu olayın sebebi, kanal tabanında sürekli gerçekleşmekte olan sediment taşınması ve sonucunda oyulma çukurunun taşınan bu sedimentle yavaş yavaş dolmasıdır. Ama Shields parametresi artmaya devam ettiğinden oyulma derinliği 2. pik değerine ulaşır. Buna hareketli taban pik değeri adı verilir. Her zaman temiz su pik değerinden küçüktür. Etterna (1980) 'in çalışmalarına göre oyulma derinliği taban malzemesinin geometrik standart sapması olan $\sigma_g = \frac{d_{84}}{d_{50}}$ artışı ile azalmaktadır. Etterna bu araştırmalarda temiz su oyulmalarını dikkate almıştır. Baker(1986) ise hareketli taban oyulmasını dikkate alarak deneyler yapmış ama bu oyulmalarda azalmalar temiz su oyulmasındaki ile karşılaştırıldığında çok fazla büyük çıkmamıştır. Sınır tabakası kalınlığı ve akış derinliği de oyulma derinliğini etkileyen faktörler arasındadır. Melville ve Sutherland (1989) bu konuda araştırmalar yapmış olup, S oyulma derinliğini S_o ise $\frac{\delta}{D}$ 'nin büyük değerleri için gelişen oyulma derinliğini göstermektedir. Burada δ = Akım derinliğini , D= Ayak çapını ifade etmektedir. Sınır tabakası kalınlığının atnalı çevrintisi üzerine etkisi Şekil 2.8'de gösterilmektedir.

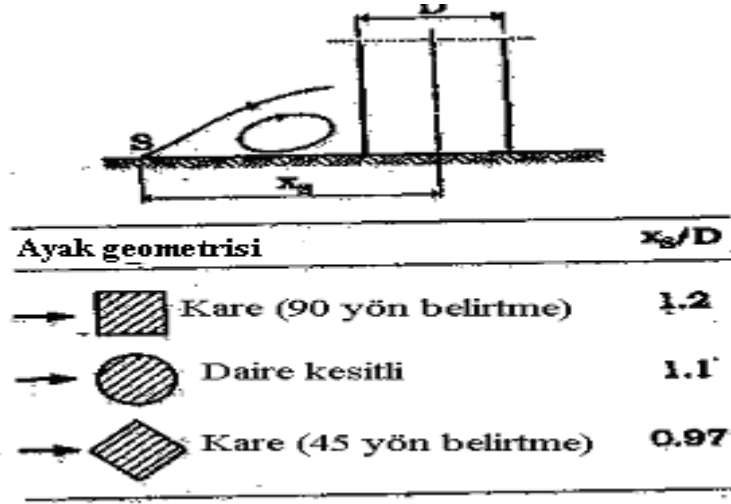


Şekil 2.8: Sınır tabakası kalınlığının atnalı çevrintisi üzerine etkisi. (Sümer ve Fredsoe, 2002)

Buna göre $\frac{\delta}{D}$ 'nin değeri ne kadar büyükse, atnalı çevrintisi de o oranda büyük olup, oyulma derinliği de o kadar büyük olacaktır. Ayak büyüklüğünün sediment büyüklüğüne oranı olan $\frac{D}{d_{50}}$ değerinin oyulma derinliği değişimi Melville ve Sutherland (1989) tarafından incelenmiştir. Buna göre büyük d_{50} değerleri oyulma

derinliğini sınırlandırmaktadır. Fakat yapılan deneylerde $\frac{D}{d_{50}} \geq 50$ değerinden sonra

sediment büyüklüğünün oyulma üzerine etkisi artık olmadığı gözlenmiştir. Şekil faktörlerinin oyulma derinliğine etkisi incelendiği zaman ise kesitin etkisi başta gelmektedir. Ayak geometrisi ve oyulma derinliği arası ilişki Şekil 2.9'da görülmektedir.

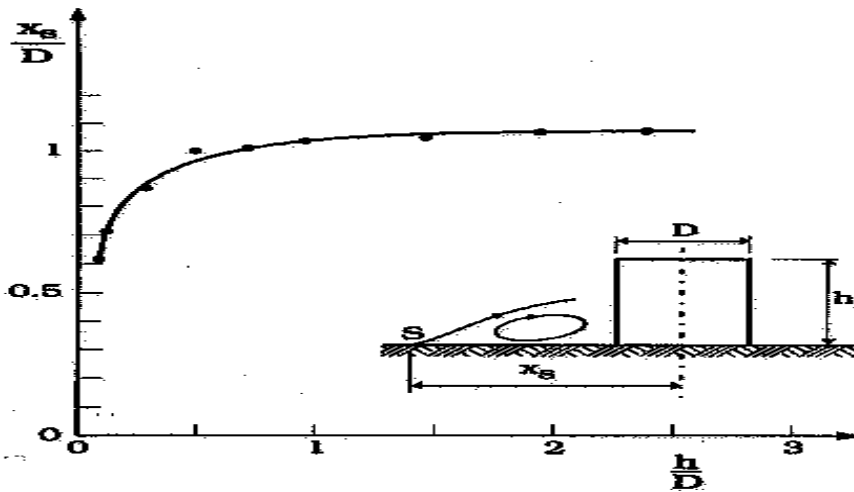


Şekil 2.9: Ayak geometrisi ve oyulma derinliği arası ilişki. (Sümer ve Fredsoe,2002)

Oyulma derinliği ayak büyüklüğü ile normalize olmaktadır. $\frac{d_{se}}{D} = 1.3$ dairesel

kesitli bir ayak için; $\frac{d_{se}}{D} = 2.0$ karesel kesitli ayak için (akıma 90° olan) söylemek

mümkündür. Öteki bir şekil faktörü ise ayağın uzunluğudur. Ayak uzunluğu ve oyulma derinliği arası ilişki Şekil 2.10'da görülmektedir.

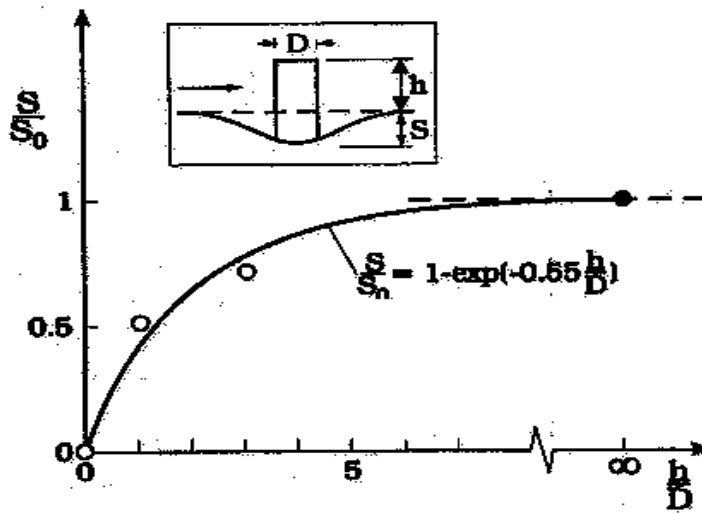


Şekil 2.10: Ayak uzunluğu ve oyulma derinliği arası ilişki. (Sümer ve Fredsoe,2002)

Eğer ayak uzunluğu yeterince büyük olmazsa, atnalı çevrntisi direkt olarak etkilenir ve büyüklüğü engellenir, dolayısıyla oyulma derinliği de buna bağlı olarak azalır. (Melville ve Sutherland (1989)) Buna göre şu ampirik ifade yazılabilir.

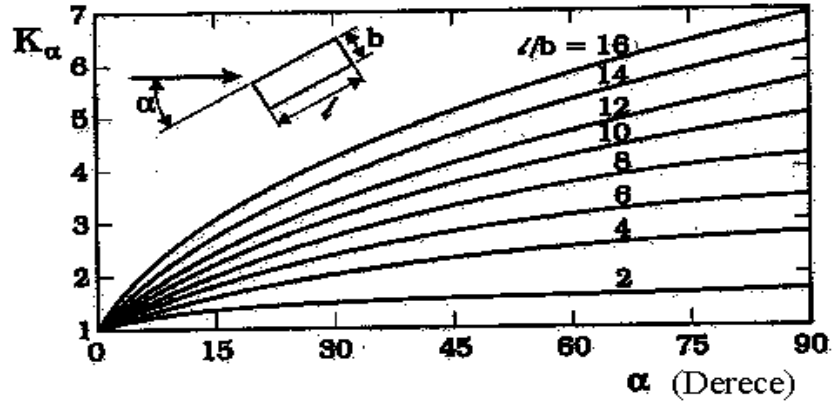
$$\frac{S}{S_0} = 1 - e^{\left(-0.55 \frac{h}{D}\right)} \quad (2.22)$$

Burada h = Ayak yüksekliği, S_0 = Uzun ayaklar için oyulma derinliğidir. Şekil 2.9'da ayak uzunluğu etkisi görülmektedir.



Şekil 2.11: Ayak yüksekliği etkisi. (Sümer ve Fredsoe,2002)

Alignman faktörünün oyulma derinliğine etkisi ise Laursen ve Toch (1956) deneylerine konu olmuştur. Burada $K_a = S/S_0$ olup S_0 = Atak açısı olan $\alpha=0$ durumundaki oyulma derinliğini göstermektedir. Atak açısı ne kadar büyük olursa, zıt basınç gradyanı, buna bağlı olarak atnalı çevrntisi ve nihayet oyulma derinliğini artırır. Şekil 2.12 alignmanın oyulma derinliğine etkisini göstermektedir.



Şekil 2.12: Alignmanın oyulma derinliğine etkisi. (Sümer ve Fredsoe,2002)

Yukarıda anlatılan sınır tabakası ayak büyüklüğü oranı, şekil faktörü ve alignman faktörü akım ile bağlantılıdır. Reynolds sayısı da akımı ve bundan dolayı oyulma derinliğini etkileyen başka bir faktördür. Literatürde daire kesitli köprü ayaklarında meydana gelen oyulma derinliğinin hareketli taban oyulması esnasında aralığın $1 < \frac{S}{D} < 2,5$ olduğu ve bu değer yukardaki parametrelere bağlı olduğu görülmektedir. Melville ve Raudkivi (1996)'nin çalışmalarında hareketli taban oyulması için $\frac{S}{D} = 2,4$ alınarak; bu araştırmacılar tarafından ortaya atılan metotlarda maksimum oyulma derinliğinin aşağıdaki ifadedeki çarpım faktörleri ile düşürülebileceğini ifade etmişlerdir.

$$\frac{S}{D} = K_I K_\delta K_d K_s K_\alpha \quad (2.23)$$

(2.23) ifadesindeki K_I ,

$$K_I = 2.4, \frac{U - (U_\alpha - U_{cr})}{U_{cr}} > 1 \quad (2.24)$$

$$K_I = 2.4 \left| \frac{U - (U_\alpha - U_{cr})}{U_{cr}} \right|; \frac{U - (U_\alpha - U_{cr})}{U_{cr}} < 1 \quad (2.25)$$

Burada U_a = Zırhlama en yüksekken yaklaşan ortalama akım hızı. $U_a=0,8U_{ca}$
 U_{ca} =Zırhlama mümkün olmadığı zaman yaklaşan akım ortalama hızı olarak ifade edilebilir. Eğer yatak malzemesi üniform ise $U_a=U_{cr}$ olmalıdır. Aksi durumlarda U_a hesaplanmalıdır. Matematiksel modelleme atnalı çevrintisini ve silindirik ayakta oyulmanın 3 boyutta incelenmesini ve numerik analizler yapılmasını sağlamıştır. Tablo 2.5'te şu ana kadar yapılan bazı matematiksel model çalışmaları gösterilmektedir ve şekil 2.11'de de oyulma derinliğinin numerik modellerde ve deneylerdeki karşılaştırılmasına yer verilmiştir

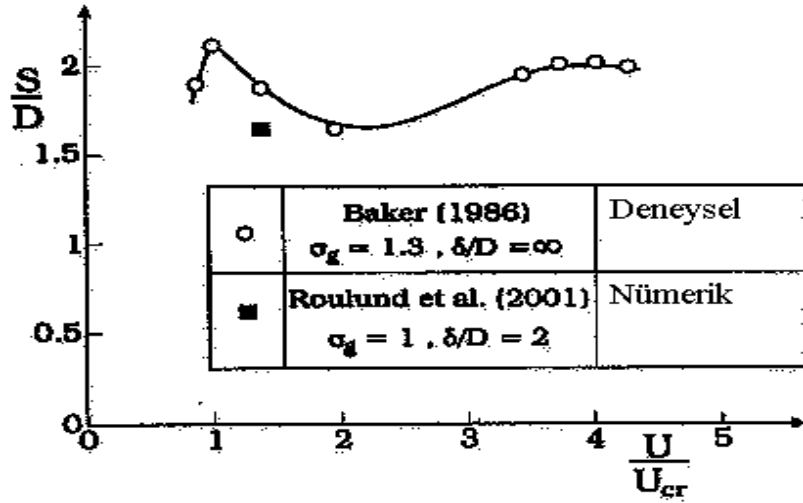
Tablo 2.5: Matematiksel modelleme çalışmaları.

Araştırmacılar	Model	Uyarılar
Kobayashi (1992)	Laminer	Salınımlı akım,rijit ve düz yatak
Olsen&Melaen(1993)	k-ε	Durağan akım,yatak morfolojisi
Olsen&Kjellesvig(1998)	k-ε	Durağan akım,yatak morfolojisi
Richardson&Panchang(1998)	RNG	Oyulma mevcut,rijit ve düz yatak
TsengYen&Song(2000)	LES	Kare kesitli ayak,rijit ve düz yatak
Yuhi,Ishida&Umeda(2000)	Laminer	Oyulma mevcut,rijit ve düz yatak
Roulond,Sumer&Fredsoe(1993)	k-ω	Salınımlı akım,rijit ve düz yatak,Yatak morfolojisi

Burada k-ε ve k-ω türbülanslı model çeşitleri olup, RNG tekrar normale dönmüş grup modelini ve LES Büyük anafor simülasyonunun kısaltılmalarıdır. K türbülans enerjisini ε ve ω türbülanslı kinetik enerji için özel bir sabittir ve aralarında

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k\beta^*} \quad (2.26)$$

ilişkisi mevcut olup $\beta^*=0.09$ alınan model sabitidir. Oyulma derinliğinin numerik modellerde ve deneylerdeki karşılaştırılması Şekil 2.13'te görülmektedir.



Şekil 2.13: Oyulma derinliğinin numerik modellerde ve deneylerdeki karşılaştırılması. (Sümer ve Fredsoe,2002)

2.4. Farklı Kesitli Köprü Ayaklarının Oyulma Derinliğine Etkilerinin İncelenmesi:

Bilindiği gibi köprü ayakları arkasında oluşan en etkili oyulma yerel oyulmalardır. Yerel oyulma sorununun düşey köprü ayakları kullanılarak ve oyulmaya etkiyen bir çok parametre üretmek suretiyle araştırmacılar teorik ve deneysel çalışmalar yapmaktadır. Araştırmacıların yaptığı deneysel çalışmanın konusu dairesel kesitli köprü ayaklarında üniform akım olduğunda yerel oyulma derinliğinin araştırılmasına dayalı deneysel çalışmalardır. Köprü ayağında güvenilir tasarım yapabilmek için maksimum oyulma derinliği mümkün olduğunca seri bir şekilde tespit edilmelidir. Burada β adı altında bir uyum açısı tanımlanır ki , bu akım yönündeki ayağın uyum açısıdır. Bresuers ve Raudkivi (1991) deneylerinde oyulma derinliğinin üste doğru genişleyen bir ayakta oyulma derinliğinin arttığını; üste doğru daralan köprü ayağında ise oyulma derinliğinin azaldığını göstermişlerdir. Üste doğru daralan ayakların başka bir avantajı ise daha kısa sürede inşa edilebilmeleri ve maliyetlerinin daha az olmasıdır. -Buckingham π teoremi ne göre boyutsuz tanımlamalar yapılmıştır. Buna göre;

$$\frac{d_s}{b} = f\left(\frac{d_o}{b}, Fr, \beta\right) \quad (2.27)$$

d_s =Yerel oyulma derinliği

Fr =Froude sayısı

b =Ayak çapı

d_o =Yaklaşan akım derinliği

β = Uyum açısı.

Bozkuş ve Yıldız (2001)'ın yaptığı deneylerde yapılan kabuller;

1) Tekil dairesel kesitli ayaklar kullanılarak L/b , α , K_g , K_s ve K_r nin etkileri ihmal edilmiştir.

K_g =Grup etkisi faktörü

K_s =Ayak şekli faktörü

K_r = Köprü ayağı yüzey kalınlığı faktörü

L =Köprü ayağı uzunluğu

2) Malzeme ve Akışkan yoğunlukları tüm deneyde sabit alınmıştır. $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ buna göre sabittir.

3) Üniorm yatak malzemesi ve d_{50} ve σ_g sabitliğine göre Reynolds sayısı etkisi ihmal edilmiştir. d_{50} =Ortalama dane çapı. σ_g = Malzeme derecesinin geometrik standart sapması.

4) Sabit bir yatak eğimi olduğu için S_o , u^*/u etkisinin çalışılmasına gerek yoktur. Zaten bu denklem d_o/b nin bir fonksiyonu olarak göze çarpar. u^* =Kayma hızı.

5) Kohezyonsuz yatak maddesi kullanıldığından $C=0$ olur ve $C/\rho_w u^2$ etkisi ihmal edilir.

6) Geniş ve düz bir kanal modelinde deney yapıldığından K_a , K_c , S_o ve B ihmal edilir.

K_a =Akım alignmanı etkisi faktörü

K_c =Kanal yan duvarlarının pürüzlülük faktörü.

B =Kanal genişliği.

Köprü ayaklarında yerel oyulma mekanizması şu bileşenlerden oluşur.

-Ayak önü akım hızının ön bileşeni

-At nalı çevrintisi

-Yüzeysel çevrinti

-Art-iz çevrintisi

Bozkuş ve Yıldız (2001)'ın deneylerinde art-iz çevrintisi hariç olmak üzere tüm bileşenler kullanılmıştır.

Yapılan deneylerde ana kanal 11 m uzunluğunda ve 2 m genişliğindedir. Ana kanalın her iki tarafına kanal su derinliğinin ölçülmesi için kanal duvarlarına 3'er m mesafede ölçütler yerleştirilmiştir. Plexiglas malzemesinden üretilen tekil köprü ayağı modeli akım yönüne kanal girişinden 6 m mesafeye yerleştirilmiştir. Su dikdörtgensel kanala su tanklarındaki 0.5 ve 1.5 m genişliğindeki keskin kenarlı savaklar mevcuttur. Bunlar kanal girişinde yer alıp akım yüzdesini ölçmek için kullanılırlar.

Başlangıç düz yatak yapısıyla birlikte şu şartları sağlanmış ve hiçbir malzeme akım yönünde oyulma çukuruna girmemiştir.

1-) Silindirik ayak modelleri deney esnasında test edilmiştir. İki farklı çap kullanılmıştır, $b=50$ ve 100 mm, bu çaplar gelen akım derinliği ayak çapına oranını 2.5 kadar yükseğe çıkmasını sağlamıştır.

2-) Üiform yatak malzemesinin karakteristik malzeme büyüklükleri $d_{50}=0.5$ mm, $d_{90}=1.0$ mm ve $\gamma_s=26.5$ KN/m³ özgül ağırlık deneyler boyunca kullanılmıştır.

3-) Yatak malzemesi 20 cm kalınlığında ve $S_o=0.001$ eğiminde bir yüzeye dökülmüş olup her seferinde öncekine göre daha düz hale gelmektedir. Oyulma test bölgesinde 50 cm kalınlığında toprak mevcuttur.

4-) Dört köprü ayağı uyum açıları $\beta= 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ olup deneyler boyunca kullanılmıştır. Deneylerin tamamen düşey ayaklarda yapılmamasına özen gösterilmiştir.

5-) Ayak modelinin akım yönü tersindeki yüzündeki oyulma derinliği yatak yüzeyi dikkate alınarak ölçülmüş bunun için de kanal düşey duvarlarına iliştirilen düşey milimetrik ölçek kullanılmıştır.

Raudkivi (1986)'nin oyulma derinliği eşitliğine ulaşılabilmesi için önerdiği zaman yaklaşık 50 saattir. Fakat bu hem zaman kaybına hem de deneyin ekonomiktikten çıkmasına sebebiyet vermektedir. Onun için maksimum ölçüm aralığı 2 saat

alınmıştır. Her ne kadar oyulma derinliği eşitliğine 2 saat içinde ulaşılmasa da , deneylerde görülen önemli bir sonuç oyulma derinliği artışının 2 saat geçtikten sonra azalmaya başlamasıdır. Zaten Melville ve Chiew (1999) deneylerinden gelen akım hızına bağlı olarak oyulma derinliğinin %50-%80 i gibi büyük aralığı zamanın %10'unda gerçekleşmektedir.

Akımın ters yönündeki ayak yönünde oyulma derinliği at nalı çevrintisi ve akım yönü tersi akıntı meydana geldiğinde oluşur. Simetrik düşey bir düzlemde, akım yönünde, akım hızı akım yönünün tersinde yay dalgaları üreterek azalır.

Nehir rejimindeki akım ve at nalı çevrintisinin gücü ile ayak uyum açısı olan β birbirleriyle ters orantılıdır. Sonuçta akım tersi yönünde oyulma derinliği azalır. Buna göre $d_s/b = f(d_o/b, F, \beta)$ prosedürünü göz önünde bulundurarak regresyon analizi hakkında;

$$\frac{d_s}{b} = \tau \left(\frac{d_o}{b} \right)^\psi (F)^\tau \quad (2.28)$$

Katlı regresyon analizi cinsinden düşünersek de;

$$Y = \tau + \Psi X_1 + \Psi X_2 \quad (2.29)$$

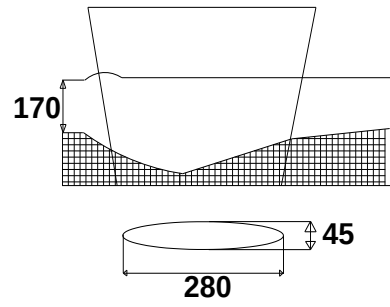
formül ve eşitlikleri yazılabilir. Burada;

$$Y = \ln\left(\frac{d_s}{b}\right) \quad (2.30)$$

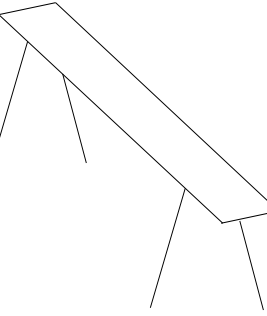
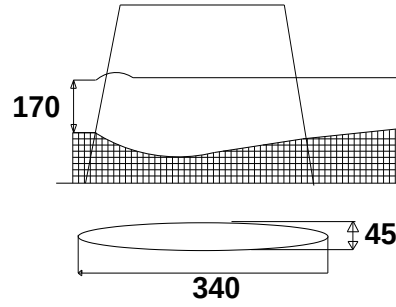
$$X_1 = \ln\left(\frac{d_o}{b}\right) \quad (2.31)$$

$$X_2 = \ln(Fr) \quad (2.32)$$

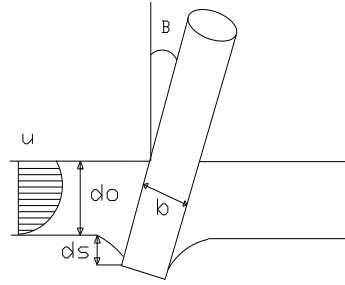
Şekil 2.14'de farklı kesitteki köprü ayaklarında oluşan oyulmalar karşılaştırılmıştır.



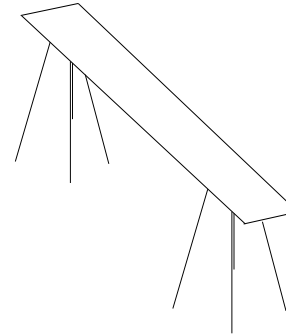
(a)



(c)



(b)



(d)

Şekil 2.14:(a)Farklı kesitli köprü ayaklarında oluşan oyulmalar. (b) Köprü ayağının zemine uyumu. (B =Uyum açısı) (c) İki adet uyumlu dairesel ayağa sahip köprü modeli. (d) Dört adet uyumlu dairesel ayağa sahip köprü modeli. (Breusers&Raudkivi 1991)

Farklı uyum açılarına göre de;

$$\frac{d_s}{b} = 14,182\left(\frac{d_o}{b}\right)^{0,154}(Fr)^{3,745} \quad (\beta=2 \text{ (r=0.972)}) \quad (2.33)$$

$$\frac{d_s}{b} = 3,769\left(\frac{d_o}{b}\right)^{0,223}(Fr)^{1,838} \quad (\beta=5 \text{ (r=0.992)}) \quad (2.34)$$

$$\frac{d_s}{b} = 5,743\left(\frac{d_o}{b}\right)^{0,189}(Fr)^{2,620} \quad (\beta=10 \text{ (r=0.988)}) \quad (2.35)$$

$$\frac{d_s}{b} = 7,544\left(\frac{d_o}{b}\right)^{0,163}(Fr)^{3,212} \quad (\beta=15 \text{ (r=0.994)}) \quad (2.36)$$

Burada r= katlı lineer regresyonlarda korelasyon katsayısıdır. Froude sayıları da 0.49 ve 0.55 alınmıştır.

Sonuç itibariyle;

-Oyulma çukuru büyüme oranı ilk başlarda çok büyük olmasına karşın sonradan zaman artışıyla asimptotik olarak azalmaktadır.

-Maksimum oyulma derinlikleri simetrik düzlemde akıma karşı olan ayak yüzeyinde elde edilmiştir.

-Ayak uyum açısı (β) ayak çevresindeki yerel oyulma derinliğini artırması engellenmiştir. Bu sistemin düşey ve incelen ayaklarda oyulma derinliği açısından avantajları mevcuttur. Mutlaka her köprü ayağının yapı ve boyutlarına göre mevcut bir uyum limiti vardır.

2.5. Zemine Dik Olmayan Köprü Ayaklarındaki Oyulmalar:

Elbette köprü ayaklarının her zaman düzgün yani oturduğu zemine dik olduğunun düşünülmesi araştırmaların eksik yapılmasına ve yetersiz veriler elde edilmesine sebep olabilmektedir. Bu sebeple zemin ile belli bir açı yapan eğri ayaklar arkasında da yerel oyulmanın incelenmiştir. Eğri köprü ayaklarında yerel oyulmaya etkiyen değerlerin boyutsal analizi eğrilik faktörlerinin genelleştirilmesine götürür, bu

faktörler özel ayak şekline göre α ve L/b ye bağlıdır. Ayak,akım,yerel oyulma derinliğine alüvyonlu yatak faktörlerinin göz önüne alarak d_{se} için Etterna ,Mostafa ve diğerleri (2000) (2.11) fonksiyonel önermesini bulmuşlardır;

$$\frac{d_{se}}{b} = f_1\left(\alpha, \frac{L}{b}, \text{Şekil}, Fr, \frac{Y}{b}, \frac{d}{b}, \sigma_s, \frac{\rho_s}{\rho}, \phi\right) \quad (2.37)$$

α = Yaklaşan akım yönünde ayak yön belirtmesi

L/b = Ayağın köşe uzunlukları

U = Gelen akım hızına göre derinlik ortalaması

g = Yerçekimi ivmesi

Y = Akım derinliği

d = Ortalama dane çapı.

ρ ve ρ_s = Su ve Yatak malzemesi yoğunluğu

Φ = Statik malzeme açısı.

Gelen akım ve ayak çevresindeki akım pürüzlüdür, suyun viskozluk etkisinin araştırılmasına gerek yoktur. Tüm bağımsız parametreler ayak çevresinde delinebilir alüvyonlu yatakta akım alanına etkir. Burada eğrilik faktörü olan K_a nın tanımlanması gerekir.

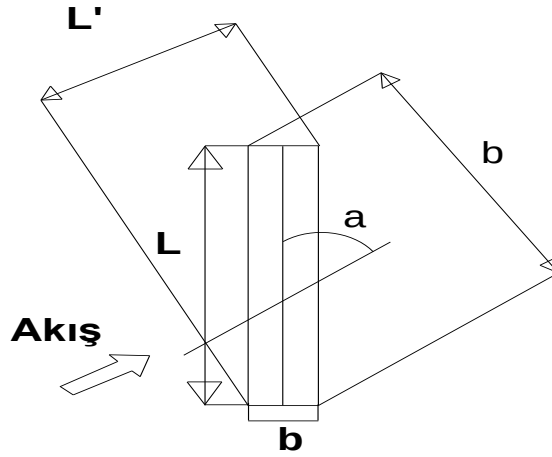
$$K_a = \frac{d_{se}(\alpha^\circ)}{d_{se}(0^\circ)} = f_2\left(\alpha, \frac{L}{b}, \text{Şekil}, Fr, \frac{Y}{b}, \frac{d}{b}, \sigma_s\right) \quad (2.38)$$

Görüldüğü gibi yoğunluklar ve statik statik malzeme açısı eğrilik faktörü üzerinde etkili değildir. Bu kavram en çok α , L/b kavramlarına bağlıdır. Federal araştırmalar merkezine göre K_a için şu ilişki yazılabilir.

$$K_a = \left(\frac{B}{b}\right)^{0.65} * B = L * \sin \alpha + b \cos \alpha \quad (2.39)$$

K_a = Dikdörtgensel köprü ayağının ön düzlemdeki kalınlığıdır.

Etterna, Mostafa ve diğerleri (2000) tarafından yapılan deneylerde dört tane ayrı dikdörtgenel ayak düzeneği hazırlanıp K_a nın $\alpha, L/b, Fr, Y/b$ ile ilişkilerini ayrı ayrı açıklanmıştır. Bir düzenekte, α ve L/b düzensizdir; ikincisinde Y/b düşürülmüştür.; üçüncüsü dairesel ayaklarda d_{se}/b 'nin $Fr, Y/b, d/b$ ile birlikte tüm izlerinin düzensizliklerinin incelenmesinin; dördüncü düzeneğe ise ayak uzunluğunun etkisini göz önüne almıştır. Dikdörtgenel ayak deneyleri, 25 m uzunluğunda 1.5 m genişliğinde ve 0.6 m derinliğinde üniform kum içeren bir yatak geri dönüşümlü bir deney düzeneğinde yapılmaktadır. İlk deney seti için $b=35$ mm akım derinliği 0.35 m ($Y/b=10$) ve ortalama düzlem merkezi hızı 0.34 m/s alınmıştır. İkinci deneyde ise akım derinliği 0.105 m ($Y/b=3$) ye ve $U=0.32$ m/s' yeye düşürülmüştür. Dairesel ayak deneyleri 3, 35, 90, 140 ve 200 mm lik çaplı silindirlerle yapılmışlardır. Şekil 2.15'te akımla bir α açısı yapan bir köprü ayağı görülmektedir.



Şekil 2.15: Tipik bir eğri köprü ayağı modeli.

Etterna ve diğerleri (2000)

Öteki iki deneyde ise daha geniş bir düzeneğe ve 315 ve 766 mm lik dairesel ayaklar kullanılmıştır. Bu deneylerde akım derinliği 0.10 m, ulaşan hız 0.33 m/s, parçacık büyüklüğü 0.85 mm alınmıştır. Ayak uzunluk etkisi deneylerinde, $b=100$ mm, $\alpha=0$ ve L/b 0.02 ile 10 arasında kullanılmıştır.

Deneylerin sonuçlarını tartışmadan önce, parametrelerin öneminin değerlendirilmesi faydalı olacaktır. Bu parametrelerle b, g, p gibi değerlerin tekrarlı değerler olarak

kullanılması gerekmektedir. Eğer tekrarlı parametreler Y, g, ρ ise $U/(gY)^{0.5}$ değeri $U/(gb)^{0.5}$ haline dönüşecektir. Eğer bunlar b, U_c (yatak yüzeyindeki kritik hız) ve ρ ise, U/U_c değeri $U/(gb)^{0.5}$ haline dönüşecektir. Y/b ve d/b parametreleri sırasıyla gelen akım derinliğinin ayak genişliğine bağlı uzunluk oranı ve yatak pürüzlülüğünün ayak genişliğine bağlı uzunluk oranıdır. Eğer yatakta parçacık büyüklüklerine göre bir dağılım gerçekleşirse; yani büyük parçacıklar toplanır, zırlanmaya sebep olur ve oyulma çukurunun sınır pürüzlülüğünü değiştirirse; d/b parçacık büyüklük dağıtımını parametre kullanarak nitelendirilebilecektir.

Oyulma eşitliklerinde öteki hız parametreleri $U/(gb)^{0.5}$ den daha sıklıkla kullanılmalarına rağmen, ayak yön belirtme etkileri $U/(gb)^{0.5}$ cinsinden ifade edilmektedir. Sabit ortalama gelen hıza göre ve ortamda durgun su basıncı da varsa; $U/(gb)^{0.5}$ durgun düzlem ve düzlemsel yataktaki silindir köşeleri arasındaki basınç sabitlerinin geniş silindirdekine göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Azaltılmış basınçta; sabitler silindir köşelerindeki hızları ve köşe ayırım ve uyanma çevrintileri tarafından azaltılır. Oyulma artık başlamıştır; oyulma çukuru değişir ve ayak çevresindeki akım daha karmaşık hal almaktadır. Oyulma çukuru ayak genişliği boyunca genişler; oyuk çukuru ölçütlerinin ayak genişliği ile ölçeklendirilebileceği söylenebilir. Ayak genişliği ve oyulma çukuru kurulumunun birleşik etkisi dengeli oyulma derinliği (d_{se}) ve ayak genişliği (b) arası ilişkiyi karmaşıktırmaktadır. Buna göre;

$$\frac{d_{se}}{Y} = 2,0 K_s K_a K_b \left(\frac{b}{Y}\right)^{0,65} \left(\frac{U^2}{gY}\right)^{0,215} \quad (2.40)$$

formülü yazılabilir

K_s =Ayak şekli faktörü

K_b =Yatak durumu faktörüdür .Bu formül;

$$\frac{d_{se}}{Y} = 2,0 K_s K_a K_b \left(\frac{gb}{U^2}\right)^{0,65} \left(\frac{U^2}{gY}\right)^{0,215} \quad (2.41)$$

haline çevrilebilir.

$U/(gb)^{0.5}$, Y/b ve d/b parametrelerin K_a üzerine etkisi b yi kapsayacak şekilde açıklanabilir. Bu açıklama dairesel bir ayakta oluşan oyulmadaki parametrelerin açıklanması şeklinde kolaylaştırılabilir; sonra eğri dikdörtgensel köprü ayağına uyarlanabilir. Bu etkiler genelde uzunluklar ve pürüzlülüğe bağlıdır. Buna göre b ayak çapı olan D ye eşit olmaktadır.

$U/(gb)^{0.5}$, Y/b ve d/b nin d_{se}/b ye etkisi d_{se}/b ile $U/(gb)^{0.5}$ yi karşılaştırıp U ve U/U_c yi sabit tutarak açıklanabilir. U sabit tutulduğunda d_{se}/b nin ayak genişliğine göre nasıl değiştiğini bize gösterir. Aynı zamanda Y/b ve d/b için akım derinliğine ve parçacık çapı hakkında gerekli sınırlamaları bize göstermektedir. Tabii buradaki veriler tamamen temiz su akımına göre konumlandırılmış olup, eğrilerin limitleri tam tasarlanamamıştır. Bu araştırmalar sonucu $d_{se} \propto b^{0.65}$ ilişkisi kurulabilir. Eğer $U/(gb)^{0.5}$ değerleri yeterince büyükse sabit bir U ya göre b değeri küçülür ve yatak daha pürüzlü bir hal alır. d_{se}/b değerleri düşer; çünkü ortada sınır pürüzlülüğü artışı ve oyulma çukurunda porozite kaynaklı daha büyük enerji oluşmaktadır. $d/b=1/3$ ve $b=3$ mm olduğunda belirgin bir oyulma gerçekleşmez. Gelen akımla karşı karşıya kalan dikdörtgensel bir köprü ayağında; d/B gibi büyük bir değer d_{se}/B gibi küçük bir değer doğmasına sebep olabilir. Ayak akıma doğru ne kadar eğriyse B değeri o oranda artar, oyulma engelleyici d/B etkisi azalır.

Düşerek azalan küçük $U/(gb)^{0.5}$ U ve Y sabit olduğu zaman b değeri büyür, ayak çapına göre akım daralır, d_{se}/b azalır. Gelen akım yönünde dikdörtgensel bir ayak olduğu zaman ($\alpha=0$, $B=b$) Y/b yeterince büyür ve d_{se}/b üzerine etkimez. Ama ayak akımın doğrultusuna ne kadar eğik olursa; B artar, akım Y/B etkisi artar. Etki ayak için K_a değerlerinin tanımlanmasıyla belirginleşir. L/b nin d_{se}/b üzerine etkisi sadece ayak genişliği kesitiyle sınırlı değildir. Ayırım sayısı ve yapısı ile birlikte ayak çevresindeki Yüzeysel çevrinti de L/b den etkilenir ve sonuçta d_{se}/D nin de bundan etkilendiği görülür. Bu değişiklikler yaklaşan akımda değişken bir köprü ayağı genişliği veya uzunluğu ile açıklanabilir.

Ayak genişliği artarsa, Yüzeysel çevrinti büyüklüğü artar ama çevrinti azalır. Yüzeysel çevrintinin azalması oyulma çukurundaki malzeme azalmasını engeller ve oyulma derinliğinin artmasını engeller. L/b nin $1/4$ ten küçük değerleri için d_{se}/b sınırlı bir değere kadar azalır. Bu trendler ayak çevresinde oluşan çevrintiye yansır.

L/b değeri çok fazla düşerse, b değeri sabit bir L değeri için çok büyür. Aynı zamanda köşe çevrintilerinin mevcudiyeti K_a yı etkileyen önemli faktörlerdendir.

Eğrilik faktörü olan K_a ayak oyulma eşitliklerinde kullanılan ayak tasarlanmasında oyulma derinliğinin etkisinin önemini bize gösterir. Bu etkiye α yani eğrilik açısı L/b ayak kenar oranı etkisi de eklenir. Bu parametreler ayak çevresindeki yerel akım alanını ve meydana gelen oyulma derinliğinin tanımlanmasında bize yardımcı olur.

2.6. Oyulmaların Evrimsel Süreci:

Köprü ayakları arkasında oluşan oyulmaların incelenmesinde oyulmanın ilerleme sürecinin araştırılması da oluşacak hata payının en aza indirgenmesi için son derece gereklidir. Dikdörtgensel kanallarda dairesel ayak ve dikdörtgensel ayak oyulmaları hakkındaki araştırmalar geçmişe göre belirgin ilerlemeler kaydedilmesine rağmen halen önemli bir sorundur. Bu çalışma benzerlik analizleri ve detaylı hidrolik araştırmalardan faydalanılarak yeni bir yöntem önermektedir. Yapılan deneyler üç üniform üç üniform olmayan malzemelerle yapılmıştır. Olivetto ve Hager (2002) araştırmalarını oyulma derinliğinin geçici evrimini gelen akım derinliğine ve gelen hıza göre düzenlemişlerdir. Malzeme ve su yoğunlukları oranı malzeme geometrisine göre 0.42 ile 1.65 arası değerler almıştır. Froude sayısının simetrik olmamasına dayanılarak granülometri etkileri tanımlanamamıştır. Bu deneyler yapılırken dane büyüklüğü 0.9 mm den büyük olan malzemelerde Froude benzerlik yasalarından da faydalanılmıştır. Deneylerde akım koşulları temiz su akımı oyulması rejiminde, hareketli yatak oyulması ve 20 mm dış makro pürüzlülük mevcuttur. Bu araştırmaların sonuçları deneysel hidrolik parametrelere bağlı olup düzgün mühendislik tasarımları için bize yardımcı olmaktadır.

Olivetto ve Hager (2002)'ın deneyleri iki dikdörtgensel kanalda yapılmış olup genişlikleri 0.5 m ve 1 m' dir. Kanalin verileri işte bu genişlik etkisine göre düzenlenmiştir. 1 m'lik kanal toplam 11 m uzunluğundadır ve 5 m'lik çalışma bölgesine sahiptir, sol tarafında cam duvar ve sağ tarafında pürüzsüz çelik bir duvar mevcuttur. Oyulma yerel olarak, malzeme yatay şekilde yerleşik, serbest yüzey akım boyunca ölçülmüş şekilde verilmektedir. Gelen akım derinliği $h_0 = (B-b)/2$ veya $(B-$

D)/2 ölçülerinde alınmıştır. D ve b sırasıyla daire kesitli köprü ayak çapı ve kare kesitli köprü ayağı genişliğidir. Oyulma kanalında akım konsantrasyonunu engelleyici 10 mm'lik geo-tekstil malzeme içeren akım düzenleyiciler bulunmaktadır. Bu malzemeler her ay ince daneli kille temizlenerek akım yönünün tersi yönünde oyulma kanalına doğru yüksek bir hidrolik sabit yaratılmaya çalışılmıştır. Tersisi durumunda küçük dalgalar oluşur ki bunlar yüzünden akım derinliği okumalarında beklenmeyen etkiler oluşabilir. Ek olarak malzeme yatağında suyun içeri giriş noktası ve akımın tamamen geliştiği bölge arasında azar azar artışlar görülebilir. Buna göre tüm deneyler düzgün yatak koşullarında ve yatak seviyesi d_{50} ortalama tanecik çapının %15 i olarak alınmıştır. Temiz su oyulma rejimi akım koşullarına göre oyulma çukuru yatak akım yönü deneyden haftalar sonra bile yatay kalabilmektedir.

Deneylerde altı farklı malzeme kullanılmıştır. Üniorm olanlar 0.55; 3.3 ve 4.8 mm lik boyutlardadır; üniorm olmayanlar ise $d_{50}=5.3$; 1.2 ve 3.1 mm olup karışık halde bulunmaktadır ve $\sigma=(d_{84}/d_{16})^{1/2}$ = sırasıyla 1.43; 1.80; 2.15 tir. $d_{50}=3.3$ olan üniorm malzemetin yoğunluğu 1.42 t/m^3 tür, bu arada ortamın yoğunluğu 2.65 t/m^3 tür. Plastik malzemeler silindirik halde oluşturulmuştur, kalanları ise nehirlerdeki tipik elips şeklindeki malzemedir. Ayaklara uygulanan testlerde yararlanılan veriler ortalama dane çapı d_{50} , standart sapma σ , alt yoğunluk $\rho'=(\rho_s-\rho)/\rho$, gün bazında test süresi t_d , eleman geometrisi D veya b (dikdörtgensel veya dairesel), ortalama ulaşan akım derinliği h_o , F_d parçacık yoğunluğuna göre froude sayısı, Fi Froude sayısı eşik değeri, gelen Reynolds sayısı $R_o=4h_oV_o/v$ V_o =akım yönü tersi hız, v =Kinematik viskozite olarak yazılabilir. Planda dikdörtgen kesitli ayaklar hep dikdörtgensel kullanılmış olup, genişlikler $b=0.05, 0.10, 0.20, 0.40$ ve 0.60 m 'dir. Kohli (1998) adlı bir araştırmacıya göre bu uzunluk etkilerinin önemi neredeyse hiç yoktur ve ihmal edilebilirler. Dairesel silindir ayakların yarıçapları sırasıyla $D=0.011, 0.022, 0.050, 0.064, 0.110, 0.257, 0.440$ ve 0.500 m dir. Tüm bu malzemeler fleksi camdan üretilmiş olup deney boyunca oyulma derinliği 1mm yi geçmeyecek şekilde ayarlanmıştır. Kanal kapalı ilmiikli bir su sistemine sahiptir ve akım yönü tersinde pompa mevcuttur ve kanalda $Q=0.130 \text{ m}^3/\text{s}$ lik maksimum debi mevcuttur. Dikdörtgen kesitli ayaklar için ise oyulma hep ters yönlü akıma karşı akım yönündeki köşe bölgesinden başlar ki burada kanal eksenıyla 70 derecelik açıyla ayakların iki yönünde de etkili bir hareketlenme gözlenmektedir. Ayakların kanal

ekseninde ve dikdörtgen kesitli ayakların kanal yönündeki duvarlarındaki oyulmalar geçici orijineğine göre daha geç başlar. Fakat yeterli uzunluktaki oyulma süresince, en yüksek oyulma derinliği eleman bölgesinden kanal duvarına veya ayak eksenine doğru ilerler. Bir t anında en yüksek oyulma derinliği z hem eleman bölgesinde hem de ayak ekseninde oluşabilir. Oyulma yüzeyi maksimum oyulma derinliği z gerçekleştiği zaman, maksimum yan ve akım yönü tersi oyulma genişlemeleri esnasında ölçülmüştür.

Buraya kadar halen daha yerel oyulma için başarılı modeller üretilmemiştir. Bunun sebebi yerel oyulma ile Akışkan akımındaki rijit madde direnci arasında ilişki kurulamamasından kaynaklanmaktadır. Buna göre oluşan direnç kuvveti Newton'a göre;

$$F = \frac{\rho A V_o^2}{2} \quad (2.42)$$

olarak yazılabilir. Burada;

ρ = Akışkan yoğunluğu

A= Yaklaşan akım yönüne paralel kesit alanı

V_o = Yaklaşan ortalama akım hızı.

Akışkan akımı içindeki malzemede oyulma oluşur çünkü hareket eden taneciklerdeki hidrodinamik kuvvetler diğer taneciklere göre daha azdır. Oyulma derinliği z ayak temeli genişliği b, ayak çapı D, akım yönünün tersindeki akım derinliği h_o gibi kavramlara bağlı olan kanal genişliğinin L_R nin bir referansı olarak zamana bağlı bir şekilde artar. Geometrik şekiller için ;

$$L_R = b^\alpha h_o^\beta \quad (\text{daireseel kesitli}) \quad (2.43)$$

$$L_R = D^\alpha h_o^\beta \quad (\text{dikdörtgensel kesitli}) \quad (2.44)$$

tanımlamaları yapılabilir. Burada $\alpha + \beta = 1$ eşitliği yapılabilir. Oyulma derinliği zamanla gelen hız V_o ya göre ve alan ilişkisine göre artar. Çift fazlı ağırlıksal akım için Froude sayısı;

$$F_d = \frac{V}{\sqrt{g' * d_{50}}} \quad (2.45)$$

$$g' = \frac{(\rho_s - \rho) * g}{\rho} \quad (2.46)$$

olarak tanımlanır. Burada F_d parçacık yoğunluğuna göre Froude sayısı, g' azaltılmış yerçekimi ivmesidir. Oyulma derinliği büyük ölçüde bu froude sayısına bağlıdır ki, bu da hem hidrolik hem de granulometriyi içerir. Referans hızı tanımlayacak olursak;

$$V_R = \sqrt{g' * d_{50}} \quad (2.47)$$

$$t_R = \frac{L_R}{V_R} \quad (2.48)$$

V_R değerinin referans zamanı olan t_R ile ilişkisi mevcuttur. Bu zaman ölçeği ise hem malzeme yoğunluğu hem de granulometriye bağlıdır. Boyutsuz oyulma süresi de buna göre;

$$T = \frac{t}{t_R} = \frac{\sqrt{g' * d_{50}}}{L_R} * t \quad (2.49)$$

oyulmanın kontrol süresidir. Sonuç olarak tüm verilerden ve geçmişte yapılan araştırmalara dayanarak boyutsuz oyulma derinliği;

$$Z = 0.068 * N * \sigma^{-1/2} F_d^{1.5} \log(T) \quad (F_d > F_{di}) \quad (2.50)$$

Burada F_{di} başlangıç Froude sayısıdır ve normal koşullarda hep F_d den küçüktür. N ise şekil faktörü olup dairesel ayaklar için 1, dikdörtgensel olanlar için 1.25 olarak alınır. Bu eşitlik;

-Hidrolik direnç analojisi

-Froude benzerliği

-Referans uzunluğu L_R ve referans hızı V_R gibi özelliklere bağlı olup N ve L_R nin ve F_d ve σ_s nin etkilerini ayırır.

Nehir rejiminde akıma sahip olan açık kanallarda, akımlar iki tane farklı etki tarafından biçimlendirilir, bunlar pürüzlülük ve çevrinti etkileridir. Sonraki oyulmalar ise gelen malzeme Reynolds sayısının etkisiyle oluşur ki $R_o^*=du^*/\nu$ sınır değeri olan 200'den küçük değerler almalıdır. Daha sonra akım değişken rejimdeyken pürüzlülük ve viskozite oyulma üzerine etkilidir. Kalkanlar bu niteliği sağlamak ve tüm girdiler malzeme taşınmasına ve uygun şartlar sağlanıncaya kadar iletilir. Her ne kadar oyulma için karmaşıklığından benzer etkiler görülmesine karşın söz edilemez. Kayma hızı tanımından ;

$$u = \sqrt{g * S * h_o} \quad (2.51)$$

formülünden hidrolik sabit S geniş bir nehirde üniform koşullarda Manning Strickler eşitliğinde de;

$$V = \frac{1}{n} * h^{\frac{2}{3}} * \sqrt{S} \quad (2.52)$$

ihmal edilebilir. Ama bunun için Strickler'e göre pürüzlülük katsayısı;

$$\frac{1}{n} = 6,75 * \sqrt{g} * \sqrt[6]{d_{50}} \quad (2.53)$$

olmalıdır. Bu arada çevrinti için en az önemli olan etkiler ise etki görmeyen akım derinliğindeki minimum dane çapı ve minimum kesin dane çapı olarak söylenebilir.

Deneyde yapılan bazı idealleştirmeler ise;

-Kanal kesiti dikdörtgensel ve düzgündür.

-Pürüzlülüğün dağıtımı her yerde üniformdur.

-Hem dikdörtgensel ayakta hemde silindirik olanda oyulma gerçekleşmiş, ayaklar hem kanal köşelerinde hem de kanal ekseninde bulunmaktadır.

-Akışkan sudur, fakat deneylerde benzer özellik gösteren başka sıvılar da kullanılabilir. Malzeme kum veya çakıl olup,farklı da olabilir, önemli olan akışkan yoğunluğu ile malzeme yoğunluğu arasında uyumdur.

-Gelen akım zamanla değişken olup ,hem akım derinliği hem de kesitteki ortalama akım hızı mevcut değişimlerde etkilidir.

-Ortalama malzeme büyüklüğü d_{50} akım derinliğinden h_o 5-10 kat küçüktür, aksi takdirde makropürüzlülük oluşur.

-Ortalama malzeme büyüklüğü d_{50} minimum büyüklük olan 0.8 mm den büyük olmak zorundadır.

. Başlangıç Froude sayısı F_i malzemede belirgin bir taşınma olmadığı takdirde 1.2 den küçüktür.

-Akım koşullarında daha başka yatak formları oluşmamıştır.

Sonuç itibariyle oyulma değişimi $z(t)$;

- $D^\alpha h_o^\beta$ ve $b^\alpha h_o^\beta$ ye (Burada $\alpha=2/3$ ve $\beta=1/3$)
- $F_d=\sigma^{-1/3} V_o/(g' d_{50})^{1/2}$ $\sigma=1$ (Üniform malzeme için)
- Benzerlik özelliklerine dayanarak geometrik ve malzeme karakteristiklerine bağlı bağıl zaman kavramlarına bağlı olarak değişmektedir.

2.7. Oyulmalarda Temel Geometrisinin Önemi:

Oyulmanın etkilendiği en büyük faktörde hiç kuşkusuz ayağın oturduğu temel ve zemindeki malzeme yapısıdır. Günümüzde köprü ayaklarında yerel oyulma ile ilgili mevcut veriler genelde sabit kesitli olan ayaklar üzerinde yapılan deneylerden elde edilmiştir. Bu tip ayaklara üniform ayak denir. Benzer olarak tüm oyulma derinliği eşitlikleri Melville ,Raudkivi ve diğerleri (1996)'nin araştırmalarında tekil ve seri ayak boyutunda ifade edilmiştir. Uygulamada köprü ayakları bir çok farklı geometri kullanarak yapılabilir ve bu ayakların bir çoğu üniform değildir. Örnek olarak bu tip ayaklar döşeme ayağı olarak kazıklı temellerde bulunur. Bu üniform olmama durumu yüzünden tasarımcının boyutlandırma yapması iyice zorlaşır. Kazıklı temeller için Federal Araştırmalar Merkezine (A.B.D) göre koruyucu analizin gerekli olduğu belirtilmektedir. Fakat temelin geometrisinin üniform olmamasının doğurduğu etkiler oyulma derinliğini açıklayan metotlar tarafından tanımlanmamış olması bunu

gereksiz kılabilmektedir. Ulaşılan nokta koruyuculuğun gerekli olmadığıdır. Örneğin yatak yolu altında kazıklı bir temelin koruyucu ve ayak genişliğine bağlı analizi ayağı yerel oyulma etkisine maruz bırakabilir. Bundan sonra yerel oyulma daha geniş olan temele etkiyebilir. Fakat bu apayrı etki genel oyulma, daralma oyulması, yerel oyulmanın toplam etkisini artırmaz. Bu koruyucu etkinin ulaşmak istediği nokta ise oyulma derinliğinin en büyük temel genişliğine göre incelenmesidir. Bütün oyulma derinliği eşitliklerinde şekil faktörü mevcuttur, K_s , K_s kare, dikdörtgen ve yuvarlak kesitli gibi farklı şekildeki ayaklarda farklı oyulma derinliklerinin kapsandığı bir çarpan faktörüdür. Pratikte, K_s nin değeri belirsizdir. Bir çok değer önerisine karşın, bu önerinin belirsiz olduğu ve çökmeler ve buz kırılmaları ile gölgelenebilmektedir. Yerel oyulma derinliği şekilden çok üniform ayak kalınlığıyla tanımlanabileceği görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği yatak malzemesinin hareketliliği sınırına göre temiz su oyulması olarak incelenebilir. Ayaklarda da ayağın büyüklüğü oyulma derinliğini etkileyen en önemli faktördür. Üniform olmayan ayaklarda ayak büyüklüğünün tespiti için bir metot gereklidir.

Melville ve diğerleri (1996) tarafından yapılan deneylerde veriler 0.44 m genişliğinde 0.38 m derinliğinde 11.8 m uzunluğunda laboratuvar düzeneğinde 0.25 m malzeme olan bir ortamdan elde edilmiştir. Oyulma derinlikleri D (ayak çapı), D^* (temel çapı), Y (Temel üstü çapı) gibi boyutları olan üniform olmayan silindirik ayaklardan elde edilmiştir. Y yatak seviyesinden ölçülmüş olup eğer temel üstü yatak seviyesinin altında ise pozitifdir. Sekiz seri deney yapılmış olup, tüm seriler için D ve D^* değerleri sabit tutularak Y değeri sürekli değiştirilmiştir. Tüm deneyler oyulma derinliği gelişmesi sıfıra ininceye kadar sürdürülmüş, oyulma derinliği dengesi sağlanmıştır. Bu yaklaşık 24 saat sürmüştür. Çoğu deneyler 0.8 mm çapında quartz kum kullanılmıştır. Ek olarak bazı deneyler 0.24 mm çaplı silika kum ile yapılmıştır. Bu şartlar oyulma derinliğinin verilen ayak çapına ve malzeme göre maksimum olmasını sağlamıştır. Tüm deneyler gerçekten $y=200$ mm gibi büyük bir oyulma derinliğinde yapılmıştır. Akım derinliğinin oyulmaya neredeyse hiç etkisi olmamıştır. Üniform bir silindirik ayakta $y/D \geq 3.5$ koşulunun geçerliliğini Melville ve diğerleri (1996) yaptıkları deneylerle bulmuşlardır. Bunun aynısı üniform olmayan köprü ayaklarına da yansıtılabilir. $y/D_a \geq 3.5$, D_a üniform olmayan ayak için dengeli ayak çapıdır.

Birçok deneyde yatak bölgesinde bir temel mevcuttur bu da daralma oyulmasının etkisini ihmal edebileceğimizi bize göstermektedir.

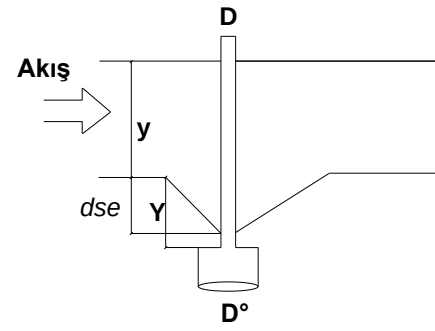
Oyulma derinliği eşitlikleri Y olarak gösterilmiş olup 60 deneye göre farklı Y değerleri bulunmuştur. Tüm farklı veri serilerinde, ilk değer sadece ayak olduğu zaman ki oyulma derinliğinin, son değer ise D^* çaplı üniform bir ayak değeri için parametreleri ifade etmektedir. Her iki durumda da oyulma derinliği ölçümleri yaklaşık olarak maksimuma yakındır. Gerekli olan şartlar $y/D \geq 3.5$, $V/V_c = 1.0$, $D/d_{50} \geq 50$, $\sigma_g \leq 1.2$, V gelen akım için ortalama hız, V malzeme hareketinin başlangıcı esnasında ortalama hız, d_{50} yatak malzeme büyüklüğünün ortalaması, σ_g parçacık büyüklüğü dağılımının geometrik standart sapmasıdır. A serisi haricindeki tüm serilerde oyulma derinlikleriyle ilgili eşitlik Y/D nin bir fonksiyonu olarak gösterilebilir. A serisi deneyleri aynı ayak geometrisi fakat farklı malzeme daneleriyle yapılmaktadır. A serisi analizden çıkarılmıştır, çünkü A ve B birbirine çok yakındır sadece malzeme kalınlığı farkı A değerlerinin B ye göre daha az çıkmasına sebep olacaktır. Deneylerdeki veriler D/D^* oranına göre anlaşılabilir. $d_s/D = 2.4$ teki yatay çizgiler üniform silindirik bir ayakta maksimum oyulma derinliğini göstermesi açısından önemlidir. $D/D^* < 1.0$ için Oyulma derinliği oranı D/D^* oranı kadar Y/D oranına da bağlıdır. Y/D , üniform olmayan ayaklarda oranı üç farklı temellerde oyulma tipinin tanımlanması açısından önemlidir. Şekil 2.3'teki tipler temellerin derinliklerinin oyulma derinliğine ne kadar bağlı olduğunu ve oyulmanın temel derinliğinden ne kadar etkilendiğini göstermektedir. 1.Tipde oyulma üniform silindirik ayak için temel etkisi olmaksızın oyulma etkisinin araştırır. Temel oyulma çukurunun altında olup, maksimum oyulma derinliği $d_s = 2.4D$ kadardır. İkinci tip yatak yüzeyi altında ve oyulma çukuru ile temel üzerindeki ayak geometrisini göstermektedir. Oyulma derinliği $2.4D$ den daha azdır. ve D/D^* oranına bağlıdır. Üniform ayak oyulmasıyla başlayarak, oyulma derinliği temel üst kısmına kadar azalır bu noktadan sonra üniform ayak oyulma çukuruna kadar artar ve olması gereken minimum D/D^* ve Y/D değerleri elde edilir. Eğer temel derinliği minimum oyulma derinliğine kadar artarsa D/D^* ye bağlı olarak güvenilir oyulma derinliği d_s/D tekrar artar. Artış oranı D/D^* nin küçük değerlerdeki yükselişine bağlıdır. $D/D^* \leq 0.50$ için oyulma derinliği Y/D oranı düşüşüyle büyük bir hızla artar. Burada şunu belirtmek gerekir temel üst seviyesine göre oyulma derinliği değerleri hassas bir şekilde değişmektedir. Farklı ayak temeli tipleri Şekil 2.16'da görülmektedir.

Bu durumda dar oyulma çukuru akım yönünde ayak temeline yerleşir, 3000 dakika içinde gelişerek sığ oyulma çukuru ayak çevresini sarar. 3000 dakikadan sonra akıma ters yönde de gelişen oyulma çukuru, köşelere de gelerek çok hızlı gelişip belli bir şekil alır. Bundan sonra da oyulma çukurunun gelişmesiyle ilgili bir veriye rastlanmamıştır. Aynı zamanda akım yönündeki oyulma Türbülansa göre de hassaslık gösterir. Yapılan deneylerde alanda daha küçük Reynolds sayılarına rastlanmış olup türbülans yoğunluğu ve ölçeği araştırılmamıştır. 3.Tipde ise temel mevcut yatak seviyesinin üzerinde bulunmaktadır, oyulma derinliği oranı temel seviyesi oranı arttıkça artar ve akım temelden çok küçük olan köprü ayağı tarafından kesilir. Oyulma genelde D büyüklüğündeki üniform bir ayağa göre daha derindir. D/D^* için çizilmiş tüm eğriler $d_s/D^* = 2.4$ değerine ulaşır, bu arada da Y akım derinliğine (y) ulaşır. Bu olaylar D^* ın büyük değerleri için akım derinliği etkisiyle oyulma derinliği düşmeleri görünse ve mevcut düzenek oranı da deneylerde kullanıldığı verilerde görünse de gerçekleşir. Bu tipdeki veri d_s/D^* cinsinden ifade edilebilir. Yapılan deneylerde oyulma derinliğinin temel üstü seviyesine kadar hızla geliştiği ve 4 saat süreyle bu derinlikte kaldığı görülmektedir. Bu periyotta oyulma derinliği alansal bazda bayağı genişlediği ve derinliğinin kısmen arttığı gözlenmektedir. Daha derin oyulma yolu köşelerde, temel köşelerinde çalışmaya devam etmekte ve iki sığ yiv açmakta, bu iki yiv sonunda merkez çizgisinde buluşmaktadır.

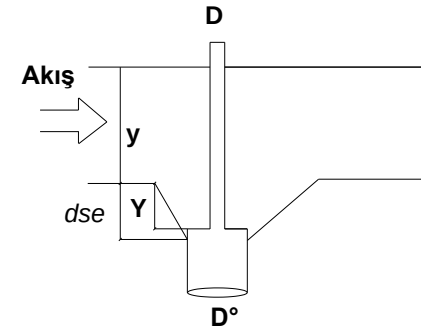
Oyulma çukuru derinliği atnalı çevrintisi tersi yönünde çevrinti oluşmaya başlayınca kadar büyümeye devam eder, at nalı çevrintisi kıyıdaki oyulmayı büyütüp derinleştirmeye devam eder. Aynı zamanda ileride oyulmayı devam ettirecek yeni çevrintiler yaratır. Bu deneylerde farklı şiddette oyulma derinliği oranları beklenmektedir, bunun sebebi önceki deneylerin sürelerinin daha az olmasıdır. Üniform olmayan temel tipleri Şekil 2.16'da gösterilmektedir.

Bu deneylerdeki veriler farklı eşitlikler türetmek için de kullanılmıştır. Bunlardan bazıları;

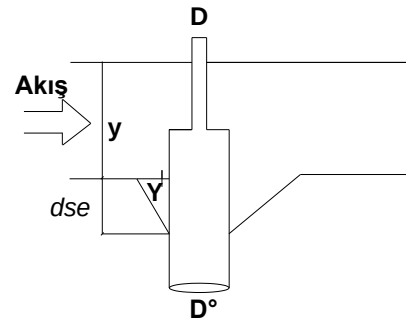
$$\frac{d_{s \min}}{D} = 2,4 * \left(\frac{D}{D^*} \right)^{0,4+0,5*\left(\frac{D}{D^*}\right)} \quad (2.54)$$



(a) 1.Tip ($Y > 2.4D$)
 $ds = 2.4D$



(b) 2.Tip ($0 < Y < 2.4D$)
 $ds < 2.4D$



(c) 3.Tip ($Y < 0$)
 $2.4D < ds < 2.4D°$

Şekil 2.16: Üniform olmayan temel tipleri. (Melville ve Raudkivi (1996))

$$\frac{Y_{\min}}{D} = 2,4 * \left(\frac{D}{D^*} \right)^{0,4+0,5*\left(\frac{D}{D^*}\right)} - 0,65 * \left(\frac{D}{D^*} \right)^4 \quad (2.55)$$

Burada $D/D^*=1$, Oyulma derinliği $d_s/D \rightarrow 2.4$.

$$D_e = D \left(\frac{(Y+y)}{(y+D^*)} \right) + D^* \left(\frac{(D^*-Y)}{(D^*+Y)} \right) \quad (2.56)$$

Burada D^* üniform olmayan ayakta etkili ayak çapı, $Y \leq D^*$, $-Y \leq y$ dir.

$$H_e = Z + \frac{m(y-Z)D}{D^*} \quad (2.57)$$

Burada H_e üniform D^* çaplı ayakta yatak seviyesi üzerinde etkili yükseklik. Z = Yatak seviyesi üzerinden zemin yüksekliği. m =Verilere bağlı sabit.

Tüm bu formül ve veriler silindirik ayaklara göreyse de bu sonuçlar tüm geometrik yapıdaki ayaklar için genelleştirilebilir. Çünkü oyulma derinliğindeki kesit şekli etkisinin önemi yoktur.

Üniform silindirik ayaklarda oyulma derinliği oranları (d_{se}/D) alt kısımdaki silindirin en yüksek seviyesi olan Y veya temel ve ayak çapları oranına (D/D^*) bağlıdır. 1.Tipde oyulma derinliği üniform bir ayakla aynıdır, temel seviye ve büyüklüğünden bağımsızdır. 2.Tipde oyulma derinliği üstteki üniform ayaktan daha küçüktür. 3.Tipe gelindiğinde ise oyulma üst üniform ayağa göre daha derindir. 2. ve 3. tiplerde oyulma derinliği oranı D/D^* ve Y/D ye bağlıdır. Oyulma derinliği malzeme hareketi için verisi derin su koşullarında malzeme hareketinin başlangıcı ve üniform malzeme içindir. Bu veri $d_s \leq 2.4D_s$ olduğu şartlarda üniform olmayan ayak için de uygulanması mümkündür.

2.8. Ölçek Etkisi:

Gevşek yataklardaki yerel oyulma üzerindeki ölçeğin doğal etkisi laboratuarlardaki akım deneylerinden de anlaşılacağı üzere daha derin oyulma çukurlarına sebep olması özellikle ayak genişliğine bağlıdır ve temiz su akımında oyulma tüm su akımlarına göre daha fazla olduğu laboratuvar ölçümlerinde görülmektedir. Ölçek etkisinin incelenmesi esnasında faydalanılabilecek ve açıklanması gerekli olan boyutsuz parametreler mevcuttur. Bunlar akım etkisi ve ayakla ilgili oyulma derinliği değerleridir.

Ölçek etkisi iyi bilinen bir modelle açıklanabilir, kohezyonsuz alüvyonlu geometrik malzeme ile ölçeklendirilebilir. Hidrolik modellerin kapasitesi ve küçük ayaklar için laboratuvar akım deneylerini belirli bir köprü ayağı yapısında karşılaştırmak, hızla ölçeklendirilebilecek nitelikte oyulma derinliği bilgisi oluşturulmasına engel teşkil etmektedir.

Alandaki alüvyonlu malzemeler karşılaştırıldığı zaman laboratuvar akım deneyleri ve hidrolik deneyler için aynı büyüklükte malzemenin kullanılmasını istemekte, veya biraz küçük olması istenmektedir. Ölçek etkisi, hidrolik modellerde köprü ayağındaki gibi benzer gereksinimler incelendiği zaman daha belirgin hale gelmektedir. Gereksinimleri karşılamak güçtür; deneylerin, üniform malzeme içeren bir yatakta daire kesitli bir köprü ayağı için temiz su akımının yarattığı yerel oyulmayı açıklamaya bile yetersiz olduğu görülmektedir. Çünkü deneylerden ortaya çıkan eşitlikler, ayak oyulması hesabı için gerekli parametrelerin hiç birini içermemektedir. Kohezyonsuz malzemelerde malzeme büyüklük sınırı mevcuttur çünkü alüvyonlu partiküllerin kohezyonlu davranışları için gerekli bir doğal bir genişlik vardır. Bu, siltler için 0.06 mm' dir. Bu sebeple laboratuvar deneylerinde oyulmanın tesbiti için kum yataklı nehir deneye yansıtılmalı ve aynı ölçülerde kum tanecikleri deneye dahil edilmelidir. Malzemelerin davranışı 0.1 mm' de daha iyidir. Normal şartlarda alan şartları daha düzensiz ve daha az üniformdur. Deneylerde ideal şartlarda çalışılmakta ve yatak malzemesi tamamen üniform dağılımlıdır. Yatak formlarını ölçeklendirme laboratuvarındaki yatak yerel oyulması deneylerinin karmaşık araştırmalarından uzaktır.

Ölçek etkisini algılamak ve çözümleyebilmek için bir ayaktaki hidrolik modellemedeki yerel oyulmanın incelenmesi gerekmektedir. Üniform akımlı kohezyonsuz bir yatakta dairesel kesitli bir köprü ayağı için oyulma derinliği akım, Akışkanlık, yatak malzemesi ve ayak ile ilgili parametrelere bağlıdır. Buna göre;

$$d_{se} = f(\rho, \mu, U, Y, g, d, U_c, D) \quad (2.58)$$

d_{se} : Oyulma Derinliği

ρ : Akışkan yoğunluğu

μ : Akışkan Dinamik Viskozitesi

U : Yaklaşan akımın ortalama hızı

Y : Akım derinliği

g : Yerçekimi ivmesi

d : Partikül çapı

U_c : Yatak yüzeyindeki partikül hareketine bağlı olarak U hızının kritik değeri

D : Ayak çapı.

Oyulma, üç temel büyüklükle açıklanabileceği için 8 tane mevcut büyüklük azaltılabilir ve boyutsuz hale getirilebilir.

$$\frac{d_{se}}{D} = \varphi\left(\frac{U}{U_c}, Fr, \frac{Y}{D}, \frac{D}{d}, Re\right) \quad (2.59)$$

Örnek olarak bu boyutsuz elemanlardan biri olan (U^2/gY) Froude sayısının karesidir. Bu büyüklükler farklı şekillerde de boyutsuz hale getirilebilir. Örneğin Froude sayısının değişik bir versiyonu olan bu formül $U/(gY)^{0.5}$ nehir ve sel rejimlerindeki akımlarda oluşan oyulma derinliğinin araştırılmasında çok işe yaramaktadır. En büyük d_{se} değerleri U/U_c değeri 1'e eşit veya alüvyonlu kanal akımındaki biçim değiştirmiş düz yatak değişim değerine eşit olmalıdır. Bağlı düzensizlik ve oyulma çukurunun sınır porozitesi arası D/d ifadesiyle ilişkilendirilebilir. Akım derinliği ve ayak çapı Y/D formülüyle ilişkilendirilebilir, bu ilişkilendirmeler oyulma çukuruna gelen nehir rejimindeki akımın hareketleri , ayağın tabanındaki atnalı çevrintisi, ayağın üst kısmının yanındaki yerdeğiştirme engelleyici su yüzeyi rollerin açıklanması hakkında faydalı olmaktadır. Y/D nin küçük değerleri için yüzey

çevrintileri harekete geçer ve oyulma çukuruna gelen nehir rejimindeki akımı zayıflatır. Reynolds sayısı olan, VD/v ise eğer akım türbülanslı ise genelde belirleyici bir parametredir. Etterna, Melville ve diğerleri (1998)'nin deney düzeneğinde oyulma derinliğinin verisini alandaki duruma göre ölçeklendirme parametreleri arası benzerlik gerektirir ki prototip bir ayakta hızlı bir yerel oyulma simülasyonuna olanak sağlanabilir, bu da U/U_c , U^2/gY , Y/D bağıntılarının sabitliği ile gerçekleşebilir. Buradan iki tip dinamik benzerlik kriterinin olduğu görülür, birisi partikül hareketi benzerliği (U/U_c) diğeri ise Froude sayısı benzerliğidir. Yapılan araştırmalar sonucu U/U_c , U^2/gY ve Y/D parametrelerinin deneysel ve alansal sonuçları arası hiçbir ilişkinin olmadığı görülmüştür. Bunun sebebi deneylerdeki karşılaştırılmalı büyüklükteki partiküllerin zorla prototipe uydurulmuş olmasıdır. Düzenekte büyük U değerleri kullanmak Froude sayısı simülasyonu, partiküllerin hareketinin düzenini algılamak U^2/gY değerlerinde büyümeye sebep olur. Bu da laboratuvar değerlerinin, gerçek değerinden daha büyük d_{se}/D değerleri oluşturmaya sebep olur.

Daire kesitli köprü ayağında oluşan çevrintiler ve farklı çaptaki ayaklarda oyulma değişimi Şekil 2.17'de görülmektedir. Ölçek etkisi nehirlerdeki köprü ayaklarının oyulma derinliklerinin tasarımıyla ilgili bir çok kavram oluşturur, çünkü tasarım eşitlikleri baskın olarak laboratuvar deneylerine bağlı olarak çıkarılmıştır. Prensipteki kavramlar laboratuvar ölçümlerine bağlı olup, oyulma derinliğini tam olarak temsil edememektedir. Çünkü, önceki verilen parametrelerin oyulma derinliğine etkisi hakkında bir fikir vermemektedir. Oyulma derinliğinin tasarım aşamasında köprülerdeki ayak çapları üzerinde durulmasına gerek olmamaktadır. Sadece koruyucu derinlik araştırması yeterlidir. Genel olarak bazı tasarım aşamaları;

- Ayak oyulma eşitliği kullanarak üst sınır araştırması yapmak.
- Ayak oyulma eşitliklerinden en uygun olanı kullanmaya devam etmek
- Eşitlikleri ayıklamak.
- Oyulma derinliği alan ölçümlerinde ona bağlı ampirik eşitlik kullanmak.

İlk iki aşama ayak oyulma eşitlikleri ve bağlı olan verilerin kullanımının devamıdır. Üçüncü aşamanın gelişimini geniş kesitli ayaklarda gerçekleştirilmesi gerekir ve bu aşama aktif alan araştırmasını ifade eder. Dördüncü aşama ile gelen risk, eşitliğin

yerleştirilmesinde d_{se}/D ifadesinin etkisinin göz önüne alınmasındaki zorluk göze çarpar. En basit ve en pratik uygulama kuşkusuz üst sınır araştırmasıdır. Laboratuvar verisi maksimum d_{se}/D değerlerine göre oluşturulmuştur. (Dairesel ayak yaklaşık 0.1 m çapındayken, $d_{se}/D=2.4$). İkinci aşama, yani ayak oyulma eşitliklerinden en uygun olanını kullanmaya devam etmektir. Bu bizi oyulma derinliğine karşı koruyuculuğun incelenmesi hakkında önceki aşamaya göre daha fazla bilgilendirir.

Üçüncü aşama daha az koruyucu ve daha ivmeli bir oyulma derinliği için kullanılabilir. Bunun için Melville ve Sutherland (1989) bir eşitlik geliştirmişlerdir.

$$\frac{d_{se}}{D} = K_l * K_Y * K_d \quad (2.60)$$

K_l , K_Y , K_d eğrilere bağlı eşitliklerdir ve U/U_c , Y/D ve D/d nin etkilerini bize gösterir. CSU nin de geliştirdiği eşitlik ise;

$$\frac{d_{se}}{Y} = K_3 * \left(\frac{Y}{D}\right)^{-0,65} * (Fr^2)^{0,215} \quad (2.61)$$

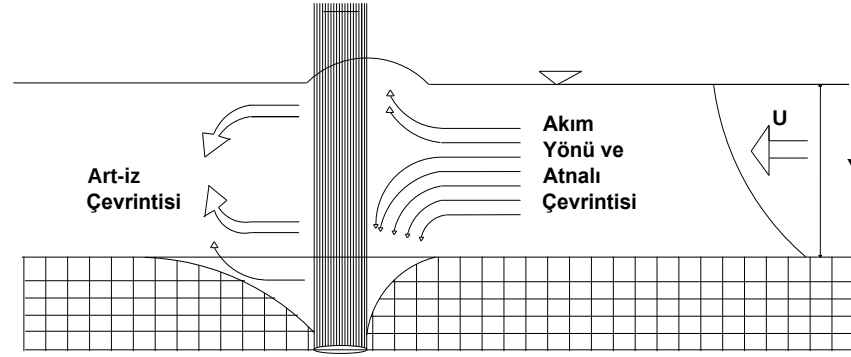
Burada K_3 yatak hareketleriyle ilgili bir bir faktördür ve 1.1 ile 1.3 arasında değişmektedir. Fakat bu eşitlikte D/d etkisi eksiktir.

Froehlich (1988) denklemi ise;

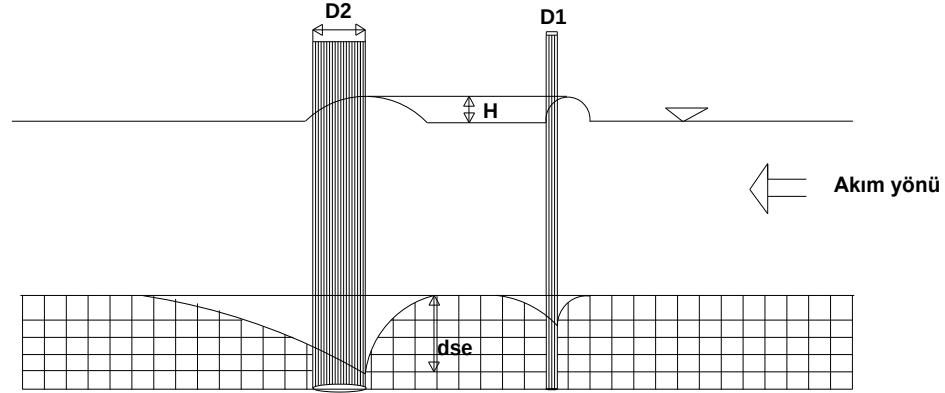
$$\frac{d_{se}}{D} = \left(\frac{Y}{D}\right)^{0,62} * Fr^{0,2} * \left(\frac{D}{d}\right)^{0,08} \quad (2.62)$$

Bu parametre de U/U_c nin etkisini ihmal etmiştir, bu da genel parametrelere bakıldığı zaman eksik olarak düşünülebilecek bir denklemdir. Parametrelerin bir etkili trend analizi oyulma alan verisinden zor belirlenmesinin sebebi kanal ve akım ortamlarından kontrollü olmamasıdır.

Şekil 2.17’de Dairesel köprü ayağı oyulmalarının temel nitelikleri gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.17:(a)Dairesel kesitli köprü ayağındaki akım ve yerel oyulmanın temel nitelikleri. (b) İki farklı çapa sahip köprü ayağında akım alanının aynı akımda değişimi. (Etterna,Melville ve diğerleri (1998))

Laboratuarda yapılan ayak oyulma deneylerinde ölçek etkisi ve yeterli alan verisi toplanması gerekliliği, köprü ayağında daha detaylı araştırmalar yapılabilmesi için kapsamlandırılabilir. Çünkü deney düzeneğinin tipik ölçüleri kohezyonsuz malzeme büyüklüğü için en alt seviyededir, bu sebeple nehir ve düzenek için benzer koşullar sağlanamamaktadır. Bu zorluk laboratuvar düzeneklerinin kullanılmasını sınırlandırarak büyük ölçekli ayaklarda yeterli araştırmalar yapılmasına da engeldir. Ayak oyulma deneylerinde, yerel oyulmaların laboratuvar ölçümleri bu sebeple nehirdekine göre büyük çıkmaktadır. Ölçek etkisinin laboratuvar düzeneklerindeki deneylerdeki karmaşık etkileri artık araştırmacıları bilgisayar destekli Akışkanlar dinamiği kullanmaya itmiştir. Bu yöntem özellikle Y/D ve Fr^2 olmak üzere bir çok karmaşık ölçeklendirme sorununu çözmede ön ayak olmuştur.

2.9. Kusur Ağacı Analizi:

Köprü ayakları arkasındaki oyulmaların incelenmesi sadece ampirik koşullarda değil işletme analizi koşullarında da kendini göstermiştir. Kusur ağacı analizi beklenmeyen olaylar için geliştirilen sistematik bir metottur. Kusur ağacı analizi, bir sistemin hata olasılığını hesaplamak, tasarım alternatiflerini karşılaştırmak, olma olasılığı en yüksek olan kritik olayları irdelemek için, kritik olayın hatası olasılığının hassaslığını bulmak ve temel olaylarla ilişkilendirmek amacıyla kullanılır. Köprü oyulmaları karmaşık olaylardır. Oyulmalar ve kanal düzensizliği olayları; daire ve dikdörtgen kesitli ayaklarda yerel oyulmalar, genel oyulmalar, kanal yatağı alçalması, kanal genişlemesi, malzeme sürüklenmesi gibi olayları içermektedir. Bu, tüm kavramların toplamı ve birbiriyle olan ilişkileri matematiksel modelleme yoluna götüren son derece karmaşık olgular dizisi oluşturur. Yerel oyulma, genel oyulma, kanal yatağı alçalması, kanal genişlemesi ve malzeme taşınması kavramları arası ilişkiler bilinmemektedir. Richardson ve Davis (1995) 'in araştırmalarında yerel oyulma , genel oyulma, kanal yatağı alçalması olayları birbirinden tamamıyla bağımsızdır. Bu bilgiye dayanılarak köprü çevresindeki toplam düşey erozyon basitçe toplam oyulma ve yatak alçalmasının toplamıdır. Başka bir yapısal kaynak olmadığından bu model önemli bir araştırma kaynağıdır. Kanal düzensizliğini ise kanal daralması ve oyulmadan ayrı olarak açıklamak gereklidir ve etkisini köprünün temellerinde incelemek deneyimlere göre daha doğru olmaktadır. Oyulma ve kanal

düzensizliği arası ilişki birbirinden bağımsızdır, fakat birbiriyle ilişkisi sonucu köprüye gelen etkiler önemlidir.Şekil 2.4'te basit bir kusur ağacı modeli gösterilmektedir.

İşte bunların arasındaki ilişkiyi, bunların köprü ayaklarına ve temellerine olan etkisini araştırmanın bir yolu da kusur ağacı analizi ile yapılabilir. Bu analiz iki ölçütlü de olabilir, olay önemine dayalı olanlar; beklenmeyen olayların sıklığına dayalı olanlar olarak ikiye ayrılabilir. Yani önem ve sıklığa bağlı olaylar için tanımlanmış şekilleri vardır. Köprü oyulmasını kanal yolundaki dairesel veya dikdörtgen kesitli ayaklardaki yatak malzemesinde oluşan erozyon olarak tanımlamak mümkündür. Oyulma üç şekilde sınıflandırılabilir. İlki olan yerel oyulma, dairesel veya dikdörtgen kesitli ayaklarda meydana gelir ve oluşma sebebi akımın engellenmesidir. İkincisi, daralma oyulmasıdır köprü açıklığının altında ve yakınında meydana gelir. Kanalin akım seviyesinde düşmesine sebep olur. Üçüncüsü olan kanal daralması, köprü olsa da olmasa da gerçekleşen bir olaydır. Oyulma ve daralma bağımsız iki olaydır; böylece toplam oyulmanın bu üçünün toplamı olduğu görülmektedir. HEC-18 tarafından verilen ayak oyulma eşitliği;

$$y_s = 2,0 * K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * y * \left(\frac{b}{y} \right)^{0,65} Fr^{0,43} \quad (2.63)$$

y_s =Ayak oyulması

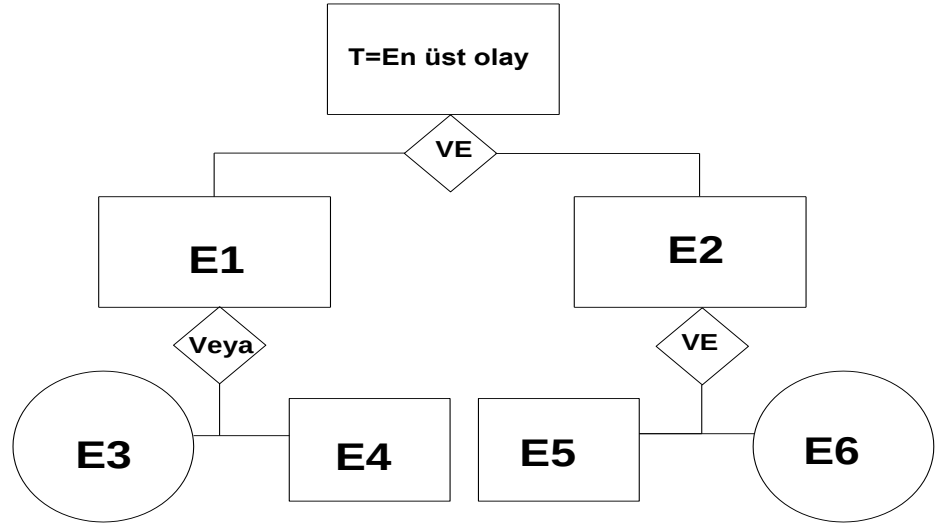
K_{1-4} =Şekil, Yatak formu, malzeme çekilmesi, akım yapısı için düzeltme faktörü

b = Ayak genişliği

y = Akım derinliği

Fr =Froude sayısı

Çoğu durumda, belirsizlikler modelin yapısından ve K parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Modelin belirsizlik sonuçları fiziksel olaylarda tamamıyla bizi yönlendiremeyebilir. Ayak oyulması durumunda, küçük ölçekli bir deney modeli oluşturularak sonuçlar prototip ölçeğine göre konumlandırılır. Basit kusur ağacı Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Basit kusur ağacı. (Johnson (1999))

Alandaki karışıklıklar laboratuardaki modelde çoğu zaman oluşturulmaz ve ölçeğin prototiptekine uygunluğu çoğu zaman bu karışıklıklar sebebiyle bilinemez. K faktörlerinin bulunduğu tablo ve figürler daha da belirsiz olup, bir mühendis değerleri çok titiz bir şekilde değerlendirmelidir. HEC-18 denklemlerinde bir sürü ayak temeli oyulma eşitliği mevcuttur. İster arazide olsun ister laboratuarda modelin hem matematiksel hem fiziksel sonuçlarının açıklamasının yapılamaması bizi belirsizliği araştırmaya itmektedir. Dikdörtgen kesitli ayaklar için oyulma eşitlikleri çok büyük değerlerde oyulmalar meydana getirir.

$$y_s = \frac{4 * y * K_{a2} * Fr^{0,33} * K_{a1}}{0,55} \quad (2.64)$$

HEC-18 formülüdür. Burada;

K_{a1} = Ayak temeli şekil sabiti

K_{a2} = Ayak temeli eğrilik sabiti.

Bu iki değer HEC-18 tablo değerlerinden şekle bağlı olarak ve ana kanaldaki ayak temeli açısına göre değerlendirilebilir. Bir yatakta daralma oyulması, kanal kesitinde

daralma olduğu zaman oluşur ki, buna göre bir Laursen ve Toch (1956) eşitliği mevcuttur.

$$y_s = y_1 * \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1} - y_1 \quad (2.65)$$

y=Ana kanaldaki ortalama derinlik

Q=Akım yüzdesi

W=Kanal dibinin genişliği

k₁=Yatak maddesi ve taşınmasına bağlı eksponansiyel değer.

1= Kanal üst yolu

2=Çekilmiş bölge.

y_o=Oyulma öncesi çekilmiş bölge mevcut derinliği

Yatak alçalması araştırması yapılabilmesi için ya bir matematiksel model ya da yıllar boyunca yatak değişimi trendleri hakkında verilere ihtiyaç vardır. En çok alüvyonlu kanallarda uzun süreli bir alçalma görölmektedir; fakat mühendisler bu araştırmayı yaparken köprünün ömrünü de gözönüne almak zorundadır. Bu uzun süreli alçalma olayları şehirleşme ve düzleştirme gibi insan aktiviteleriyle hızlandırılabilir. Bu olay kanalın düzensizleşip ve oyulmasına sebep olmaktadır. Bu durumda yatak seviyesine bağlı ilerleme eşitliği kullanılmalıdır. Ek olarak köprünün temelleri de kanal genişlemesi ve madde taşınmasından olumsuz etkilenebilir. Kanal genişlemesi ile başa çıkmak her zaman kanal çekilmesinden güç olmaktadır. Kanal genişlemesi hakkında bir sürü matematiksel model bulunmasına rağmen henüz alanda yeterince denenmemiştir. Kusur ağacı karmaşık bir sistemde oluşan hataları ve ilişkilerini algılamak için kurulmuş sistematik bir metottur. Kusur ağacı hem hataya sebep olan yolların anlaşılmasında ve hem de kritik olayların tespit edilmesinde kullanılabilir. Hata ağaçları aynı zamanda bir sistemin hata olasılığını hesaplamak, tasarım alternatiflerini karşılaştırmak, olma olasılığı en yüksek olan kritik olayları irdelemek için; kritik olayın hatası olasılığının hassaslığını ve temel olaylarla ilişkilendirilmesinde kullanılır.

Basit bir kusur ağacında dört tip olaydan söz edebiliriz. En üst olay olan T sistem hatası gibi beklenmeyen bir olaydır. E_3 ve E_6 olarak gösterilen temel olaylar, öteki olaylarla kesinlikle çürütülemez. E_5 ile gösterilen ikincil olaylar bazı durumlar hariç temel olay olarak nitelendirilebilir ve çürütülmesi çok zordur. E_4 ile gösterilen olay ise anahtar olaydır. Anahtar olayın oluşması sistemin yapısına göre değişiklik gösterir. Bu olaylar bir çok yolla birleştirilebilir, genelde kesişim ve birleşim halindedir. Şekil 2.19'da Köprülerde oyulma ve kanal düzensizliği için ana kusur ağacı görülmektedir.

Kusur ağacı analizinde bir sürü kısıtlama vardır. Çok karmaşık sistemlerde çok büyük hata ağaçları gerektirir, bu sebeple hata modları kaçırılabilir. Bu durumda en üst olayın ve diğer olayların olasılığı tutucu olmayan bir hal alır. Bir başka sıkıntı ise olaylar hakkında sadece iki olasılıkla karşı karşıya kalınmasıdır. Modları değiştirmek fayda etmeyebilir Kusur ağacı analizi çıkan ürüne bağlı olarak hem önemine hem büyüklüğüne göre sınıflandırılabilir. Kesik setler öneme göre oluşan olaylardır.

Büyüklüğe bağlı olaylar ise en üst olay alt olaylara ve temel hatalara bağlıdır ve bunlar arasında ve/veya bağlantıları gibi matematiksel bir mantık ilişkisi mevcuttur.

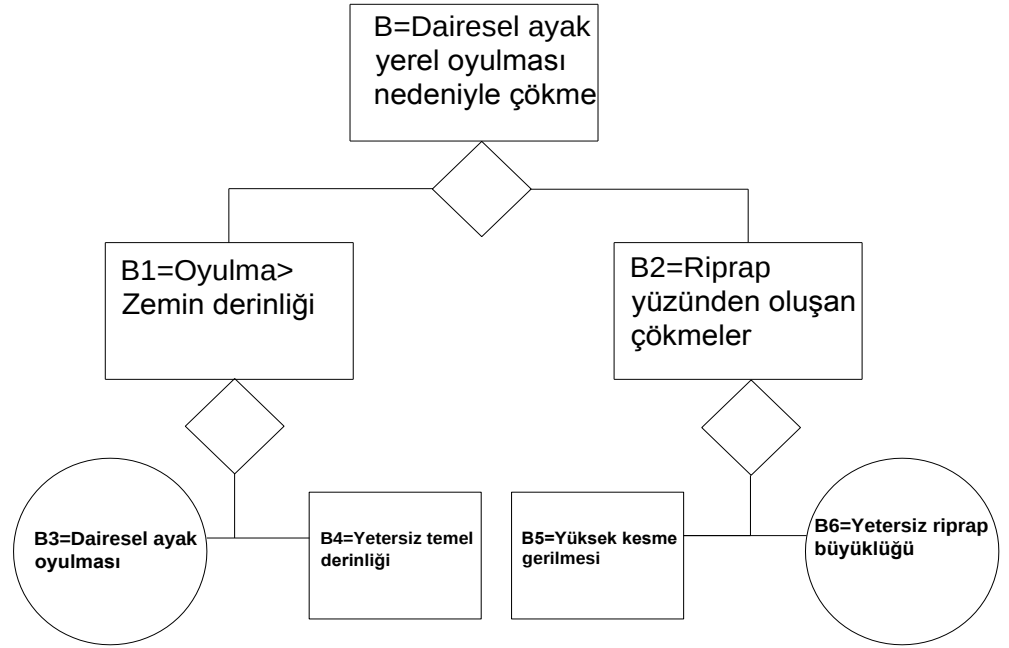
Örneğin temel kusur ağacında;

$$p(T) = p(E_1 \cap E_2) = p(E_1)p(E_2|E_1) \quad (2.66)$$

en genel şekilde. Eğer bağımsızlarsa;

$$p(T) = p(E_1)p(E_2) \quad (2.67)$$

Veya bağıntısı olduğu zaman;



Şekil 2.19: Köprülerde oyulma ve kanal düzensizliği için ana kusur ağacı. (Johnson (1999))

$$p(T)=p(E_1 \cup E_2)=p(E_1)+p(E_2)-p(E_1 \cap E_2) \quad (2.68)$$

E_1 ve E_2 birbirine bağlı ise;

$$p(T)=p(E_1)+p(E_2)-p(E_1)p(E_2|E_1) \quad (2.69)$$

Eğer bağımsız iseler;

$$p(T)=p(E_1)+p(E_2)-p(E_1)p(E_2) \quad (2.70)$$

mantıksal ilişkileri yazılabilir.

Eğer $p(E_1 \cap E_2)$ terimi çok küçük olursa; sonuçta belirgin bir değişiklik olmamasına karşın tutucu bir $p(T)$ incelemesi oluşur. Eğer kusur ağacında tüm olaylar birbirinden bağımsız ise, hesaplamalar düzgün çıkar. Eğer bazıları bağlıysa, o zaman olayların olma olasılıklarının gözönüne alınması gerekir. Bilgi eksikliğinin yetersiz olduğu bir çok olayla sıklıkla karşılaşılır. O zaman analiz yapan kişi, en üst olasılığın en üst ve

en alt sınırına göre olasılıkları sınırlarını araştırması gereklidir. Örneğin böyle bir durumda $p(T)$ sınırları;

$$p(E_1)+p(E_2)-\min[p(E_1),p(E_2)]<p(T)<p(E_1)+p(E_2)-p(E_1)p(E_2) \quad (2.71)$$

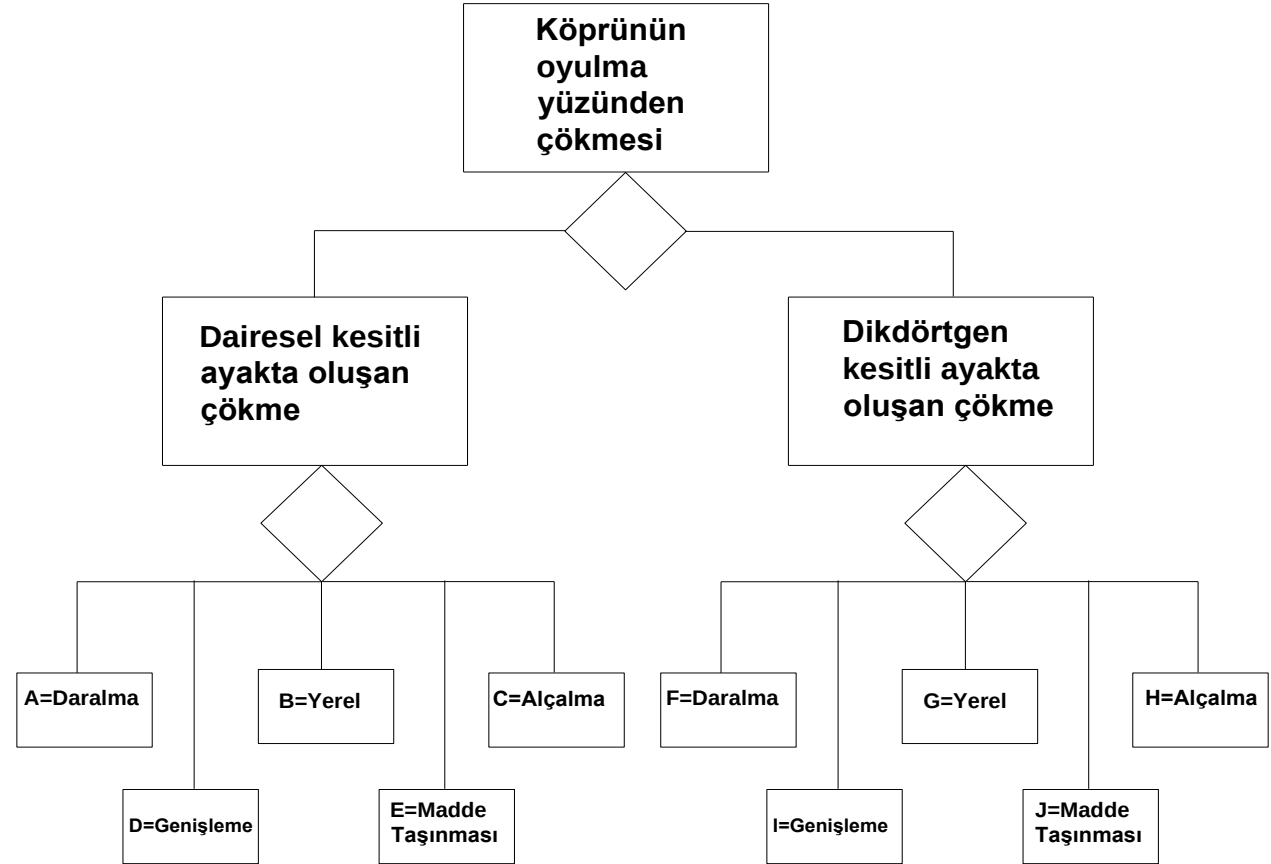
olarak gösterilebilir.

Köprülerdeki oyulma genel olarak kanal daralması, daralma oyulması ve yerel oyulma olarak sınıflandırılabilir. Ek olarak köprünün temelleri kanal genişlemesi ve madde taşınması gibi olaylardan belirgin şekilde etkilenir. Buna göre bir kusur ağacı analizi yapılacak olursa; en üst olay olarak kanal düzensizliği ve oyulma sonucu köprünün çökmesi olarak düşünülebilir. Bu çalışmada çökme, oyulma derinliğinin ayak dibine ulaştığı bir nokta olarak tanımlanabilir. Bazı durumlarda köprüler açıkta kalmış ayaklarla düzenli bir şekilde tasarlanabilir. Bir köprü ayakların veya temellerin veya her ikisinden de kaynaklanan hatalardan çökebilir. Burada temeller ve ayakların çökmeleri birbiriyle bağlantılıdır. Dikdörtgen kesitli ayaklarda oluşan çökmeler kanal genişlemesi, malzeme hareketi, yerel oyulma, daralma oyulması ve kanal çekilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayaklardaki çökmeler de bu olayların değişik kombinasyonlarının bir araya gelmesinden oluşur. Bu da bu beş olayın birbirine bağlı olduğunu gösterir. Bu olaylar bazı durumlarda ortadan kaldırılabilir.

Riprap olayı dikdörtgen kesitli ayaklarda onları yerel oyulmadan korumak için oluşur. Eğer riprap oluşması büyük bir hidrolojik olayla engellenirse ayak temeli oyulma tehlikesiyle yüz yüze kalır. Şekil 2.19'a göre köprü ayak temelinde, riprap engellenir (B_2) ve zemin oyulması (B_1) oluşursa çökme meydana gelir. B_1 ve B_2 nin buradan ve bağıntısıyla bağlı olduğu görülür. Ripraptan çöküş aşamasına geçerken mutlaka riprap kaynaklı aşırı bir kayma kuvveti oluşur. B_5 (aşırı kayma kuvveti) ve B_6 (kritik kayma kuvveti) da birbirine bağlı olup bu olaylar ripraptan çöküş aşamasına geçerken mutlaka gerçekleşir. Eğer oyulmaya sebep olan aşırı bir hidrolojik olay (B_3) varsa ve temel derinliği uygunsuz bir şekilde sığsa (B_4) derin ayak temeli oyulması oluşur. B_3 ve B_4 yine birbirine bağlıdır. Kusur ağacında temel olayların olma olasılığı üst olayın olma olasılığını tespit etmek için gereklidir. HEC-18 ve öteki jeomorfolojik ilişkilerde oyulma eşitliklerinin simülasyonu, bu olasılıkları çözmek için kullanılabilir. Simülasyon, değerler sabiti ile bu sabitlerin eşitlikte dağılımını içeren bilgiler gerektirir. Bu bilgiler bazen bilinmeyebilir. Mesela dağılım simetrik veya asimetrik olabilir; varyasyon sabiti bunlara göre farklı değerler

alır.Şekil 2.20’de Dairesel kesitli ayaklardaki yerel oyulma için kusur ağacı gösterilmektedir. Kusur ağacı analizini bu karmaşık olaylarda kullanmanın avantajları;

- 1) Üst üste gelen olaylarda çok fazla bir bilgi kapasitesine ihtiyaç yoktur.
- 2) Analizler, hata olasılığını veya bireysel olaylarda hata olasılıkları döngüsünü sağlar.
- 3) En üst olayın $[p(T)]$ olasılığı, olasılık dağılımlarının seçiminden etkilense de tam bir $p(T)$ değerine ihtiyaç yoktur fakat bizi yönlendirecek bir olaya ihtiyaç duyulur. Bu sebeple seçim her ne kadar dikkatli yapılmışsa da; sonuç itibariyle doğru dağılımın kritik olmadığı tespit edilmektedir. Tüm oluşan olaylara varyasyon sabiti atanması $p(T)$ değeri seçiminde bizi doğruya kanalize eden bir etki olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 2.20:Dairesel kesitli ayaklardaki yerel oyulma için kusur ağacı.(Johnson (1999))

2.10. Zırhlama ile Köprü Ayakları Arkasında Oyulmanın Sınırlandırılması:

Zırhlama yöntemi de oyulmaların engellenmesinde önemli bir kavram olup günümüzde bunun hakkında bir çok araştırma yapılmıştır. Yatak yolunun zırhlanması hakkında basitleştirilmiş bir model köprülerdeki temiz su çekilme oyulmalarını hesaplar. Laursen ve Toch (1956) eşitliğinde bölge yüzeyinin kabalığının sınırlandırıcı etkilerini de dahil etmek için kullanılır. Nehir yatağından doğal olarak alınan çakıl büyüklüğünün belirlenmesi için üretilmiş ampirik ilişki zırhlı bölgedeki taşınamayan en küçük parçacığın tespitinde kullanılır. Eğer taşınamayan en küçük parçacık yatak maddesi karışımındaki en büyük parçacıksa, bu zırhlı bölgedeki maddelerin harekete meyilli ve zırhlı bölgenin düzenli olmadığını ortaya koyar. Eğer zırhlı bölge sabitse, temiz su oyulması derinliğinin bariz bir şekilde azalacağı aşıkardır. Zırhlı bölgeyle sınırlı daralma oyulmasının hesaplanması için iki eşitliğin çözümü gerekir. Bunlardan ilki zırhlı bölgedeki modelli aktif bölge derinliğidir. İkincisi ise uzun daralma olan bölgedeki temiz su oyulma derinliğidir. Akımın taşıma kapasitesi yetersiz kalıncaya kadar, yatak malzemesi daralan bölgede oyulmaya devam eder. Eğer ulaşan akımla hiç malzeme taşınmamışsa, kayma gerilmesi daha fazla materyali kaldırmayacak dereceye düşünceye kadar daralan kesim oyulmuştur. Eğer yatakta büyük daneler mevcutsa, daralma oyulması iri daneli zeminlerin oluşturduğu zırh tarafından engellenebilir ve bu sayede hareket etmeyen daneler de ileride oluşacak bir erozyona karşı malzemeyi korurlar.

Basit bir zırh bölgesi modeli Borah (1999) tarafından ortaya konmuştur. Zırhlama olayında hareket etmeyen daneler, ince danelerden taşınma sonucu ayrılır ve sonuçta üst tabaka oluşturuncaya kadar dibe çökerler. Yatak daralınca ,homojen dağılımlı gerçek yatağın ince malzemesi alt tabakadan sıyrılır ve uzağa taşınır. En küçük taşınamayan danelerin çapı D_a dır ve bundan daha küçük çaplı daneler akımla alt tabakadan uzaklaşmıştır. Eğer daha büyük daneler ufalanırsa, tabakanın kalınlığı artar. Bu tabaka yeterince kalınlaşınca bir kalkan veya zırh vazifesi görerek daralmayı engelleyecek konuma gelince statik zırh bölgesi oluşur. Kaba dane çapı (D_{84}) ile ince dane çapı (D_{50}) arası oran 2 ($\sigma_g > 2$) geçerse lognormal bir dağılımı görülür ve $\sigma_g < 1.5$ koşulunda zırhlama olmaz.

Malzemenin zırh bölgesini oluşturduğu homojen dağılımlı orijinal yatak bölgesinin türetimi Borah tarafından yapılmıştır. Buna göre basitliğine rağmen bu zırhlama modeli ve oyulma derinliği tahmini hem laboratuarda hem de alanda kolaylıkla kullanılabilir. Aktif bölge kalınlığı;

$$\Lambda = \left[\frac{(1 - \epsilon)}{(1 - e)} \right] * \frac{\Delta}{P_a} \quad (2.72)$$

Λ = Aktif bölge kalınlığı.

ϵ = Zırh bölgesinin porozitesi

e = Alt yüzey yatak malzemesinin porozitesi

Δ = Zırhlı bölge kalınlığı

P_a = En küçük taşınamayan parçacığa göre yüzey altı yatak malzemesinin ondalık fraksiyonu.

Zırhlı bölge kalınlığı hakkında araştırmacıların farklı görüşleri mevcuttur.

*Borah $\Delta = D_a$

*Ballofet $\Delta = 1.5 D_a$

*Blazejewski $\Delta = (D_a + D_{\max})/2$.

$D_{\max}$ burada örnekten alınan en büyük dane çapıdır.

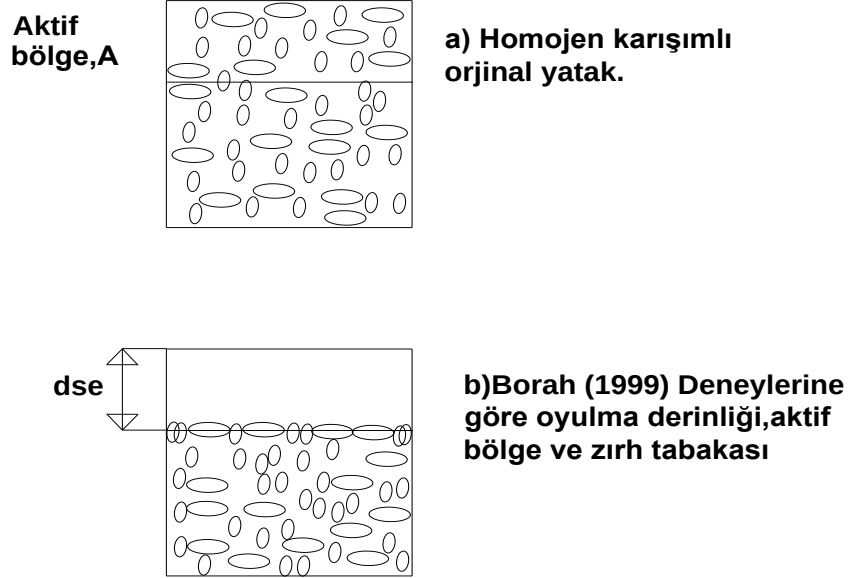
Laursen ve Toch (1956) çalışmalarında doğal bir kanal yolunda zırh bölgesinde tek ana parçacık kalınlığı olduğunu tespit etmişlerdir. Lagasse, Thompson ve diğerleri (1995) ise yaptıkları araştırmalarda doğal nehir veya yollardaki temel verilere dayanılarak iki ayrı zırh tabakası parçacıklarının olduğunu görmüştür. Bu araştırmalardan çıkarılan sonuç $\Delta = 3D_a$ veya 0.15 m olmalıdır. Bu tüm sonuçları karşılaştıran Borah $\Delta = \tau D_a$ denklemini çıkarmış olup $\tau = 1.0$ olduğu kanaatine varmıştır. Zırh tabasının yapısı Şekil 2.21’de görülmektedir.

Daralma oyulması derinliği d_s zırh tabakası kalınlığı ve aktif tabaka kalınlığı arası farktır. $d_s = \Lambda - \Delta$ ve $\epsilon = e$ ye eşit olduğunda oyulma derinliği denklemi;

$$d_s = D \left[\frac{1}{P_o} - 1 \right] \quad (2.73)$$

Eğer orijinal yatak malzemesi lognormal bir parçacık büyüklüğü dağılımı gösteriyorsa, tüm dağılım iki parametreyle ifade edilir,medyan parçacık parametresi D_{50} ve σ_g . Dane çapı

$$D_i = D_{50} \cdot \sigma_g^{K_i} \text{ ve buna göre } K_i = \ln(D_i/D_{50})/\ln\sigma_g.$$



Şekil 2.21: Zırh tabasının yapısı. (Borah (1999))

Yatak kayma kuvveti artınca ve zırh tabakası kalınlaşınca, durum zırh tabakasında kalan danelerin hareketinin kesilmesi ve buna dayalı kayma kuvvetindeki büyük artış, ayrılma taşınmasına sebep olur. Raudkivi (1986) dengeli bir zırh tabakası oluşma koşulu için $D_{100}/D_{50}=1.8$ formülünü bulmuştur.

Mevcut model zırhlanma olayının bir sürü karmaşık olaylarını ihmal etmiştir. Örneğin, ince danelerin sürüklenmesinden ince danelerin içine yerleşip zırh tabakasında katkısı bulunabileceği bunlardan biridir. İri danelerin çok büyük bir çoğunluğu zırh tabakasına katıldıkları halde, bir kısmı da ufalanmış veya taşınmış olabilir. Zırh tabakası altında doğal bir filtre oluşuncaya kadar ince daneler zırh tabakasına doğru hareket edip daralmayı artırmaya devam ederler. Ama, alt yüzey malzemesi bimodal dağılıma uğrarsa filtre tabakası oluşmaz. Bu basitleştirmelere rağmen burada zırh tabakası modeli kullanılmıştır.

Temiz su koşulları olduğu zaman, yatak kayma gerilmesi malzeme parçacıkları içine nüfuz edebilen minimum kayma gerilmesine eşit olduğunda daralma oyulması meydana gelir. Geniş bir dikdörtgen kesitli kanalda üniform akım için ortalama kayma gerilmesi için Manning denklemi;

$$\tau = \frac{\rho * g * n^2 * V^2}{y^{\frac{1}{3}}} \quad (2.74)$$

ρ =Suyun kütleli yoğunluğu

g =yerçekimi ivmesi.

n = Manning pürüzlülük katsayısı

Y =Akım derinliği.

V =Ortalama hız.

Manning pürüzlülük katsayısı malzeme büyüklüğü ve akım derinliğini içeren bir çok formülden tespit edilebilir. Strickler bağıntısı, Manning pürüzlülük katsayısı için;

$$n = k_n * D_{50}^{1/6} \quad (2.75)$$

Burada D_{50} metre cinsinden ifade edilirse $k_n = 1/21.1 = 0.0474$ olmaktadır. Eğer yatak daralırsa ve D_a nın büyüklüğü artarsa , zırh tabakasının medyan dane pürüzlülük katsayısı artışı sebebiyle büyüklüğü kalınlaşır ve daralan kesim de buna göre artış gösterir. Malzeme parçacıklarının taşınmasını sağlayan kritik kayma gerilmesi;

$$\tau = \Theta_c * (\rho_s - \rho) * g * D \quad (2.76)$$

Burada;

Θ_c =Kalkanın boyutsuz kritik gerilme ifadesi;

ρ_s =Yatak malzemesinin kütleli yoğunluğu.

D =Malzeme parçacıklarının çapı.

Bağıl parçacık büyüklüğü etkisi hem teorik hem de deneysel olarak bir sürü araştırmacı tarafından sınanmıştır. Kritik kayma gerilmesi parametresinin tekil D_i çapındaki yatak büyüklükleri hakkında formül;

$$\tau_{ci} = \Theta_{ci} * (\rho_s - \rho) * g * D_i \quad (2.77)$$

$$\theta_{ci} = \theta_{c50} \left(\frac{D_i}{D_{50}} \right)^m \quad (2.78)$$

Burada Θ_{c50} ve m ampirik sabitlerdir. m üssü farklı parçacıklarda kritik kayma gerilmesi varyasyonunu tanımlar. Eğer $m=-1$ ise tüm parçacıklar aynı kritik kayma gerilmesine sahiptir ve eşit şekilde hareketlidirler. Genelde değerler $0.03 < \Theta_{c50} < 0.09$ ve $-1 < m < -0.5$ arasındadır. Ek olarak, ilişkinin basit formu parçacık şekilleri ve açılarının etkilerini ihmal edip, iki özelliğin yatak malzemesinin çekilmesine ve parçacıkların şekil ve açılarına etkisi olduğu aşıkardır. Temiz su daralma oyulması derinliği, uzun bir daralma bölgesinde üniform akım gözleendiği zaman yatak kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesine eşitlenebilir. Kanal genişliği W ve debi Q , manning denkleminde göre τ yi τ_{ci} ye eşitlemek için;

$$d_s = \left(\frac{Q}{\frac{1}{n} * \sqrt{Q_{ca}} * (S_s - 1) * D_a * W} \right) - y_0 \quad (2.79)$$

yazılabilir. Zırh tabakası D_a , D_{95} olunca düzensiz hale gelir, ve bu zırh tabakası maksimum kayma gerilmesine direnir. O zaman;

$$\tau_{max} = \theta_{max} * (\rho_s - \rho) * g * D_{50} * \sigma^{\frac{1,645}{g}} \quad (2.80)$$

$$\theta_{max} = \max\{0,0834 * \sigma^{\frac{1,434}{g}}; 0,02\} \quad (2.81)$$

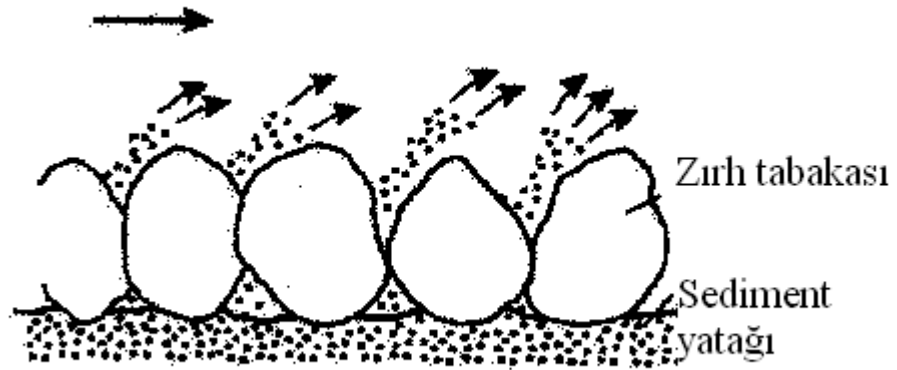
Eşitlikleri yazılabilir. Bu eşitliklerin kullanımı lognormal dağılımlar için çok kullanışlı olmaktadır.

Sonuç olarak aşama aşama sonuca ulaşma yollarını özetleyecek olursak;

- 1.Aşama: D_a için uygun değer seçmek. Gerekirse D_{84} çok iyi bir seçimdir.
- 2.Aşama: $K_a = \ln(D_a/D_{50}) + \ln \sigma_g$. Ve $Pa = 1 - \Phi(K_a)$ değerlerinin hesabını yapmak. .Bunu yaparken toplu bir normal dağılım tablosu kullanmak suretiyle Φ lognormal dağılım değerleri hesaplanır.
- 3.Aşama: Zırh tabakasındaki en büyük danelerin çaplarının standart normal sapması hesaplanır.
- 4.Aşama: Kritik kayma gerilmesine dayanılarak daralma esnasında D_a , K_{50} , Q , W , y_0 , D_{50} , σ_g değerlerini hesaplamak.
- 5.Aşama: Zırh tabakasının kalınlığını hesaplamak. $\Delta = D_a$ kullanılarak.
- 6.Aşama: Eğer $|d_{s1} - d_{s2}|$ eşitliğinde $d_{s1} < d_{s2}$ ise D_a yı azaltılmalı; $d_{s1} > d_{s2}$ ise D_a yı artırılmalıdır ve ikinci aşamaya geri dönmelidir.

Zırh tabakasındaki emilimi olan malzemenin de ortamdan uzaklaştırılması hakkında Sümer ve diğerleri (2001)'nin deneyleri mevcut olup, ince taban malzemesinin zeminden uzaklaşmaması için filtre tabakası önemli bir koruyucu malzeme tabakasıdır. Bu durumda üç malzeme tabakası bulunmaktadır.

- a-)Üst zırh tabakası.
- b-)Filtre tabakası. (Küçük malzeme boyutu.)
- c-)Taban sediment yatağı.

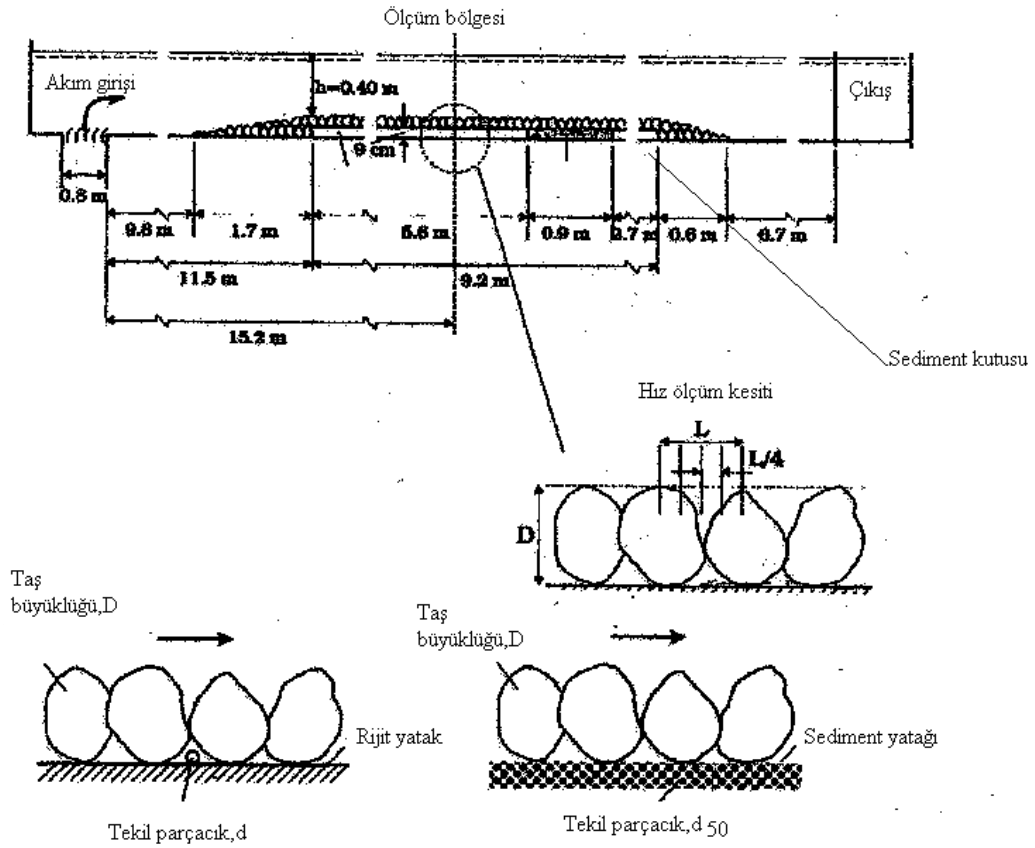


Şekil 2.22: Zırh tabakası arasında sediment emilimi. (Sümer ve diğerleri,2002)

Buradaki filtre tabakasının amacı taban malzemesinin akım karşısında durabilitesinin sağlanmasıdır. Bu konuda Sümer ve diğerleri (2001) tarafından yapılan deneyler 0.8 m derinlikte, 28 m uzunlukta ve 0.6 m genişlikte bir düzenekte yapılmıştır. Çapları $D=0.65$ ten 10 cm değişen yedi tip taş kullanılmış ve deneylerde dört tip ölçüm yapılmıştır. Bunlar ;

- 1-) Hız ölçümleri.
- 2-) Akım görüntüsü ölçümleri
- 3-) Tekil parçacık ölçümleri
- 4-) Sediment yatağı ölçümleri.

Şekil 2.23 Sümer ve diğerleri (2001)'nin deney düzeneğini göstermektedir.

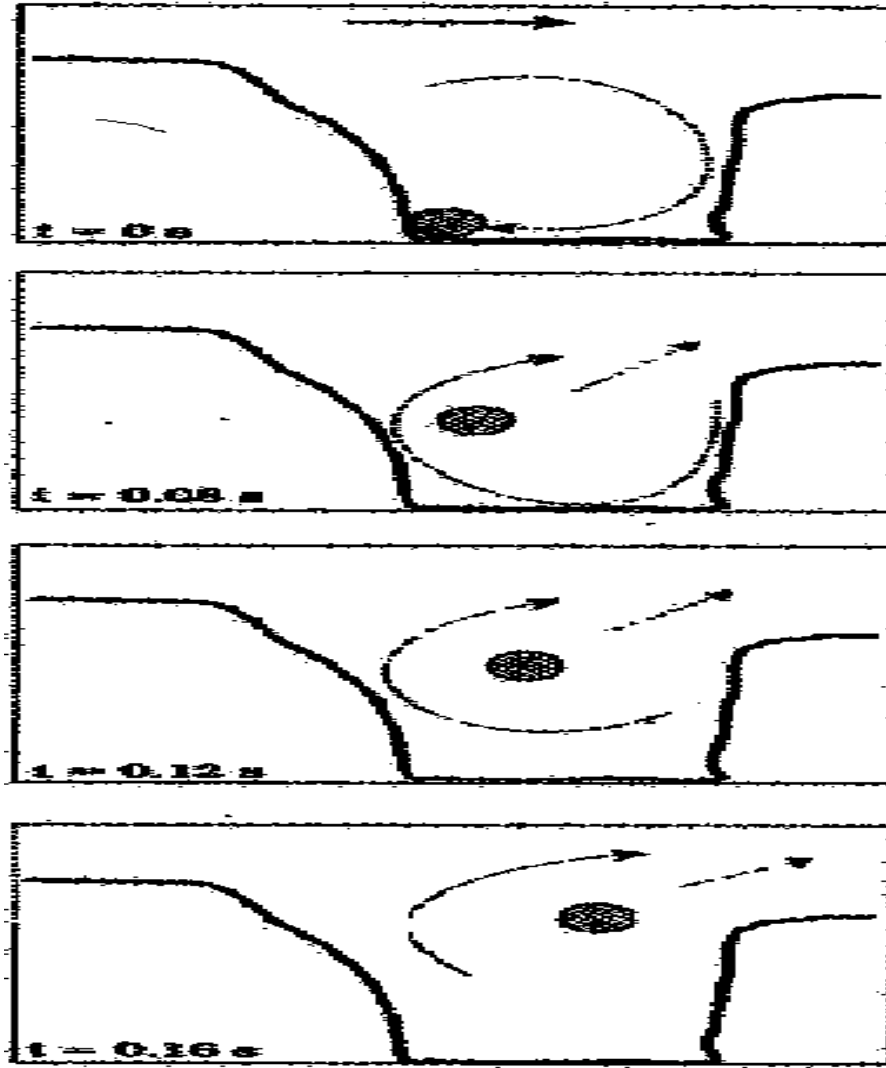


Şekil 2.23: Sümer ve diğerleri (2001)'nin deney düzeneği.

$$\langle \bar{u} \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L \bar{u}^* dx \quad (2.82)$$

$$\left(\sqrt{u'^2}, \sqrt{v'^2}, -u'v'\right) = \frac{1}{L} \int_0^L \left(\sqrt{u'^2}, \sqrt{v'^2}, -u'v'\right) dx \quad (2.83)$$

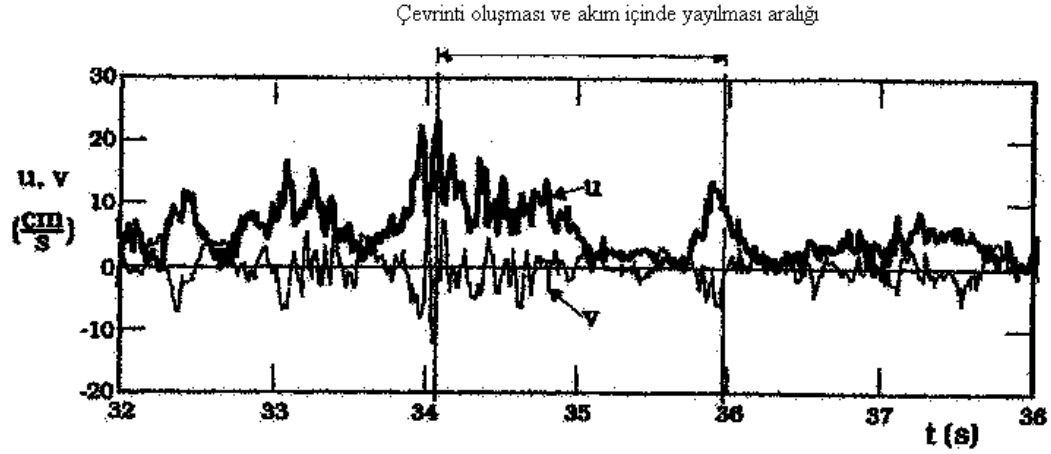
Burada L = İki komşu taş arası mesafeyi göstermektedir. L değeri her beş taş profili için farklı farklı hesaplanmıştır. Hız ölçüm deneylerinde akım özellikleri kritik değerleri karşılamaktadır ve pratik olmadığı kanıtlandığı için hız profili ölçümü yapılmamıştır. Taşlar arasında emilen sedimentin uzaklaştırılması olayının mekanizması Şekil 2.24'de görülmektedir.



Şekil 2.24: Taşlar arası çukurda akımın gelişimi ve çukurdaki parçacık hareketi. (Sümer ve diğerleri, 2001)

Bu şekilde akım etkisiyle taşlar arasında çevrinti oluşmasını ve çevrintinin yayılmasını görmekteyiz. Şekil 2.25'de akım hızının yatay ve düşey bileşenlerinin zamanla değişim grafiği ve yukarda oluşan çevrintinin hangi zaman aralıklarında

oluşup yayıldığı görülmektedir. Bu çevrinti oluşuktan sonra sedimenti de yerinden kaldırarak ana akıma doğru taşır . Bundan sonra da çevrinti yayılarak ana akıma karışır.



Şekil 2.25: Akım hızının yatay ve düşey bileşenlerinin zamanla değişim grafiği ve yukarda oluşan çevrintinin hangi zaman aralıklarında oluşup yayıldığı. (Sümer ve diğerleri,2001)

Boyutlu yüzeylerde sedimentin emildiği kritik koşul şu şekilde ifade edilebilir.

$$\theta_{su} = f\left(\frac{d}{D}\right) \quad (2.84)$$

Burada θ_{su} = Shields parametresinin emilim için kritik değeri.

Emilimi etkileyen bir başka faktör de iki kuvvet arası oran olup, F_D/F_R olup F_D = Sedimenti dışarı çıkaran ajitasyon kuvveti. F_R = Buna karşı oluşan direnç kuvvetidir. F_D temel olarak şu üç kuvvetin toplamıdır.

- 1-) Çevrinti yayılması sonucu oluşan düşey basınç gradyanı kuvveti.
- 2-) Düşey yönlü sürüklenme kuvveti.
- 3-) Öteki ajitasyon kuvvetleri.

Buna göre bu kuvvet;

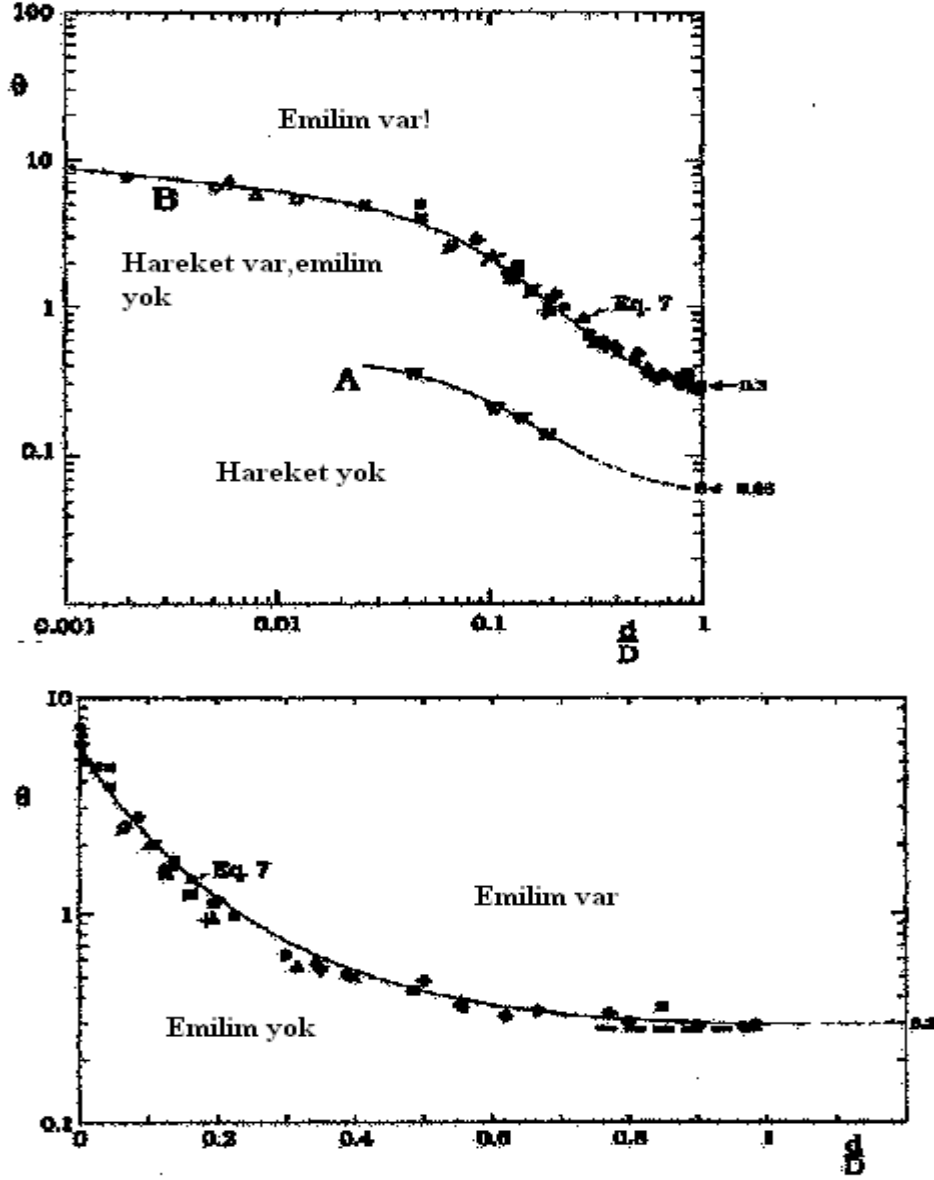
$$F_D \sim \rho U_f^2 d^2 \quad (2.85)$$

şeklinde yazılabilir. Öbür taraftan direnç kuvvetini de şu şekilde yazmak mümkündür.

$$F_R \sim \rho(s-1)gd^3 \quad (2.86)$$

Buna göre Shields parametresi ve F_D/F_R ne kadar büyük olursa emilim o kadar artar.

Bu durum $\frac{d}{D}$ için de geçerlidir. Şekil 2.26 'da $\theta - \frac{d}{D}$ grafikleri görülmektedir.



Şekil 2.26: $\theta - \frac{d}{D}$ grafikleri . (Sümer ve diğerleri,2001)

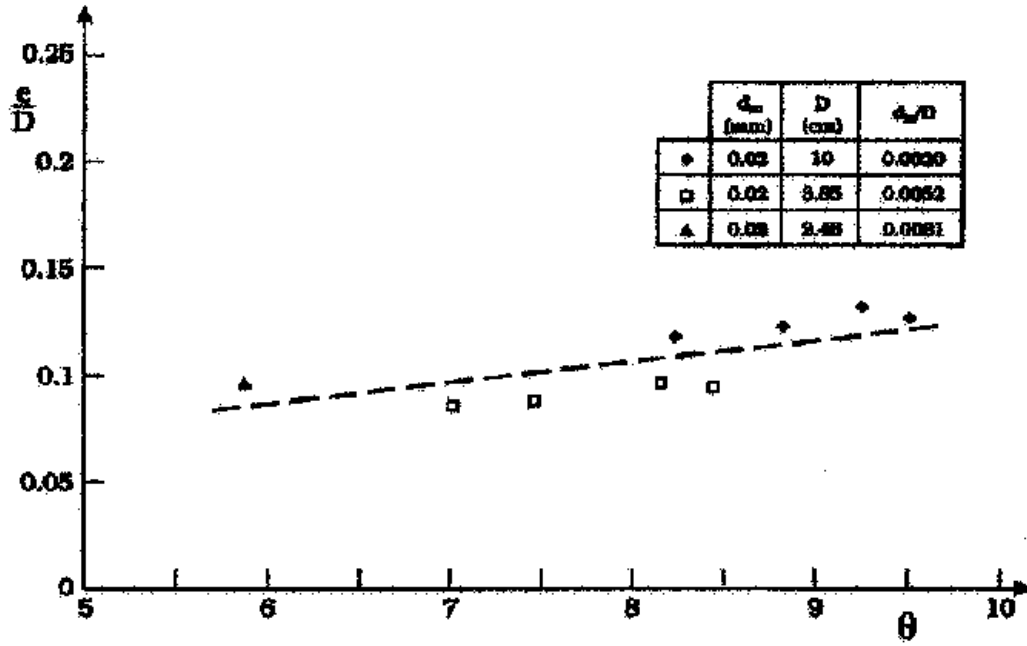
Bu deneylerden ortaya çıkan sonuçlar şunlardır.

* Akım hızı yavaş yavaş azaldığında, sedimentin taşlar arasından emiliminin gerçekleştiği noktada bir kritik nokta meydana gelir.

* Çevrinti taşlar arasındaki çukurlarda oluşur ve emilim olayının anahtar elemanıdır. Sediment bu çevrintiler tarafından oynatılır ve ana akıma doğru sürüklenir ve bundan sonra çevrinti de yayılarak akıma karşı.

* Sedimentin taşlar arasından emiliminde iki kritik olgu mevcuttur. Bunlar θ ile ifade edilen Shields parametresi $\frac{d}{D}$ ile ifade edilen sediment ve taş büyüklükleri oranıdır.

*Zırh taşlarının aşağı doğru yerleşmesi azar azar θ artması sonucu artar. Bu olay Şekil 2.27’de gösterilmektedir.



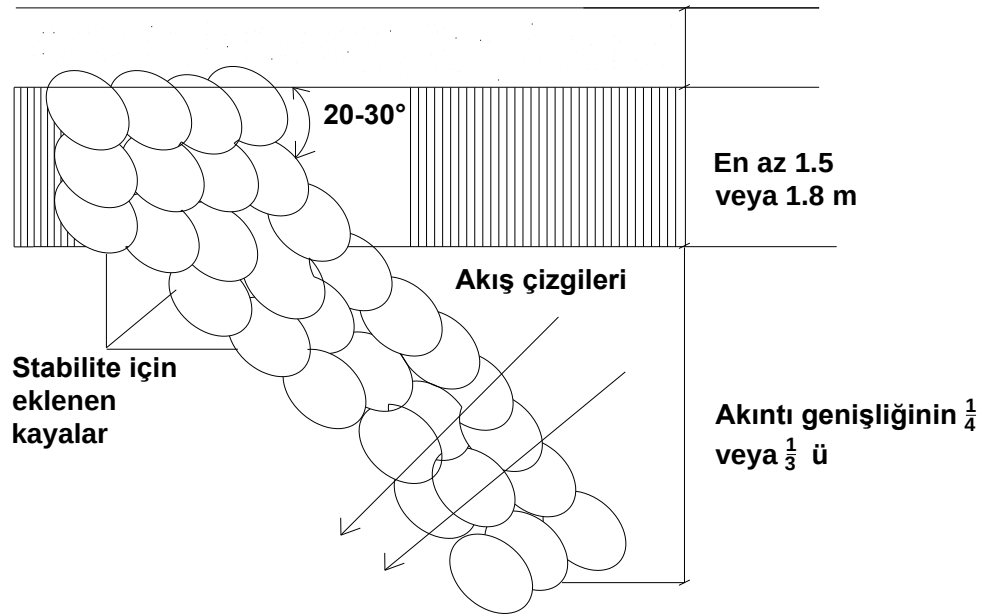
Şekil 2.27: Zırh taşlarının aşağı doğru yerleşmesi azar azar θ artması sonucu artması. (Sümer ve diğerleri,2001)

2.11. Kanatlarla Köprü Ayakları Arkasında Oyulmanın Sınırlandırılması:

Kanatlarla sınırlandırma ise zırhlama yönteminden farklı bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Kanatlar yıllardır akım durabilite projelerinde kıyı erozyonunu engellemek için kullanılmaktadır. Bu yapılar erozyona uğraması söz konusu olan kıyıları suyu döndürerek korur ve bu sayede erozyon riski gözle görülür bir şekilde azalır. Tipik bir kanat yapısı Şekil 2.28’de gösterilmektedir. Bu kanatlar çok küçük ölçekli bir geri dönüşümlü deney düzeneğinde kontrol edilmiş olup, değişik akım

koşullarında bu deneyler yapılmıştır. Hatta dolu kanat ve kanat üstü akımı koşulları ayağın bulunduğu kanalın dönmesine sebep olmaktadır. Sonuçlara göre kanatlar hakkında bir sürü varsayımlar yapılmıştır. Köprülerde oyulmalar için yumuşatma ölçümleri,akım değişiminin sağlanmasında zırlama tekniklerini de kapsamaktadır. Küçük ve tekil boyutlarda düşey duvar ayaklarına sahip köprülerde, oyulma değişimleri zırlının oluşmasından dolayı çok güçtür. Riprap olayları da köprü boyunca su yolunda belirgin bölgelerin dolmasına yol açarak ek daralma oyulmasına sebep olmaktadır. Ek olarak, yıllar boyunca süregelen kanal taşınması kanaldaki akımın köprüye belli bir açıyla gelmesine sebep olarak oyulma riskini artırmaktadır. Bu tehlikeleri göz önüne alarak köprü yapmak,çok pahalıdır ve bir çok küçük köprünün ayrı ayrı yerleştirilmeleri ekonomik olarak mümkün değildir.

On yıldan beri köprülerdeki oyulmaya karşı yumuşatma belirgin bir konu haline gelmiştir. Oyulmaya karşı yumuşatma yapmanın temel olarak iki yolu vardır. Birincisi köprü ayaklarını ve ayakların temellerini yüksek akımla karşılaştığı zamanki kayma gerilmelerini göz önüne alarak zırlama yapmak, ikincisi ise çevrintileri kırmak ve ayakların çevresindeki hızları düşürmektir.



Şekil 2.28 : Tipik bir kanat yapısı. (Johnson, Hey ve diğerleri (2001))

Ayaklar için yapay zırlama teknikleri riprap, dökme beton üniteler,temel dış kısımları, beton önlükleri kapsar. Riprap uzun zamandır en çok kullanılan zırlama

metodudur. Ayakların zırhlanmasında yaşanan problemler zırh boyunca malzeme taşınması ve zırhın yerinde tutulmasıdır. Ayaklarda akım değiştiren araçlar ve köprünün akım yönüne ters olan kısmı laboratuarda olduğu kadar arazide de test edilmiş ve sınırlı başarı sağlanabilmiştir. Görülen arazide bu tarz araçlar bariz problemler yaratmakta, yıkıntıyı artırmakta, buzlanmayı çabuklaştırmakta ve bu araçların oyulmayı engelleyici etkisi en az derecede olmaktadır. Yani yarardan fazla zarara sebep olduğu açıktır. Hızları düşürmek ve kayma gerilmelerini belli bir seviyenin altında tutmak için kanatlar veya benzer alternatifleri tercih etmek daha mantıklıdır. Kanatlar çok değişik şekillerde kıyı erozyonunun engellenmesi için kullanılmıştır. Uygun kanat yerleştirmeleri akımın ikincil çevrimine sebep olarak oyulma havuzu gelişimini rütbelendirir. Kanatlar nehir kıyılarını erozyondan korumak için büyük kayalardan yapılırlar. Johnson, Hey ve diğerleri (2001) deneylerinde kıyı 20°-30°ler arası bir açının en iyi sonucu verdiğini görmüştür. Kanatlar kıyı yüzünde durgun koşullar yaratır, taşkın akımı esnasında, hızlı savılan akım orta kanala doğru yönlendirilir. Gelecekte kıyı çökmelerinin engellenmesi için köşe etrafınca bir sürü kanat gerekebilir. Toplu olarak dış kıyının ikincil akım bölgesini düzenleyebilir. Bu, köşe eğriliğindeki sonuçla çatışır. Sonuç olarak, kanatların tabanları akım yönünde ve kıyının tabanının arka kısmı malzemeye dolu kanal ortasında aşağıya gömülme ve oyulma oluşur. Iowa kanatları olarak bilinen, küçük izole edilmiş su altındaki kanatlar akım derinliğinde kanat uzunluğunun 2-8 katı geniş bir ölçüde etkili olabilmektedir. Burada debi ilk elden belirleyici bir parametre değildir, sadece hızın belirlenmesi için gereklidir. Kanat yüksekliği ve akım derinliği arası oran erozyonun akım yüzdelelerini etkilediği zaman 0.2 ve 0.5 arasında olmalıdır. Uzunluk kanat yüksekliğinin 3 veya 4 katı, optimum açı değeri ise akım yönünde 20° olmalıdır. Kanatlar arası yatay mesafe akım derinliğinin iki katı olmalıdır. Bu kanatlar kaya veya tahtadan erozyon etkilerine direnebilecek uygun derinlikte inşa edilmelidir. Bu konuda bir sürü araştırmacı tarafından deneyler yapılmıştır. Kıyı yolu savakları taş kütlelerinden yapılır. Kanatlara benzer olarak yatay akımın durabilitesini ve akım diziliş problemlerinin çözümünü sağlar. Dolu kıyı akımlarında etkisi görülmez. Savak yüksekliği akım derinliğinin etkili ortalama yüksek su seviyesindeyken %30-50 si kadar olmalıdır. Uzunluk ortalama kanal genişliğinin 1/3'ünü geçmemelidir, 1/10 ve 1/4 ü arasında olması en makbul değerlerdir. Savakların mesafelendirilmesi kanal eğrilik çapına, savak uzunluğuna ve

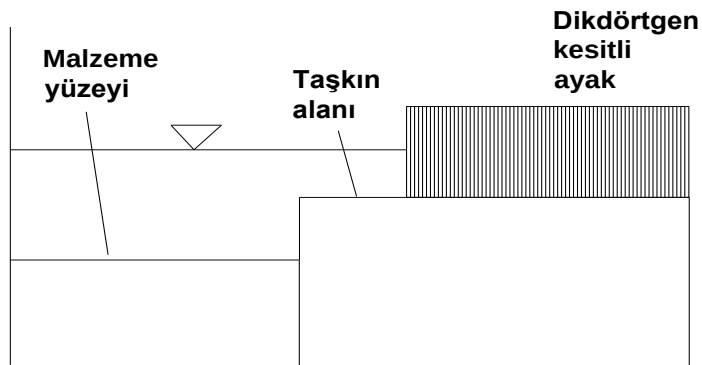
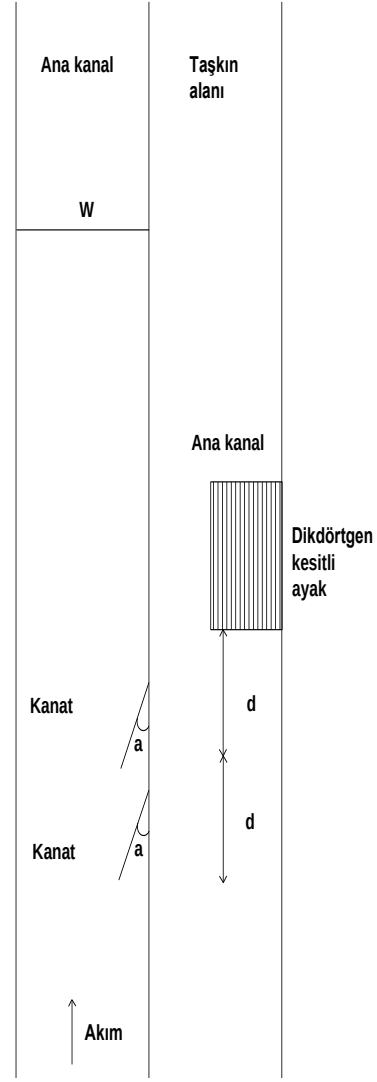
kanal genişliğine bağlıdır. Kanal geometrisi terimleriyle mesafelendirme $W < S < 1.5W$ olarak ifade edilebilir. W = Kanal genişliği, S = Kasık mesafesi.

Johnson, Hey ve diğerleri (2001) tarafından uygulanan deneysel programda ise 15 m uzunluğunda 0.9 m derinliğinde ve 1.5 m genişliğinde geri dönüşümlü düzenek kullanılarak akımın etkileri ve oyulmanın aldığı durum incelenmiştir. Debi ölçümlerinin saptanması için venturimetre ve manometre kullanılmıştır. Noktasal ölçüt ise düzenekteki akım derinliklerinin tesbiti amacıyla kullanılmıştır. Akım hızları akustik hız ölçer ile ölçülmüştür. Kullanılan malzeme ortalaması kaba taneli çakıllardır ve kanal eğimi 0.002 dir. Taşkın yatağı L tipi desteklerle tamamen pürüzlendirilerek, türbülanslı akım için uygun hale getirilmiştir. Taşkın yatağı ve kanal kıyısı hareketli kanal yatağı ile rijit bir yapıdadırlar. Froude sayısı kabul edilebilir bir aralıkta alınır ve bu sayede hız oranı tahmin edilen değere ulaşabilir. Hız oranı V/V_c , V = Hız ve V_c =Malzeme hareketi esnasında kritik hız. Bu kritik hız aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir;

$$V_c = 6.19y^{1/6}D^{1/3} \quad (2.87)$$

Burada y =Akım derinliği (m) , D = Malzeme büyüklüğü (m). Laboratuar deneylerinde y/D oranı genelde 1 dir. Bunun sebepleri; birincisi Maksimum oyulma derinliğinin bu değerde oluşması, ikincisi de bu hız oranı yatak formlarının engellenmesinde yardımcı etken olmasıdır. 37 tane farklı tipte deney yapılmış olup, her deney yaklaşık 4 saat sürmüştür.

Bu deneylerden çıkan sonuçlara göre genel başlangıç tasarım ilkeleri, tek aralıklı köprülerde oyulma derinliğini engellemek amaçlı yapılan kanatların yapısına uygun düşmektedir. Deney düzeneği Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.29.: Kanat yapıları için deney düzeneği. (Johnson, Hey ve diğerleri (2001))

Kanat ayakları talveg boyunca en az en derin oyulma derinliğinde olmalıdır. Bu kanatların oyulmayı engellemesini akımın yönünü değiştirerek, temelde hızları ve kayma gerilmelerini azaltarak yaptığını ve zırlama yapmadığını unutmamalıyız. Bu kanatların yapımına etkiyen tasarım etkileri ise;

-Kıyı ile yapılan açı. (Yaklaşık $25 < \alpha < 30$ arasında olursa en çok akım kontrolu sağlanabilir.)

-Akım yönü tersi konumu. (Optimum konum $d=2W$ olarak verilebilir. W =Kanal genişliği, d =Kıyı boyunca ayağın akım tersi köşesinden olan proje uzaklığı.

-Yapı sayısı. (İki yapı da etkilenen ayağın akım yönü tersinde kanalın aynı köşesine yerleşmelidir.)

-Yapı yüksekliği. (Bu yükseklik dolu kıyı seviyesinde olmalıdır. Bu seviyeden 15 cm yukarı çekmek yapıyı hidrolik olarak daha güvenilir ve işlevsel kılabilmektedir. Fakat bu seferde kıyı erozyonu ve ek oyulmalarla mücadele zorlaşmaktadır.)

Sonuç olarak kanatlar oyulmayı kanalın orta kısmına iterek ayakları korumaktadır, fakat zırlama yapmadıklarından bazı beklenmedik durumlar için de projelerin tasarlanması gerekmektedir. Yine de ayakların oyulmasını azaltan ekonomik bir çözüm yolu olabileceği kuşkusuzdur.

2.12.Değişken Akımlı Kanallardaki Ayaklarda Riprap Dayanımının İncelenmesi:

Bir akarsu yatağında oluşan toplam oyulma derinliğinin; yatak alçalması, köprü ayakları arkasında meydana gelen yerel oyulmalar ve kanal daralmasının toplamı olduğunu önceden açıklamıştık. Özellikle yerel oyulmaların oluşmasında çevrıntilerin rol oynadığı ve bu çevrıntilerin akarsu hızının tabanda meydana getirdiği kayma gerilmelerinin bir sonucu olduğu bilinmektedir. Riprap olayının neredeyse tamamıyla yerel oyulmadan etkilendiği de göz önüne alınırsa, riprap dayanımı araştırılırken genel oyulma yerele indirgenerek çalışma yapılır. Aynı şey alüvyonlu yatak alçalması için de geçerlidir. Hızın oyulma derinliğine nasıl bir etkisinin olduğu da hem temiz su oyulması hem de hareketli taban oyulmasına göre yapılan araştırmalara rağmen belirsizliğini korumaktadır. Melville ve Sutherland (1988) deneylerinde kayma gerilmesi sabitken ayak riprap yüzeyinin ani oyulma

ölçümlerine uygun olmadığını bunun sebebinin de yatak alçalması olduğunu görmüşlerdir. Bu olay da riprap ölçümlerinde yatak alçalmasının da belli bir miktar işin içine katılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Riprap dayanımı ile ilgili olarak Chiew (2004) in yaptığı deneyler kabul görmüştür.

Chiew (2004) deneylerinde 18 m uzunluğunda, 60 cm genişliğinde, 60 cm derinliğinde, yatak eğimi yaklaşık olarak %0.1-0.2 arasında olan bir düzenekte yapılmıştır. Su akımı devridaim yapan bir AC motor tarafından sağlanmıştır. Bu düzenekteki malzemenin kalınlığı ($d_{50}=0.9\text{mm}$), birim ağırlığı ($S_s=2.61$), standart sapması ($\sigma_g=1.24$) şeklinde verilmiştir. Deneyler yapılırken üç değişik hız oranı kullanılmıştır. Bunlar $U/U_c=1/2; 1/4; 1/7$ değerleridir. Burada U Deney esnasında sabit ortalama hız, U_c ise malzeme için kritik ortalama hızı temsil etmektedir. Alçalan kanalda ayak riprap dayanımı incelenirken hata mekanizmalarını da göz önünde bulundurmamak deneyin sağlıklı yürütmesi ve tasarım hatalarını azaltmak için şarttır. Bu mekanizmalar şu şekilde sınıflandırılabilir;

-Kayma hatası.

-Savrulma hatası.

-Köşe hatası.

-Yatak formu hatası yada yatak destabilizasyonu.

Tüm bu hata mekanizmalarının alüvyonlu kanalın ortalama yatak seviyesinin sabit kaldığı şartlarda göz önüne alınması gereklidir. Alçalan kanallarda riprap dayanımına ait önemli bir özellik de, yatak kayma gerilmeleri zamana bağlı bir şekilde değişir ve genel oyulmanın oluşumunu engeller. Buna bağlı olarak,

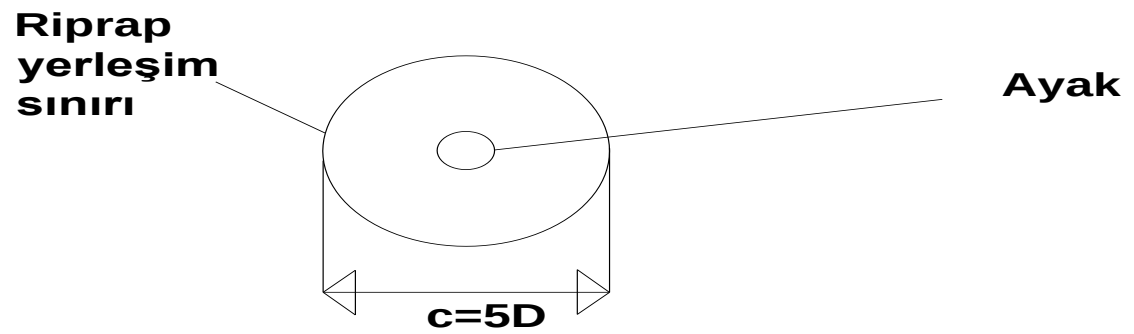
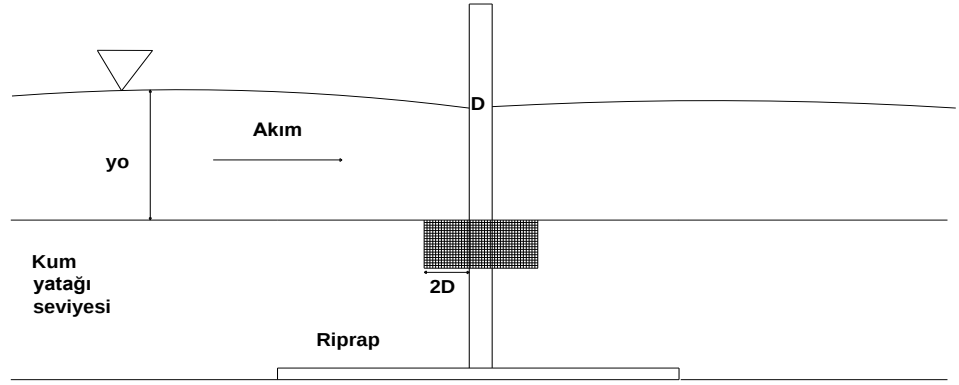
-Yaklaşan akımın kayma gerilmesinin ziyadesiyle engellenmesi genel oyulma öncesiyle kıyaslandığı zaman riprap kayaları yüksek bir dayanım kazanır.

-Yatak malzemesinin azalması yatak yapılarındaki değişimleri engeller. Sınır şartları sağlandığında, hareketsiz düzgün kanal oluşur. Ayak modeli ve bu modelde oluşan riprap tabakası Şekil 2.11’de görülmektedir.

$U/U_c=1/2; 1/4; 1/7$ değerleri dikkate alınarak yapılan deneylerden;

- 1) Kohezyonsuz sedimen malzemesi içeren düz bir yatakta yatak alçalması erozyonun daha ilk aşamalarında süratli bir şekilde oluşur ve daha sonra azalan bir artış gösterir. Başka bir deyişle grafiksel olarak resimleyecek olursak parabolik bir artış grafiği oluşur.
- 2) Köprü ayağının varlığı yatağın profilini değiştirecek etki yapmaz.

- 3) Toplam oyulma derinliği yatak formlarından etkilenmeyen hareketli taban oyulmasının ve yatak alçalmasının ortalamasıdır.
- 4) $t=24$ saat için yapılan ölçümlerde ayağın yerel oyulma derinliği sabit ve zamandan bağımsız olduğu tespit edilmiştir.



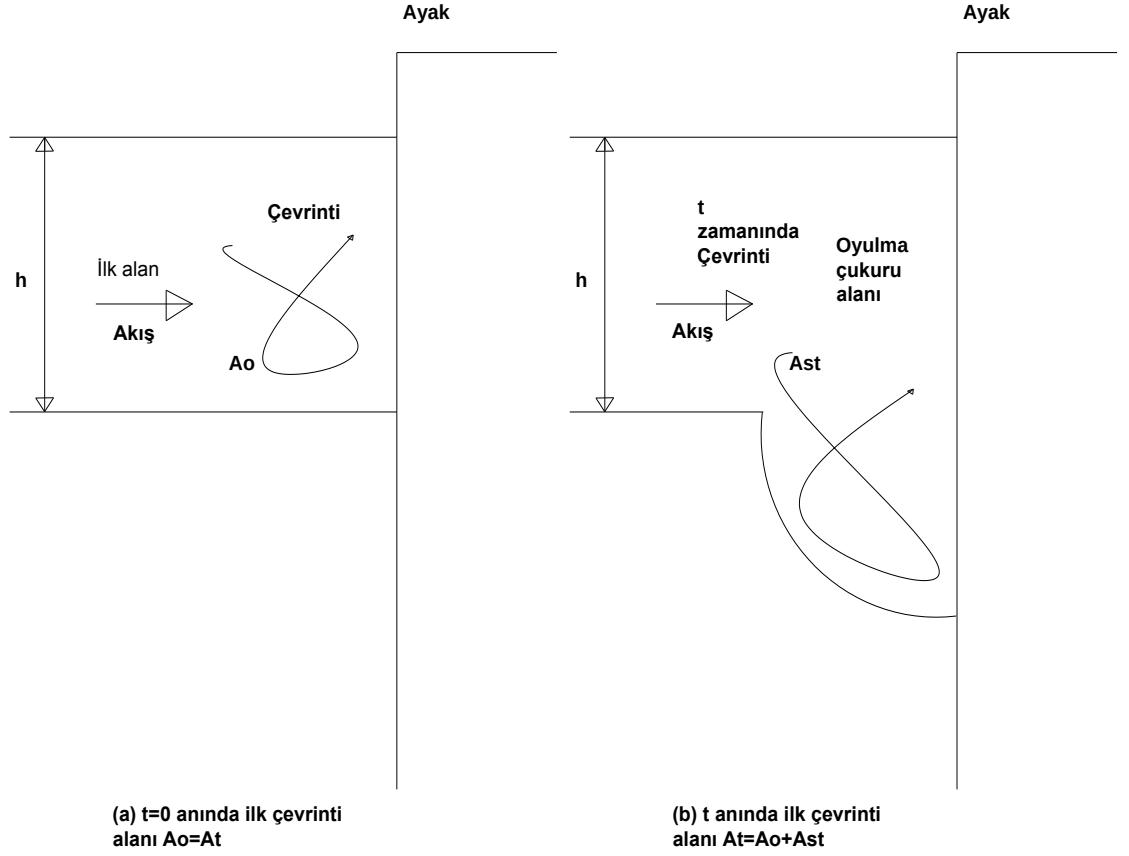
Şekil 2.30: Ayak modeli ve riprap tabakası. (Chiew (2004))

- 5) Büyük yapılı tümseklerin riprap dayanımı yüksek hassaslıkta olup buna yatak formu şaşırtma hatası adı verilir.
 - 6) Riprap bölgesinin düzenli bir şekilde bakımı yapılmalıdır. Eğer riprap tümseği köprü ayağı boyunca kuruluysa, farklı tasarım taşkınlarına karşı tekrar restore edilmeli veya yenilenmelidir.
 - 7) Riprap tümsekleri erozyona karşı dayanımı artırır. Fakat şiddeti yüksek tasarım taşkınları sebebiyle çok büyük zarar görme riskleri söz konusudur. Bu sebeple tasarım taşkınlarının şiddetleri çok iyi hesaplanmalıdır.
- Sonuçları çıkarılabilir.

2.13. Oyulma- Zaman İlişkileri:

Şu ana kadar açıklanan tüm metotlarda zaman kavramı büyük ölçüde ihmal edilmiş ve deney sonuçları zamandan bağımsız olarak açıklanmıştır. Oysa zaman kavramının önemi de bir çok araştırmacı tarafından kabul edilmektedir. Köprü oyulmasıyla ilgili araştırmalar tüm dünya çapında yapılmaktadır. Bunun hakkında bulunan eşitlikler genelde oyulma derinliğini incelemek için yapılmaktadır. Bazı araştırmacılar zamana bağlı bir oyulma derinliği eşitliğinin belirsiz olduğunu söylemektedir, çünkü temiz su oyulma derinliği hakkındaki eşitlik zamanla asimptotik bir değişim göstermektedir. Fakat pik taşkın akımı oyulma derinliği eşitliğini sağlayacak kadar uzun sürmez. Daha küçük oyulma derinliği ve tasarım taşkının oyulma derinliği eşitliği, zaman-pik değeri ile ilişkilendirilebilir. Zaman ölçekli yerel oyulma çalışmalarından Chiew (2004)'in araştırmalarına göre oyulma derinliği eşitliğinin %50-80 lik kısmı yaklaşan akım hızına bağlı olarak zaman diliminin %10 unda meydana gelmiştir. Eğer tasarım taşkını %10 luk zaman periyodunda biterse, o zaman tasarım oyulma derinliği %20-50 daha az olmaktadır. Buna göre pik taşkın akımı, zaman- pik taşkın hidrografına göre oyulma derinliği gelişiminin incelenmesi önemlidir. Ayak mevcut olduğunda akım engellenmesinden oluşan yerel oyulma, ayak çevresindeki malzeme erozyonun bir sonucudur. Oyulan parçacıklar ayak önünde akım engellenmesinden dolayı oluşan çevrintiler tarafından taşınır. Çevrintiler ayağın burun kısmından yönelerek akım yolu boyunca ayağın köşelerinden geçer. Malzeme yüzeyindeki kayma gerilmesi kritik değeri aşarsa erozyon meydana gelir. Çevrinti sistemi yüksek kayma

gerilmeleri oluşturur, oyulma çukuru gelişimini önemli ölçüde etkiler. Buradaki çalışma Yalın (2001)'in malzeme taşınması teorisine dayanarak daire kesitli ayaklarda üniform malzeme ve temiz su akımına göre geçici bir değer oluşturmaktır.



Şekil 2.31: İlk çevrintinin $t=0$ ve t anındaki durumları . (Mia ve Nago (2003))

Mia&Nago (2003)'nun bu konuda yapmış olduğu deneyler 1600 cm uzunluğunda 60 cm genişliğinde 40 cm derinliğindeki bir düzeneğe yapılmıştır. Su, düzeneğe yüksekteki bir tanktan boru vasıtasıyla aktarılmaktadır. Bu aktarılan suyun debisi keskin kenarlı savakta ölçülmüştür. Akım yüzdesi supapla ölçülmüştür. Su derinliği kuyruk kapağı yardımıyla ölçülmüştür. Hareketli yatak bölgesi 100 cm uzunluğunda, 60 cm genişliğinde, 57 cm derinliğinde ve düzeneğin başlamasından 800 cm akım yönünde hazırlanmış, $d_{50}=1.28$ mm ve geometrik standart sapması $\sigma_g=1.29$ olan parçacıklardan oluşmuştur. Düşey dairesel ayak ($D=60$ cm) bu hareketli bölgenin ortasına konmuştur. Hareketli yatak deneye başlandıktan sonra seviyelendirilmiştir. Üniform temiz su akımı gerekli debinin karşılanması için geliştirilmiştir. Deneyler oyulma 1 mm den az veya 1 saat içinde hiç oyulma

görülmemesi durumunda durdurulmuştur. Oyulma derinlikleri ayak çapına göre zaman zaman kaydedilmiştir.

Sonuca ulaşılırken kullanılan bazı yöntemler;

- 1) $A_o = \pi D_v^2/4$ ve $D_v/h = 0.28(D/h)^{0.85}$ A_o hesaplanması ve $U/u^* = 5.75 \log h/2d_{50} + 6$ veya $u^* = (gRS)^{0.5}$ ile u^* değerinin hesaplanması. Burada; $A_o = t=0$ anında ilk çevrintinin kesit alanı D_v =İlk çevrintinin çapı u^* =Kayma hızı. U =Akım hızı. H =Akımın ters yönünde akım derinliğidir.
- 2) $n=0$ $t_o=0$ kabulleriyle $u_t^* = 3.3u^*(A_o/A_t)^C$ u^*_{to} hesaplanması ve $d_{sto}=0$ ve $q_{sto}=0$ kabulleriyle $st = u_t^*/u_c^* - 1$ ve $a = 2.45 \sqrt{\psi_c/(\rho_s/\rho)^{0.4}}$ sto ve a hesabının yapılması. Burada C =Deneylerden elde edilen sabit. $A_t = t$ anında tekil çevrintinin çapı. $A_t = A_o + A_{st}$. $A_{st} = d_{st}^2/2 \tan \Phi$ $A_{st} = t$ anında oyulma çukurunun çapı. u_t^* ayak burun kısmında yatak kayma hızı, u_c^* Kritik hareketlilikteki hız, ψ_c malzemetolojik fonksiyon çapıdır.
- 3) $n=1$ zamanı için $q_{st} = 1.80 d_{50} u_t^* st [1 - \ln(1 + a_{st})/a_{st}]$ formülü ile q_{st1} hesabı ve $q_{vt1} = q_{st0} + q_{st1}$ hesabı ve dst hesabı oyulma derinliği zamanında $t_1 = t_o + 1$. $st = t$ zamanında boyutsuz bölgesel kuvvettir.
- 4) $A_t = A_o + A_{st}$ ve $A_{st} = d_{st}^2/2 \tan \Phi$ formüllerinden ilk çevrintinin kesit alanı artışının bulunması sağlanır.
- 5) $st = u_t^*/u_c^* - 1$ ve $u_t^* = 3.3u^*(A_o/A_t)^C$ formüllerinden yeni birer st ve u_t^* değerleri bulmaktır.
- 6) $q_{st} = 1.80 d_{50} u_t^* st [1 - \ln(1 + a_{st})/a_{st}]$ formülünü kullanarak yeni bir q_{stn} hesaplamak ve $q_{vtn} = \sum q_{sti}$ formülünden yeni bir q_{vtn} hesaplanmaktadır.
- 7) 4 ve 6 aşamalar oyulma derinliği zaman ilişkisinde u_t^* ve u_c^* eşitlenene kadar devam edilecektir.

Bu çalışma üniform kum malzemeli temiz su akımı esnasındaki daire kesitli köprü ayaklarındaki yerel oyulma ile sınırlandırılmıştır. Bunun için geliştirilen tasarım metodları ve formülleri anlatılmaya çalışılmıştır. Ayak çevresindeki oyulma çukuru çevresi, oyulma zamanına göre içe gömülü bir koni olarak tanımlanmış, oyulma çukuru açısı malzemesi yeni durum açısına göre eşitlenmiştir. Bu metot aynı zamanda kritik kayma gerilmesine ulaşmak için gerekli olan zamanın bulunmasında bize yardımcı olmuştur. Kritik kayma gerilmesine ulaşılmadığında oyulmanın gerçekleşmemesi, zamana bağlı oyulma derinliği hesabından o zamanki yerel oyulma miktarı bulunmuştur. Kısacası bu metot yerel oyulmanın gelişmesini mevcut taşkın

akım süresine göre tasarım taşkın hidrografı bilindiği zaman incelenmesini sağlayıp maliyeti düşürmektedir.

3. FARKLI KESİTLİ KÖPRÜ AYAKLARI ARKASINDA OLUŞAN OYULMALARIN İNCELENMESİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ:

3.1.Kanal Oyulması ve Ayak Oyulmalarının Etkilendiği Kavramlar:

Oyulma genel olarak çok karmaşık yapıda olduğundan başka kavramlarında göz önünde bulundurulması gerekir. Bunlardan birisi yaklaşan akım hızının oyulmaya ne derece etki ettiği. Bilindiği üzere temiz su oyulmasında hız dolayısıyla oluşan akım gücü tamamıyla oyulma derinliğinin artması için harcanmaktadır. Hareketli taban oyulmasında ise toplam akım gücü hem oyulma derinliği artması hem de malzemenin taşınması için kullanılmaktadır. Buna göre oyulmalar karşılaştırılmak istenirse temiz su oyulması hareketli taban oyulmasından fazla olacağı görülmektedir. Oyulma derinliği şekil etkilerinin maksimum olduğu zaman en yüksek değere çıkar. Oyulma derinliği araştırılırken yaklaşım akım hızı gibi boyutlu bir değişkenin araştırılmasından çok Froude sayısı gibi hem boyutsuz hem yaklaşım akım hızı ve yaklaşım akım derinliği etkilerini bir arada bulunduran bir etkinin araştırılması daha kesin sonuçlar vermesi ve pratik olmasından dolayı tercih edilmektedir. Hızların sürekli artması durumunda da bir geçiş rejimi oluşmakta, taban şekli sürekli değişmekte oyulma da buna bağlı olarak sürekli bir azalma ve artma değişimine girmektedir. Bunun haricinde oyulma sürecine en önemli etkilerden biri de zamandır. Temiz su oyulmasının zamanla değişimi hakkında yapılan Yanmaz ve Altınbilek (1991) deneylerine bakarsak genelde %50-%80'lik bir oyulma derinliğine yaklaşık %10-%15'lik bir zaman diliminde ulaşıldığı

görülmüştür. Kalan zamanda ise dengeli bir oyulma derinliğine ulaşılması için gerekli olan çok uzun bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Raudkivi (1996) ye göre dengeli oyulma süresine erişmek için en az 50 saate ihtiyaç vardır. Doğa koşullarında etkili akım süresinin az olması tasarım esnasında dengeli oyulma derinliği yerine makul zamanda ulaşılabilir oyulma derinliğinin kullanılması daha akla yatkındır. Taban malzeme yapısı da oyulmayı etkileyen faktörler içinde çok önemli olmasa da oluşturabileceği zırlama dolayısıyla oyulmayı belli ölçülerde azaltmaktadır. Bu da tanelerin geomerik standart sapması olan σ_g artışına bağlı olarak söylenebilir. Raudkivi (1996) buna dayalı geliştirdiği formül;

$$K_\sigma = 0.013462\sigma_g^5 - 0.2232\sigma_g^4 + 1.4066\sigma_g^3 - 4.0864\sigma_g^2 + 5.007\sigma_g - 1.1179 \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada K_σ gradasyon etkisi düzeltme katsayısıdır. Bu denkleme göre taban malzemesi dağılımı büyük olduğunda üniform malzeme dağılımına göre daha az oyulma olduğu görülmektedir. Fakat dikkat edilmesi gereken en önemli husus bu formülün doğruluğunun temiz su oyulması için güvenilir olmasına rağmen, hareketli taban oyulması koşullarına uygunluğunun tam belirlenemeyecek kadar karmaşıklığıdır. Bunun sebebi ise temiz su oyulmasında hız dolayısıyla oluşan akım gücü tamamıyla oyulma derinliğinin artması için harcanmaktadır. Hareketli taban oyulmasında ise toplam akım gücü hem oyulma derinliği artması hem de malzemenin taşınması için kullanılmaktadır. Zırlama olduğu zaman malzemenin nasıl veya ne kadar taşınabileceği ve bunun nasıl modelleneceği daha fazla doküman ve araştırma isteyen ve tartışmaya açık karmaşık bir konudur. Diğer bir başka faktör ise yaklaşan akım derinliğinin etkisidir. Akım hızında herhangi bir azalma sebebiyle memba tarafında su seviyesinde artış görülür. Bu da bir yüzey çevrintisi oluşturur. Daha önce oluşumunu ve oyulmaya etkilerini açıkladığımız at nalı çevrintisi ve bu yüzey çevrintileri aksi istikamette hareket eder. Oyulmanın akım derinliğine bağlılığı tamamen bu çevrintilerin girişimi ile orantılı olarak değişir. Akım derinliği çok ise cidar sürtünmesi az, akım derinliği az ise cidar sürtünmesi fazla olmaktadır. Akım derinliğinin aşırı olduğu durumlarda bu girişim ziyadesiyle azalır ve yaklaşan akım derinliğinin oyulma derinliğine etkisi ihmal edilecek düzeye gelir. Melville & Raudkivi (1996) deneylerine göre bu oran ince zemin malzemesinde $d_o/b \geq 3.0$ kaba zemin malzemesinde $d_o/b \geq 6.0$ değerleri için ihmal edilebilir. Ayak arkasında oluşan oyulmaların etkilendiği bir başka husus da ayakların şekli ve akımın ayaklara ne

şekilde geldiğidir. Ayaklar (dairesel kesitli olanlar hariç) eğer akıma dik olmayan bir açıyla yerleştirilirse çevrıntilerin etki alanları, ayağa etkiyen sürüklenme kuvveti artar. Bu da doğal olarak oyulmayı artırıcı bir etkiyi beraberinde getirir. Ayak eğer düşeyle açı yapacak şekle sahipse yine oyulma derinliği etkilenmektedir. Tablo 3.1’de de görüldüğü üzere değişik hızlarda alttan üste genişleyen ayaklardaki üstten alta genişleyenlere oranla fazla oyulma derinliği bariz bir şekilde göze çarpmaktadır. Burada u kanaldaki ortalama hız, L_b ayak boyu, b ayak genişliği, d_s oyulma derinliği, K_s dairesel ayağa göre şekil faktörleridir.

Tablo 3.1.: Genişliği değişen üniform olmayan yapıda ayaklar için şekil faktörleri.

AYAK ŞEKLİ	$u(m/s)$	d_{se}/b	K_s
Altan üste genişleyen	0.67	2.03	1.20
	0.81	2.06	
Üstten alta genişleyen	0.67	1.31	0.78
	0.81	1.26	0.74

Tabii şekle göre oyulma derinliğinin değişiklik göstermesinin diğer bir sebebi de ayakların farklı geometrik şekillere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 3.2 bunu destekler mahiyette olup, farklı şekilli köprü ayaklarında şekil faktörlerini bize göstermektedir.

Tablo 3.2.: Akım doğrultusuna dik ayaklar için şekil faktörleri.

Ayak Şekli	b/L_b	K_s
Dairesel	.	1
Kare	1	1.22
Dikdörtgensel	1/3	1.08
	1/5	0.99
Yarım uçlu dikdörtgensel	1/3	0.90
Yarım daire veya kama	1/5	0.86

Bu tablolar Breusers ve Raudkivi (1991)’nin deneyleri sonucu bulunan şekil faktörleridir. Dairesel kesiti olmayan ayakların akıma mutlaka dik yapılması

gerektiğinin en önemli sebebi oyulmanın direkt olarak ayak genişliğinden değil, yaklaşan akıma dik olan kesimin genişliğinden etkilenmesinden dolayıdır. Örneğin yaklaşan akım ayağa bir θ açısıyla geldiğinde, bu akıma dik kesimin uzunluğu;

$$b_t = b \cos \theta + L_b \sin \theta \quad (3.2)$$

olmaktadır. Burada b ayak genişliği, L_b ayak boyudur. Buna göre Tablo 3.1 te görülen şekil faktörleri de Richardson ve Davis (2001)' in tanımladıkları bir düzeltme katsayısı ile değişikliğe uğramaktadır. Bu katsayı;

$$K_\theta = (b * \cos \theta + \left(\frac{L_b}{b}\right) * \sin \theta)^{0,65} \quad (3.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu da oyulmanın direkt olarak artması anlamına gelmektedir. Bunun haricinde ayak büyüklüğünün malzeme büyüklüğü ile ilişkilendirilmesi (b/D_{50}) konusu bir çok araştırmacının araştırma konusu olmuştur. Ettema (1980), bu ilişkilendirmenin oyulma ile değişimini incelemiştir. (b/D_{50})<50 olduğu zamanlarda zemin malzemesinin kalınlığı fazla olmakta ve bu yaklaşan akım kaynaklı çevrintileri belli bir oranda nötrleştirmektedir. Ama (b/D_{50})≥50 olduğunda oyulma derinliği belli bir değerde artmakta ve belli bir zaman sonra zemin malzeme boyutundan tamamen bağımsızlaşmaktadır.

3.2. Daire Kesitli Ayaklar için Çıkarılan Oyulma Formülleri:

Mia&Nago(2003) deneylerinde köprü ayakları arkasında oluşan oyulma derinliğinin dairesel kesitli köprü ayağı için çıkarılmış formülünün açılımı yapılmak istenildiği zaman Yanmaz&Altınbilek (1991) deneylerindeki t anındaki oyulma çukuru hacmi Q_{vt} önerisinden yola çıkılmıştır. Bu öneriye göre;

$$Q_{vt} = \pi \int_0^{dst} x^2 dy - \frac{\pi D^2 d_{st}}{4} \quad (3.4)$$

Şeklinde gösterilebilir. Tasarlanan deney düzeneğine göre;

$$x = \frac{D}{2} + \frac{y}{\tan \theta} \quad (3.5)$$

olmaktadır. Buradan hareket edilerek (3.4) denkleminin çözümü yapılırsa;

$$Q_{vt} = \pi \int_0^{dst} \left(\frac{D}{2} + \frac{y}{\tan \theta} \right)^2 dy - \frac{\pi D^2 d_{st}}{4} \quad (3.6)$$

$$Q_{vt} = \pi \int_0^{dst} \left(\frac{D^2}{4} + \frac{D * y}{\tan \theta} + \frac{y^2}{\tan^2 \theta} \right) dy - \frac{\pi * D^2 * d_{st}}{4} \quad (3.7)$$

ve içindeki ifadenin integrali alındığında;

$$Q_{vt} = \frac{\pi D^2 d_{st}}{4} + \frac{\pi D d_{st}^2}{2 \tan \theta} + \frac{\pi d_{st}^3}{3 \tan^2 \theta} - \frac{\pi D^2 d_{st}}{4} \quad (3.8)$$

$$Q_{vt} = \frac{\pi D d_{st}^2}{2 \tan \theta} + \frac{\pi d_{st}^3}{3 \tan^2 \theta} \quad (3.9)$$

ifadesi elde edilir. Elbetteki bu belirli bir genişlikteki oyulma çukuru hacmidir. Bu ifadeyi eğer birim oyulma genişliğine indirmek istenirse deneysel düzeneğe göre ;

$$n = \frac{2d_{st}}{\tan \theta} \quad (3.10)$$

ifadesine bölünmesi gereklidir. Buna göre birim genişlikteki oyulma çukurunun hacmi;

$$q_{vt} = \left(\frac{\frac{\pi * D * d_{st}^2}{2 * \tan \theta} + \frac{\pi * d_{st}^3}{3 * \tan^2 \theta}}{\frac{2 * d_{st}}{\tan \theta}} \right) \quad (3.11)$$

işleminin çözümünden;

$$q_{vt} = \frac{\pi * D * d_{st}}{4} + \frac{\pi * d_{st}^2}{6 * \tan \theta} \quad (3.12)$$

ifadesi elde edilir . Bizim burada aradığımız oyulma derinliği olduğuna göre son bulunan birim genişlikteki oyulma çukuru hacmi ifadesinden d_{st}^2 ifadesini yalnız bırakırsak yani her iki tarafı da $6 * \tan \theta / \pi$ ifadesiyle çarparsak;

$$d_{st}^2 + \frac{3 * \tan \theta * D}{2} * d_{st} - \frac{6 * \tan \theta * q_{vt}}{\pi} = 0 \quad (3.13)$$

ifadesi elde edilir Bu ifade ikinci dereceden bir denklem olup bu denklemin kökleri bize oyulma derinliğini verecektir.Buna göre;

$$d_{st1,2} = \left(\frac{-3 * D * \tan \theta}{4} \pm \sqrt{\frac{9 * \tan^2 \theta * D^2}{16} + \frac{6 * \tan \theta * q_{vt}}{\pi}} \right) \quad (3.14)$$

ifadelerinden sonuçta;

$$d_{st} = \left(\frac{-3 * D * \tan \theta}{4} + \sqrt{\frac{9 * \tan^2 \theta * D^2}{16} + \frac{6 * \tan \theta * q_{vt}}{\pi}} \right) \quad (3.15)$$

ifadesi elde edilebilir. Bu ifade dairesel kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği ifadesidir.

Tüm bu formüllerde;

d_{st} = Oyulma derinliği.

D = Dairesel kesitli köprü ayağının çapı.

θ = Sürüntü malzemesinin kayma açısı.

q_{vt} = Birim genişlikteki oyulma çukuru hacmi.

olarak tanımlanmaktadır.

3.3. Kare Kesitli Ayaklar için Çıkarılan Oyulma Formülleri:

Oyulmanın kare kesitli bir köprü ayağında nasıl olabileceğine bakalım. Karenin bir kenarının uzunluğuna a dersek;

$$Q_{vt} = \pi \int_0^{dst} x^2 dy - a^2 d_{st} \quad (3.16)$$

Şeklinde gösterilebilir. Tasarlanan deney düzeneğine göre;

$$x = \frac{a}{2} + \frac{y}{\tan \theta} \quad (3.17)$$

olmaktadır. Buradan yola çıkılarak yukardaki matematiksel önermenin çözümü yapılırsa;

$$Q_{vt} = \pi \int_0^{dst} \left(\frac{a}{2} + \frac{y}{\tan \theta} \right)^2 dy - a^2 d_{st} \quad (3.18)$$

$$Q_{vt} = \pi \int_0^{dst} \left(\frac{a^2}{4} + \frac{a * y}{\tan \theta} + \frac{y^2}{\tan^2 \theta} \right) dy - a^2 d_{st} \quad (3.19)$$

ve içteki ifadenin integrali alındığında;

$$Q_{vt} = \frac{\pi * a^2 * d_{st}}{4} + \frac{\pi * a * d_{st}^2}{2 * \tan \theta} + \frac{\pi * d_{st}^3}{3 * \tan^2 \theta} - a^2 d_{st} \quad (3.20)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade birim genişlikteki hacime indirgenirse 3.20 denklemi;

$$q_{vt} = \left(\frac{\frac{\pi * a^2 * d_{st}}{4} + \frac{\pi * a * d_{st}^2}{2 * \tan \theta} + \frac{\pi * d_{st}^3}{3 * \tan^2 \theta} - a^2 * d_{st}}{\frac{2 * d_{st}}{\tan \theta}} \right) \quad (3.21)$$

$$q_{vt} = \left(\frac{\pi * a^2 * \tan \theta}{8} + \frac{\pi * a * d_{st}}{4} + \frac{\pi * d_{st}^2}{6 * \tan \theta} - \frac{a^2 * \tan \theta}{2} \right) \quad (3.22)$$

d_{st}^2 ifadesini (3.22) bağıntısında yalnız bırakırsak yani her iki tarafı $6 \tan \theta / \pi$ ile çarparsak;

$$\frac{6 * \tan \theta}{\pi} * q_{vt} = \frac{6 * \tan \theta}{\pi} * \left(\frac{\pi * a^2 * \tan \theta}{8} + \frac{\pi * a * d_{st}}{4} + \frac{\pi * d_{st}^2}{6 * \tan \theta} - \frac{a^2 * \tan \theta}{2} \right) \quad (3.23)$$

(3.23)denklemini daha açık bir şekilde yazarsak;

$$\frac{6 * \tan \theta}{\pi} * q_{vt} = \frac{3 * a^2 * \tan^2 \theta}{4} + \frac{3 * a * \tan \theta * d_{st}}{2} + d_{st}^2 - \frac{3 * a^2 * \tan^2 \theta}{\pi} \quad (3.24)$$

(3.24) denklemini düzenlersek;

$$d_{st}^2 + \frac{3 * a * \tan \theta}{4} - \frac{3 * a^2 * \tan^2 \theta}{\pi} - \frac{6 * q_{vt} * \tan \theta}{\pi} = 0 \quad (3.25)$$

Sonuç itibariyle kare kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği ifadesi;

$$d_{st} = \sqrt{\left(\frac{9 * a^2 * \tan^2 \theta}{16} + \frac{6 * q_{vt} * \tan \theta}{\pi} + \frac{3 * a^2 * \tan^2 \theta}{\pi} - \frac{3 * a^2 * \tan^2 \theta}{4} \right)} - \frac{3 * a * \tan \theta}{4} \quad (3.26)$$

olarak bulunur. Tüm bu denklemlerde;

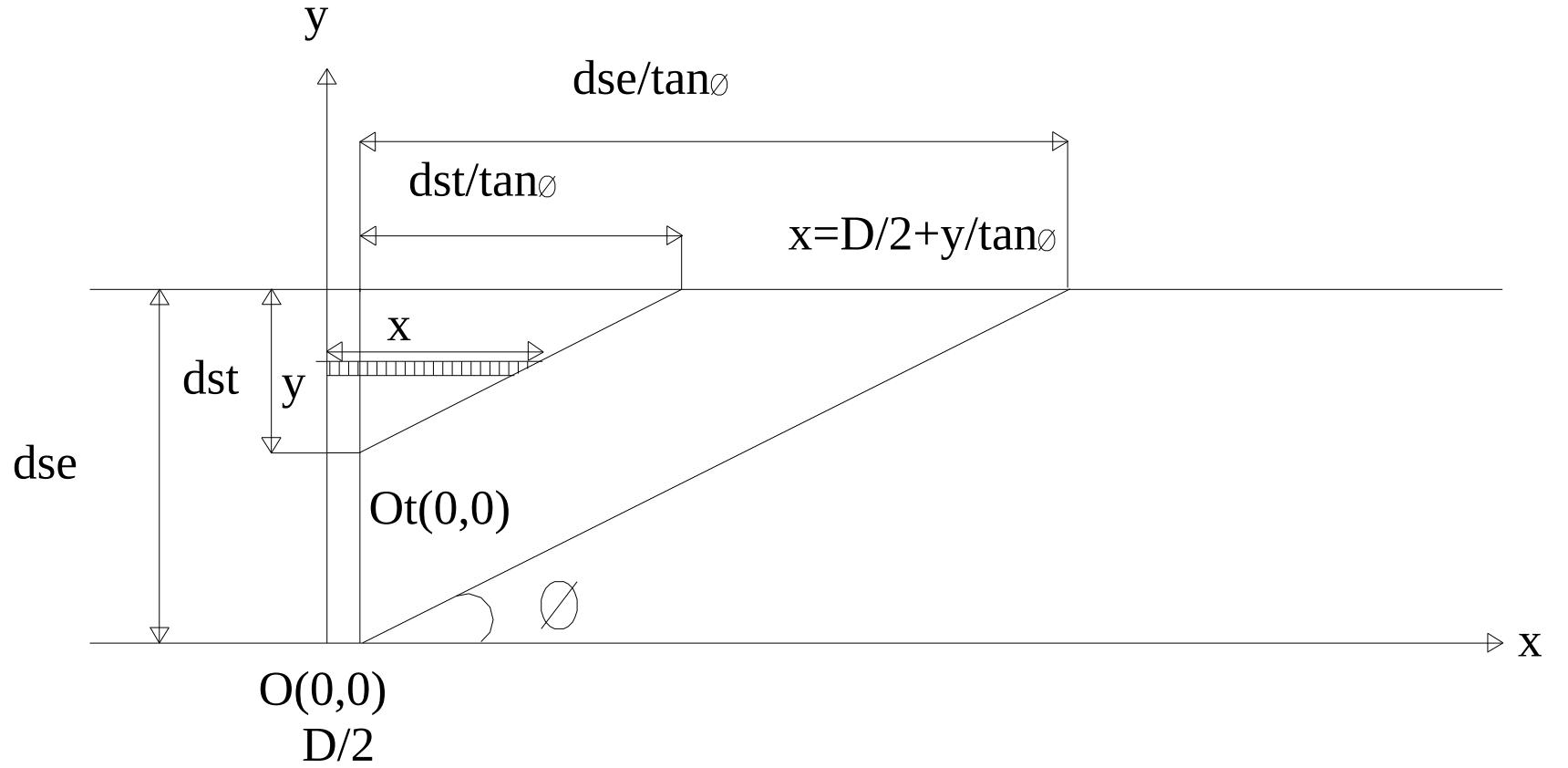
d_{st} = Oyulma derinliği.

a = Kare kesitli köprü ayağının çapı.

θ = Sürüntü malzemesinin kayma açısı.

q_{vt} = Birim genişlikteki oyulma çukuru hacmi.

olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1 de oyulma çukuru için idealleştirilmiş tanımsal çizim gösterilmektedir.



ŞEKİL 3.1. : Köprü ayaklarındaki oyulma çukuru için idealleştirilmiş tanımsal çizim.(Mia ve Nago (2003))

3.4. Daire ve Kare Kesitli Köprü Ayakları İçin Bulunan Oyulma Derinliği Değerleri:

Köprü ayaklarını incelemek için yazılmış olan ilk programda birim oyulma çukuru hacimleri değerleri $q_{vt} = 0.5, 1, 2, 3, 4, 5$ gibi sabit değerler alınarak bu değerlerin kare ve daire kesitli köprü ayaklarında oyulma derinliklerini nasıl etkilediği görülmektedir. Burada daire kesitli ayağın çapı ve kare kesitli ayağın kenarı 40 ile 80 arasında alınmış olup, her 5 cm'lik artışta oluşan ölçümler görülmektedir. Bu ölçümler hız ve zamandan bağımsızdır.

Tablo 3.3.: Kare ve daire kesitli köprü ayaklarında oluşan oyulma değerleri.

q_{vt} (m)	D,a (m)	d_{st} (Kare)	d_{st} (daire)
0.5	0.40	0.587	0.501
	0.45	0.593	0.515
	0.50	0.599	0.531
	0.55	0.607	0.547
	0.60	0.615	0.563
	0.65	0.625	0.580
	0.70	0.636	0.598
	0.75	0.648	0.617
	0.80	0.661	0.637
1	0.40	0.879	0.813
	0.45	0.889	0.831
	0.50	0.900	0.849
	0.55	0.912	0.868
	0.60	0.925	0.887
	0.65	0.939	0.907
	0.70	0.954	0.927
	0.75	0.970	0.948
	0.80	0.987	0.969

Tablo 3.3.'ün devamı

2	0.40	1.322	1.273
	0.45	1.337	1.294
	0.50	1.352	1.314
	0.55	1.367	1.335
	0.60	1.384	1.356
	0.65	1.419	1.422
	0.70	1.458	1.445
	0.75	1.762	1.743
	0.80	1.802	1.765
3	0.40	1.674	1.633
	0.45	1.690	1.654
	0.50	1.707	1.676
	0.55	1.725	1.698
	0.60	1.743	1.720
	0.65	1.762	1.743
	0.70	1.782	1.789
	0.75	1.802	1.812
	0.80	1.823	2.075
4	0.40	1.974	1.698
	0.45	1.992	1.939
	0.50	2.010	1.961
	0.55	2.029	1.983
	0.60	2.048	2.028
	0.65	2.068	2.051
	0.70	2.089	2.075
	0.75	2.110	2.098
	0.80	2.131	2.122
5	0.40	1.992	2.209
	0.45	2.241	2.232
	0.50	2.279	2.254
	0.55	2.298	2.277

	0.60	2.318	2.300
	0.65	2.339	2.324
	0.70	2.360	2.347
	0.75	2.382	2.371
	0.80	2.404	2.396

Bu değerlerin ışığında elde edilen Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'e göre çıkarılan bazı formüller mevcuttur.

Kare kesitli ayaklar için;

$$d_{st}=2.5547a^{0.2068} \quad (q_{vt}=5) \quad (3.28)$$

$$d_{st}=2.1741a^{0.1104} \quad (q_{vt}=4) \quad (3.29)$$

$$d_{st}=1.8630a^{0.122} \quad (q_{vt}=3) \quad (3.30)$$

$$d_{st}=1.8203a^{0.4154} \quad (q_{vt}=2) \quad (3.31)$$

$$d_{st}=1.0143a^{0.1662} \quad (q_{vt}=1) \quad (3.32)$$

$$d_{st}=0.6768a^{0.1686} \quad (q_{vt}=0.5) \quad (3.33)$$

Daire kesitli ayaklar için;

$$d_{st}=2.4489D^{0.1169} \quad (q_{vt}=5) \quad (3.34)$$

$$d_{st}=2.2838D^{0.2563} \quad (q_{vt}=4) \quad (3.35)$$

$$d_{st}=2.0098D^{0.2573} \quad (q_{vt}=3) \quad (3.36)$$

$$d_{st}=1.8231D^{0.4558} \quad (q_{vt}=2) \quad (3.37)$$

$$d_{st}=1.0163D^{0.2538} \quad (q_{vt}=1) \quad (3.38)$$

$$d_{st}=0.6787D^{0.3467} \quad (q_{vt}=0.5) \quad (3.39)$$

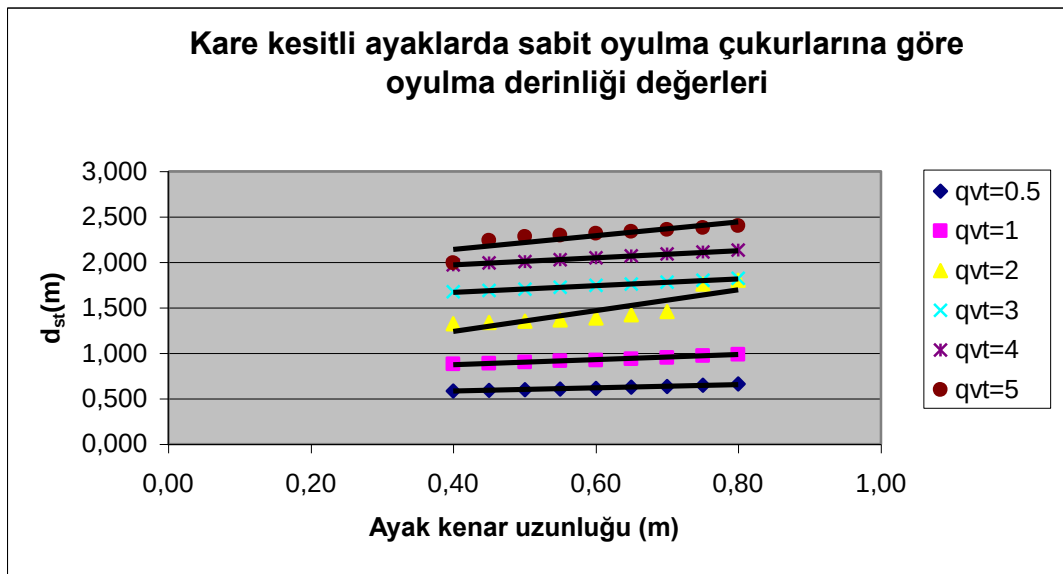
Bu farklı birim oyulma çukuru hacmi (q_{vt}) değerlerine göre bulunan değerleri göstermektedir. Bu değerler sentezlendiği zaman formüller daire ve kare kesitli köprü ayakları için sırasıyla (3.40) ve (3.41) 'de verilmektedir.

$$d_{se}= 1,5549D^{0,2811} \quad (3.40)$$

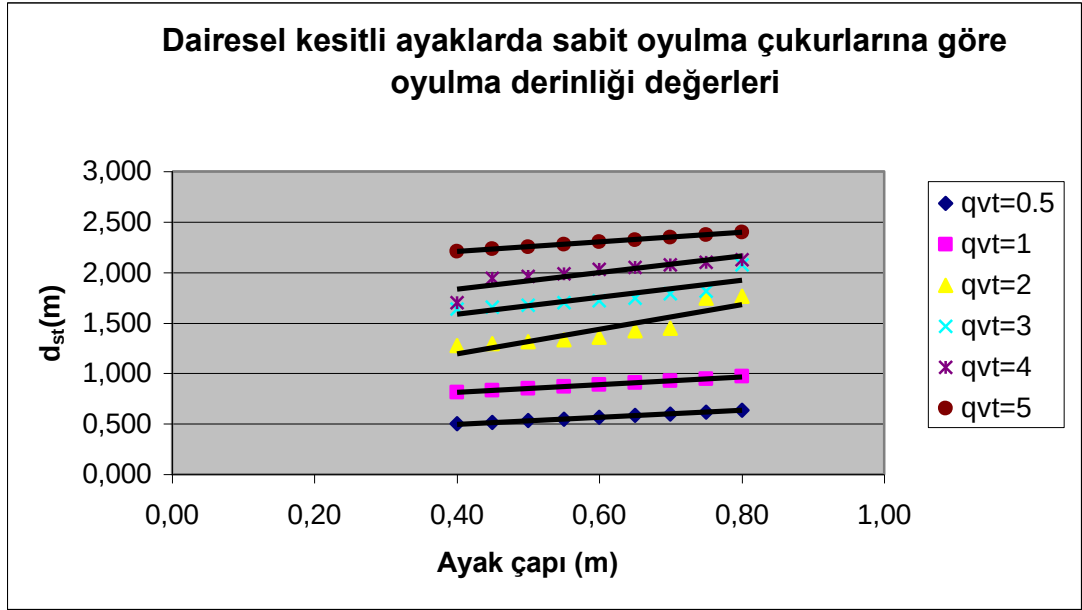
$$d_{se}= 1,532a^{0,1984} \quad (3.41)$$

(3.40) eşitliği Tablo 2.2'de daha önceden oyulma derinliği ayak çapı arasındaki bulunmuş eşitliklerle karşılaştırıldığında Üç (1979) ve Başak (1975) değerlerine yakın çıktığı görülmektedir. Bu yakınlık sayesinde, bulduğumuz (3.40) eşitliği hakkında mantıklı bir eşitlik olduğu kanısına varmak mümkündür. Bundan dolayı (3.41) eşitliği de kare kesitli köprü ayağında oyulma ve kenar bağıntısı olarak sunulmaktadır.

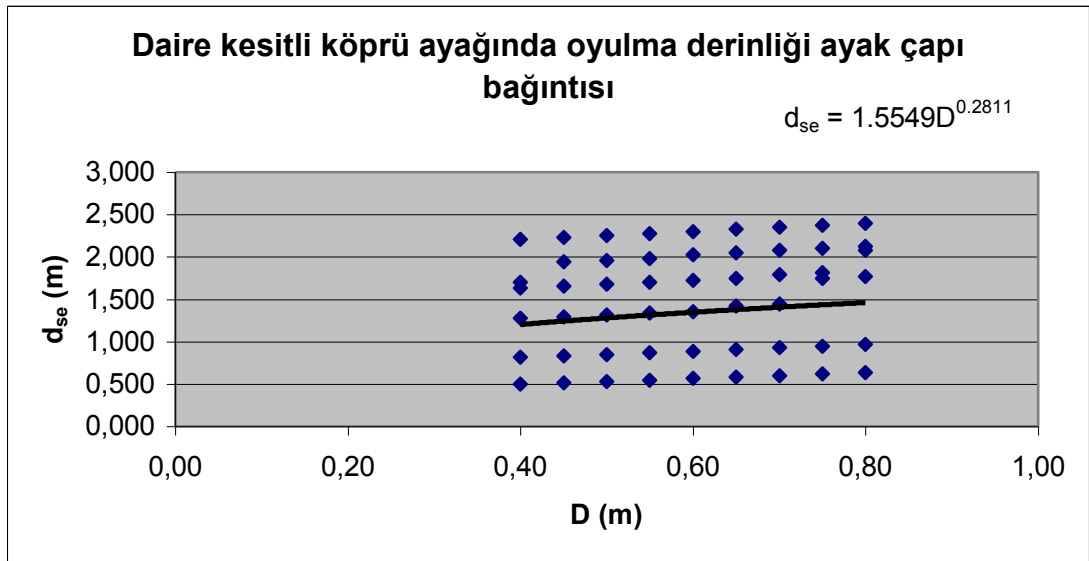
Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 sırasıyla kare ve daire kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değişim grafiklerini bize göstermektedir.



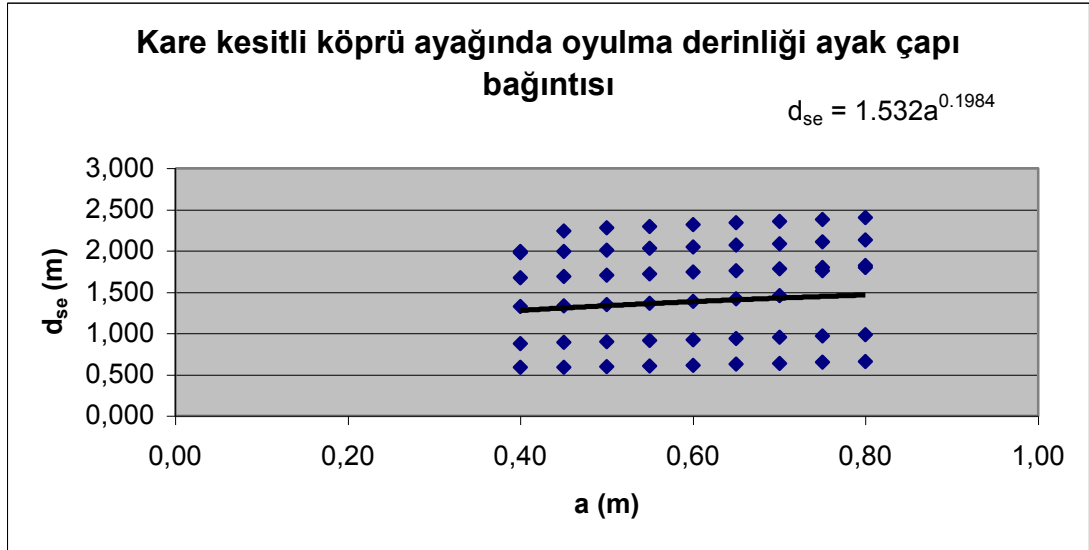
Şekil 3.2 : Kare kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerleri.



Şekil 3.3 : Daire kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerleri.



Şekil 3.4 : Daire kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerlerinden bulunan nihai eşitlik grafiği.



Şekil 3.5 : Kare kesitli köprü ayakları için oyulma derinliği değerlerinden bulunan nihai eşitlik grafiği.

3.5. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

Bu grafiklere, tablolara ve formüllere göre şu sonuçlara varılmıştır:

- 1-) Veriler kontrol edildiği zaman oyulma derinliği değerleri kare kesitli ayakların kenar uzunluğu daire kesitli ayakların çapına eşit olduğu zaman her zaman kare kesitlilerde büyük çıkmıştır.
- 2-) Kare kesitli köprü ayaklarındaki köşe ve kenarların oyulmanın artmasında büyük rolü vardır.
- 3-) Oyulma derinliği çok olan kesit her zaman akımın yapısını en çok bozan kesittir.
- 4-) Suyun hızı sonucu oluşan kayma gerilmelerinin daire kesitli köprü ayakları boyunca her yere birbirinin aynı etkiyi yaparken; kare kesitli köprü ayaklarının geometrik şekli dolayısıyla kenar ve köşelere birbirlerinden farklı etkiler oluşturmaktadır.
- 5-) Oyulma çukurunun aşağıya doğru küçülen bir kesik koni şeklinde olması sebebiyle aynı çukur hacmi mevcutken derinliğinde kare kesitli köprü ayak temelleri daire kesitli köprü ayak temellerine göre daha derinde olduğu tespit edilmiştir. Bu

durum hem ekonomik olmamakta hem de yapısal bakımdan zorluklara sebep olmaktadır.

6-) Bunun haricinde oyulma çukurunun hacminin büyüdükçe köprüyü bir bütün olarak düşündüğümüzde belli bir zaman sonra kanalda yapılacak iyileştirmelerde de başarısızlık oranının artmasına sebep olacaktır.

7-) Ayak çapı veya ayak kenarı arttıkça oyulma derinliğinin her iki kesit için de artacağı aşıkardır.

8-) Oyulma sadece ayak kesitlerine bağlı olmadığı, aynı zamanda sürüntü malzemesinin büyüklüğüne göre de değiştiği, yapılan incelemelerde sürüntü malzemesinin çapı arttıkça oyulmanın azaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Baker, C.J.**, 1979, The Laminar Horseshoe Vortex, *J. Fluid Mechanics*, Vol. **95**, Part 2, 347-367
- Baker, C.J.**, 1991, The Oscillation of Horseshoe Vortex Systems, Trans. ASME I: *J. Fluids Engineering*, Vol. **113**, 489-495.
- Baker, R.A.**, 1986, Local Scour at Bridge Piers at Non- Uniform Sediment, Auckland, New Zealand.
- Başak, V.**, 1975, Doğrusal Eksenli Bir Kazık Grubunda Oluşan Yerel Oyulma Derinlikleri, *DSİ Araştırma Dairesi*.
- Bozkuş,Z. and Yıldız,O.**, 2004, Effects of Inclination of Bridge Piers on Scour Depth, *Journal of Hydraulic Engineering*, 827-832.
- Breusers,H.N.C.,and Raudkivi,A.J.**, 1991, “Scouring”, *Balkema*, Rotterdam, Netherlands
- Chee.**, 1982. Live Bed Scour at Bridge Piers, Rep. No. **290**, University of Auckland, New Zealand.
- Chiew,Y.M.**, 2004. Local Scour and Riprap Stability at Bridge Piers in a Degrading Channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 218-226.
- Chiew.Y.M**, 1984. Local scour at bridge piers, Rep. No. **290**, University of Auckland, New Zealand.
- Etterna, R.**, 1980, Scour at Bridge Piers, *School of Engineering*, Auckland, New Zealand.
- Etterna,R., Mostafa,E.A.,Melville,B.W. and Yassin,A.A.**, 1998, Local Scour at Skewed Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 756-759.
- Etterna,R.,Melville,B.W.,and Barkdoll,B.**, 1998. Scale Effects in Pier Scour Experiments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 639-642.
- Froehlich, D.C.**, 1988, Analysis of onsite Measurements of Scour at Piers,ASCE *National Hyd. Eng. Conf.*, ASCE, Rescon.
- Hancu,S.**, 1971, Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles du pont, Proc. IAHR, Vol. **3**, pp.299.
- Johnson,P.A. and Niegzoda,S.L.**, 2004, Risk Based Method for Selecting Bridge Scour Countermeasures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121-129.
- Johnson,P.A.**, 1999. Fault Tree Analysis of Bridge Failure Due to Scour and Channel Instability, *Journal Infrastructure Systems*, 35-41.

- Johnson,P.A.,Hey,R.D.,Tessier,M.,and Rosgen,D.L.,** 2001. Use of Vanes for Control Of Scour At Vertical Wall Abutments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 772-778.
- Keutner,C.,** 1932, The flow around the bridge piers of different shapes and its effects on the river bed, *Die Bautechnik Vol. 10*, No. 121, Germany.
- Kohli,A.,** 1998, Kolk an Gebunden in Überschwemmungsebenen, *PhD thesis* 12592, Zürich, Switzerland.
- Lagasse,P.F.,Thompson, P.L. and Sabol, S.A.,** 1995, Guarding against scour, *Civ. Engnrng*, ASCE, 56-59.
- Larras, J.,** 1972. Hydrauliques et Granulats, Paris, France.
- Laursen, E.M. and Toch, A.** 1956, Scour around Bridge Piers and Abutments, Bull.4, Iowa Hyw.Res. Board, Ames, Iowa.
- Melville,B. and Raudkivi,A.J.,** 1996, Effects of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, 203-209.
- Melville,B.W.,and Chiew,Y.M.,** 1999, Time scale for Local Scour at Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125-136.
- Melville,B.W.,and Sutherland,A.J.,** 1989,Design Method for Local Scour at Bridge Piers,, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1210-1226.
- Mia,F.,and Nago,H.,**2003. Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier, *Journal of Hydraulic Engineering*, 420-427.
- Nicollet, C.,** 1971, Sur problem des affouillements au pied de pont cylindriques, Paris, France.
- Olivetto,G. and Hager,W.H.,** 2002, Temporal Evolution of Clear Water Pier and Abutment Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, 218-226.
- Posey, C.J.,** 1949, Why bridges fail in flood, *Civ. EngRg.*, Vol.19, pp. 42-90.
- Qadar,A.,** 1981, The vortex scour mechanism at bridge piers, *Proc.Inst. Civ. Engineering*, Part 2, pp.739-757.
- Raudkivi, A.J.,** 1986, Functional trends of Scour at Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1-13.
- Richardson, E.V. and Davis S.R.,** 1995, Evaluating Scour at Bridges, 3rd Edition, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., U.S.A.
- Shen,H.W., Schneider, V.R., and Karaki, S.S.,** 1966, Mechanics of Local Scour, Colorado, USA.

- Sümer, B. M., and Fredsoe, J.,** 2002, The mechanics of scour in the marine environment, *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, Singapore.
- Sümer, B. M., Çokgör,Ş. and Fredsoe, J.,** 2001, Suction Removal of Sediment from Armour Blocks, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. **127**, No. 4.
- Tison, L.J.,** 1940, Erosion author des pilles en cylindriques circulaires, Paris, France.
- Uyumaz, A.,** 1988, Scour Downstream of Vertical Gate, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.114.
- Üç,S.,** 1979, Doğrusal Eksen üzerine sıralanmış Dairesel Köprü Ayakları Etrafında oluşan Maksimum denge oyulma derinlikleri için bir ampirik formülün elde edilmesi, *İDMMA dergisi*, Vol.1, sayfa 132-151.
- Üç,S. and Ağaçoğlu, H.,** 2001, Relationship of Cylindrical Bridge Pier Scour Depth with Shedding Frequencies of Vortex and Reynolds Number, *Yıldız Technical University*, Yıldız, İstanbul.
- Üç,S. ve Ağaçoğlu,H.,** 1999, Köprü ayaklarında oyulma derinliklerinin belirlenmesi, *ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi*, Ankara.
- Üç,S.,** 1988, The Effect of Vortex shedding Frequency on Scour Depth, *Ph. D. Dissertation*, pp.93, Yıldız Technical University, İstanbul.
- Yalın,S.,** 1972, Mechanics of Sediment Transport, *Pergamon Pres Ltd.*, Headington Hill Hall, Oxford, England.
- Yanmaz, M.A. and Altınbilek, H.D.,** 1991, Study of Time Dependent Local Scour around Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1247-1268.
- Yanmaz, M.A.,** 2002, Köprü Hidroliği, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık*, İnönü Mah., ODTÜ kampüsü, Ankara, Türkiye.

EK1:
KARE VE DAİRE KESİTLİ AYAKLARDA OYULMA
DERİNLİĞİ,OYULMA ÇUKURU HACİMLERİ İÇİN YAZILMIŞ
PROGRAMLAR:

1. Daire kesitli ayakta oyulma derinliği hesabı:

```
program dakka01
real :: qvt,pi,dst,T,x
integer :: D,i
pi=3.14
T=0.196*pi
do D= 40,80,5
do i=1,6,1
if (i==1) then
qvt=0.5
end if
if (i==2) then
qvt=1
end if
if (i==3) then
qvt=2
end if
if (i==4) then
qvt=3
end if
if (i==5) then
qvt=4
end if
if (i==6) then
qvt=5
end if
x=tan(T)
dst=-3*x*D/4+((9*x**2*(D)**2/16)+(6*x*qvt/pi))**0.5
print *,D,dst
```

```

open (100,file="C:\WINDOWS\Desktop\programlar\dak1.txt",status="old",&
&,action="write")
write(100,50)D,dst
50 format(1i6, 1f15.7, f15.5)
end do
end do
end program dakkao1

```

2. Kare kesitli ayakta oyulma derinliği hesabı:

```

program kkkao1
real :: qvt,pi,dst,T,x
integer :: a,i
pi=3.14
T=0.196*pi
do a= 40,80,5
do i=1,6,1
if (i==1) then
qvt=0.5
end if
if (i==2) then
qvt=1
end if
if (i==3) then
qvt=2
end if
if (i==4) then
qvt=3
end if
if (i==5) then
qvt=4
end if
if (i==6) then
qvt=5
end if

```

```

x=tan(T)
dst=-3*x*a/4+((4*x**2*(a)**2/pi)+(6*x*qvt/pi)-(3*x**2*(a)**2/16))**0.5
print *,a,dst
open (100,file="C:\WINDOWS\Desktop\programlar\kak1.txt",status="old",&
&,action="write")
write(100,50)a,dst
50 format(1i6, 1f15.7, f15.5)
end do
end do
end program kkkao1

```

ÖZGEÇMİŞ

M. Levent Yurtseven 1982 yılında Erzurum’da doğdu. İlk öğrenimini Erzurum’da, Orta ve Lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 1999 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayarak, 2003 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliğinde yüksek lisans eğitimine başladı.