

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Düresel Köp. Ayaç Etr. Mak. Öyu. 180°lik
bir Aka. Kıv. Boy. Değ. Araş.

DOKTORA TEZİ

Yalçın Yüksel

1997

150
118

2000

T.C.
YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

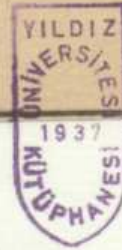
DAİRESEL KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDAKİ
MAKSİMUM OYULMANIN 180°'lik BİR AKARSU KIVRIMI
BOYUNCA DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ
YÜK MÜH YALÇIN YÜKSEL

İSTANBUL 1987

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
GENEL KİTAPLIĞI

Kot : R 150
Alındığı Yer : Fen Bil. Ens. 118
Tarih : 24.12.1988
Fatura :
Fiatı : 5000 TL
Ayniyat No : 1/24
Kayıt No : 45930
UDC : 378.242
Ek : 624.074



20



T.C.

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİRESEL KÖPRÜ AYAKLARI ETRAFINDAKİ
MAKSİMUM OYULMANIN 180°'lik BİR AKARSU KIVRIMI
BOYUNCA DEĞİŞİMİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ
YÜK MÜH YALÇIN YÜKSEL

İSTANBUL 1987



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET

SUMMARY

SEMBOLLER

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1

1.1. Köprü Ayaklarında Meydana Gelen Oyulma Olayının Önemi
ve Çalışma Konusunun Belirlenmesi

1

1.2. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

2

2. BÖLÜM

SABİT TABANLI KIVRIMLI KANALLARDA AKIM VE KÖPRÜ AYAKLARININ
AKIM ALANINA ETKİSİ

4

2.1. Kıvrımlı Kanallarda Akım

4

2.1.1. Kıvrımlı Kanallarda Hız ve Basınç Dağılımı

9

2.2. Köprü Ayağı Etrafındaki Akım Alanının Tanıtılması

14

2.2.1. Köprü Ayağı Civarında Hız Dağılımı

15

2.2.2. Köprü Ayağı Civarında Basınç Dağılımı

19

2.2.3. Köprü Ayağı Civarında Oluşan Vorteks Sistemleri

20

2.2.3.1. Atnalı Vorteks Sistemi

24

2.2.3.2. Art-İz Vorteks Sistemi

26

3. BÖLÜM

KIVRIMLI KANALLARDA KATI MADDE HAREKETİ VE KÖPRÜ
AYAKLARININ KATI MADDE HAREKETİNE ETKİSİ

28

3.1. Sürüntü Maddesi Hareketi

28

3.2. Taban Şekillerinin Oluşması ve Taban Direnci

30

3.3. Kıvrımlı Kanallarda Katı Madde Hareketi

32

3.4. Köprü Ayaklarında Meydana Gelen Oyulma ve
Bu Oyulmaya Etkili Parametreler

38

3.4.1. Oyulma Olayının Başlaması ve Gelişmesi

38

3.4.2. Oyulmaya Etkili Parametreler

42



4. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4.1. Giriş	47
4.2. Deney Düzeni	47
4.3. Savak Anahtar Eğrisinin Elde Edilmesi	52
4.4. Deneylerde Kullanılan Taban Malzemesinin Özelliklerinin Belirlenmesi	54
4.5. Deneylerde Kullanılacak Köprü Ayaklarının Seçimi	55
4.6. Deney Programı	55

5. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMAYA AİT PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ	57
5.1. Oyulma Parametrelerinin Analizi	57
5.2. Boyut Analizi	59
5.3. Taban Malzemesinin Kritik Hızının Belirlenmesi	61
5.4. Deneylerin Yapılması	66
5.5. Doğrusal Kanaldaki Oyulma Olayının Araştırılması	66
5.6. Kıvrımlı Kanalda Oyulmanın Araştırılması	68
5.6.1. Kıvrımın Ekseni Boyunca Oyulmanın Değişimi	69
5.6.2. Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Oyulmanın Değişimi	71
5.6.3. Kıvrımın İç Kenarı Boyunca Oyulmanın Değişimi	76
5.6.4. Kesitten Kesite Oyulmaların Değişiminin İncelenmesi	80
5.7. Kıvrımlı Kanalda Taban Topoğrafyası ile Oyulma Arasındaki İlişki	85

6. BÖLÜM

SONUÇLAR	88
REFERANSLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	

Kıvrımlı kanallarda kesim ile, iç ve dış kenarı boyunca yapılan ölçülerden, oyulma hızının kıvrım boyunca değişiminin, kıvrımdaki oyulma taban profiline benzer bir değişim gösterdiği belirlenmiştir.

ÖZET

Akarsular üzerine inşa edilen köprüler, ayaklarında oluşan yerel oyulmalar sonucunda, stabiliteleri bozularak yıkılırlar. Bu bakımdan, yerel oyulma derinliğinin tayini projelendirme açısından önemlidir. Bu konuda çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen tatmin edici bir sonuca varılamamıştır. Bunun nedeni de, genellikle doğrusal eksenli kanallarda yapılan çalışmalarda bile, olayda çok fazla parametrenin etkili olmasıdır.

Bu çalışmanın ele alınmasında, akarsu kıvrımlarına yerleştirilmiş köprü ayağı etrafındaki yerel oyulmalar hakkında yeterli bir bilginin mevcut olmaması, büyük bir etken olmuştur.

Bu çalışmada, kıvrıma yerleştirilmiş köprü ayağı etrafındaki akım alanında meydana gelen değişiklikler incelenerek, maksimum denge oyulma derinliğinin kıvrım boyunca değişimi ve kıvrımda sekonder akımın etkisiyle oluşacak taban deformasyonlarının yerel oyulmaya etkisi araştırılmıştır. Bu sonuçlar değerlendirilerek, kıvrımlardaki maksimum denge-oyulmasının, doğrusal kanaldaki maksimum denge-oyulması ile olan ilişkisi incelenmiştir.

Yerel oyulma çukurunun derinliği, ayağın akım yönünde görülen izdüşüm genişliğinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle kıvrımda, esas akımın doğrultusundan etkilenmeyecek, farklı çaplarda dairesel ayaklar kullanılmıştır. Kıvrımlı kanalda oyulma derinliğinin, ayak çapına ve kıvrım merkez açısına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

Kıvrımlı kanalda, değişik çaplı ayaklar ele alınarak, yapılan ölçüm sonuçlarından, kıvrımdaki oyulma derinliğinin doğrusal kanaldakine oranının ayak çapından bağımsız olduğu bulunmuştur. Böylece, doğrusal eksenli kanaldaki oyulma değerlerini kullanarak, kıvrımlı kanallardaki yerel oyulma derinliğinin değişimini veren bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Kıvrımlı kanalın eksenli ile, iç ve dış kenarı boyunca yapılan ölçümlerden, yerel oyulmanın kıvrım boyunca değişiminin, kıvrımdaki orijinal taban profiline benzer bir değişim gösterdiği belirlenmiştir.



SUMMARY

The bridges built over stream flows are failed by spoiling their stabilities due to local scour occurring around their piers. For this reason, the determination of local scouring depth is important from stand point of designing. It has not been reached a satisfactory result yet although a lot of researches, have been done in this subject. Because there are many parameters which effect to the problem even in the case of studies in straight channels.

The shortage of available data about local scourings around the piers of the bridges which are located on the curves of meandering channels has become a main reason in choosing this problem as a research study.

In this study, analysing the changes occurring in the flow field around bridge piers located in the curve, the change of maximum equilibrium-scouring depth along the curve, and the effect of bed-deformation which will occur with influence of the secondary flow in the curve to local scouring, were investigated. The relation between maximum equilibrium-scouring in curves and maximum equilibrium-scouring in straight channel was analysed by evaluating these results.

The depth of local scouring pit is a function of the projection of pier-width which is seen in the direction of flow. For this reason in the curve, circular piers with different diameters were used, such that they will not be influenced by direction of the main flow. It was found that the scouring depth changes depending on pier-diameter and the central angle of the curve in the curved channels. According to the measured results which have been done by using piers with different diameters, the ratio of the scouring depth in curved channel to that of the straight channel was found to be independent on pier-diameter. Thus, a matamatical model giving the change of local scouring depth in curved channels was derived by using the values of scouring in straight channels.

With the measurments, done along the inner and outer edges and the axis of the curved channel, it was found that the change of local scouring along the curve has shown a similar change to the original bed-profile of the curve.

SEMBOLLER

a	İvme, silindirik ayağın yarı çapı	$ LT^{-2} $
B	Kanal genişliği	$ L $
b	Dikdörtgen ayağın genişliği	$ L $
b_t	Ayağın akıma dik etkili genişliği	$ L $
C	Chezy direnç katsayısı	$ L^{1/2}T^{-1} $
c_p	Basınç katsayısı	$ - $
c_o	Vorteks şiddeti	$ L^2T^{-1} $
D	Silindirik ayağın çapı	$ L $
d	Dane çapı	$ L $
d_m	Ortalama dane çapı	$ L $
d_{50}	%50'si verilen çaptaki elekten geçen dane çapı	$ L $
d_{90}	%90'nı verilen çaptaki elekten geçen dane çapı	$ L $
F_r	Froude Sayısı	$ - $
F_{r*}	Dane Froude Sayısı	$ - $
Fr_a	Ayak Froude Sayısı	$ - $
f_s	Vorteks yayılma frekansı	$ T^{-1} $
G	Ağırlık kuvveti	$ F $
g	Yerçekimi ivmesi	$ LT^{-2} $
H	Oyulma derinliği	$ L $
H_d	Denge oyulma derinliği	$ L $
H_{dmax}	Maksimum denge oyulma derinliği	$ L $
h	Su derinliği	$ L $
h_{kr}	Kritik derinlik	$ L $
h_d	Taban dalgasının yüksekliği	$ L $
I_r, I_θ	Su yüzünün radyal ve teğetsel eğimleri	$ - $



J_t, J_s	Kanal taban ve su yüzü eğimleri	-
J_e	Enerji çizgisi eğimi	-
K	Kuvvet, ayak şekline bağlı bir katsayı	F
K_θ	Kıvrımın eksenı boyunca ayağın yerine bağlı bir katsayı	-
$K_{\theta/B}$	Kıvrımlı kanaldaki ayağın yerine bağlı bir katsayı	-
k_m, k_s	Kanal pürüzlülük katsayıları	L
k_w	Kanal yan yüzeylerinin pürüzlülük katsayısı	L
P	Basınç, savağın tepesinin tabana olan uzaklığı	FL^{-2}, L
Q	Debi	$L^3 T^{-1}$
Q_s	Sürüntü maddesi debisi	$L^3 T^{-1}$
q_{s1}	Birim zamanda akımın kapasitesiyle oyulma çukurundan taşınan malzeme miktarı	$L^3 T^{-2}$
q_{s2}	Tedirgin edilmemiş akımın oyulma çukuruna taşıdığı katı madde miktarı	$L^3 T^{-2}$
r	Eğrilik yarıçapı	L
r_o	Vorteks yarıçapı	L
R	Hidrolik yarıçap, kıvrımın eksenine göre yarıçap	L
R_o	Kıvrımın dış kenarına göre yarıçap	L
R_e	Reynolds sayısı	-
R_{e*}	Dane Reynolds sayısı	-
R_{ea}	Ayak Reynolds Sayısı	-
S_h	Strouhal sayısı	-
s	Yay elemanı	L
t	Zaman	T
V	Oyulma çukuru hacmi	L^3
v	Hız	LT^{-1}
U_o, U_∞	Yaklaşım hızı	LT^{-1}
U_{kr}	Kritik hız	LT^{-1}

u	Ayak etrafındaki toplam hız	$ LT^{-1} $
u, v, z	x, y, z yönündeki hız bileşenleri	$ LT^{-1} $
u_r, u_θ, u_z	r, θ, z yönündeki hız bileşenleri	$ LT^{-1} $
$u_{\theta m}$	Akım derinliğine göre ortalama teğetsel hız	$ LT^{-1} $
u_θ'	Değiştirilmiş teğetsel hız	$ LT^{-1} $
U	Taban kayma hızı	$ LT^{-1} $
U_{*kr}	Kritik taban kayma hızı	$ LT^{-1} $
u_x	Ayak etrafındaki (Daraltılmış kesitteki) hız	$ LT^{-1} $
γ	Suyun özgül ağırlığı	$ FL^{-3} $
γ_s	Danenin özgül ağırlığı	$ FL^{-3} $
Δ	Danenin su altındaki birim hacim ağırlığı	$ - $
ν	Suyun kinematik viskozitesi	$ L^2T^{-1} $
ν_T	Türbülanslı kinematik viskozite	$ L^2T^{-1} $
α	Atak açısı	$ - $
ρ	Suyun özgül kütlesi	$ FL^{-4}T^2 $
ρ_s	Danenin özgül kütlesi	$ FL^{-4}T^2 $
η	Akım içersinde bir noktanın rölatif derinliği	$ - $
χ	Von Karman sabit	$ - $
δ	Viskoz alt tabaka kalınlığı	$ L $
φ	Silindirik koordinatlarda yol	$ L $
$\dot{\varphi}$	Açısal hız	$ LT^{-1} $
ψ	Dane hareket faktörü	$ - $
W	Dane çökelme hızı	$ LT^{-1} $
$\bar{\tau}$	Ortalama taban kayma gerilmesi	$ FL^{-2} $
τ'	Dane kayma gerilmesi	$ FL^{-2} $
τ''	Taban formu kayma gerilmesi	$ FL^{-2} $



BÖLÜM I

1. GİRİŞ

1.1. Köprü Ayaklarında Meydana Gelen Oyulma Olayının Önemi ve Çalışma Konusunun Belirlenmesi

Yerel oyulmalar , akımdan dolayı meydana gelen yerel erozyon olayıdır. Yerel oyulmanın örneklerine köprü ayakları, bağlama kapakları gibi akımın hızlandığı veya çevrintiler meydana getirdiği yerlerde rastlanır. Su yapıları için zararlı olan yerel oyulmaların önlenmesi ve muhtemel yerel oyulma derinliğinin tayini proje ve işletme çalışmaları yönünden önemlidir /1/.

Su yapılarında köprü ayakları ve benzeri engeller sebebiyle ortalama hızdaki ve/veya türbülans şiddetindeki yerel artışlar sürüntü madde si taşıma kapasitesini de artıracaktır. Yerel taşıma kapasitesinin artması neticesinde yatakta bir oyuntu çukuru meydana gelir. Yerel oyulma kararlı olmayan bir olaydır. Oyulma çukurunun sınır geometrisi zamanla devamlı değişir. Sınır geometrisi ve akım karakteristiklerindeki değişiklikler, oyulma çukuruna giren katı madde ile oyulma çukurundan çıkan katı madde birbirine eşit oluncaya kadar devam eder /2/.

Çok sayıda ve değişik karakterde parametrenin oyulma olayına etkili olması nedeniyle genel, teorik sonuçları bulmak imkansız gözükmektedir. Bu yüzden yerel oyulmanın çözümünün deneysel neticelere dayanması en uygun yol olmaktadır.

Yerel oyulma derinliğinin tespitindeki ihmalden dolayı bir çok yapının zarar gördüğü bilinmektedir. Maksimum denge oyulma derinliğine göre köprü ayaklarının projelendirilmesinde temel derinliğinin artırılması veya tabanın korunmasıyla yerel oyulma problemi çözüme kavuşturulabilir.

Gerçekte, insan etkisi olmaksızın da akarsuların daraldığı bölgelerde, kıvrımlarda ve taşkın esnasında akarsu tabanında sayısız tabii oyulmalar oluşur.

Köprü temellerinin dizaynı için proje mühendisinin bu tip halleri de göz önüne alması gerekir. Çünkü akarsular genellikle kıvrımlar meydana getirerek akarlar. Kıvrımlardaki taban hareketlerinin en önemli özelliği kıvrım iç kenarında yığılmanın dış kenarında ise oyulmanın meydana gelmesidir.

Bugüne kadar köprü ayaklarında oluşan oyulma çukuruyla ilgili yapılan çalışmalar, akarsuyun doğrusal eksenli olduğu düşünülerek yapılmıştır. Doğrusal eksenli kanallarda yapılan bu çalışmalarda dahi birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bunun nedeni olaya etkili çok fazla parametre olması ve her araştırmanın kendisine göre önemli olanlarını dikkate almasıdır.

Kıvrımlı kanallarda akım ve taban hareket uzun zamandan beri çalışma konusudur. Sabit eğrilikli uzun kıvrımlarda, taban şekillerinin oluşması hakkında birçok teoriler geliştirilmiş olmakla birlikte henüz kabul edilebilir bir ifade verilememiştir.

Kıvrımlı kanallara yerleştirilecek köprü ayakları etrafında oluşan oyulmalar hakkında ise detaylı bir çalışma mevcut değildir. Bu konunun detaylı olarak incelenmesi bu yüzden önem arz etmektedir.

1.2. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada, öncelikle köprü ayaklarının akım alanında yaptığı değişiklikler ve katı madde hareketi ile akarsu kıvrımlarındaki akım ve taban şekillerinin oluşması incelenmiştir.

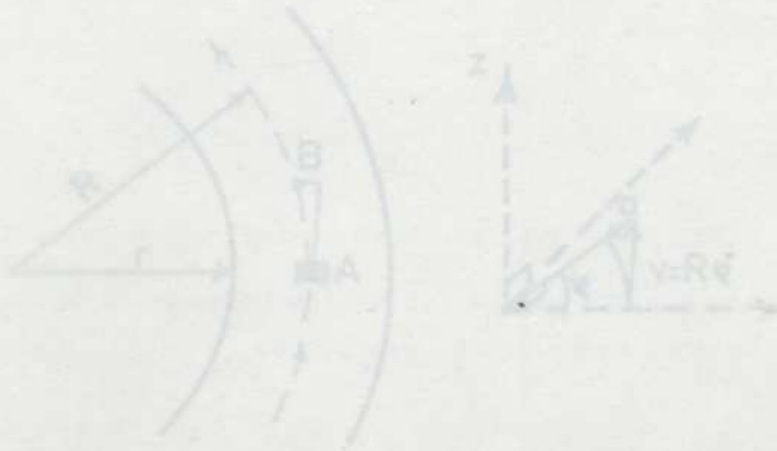
Kıvrımlı kanallara yerleştirilen köprü ayakları etrafında oluşan oyulma olayına etki eden parametreler tespit edildikten sonra, olayı açıklığa kavuşturmak için laboratuvarında kurulan kıvrımlı kanalda aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

a) 180° lık bir kıvrım boyunca, kıvrımın çeşitli yerlerine yerleştirilen köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma derinlikleri gerek kıvrım boyunca ve gerekse her kıvrım kesitinde değişimi araştırılmıştır.

b) Elde edilen neticeler doğrusal kanallarda meydana gelen oyulma derinlikleri ile karşılaştırılarak aralarındaki bağıntı incelenmiştir. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için, aynı hidrolik şartlar oluşturularak, doğrusal kanallardaki oyulma olayı da araştırılmıştır.

c) Kıvrımın taban topografyası belirlenerek, kıvrım boyunca oyulma derinliklerinin değişimiyle taban deformasyonları arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu çalışmada, kıvrımlardaki taban deformasyonu ile ilgili daha önceki çalışmalarda değerlendirilip probleme daha detaylı bir yaklaşım sağlanmaya çalışılmıştır.

Kıvrımın daha iyi açıklanabilmek amacıyla kıvrımlı bir kanaldaki akışın karakteristiklerini hareketini silindirik koordinatları kullanılarak araştırılmıştır (Şekil-2.1).



Şekil-2.1 Kıvrımlı Akış.

Hareket halinde bir A partikülünün sahip olduğu hız Şekil-2.1'den görüldüğü gibi $v = R\omega$ dir, burada

$$\omega = \frac{v}{R}$$

dir. A partikülünün A noktasından B noktasına hareketi, akışın geometrisiyle açıklanabilir.



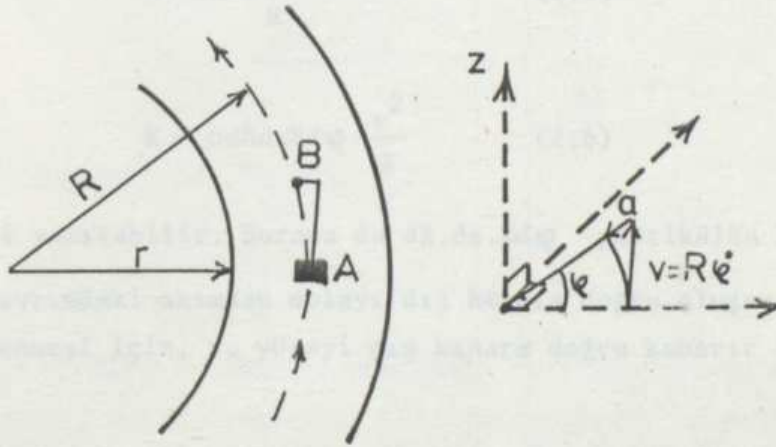
BÖLÜM II

2. SABİT TABANLI KIVIRIMLI KANALLARDA AKIM VE KÖPRÜ AYAKLARININ AKIM ALANINA ETKİSİ

2.1. Kıvrımlı Kanallarda Akım

Akarsu kıvrımlarındaki akım ve taban deformasyonu uzun zamandan beri araştırma konusu olmuştur. Fakat sabit eğrilikli ve sabit şevli kıvrımlarda bile, henüz nicel olarak kabul edilebilir bir bağıntının verilememesi konu üzerindeki tartışmaları sürdürmektedir. Bunun nedeni de düzgün üniform bir kanaldan kıvrımlı bir kanala geçişte akım alanında çok önemli değişmelerin meydana gelmesiyle akımın daha karmaşık bir yapıya sahip olmasıdır.

Konuyu daha iyi açıklayabilmek amacıyla kıvrımlı bir kanaldaki akışkan partiküllerinin hareketini silindirik koordinatları kullanarak tarifliyelim (Şekil-2.1)



Şekil-2.1 Kıvrımlı Akım.

Hareket halinde bir A partikülünün sahip olduğu hız Şekil-2.1'den görüleceği gibi $v = R \cdot \dot{\varphi}$ dir, burada

$$\dot{\varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

dir. A partikülü Δt kadar zaman sonra B noktasına a ivmesiyle vardığına göre geometriden aşağıdaki bağıntıyı yazabiliriz :

$$\frac{a}{R\dot{\psi}} = \frac{R\dot{\psi}}{R} \quad (2.1)$$

veya

$$a = R\dot{\psi}^2 \quad (2.2)$$

aynı zamanda

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (2.3)$$

bağıntısı da yazılabilir. Ele aldığımız kanalın sabit olan tabanının yatay olduğu ve ilk yaklaşımda da pürüzlülüğü ihmal edilerek, potansiyel akım kabulü ile, maksimum hızın iç kıyıda meydana geldiği sonucu çıkarılabilir /3/. Tabi bu sonuç hareketli taban halinde değişmektedir.

Kıvrımda bir K kuvvetine maruz su partikülü için

$$K = m.a \quad (2.4)$$

yazılabilir. Burada, m: partikülün kütlesidir.

Böylece

$$K = m \frac{v^2}{R} \quad (2.5)$$

veya

$$K = \rho dRdzRd\psi \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2.6)$$

ifadesi yazılabilir. Burada da $dR.dz.Rd\psi$ partikülün hacmidir.

Kıvrımdaki akımdan dolayı dış kenara doğru oluşan bu kuvvetin dengelenmesi için, su yüzeyi dış kenara doğru kabarır (Şekil-2.2), /4/.

Eğer akım iki boyutluysa örneğin düşey doğrultudaki hız sabitse ($\partial v/\partial z = 0$) aşağıdaki çözüm bulunabilir.

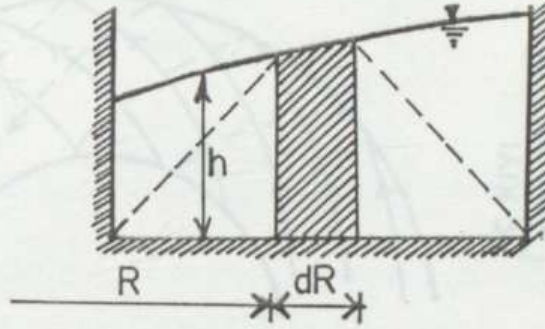
$$\frac{\partial h}{\partial R} \cdot \rho.g.dR.dz.R.d\psi = \rho.dR.dz.R.d\psi \cdot \frac{v^2}{R}$$

buradan da



$$\frac{\partial h}{\partial R} = I_R = \frac{v^2}{gR} \quad (2.7)$$

yazılabilir.



Şekil-2.2 Kıvrımlı kanalda su yüzü eğimi.

Düşey doğrultudaki değişimin hesaba katılması ile gerçek hızla çözüme gidilmesi olayın daha komplike olmasına neden olur. O halde, şimdi sürtünme etkisini göz önüne alabiliriz. ve sürtünmeden dolayı hız yüzeyde tabandan daha büyüktür. (2.7) ifadesindeki I_R enine eğimi;

$$I_R = \frac{\int_0^h \frac{v^2}{gR} dz}{h} = \frac{\frac{v^2}{gR}}{h} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir, burada

$$v = \frac{\int_0^h v \cdot dz}{h}$$

ortalama hızdır. Her bir su partikülü bu enine eğimin etkisine maruz kalmaktadır, fakat herbirinin hızları farklıdır ve dolayısıyla $\frac{v^2}{gR}$ nın değeri de değişmektedir. Bu değişimi χ ile ifade edersek

. yüzeyde $\chi < \frac{v^2}{gR}$ hız büyüktür.

. taban yakınında $\chi > \frac{v^2}{gR}$ hız küçüktür.

Böylece su yüzeyi yakınındaki su partikülleri dış kıyıya doğru buna karşılık taban yakınındaki su partikülleri iç kıyıya doğru saparlar.

Bu sapmanın sonucunda kıvrımda helikoidal veya spiral akım oluşur. Bu helikoidal akım kanal eksenini doğrultusundaki ana akımın bir bileşenidir ve enkesit içersinde oluşan bir çevrimdir (Şekil-2.3)



Şekil-2.3 Kıvrımda Helikoidal Akım.

Bu açıklamalardan sonra tabandaki τ kayma gerilmesinin doğrultusunu ve şiddetini göz önüne almak mümkündür. İleride açıklanacak taban morfolojisi için, oldukça önemli olan bu kayma gerilmesinin iki bileşeni mevcuttur (Şekil-2.4) Akım doğrultusunda τ_{sb} ve radyal doğrultuda τ_{Rb} bunlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir /4/.

$$\tau_{sb} = \rho g h I = \frac{v^2}{c^2} \rho g \quad (2.9)$$

$$\tau_{Rb} = \rho g h \frac{v^2}{gR} \beta \quad (2.10)$$

Rozowski /5/ tarafından da

$$\tau_{Rb} = \rho g h \frac{v^2}{gR} 2\beta \quad (2.11)$$

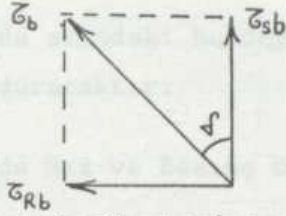
ifadesi verilmiştir /5/, burada β ; χ Von Karman ve C Chezy sabitlerine bağımlı bir parametredir. (2.9) ve (2.11) ifadelerinden

$$\text{tg} \angle = \frac{\beta \cdot 2 \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{v^2}{gR}}{\rho \cdot g \cdot v^2 / c^2} = \xi \cdot \frac{h}{R} \quad (2.12)$$



$$\xi = \beta 2 C^2 / g$$

elde edilir.



Şekil-2.4 Kayma Gerilmelerinin Yön ve Şiddetleri

büyük C değerlerinde ve $\alpha = 0.4$ için $\xi \approx 10$ olur, (2.10) ifadesi de aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau_{Rb} \approx 10 \frac{h}{R} \rho g h I \quad (2.13)$$

Bir kıvrımdaki ana akımın enine dağılımı ana hatlarıyla şöyle özetlenebilir /6/.

. Kıvrım bölgesine yaklaşıldıkça akım, akım çizgisinin eğrilikliğini tedrici olarak artırmaya çalışan menba tarafındaki basınç yükünün etkisiyle karşılaşır.

. Kıvrıma girişte, akım çizgisinin eğrilikliğı, kıvrımın iç kısmında akımın hızlanmasına yol açan (potansiyel akım etkisine yol açan) enine ve boyuna basınç gradyanlarına sahiptir.

. Kıvrıma girişten sonra akım tedrici olarak üniform olmayan derinlik dağılımına kendisini uydurmaya çalışır, $\bar{v}$ 'nin enine dağılımının dışa doğru sapmasına neden olur.

. Bu dışa doğru sapma sekonder akımın düşey bileşeninin konvektif ivme etkisini artırmaya çalışır.

. Kıvrım çıkışına yakın kısımda, akım çizgisinin eğrilikliğı tedrici olarak azalır.

. Enine doğrultuda basınç gradyanındaki değişim, kıvrımın iç kısmında akımı yavaşlatacak, dış kısmında ise hızlandıracak olan boyuna basınç gradyanlarına neden olur. Bu kıvrımın çıkışına yakın



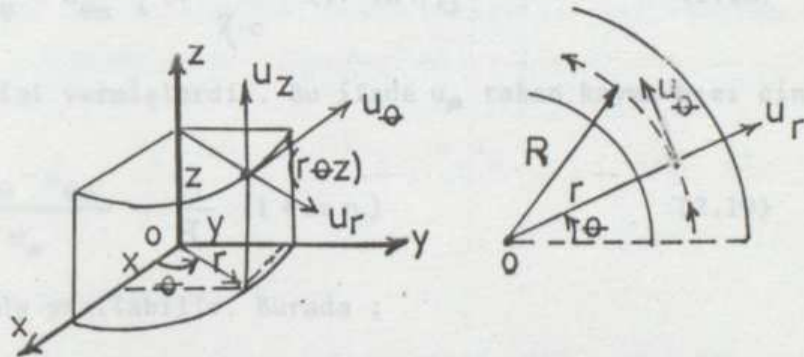
kısımda $\bar{V}$ nin enlemesine dağılımında dışarıya doğru olan daha fazla bir (çarpılmaya) sapmaya neden olur.

. Kıvrımın çıkışında akımdaki bu değişiklikler tedricen kendisini taban topoğrafyasına uyduracaktır.

2.1.1 Kıvrımlı Kanallarda Hız ve Basınç Dağılımı

Kıvrımlı kanallarda akım, eğrisel karakteristiklerin etkisiyle düzgün üniform akımlı bir kanaldan oldukça farklıdır. Kesitten kesite akım değişmektedir ve her ne kadar genelde, yanıl kütle transferi, bo-
yuna kütle transferine göre küçükse de vardır /7/.

Geniş ($h/R \ll 1$) ve uzun bir dairesel kıvrımda ($\partial u / \partial \theta = 0$, $\partial p / r \partial \theta = sb$) iki boyutlu sıkışamaz, kararlı akışkanın genel denklemleri silindirik koordinatlarda (Şekil-2.5) elde edilir /8/.



Şekil-2.5 Silindirik Koordinatlarda Hız Bileşenleri.

Hareket denklemleri

$$r \text{ doğrultusunda ; } u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} = -g I_r + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (2.14)$$

$$\theta \text{ doğrultusunda ; } u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} = g I_\theta + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \quad (2.15)$$

$$z \text{ doğrultusunda ; } g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

Burada :

u_r, u_θ, u_z radyal, teğetsel ve düşey hız bileşenlerini

I_r, I_θ su yüzeyinin radyal ve teğetsel eğimlerini

ν_T türbülanslı kinematik viskoziteyi

göstermektedir.

(2.14) ve (2.15) denklemlerinden u_r ve u_z hızlarının çözülebilmesi için ν_T türbülanslı kinematik viskozite ile birlikte u_θ 'nın düşey doğrultudaki dağılımının bilinmesi gerekir. Francis J.R.D. ve Asfari A.F /8/ yapmış oldukları çalışmalardan, kıvrımın giriş kesitinde u_θ teğetsel hızının tamamen logaritmik hız dağılımına uyduğunu ispatlamışlar ve

$$u_\theta = u_{\theta m} \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\chi \cdot c} (1 + \ln \eta) \right] \quad (2.18)$$

ifadesini vermişlerdir. Bu ifade u_* taban kayma hızı cinsinden

$$\frac{u_\theta - u_{\theta m}}{u_*} = \frac{1}{\chi} (1 + \ln \eta) \quad (2.19)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ;

$u_{\theta m}$ Akım derinliğine göre ortalama teğetsel hızı

$u_* = u_\theta \frac{\sqrt{g}}{c}$ Taban kayma hızı

χ Von Karman Sabiti

$\eta = z/h$ Akım içindeki bir noktanın rölatif derinliğidir.

Diğer taraftan ν_T türbülanslı kinematik viskozite Rozovskii tarafından /5/

$$\nu_T = \chi h u_{\theta m} \cdot \frac{\sqrt{g}}{c} \eta (1 - \eta) \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilmiştir. $I_r = u_{\theta m}^2 / gR$ yaklaşımı yapılarak (2.14) denklemi çözülürse

$$u_r = \frac{h}{\chi^2 r} u_\theta \left[F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{\chi \cdot c} F_2(\eta) \right] \quad (2.21)$$

ifadesi elde edilir. Burada

$$F_1(\eta) = \int_0^1 \frac{2 \ln \eta}{\eta - 1} d\eta \quad F_2(\eta) = \int_0^1 \frac{\ln^2 \eta}{\eta - 1} d\eta$$

olarak verilmektedir.

Sökonder akımdan dolayı u_θ teğetsel hızında önemli değişimler olacağını belirten Francis-Asfari /8/ üç boyutlu akım hali için yaklaşık bir çözüm vermektedirler. Bu metodu kısaca şöyle özetleyebiliriz.

u_r ve u_z hızlarının sekonder bileşenleri kıvrımı izleyen sıvı partiküllerinin deplasmanı gerçeğine dayanır. Eğri boyunca hızların değişimine neden olan bu gerçek, farklı alanlar arasındaki hareket miktarındaki değişimi belirtmektedir.

Cidar etkisi olmayan, büyük genişlikli bir kanaldaki akım hali için, hareket denkleminin θ yönündeki bileşeni,

$$u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} = g I_\theta + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_\theta}{\partial z} \quad (2.22)$$

şeklinde yazılabilir.

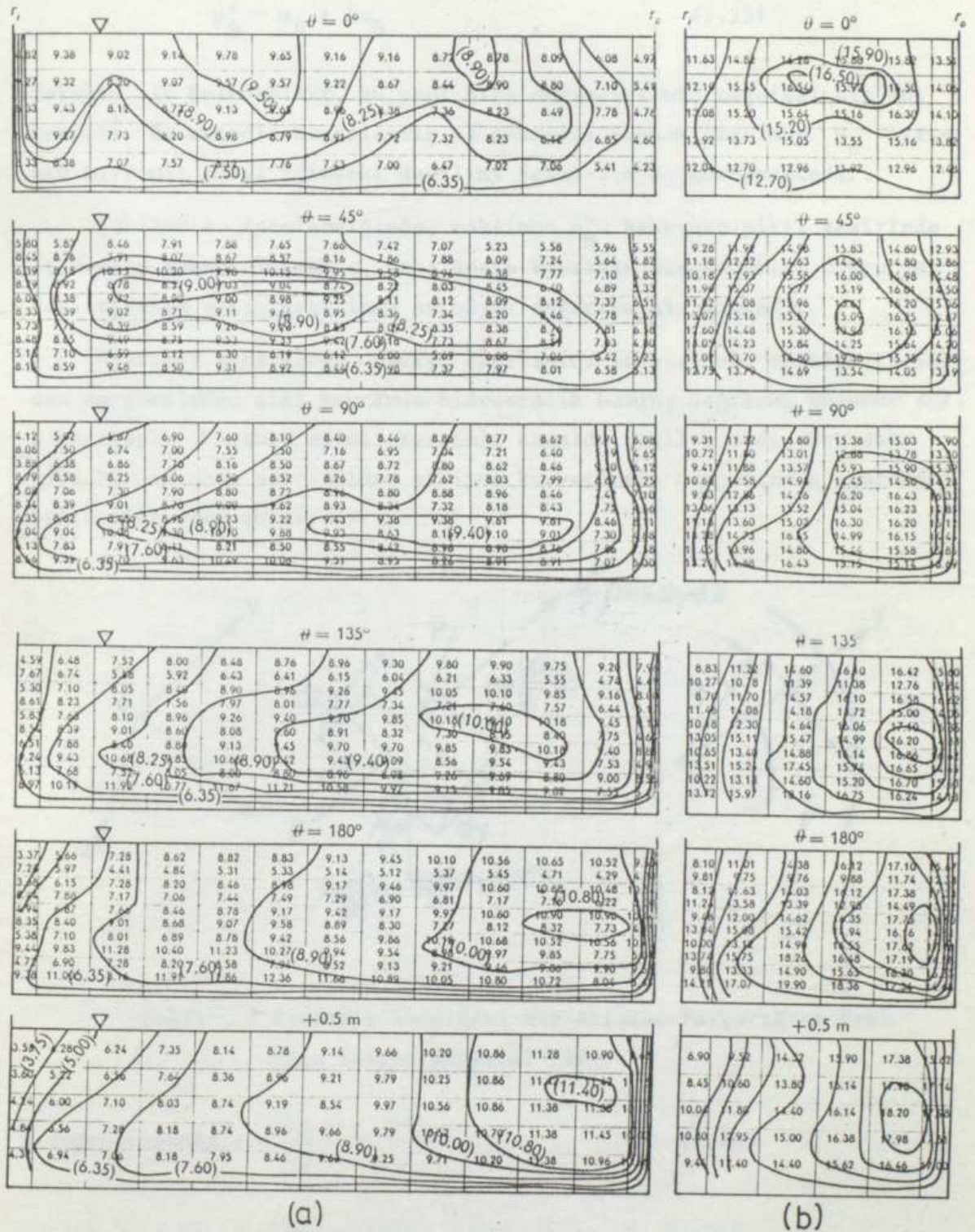
Kıvrımdaki u_θ daki değişimlerin $r \Delta \theta$ yayının sınırında aniden meydana geldiği yaklaşımı ile her $r \Delta \theta$ yay parçası boyunca ağırlık ve teğetsel kuvvetlerin arasında bir dengenin varlığını düşünersek (2.22) denkleminin sağ tarafı sıfır olur. Ayrıca u_r ve u_z hızlarının hesaplanmış değerlerini denklemde yerine koyarsak (2.22) denklemini sonlu farklar metodu ile çözebiliriz. Çünkü denklem

$$u_r \frac{\Delta u_\theta}{\Delta r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\Delta u_\theta}{\Delta \theta} + u_z \frac{\Delta u_\theta}{\Delta z} + \frac{u_r u_\theta}{r} = 0 \quad (2.23)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan Δu_θ 'yı çekersek,

$$\Delta u_\theta = - \frac{r \Delta \theta}{u_\theta} \left[u_r \frac{\Delta u_\theta}{\Delta r} + u_z \frac{\Delta u_\theta}{\Delta z} + \frac{u_r u_\theta}{r} \right] \quad (2.24)$$

ifadesi elde edilir.



Şekil-2.6 Maksimum u_θ 'nin Kesitten Kesite Değişimi

a) $R/b = 3$ b) $R/b = 7.9/8$

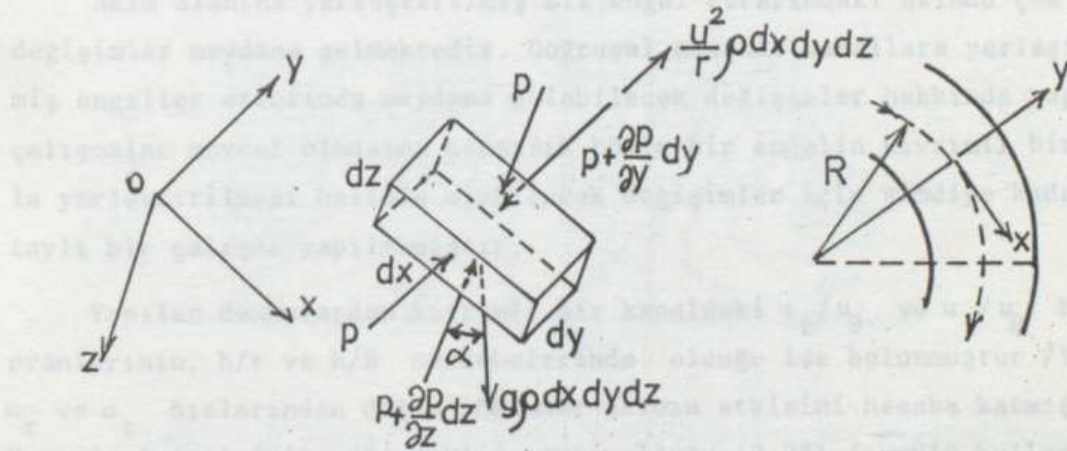
(2.24) bağıntısından elde edilen Δu_θ ile yeni teğetsel hızın değeri

$$u'_\theta = u_\theta + \Delta u_\theta \quad (2.25)$$

formülü ile bulunabilir. Bu yeni hıza değiştirilmiş teğetsel hız adı verilir. Bu metodla hesaplanmış ve deneysel olarak ölçülmüş u'_θ hızının kıvrımlı kanal içindeki dağılımı Şekil-2.6'da görülmektedir.

Şekil-2.6 incelendiğinde, maksimum u'_θ kıvrımın giriş kesitinde iç kenara yakın oluşmakta, daha sonra kıvrımın dış kenarına doğru yer değiştirerek çıkış kesitinde en büyük değerine ulaşmaktadır.

Kıvrımlı kanallarda basınç dağılımını incelersek, denklem (2.16) dan da görüldüğü gibi kıvrımda hidrostatik basınç dağılımı bulunur /8/. r yarıçaplı J taban eğimli kıvrımlı kanalda Şekil-2.7'de görüldüğü gibi bir akışkan partikülüne etkiyen kuvvetlerin dengesinden aşağıdaki bağıntılar yazılabilir /9/.



Şekil-2.7 Kıvrımlı Kanaldaki Bir Akışkan Parçacığına Etki Eden Basınç Değişimi /9/.

$$y \text{ doğrultusunda ; } -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{u^2}{r} = 0 \quad (2.26)$$

$$z \text{ doğrultusunda ; } -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \cos \alpha = 0 \quad (2.27)$$

(2.26) ve (2.27) denklemleri integre edilip ve sınır şartları göz önüne alınırsa

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{u^2}{r} - \frac{y}{g} \quad (2.28)$$

ve

$$\frac{p}{\gamma} = z \cos \alpha \quad (2.29)$$

ifadeleri bulunur.

(2.28) ve (2.29) ifadelerinden görüldüğü gibi, kıvrımın iç tarafından dış tarafına doğru gittikçe su derinliğinin arttığını ve buna karşılık kanaldaki basınç dağılımının yaklaşık olarak hidrostatik kanuna uyduğu görülmektedir.

2.2. Köprü Ayağı Etrafındaki Akım Alanının Tarifi

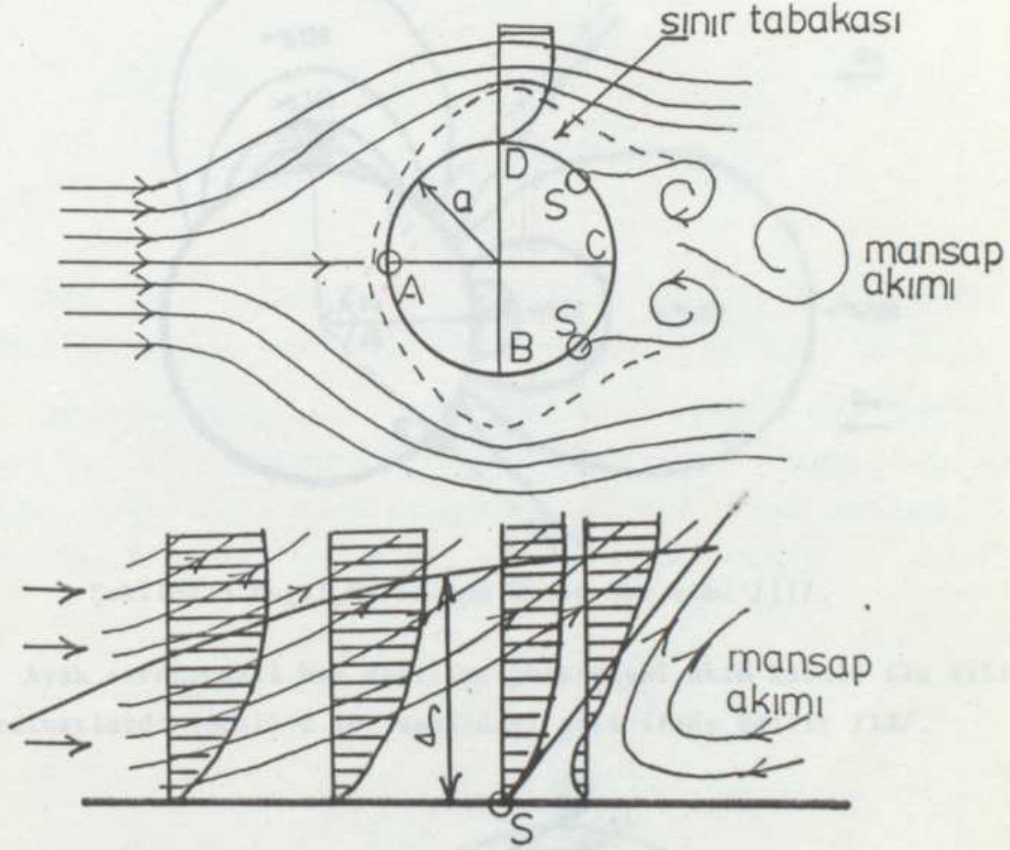
Akım alanına yerleştirilmiş bir engel etrafındaki akımda çok önemli değişimler meydana gelmektedir. Doğrusal eksenli kanallara yerleştirilmiş engeller etrafında meydana gelebilecek değişimler hakkında yapılmış çalışmalar mevcut olmasına karşılık böyle bir engelin kıvrımlı bir kanala yerleştirilmesi halinde olabilecek değişimler için şimdiye kadar detaylı bir çalışma yapılmamıştır.

Yapılan deneylerden kıvrımlı bir kanaldaki u_r/u_θ ve u_z/u_θ hız oranlarının, h/r ve h/B mertebelerinde olduğu ise bulunmuştur /10/. u_r ve u_z hızlarından doğan sökonder akımın etkisini hesaba katmış olan Francis-Asfari 'nin /8/ teklif etmiş olduğu (2.25) formülü kullanıldığında, u_θ teğetsel hızı kıvrımlı kanallar için etkili bir akım karakteristiği olarak düşünülebilir /9/.

Akıma yerleştirilen engelin dairesel kesitli olması halinde, akımın doğrultusundaki değişimlerden etkilenmediği bilinmektedir. Bu düşünceden kıvrımlı bir kanala yerleştirilen dairesel kesitli silindirik engelin akım alanına etkisi için u'_θ değiştirilmiş teğetsel hızı esas akım hızı olarak alınmak şartıyla, doğrusal üniform bir akım alanına yerleştirilen engelin yapacağı etkiyi meydana getirdiği kabulü yapılabilir /9/. Ayrıca, kıvrımlı kanalların özelliklerinden dolayı, akımda u'_θ teğetsel hızı, hem bulunduğu kesit içinde ve hem de kıvrım boyunca kesitten kesite

değişim gösterdiği göz önünde tutulmalıdır.

Şimdi bir köprü ayağının akım alanına etkisini inceliyelim, akım içersine yerleştirilmiş ayaktan dolayı akım çizgilerinde sapmalar meydana gelir ve bunun sonucunda, ayak etrafındaki hız ve basınç alanlarında değişimler söz konusu olur.

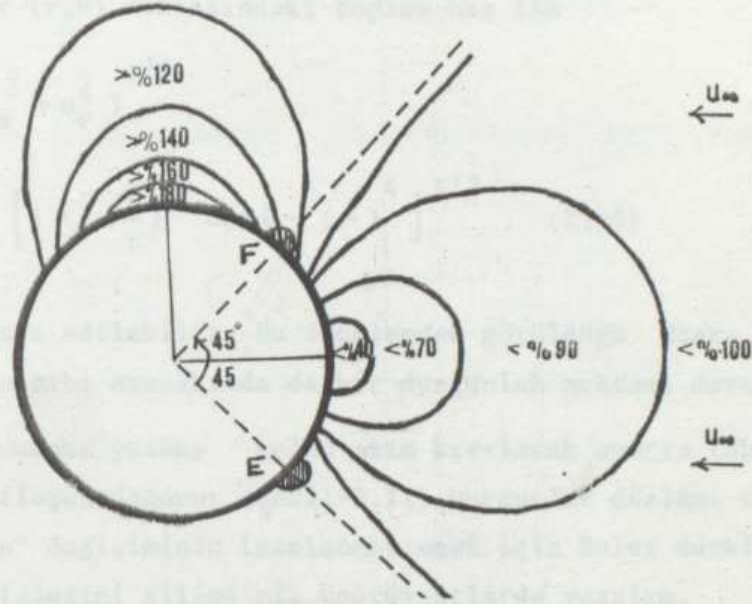


Şekil-2.8 Engel Yakınındaki Akım Çizgilerinde Meydana Gelen Sapmalar /11/.

2.2.1. Köprü Ayağı Civarında Hız Dağılımı

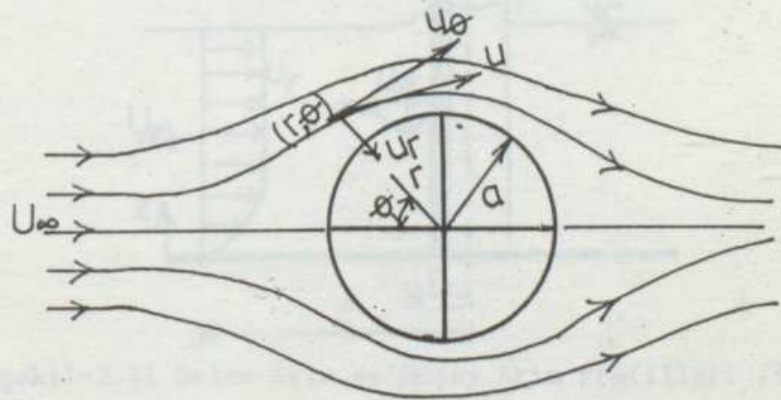
Akım alanına yerleştirilmiş köprü ayağının eksenine boyunca yaklaşan sıvı ipçığı ayağa yaklaştıkça hızı azalır ve sonunda sıfır olur, hızın sıfır olduğu bu noktaya "durgunluk noktası" olaya üç boyutlu olarak bakılırsa bu bölgeye "durgunluk düzlemi" denir. Durgunluk noktasının konumu, akım yüksekliğinin, akım hızının ve ayak önünde meydana gelen kabarma yüksekliğinin bir fonksiyonudur /12/.

Şekil-2.9'dan görüleceği gibi hızın engelin menba tarafında, simetrik ekseninin her iki tarafındaki 45° lik açılarının içinde yavaşlama ve bu 45° lik açılarının mansabında ise hızlanma şeklinde olduğu, ayrıca 90° de hızın yine yaklaşım hızının iki katına ulaştığı da Carstens ve Sharma /11/ tarafından gösterilmiştir.



Şekil-2.9 Engel Etrafında Hızın Değişimi /11/.

Ayak etrafındaki hız dağılımı potansiyel akım kabulü ile silindirik koordinatlarda (Şekil-2.10) aşağıdaki gibi ifade edilir /13/.



Şekil-2.10 Silindirik Koordinatlarda Ayak Etrafındaki Hız Bileşenleri /13/.



$$u_r = -U_\infty \left[1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \cos \theta \quad (2.30)$$

$$u_\theta = U_\infty \left[1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \sin \theta \quad (2.31)$$

Herhangi bir (r, θ) noktasındaki toplam hız ise

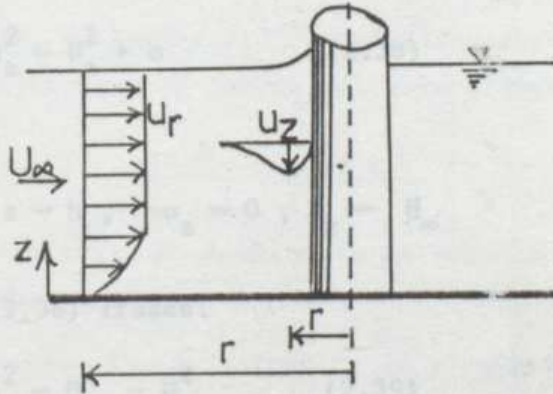
$$u = (u_\theta^2 + u_r^2)^{1/2}$$

$$u = U_\infty \left[1 - 2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \cos \theta - \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right]^{1/2} \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemden görüldüğü üzere ayağın menba-
ında olduğu gibi mansabında da bir durgunluk noktası mevcuttur.

Ayağın menba yüzüne gelen akım kırılarak ayağın tabanına doğru
düşey bir bileşen doğurur (Şekil-2.11). Durgunluk düzlemi üzerindeki
"düşey hızın" değişiminin incelenebilmesi için Euler denkleminin z
yönündeki ifadesini silindirik koordinatlarda yazalım.

$$u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.33)$$



Şekil-2.11 Gelen Akım ve Düşey Akım Profilleri /13/.

(2.33) denkleminde (2.30) ve (2.31) ifadeleri yerleştirilirse

$$-U_\infty \left[1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \cos \theta \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{U_\infty}{r} \left[1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \sin \theta \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} =$$

$$= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.34)$$

elde edilir. Ayrıca akım çizgisi boyunca tedirgin edilmemiş akım üzerindeki bir nokta ile silindir yakınındaki bir nokta arasında Bernoilli denklemini yazalım.

$$\frac{U_{\infty}^2}{2g} + h_0 = \frac{u}{2g} + h \quad (2.35)$$

bu denkleme de (2.32) ifadesi yerleştirilirse, engel önündeki akım derinliği için

$$h = h_0 + \frac{U_{\infty}^2}{2g} \left[2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \cos 2\theta - \left(\frac{a}{4} \right)^4 \right] \quad (2.36)$$

elde edilir. (2.36) ifadesi (2.32) denklemiyle birlikte (2.34) denkleminde yerleştirilip engel yakınında U_z bileşke hızı U_{∞} ile yer değiştirilirse, $\theta = 0$, $r = a$ da

$$\frac{u_z}{U_z} \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (2.37)$$

ifadesi bulunur. (2.37) denklemi integre edilirse

$$u_z^2 = U_z^2 + c \quad (2.38)$$

şeklini alır.

$$z = h, \quad -u_z = 0, \quad U_z = U_{\infty}$$

sınır şartı için (2.38) ifadesi

$$u_z^2 = U_{\infty}^2 - U_z^2 \quad (2.39)$$

olur. Varsayalımki $U_z = U_{\infty}$ olan bir bölge vardır, o halde $-u_z = 0$ olması gerekir. Diğer bir deyişle düşey hız mevcut değildir. $z = 0$ için $U_z = 0$ olduğundan $-u_z = U_{\infty}$. Bu değer düşey hızın sahip olacağı maksimum değerdir /13/.

2.2.2. Köprü Ayağı Civarında Basınç Dağılımı

Yaklaşım akımının engel önünde sifıra yaklaşması, bu bölgedeki basınç alanında önemli değişimlere neden olacağı aşîkardır. Bu değişimleri daha iyi anlayabilmek için, engelden yeterince uzaktaki bir nokta ile engel üzerindeki bir nokta arasında Bernoilli denklemini uyguladığımızda, engel önündeki basınç,

$$p_a = p_{\infty} + \rho \frac{u_{\infty}^2}{2} \quad (2.40)$$

olarak elde edilir. Burada,

p_{∞} Engelden yeter uzaklıktaki bir noktanın basıncı

p_a Engel durgunluk düzlemindeki bir noktanın basıncı

$\rho \frac{u_{\infty}^2}{2}$ Dinamik basıncı

göstermektedir.

(2.40) denkleminde görüldüğü gibi, engelin menbaında daha büyük bir basınç meydana gelmektedir ve dolayısıyla bu su yüzeyinde bir kabarmayla da kendini göstermektedir.

Shen, Schneider ve Karakı /13/ tarafından, engel etrafındaki basınç dağılımı, akımın sıkışamaz ve potansiyel akım olduğu kabulü ile

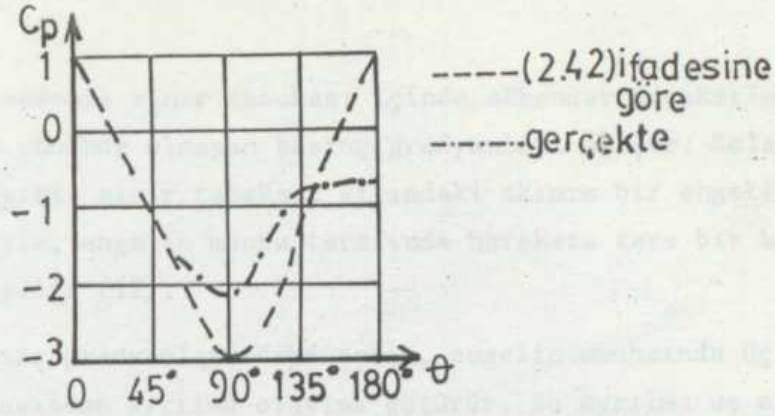
$$p_a = \rho u_{\infty}^2 (2 \cos 2\theta - 1) \quad (2.41)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemden de engelin menba ve mansapta-ki durgunluk düzlemlerinde basıncın maksimum olduğu görülmektedir.

(2.40) ifadesinden basınç katsayısı (c_p) aşağıdaki gibi tariflenmiştir /2/, /14/.

$$c_p = \frac{p_a - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2} \quad (2.42)$$

(2.41) ifadesi göz önüne alınarak basınç katsayısının değişimi Şekil-2.12'de gösterilmiştir.



Şekil-2.12 c_p Basınç Katsayısının Değişimi.

Pratikte ise yapılan ölçümlerden ayak etrafındaki basınç dağılımının bundan biraz farklı olduğu görülmüştür. Bu da basıncın $\theta = 90^\circ$ ye kadar azaldığı, sonra tekrar yükseldiği fakat bu yükselmenin menbadaki kadar olmadığı ve engelden uzaklaştıkça basınç dağılımının hidrostatik kanuna uyduğu şeklindedir /9/.

2.2.3. Köprü Ayaga Civarında Oluşan Vorteks Sistemleri

Açık kanal içersine yerleştirilmiş bir köprü ayacı etrafında birbirinden çok farklı, buna karşılık birbirine bağımlı olan olaylar gözlenir /9/. Bunlar :

- . Ayaktan dolayı akım çizgilerinde meydana gelen sapmalar ve bunun neticesi olarak da, ayak etrafındaki hız ve basınç alanında önemli değişiklikler.

- . Ayak etrafında sınır tabakasının oluşması, hız ve basınç alanındaki değişikliklerin neticesi olarak, sınır tabakasından ayrılmalarda.

- . Sınır tabakasından ayrılmanın neticesinde ayak etrafında çeşitli biçim ve büyüklükte vorteks sistemlerinin oluşması ve sökonder hareketler.

Akım çizgileri sınır yüzeylerinin jeodezikleri olduğundan, sınır tabakası üzerinde sökonder bir etki meydana getirmezler. Fakat akıma yerleştirilmiş bir silindirik engel dikkate alınacak olursa, bu olayda taban jeodezikleri doğrular, silindirin jeodezikleri ise, helisler olduğundan sınır tabakası dışındaki akım çizgileri bu eğrilerden hiç birine uymaya-

caktır. Bu nedenle sınır tabakası içinde skonder hareketlere neden olacak akım yönünde olmayan basıncı gradyanları oluşur. Kolayca anlaşılabileceği gibi, sınır tabakası dışındaki akımın bir engelle karşılaşması nedeniyle, engelin menba tarafında harekete ters bir basınç artması meydana gelir /12/.

Bu basınç gradyanlarındaki artım, engelin menbaında üç boyutlu sınır tabakasından ayrılma olayına götürür. Bu ayrılma ve engelin menba durgunluk düzleminde oluşan hızın düşey bileşenlerinin, taban zemini üzerinde yansıması ve sapması neticesinde, engel yakınında vorteks sistemleri meydana gelir /15/.

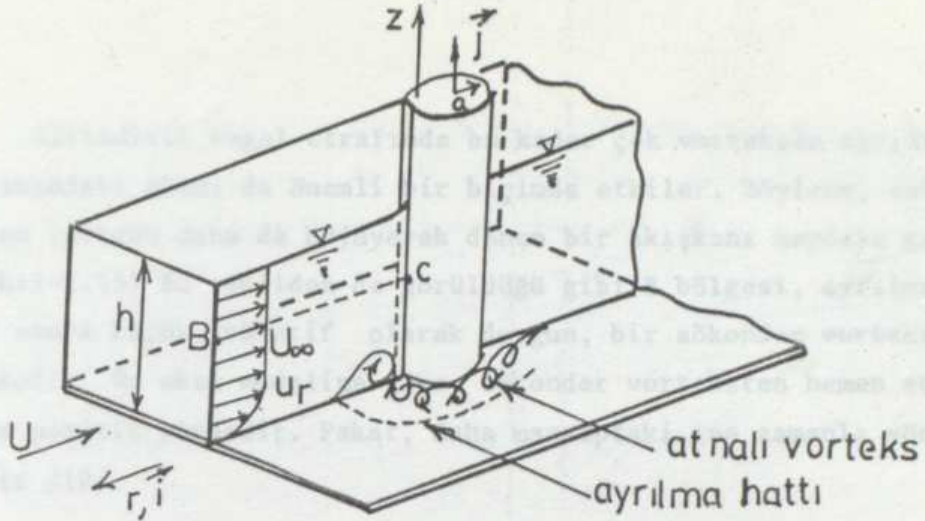
Köprü ayaklarının civarındaki akımın en önemli karakteristiği büyük ölçekli çevrilerin meydana gelmesidir. Çeşitli araştırmacılar tarafından da bahsedildiği gibi bu vorteks sistemleri yerel oyulmanın temel mekanizmasını oluşturur /16,17/.

Ayak tipine ve serbest akım şartlarına bağımlı olan çevri sistemi, at nalı vorteks, art-iz vorteks ve/veya izli vorteks halinde tariflenen üç temel vorteks sisteminden ibaret olur.

Akım yapısının bütününü teşkil eden vorteks sistemleri, ayak yakınındaki hızın düşey bileşenine bir kuvvet etkitir. İki boyutlu bozulmamış hız alanında enlemesine oluşan vorteks yumakları, kt burunlu bir ayağın mevcudiyetinden dolayı atnalı vorteks sistemini teşkil etmek üzere yoğunlaşırlar. Bu mekanizma, ayağın etkisiyle oluşan basınç alanının bir sonucudur. Eğer meydana gelen bu basınç alanı yeterince kuvvetliyse sınır tabakasından üç boyutlu bir ayrılmaya sebep olarak atnalı vorteks sistemini şekillendirmek için ayağın önünde dönerek çevri oluştururlar.

Kt burunlu ayaklar yeterince büyük basınç gradyanlarına sahip olmalarıyla tariflenirler. Diğer tüm ayaklar keskin burunlu olarak tariflenirler ve en önemlisi ise bunların vorteks meydana getirmemele-ridir.

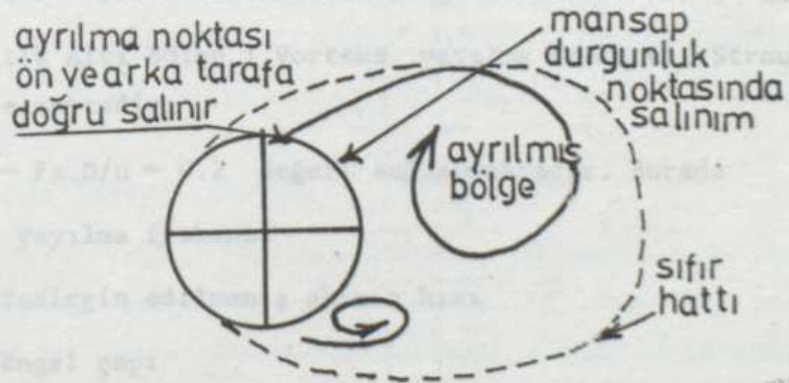
Tedirgin edilmemiş akımda bile mevcut olan vorteksler için ayaklar bir odak veya bir yoğunlaşma noktası gibi vazife grrlr.



Şekil-2.13 Ayak Etrafındaki Atnalı Vorteksin Oluşumu /14/.

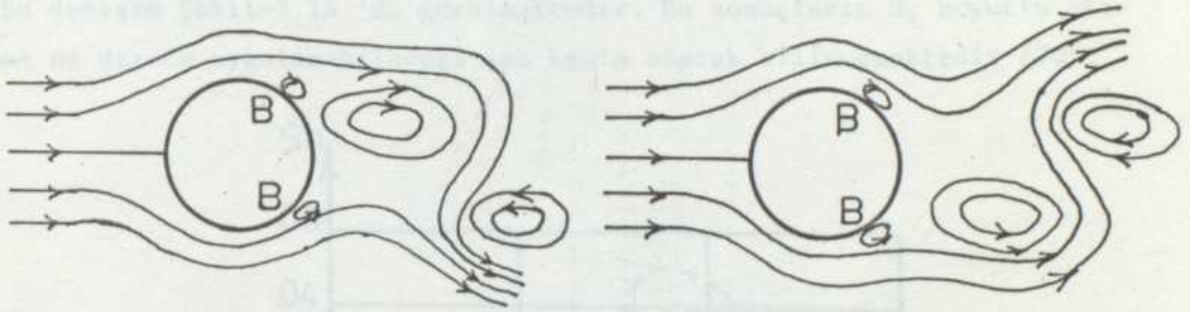
Kama veya mercek biçimindeki bazı ayak şekilleri, menba burnunun açısına ve tedirgin edilmemiş akımla yaptığı açıya bağımlı olarak küt-burunlu veya sivri burunlu ayak olarak tanımlanabilir /18/. Shen (1970) yaptığı araştırmalar sonucunda ayağın menba burun açısının 30° den daha büyük olduğu zaman küt burunlu engel olarak kabul edebileceğini göstermiştir.

Şekil-2.13 'de görülen ayrılma hattında ayağın her iki tarafından sürtünme tabakaları koparak ayrılırlar (Şekil-2.14) Ayaktan ayrılan akım çizgileri önce mansap tarafında Laminer sınır tabakası halinde, kapalı bir bölge oluştururlar, "duran vorteks". Bu bölge, büyümeye devam eder ve hatta silindirin boyutundan daha büyük olur. Nihayet, duran vorteks asimetrik olan titreşimler oluşturur ve bir kısmı koparak mansap akımına doğru hareket ederler.



Şekil-2.14 Silindirin Mansabındaki Ayrılma ve Salınımlar

Silindirik engel etrafında bu kadar çok vorteksin ayrılması engel yakınındaki akımı da önemli bir biçimde etkiler. Böylece, ters yönde dönen vorteks daha da büyüyerek dönen bir akışkanı meydana getirirler (Şekil-2.15) Bu şekilden de görüldüğü gibi B bölgesi, ayrılma noktasından sonra küçük, rölatif olarak durgun, bir sökonder vorteksi göstermektedir. Bu akım modeline göre, sökonder vorteksten hemen sonraki akım pozitif yöndedir. Fakat, daha mansaptaki ise zamanla yönünü değiştirir /19/.



Şekil-2.15 Engelin Mansabında Oluşan Çevriler /19/.

Bu kopan vorteksler, belirli bir uzaklığa kadar gözlenebilir ve hemen hemen birbirine paralel olarak doğrusal bir sıra üzerinde "Karman Vorteks sokağını" oluştururlar.. Bu olay $70 < Re < 3.5 \times 10^5$ değerleri arasında gözlenebilir. Bu değerden itibaren sınır tabakası türbülanslı hale geçer.

Vorteks yayılmasının, Re değerlerinin geniş bir bölgesi içinde periyodik bir görünümde olduğu bulunmuştur. Dairesel silindirik bir engel için dört ayrı karakteristik bölge mevcuttur /9/ ;

a) Kritik Altı Bölge : Vorteks yayılma frekansı, Strouhal sayısına tekabül etmektedir.

$$Sh = f_s \cdot D / u = 0.2 \text{ değeri sağlanmaktadır. Burada}$$

f_s yayılma frekansı

U Tedirgin edilmemiş akımın hızı

D Engel çapı

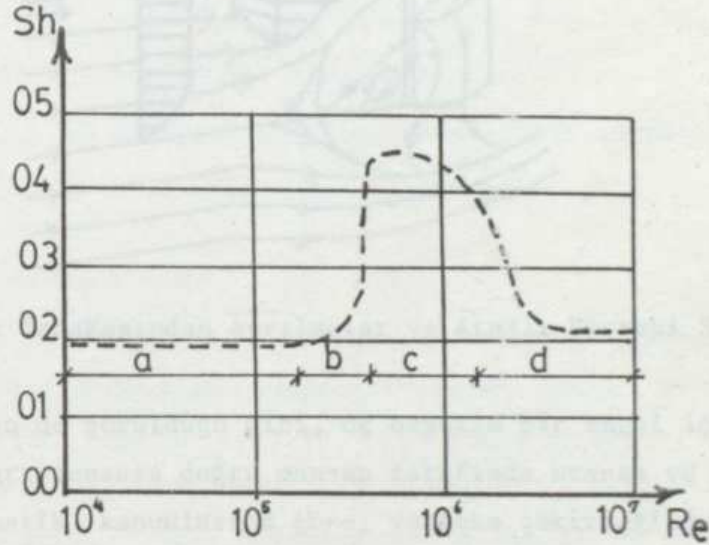
dır.



b) Kritik bölge : Bu bölgede Sh sayısı Re sayısı ile birlikte artmaktadır. Re sayısı $1,5 \cdot 10^5$ dan $2,5 \cdot 10^5$ değerine değişirken Sh sayısı 0.2 değerinden 0.4 değerine yükselmektedir.

c) Kritik Üstü Bölge: Vorteks yayılması artık periyodik değildir. Bu bölge $2,5 \times 10^5 < Re < 10^6$ arasındadır.

d) Kritik Geçiş Bölgesi : Vorteks yayılması tekrar periyodik hale gelir ve Sh yine yaklaşık olarak 0.2 değeri ile karakterize edilir. Bu değişim Şekil-2.16 'da görülmektedir. Bu sonuçların üç boyutlu akıma ne derece uygulanabileceği ise kesin olarak bilinmemektedir /20/.



Şekil-2.16 Silindirik Ayak İçin iki Boyutlu Akım Halinde Sh-Re Arasındaki İlişki /9/.

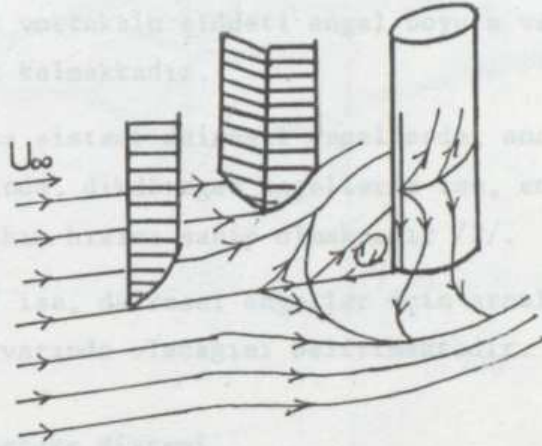
Pratikte uygulanabilir Re değerleri için sistem stabil değildir ve vorteksler ayaktan saçılarak mansaba doğru yayılırlar /14/.

2.2.3.1. Atnalı Vorteks Sistemi

Akıma yerleştirilen bir engelin menba yüzünde oluşan sınır tabakası içinde kaymama şartının uygulanması, dU/dz düşey hız gradyanına sebep olur ki bu durgunluk basıncı içindeki düşey hız gradyanı aşağı yönlü akımı meydana getirir. Bu akım tabanda silindirden saparak menba simetri düzleminden, belirli bir uzaklıkta ayrılma noktasını oluştur-

rur. Ana akım bu noktanın civarında dönerek atnalı vorteksi meydana getirir /11/.

Shen /13/ atnalı vorteks sisteminin meydana gelişini, gerek durgunluk düzleminde aşağı doğru inen akımın sınır tabakasından ayrılması ve gerekse, taban akımının sınır tabakasından ayrılması neticesinde oluşan çevri hareketleri şeklinde açıklamıştır. (Şekil-2.17)



Şekil-2.17 Sınır Tabakasından Ayrılmalar ve Atnalı Vorteks Sistemi /13/.

Şekil-2.13'den de görüldüğü gibi, üç boyutlu bir engel için vorteks yumaklarının uçları sonsuza doğru mansap tarafında uzanan ve vorteks davranışının kinematik kanunlarına göre, vorteks çekirdeğindeki dönüşlü akım hızlarını artıran işte bu atnalı vorteks sistemidir /14/.

Engelin geometrisi, atnalı vorteksin şiddetinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Gerek Baker /15/ gerekse Qadar /21/ bu konuda yapmış oldukları çalışmalarda oyulmanın sebebini atnalı vortekse bağlamışlardır. Qadar /21/ engelin menba genişliğine göre ayağın hemen önünde dönen atnalı vorteksin yarı çapını

$$D \geq 0.025 \text{ m için } r_o = 0.1 (D + 0.025) \quad (2.43)$$

$$D \gg 0.025 \text{ m için } r_o = 0.1 D \quad (2.44)$$

ve u_o vorteks hızını yaklaşım akımının $\bar{U}$ ortalama hızıyla ilişkili olduğunu düşünerek

$$u_o = 0.092 D^{-0.5} (\bar{U})^{0.83} \quad (\text{m/s}) \quad (2.45)$$

şeklinde C_o vorteks şiddetini de

$$C_o = u_o r_o \quad (2.46)$$

ifadeleriyle vermiştir. (2.45) denkleminde göre vorteksin hızı yaklaşım akımının hızıyla artmakta fakat engelin menba genişliği ile azalmaktadır, buna karşılık vorteksin şiddeti engel boyutu ve vorteks hızı ne olursa olsun sabit kalmaktadır.

Atnalı vorteks sistemi dairesel engellerde, ana akımla 70° açı yapan nokta yakınında, dikdörtgen engellerde ise, engelin köşelerinde maksimum dönümlü akım hızına sahip olmaktadır /2/.

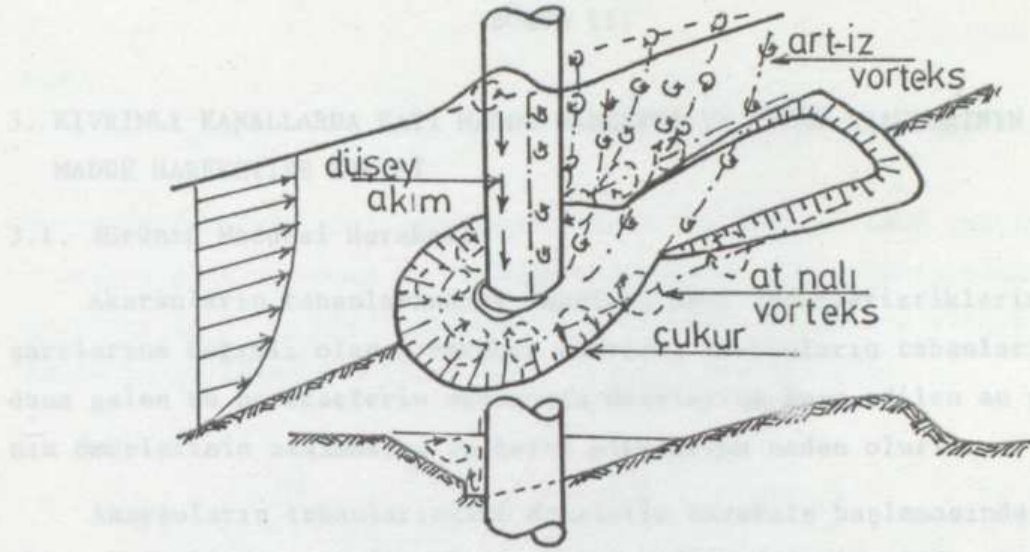
Carstens /11/ ise, dairesel engeller için atnalı vorteksin maksimum şiddetinin 45° civarında olacağını belirtmektedir.

2.2.3.2. Art-İz Vorteks Sistemi

Bu vorteks sistemi engel yüzeyindeki stabil olmayan sürtünme tabakasının yukarıya doğru dönerek çıkmasıyla meydana gelir. Bu sistem içinde yoğunlaşan çevriler engelin kendisi tarafından üretilir. Art-iz vorteks sistemi Posey /22/, Moore-Mash /23/ ve diğer araştırmacılar tarafından gözlenmiş olan yukarı doğru yönelmiş akımla ilgilidir. Sürtünme tabakaları, ayrılma hattının her iki tarafından koparak ayrılırlar.

Viskoz akımlarda, genellikle, bir silindirin art-iz bölgesindeki sekonder akımın, artan hız yükü doğrultusunda olduğu söylenebilir. Bu olay, genellikle, yaklaşım hızının silindire doğru artması, silindirin arkasındaki basıncın düşmesi gerçeğinden çıkmıştır /2/.

Art-iz vorteks sistemindeki çevrilerin şiddeti, engelin şekline ve akım hızına bağlı olarak çok değişir. Ayağın arka tarafında, tabandan yukarıya doğru kalkan bir akım gözlenir. Bu vorteks sistemi taban malzemesini emen elektrik süpürgesi gibi etkir ve malzemeyi mansaba doğru taşır /14/.



Şekil-2.18 Silindirik Ayakta Akım Şeması /24/.



BÖLÜM III

3. KIVIRIMLI KANALLARDA KATI MADDE HAREKETİ VE KÖPRÜ AYAKLARININ KATI MADDE HAREKETİNE ETKİSİ

3.1. Sürüntü Maddesi Hareketi

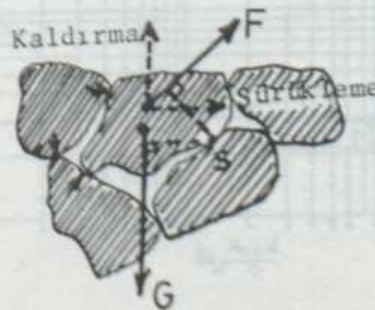
Akarsuların tabanlarındaki daneler, dane karakteristiklerine ve akım şartlarına bağımlı olarak hareket ederler. Akarsuların tabanlarında meydana gelen bu hareketlerin sonucunda üzerlerine inşa edilen su yapılarının ömürlerinin azalmasına ve harab olmalarına neden olurlar.

Akarsuların tabanlarındaki danelerin harekete başlamasında taban kayma hızının veya gerilmesinin değeri kritik değeri aştığı zaman, daneler yuvarlanmaya ve kaymaya başlarlar. Taban kayma hızının artan değerleri için, kaldırma kuvveti batmış haldeki danelerin ağırlıklarını yendiğinden, daneler tabandan ayrılarak, "askı haline" geçerler.

Ekseriyetle yuvarlanma, kayma ve sıçrama yapan danelerin hareketi "sürüntü maddesi hareketi" olarak isimlendirilirler /25/.

Eğer akımda bulunan tedirgin edici (Dinamik) kuvvetler (sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, dane yüzeylerindeki viskoz kuvvetler) kohezyonsuz zeminlerdeki esas stabilite faktörü olan ağırlık kuvvetinden büyükse tabandaki danenin dengesi bozulur /26/.

Tedirgin edici kuvvet F (sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin bileşkesi), τ_o Taban kayma gerilmesi ve d^2 dane yüzey alanıyla orantılıdır. Ağırlık kuvveti ise $(\rho_s - \rho) g d^3$ ile orantılıdır. Şekil-3.1'de görülen s dönme noktasına göre bu kuvvetlerin momentleri alınır (3.1) ifadesi bulunur.



Şekil-3.1 Daneye Etkili Kuvvetler

$$\alpha_1 \tau_o \frac{\pi}{4} d^2 \geq \alpha_2 (\rho_s - \rho) g \frac{\pi}{6} d^3$$

veya

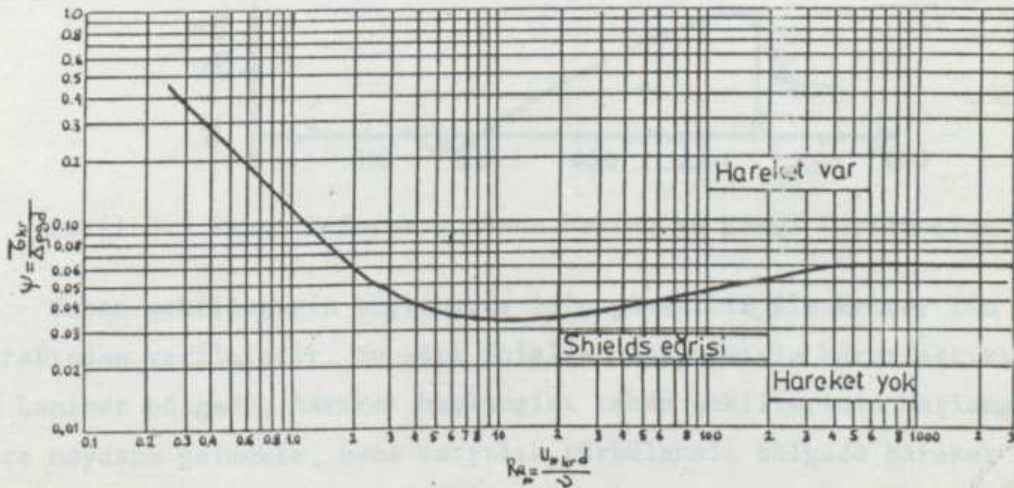
$$\tau_o \geq c (\rho_s - \rho) g d \quad (3.1)$$

Burada c faktörü taban yakınındaki akım şartlarına, dane şekline, diğer danelere göre durumuna vs. bağımlı olacaktır. Taban yakınındaki akım şartları $Re_* = U_* d / \nu$ ile orantılı olan dane boyutunun viskoz alt tabakanın kalınlığına oranıyla (d/δ) tariflenebilir /26/.

$$\psi_{kr} = \frac{\tau_{kr}}{(\rho_s - \rho) g d} = \frac{U_{*cr}^2}{\Delta g d} = f\left(\frac{U_{*cr} d}{\nu}\right) = f(Re_*) \quad (3.2)$$

(3.2) denkleminin sol tarafı boyutsuz kritik kayma gerilmesi veya dane Froude sayısı, sağ tarafı ise dane Reynolds sayısı olarak isimlendirilir. Bu boyutsuz sayılar üzerine ilk araştırma Shields tarafından yapılmıştır (Şekil-3.2).

Kritik taban kayma gerilmesinin bulunmasında, Shields eğrisi bugün en çok uygulanan bir kriter olmakla birlikte en büyük eksigi, türbülans çalkantılarından dolayı akım alanında, dolayısıyla taban malzemesi üzerinde meydana gelebilecek etkileri kapsamamış olmasıdır /9/.



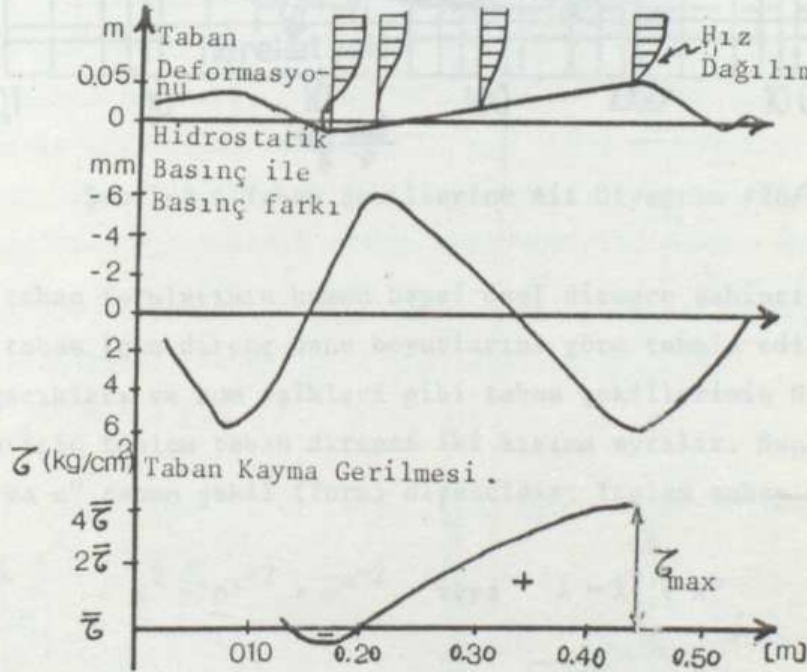
Şekil-3.2 Shields Eğrisi /26/.

Türbülanslı akım içinde dinamik kuvvetler sabit bir değere sahip değildir ve hız çalkantıları ile aynı büyüklükte olan bir periyodik seyirle zaman içinde değişirler. Taban yakınındaki hız çalkantılarının, taban sürüklenme hızına oranı $2,5 \sim 3$ değerinde olmaktadır /27,28/.

3.2. Taban Şekillerinin Oluşması ve Taban Direnci

Taban kayma gerilmesinin büyük değerlerinde hareket eden sürüntü maddesi miktarı artacak ve hareketli tabanda deformasyonlar oluşacaktır. Deformasyonlar zamana bağımlı olduklarından, pratikte bir denge durumunun bulunması oldukça güç olacaktır /26/.

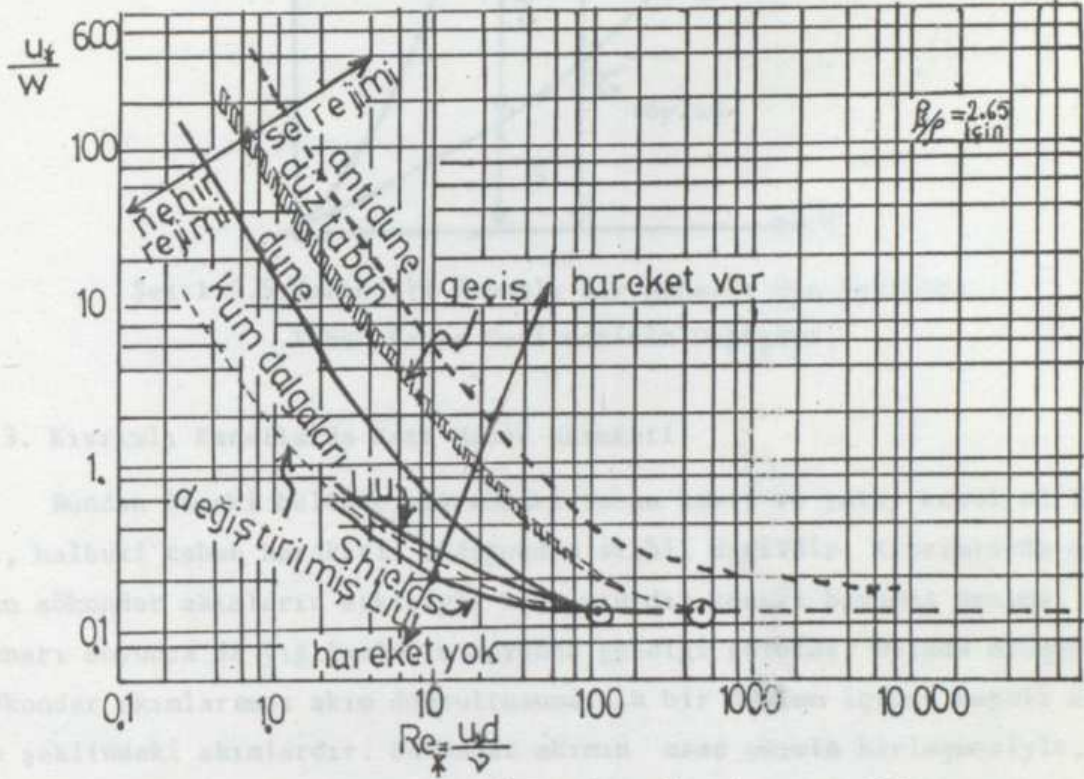
Taban hareketi, akımdaki değişimlere paralel olarak sürekli bir biçimde değişim halindedir. Çünkü Şekil-3.3'den de görüldüğü gibi, tabanda oluşan deformasyonlar, taban yakınındaki hidrostatik basınç dağılımında ve taban kayma gerilmesinde önemli değişimlere neden olur /9/.



Şekil-3.3 Taban Deformasyonunun Basınç ve Kayma Gerilmesine Etkisi

Taban şekillerinin başlangıcı için güvenilir ilk kriter Liu (1957) tarafından verilmiştir. Bu eğri Shields diyagramıyla karşılaştırıldığında Laminer bölgede, hareket başlangıcı taban şekillerinin başlangıcından önce meydana gelmekte, buna karşılık türbülanslı bölgede hareket başlangıcı ile taban şekilleri aynı anda oluşmaktadır. Bu diyagram çeşitli

taban formları için Simons (1966) tarafından geliştirilmiştir. (Şekil-3.4) /26/.



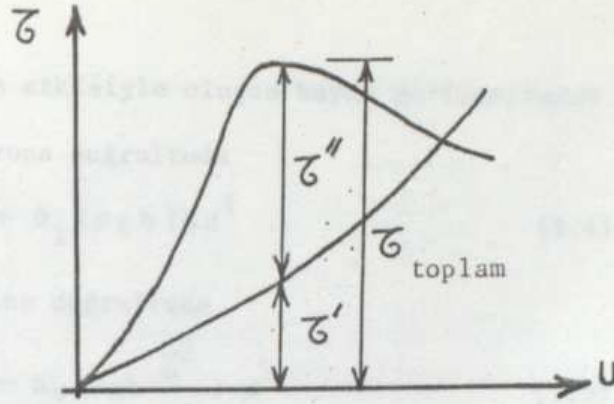
Şekil-3.4 Taban Şekillerine Ait Diyagram /26/.

Bu taban formlarının hemen hepsi özel dirence sahiptirler. Hareketsiz düz taban için direnç dane boyutlarına göre tahmin edilebilir fakat kum dalgacıkları ve kum eşikleri gibi taban şekillerinin üzerinden geçen akım için toplam taban direnci iki kısma ayrılır. Bunlar c' dane direnci ve c'' taban şekil (form) direncidir. Toplam taban direnci

$$c^2 = c'^{-2} + c''^{-2} \quad \text{veya} \quad \lambda = \lambda' + \lambda'' \quad (3.3)$$

ifadesiyle verilebilir /26/.

Taban form direnci genelde sabit bir değer olarak belirlenememektedir. Yapılan deneysel çalışmalar bu direncin değişiminin 5~6 misli civarında olduğunu göstermiştir.

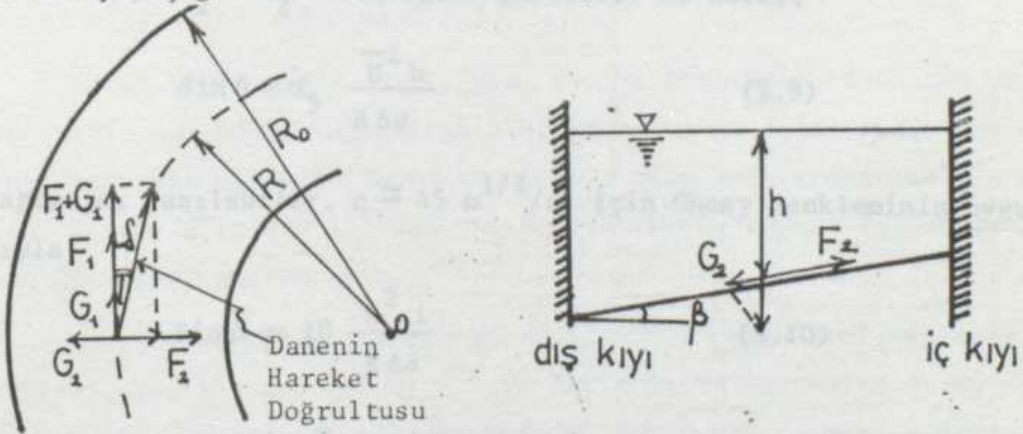


Şekil-3.5 Hareketli Tabanlı Bir Kanalda Hız Arttıkça Taban Kayma Gerilmesinin Değişimi.

3.3. Kıvrımlı Kanallarda Katı Madde Hareketi

Bundan önceki bölümde kıvrımdaki taban sabit ve yatay kabul edilmişti, halbuki taban hareketli olduğundan stabil değildir. Kıvrımlarda oluşan sökonder akımların etkisiyle kıvrımın dış kenarı boyunca oyulma, iç kenarı boyunca da yığılmaların meydana geldiği görülür. Burada oluşan sökonder akımla esas akım doğrultusuna dik bir düzlem içinde kapalı devre şeklindeki akımlardır. Sökonder akımın esas akımla birleşmesiyle, kıvrımlarda oluşan helikodial akım, tabanda kıvrımın dışından içine doğru yönelirken dış kıydan oyduğu malzemeyi, iç kenara doğru taşır.

Sabit şevli, debili ve eğrilik yarıçaplı bir kıvrımda hareketsiz bir daneye aşağıdaki kuvvetler etkir (Şekil-3.6) /30/.



Şekil-3.6 Kıvrımdaki Bir Daneye Etkili Kuvvetler /30/.



I- Akımın etkisiyle oluşan kayma gerilmesinden dolayı

a) Boyuna doğrultuda

$$F_1 = \alpha_1 (\rho g h I) d^2 \quad (3.4)$$

b) Enine doğrultuda

$$F_2 = \alpha_2 \left(\rho g h \frac{\bar{u}^2}{gR} \right) d^2 \quad (3.5)$$

II- Ağırlıktan dolayı

a) Boyuna doğrultuda

$$G_1 = \alpha_3 (\rho_s - \rho) d^3 g \sin i \quad (3.6)$$

b) Enine doğrultuda

$$G_2 = \alpha_4 (\rho_s - \rho) d^3 g \sin \beta \quad (3.7)$$

ortalama akım hattında kuvvetlerin bileşke kuvveti için

$$\tan \phi = (F_2 - G_2) / (F_1 + G_1) \quad (3.8)$$

Denge halinde, enine doğrultuda katı madde hareketi yoktur, bu da $\phi = 0$ veya $F_2 = G_2$ olacağını gösterir. Bu halde,

$$\sin \beta = \alpha_5 \frac{\bar{u}^2 h}{R \Delta d} \quad (3.9)$$

bağıntısı yazılabilir. $c \approx 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ için Chezy denkleminin uygulanmasıyla,

$$\sin \beta \approx 10 \frac{h^2 \cdot i}{R \Delta d} \quad (3.10)$$

β açısı genellikle 15° den küçük olduğundan $\beta = dh/dR$ nin yerleştirilmesiyle ve $I = I_o \cdot \frac{R_o}{R}$ kabulüyle (3.10) ifadesinden

$$\frac{dh}{h^2} \approx \left(\frac{10 I_o R_o}{\Delta d} \right) \left(\frac{dR}{R^2} \right) \quad (3.11)$$

elde edilir, bu denkleminde integre edilmesiyle

$$\frac{1}{h} - \frac{1}{h_0} = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \left(\frac{10 I_0 R_0}{\Delta d} \right) \quad (3.11)$$

bulunur. Genelde, deterministik bir ifade olarak verilebilen bu yaklaşım dizayn için tam doğru sonuç vermemektedir. Bu konuda daha iyi sonuçlar hidrolik modellerle alınabilir, bunun yanında stokastik yöntemlerin yardımı ile deyaklaşım yapılabilir. Buradan şunu söyleyebiliriz kıvrımın eğrilığının (R) değişmesiyle tabanın enine eğimi (β) değişmektedir.

Gerçekte, kıvrımlardaki taban deformasyonu olayı oldukça karışık bir konudur. Bu deformasyon sırasında çok farklı olaylar bir arada bulunur. Bunlar ,

. Kritik sürüklenme debisinin kıvrıma doğru yönelişi

. Yatağın genel pürüzlülüğünü değiştiren dalga ve eşiklerin meydana gelmesi

. Stasyoner dalgaların meydana gelmesidir /31/.

Bu olayların, kıvrımlardaki katı madde hareketi üzerine etkileri oldukça önemlidir. Enlemesine momentum değişiminden dolayı meydana gelen hız dağılımının ayarlanması, taban kayma gerilmesinde ilave bir değişimin oluşmasına neden olur /7/.

Morin (1971) /31/, özellikle, oyulma çukurunun tabanında yayılan eşiklerin çok büyük boyutlarda oluştuğunu ve bu eşiklerin, katı madde taşınımındaki süreksizlikten ileri geldiğini belirtmektedir. Bu eşiklerin, su derinliğinin 1/3'üne yakın yüksekliğe kadar bir boyuta sahip olabileceğini gözlemiştir.

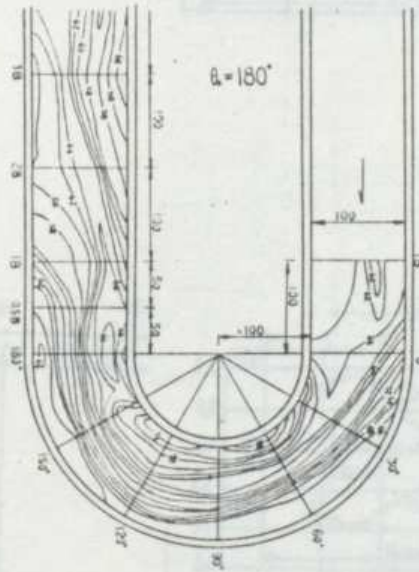
Kıvrımlardaki katı madde hareketine etki eden değişkenlerin karışıklığı, her kıvrım için ayrı ayrı neticelerin doğmasına neden olur. Bu bakımdan, araştırmacılar bu konuda, genel bir formül vermekten kaçınmışlardır.

Suga (1967) /32/, üç ayrı tip kıvrımda yaptığı deneylerde, taban deformasyonuna etkili parametrelerin,



$$F = f \left(\frac{R}{B}, \theta, \frac{h_m}{B}, \tau_*, Fr \right) \quad (3.12)$$

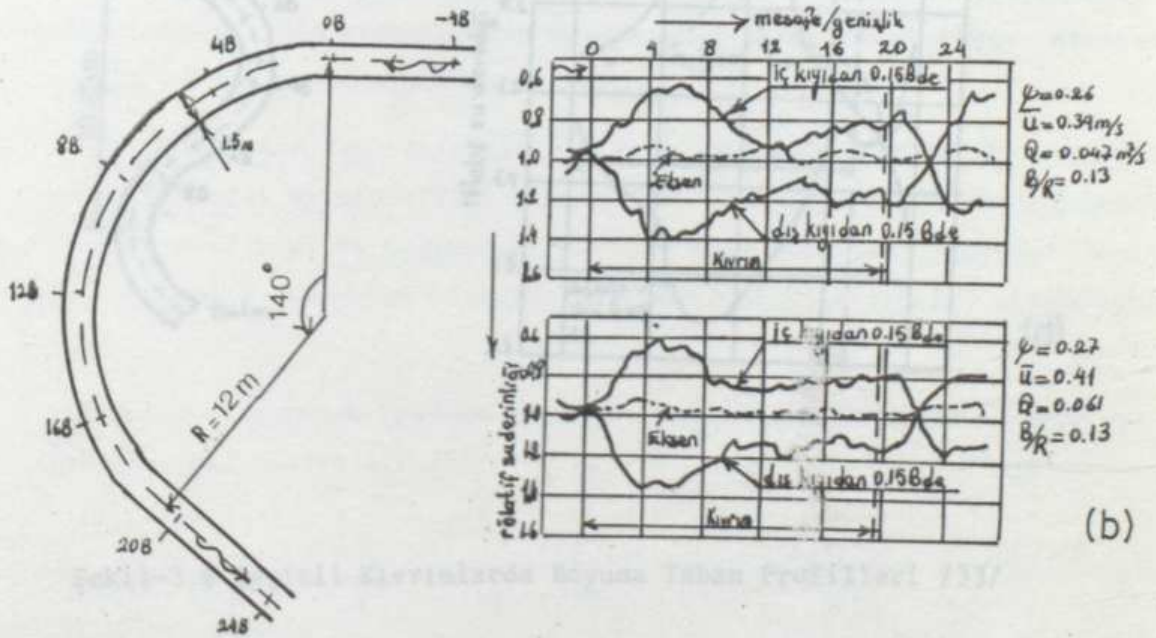
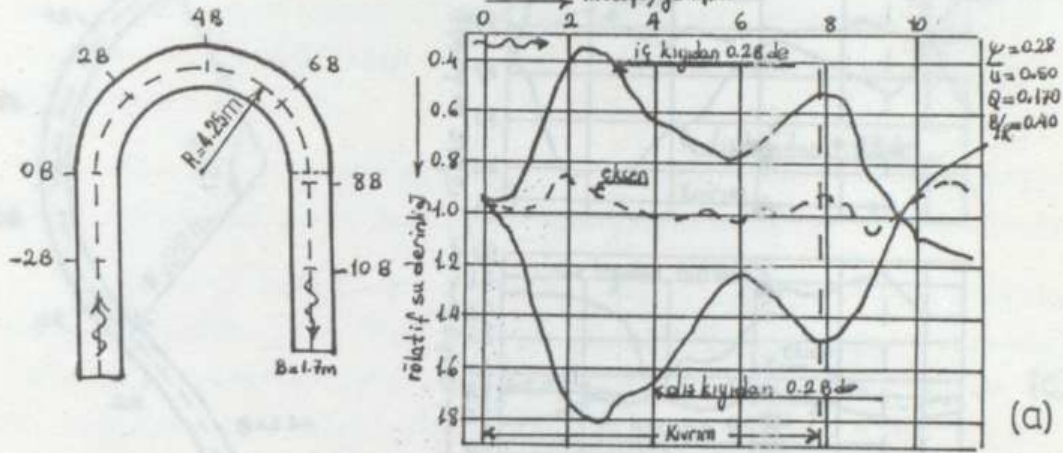
olduğunu belirtmiş ve dinamik denge halindeki deformasyon için şu neticeleri vermiştir, Buna göre, kıvrımın hemen girişinde menbadan taşınan malzemenin yeterli olmasından dolayı meydana gelen erozyonun çok fazla olmaması, buna karşılık, oyulmanın diğer hattı ise menbadaki doğrusal kanalın ekseninin uzantısı ile kıvrımın dış duvarının kesişme noktasında başlar ve bundan sonra taşınan malzemenin yeterli olmamasından dolayı maksimum oyulma kıvrımın mansabına doğru sekonder akımın şiddetlenmesiyle dış duvar boyunca yerleşir.



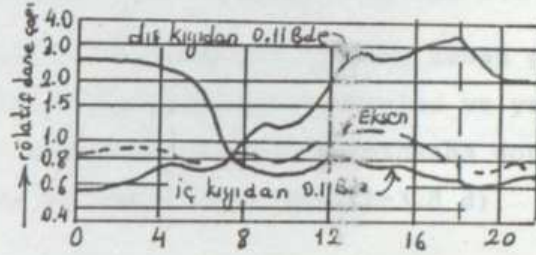
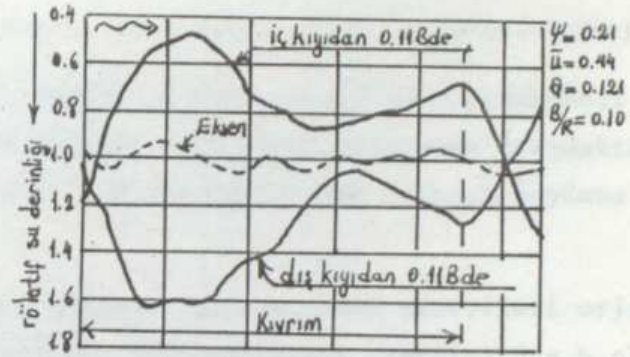
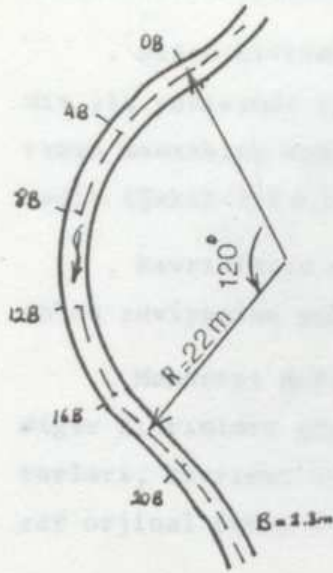
Şekil-3.7 180° lik Bir Kıvrımda Taban Deformasyonu /32/.

Struiksma, Olesen, Floksta, Vriend (1985) /33/ altı ayrı tip kıvrımlı kanaldaki deney sonuçlarını kullanarak taban deformasyonunun belirlenmesi amacıyla bir matematik model kurmaya çalışmışlardır. Yapılan tüm deneylerde (h/z) rölatif su derinliği, kıvrımın merkez hattında ve kanal duvarlarından sabit bir mesafede olmak üzere, merkez hattının sağında ve solunda üç ayrı boyuna profil halinde verilmiştir.

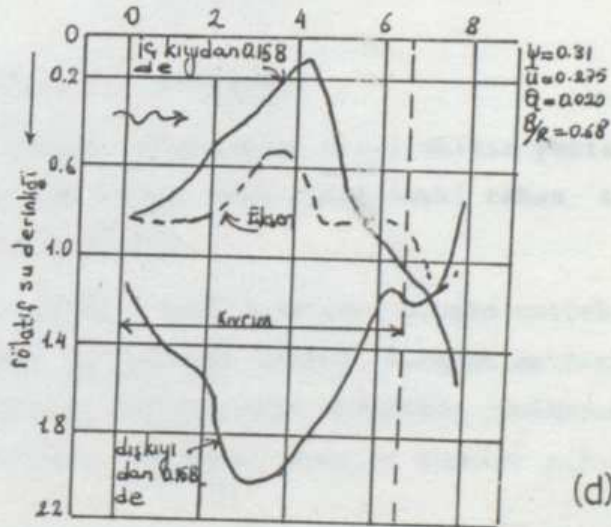
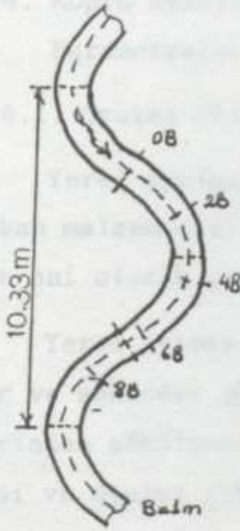




Şekil-3.8 Çeşitli Kıvrımlarda Boyuna Taban Profilleri /33/



(c)



(d)

Şekil-3.8 Çeşitli Kıvrımlarda Boyuna Taban Profilleri /33/

Şekil-3.8'deki çeşitli kıvrımlarda yapılan deneylerden bulunan boyuna taban profilleri incelendiğinde şu sonuçlar yazılabilir.

. 180° lik kıvrımda giriş kesitinden itibaren dış kenar boyunca oyulma, iç kenar boyunca yayılma miktarı artmakta ve 60° - 75° de maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu değerden itibaren 135° ye kadar azalmakta ve

tekrar kıvrımın mansabına doğru artış göstermektedir (Şekil-3.8 a) ,

. Diğer kıvrımlarda da benzeri boyuna profiller oluşmaktadır. Kıvrımın ilk yarısında oyulma ve yığılma miktarları maksimuma ulaşmakta, kıvrımın mansabına doğru ise 180° lik kıvrıma benzer salınım meydana gelmektedir (Şekil-3.8 a,b).

. Kıvrımların eksenleri boyunca, boyuna taban profilleri orjinal taban seviyesine yakın salınımlar göstermektedir.(Şekil-3.8 a,b,c).

. Menderes meydana getiren kıvrımda ise, boyuna taban profilleri diğer kıvrımlara göre farklılık göstermektedir. Oyulma ve yığılma miktarları, kıvrımın ortasında maksimuma ulaşmakta, mansaba doğru ise tekrar orjinal taban seviyesine yaklaşmaktadır (Şekil-3.8 d).

3.4. Köprü Ayaklarında Meydana Gelen Oyulma ve Bu Oyulmaya Etkili Parametreler

3.4.1. Oyulma Olayının Başlaması ve Gelişmesi

Yerel oyulma, ayak etrafında oluşturulan yerel akımın yapısıyla, taban malzemesinin erozyonundan dolayı ayak etrafındaki taban seviyesinin ani olarak azalmasıyla tariflenir.

Yerel akımın yapısıyla ilgili, ayak etrafında oluşan vorteks sistemler ve sökonder akımın etkisi ile tabanda dengede bulunan malzemelerin yerinden sökülmesi ve taşınması, böylece ayak etrafında oyulmanın başlaması ve oyulma çukurunun oluşması şeklinde, olaylar zinciri sıralanabilir.

Akarsu tabanında meydana gelen bu değişim matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir /14/ ,

$$\frac{dQ_s}{dt} = q_{s1} - q_{s2} \quad (3.13)$$

Burada

$\frac{dQ_s}{dt}$ Birim zamanda yerel oyulmanın hacminde meydana gelen değişme



q_{s1}	Birim zamanda akımın kapasitesiyle oyulma çukurundan taşınan malzeme miktarı
q_{s2}	Tedirgin edilmemiş akımın oyulma çukuruna taşıdığı katı madde miktarı.

Bu denklem irdelendiğinde

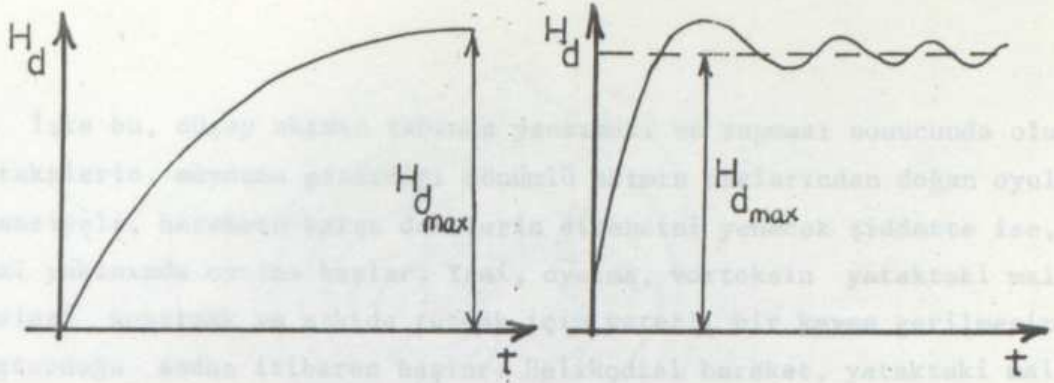
- 1) $q_{s1} = q_{s2} = 0$ ise oyulma yoktur.
- 2) $q_{s1} > 0$ ve $0 \approx q_{s2} \ll q_{s1}$ ise, yatakta sürüntü hareketi yokken oyulma vardır. Bu durumdaki oyulmaya "temiz su halindeki oyulma" adı verilir.
- 3) $q_{s1} \geq q_{s2} > 0$ ise, yatakta hem sürüntü hareketi ve hem de oyulma vardır. Bu q_{s2} durumdaki oyulmaya da "daimi sürüntü maddesi taşınımı halindeki oyulma" adı verilir /34, 14/.

Görüldüğü gibi, tabanda sürüntü hareketi olmadığı halde bile engel etrafında oyulma meydana gelmektedir. Bunun nedeni, engelden dolayı oluşan türbülans ve vortekslerdir. Çünkü, engel etrafındaki taban kayma gerilmesini etkileyen bu olaylar tabanda oyulmaya neden olurlar /9/.

Temiz su oyulmasında, maksimum denge oyulma derinliğine, oyulma çukuru civarındaki kayma gerilmeleri katı maddeyi hareket ettirebilecek gücün altına düştüğünde erişilir /35/. Bu durumda maksimum oyulmaya daha uzun zamanda varılır.

Hareketli taban halindeki oyulmada, maksimum denge oyulma derinliğine, oyulma çukuruna giren katı madde ile oyulma çukurundan çıkan katı madde birbirine eşit olduğunda erişilir /35/. Bu halde ise maksimum oyulmaya çok kısa zamanda ulaşılır. ve bu seviyede oyulma çukuru denge değeri civarında periyodik olarak değişir, bunun nedeni ise hareketli tabanda oluşan taban şekilleridir (Şekil-3.9) /14/.

Oyulma çukurunun sınır geometrisi devamlı olarak değişir. Sınır geometrisindeki bu değişim akım alanını ve dolayısıyla yerel akım hızını değiştirecektir. Böylece, akımın taşıdığı sürüntü yükü de değişecektir.

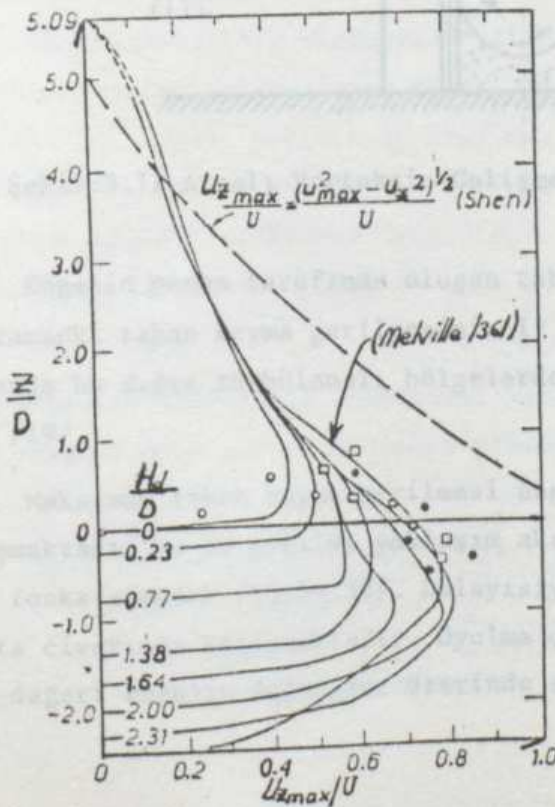


a) Temiz Su oyulması Hali b) Hareketli Taban Oyulması Hali

Şekil-3.9 Oyulmanın Zamana Göre Değişimi

Oyulma devam ettikçe hız azalacağından, q_{s1} de gittikçe azalır ve sonunda q_{s2} 'e eşit olur neticede $dQ_s/dt = 0$ olacağından oyulma durur. Oyulma olayı kararlı bir karakter taşımadığı halde, artık zamanla değişmeyen kararlı bir duruma ulaşılır. Bu oluşan denge durumuna "dinamik denge" adı verilir /2/.

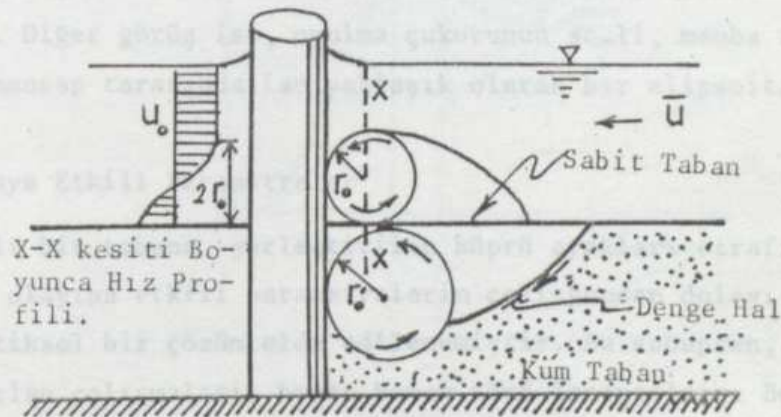
Daha önceki bölümde, ayağın menbaında oluşan düşey akım hızından ve vorteks sistemlerden bahsedilmişti. Silindirik köprü ayağı önünde oyulma çukuru olduğu zaman düşey akım orjinal taban seviyesinin altında maksimum şiddetine ulaşır. Düşey akımın maksimum hızı ayağın menba yüzeyinden itibaren ayak çapının $0.05 \sim 0.02$ de meydana gelmektedir ve bu hız ayağa yaklaştıkça azalmaktadır /36/. (Şekil-3.10).



Şekil-3.10 Oyulma Çukurunun Değişik Derinlikleri için Farklı Seviyelerde, çeşitli Ayak Çaplarına Göre Düşey Akım Pikleri /24/.

İşte bu, düşey akımın tabanda yansması ve sapması sonucunda oluşan vortekslerin, meydana getirdiği dönümlü akımın hızlarından doğan oyulma potansiyeli, harekete karşı danelerin direncini yenecek şiddette ise, engel yakınında oyulma başlar. Yani, oyulma, vorteksin yataktaki malzemeleri koparmak ve askıda tutmak için yeterli bir kayma gerilmesini oluşturduğu andan itibaren başlar. Helikodial hareket, yataktaki malzemeyi mansaba doğru sürükler ve vorteksler onu mansap basınç gradyanı ve viskozitenin etkisi ile her yöne yayar. Bu harekette, atnalı vorteks sistemiyle, bir emme fonksiyonu gören art-iz vorteks sisteminin rolü çok büyüktür /37/.

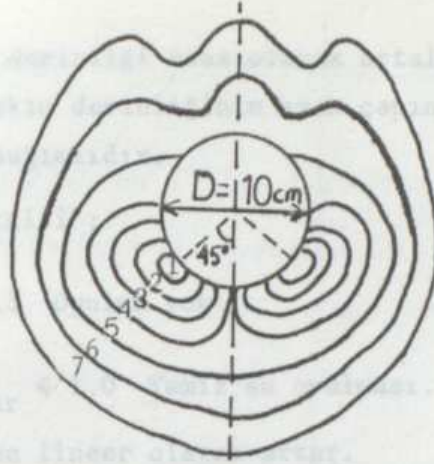
Çukur derinleştikçe, sınırdaki malzemeler tabana doğru kayar, çünkü vorteks dengede değildir. Böylece, oyulma çukuru genişler. Oyulma, vorteksin taban malzemelerini taşıyacak veya askıda tutacak yeter kuvvete sahip olmadığı zaman durur (Şekil-3.11).



Şekil-3.11 Atnalı Vorteksin Gelişmesi ve Vorteksin Boyutları /21/.

Engelin menba tarafında oluşan taban kayma gerilmesi engel olmadığı zamanki taban kayma gerilmesinin 12 katı kadar olmaktadır. Aynı zamanda bu değer türbülanslı bölgelerde 2.5 katı mertebesine çıkmaktadır /19/.

Maksimum taban kayma gerilmesi engelin menbaında 45° lik kısımda oluşmaktadır ve bu gerilme yaklaşım akım hızının ve engel boyutunun bir fonksiyonudur /13,14,38/. Dolayısıyla, engel etrafındaki oyulma bu nokta civarında başlamaktadır. Oyulma çukuru büyüdükçe, oyulmanın maksimum değeri engelin doğurganı üzerinde sabitleşmektedir (Şekil-3.12)



Şekil-3.12 Oyulma Olayının Başlaması ve Gelişmesi /38/.

Engel etrafında oluşan oyulma çukurunun biçimi hakkında da iki ayrı görüş mevcuttur. Birincisi, oyulma çukurunun şekli yaklaşık olarak en küçük boyutu engelin çapı kadar olan ters yatırılmış bir kesik konidir, konin yan şevinin eğimi, taban malzemesinin su altındaki şev açısına eşittir. Diğer görüş ise, oyulma çukurunun şekli, menba tarafında yarım koni, mansap tarafında ise yaklaşık olarak bir elipsoittir /9/.

3.4.2. Oyulmaya Etkili Parametreler

Hareketli bir tabana yerleştirilen köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulma olayına etkili parametrelerin çokluğundan dolayı, bugüne kadar matematiksel bir çözüm elde edilememiştir. Bu sebepten, bu konu hakkında yapılan çalışmaların hemen hemen tümü deneyseldir. Buna rağmen, elde edilen amprik bağıntılar arasında bile tam bir uygunluk henüz sağlanamamıştır. Ayrıca çalışmalar doğrusal kanallardaki yersel oyulma olayının araştırılması etrafında yoğunlaşmıştır. Bu bakımdan burada öncelikle doğrusal kanaldaki oyulma olayına etkili parametreleri gözden geçireceğiz.

Breusers (1977) /2/, doğrusal kanala yerleştirilmiş köprü ayakları için yapılan deneylerde, oyulmaya etkili parametrelerin

$$\frac{H_d}{D} = f \left(\frac{\bar{U}}{U_{kr}}, \frac{h}{D}, \frac{d}{D} \right) \quad (3.14)$$

olduğunu belirtmiş ve şu neticeleri vermiştir,

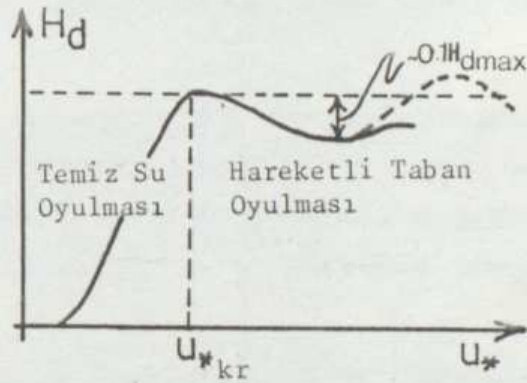
H_d Denge oyulma derinliği esas olarak ortalama akım hızı ile ortalama kritik hız oranına, akım derinliğinin ayak çapına oranına ve dane çapının rölatif derinliğine bağlıdır.

1- $\bar{U}/\bar{U}_{kr}$ nin etkisi :

a) $\bar{U}/\bar{U}_{kr} \leq 0.5$ Oyulma yok.

b) $0.5 < \bar{U}/\bar{U}_{kr} < 1.0$ Temiz su oyulması. Bu aralıkta oyulma derinliği $\bar{U}$ ile hemen hemen lineer olarak artar.

c) $\bar{U}/\bar{U}_{kr} \geq 1.0$ Hareketli taban oyulması. Burada oyulma derinliği hız ile artmaz, çünkü çukurdan oyulan malzeme ile menbadan taşınan malzeme arasındaki dinamik denge sürüntü maddesi debisinin şiddetinden etkilenmez (Şekil-3.13)



Şekil-3.13 Kayma hızının veya yaklaşım hızının fonksiyonu olarak oyulma derinliği /24/.

2- d/D nin etkisi: Taban malzemesi dane çapının etkisi konusunda ileri sürülen çok değişik görüşler vardır.

Larras /39/, Coleman /40/ dane çapının oyulmaya etkili olmadığını, Laursen ve Toch /41/ $d = 0.44 - 2.25$ mm arasında dane çapının etkisinin olmadığını belirtmiştir. Nicollet /38/ dane çapının artmasıyla oyulmanın sabit bir değere asimtotik olarak yaklaştığını ve bu nedenle dane çapının oyulmaya etkisinin kalmayacağını belirtmektedir.

Genelde $U < U_{kr}$ için oyulma derinliği, taban malzemesinin özelliklerinden etkilenir. Hareketli taban durumunda, dane çapının oyulmanın büyüklüğüne etkisinin olup olmadığı kesin olarak bilinmemektedir.

3- h/D nin etkisi: Su derinliğinin oyulmaya etkisi konusunda üç görüş mevcuttur.

. Su derinliği oyulmaya etkili değildir. Başak /42/, Leclerc /43/.

. Su derinliği belirli bir değerden itibaren oyulmaya etkilidir,

Hancu /44/ ve Raudkivi /24/ 'e göre $h/D \geq 1$

Quesnot /37/ ve Nicollet /38/ 'e göre $h/D \geq 2$

Breusers /2/ 'e göre $h/D \geq 3$

. Su derinliği oyulmaya etkilidir, Laursen ve Toch /11/, Neill /17/ Görüldüğü gibi, su derinliğinin oyulma üzerine etkisi konusunda henüz ortak bir görüş oluşmamıştır. Buna rağmen, belirli bir değerden itibaren su derinliğinin oyulmaya etkili olmadığı düşüncesinde olanlar çoğunluk-tadır.

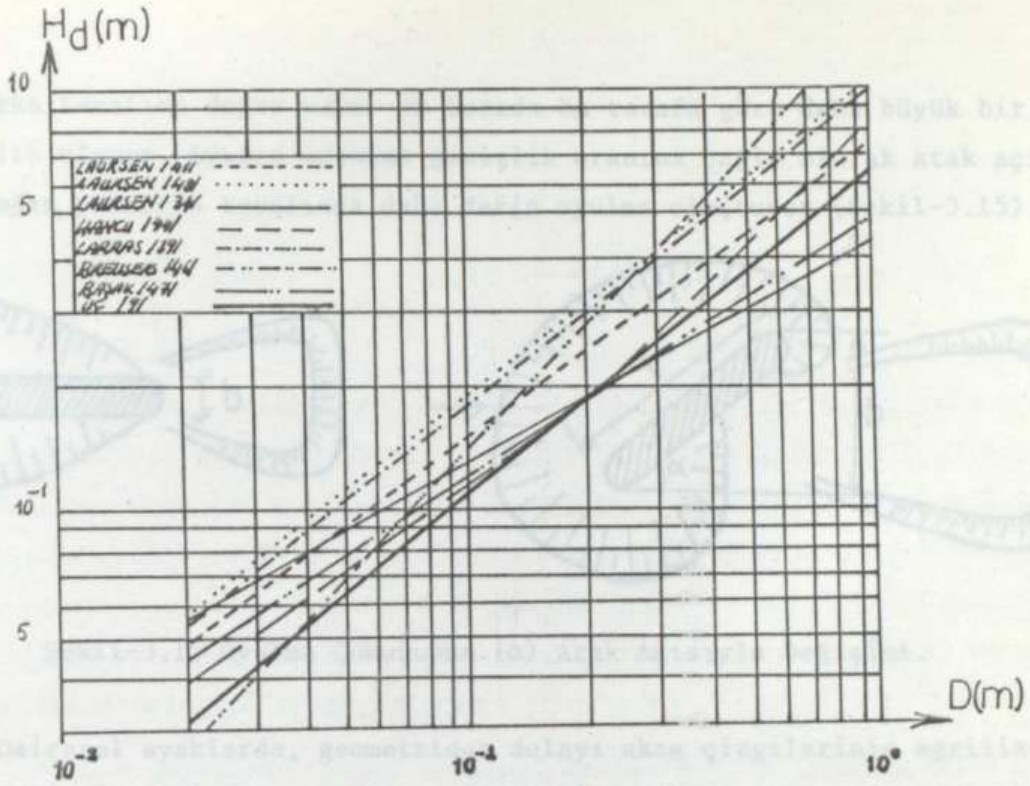
4. Ayak çapının fonksiyonu olarak verilen ifadeler : Şimdiye kadar yapılan deneyler açıkça göstermiştir ki pratik olarak oyulma derinliği ayak çapıyla ilişkilidir. Bu fiziksel olarak ta açıklanabilir, çünkü atnalı vorteks sistemi ayak çapının bir fonksiyonu olarak oyulmaya etkilidir /21/.

Genel olarak bütün araştırmacıların ortak oldukları görüş akıma dik olan ayak genişliği ne kadar büyükse, diğer bir deyişle, ayak ne kadar küt burunlu ise, oyulmanın da o kadar büyük olacağı biçimindedir.

Bazı araştırmacıların elde ettikleri bağıntılar şunlardır.

- | | | |
|------------------|-------------------------|-------------------|
| 1- Tarapore /45/ | $H_d = 1.4 D$ | |
| 2- Larras /39/ | $H_d = 1.05 D^{0.75}$ | |
| 3- Neill /17/ | $H_d = 1.5 \sim 2.5 D$ | |
| 4- Breusers /46/ | $H_d = 1.4 D$ | |
| 5- Shen /19/ | $H_d = D^{0.619}$ | |
| 6- Başak /42/ | $H_d = 0.558 D^{0.586}$ | (Dikdörtgen için) |
| 7- Başak /47/ | $H_d = 0.446 D^{0.586}$ | |
| 8- Üç /9/ | $H_d = 0.61 D^{0.766}$ | |





Şekil-3.14 Maksimum Denge Oyulma Derinliğinin Ayak Çapı ile Değişimi /9/:

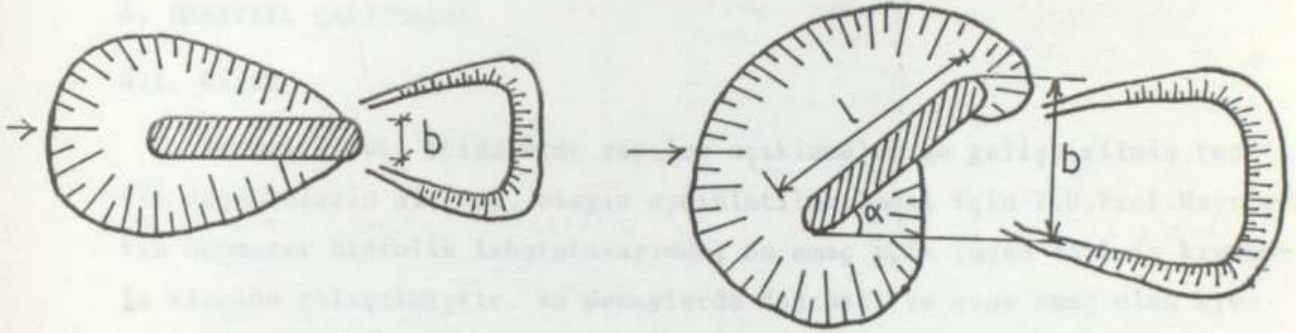
4- Ayak şeklinin etkisi : Ayaklar etrafındaki oyulmaya akım çizgilerinin eğriliklerinin etkili olduğu bilinmektedir. Shen, Schneider ve Karaki /14/ ayak şekillerini iki kategoride sınıflandırdı.

i) Küt burunlu ayaklar, bunlar kuvvetli vorteksler meydana getirirler ve böylece maksimum oyulma ayağın burnunda meydana gelir.

ii) Keskin burunlu ayak, bunlar da atnalı vorteksin etkisi zayıftır ve maksimum oyulma derinliği mansap yakınında meydana gelmektedir. Laursen /48/, değişik ayak şekillerinde yaptığı deneyler sonucunda şekil katsayılarını tespit etmiştir.

5- Atak açısının etkisi: Ayağın akımla belirli bir açı yapması halinde oyulmanın bundan etkilenmesi söz konusudur. Oyulma çukurunun derinliği, gelen akım tarafından görülen genişliğin fonksiyonudur, Başak /42/, bu genişliği "etkili genişlik" olarak tanımlamıştır. Akıma geliş güzel yerleştirilmiş uzun bir ayakta, ayağın kalınlığı ile karşılaştırıldığında akımın gördüğü genişlik daha fazladır. Atak açısından ve böylece ayağın görünen genişliğinden dolayı, oyulma çukurunun maksimum derinliği ayağın

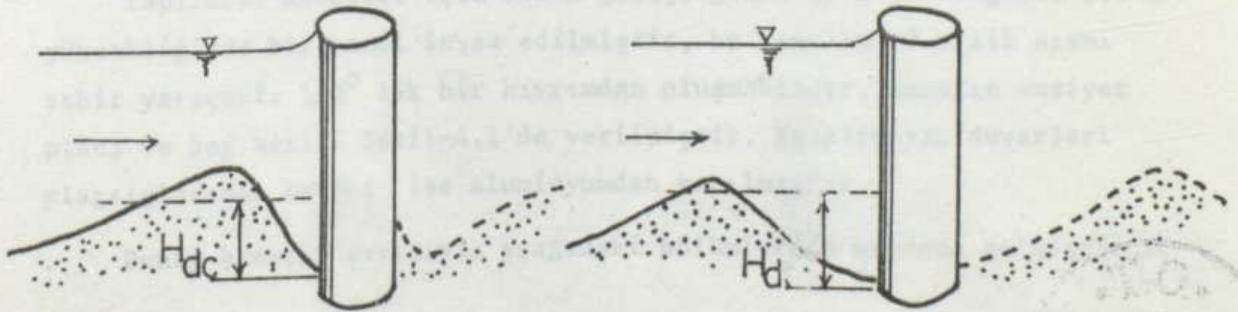
yan arka tarafına doğru kayar ve burada ön tarafa göre daha büyük bir derinlik oluşur. Ayağın uzunluk genişlik oranına bağlı olarak atak açısı ayağın yan arka tarafında daha derin oyulma oluşturur (Şekil-3.15).



Şekil-3.15 Oyulma Çukurunun (α) Atak Açısıyla Değişimi.

Dairesel ayaklarda, geometriden dolayı akım çizgilerinin eğrilikleri değişmeyeceğinden, meydana gelen oyulma çukuru atak açısından etkilenebilir.

6- Kum eşiklerinin etkisi: Oyulma çukuruna doğru kum eşiklerinin hareketinin etkisi üzerine yapılmış çok sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu etki genelde aşağıdaki gibi açıklanmaktadır. H_{dc} kum eşiğinin tepesi ayak yakınındayken meydana gelen oyulma çukurunu, H_{dt} kum eşiğinin kuyruğu ayağı geçerken meydana gelen oyulma çukurunu gösteriyorsa $H_{dc} < H_{dt}$ dir. Yapılan deneysel çalışmalar esas alındığında $H_{dc} < H_{dmax} < H_{dt}$ fakat $(H_{dt} - H_{dmax})$ ve $(H_{dmax} - H_{dc})$ kum eşiğinin yüksekliğinin yarısından azdır. Eğer akarsu tabanında böyle bir durum meydana geliyorsa maksimum denge oyulma derinliğine, tahmin edilen kum eşiği yüksekliğinin yarısı ilave edilir. Bu tip durumla genellikle taşkın esnasında karşılaşılır. Deneylerde emniyetli dizayn için oyulma derinliği tespit edilirken kum eşikleri mevcut olmamalıdır /13,14/ (Şekil-3.16)



Şekil-3.16 Kum Eşiklerinin Oyulma Çukuruna Etkisi.

BÖLÜM IV

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Bundan önceki bölümlerde yapılan açıklamalar ve geliştirilmiş teorik düşüncelerin altında, olayın aydınlatılabilmesi için Y.U.Prof.Hayrettin Dönmezer Hidrolik laboratuvarında, bu amaç için inşaa edilmiş kıvrımlı kanalda çalışılmıştır. Bu deneylerde doğrusal ve esas amaç olan kıvrımlı kanala yerleştirilen çeşitli çaptaki dairesel silindirik ayaklar etrafındaki yerel oyulmaların maksimum denge oyulma derinlikleri ve oyulma çukurunun değişimi incelenmiştir.

Deneyler esnasında, yerel oyulmayı incelerken değerlendirmeleri kolaylaştırmak amacıyla aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- 1- Sabit genişlikli ve sabit eğrilik çaplı bir kanal kullanılmıştır.
- 2- Taban malzemesi olarak her deney için aynı cins malzeme kullanılmıştır.

3- Deneyler esnasında hareketli tabandan dolayı malzeme sirkülasyonu olduğundan, mansaptan çıkan malzeme menbadan aynı tip malzeme ile beslenerek devamlı bir denge sağlanmıştır.

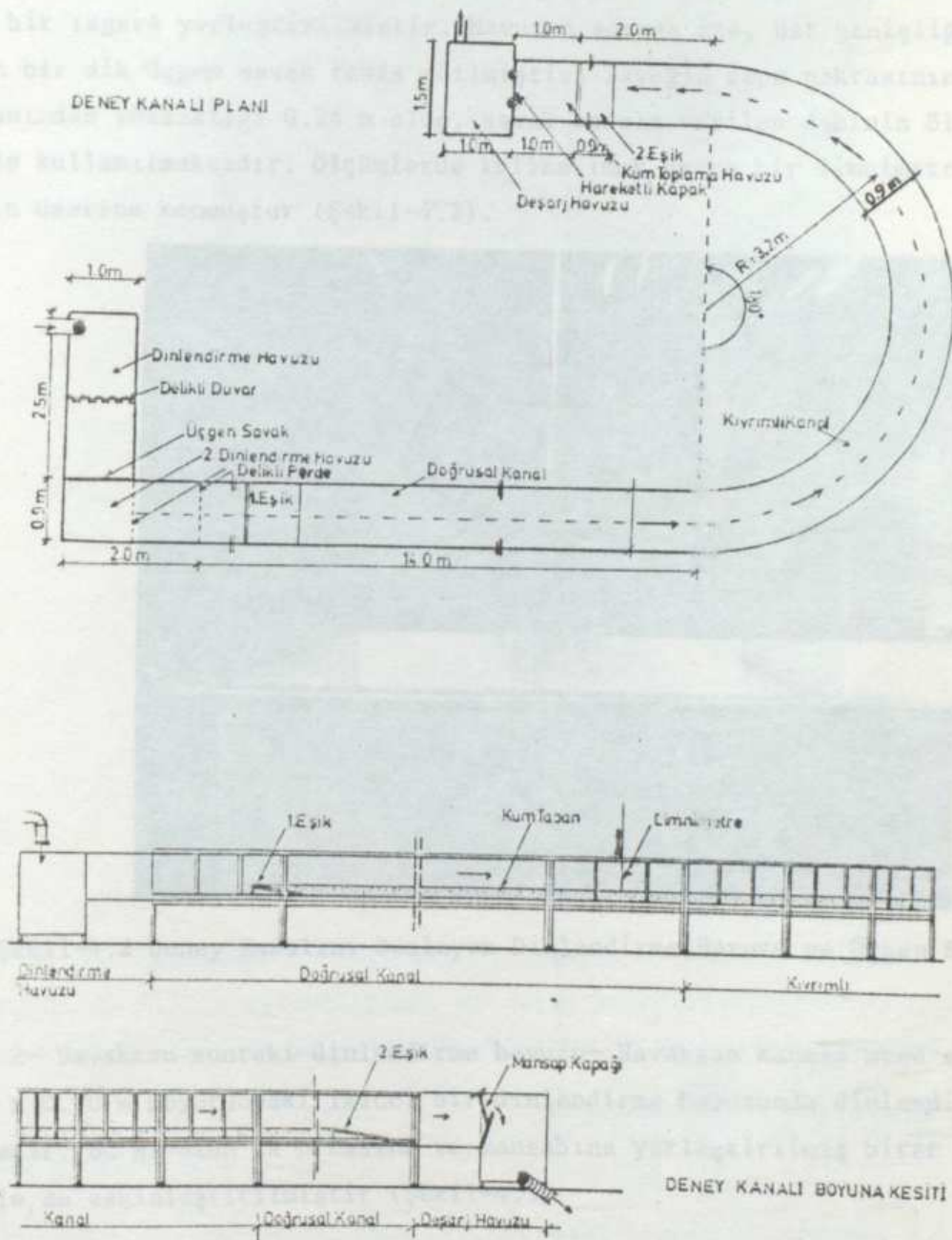
4- Her deneyin başlangıcı için taban düzlemsel hale getirilmiş, gerek taban şekillerinin ve gerekse kıvrımdan oluşan taban şeklinin başlangıçtaki etkisi ortadan kaldırılmıştır.

- 5- Her deney için akım şartları sabit tutulmuştur.

4.2. Deney Düzeni

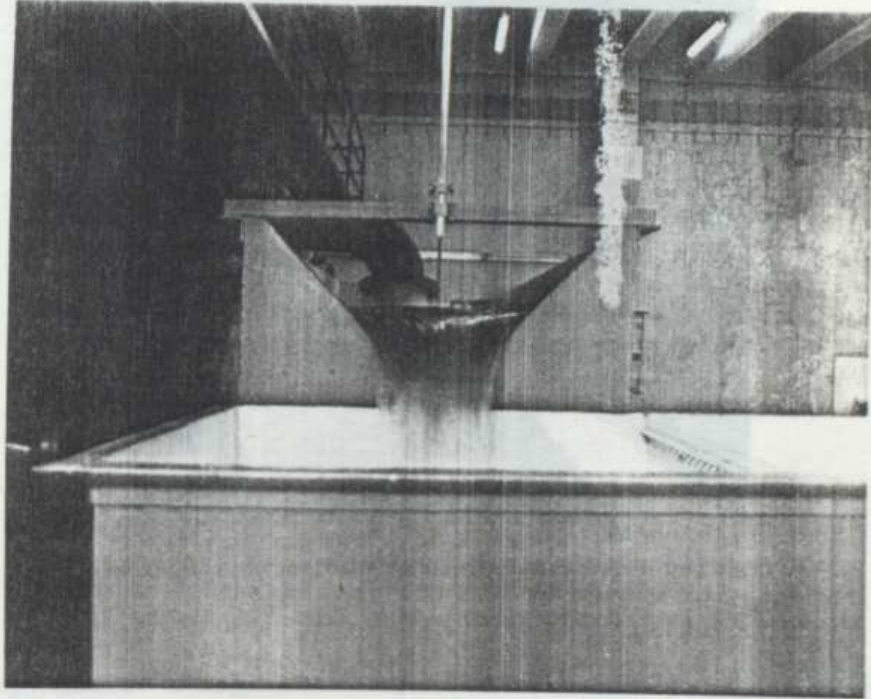
Yapılacak deneyler için 0.9 m genişliğinde 27 m uzunluğunda 0.6 m yüksekliğinde bir kanal inşaa edilmiştir, bu kanalın 12 m lik kısmı sabit yarıçaplı 180° lik bir kıvrımdan oluşmaktadır. Kanalın vaziyet planı ve boy kesiti Şekil-4.1'de verilmiştir. Kanalın yan duvarları plegsiglassdan tabanı ise alüminyumdan yapılmıştır.

Deney kanalı, sırasıyla aşağıdaki bölümlerden meydana gelmiştir.



Şekil-4.1 Deney Kanalı Vaziyet Planı ve Boy Kesiti.

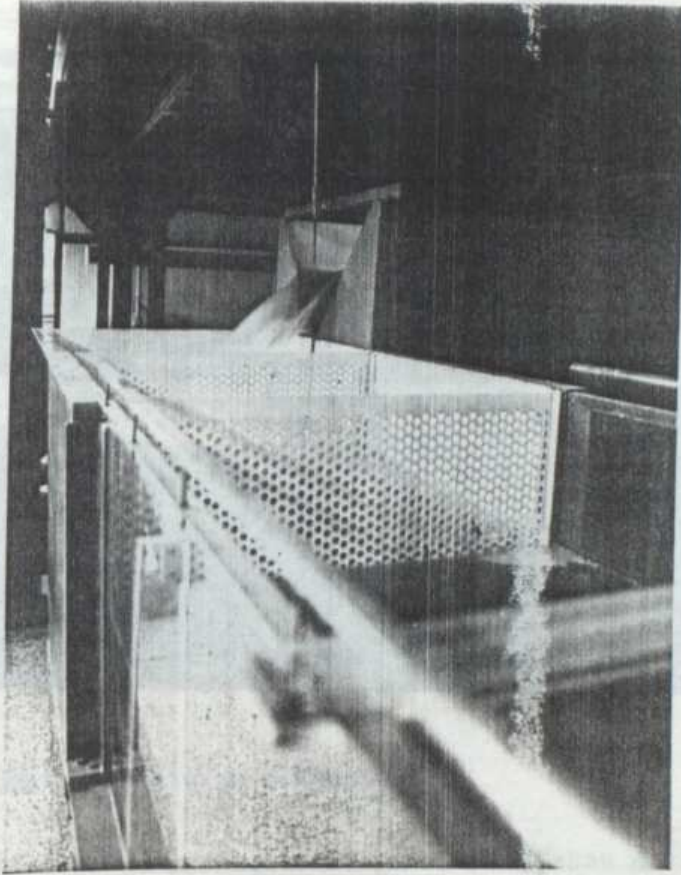
1- Deney kanalını besleyen dinlendirme havuzu ve üçgen savak- Kanalı besleyen dinlendirme havuzu 2.50 x 1.00 m boyutunda olup 0.70 m yüksekliğindedir. Havuzun ortasına suyun sakinleştirilmesi amacıyla delikli tuğladan bir ızgara yerleştirilmiştir. Havuzun sonuna ise, üst genişliği 0.9 m olan bir dik üçgen savak tesis edilmiştir. Savağın tepe noktasının, havuz tabanından yüksekliği 0.24 m olup, savak kanala verilen debinin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Ölçümlerde kullanılmak üzere bir limnometre de savağın üzerine konmuştur (Şekil-4.2).



Şekil-4.2 Deney Kanalını Besleyen Dinlendirme Havuzu ve Üçgen Savak

2- Savaktan sonraki dinlendirme havuzu- Savaktan kanala akan su 2.00 x 0.90 m boyutundaki ikinci bir dinlendirme havuzunda dinlendirilmektedir. Bu havuzun da ortasına ve mansabına yerleştirilmiş birer perde ile, su sakinleştirilmiştir (Şekil-4.3)





Şekil-4.3 Savaktan Sonraki Dinlendirme Havuzu

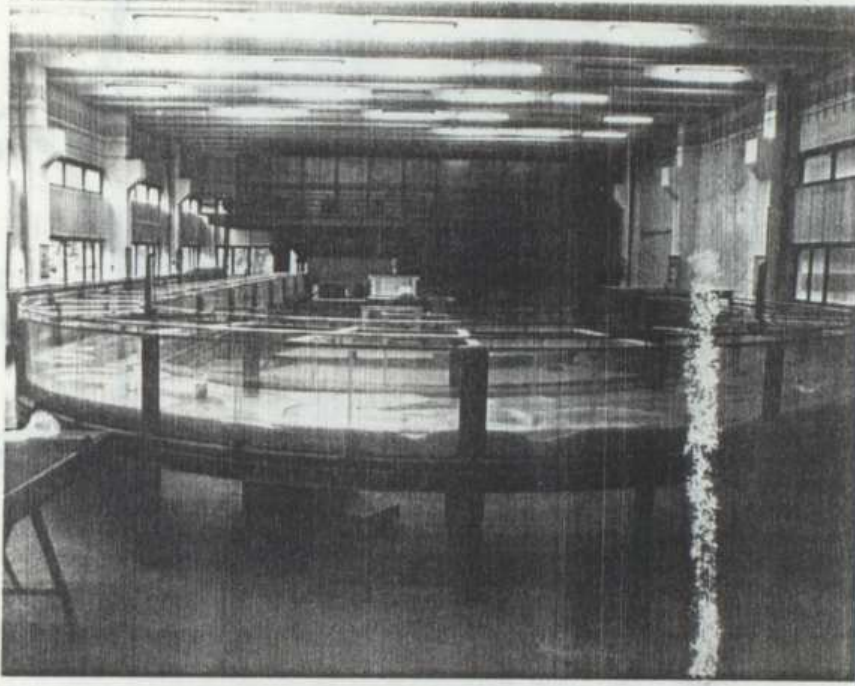
3- Deney Kanalı- Deney kanalı üç bölümden meydana gelmektedir :

a) 14 m uzunluğunda doğrusal bir kanal, bu kanalın başına 0.80 m uzunluğunda 0.20 m yüksekliğinde bir eşik yerleştirilmiştir. Böylece, kanala giren suyun taban malzemesini bozmadan akması temin edilmiştir.

b) $R = 3.20$ m yarıçaplı ve 12 m uzunluğunda 180° lık kıvrımlı bölüm (Şekil-4.4).

c) 2 m uzunluğunda ikinci bir doğrusal kanal, bu kanalın 1.5 m mansabında, uzunluğu 0.90 m yüksekliği 0.17 m olan ikinci bir eşik yerleştirilmiştir, böylece akımdan dolayı taban malzemesinin kayması önlenmiş olmaktadır.



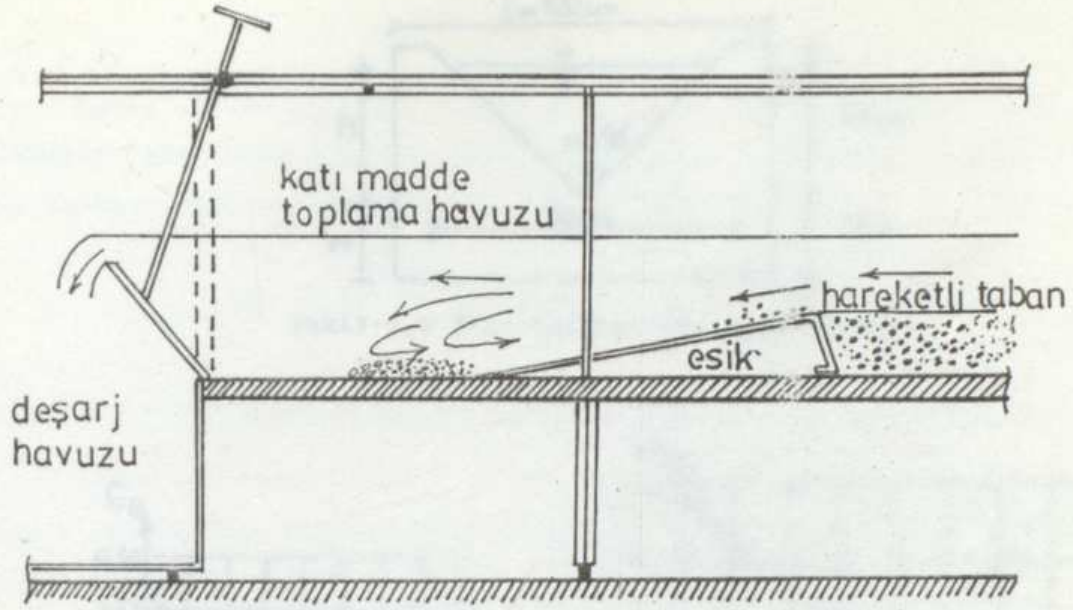


Şekil-4.4 Kıvrımlı Kanal

4- Taban malzemesinin yerleştirildiği bölüm- Taban malzemesi yukarıda belirtilen eşikler arasına yaklaşık 23 m uzunluğunda ve 0.15 m yüksekliğinde kanal tabanına serilmiştir. Taban eğimi $J = 0.001$ dir.

5- Mansap kapağı- Kanalın mansabına hareketli bir kapak yapılmıştır. Bu kapak vasıtasıyla kanaldaki su seviyesinin istenilen değerde olması sağlanmıştır. Kanalın mansabındaki kapak akım ile taşınan malzemenin toplanması içinde uygun bir ortam meydana gelmiştir. Mansaba doğru taşınan malzeme, kapağın menbaındaki 1.6 m uzunluğunda tabanı, hareketli tabandan 0.17 m aşağıda olan, bir kum toplama havuzunda birikmektedir. Böylece, mansap kapağı ile, hem mansapta su yüzü profilinde meydana gelebilecek alçalma önlenerek tabii akım sağlanmakta, hem de kum toplama havuzunda ters çevriler meydana getirerek katı maddenin bu bölgede toplanması sağlanmaktadır (Şekil-4.5).

Her deneyin sonunda, toplanan malzeme alınarak, tekrar kanala geri verilmektedir.



Şekil-4.5 Katı Maddenin Toplanması.

4.3. Savak Anahtar Eğrisinin Elde Edilmesi

Kanala giren suyun debisinin bulunmasını sağlayan dik üçgen savağın anahtar eğrisini elde etmek için çeşitli formüller verilmiştir, burada şartlarımıza en uygun olan KINDSVATER formülü kullanılmıştır /49/.

$$Q = c_e \frac{8}{15} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g} (h - 2k_h)^{5/2} \quad (4.1)$$

Burada

Q Savaklanan debi (m^3/s),	h Savak yükü
ω Üçgen tepesinin, kanal tabanına olan uzaklığı	l Savağa su getiren kanalın genişliği
α Üçgen savağın tepe açısı,	$k_h = f(\alpha)$ katsayı
	$c_e = f(\alpha)$ katsayı

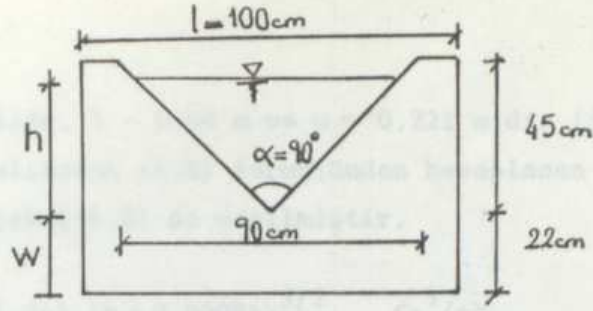
Kindsvater formülü

$$h > 0.06 \text{ m} , \quad 20^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$$

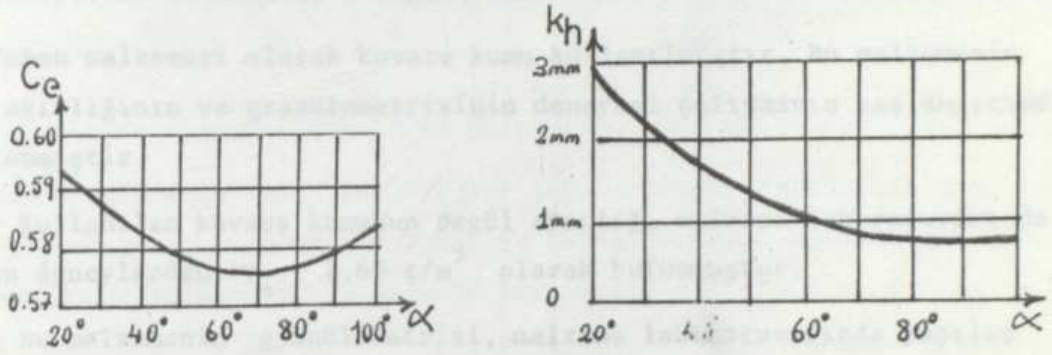
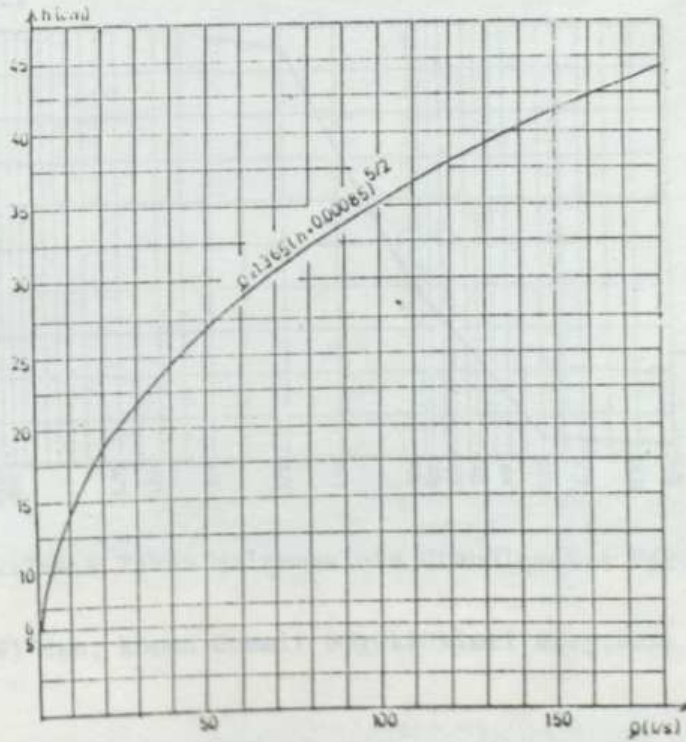
$$\omega > 0.10 \text{ m} , \quad 0.57 \leq c_e \leq 0.60$$

için geçerlidir.





Şekil-4.6 İnce Kenarlı Dik Üçgen Savak

Şekil-4.7 c_e ve k_h Katsayılarının α göre değişimleri /49/.

Şekil-4.8 Üçgen Savak Anahtar Eğrisi.

Deney sistemimizde, $l = 0.99$ m ve $\omega = 0.221$ m dir (Şekil-4.6). Bu değerler göz önüne alınarak (4.1) formülünden hesaplanan savağın formülü ve anahtar eğrisi (Şekil-4.8) de verilmiştir.

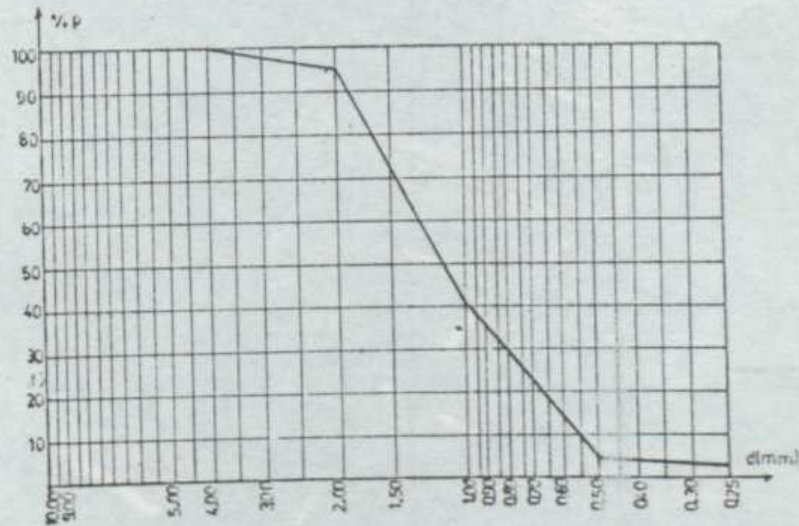
$$Q = 1.365 (h + 0.00085)^{5/2} \quad (m^3/s) \quad (4.2)$$

4.4. Deneylerde Kullanılan Taban Malzemesinin Özelliklerinin Belirlenmesi

Taban malzemesi olarak kuvars kumu kullanılmıştır. Bu malzemenin özgül ağırlığının ve granülometrisinin deneysel çalışmanın başlangıcında belirlenmiştir.

- Kullanılan kuvars kumunun özgül ağırlığı malzeme laboratuvarında yapılan deneylerden $\gamma_s = 2.65$ t/m³ olarak bulunmuştur.

- Bu malzemenin granülometrisi, malzeme laboratuvarında yapılan elek analizinden (Şekil-4.9) daki gibi belirlenmiştir.



Şekil-4.9 Taban Malzemesinin Granülometri Eğrisi.

(Şekil-4.9)'dan, kumun önemli büyüklükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.



$$d_{50} = 1.13 \text{ mm}$$

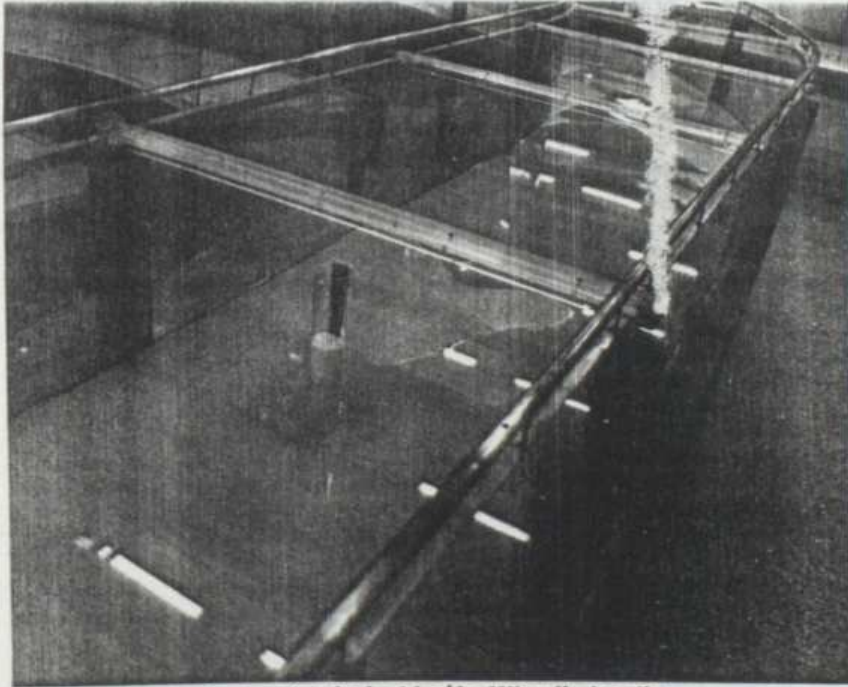
$$d_{90} = 1.86 \text{ mm}$$

$$d_m = d_{60} = 1.28 \text{ mm.}$$

Gronülometri eğrisinden görüldüğü gibi, yeterince üniform malzeme kullanıldığı için, deneylerde genelde zırhlama erozyonu ve malzeme yığılması gibi dinamik denge hali için uygun olmayan durumlara sebebiyet verilmemiştir.

4.5. Deneylerde Kullanılacak Köprü Ayaklarının Seçimi

Deneylerin daha iyi izlenebilmesi için dairesel silindirik cam ayakların kullanılmasına karar verilmiştir. Gerek doğrusal kanalda gerekse kıvrımda sonuçların daha iyi değerlendirilebilmesi için dört farklı çapta ayak seçilmiştir. Bunlar $D = 3.8, 6.4, 8.5, 9.4$ cm çaplıdırlar (Şekil-4.10).



Şekil-4.10 Silindirik Köprü Ayağı.

4.6. Deney Programı

1- Öncelikle doğrusal kanalda, çeşitli çaplı köprü ayakları etrafındaki maksimum denge oyulma derinliğinin değişimi araştırılmıştır ve

bu bölüm için, maksimum denge oyulmasını veren bir bağıntının elde edilmesine çalışılmıştır.

2- 180° lik kıvrımın, giriş kesitinden başlamak üzere, her 15° de bir eksen üzerine ayaklar yerleştirilerek, oluşan maksimum denge oyulma derinliklerinin değişimi araştırılmıştır.

3- Gerek doğrusal kanalda ve gerekse kıvrımlı kanalda ayaklar etrafında oluşan maksimum oyulma derinliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

4- Kıvrımın eksenini boyunca oluşan oyulma derinliklerinin minimum ve maksimum olduğu kesitlerin yerleri araştırılmıştır.

5- Ayrıca, kıvrımın içersindeki kesitlerde oyulma derinliklerinin enine olarak değişimleri de araştırılmıştır.

6- 180° lik kıvrımda, aynı hidrolik şartlar altında taban topografyası belirlenerek bunun maksimum denge oyulma derinliklerinin değişimiyle ilgisi araştırılmıştır.

Böylece, ön hazırlık ve çalışma sonunda, kontrol deneyleri de göz önüne alınırsa sonuçların elde edilmesi için toplam olarak, yaklaşık 300 adet deney yapılmıştır.



BÖLÜM V

5. DENEYSEL ÇALIŞMAYA AIT PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Oyulma Parametrelerinin Analizi

Hareketli tabanlı bir kıvrımlı kanala yerleştirilen köprü ayağı etrafında oluşan oyulma olayına etki eden birçok değişken vardır. Bunları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz :

Adı	İşaret	Birimi	Boyutu
1-Kanalı karakterize eden değişkenler			
a)Kanal genişliği	B	m	L
b)Kıvrımın eğrilik yarıçapı	R	m	L
c)Kıvrımın merkez açısı	θ	-	-
d)Kanal taban eğimi	J	-	-
2-Köprü ayağını karakterize eden değişkenler			
a)Şekli	α_s	-	-
b)Çapı	D	m	L
c)Yüzey şartları	α_y	-	-
d)Herhangi bir korunma sistemi	α_k	-	-
3-Akışkanı karakterize eden değişkenler			
a)Akışkanın özgül kütlesi	ρ	kg/m ³	ML ⁻³
b)Akışkanın kinematik viskozitesi	ν	m ² /s	L ² T ⁻¹
c)Yerçekimi ivmesi	g	m/s ²	LT ⁻²
4-Taban malzemesini karakterize eden değişkenler			
a)Malzemenin özgül kütlesi	ρ_s	kg/m ³	ML ⁻³
b)Malzemenin gronülometresi	d	-	-
c)Dane şekli	$\alpha_{d\phi}$	-	-
d)Malzemenin kohezyonu	c	-	-
5-Akımı karakterize eden değişkenler			
a)Akımın derinliği	h	m	L
b)Akımın ortalama hızı	$\bar{u}$	m/s	LT ⁻¹
c)Taban kayma gerilmesi	τ	kg/m ²	ML ⁻²

Bazı karakteristiklerin tespitindeki güçlükler ve bu değişkenlerin çokluğundan dolayı şu kabuller yapılabilir.

1- Taban malzemesi- Malzeme kohezyonsuz ve uniform çaplı (d)

2- Akım- İnceleme kolaylığı bakımından

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (5.1)$$

ifadesinden, U_* kayma hızı, τ taban kayma gerilmesi yerine kullanılacaktır.

3- Köprü ayağı- Silindir ve yeterince cilalı (cam)

4- Kanal- Deneyler sırasında, kanal taban eğimi ile su yüzü eğiminin eşit olması sağlanacağından, $J_t = J_s = J_e$ alınacaktır. Strickler formülü göz önüne alınırsa

$$U = k_m R^{2/3} J = k_m h^{2/3} J^{1/2} \quad (5.2)$$

yazılabilir. Burada, k_m , d 'nin bir fonksiyonu olduğu ve aynı zamanda U , h , J 'nin birbirinden bağımsız olmadığı anlaşılır. Bu bakımdan U ve h 'in değişimi incelenecek olduğundan, J değişkenini ayrıca göz önüne almaya gerek yoktur.

Akım içersine yerleştirilen ayağın etrafındaki, gerek hız ve gerekse basınç dağılımının, potansiyel akım teorisine uyduğu kabul edilirse

$$U_x = U \left(1 - \frac{y^2}{B^2} \right) \quad (5.3)$$

neticesi çıkarılabilir /9/. Burada :

U_x Ayak etrafındaki hız (Daraltılmış kesitteki hız)

y Daraltılmış kesitin kanal yan cidarlarından olan uzaklıktır.

Bu eşitlikten

$$y \leq B \sqrt{\frac{U_x}{U} - 1} \quad (5.4)$$

ifadesi elde edilir. Akım hızının % 4 den daha fazla değişmemesi esastan hareket edersek ($U_x/U = 1.04$)

$$y < 0.18 \text{ m}$$

bulunur. O halde, kanal yan cidarına 0.18 m den fazla yaklaşmamak şartı ile, kanal genişliği (B) de ihmal edilebilir.

Bu çalışmada, denge halindeki limit oyulma derinliği dikkate alınacağından, oyulmanın zamanla değişimi de ihmal edilebilir.

Bunun için H_d oyulma derinliği şu değişkenlere bağımlı olarak yazılabilir.

$$H_d = f_1 (R, \theta, U_*, h, \bar{U}, \rho, \nu, g, \rho_s, d, D) \quad (5.5)$$

burada Δ rölatif batmış yoğunluğu, ρ_s yerine kullanılabilir.

$$H_d = f_2 (R, \theta, U_*, \rho, h, \bar{U}, \rho, \nu, g, \Delta, d, D) \quad (5.6)$$

5.2. Boyut Analizi

Deneyssel çalışmada, olaya etkili değişkenlerin sayısını azaltmak ve deneyssel sonuçların bağıntılarını teşkil etmek için D, U, ρ tekrarlanan değişkenler olarak seçerek boyut analizi uygulayalım.

Tablo-5.1

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}
	d	ν	g	Δ	h	R	θ	U_*	H_d	D	U	ρ
L	1	2	1	0	1	1	0	1	1	1	1	-3
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
T	0	-1	-2	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0

Tablo-5.1'den aşağıdaki bağıntılar yazılır.

$$k_1 + 2k_2 + k_3 + k_5 + k_6 + k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11} - 3k_{12} = 0 \quad (5.7)$$

$$k_{12} = 0 \quad (5.8)$$

$$-k_2 - 2k_3 - k_8 - k_{11} = 0 \quad (5.9)$$

Bu üç denklemden k_{10} , k_{11} , k_{12} çözülürse,

$$k_{10} = -k_1 - k_2 + k_3 - k_5 - k_6 - k_9 \quad (5.10)$$

$$k_{11} = -k_2 - 2k_3 - k_8 \quad (5.11)$$

$$k_{12} = 0 \quad (5.12)$$

boyutsuz sayılar aşağıdaki tablo vasıtasıyla elde edilir.

Tablo-5.2

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}
	d	v	g	Δ	h	R	θ	U_*	H_d	D	U	ρ
π_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
π_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0
π_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-2	0
π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
π_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
π_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0
π_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
π_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0
π_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

$$\pi_1 = \frac{d}{D} \quad \pi_2 = \frac{Y}{D \cdot U} \quad \pi_3 = \frac{g D}{U^2} \quad \pi_4 = \Delta \quad \pi_5 = \frac{h}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{R}{D} \quad \pi_7 = \theta \quad \pi_8 = \frac{U_*}{U} \quad \pi_9 = \frac{H_d}{D}$$

Bu boyutsuz büyüklükler arasında

$$\pi_9 = f_3 (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) \quad (5.13)$$

yazılabilir.

Yapılacak deneysel çalışmada

1- d taban malzemesi dane çapı, R kıvrımın eğrilik yarıçapı, Δ rölatif batmış yoğunluk, sabit olduğundan, π_1, π_4, π_6 ,

2- Oyulmaya su derinliğinin etkili olmadığı kabul edilerek, $\pi_5 / 42/$, boyutsuz sayıları ihmal edildi. Bu halde (5.13) fonksiyonel bağıntısı

$$\frac{H_{dmax}}{D} = f_4 \left(\frac{v}{D \cdot U}, \frac{gD}{U^2}, \theta, \frac{U_*}{U} \right) \quad (5.14)$$

şeklini alır.

(5.14) ifadesini incelediğimizde, 3.bölümde de anlatıldığı gibi oyulma derinliğinin ayak çapıyla ilişkili olduğu aşıkardır. Tabanda hareketin başlangıcı için ise, taban kayma hızı tespit edilmiş ve tüm deneyler aynı hidrolik şartlar altında yapılmıştır.

Geriye boyutsuz parametre olarak θ kıvrımın merkez açısı kalmıştır, ki bu çalışmada oyulma olayının θ ile değişimi ele alındığından, fonksiyonel bağıntı, sonuç olarak,

$$\frac{H_{dmax}}{D} = f_5 (\theta) \quad (5.15)$$

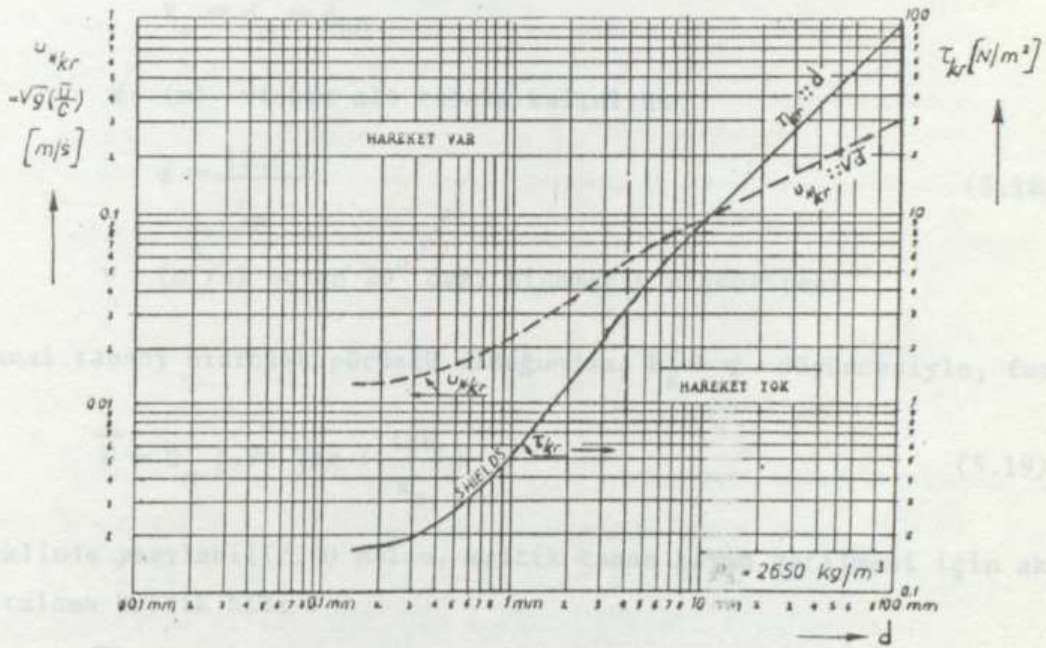
şeklini alır.

5.3. Taban Malzemesinin Kritik Hızının Bulunması

Daha öncede açıklandığı gibi ayaklar etrafındaki maksimum denge oyulması $U = U_{kr}$ olduğu zaman oluşmaktadır. Bu konuda daha önce yapılan çalışmaların çoğunda aynı fikir savunulmuş olduğundan, buradaki çalışmada da aynı düşünceden hareket edilmiştir. O halde, kanaldaki kritik

hızın hesaplanması gerekmektedir, kritik hızın bulunmasında değişik ifadeler mevcuttur, bunların bazıları kullanılarak kritik hız hesaplanacaktır.

-SHIELD eğrisinden elde edilen (Şekil-5.1) kullanılarak: Bu şekilden ortalama dane çapının bilinmesiyle U_{*kr} ve τ_{kr} değerleri okunabilir /2/.



Şekil-5.1 Dane Çapının fonksiyonu Olarak Kritik Kayma Gerilmesi ve Kritik Kayma Hızı (Kum $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$)/2/.

$$d_m = d_{60} = 1.28 \text{ mm}$$

$$U_{*kr} = 0.027 \text{ m/s}$$

$$\tau_{kr} = 0.7 \text{ N/m}^2$$

Bu değerlerden ortalama akım hızına geçmek uygulama açısından daha kolay olacağından kararlı üniform akım için verilen aşağıdaki ifade kullanılabilir :

$$\frac{\bar{U}}{U_*} = 5.75 \log \left(\frac{12h}{k_s - 0.3\epsilon} \right) \quad (5.16)$$

veya

$$\bar{U} = U_* 5.75 \log \left(\frac{12h}{k_s - 0.3\delta} \right) \quad (5.17)$$

Burada,

h (m) su derinliği

k_s (m) pürüzlülük, kum danelerinin boyatundadır.

$$k_s = d_m = d_{60}$$

δ (m) viskoz alt tabaka kalınlığı

$$\delta = \frac{11.6 \nu}{U_*} \quad (5.18)$$

ν (m²/s) suyun 20° deki kinematik viskozitesi

Kanal tabanı hidrolik pürüzlü olduğundan, $k_s \gg \delta$ düşüncesiyle, formül,

$$\bar{U} = U_* 5.75 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right) \quad (5.19)$$

şeklinde yazılabilir. O halde, kritik taban kayma gerilmesi için akımın ortalama kritik hızı :

$$\bar{U}_{kr} = 0.16 \log (9375 h) \quad (5.20)$$

dir. Kanaldaki çeşitli su derinlikleri için

Tablo-5.3

$h(m)$	$\bar{U}_{kr}$ (m/s)	$q(m^3/s/m)$	$Q(lt/s)$
0.05	0.430	0.0215	19
0.06	0.440	0.0264	24
0.07	0.450	0.0315	28
0.08	0.460	0.0368	33
0.09	0.468	0.0421	38
0.10	0.475	0.0475	43
0.11	0.480	0.0528	47.5

verilebilir.



-LEVI'nın normal türbülanslı akım için verdiği formül ile /9/.

$$U_{kr} = 1.4 \sqrt{g d} \ln h/7d \quad (5.21)$$

akım ortalama kritik hız değerleri, çeşitli su derinlikleri için bulunmuştur.

Tablo-5.4

h(m)	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11
U_{kr} (m/s)	0.126	0.190	0.235	0.270	0.300	0.322	0.344	0.362	0.379	0.394

-MEYER -PETER formülünün kullanılmasıyla kritik hızın tayini /37/.

$$\frac{\tau}{\tau_{kr}} = \frac{h \cdot J_e}{A (\gamma_s - \gamma) d_m} \quad (5.22)$$

Tabanda kayma gerilmesinin τ_{kr} e ulaştığı zaman oyulmanın maksimum denge derinliğine ulaştığı bilindiğine göre $\tau/\tau_{kr} = 0.99$ düşüncesi ve $J_e = U^2/k_m^2 \cdot h^{4/3}$ değeri, formüle yerleştirilir ve gerekli düzenlemeler yapılırsa kritik hız için aşağıdaki ifade elde edilir :

$$U_{kr} = 9.9 \times 10^{-3} k_m h^{1/6} \quad (5.23)$$

Burada

$$d_m = d_{60} = 1.28 \times 10^{-3} m$$

$$A = 0.047 \text{ sabit}$$

$$k_m = \frac{k_s k_\omega P^{2/3}}{(B \cdot k_\omega^{3/2} - 2 h k_s^{3/2})^{2/3}} \quad (5.24) \text{ taban pürüzlülük katsayısı}$$

P (m) ıslak çevre

B (m) kanal taban genişliği

k_ω kanal yüzeylerinin pürüzlülük katsayısı (burada $k_\omega = 100$ alınabilir).

$$k_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad (5.25)$$

R (m) hidrolik yarıçap, yeter genişlikli ve küçük derinlikli bir kanal için, yaklaşık olarak $R \approx h$ alınabilir.

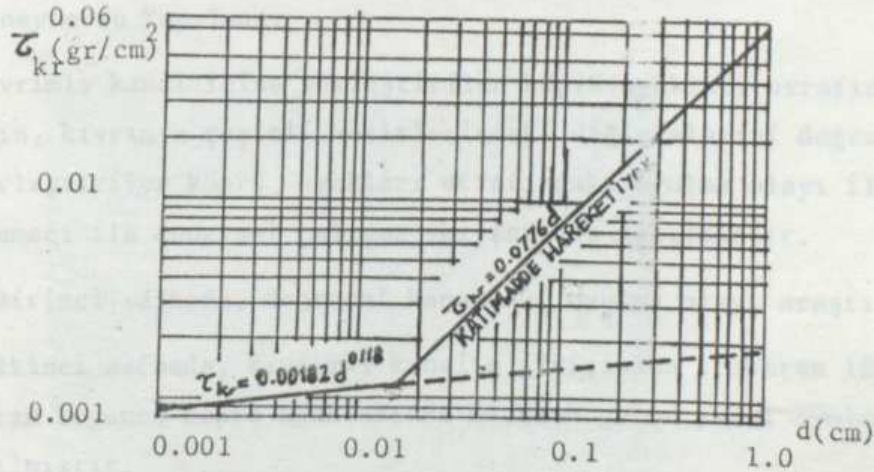
J_e hidrolik eğim.

Öncelikle, her su derinliğine karşı gelen k_m değerleri belirlendi, sonra Meyer-Peter formülü ile akımın ortalama kritik hızı hesaplandı.

Tablo-5.5

$h(m)$	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
k_m	76.10	77.64	80.05	81.68	83.35	85.9	87.66	89.46	92.18
$U_{kr}(m/s)$	0.39	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.57	0.59	0.62

-BOGARDI'nin tariflemiş olduğu kanal stabilite faktörü yardımıyla, hareketin başlangıcını ve taban şekillerinin meydana geldiği rejimleri belirlemeye çalışarak verdiği grafik ile /50/



Şekil-5.2 Hareket Başlangıcının Dane Çapıyla Değişimi /50/.

$d_m = 1.28 \text{ mm}$ karşılık gelen $\tau_{kr} = 0.01 \text{ gr/cm}^2 = 0.9 \text{ N/m}^2$ okunmuştur. Taban kayma hızı ise $U_* = 0.03 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.

Tablo-5.6

$h(m)$	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
$U_{kr}(m/s)$	0.46	0.47	0.485	0.496	0.50	0.51



-Verilen bu ifadelerden, kritik hız için ortalama bir değer deney-sel çalışmaya kriter olarak alınabilir. Kanaldaki su derinliği

Tablo-5.7

h = 10 cm için	I	II	III	IV	Ort	Deney Sonucu
U_{kr} (m/s)	0.475	0.379	0.6	0.51	0.49	0.48

h = 10 cm olduğunda akımın ortalama kritik hızı $U_{kr} = 0.49$ m/s civarındadır.

Bu hız civarında bir seri deney yapılarak yaklaşım hızı, su derinliği ve geçirilecek debi belirlenmiştir. Bu deneylerin sonucunda ortalama akım hızı 0.48 m/s ve kanaldaki üniform su derinliği 10 cm olarak bulunmuştur.

5.4. Deneylerin Yapılması

Kıvrımlı kanal içine yerleştirilen köprü ayakları etrafındaki yerel oyulmanın, kıvrımın çeşitli kesitlerindeki değişimlerini doğrusal kanallara yerleştirilen köprü ayakları etrafındaki oyulma olayı ile karşılaştırmak amacı ile deneysel çalışma iki safhada yapılmıştır.

. Birinci safhada, doğrusal kanaldaki oyulma olayı araştırılmıştır.

. İkinci safhada, kıvrımlı kanalın girişinden itibaren 180° lik bir kıvrım boyunca köprü ayaklarında meydana gelen yerel oyulma olayı araştırılmıştır.

Bu çalışmalardan sonra, yerel oyulma olayının kıvrımlı kanalın hareketli tabanında meydana gelen değişimlerle ilişkisini araştırmak üzere bu kıvrımın taban topoğrafyası belirlenmiştir.

5.5. Doğrusal Kanaldaki Oyulma Olayının Araştırılması

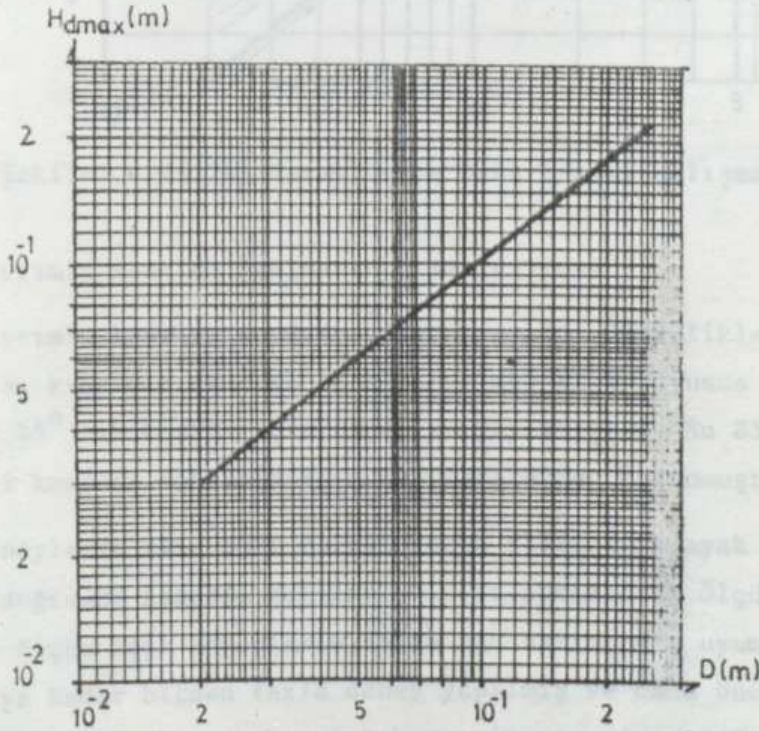
Kıvrımın önündeki doğrusal kanalda, kıvrımın 3 m önünde ve eksen üzerindeki bir noktaya, deneyde kullanılacak ayaklar yerleştirilerek, ayaklar etrafında oluşan yerel oyulmanın, maksimum denge oyulma derin-

likleri ve oyulma çukurunun şekli araştırılmıştır.

Gerekli akım şartlarının elde edilmesiyle, deney süreleri kısaltılmıştır, çünkü temiz su halinde oyulma durumunda maksimum denge oyulmasına çok uzun zamanda erişilmekte, fakat hareketli taban halinde buna hemen varılmaktadır.

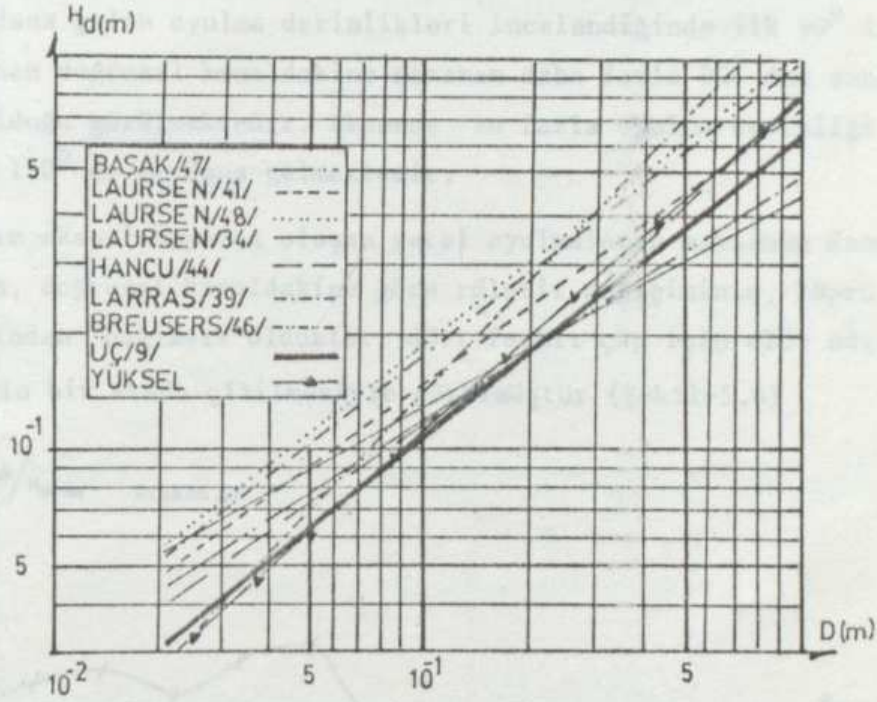
Böylece, dört farklı çaplı silindirik ayak için deneylere geçilmiştir. Her bir ayaktaki maksimum oyulma derinliğini elde etmek için sonuçlar arasında uygun bir yaklaşıma varılncaya kadar deneyler tekrarlanmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarını değerlendirebilmek için maksimum denge oyulma derinlikleri, ayak çapının fonksiyonu olarak çift logaritmik kağıda işlenmiştir. Ölçüm noktaları bir logaritmik doğru üzerinde yoğunlaştıklarından, oyulma ile ayak çapı arasında eksponansiyel bir bağıntının mevcut olduğu sonucuna varılmıştır.

$$H_{dmax} = 0.61 D^{0.769} \quad (m) \quad (5.26)$$



Şekil-5.3 Doğrusal Kanalda Oyulma Derinliği ile Ayak Çapı Arasındaki İlişki.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen netice Şekil-5.4'den görüldüğü gibi, bu konuda yapılmış çalışmaların neticeleriyle bir arada değerlendirilmiştir. Elde edilen bu netice, diğerleri ile biraz farklı olmakla birlikte, bu farklılığın çalışılan kumun granülometrisinin farklı olmasından ileri geldiği söylenebilir.



Şekil-5.4 (5.26) formülü ile Daha Önceki Çalışmaların Mukayesesi.

5.6. Kıvrımlı Kanalda Oyulmanın Araştırılması

Kıvrımlı kanalda meydana gelecek oyulma derinliklerini belirlemek amacıyla, kıvrımın eksen, iç kıyı ve dış kıyı boyunca 180° lik kıvrımın her 15° lik kesiti için ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler esnasında doğrusal kanalda sağlanan akım şartları aynen korunmuştur.

Deneylerde yine dört farklı çapta silindirik ayak kullanılmıştır, bunlar doğrusal kanalda kullanılanların aynısıdır. Ölçümler sırasında, her bir ölçüm için sonuçların doğruluğu bakımından uyumlu neticeler bulununcaya kadar birden fazla deney yapılmış ve daha öncede açıklandığı gibi her deneyden sonra kanal tabanı yine tesviye edilmiştir.

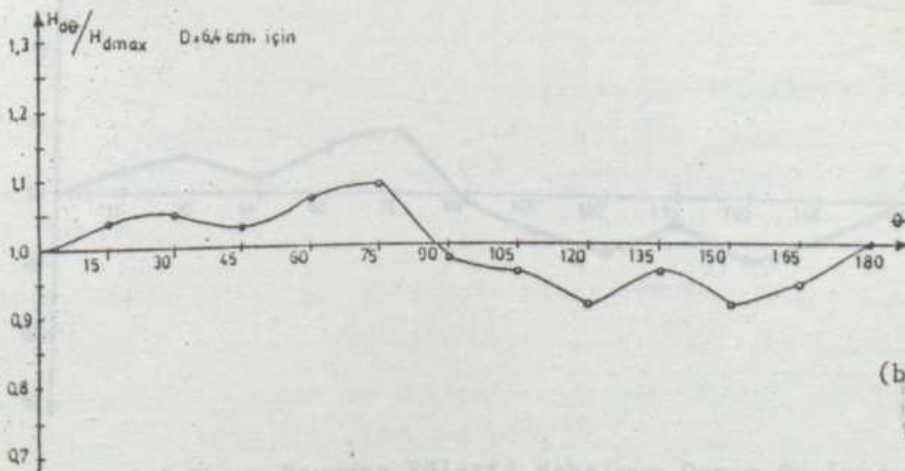
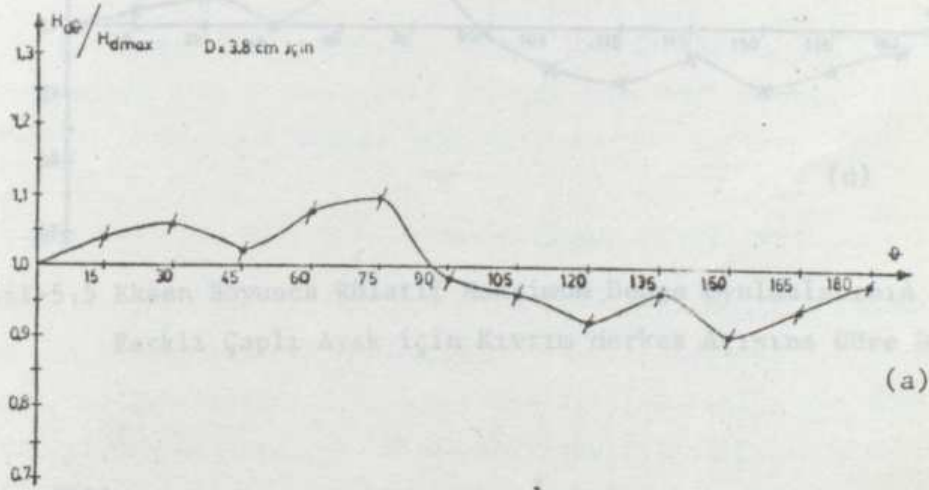
Böylece çıkan sonuçların doğrusal kanaldan elde edilenlerle karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu arada kıvrımda yapılan deneylerde maksimum

denge oyulma derinliğinin elde edilmesinde tabandaki deformasyonlarda dinamik dengenin meydana gelmesi sağlanmıştır.

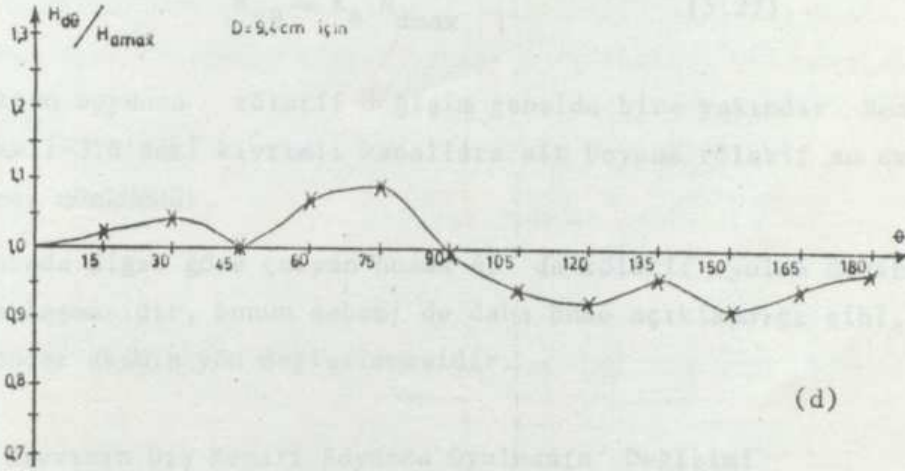
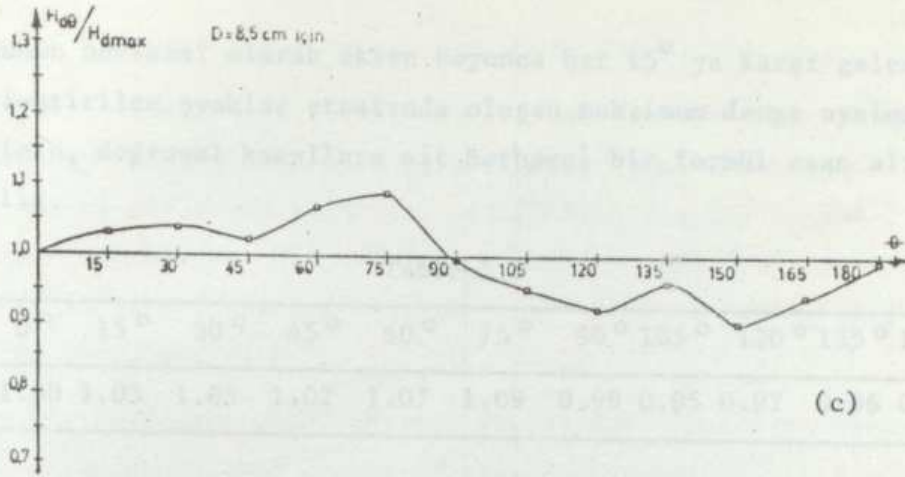
5.6.1. Kıvrımın Eksenî Boyunca Oyulmanın Değişimi

Kıvrımın eksenî boyunca yerleştirilen dört farklı çaplı ayak etrafında meydana gelen oyulma derinlikleri incelendiğinde ilk 90° lik kısımda oyulmanın doğrusal kanaldakine nazaran daha fazla 90° den sonra ise daha az olduğu görülmektedir. Eksende en fazla oyulma derinliği 75° de, en az ise 150° de meydana gelmektedir.

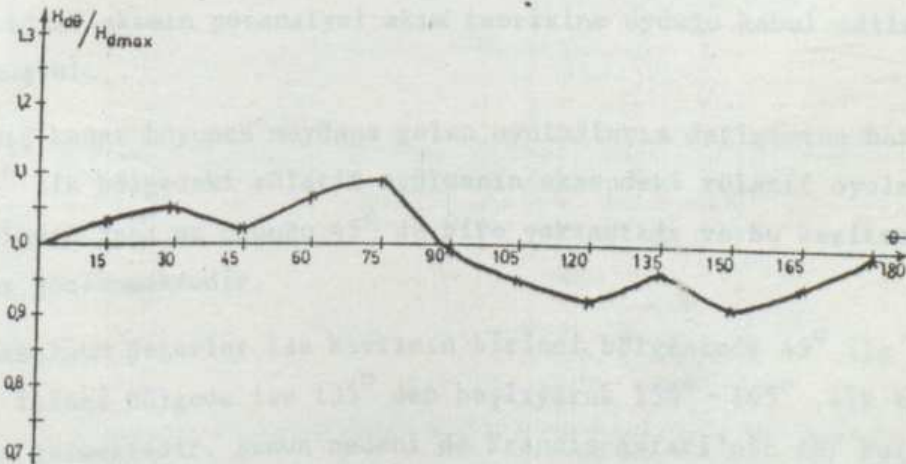
Kıvrım eksenî boyunca oluşan yerel oyulmaların maksimum denge derinliklerinin, doğrusal kanaldakine göre rölatif değişiminin, köprü ayaklarının çapından bağımsız oldukları dört farklı çap için elde edilen grafiklerin bir arada çizilmesiyle görülmüştür (Şekil-5.6)



Şekil-5.5 Eksen Boyunca Rölatif Maksimum Denge Oyulmalarının Dört Farklı 11 Ayak için Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi



Şekil-5.5 Eksen Boyunca Rölatif Maksimum Denge Oyulmalarının Dört Farklı Çaplı Ayak için Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi.



Şekil-5.6 Eksen Boyunca Rölatif Maksimum Denge Oyulmasının Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi.

Bunun neticesi olarak eksen boyunca her 15° ye karşı gelen kesitlere yerleştirilen ayaklar etrafında oluşan maksimum denge oyulma derinliklerinin, doğrusal kanallara ait herhangi bir formül esas alınarak bulunabilir.

Tablo-5.8

θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
K_θ	1.00	1.03	1.05	1.02	1.07	1.09	0.99	0.95	0.92	0.96	0.91	0.94	0.99

$$H_{d\theta} = K_\theta H_{dmax} \quad (5.27)$$

Eksen boyunca rölatif değişim genelde bire yakındır. Benzeri değişimi Şekil-3.8'deki kıvrımlı kanallara ait boyuna rölatif su derinliğinde görmek mümkündür.

Burada diğer göze çarpan husus 45° de rölatif oyulma derinliğinin bire yaklaşmasıdır, bunun sebebi de daha önce açıklandığı gibi, bu bölgede sekonder akımın yön değiştirmesidir.

5.6.2. Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Oyulmanın Değişimi

Kanalın yan cidarlarının etkisinin olmadığı bölgede kalmak üzere, kıvrım dış kenarı boyunca oyulma derinlikleri ölçülmüştür. Bunun için kıvrımın dış kenarlarından 0.25 m uzaklıktaki noktalar göz önüne alınmıştır. (Daha önce kanalın yan cidar etkisinin kalmadığı uzaklık, ayak etrafındaki akımın potansiyel akım teorisine uyduğu kabul edilerek 0.18 m bulunmuştu).

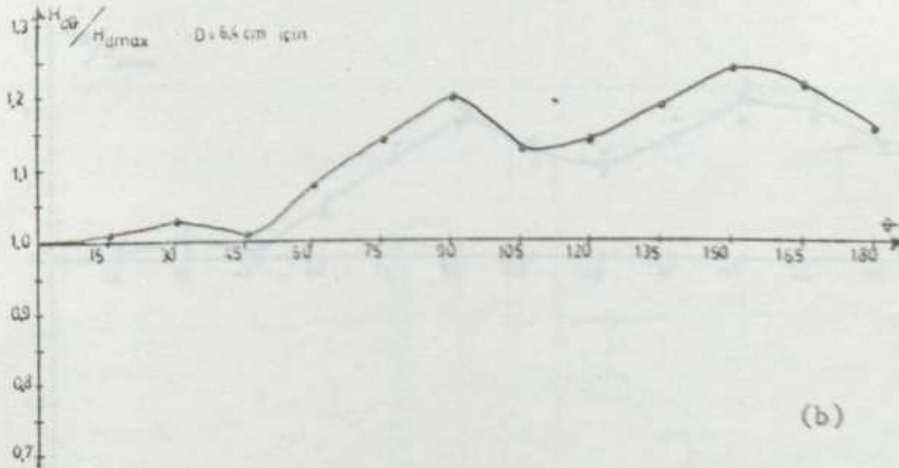
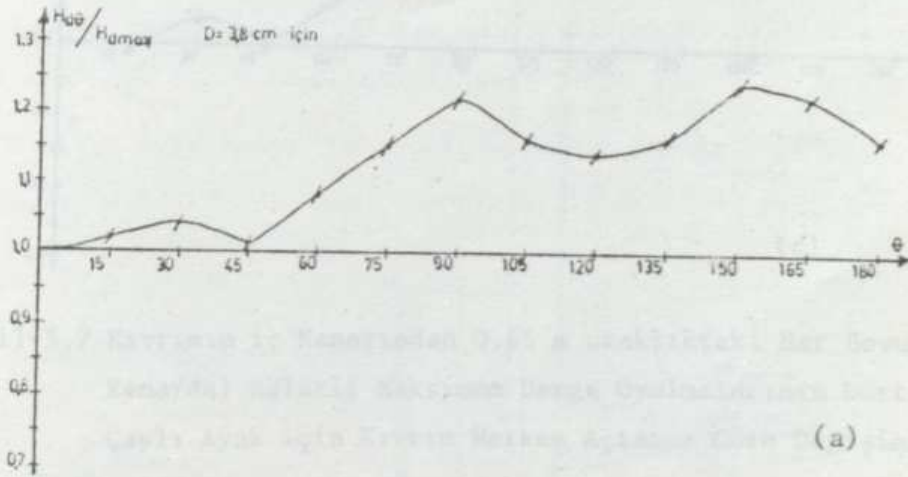
Dış kenar boyunca meydana gelen oyulmaların değişimine bakıldığında ilk 45° lik bölgedeki rölatif oyulmanın eksendeki rölatif oyulma derinliklerinden daha az olduğu 45° de bire yaklaştığı ve bu kesitten itibaren arttığı gözlenmektedir.

Maksimum değerler ise kıvrımın birinci bölgesinde 45° ile 90° civarında, ikinci bölgede ise 135° den başlayarak $150^\circ - 165^\circ$ lik kesitlerde meydana gelmektedir. Bunun nedeni de Francis-Asfari'nin /8/ belirttiği gibi maksimum u_θ' kıvrımın giriş kesitinde iç kenara yakın oluşmakta,

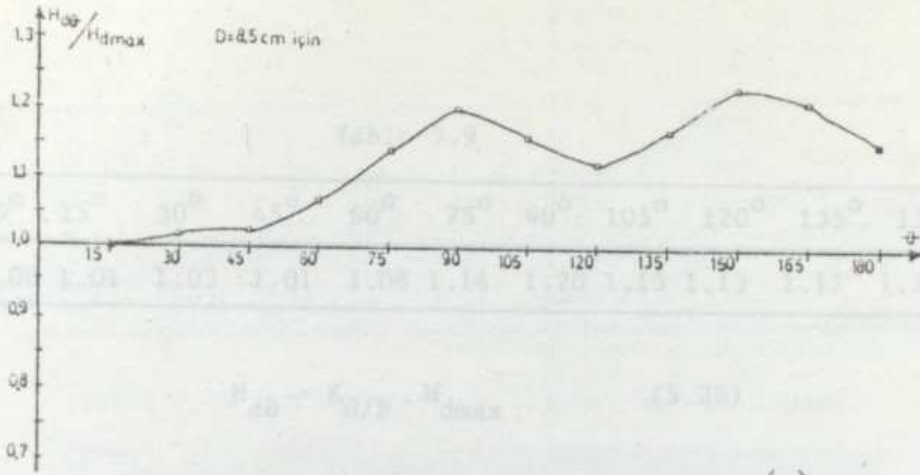
daha sonra kıvrımın dış kenarına doğru yer değiştirmesidir.

Bu sonuç Kyoza Suga (1967)'nin /32/ kıvrımdaki taban topoğrafyasıyla ilgili çalışmasıyla da uyum içindedir, gerçekten sekonder akım kıvrımın ikinci yarısında şiddetini artırmakta dış kıyıda çok fazla oyulmaya neden olmaktadır. Dış kıyıdaki rölatif oyulma derinliklerine benzeri dağılım yine Şekil-3.8'de görülen rölatif su derinliğinin değişimi ile de benzeşmektedir.

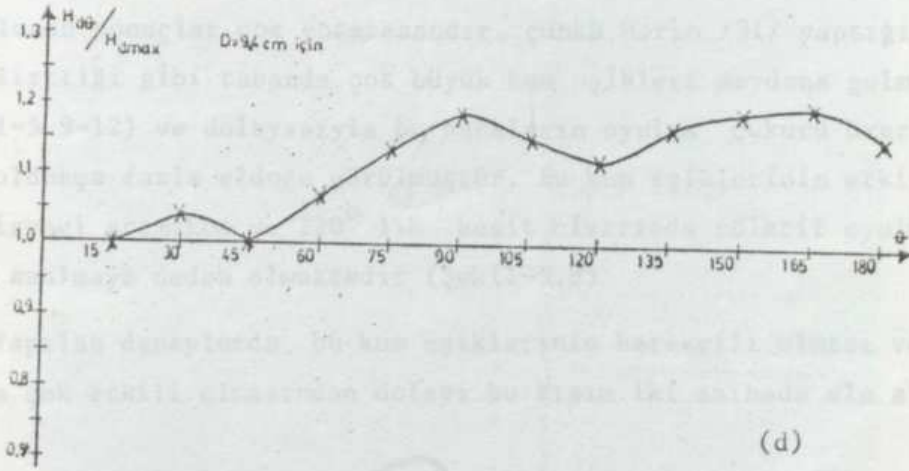
Bu hat boyunca oluşan maksimum oyulma derinliklerini bulmak için doğrusal kanalda bulunan oyulma derinliklerini her 15° için verilen $K_{\theta/B}$ değerleri ile çarpmak yeterli olacaktır. Böylece, dikkate alınan kesitteki ayak etrafında oluşan oyulma derinlikleri bulunmuş olur.



Şekil-5.7 Kıvrımın iç kenarından 0.65 m uzaklıktaki Hat Boyunca (Dış Kenarda) Rölatif Maksimum Denge Oyulmalarının Dört Farklı Çaplı Ayak için Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi

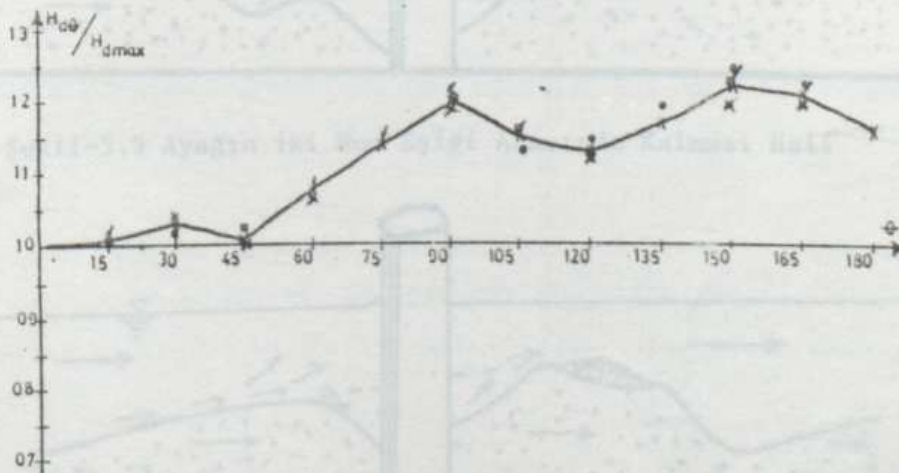


(c)



(d)

Şekil-5.7 Kıvrımın iç Kenarından 0.65 m uzaklıktaki Hat Boyunca (Dış Kenarda) Rölatif Maksimum Denge Oyulmalarının Dört Farklı Çaplı Ayak için Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi.



Şekil-5.8 Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Maksimum Denge Oyulmasının Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi.

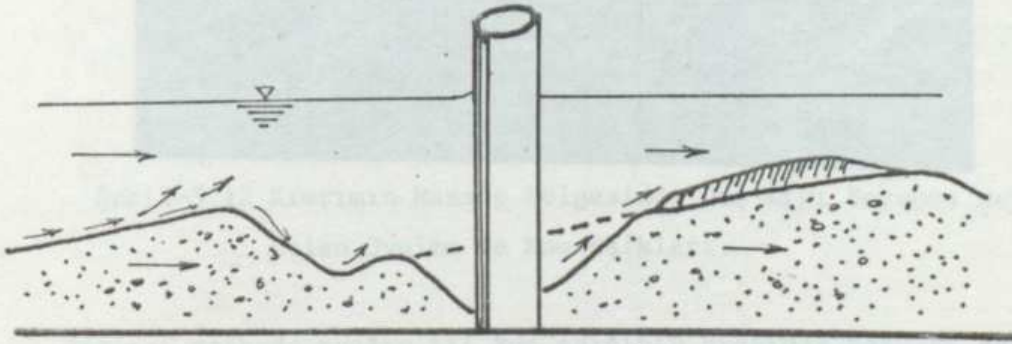
Tablo-5.9

θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
$K_{\theta/B}$	1.00	1.01	1.03	1.01	1.08	1.14	1.20	1.15	1.13	1.17	1.225	1.21	1.16

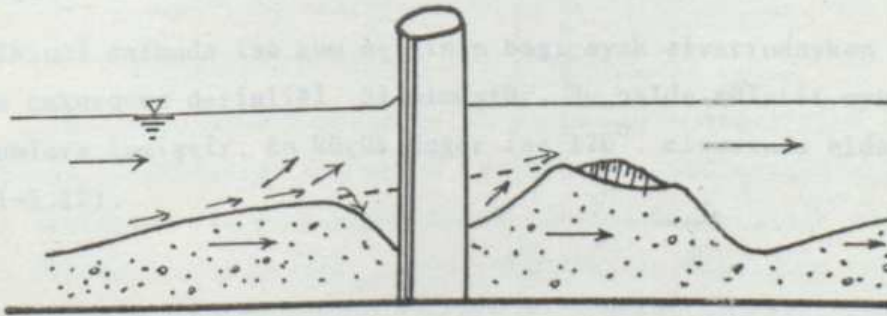
$$H_{d\theta} = K_{\theta/B} \cdot H_{dmax} \quad (5.28)$$

Dış kıyı boyunca yapılan ölçümlerde bilhassa kıvrımın ikinci yarısında bulunan sonuçlar çok enteresandır, çünkü Morin /31/ yaptığı çalışmalar da belirttiği gibi tabanda çok büyük kum eşikleri meydana gelmektedir (Şekil-5.9-12) ve dolayısıyla bu bankların oyulma çukuru üzerine etkileri oldukça fazla olduğu görülmüştür. Bu kum eşiklerinin etkisiyle taban direnci artmakta ve 120° lik kesit civarında rölatif oyulma derinliğinde azalmaya neden olmaktadır (Şekil-5.8)

Yapılan deneylerde, bu kum eşiklerinin hareketli olması ve dış kıyıda çok etkili olmasından dolayı bu kısım iki safhada ele alınmıştır.

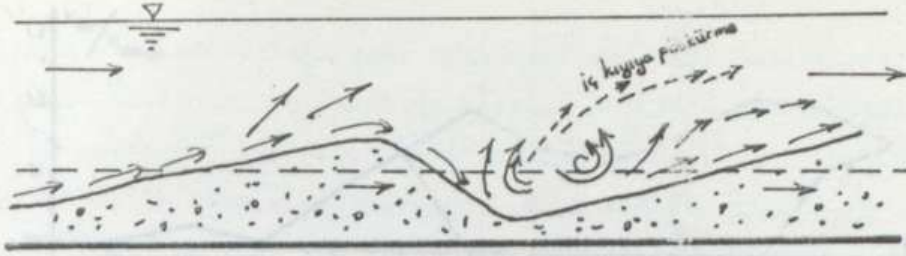


Şekil-5.9 Ayığın iki Kum Eşiği Arasında Kalması Hali

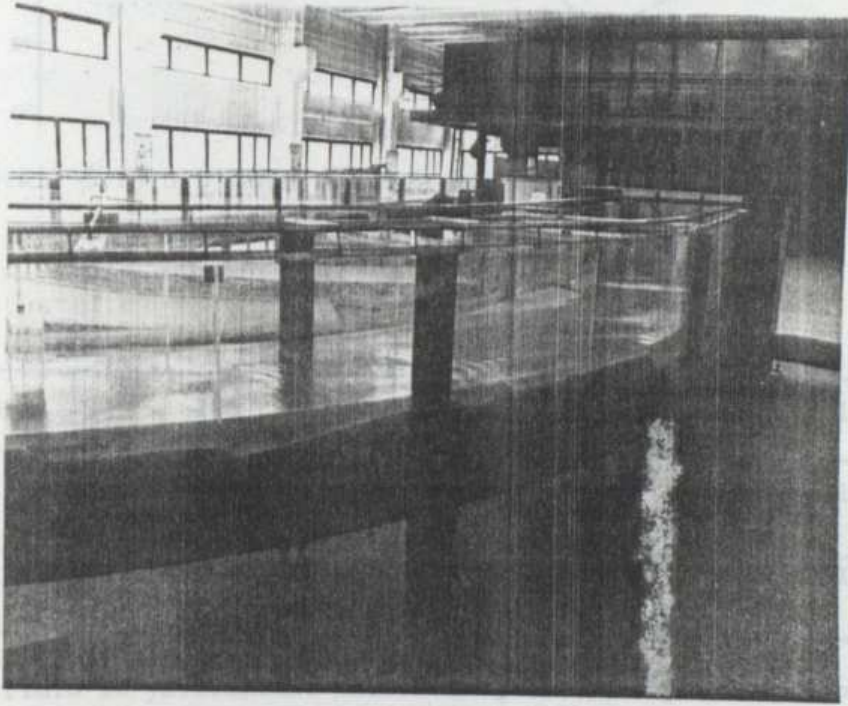


Şekil-5.10 Ayığın Kum Eşiğinin Başında Bulunması Hali





Şekil-5.11 Kum Eşiklerinin Yakınındaki Akım Hali.

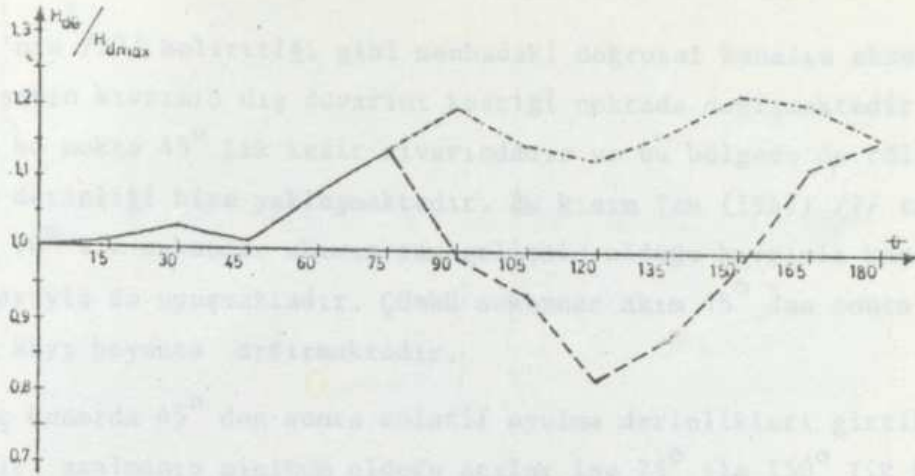


Şekil-5.12 Kıvrımın Mansap Bölgesinde Dış Kıyı Boyunca Meydana Gelen Oyulma ve Kum Eşikleri.

Birinci safhada ayağın iki kum eşığının arasında kalması halinde oyulma çukurunun derinliği ölçülmüştür, bu halde maksimum derinlik elde edilmiştir.

İkinci safhada ise kum eşığının başı ayak civarındayken meydana gelen oyulma çukurunun derinliği ölçülmüştür. Bu halde rölatif oyulma derinliği minimumlara inmiştir. En küçük değer ise 120° civarında elde edildi (Şekil-5.12).





Şekil-5.13 Dış Kenar Boyunca Kum Eşiklerinin Rölatif Oyulma Derinliğine Etkisi

Tablo-5.10

θ	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
$K'_{\theta/B}$	0.99	0.94	0.82	0.88	0.98	1.12	1.16
$K_{\theta/B}/K'_{\theta/B}$	1.21	1.22	1.38	1.33	1.25	1.08	1.00

Kıvrımın bu yarısındaki maksimum oyulma derinliği ayağın tam doğur-
ganında meydana gelmemekte, bu kıvrımın iç tarafına doğru doğurgan ile
 45° lik açı yapan nokta civarında oluşmaktadır.

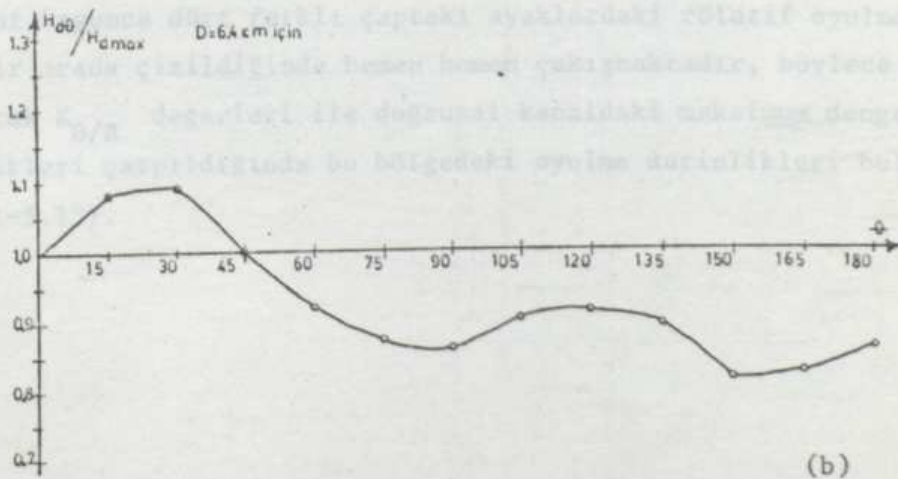
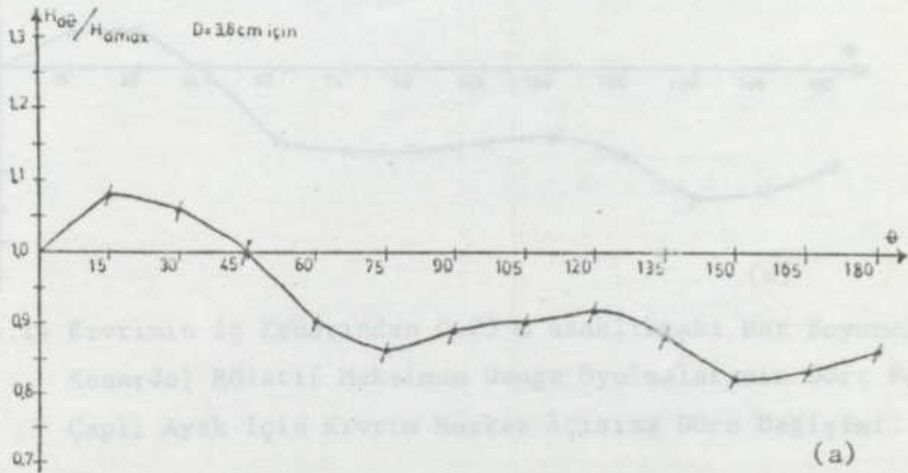
5.6.3. Kıvrımın İç Kenarı Boyunca Oyulmanın Değişimi

Bu bölgede de yine kanalın yan cidarının etkisi olmadığı için duvar-
dan 0.25 m uzaklıktaki noktalar göz önüne alınarak dört farklı çaplı
ayak için ölçümler yapılmıştır.

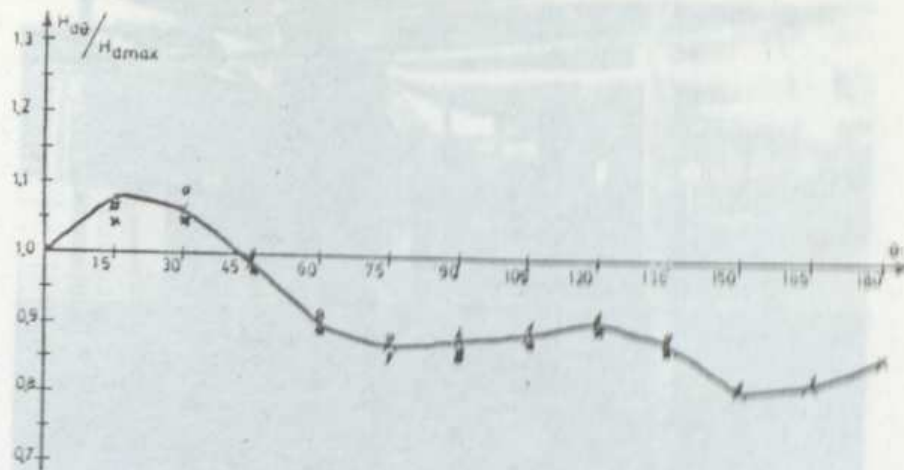
İç kenar boyunca meydana gelen oyulmaların değişimine de bakıldığında,
kıvrımın girişinde 15° ve 30° de rölatif oyulma derinliğinin arttığı
ve bu artışında gerek eksendekinden gerekse dış kıyıdakinden biraz daha
fazla olduğunu görmekteyiz, bunun nedeninin de daha önce bahsettiğimiz
gibi maksimum u'_θ nin kıvrımın giriş kesitinde iç kenara yakın oluşması
daha sonra kıvrımın dış kenarına yönelmesidir. Bu yönelme Kyoza Suga

(1967)'nin /32/ belirttiği gibi menbadaki doğrusal kanalın ekseninin uzantısının kıvrımın dış duvarını kestiği noktada değişmektedir. Gerçekten bu nokta 45° lik kesit civarındadır ve bu bölgede de rölatif oyulma derinliği bire yaklaşmaktadır. Bu kısım Yen (1967) /7/ tarafından da 90° lik sekonder akımın tam gelişmiş olduğu kıvrımlı kanaldaki sonuçlarıyla da uyumaktadır. Çünkü sekonder akım 45° den sonra şiddetini dış kıyı boyunca artırmaktadır.

İç kenarda 45° den sonra rölatif oyulma derinlikleri gittikçe azalmaktadır, azalmanın minimum olduğu açılar ise 75° ile 150° lik kesitlerin civarındadır. Bu noktalarda ölçülen oyulma derinliklerinin 45° den sonraki kesimi aynı zamanda Şekil-3.8'deki rölatif su derinliklerinin değişimi ile de benzeşmektedir.



Şekil-5.14 Kıvrım iç Kenarından 0.25 m uzaklıktaki Hat Boyunca (İç Kenarda) Rölatif Maksimum Denge Oyulmalarının Dört Farklı Çaplı Ayak için Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi



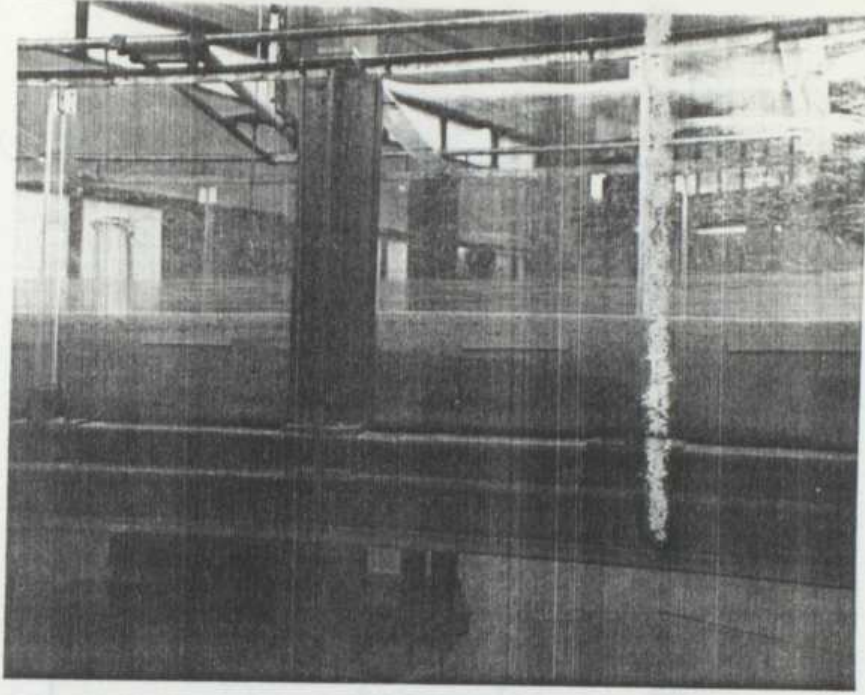
Şekil-5.15 Kıvrımın İç Kenarı Boyunca Maksimum Denge Oyulmasının
Kıvrım Merkez Açısına Göre Değişimi,

Tablo-5.11

θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
K _{θ/B}	1.00	1.07	1.06	0.99	0.90	0.87	0.88	0.89	0.91	0.88	0.81	0.82	0.86

$$H_{d\theta} = K_{\theta/B} H_{dmax} \quad (5.29)$$

Bu hat için yine kıvrımın ikinci yarısına bakıldığında kıvrımın dış kenarında görüldüğü gibi kum eşiklerinin oyulma çukuruna etkisi hissedilmektedir, çünkü iç kıyıda meydana gelen yığılma bu kum eşiklerinin kesite göre antisimetrik oluşmasına neden olmaktadır, Böylece bu bölgede gerek iç kenar gerekse eksen boyunca dış kenara nazaran daha stabil sonuçlar elde edilmiştir (Şekil-5.16).



Şekil-5.16 Kıvrımın İç Kenarı Boyunca Yığılmanın Meydana Gelmesi.

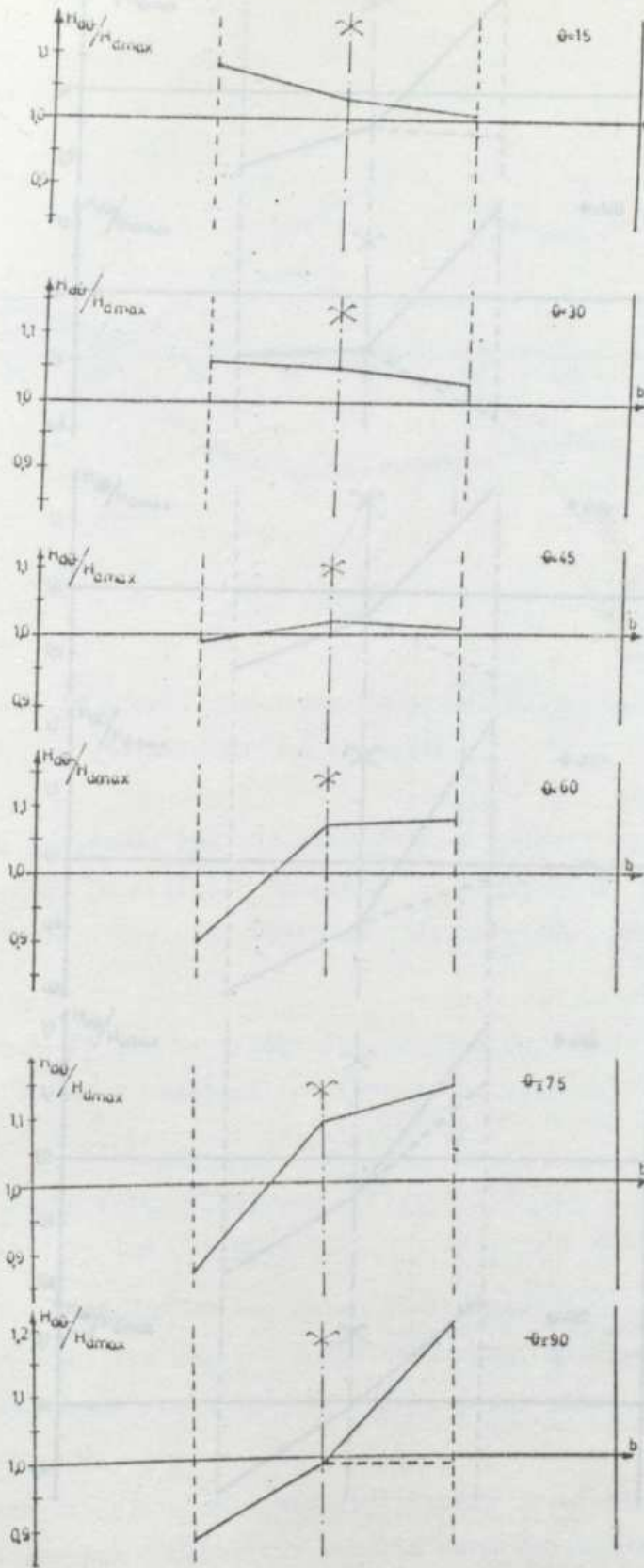
5.6.4. Kesitten Kesite Oyulmaların Değişiminin İncelenmesi

En kesitten en kesite her 15° için rölatif denge oyulma derinliklerinin değişimini incelersek şu sonuçlar çıkmaktadır,

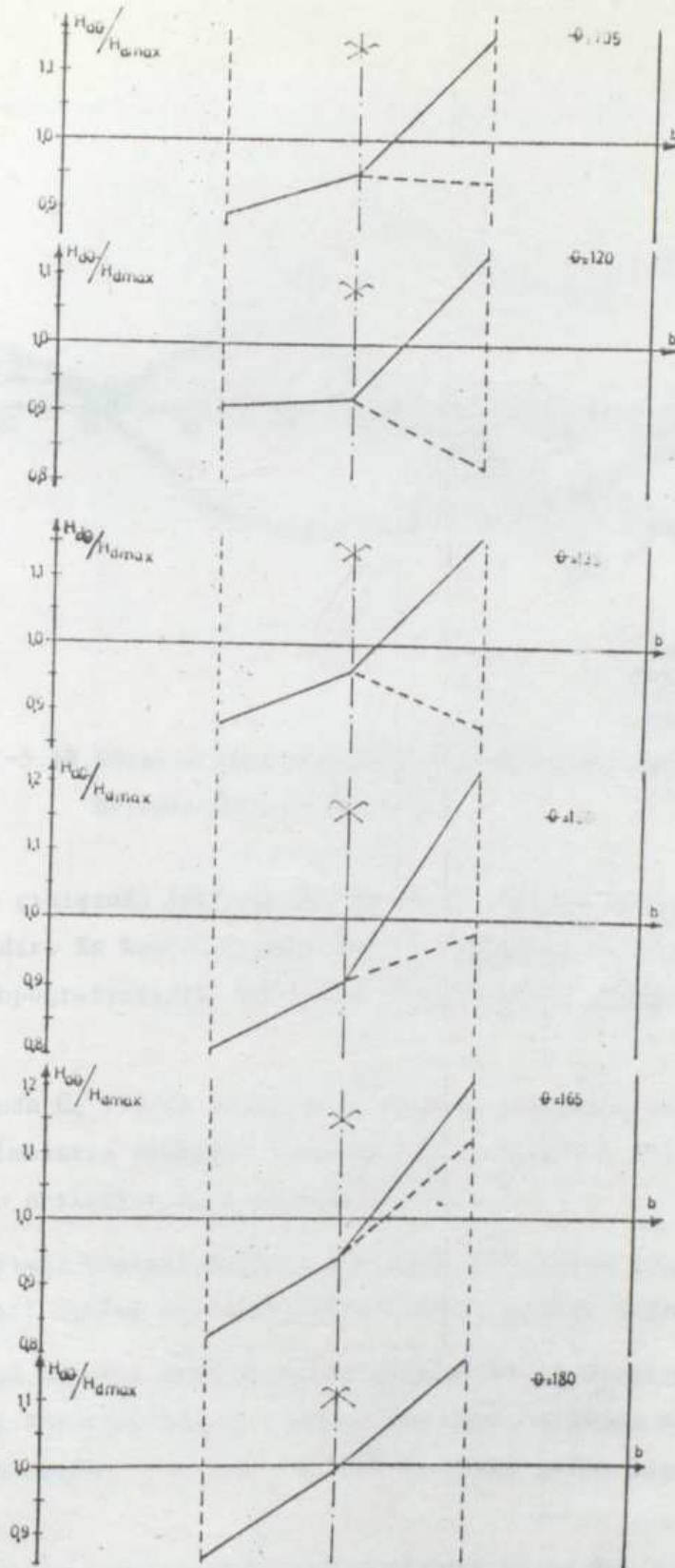
Kıvrımın giriş kesitinde 45° ye kadar, kıvrımdaki oyulma derinliği artmaktadır. Bu bölgede ikinci ve üçüncü bölümlerde anlatılan kıvrımlı kanaldaki akımın yapısından dolayı iç kıyıda eksene göre eksende ise dış kıyıya göre daha fazla oyulma oluşmaktadır. Bu dağılım 45° den sonra tam tersine dönmektedir.

Eksen boyunca oyulma derinlikleri 90° ye kadar artmakta ve 90° de bire yaklaşmaktadır bu kesitte iç kenar boyunca minimum dış kenar boyunca maksimum oyulma derinlikleri meydana gelmektedir. Bu kesitten itibaren eksen boyunca oyulma derinlikleri azalmakta dış kenar boyunca maksimum oyulma derinlikleri elde edilirken bu bölgede meydana gelen kum eşiklerinden dolayı 105° ile 150° arasında minimum değerler elde edilmekte ve stabil olmayan oyulmalar meydana gelmektedir.

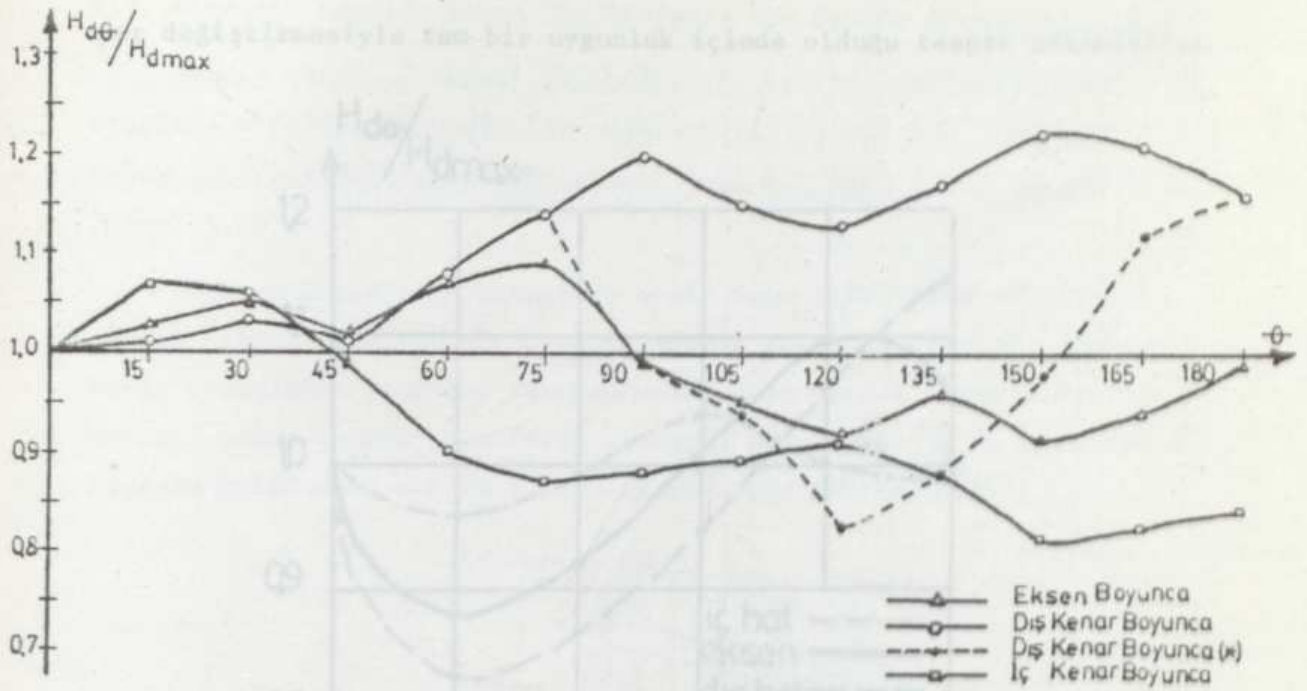




Şekil-5.17 a RÖlatif Maksimum Denge Oyulmasının Enkesitten Enkesite Değişimi.



Şekil-5.17 b Rölatif Maksimum Denge Oyulmasının Enkesitten Enkesite Değişimi.



Şekil-5.18 RÖlatif Maksimum Denge Oyulmasının 180° lik Kıvrım Boyunca, Boyuna Değişimi.

Kıvrım çıkışında 180° de eksen de yine rölatif oyulma derinliği bire yaklaşmaktadır. En kesitten enkesite bu değişimler bize olayın kıvrımın taban topoğrafyasıyla yakından ilişki içinde olduğu izlenimi vermektedir.

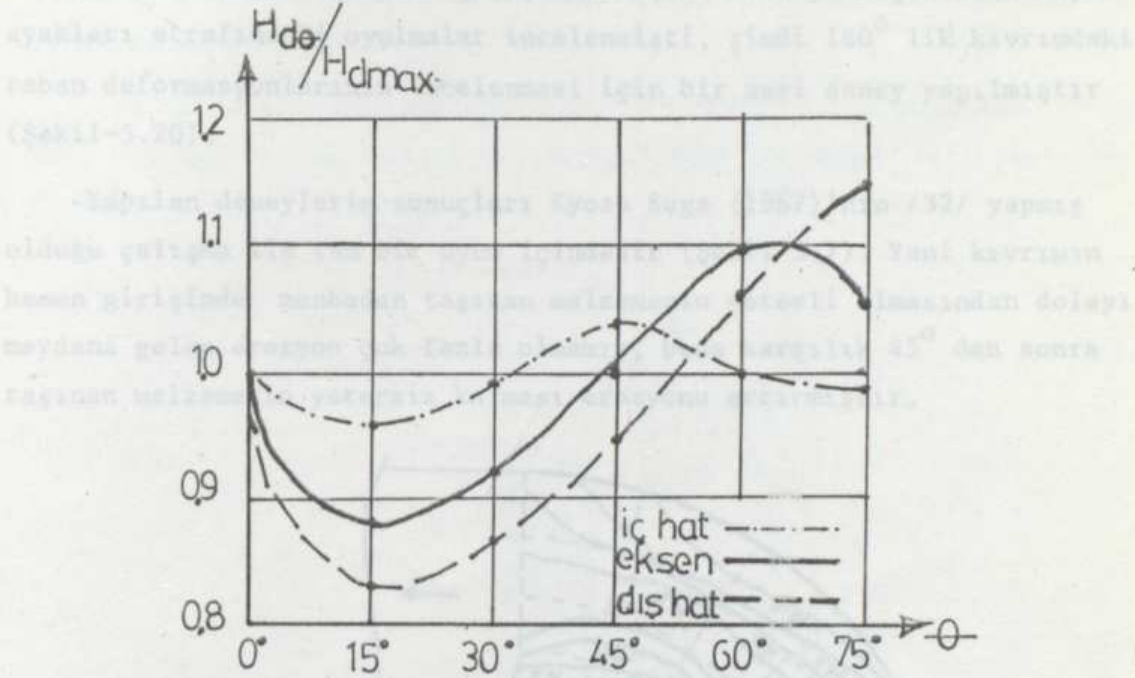
Bu konuda Üç (1979) tarafından yapılan çalışmada ise 75° lik kıvrım boyunca oyulmaların değişimi incelenmiştir. (Şekil-5.19). Bu çalışmanın sonucunda şu neticeler elde edilmiştir /9/.

1- Kıvrımın keksenî boyunca yerleştirilen köprü ayakları etrafında oluşan rölatif oyulma derinliklerinin ayak çapından bağımsız olduğu,

2- Eksen boyunca yerleştirilen ayaklar etrafındaki maksimum oyulma derinlikleri kesitten kesite değişmekte olup, minimum oyulma derinliği 15°, maksimum oyulma derinliği ise 60° ye karşı gelen kesitlerde oluşmaktadır.

3- Cidar etkisinin bulunmadığı kıvrımın iç ve dış kenarındaki iki hat boyunca yapılan ölçümlerden ise, iç kenardan dış kenara doğru gidildikçe, maksimum oyulmanın yer değiştirdiği ve bunun sükonder hareketin

yer değiştirmesiyle tam bir uygunluk içinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil-5.19 75° lik Kıvrım Boyunca Rölatif Maksimum Denge Oyulma Derinliğinin Değişimi /9/.

4- Cidar etkisinin dışında kalmak şartı ile köprü ayakları kıvrımın neresine yerleştirilirse yerleştirilsin her zaman 0°-30° arasındaki giriş bölgesinde, doğrusal kanalda elde edilen oyulma derinliklerinden daha küçük oyulma derinlikleri elde edilmektedir.

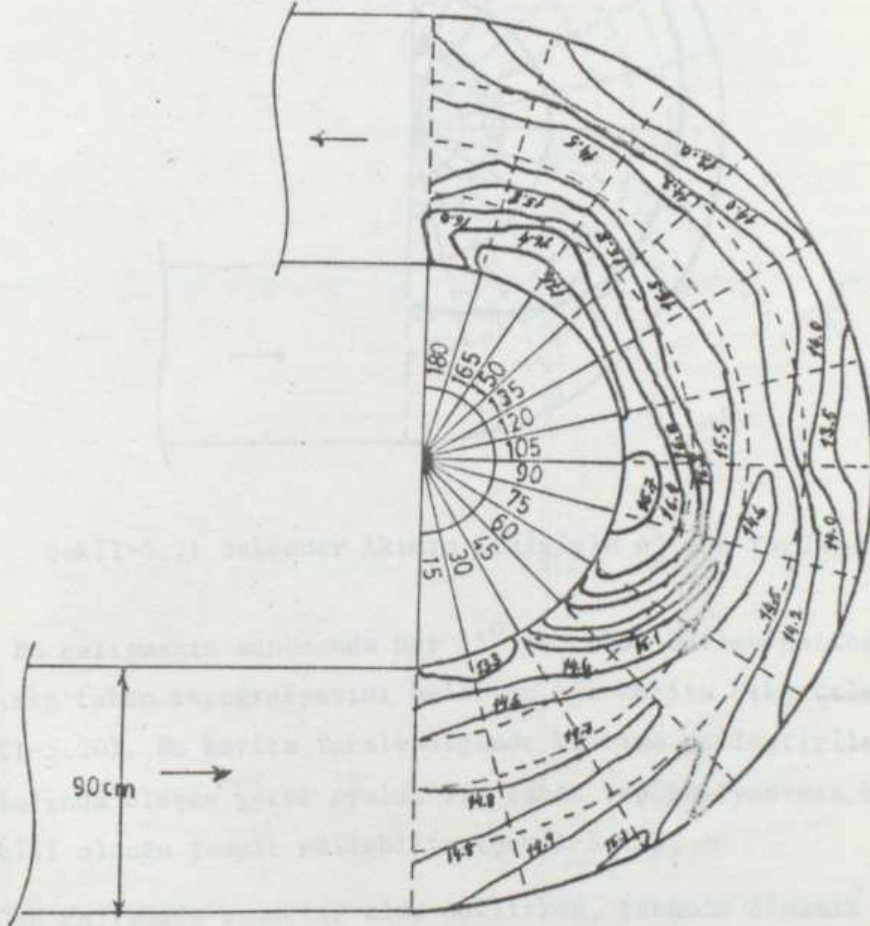
5- Kıvrımlara yerleştirilmiş köprü ayakları etrafında oluşan oyulma çukurlarının şekli, menba tarafında yarım kesik koni, mansap tarafında ise, yaklaşık olarak yarım elipsoit olarak meydana gelmektedir.

Yukarıda ana hatlarıyla sıralanan bu neticeler, burada yapılan çalışmayla karşılaştırıldığında, meydana gelen değişimlerin karakterleri itibariyle tam bir uyum içinde oldukları görülmektedir. Bu çalışmada göze çarpan tek fark kıvrımın 0°-30° arasında oyulma derinliklerinin doğrusal kanaldakine nazaran daha az olmasıdır, bunun nedeni de gerek iki ayrı kıvrımlı kanaldaki, kıvrım eğrilik yarı çaplarının ve merkez açılarının farklı oluşu, gerekse taban malzemesi olarak kullanılan kumun granulometresinin değişik olmasındandır.

5.7. Kıvrımlı Kanalda Taban Topoğrafyası ile Oyulma Arasındaki İlişki

Bundan önceki deneysel çalışmalarda, kıvrıma yerleştirilen köprü ayakları etrafındaki oyulmalar incelenmişti, şimdi 180° lik kıvrımdaki taban deformasyonlarının incelenmesi için bir seri deney yapılmıştır (Şekil-5.20).

Yapılan deneylerin sonuçları Kyozo Suga (1967)'nin /32/ yapmış olduğu çalışma ile tam bir uyum içindedir (Şekil-3.7). Yani kıvrımın hemen girişinde menbadan taşınan malzemenin yeterli olmasından dolayı meydana gelen erozyon çok fazla olmamış, buna karşılık 45° den sonra taşınan malzemenin yetersiz kalması erozyonu artırmıştır.

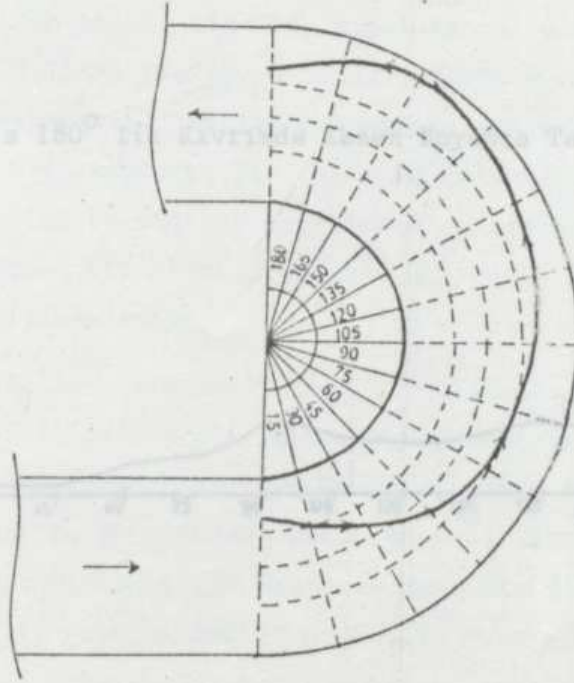


Şekil-5.20 180° lik Kıvrımda Ölçülen Taban Topoğrafyası.



Tabanda 60° den sonra kum dalgacıkları büyümeye başlamakta 90° den itibaren kendini hissettiren antisimetrik dış kıyıya doğru çarpık kum eşikleri oluşmuştur.

Bu çalışmada maksimum u'_θ 'nünde kıvrımda giriş kesitinde iç kıyıdan, dış kıyıya doğru nasıl yer değiştirdiği de tespit edilmiştir (Şekil-5.21).

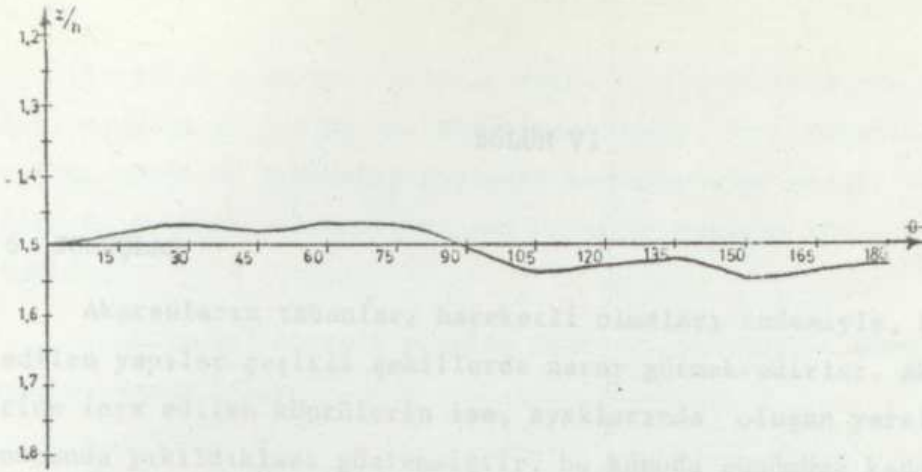


Şekil-5.21 Sekonder Akımın Etkisiyle u'_θ 'nün Yörüngesi

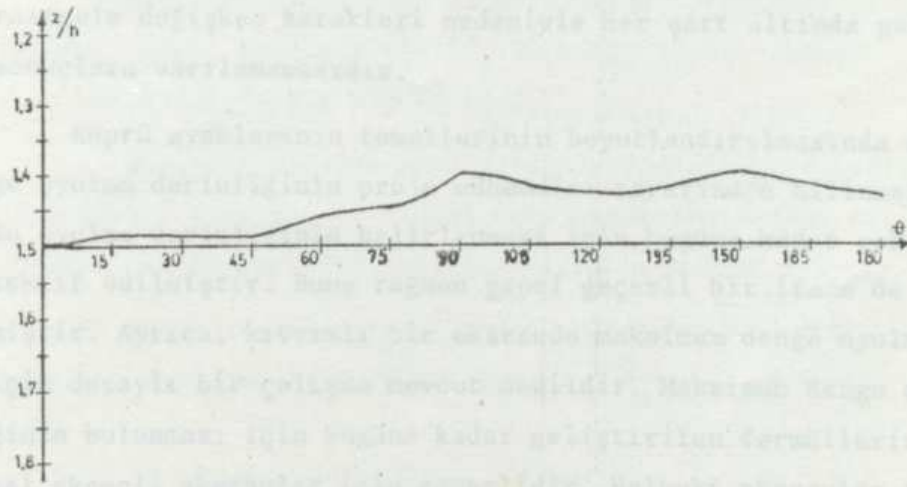
Bu çalışmanın sonucunda her 15° 'de elde edilen neticelerden, kıvrımın taban topografyasını belirten bir harita çıkartılmıştır (Şekil-5.20). Bu harita incelendiğinde kıvrıma yerleştirilen köprü ayaklarında oluşan yerel oyulma ile taban topografyasının birbiriyle ilişkili olduğu tespit edilebilir (Şekil-5.22).

Bu çalışmada sonuçlar elde edilirken, tabanda dinamik dengenin oluşmasına çalışılmıştır.

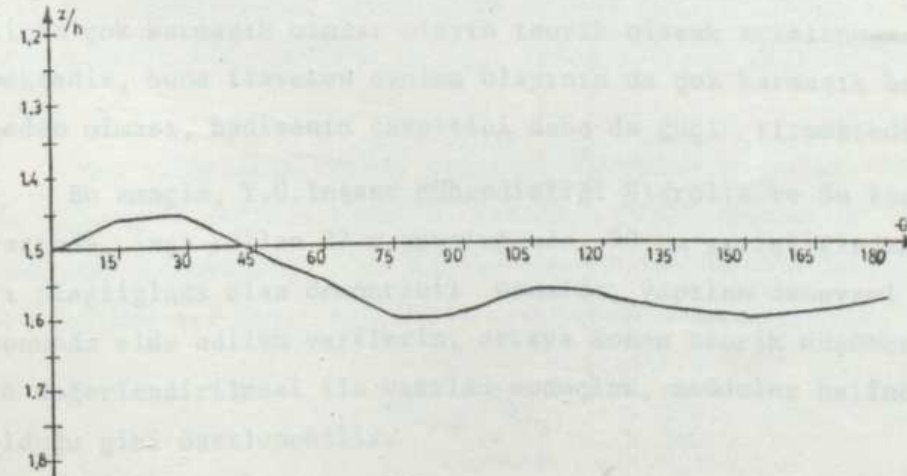




Şekil-5.22 a 180° lik Kıvrımda Eksen Boyunca Taban Formu.



Şekil-5.22 b 180° lik Kıvrımda Dış Kenar Boyunca Taban Formu.



Şekil-5.22 c 180° lik Kıvrımda İç Kenar Boyunca Taban Formu.



BÖLÜM VI

6. SONUÇLAR

Akarsuların tabanları hareketli olmaları nedeniyle, üzerlerine inşa edilen yapılar çeşitli şekillerde zarar görmektedirler. Akarsuların üzerine inşa edilen köprülerin ise, ayaklarında oluşan yerel oyulmalar sonucunda yıkıldıkları gözlenmiştir, bu konuda günümüze kadar çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yapılan çok sayıda araştırmaya rağmen olayın aydınlığa kavuşturulamamış bir çok yönü bulunmaktadır. Bunun nedeni de, olayın çok sayıda ve değişik karakterde parametrelerden etkilenmesi ve rastgele değişken karakteri nedeniyle her şart altında genel geçerli sonuçlara varılamamasıdır.

Köprü ayaklarının temellerinin boyutlandırılmasında maksimum denge oyulma derinliğinin proje mühendisi tarafından bilinmesi önemlidir. Bu oyulma derinliğinin belirlenmesi için bugüne kadar çok sayıda formül teklif edilmiştir. Buna rağmen genel geçerli bir ifade de elde edilememiştir. Ayrıca, kıvrımlı bir akarsuda maksimum denge oyulma derinliği için detaylı bir çalışma mevcut değildir. Maksimum denge oyulma derinliğinin bulunması için bugüne kadar geliştirilen formüllerin tamamı doğrusal eksenli akarsular için geçerlidir. Halbuki akarsular tabiatları itibarıyla genellikle kıvrımlar oluşturarak akımlıdırlar.

Kıvrımlı akarsulardaki gerek akım yapısının gerekse taban hareketinin çok karmaşık olması olayın teorik olarak açıklanmasını güçleştirmektedir, buna ilaveten oyulma olayının da çok karmaşık bir akım yapısına neden olması, hadisenin tespitini daha da güçleştirmektedir.

Bu amaçla, Y.Ü.İnşaat Mühendisliği Hidrolik ve Su Yapıları laboratuvarında, inşa edilen 27 m uzunluğunda, 90 cm genişliğindeki, yan duvarları plegsiglass olan demontabil kanalda, yapılan deneysel çalışmanın sonunda elde edilen verilerin, ortaya konan teorik düşüncelerle birlikte değerlendirilmesi ile varılan sonuçlar, maddeler halinde aşağıda olduğu gibi özetlenebilir.



1- Köprü ayakları, akım içersine yerleştirildiğinde en önemli özelliği meydana getirdiği vorteks sistemlerdir. Ayak etrafındaki hareketli tabanı söken ve oyulmanın başlamasına neden olan atnalı vorteks sistemidir. Bu sökülen malzemeyi mansap tarafına taşıyan ise art-iz vorteks sistemidir.

2- Doğrusal kanalda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda maksimum oyulma derinliğinin

$$H_{dmax} = 0.61 D^{0.769} \quad (m)$$

formülü ile elde edilebileceği bulunmuştur.

3- Doğrusal kanallarda köprü ayakları etrafında oluşan oyulma çukurunun şekli, yaklaşık olarak, en küçük boyutu ayağın çapı olan, ters yatırılmış kesik bir konidir.

4- Doğrusal kanalda elde edilen ölçümlere göre, rölatif olarak elde edilen kıvrımlı kanaldaki maksimum denge oyulma derinlikleri köprü ayaklarının çapından bağımsız olduğu görülmüştür.

5- Bu elde edilen sonuçlardan, kıvrımın eksenini boyunca oluşan maksimum denge oyulma derinliklerinin

$$H_{d\theta} = K_{\theta} \cdot H_{dmax}$$

formülü ile bulunabileceği elde edilmiştir. Yani, eksenindeki herhangi bir kesitteki oyulma derinliğini bulmak için doğrusal kanaldaki oyulma derinliklerini, o kesite ait K_{θ} katsayısı ile çarpmak yeterli olacaktır.

Yan cıdarların etkili olmadığı kıvrımın iç ve dış kenarından 0,25 m uzaklıktaki iki hat boyunca, maksimum denge oyulma derinlikleri de, doğrusal kanallardan elde edilen oyulma derinliklerini, göz önüne alınan kesite ait $K_{\theta/B}$ katsayısı ile çarpılarak bulunabilir. Yani,

$$H_{d\theta} = K_{\theta/B} \cdot H_{dmax}$$

formülünden elde edilebilir.



6- Kıvrımın eksenî boyunca yerleştirilen ayaklar etrafındaki maksimum oyulma derinlikleri kesitten kesite değişmekte olup, maksimum oyulma derinliği 60° ila 75° lik kesitlerde meydana gelmektedir. Minimum oyulma derinliği ise 120° ve 150° lik kesitlerin bulunduğu kıvrımın ikinci yarısında oluşmaktadır.

7- Gerek kıvrımın eksenî boyunca gerekse kıvrımın iç ve dış kenarındaki hat boyunca elde edilen maksimum denge oyulma derinlikleri incelendiğinde, bu hatlar arasında birbirinden farklı neticeler elde edilmiştir. Burada tek benzer özellik kıvrımın girişinden 45° lik kesite kadar olan kısımda, diğer kesitlere nazaran daha az ve stabil oyulma derinliklerinin elde edilmesidir. Ayrıca oyulma derinlikleri bu kısımda iç kıyıdan dış kıyıya doğru tedricî olarak azalmaktadır.

8- Kıvrımda 45° lik kesitten sonra maksimum oyulma derinliklerinin miktarı dış kıyıdan iç kıyıya doğru azalma göstermektedir.

9- Sekonder akımın kıvrımın ikinci yarısında şiddetini artırmasıyla bu bölgede dış kıyıya doğru çarpılmış antisimetrik kum eşiklerinin oluştuğu gözlenmiştir. Dolayısıyla dış kenara yakın hat boyunca bu kum eşikleri oyulma derinliklerine etkili olmaktadır. Böylece mansaba doğru hareket eden kum eşikleri oyulma derinliklerinin periyodik olarak değişmesine neden olmuştur.

Morin (1971)'de /31/ bu kum eşiklerinin çok büyük boyutlara ulaştığını ve yüksekliklerinin su derinliğinin yaklaşık $1/3$ 'üne yakın yüksekliğine varabileceğini belirtmiştir.

Gerçekten bu kum eşiklerinin kıvrımın bu bölgesinin stabilitesini bozmaktadır.

10- Bu kum eşiklerinden oluşan salınımlar, eksen ve iç kıyıdaki hat boyunca yığılmanın etkisiyle oyulma çukurları üzerinde etkisini göstermemiş ve bu hatların daha stabil olduğu gözlenmiştir.

11- 180° lik kıvrım boyunca çeşitli kesitlerde yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, iç kenardan dış kenara doğru gidildikçe, maksimum oyulmanın da yer değiştirdiği ve bunun kıvrımdaki sekonder hareketin yer değiştirme gerçeği ile tam bir uygunluk içinde olduğu tesbit edilmiştir.

12- Kesitten kesite değişen oyulma derinlikleri Şekil-3.8'de verilen kıvrımlı kanallardaki rölatif su derinliğinin değişimi ile uyum sağlamaktadır. Yapılan deneysel çalışmaların devamında 180° lik kıvrımlı kanalımıza ait çıkarttığımız taban topoğrafyası ile Şekil-3.7 den görülen benzeri sonuçlardan da oyulma derinliklerinin kıvrımlı kanalın taban topoğrafyasının değişimiyle ilgilidir ve bu taban şekillerinin oluşmasında tamamen sökonder akımın sonucudur. Gerçekten, Şekil-5.19'da görülen 75° lik kıvrımlı kanaldan elde edilen sonuçların sökonder akımın şiddetiyle büyük bir uyum içinde olması da ilginçtir.

13- Kıvrımda oluşan gerek taban şekillerinin gerekse elde ettiğimiz oyulma derinliklerinin iç kıyıdan dış kıyıya doğru değişimi, Francis-Asfari (1970) nin /8/ (Şekil-2.6) 180° lik kıvrımlı dikdörtgen kesitli kanalda sökonder akımı da içine alan, değiştirilmiş u_0 teğetsel hızı esas olmak üzere, doğrusal bir kanaldaki ayak etrafında oluşacak akım alanının yaklaşık olarak kıvrımda da oluşacağı kabulü gerçekleşmiştir.

14- Oyulmanın iç kıyıdan dış kıyıya yapmış olduğu yer değiştirmenin 45° lik kesit civarında olduğu gözlemlendi. Bu da Kyozo Suga (1967)'nin /32/ belirtmiş olduğu, menbadaki doğrusal kanalın ekseninin uzantısı ile kıvrımın dış duvarının kesişme noktasında taban topoğrafyasının değişimi ile tam bir uyum içindedir. Benzeri değişim kanalımızın taban topoğrafyasında da gözlenmiştir.

15- Buradan şunu söylemek mümkündür, Cidar etkisinin dışında kalmak şartıyla köprü ayakları kıvrımın neresine yerleştirilirse yerleştirilsin 0° ile 45° arasındaki giriş bölgesinde daha üniform ve stabil oyulma derinlikleri oluşmaktadır.

16- Kıvrımlara yerleştirilmiş köprü ayakları etrafında oluşan oyulma çukurlarının şekli menba tarafında yarım kesik koni, mansap tarafında ise yaklaşık olarak biraz iç kıyıya doğru çarpılmış yarım elipsoit olarak meydana gelmektedir. Ayrıca kıvrımın ikinci yarısında dış hat boyunca yapılan ölçümlerde maksimum oyulma derinliği ayağın tam doğurganında değilde kıvrımın iç tarafına doğru menba ile 45° lik açı yapan, noktada kaldığı gözlenmiştir.



REFERANSLAR

- 1- ALTINBİLEK, H.D., "Su Yapılarında Yerel Oyulmalar", D.S.I. Yaz Okulu, Keban, 1974.
- 2- BREUSERS, H.N.C., "Local Scour", I.H.E., Delft, 1977.
- 3- VRIES, M., "Rivers", I.H.E., Delft, 1985.
- 4- PRINS, A., "Rivers", I.H.E., Delft, 1984.
- 5- ROZOWSKII, I.L., "Flow of Water in Bends of Open Channels", Pub.by.A.S.(USSR), Kiev, 1967.
- 6- STRUİKSMAN, N., VRIEND, H.J., "Flow and Bed Deformation in River Bends", pub.no.317, Delft Hy.Lab., 1983.
- 7- YEN, B.C., "Some Aspects of in Meandering Channels", Journal of Hy.Res., I.A.H.R., Vol.1, p.465, 1967.
- 8- FRANCIS, J.R.D., ASFARI, A.F., "Velocity Distributions in Wide, Curved Open-Channed Flows", Journal of Hy.Res., I.A.H.R., Vol.9, p.73-90., 1970.
- 9- UÇ, S., "Akarsu Kıvrımlarındaki Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Yerel Oyulmalar", Doçentlik Tezi, İ.D.M.M.A., İstanbul, 1979.
- 10- YEN, B.C., "Charecteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel", Institute of Hy.Res., Univ.of.Lowa, Iowa City, Iowa, 1965.
- 11- CARSTENS, M.R., SHARMA, H.R., "Local Scour Around Large Obstructions", Journal of Hy.Res., I.A.H.R., p.254-261, 1975.
- 12- DURGUN, K., "Laminer Üç Boyutlu Sınır Tabakası Denklemlerinin İnvariant Özellikleri ve Bir Bağlama Ayağı Etrafındaki Laminer Üç Boyutlu Sınır Tabakasının Etüdü", Doktora Tezi, İ.T.Ü., İstanbul, 1964.
- 13- SHEN, H.W., SCHNEIDER, V.R., KARAKI, S.S. "Mechanics of Local Scour", Colarado State Univ. CER66HWS22, FT Collins, 1966
- 14- SHEN, H.W., SCHNEIDER, V.R., KARAKI, S.S., "Local Scour Around Bridge Piers", A.S.C.E., Vol.95, HY6, p.1919-1939, 1969



- 15- BAKER, C.J., "Theoretical Approach to Prediction of Local Scour Around Bridge Piers", Journal of Hy.Res., I.A.H.R., Vol.18, p.1-12, 1980.
- 16- ROPER, A.T., SCHNEIDER, V.R., SHEN, H.W., "Analytical Approach to Local Scour", 12th I.A.H.R. Congress, FT. Collins. Vol.3, p.151-161, 1967.
- 17- NEILL, C.R., "Local Scour Around Bridge Piers", Res. Council of Alberta, Highway Division., 1964a
- 18- SHEN, H.W., SCHNEIDER, V.R., "Effect of Bridge Pier Shape on Local Scour", Prepr. no. 1238, A.S.C.E. Nat. Meeting on Transp. Eng., Boston, Mass. 1970.
- 19- HJORTH P., "Studies on the Nature of Local Scour", Lund, Sweden, 1975.
- 20- ROSHKO, A., "Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at a Very High Reynolds Number", J. Fluid Mech., Vol.10, p.345-356, 1961.
- 21- QADAR, A., "The Vortex Scour Mechanism at Bridge Piers", Proc. Instn. Civ. Eng., Part 2, p.739-757, 1981.
- 22- POSEY, C.J., "Tests of Scour Protection for Bridge Piers", A.S.C.E., Vol.100, HY12, p.1773-1783, 1974.
- 23- MOORE, W.L., MASCH, F.D. "The Influence of Secondary Flows on Local Scour at Obstructions in a Channel", Proc. Federal Interagency Sed. Conf. Misc. Publ., no. 970-1963.
- 24- RAUDKIVI A.J., "Scour at Bridge Piers", Univ. of Auckland Sch. of Eng., New Zealand Pub. No. 216, 1985.
- 25- Van RIJN, L.C., "Sediment Transport, 1-Bed Load Transport 2-Suspended Load Transport 3- Bed Form Sand Alluvial Roughness", pub. no: 334, Delft Hy. Lab., 1985.
- 26- BREUSERS, H.N.C., "Sediment Transport 1.", I.H.E., Delft, 1985.
- 27- GUNTER, A., "Force D'entrainement Moyenne Critique $\bar{Z}_c$, Avec Prise en Consideration des Fluctuations dues a la Turbulence de la Force D'entrainement Agissant Sur le Matériau D'un lit Alluvionnaire", 14th I.A.H.R. Congress, Paris, p. 9-14, 1971

- 28- RAZVAN,E., "L'Influence de la Haute Turbulence Sur L'Entrainement des Alluvions", 14th.I.A.H.R.Congress,Paris,p.17-23,1971.
- 30- ZWAARD,J.J., "Applied River Hydraulics", I.H.E.,Delft,1985.
- 31- MORIN,E., "Deformation di Lits Alluvionnaires dans les Coudes des Rivières", 14th.I.A.H.R.Congress,Paris p.127-136,1971
- 32- SUGA,K., "The Stable Profiles of the Curved Open Channel Beds", Journal of Hy.Res.,I.A.H.R., Vol.1,p.487-495,1967.
- 33- STRUIKSMA,N., OLESEN,K.W.,FLOKSTRA,C., de VRIEND,H.J.,"Bed Deformation in Curved Alluvial Channels",pub.no.333, Delft Hy.Lab. 1985.
- 34- LAURSEN,E.M., "A Generalized Model Study of Scour Around Bridge Piers and Abutments", Proc.Minnesota International Hydraulics Convention,1963.
- 35- BAKER,C.J., "Vortex Flow Around the Bases of Obstacles", Ph.D.Thesis, Cambridge University,U.K., 1978.
- 36- MEVILLE,B.W., "Local Scour at Bridge Sites,Ph.D.Thesis, Univ.of Auckland,Rep.No.117,New Zealand,1975.
- 37- QUESNOT,C., "Affouillements Autour de Piles de Ponts Cylindriques Circulaires", L.N.H.Chatau,HC043-E223,Paris,1971
- 38- NICOLLET,G.,"Deformation des Lits Alluvionnaires Affouillements Autour des Piles de Ponts Cylindriques",L.N.H.Chatau,HC-043-689, Paris,1971.
- 39- LARRAS,J., "Profondeurs Maximales D'érosion des Fonds Mobiles Autour des Piles en Rivière, Ann.Ponts et Chaussées, 133(4), p.411-424,1963.
- 40- COLEMAN,N.L., "Analyzing Laboratory Measurements of Scour at Cylindrical Piers in Sand Bends" 14th. I.A.H.R. Congress,Paris, Vol.3, p.307-313,1971.
- 41- LAURSEN,E.M., TOCH,A., "Scour Around Bridge Piers and Abutments", Bull.no.4, Iowa Highway Res.Board.,1956.



- 42- BAŞAK,V., "Doğrusal Eksenli Bir Kazık Gurubunda Oluşan Yerel Oyulma Derinlikleri", D.S.I.Araştırma Dairesi,Ankara,1975.
- 43- LECLERC,J.P., "Recherche des Lois Regissant Les Phenomenes D'Affouillement Au Pied des Piles de Pont Premiers Resultats", 14th.I.A.H.R.Congress,Paris,Vol.3, p.323-330,1971.
- 44- HANCU,S., "Sur le Calcul des Affouillements Locaux Dans la Zone des Piles du Pont", 14th.I.A.H.R.Congress, Paris,Vol.3, p.299-305, 1971.
- 45- TARAPORE,Z.S., "A Theoretical and Experimental Determination of the Erosion Patterns Coused by Obstructions in an Alluvial Channel with Particular Reference to a Vertical Circular Cylindrical Pier", Ph.D.Thesis,Univ.of Minnesota,1962.
- 46- BREUSERS,H.N.C., "Scouring Around Drilling Platforms", Journal of Hy.Res., I.A.H.R.,Vol.19,p.276,1965.
- 47- BAŞAK,V., "Doğrusal Eksenli ve Dairesel Kesitli Kazık Gurubu Etrafındaki Yerel Oyulmalar",D.S.İ.Araştırma Dairesi,Ankara,1977.
- 48- LAURSEN,E.M., "Scour at Bridge Crossing",A.S.C.E.,Vol.86, HY2,p.39-34, 1960.
- 49- TANER,N., "Hidrolik - Cilt V" Kurtulmuş Matbaası, İstanbul,1977.
- 50- KAPDAŞLI,S., "Hareketli Tabanlı Açık Kanallarda Kısmi Sürüntü Maddesi Hareketi Üzerine Bir İnceleme",Doktora Tezi,I.T.Ü.İstanbul,1982.



Bu çalışmayı yöneten ve çalışmanın her safhasında büyük ilgi ve yardımlarını gördüğüm Sayın Hocam Doç.Sabahattin ÜÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bilgilerinden yararlandığım, Sayın Prof.Dr.Fahri BAĞLI'ya, Doç.Dr. M.Emin KARAHAN'a, gösterdiği yakın ilgilerinden dolayı Doç.Dr.Adem BAŞTÜRK'e ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamı yapabilmem için gereken deney kanalının kurulmasını sağlayan Yıldız Üniversitesi Sayın Rektörlüğüne ve emeği geçen İnş.Müh.Ayhan AKGÜN'ne de teşekkürü bir borç bilirim.



ÖZGEÇMİŞ

Yük.Müh.Yalçın YÜKSEL, 1958 yılında İstanbul'da doğmuş, 1975 yılında Mehmet Bayazıt Lisesini bitirmiştir. 1979 yılında E.D.M.M. Akademisinden İnşaat Mühendisi olarak mezun olmuştur. Mezuniyeti müteakiben aynı yıl İ.D.M.M. Akademisi İnşaat Fakültesinde Lisans Üstü öğrenimine başlamış ve 1981 yılında mezun olmuştur. Mayıs 1981 tarihinde aynı Fakültenin Hidrolik ve Su Yapıları kürsüsünde asistan olarak göreve başlamıştır.

Askerlik görevini 1 Temmuz - 1 Kasım 1982 tarihleri arasında tamamlamıştır. Ekim 1984 tarihinde Hollanda devlet bursunu kazanarak "International Institute For Hydraulic and Environmental Engineering" de "Experimental and Computational Hydraulics" konusunda Lisans Üstü düzeyinde öğrenim görmüş, Ekim 1985 tarihinde mezun olmuştur.

Halen Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.



