

67776



T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
07.07.1997

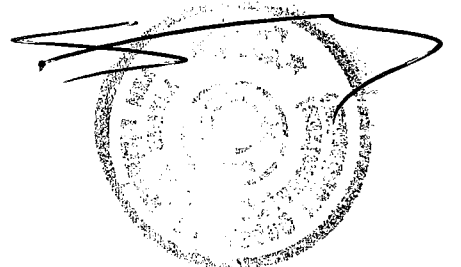
**AKARSU KIVRIMLARINA YERLEŞTİRİLEN
KÖPRÜ KENAR AYAKLARI ETRAFINDA
MEYDANA GELEN YEREL OYULMA
DERİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

İnş. Yük. Müh. Mahmud GÜNGÖR

F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Programında
hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabahattin ÜÇ



İSTANBUL, Temmuz 1997

İÇİNDEKİLER

	SEMBOLLER	vii
	ŞEKİL LİSTESİ	x
	TABLO LİSTESİ	xvi
	TEŞEKKÜR	xvii
	ÖZET	xviii
	ABSTRACT	xix
I.	BÖLÜM	
	GİRİŞ	
1.1.	Akarsu Kıvrımlarına Yerleştirilen Köprü Orta ve Kenar Ayakları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmanın Önemi ve Çalışma Konusunun Tesbiti	1
1.2.	Yapılan Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
II.	BÖLÜM	
	SABİT TABANLI KANAL KIVRIMLARINDAKİ AKIM OLAYI VE KÖPRÜ AYAKLARININ AKIMA ETKİSİ	
2.1.	Kıvrımlı Kanallardaki Akım Olayının Mekanizması	4
2.1.1.	Kıvrımlı Kanallarda Hız Ve Basınç Dağılımı	9
2.2.	Köprü Ayakları Etrafındaki Akımın Belirlenmesi Olayın Mekanizması	12
2.2.1.	Köprü Ayağının Hız Dağılımına Etkisi	13
2.2.2.	Köprü Ayağının Basınç Dağılımına Etkisi	14
2.2.3.	Sınır Tabakasının Oluşumu ve Sınır Tabakasından Ayrılmalar	15
2.2.3.	Akıma Yerleştirilen Engel Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler	16
2.2.3.1.	Sürüklenen Vorteks sistem	17
2.2.3.2.	Atnalı Vorteks Sistem	17
2.2.3.3.	Art-İz Vorteks Sistem	19

III. BÖLÜM

HAREKETLİ TABANLI KIVRIMLI KANALLARA YERLEŞTİRİLEN KÖPRÜ AYAKLARININ KATI MADDE HAREKETİNE ETKİSİ

3.1.	Taban Hareketinin Başlaması	21
3.2.	Taban Şekillerinin Oluşumu	23
3.3.	Köprü Ayakları Etrafında Meydana Gelen Oyulma	27
3.3.1.	Köprü Ayakları Etrafındaki Yerel Oyulma Olayının Mekanizması ve Dinamik Dengenin Oluşması	27
3.3.2.	Oyulmaya Etkili Parametreler	30
3.3.2.1.	Akım Hızının Oyulmaya Etkisi	30
3.3.2.2.	Ayak Genişliğinin Oyulmaya Etkisi	31
3.3.2.3.	Ayak Şeklinin Oyulmaya Etkisi	33
3.3.2.4.	Ayağın Atak Açısının Oyulmaya Etkisi	34

IV. BÖLÜM

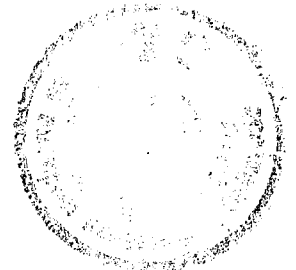
DENEY ŞARTLARININ TESBİTİ, DENEYLERİN YAPILMASI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1.	Çalışmanın Amacı	37
4.2.	Deney Kanalının Genel Düzeni	37
4.2.1.	Deney Kanalı	37
4.2.2.	Savak Anahtar Eğrisinin Elde Edilmesi	40
4.3.	Deney Öncesi Yapılan Çalışmalar	42
4.3.1.	Deneyde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri	42
4.3.2.	Deneyde Kullanılan Köprü Ayağı Modellerinin Seçimi ve Teşkil Edilmesi	43
4.3.3.	Deneysel Çalışma Programı	43
4.3.4.	Taban Malzemesi İçin Kritik Hızların Tesbiti	44
4.4.	Oyulmaya Etki Eden Parametrelerin Tesbiti ve Boyut Analizi	45
4.5.	Yerel Oyulma Deneylerin Yapılması ve Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	48
4.5.1.	Doğrusal Kanalda Yerel Oyulma Olayının İncelenmesi ve Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	49

4.5.1.1.	Doğrusal Kanalda Ayağın Akıma Dik Genişliğinin Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi	49
4.5.1.2.	Doğrusal Kanalda Atak Açılarının Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi	54
4.5.1.3.	Doğrusal Kanalda Cidar Etkisinin Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi	65
4.5.2.	Kıvrımlı Kanalda Yerel Oyulma Olayının İncelenmesi ve Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69
4.5.2.1.	Kıvrımlı Kanalda Her Konumda Atak Açısının Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi	69
4.5.2.1.1.	Kıvrımlı Kanalda Kıvrım Boyunca Atak Açıları Sabitken Narinlik Sayısının Rölatif Oyulmaya Etkisinin Araştırılması	77
4.5.2.1.1.1.	Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Atak Açısı Sabitken Rölatif Oyulmanın Ayağın Narinlik Katsayısıyla Değişimi	78
4.5.2.1.1.2.	Kıvrımın Akım Ekseni Boyunca Atak Açısı Sabitken Rölatif Oyulmanın Köprü Ayağı Narinlik Katsayısıyla Değişimi	80
4.5.2.1.1.3.	Kıvrımın İç Kenarı Boyunca Atak Açısı Sabitken Rölatif Oyulmanın Köprü Ayağı Narinlik Katsayısıyla Değişimi	80
4.5.2.2.	Kanal Kıvrımı Boyunca Rölatif Oyulma ile Narinlik Katsayısı İlişkisinin İncelenmesi	85
4.5.2.2.1.	Kanal Kıvrımı Boyunca Dikdörtgen Kesitli Ayaklarda Rölatif Oyulma-Narinlik İlişkisinin İncelenmesi	85
4.5.2.2.2.	Kanal Kıvrımı Boyunca Oblonik Kesitli Ayaklarda Rölatif Oyulma-Narinlik İlişkisinin İncelenmesi	93
4.5.3.	Kanal Kıvrımında Taban Topoğrafyasının Elde Edilmesi ve Oyulma ile İlişkisi	102

V. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	



SEMBOLLER

a	: İvme.	LT^{-2}
b	: Köprü ayağının genişliği.	L
B	: Deney kanalının taban genişliği	L
C	: Chezy katsayısı	$L^{1/2}T^{-1}$
C_D	: Sürüklenme katsayısı	-
C_n	: Basınç katsayısı	-
C_1	: Dane şekil katsayısı	-
c_e	: Savak tepe açısına bağlı katsayı	-
D	: Köprü ayağının akım yönüne dik izdüşüm genişliği	L
D_s	: Karakteristik dane çapı	L
d	: Taban malzemesinin dane çapı	L
d_m	: Ortalama dane çapı	L
d_{50}	: %50'si verilen elekten geçen dane çapı	L
F_d	: Sürtünme kuvveti	F
F_L	: Kaldırma kuvveti	F
Fr	: Froude sayısı	-
Fr^*	: Dane Froude sayısı	-
G	: Ağırlık kuvveti	F
g	: Yerçekim ivmesi	LT^{-2}
H	: Oyulma derinliği	L
H_d	: Denge oyulma derinliği	L
H_{dmax}	: Maksimum denge oyulma derinliği	L
h, y_0	: Kanaldaki su derinliği, savak yükü	L
h_{kr}	: Kritik derinlik	L
h_v	: Atnalı vorteks yüksekliği	L
I_r, I_θ	: Su yüzünün radyal ve teğetsel eğimleri	-
J_s, J_t	: Su yüzeyi ve kanal taban eğimi	-
K_s	: Ayak şekil katsayısı	-
K_{vi}	: Akım derinliğine ve kenar ayak uzunluğuna bağlı katsayı	-
K_α	: Atak açılara bağlı katsayı	-
K_θ	: Kanal kıvrımının eksen boyunda ayağın yerine bağlı bir katsayı	-
k_h	: Savak tepe açısına bağlı bir katsayı	-
L	: Uzunluk boyutu	L

l	: Köprü ayağının uzunluğu.	L
P	: Basınç, üçgen savağın tepesinin tabana olan uzaklığı	FL^{-2}, L
P_0	: Engelden yeterli uzaklıktaki bir noktanın basıncı	FL^{-2}
Q	: Debi	L^3T^{-1}
q_{tb}	: Membadan gelen katı madde miktarı	L^3T^{-2}
q_{ts}	: Oyulma çukurundan taşınan katı madde miktarı	L^3T^{-2}
R	: Hidrolik yarıçap, kanal kıvrımının akım eksenine göre eğrilik yarıçapı	L
R_0	: Kanal kıvrımının dış kıyısına göre eğrilik yarıçapı	L
R_i	: Kanal kıvrımının iç kıyısına göre eğrilik yarıçapı	L
Re	: Reynolds katsayısı	-
Re_*	: Dane Reynolds katsayısı	-
r	: Eğrilik yarıçapı, regresyon katsayısı	L
s	: Yay elemanı	L
t	: Zaman	T
U_0, U_∞	: Yaklaşım hızı	LT^{-1}
U_{max}	: Ayak önünde oluşan düşey hızın maksimum değeri	LT^{-1}
U_{kr}	: Taban hareketi için gerekli hız	LT^{-1}
u	: Ayak etrafındaki toplam hız	LT^{-1}
u_s	: Sekonder çevrinti hızı	LT^{-1}
u_t	: Sekonder geçiş hızı	LT^{-1}
u_z	: Ayak önündeki düşey hız bileşeni	LT^{-1}
u_θ	: Değiştirilmiş teğetsel hız	LT^{-1}
u_*	: Taban kayma hızı	LT^{-1}
u_{kr}	: Dane hareketi için gerekli hız	LT^{-1}
u_{*kr}	: Kritik taban kayma hızı	LT^{-1}
u', v', w'	: Sırasıyla, x,y,z yönündeki türbülans çalkantı hız bileşenleri	LT^{-1}
u_r, u_θ, u_z	: Sırasıyla, r, θ , z yönündeki hız bileşenleri	LT^{-1}
V	: Oyulma çukurunun hacmi	L^3
v	: Hız vektörü	LT^{-1}
w_b	: Çökelme hızı	LT^{-1}
α	: Atak açısı	-
γ	: Suyun özgül ağırlığı	FL^{-3}
γ_s	: Danenin özgül ağırlığı	FL^{-3}
Δ	: Danenin su altındaki birim hacim ağırlığı	-
δ	: Sınır tabaka (viskoz alt tabaka) kalınlığı	L

η	: Akım içinde bir noktanın rölatif derinliği	L
θ	: Kıvrımın merkez açısı	-
κ	: Von-Karman sabiti	-
λ	: Darcy sürtünme faktörü	-
μ	: Suyun dinamik viskozitesi	$FL^{-2}T$
ν	: kinematik viskozite	L^2T^{-1}
ν_T	: Türbülanslı kinematik viskozite	$F^{-2}T$
ρ, ρ_w	: Suyun yoğunluğu	$FL^{-4}T^2$
ρ_s	: Danenin özgül kütlesi	$FL^{-4}T^2$
σ	: Malzemenin standart sapması	-
$\bar{\tau}$	: Ortalama taban kayma gerilmesi	FL^{-2}
τ	: Dane kayma gerilmesi	FL^{-2}
τ_0	: Taban kayma gerilmesi	FL^{-2}
τ_{kr}	: Kritik taban kayma gerilmesi	FL^{-2}
τ_{Rh}	: Radyal yöndeki taban kayma gerilmesi	FL^{-2}
τ_{sh}	: Akım yönündeki taban kayma gerilmesi	FL^{-2}
τ''	: Taban şekli kayma gerilmesi	FL^{-2}
ψ	: Dane hareket faktörü	-

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1.	Akarsu Kıvrımlarındaki Akışkan Parçacığının Hareketi ve Silindirik Koordinat Sistemi Gösterimi	5
Şekil 2.2.	Kıvrımlı Bir Kanalda Enine Su Yüzü Profili	6
Şekil 2.3.	Kanal Kıvrımındaki Helikoidal Akım	7
Şekil 2.4.	Sabit Tabanlı Bir Kanal Kıvrımındaki Akım ve Radyal Düzlemde Hız Profilleri	10
Şekil 2.5.	Kanal Kıvrımında $U/\bar{U}$, Hız Dağılımı (Yeh ve Kennedy (1993), Leschziner ve Rodi (1979), Johannesson (1988) ve Rozovskii (1961)'in Çalışmaları).	12
Şekil-2.6.	Silindirik Koordinat Sisteminde Ayak Etrafındaki Hız Bileşenleri	13
Şekil 2.7.	Ayak Önünde Oluşan Düşey Hız Dağılımı	14
Şekil 2.8.	C_p Basınç Katsayısının Dağılımı	15
Şekil 2.9.	Sınır Tabaka Bölgeleri ve Hız Dağılımları	15
Şekil 2.10.	Engel Boyunca Hız Dağılımı ve Sınır Tabakasının Ayrılması	16
Şekil 2.11.	Akıma Yerleştirilen Köprü Orta Ayakları Etrafında Meydana gelen Akım Çizgileri ve Vorteks Yapı	18
Şekil 2.12.	Akıma Yerleştirilen Köprü Kenar Ayakları Etrafında Meydana Gelen Akım Çizgileri	19
Şekil 2.13.	Dikdörtgen Kenar Ayak Civarında Meydana Gelen Vorteks Yapı	20
Şekil 3.1.	Tabandaki Bir Daneye Etki Eden Kuvvetlerin Gösterimi	21
Şekil 3.2.	Dengedeki Bir Dane Etrafındaki Akım	22
Şekil 3.3.	Taban Hareketinin Başlangıcını Belirleyen Shields Eğrisi	23
Şekil 3.4.	Liu'nun Taban Şekillerinin Başlangıcı İçin Verdiği Eğriyle Shields'in Taban Hareketinin Başlangıcı İçin Verdiği Eğrinin Karşılaştırılması	24
Şekil.3.5.	Taban Deformasyonunun Basınç ve Kayma Gerilmesine Etkisi	24
Şekil 3.6.	180° lik Bir Kanal Kıvrımında Boyuna Taban Profilleri	26
Şekil 3.7.	Ayak Önünde Başlangıç Vorteksinin Oluşumu	28
Şekil 3.8.	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi	29
Şekil 3.9.	Kayma Gerilmesinin veya Yaklaşım Hızının Fonksiyonu Olarak, Yerel Oyulma Derinliğinin Değişimi	30
Şekil 3.10.	Akım Hızının Köprü Kenar Ayakları Etrafındaki Oyulmaya Etkisi	31
Şekil 3.11.	Farklı Atak Açılarındaki Oyulma Çukurları	35
Şekil 3.12.	(α) Atak Açısıyla K_w Katsayısının Değişimi	35

Şekil 4.1.	Deney Kanalının Vaziyet Planı ve Boyuna Kesiti	38
Şekil 4.2.	Katı Maddenin Toplanması	40
Şekil 4.3.	İnce Kenarlı Dik Üçgen Savak	41
Şekil 4.4.	c_e ve k_h Katsayılarının α 'ya Göre Değişimi	41
Şekil 4.5.	Üçgen Savak Anahtar Eğrisi	41
Şekil 4.6.	Taban Malzemesinin Granülometri Eğrisi	42
Şekil 4.7.	Deneyde Kullanılan Köprü Ayağı Şekilleri	43
Şekil 4.8.	Doğrusal Kanalda Tüm Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Denge Oyulma Derinlikleri ile Ayağın Akıma Dik Genişliği Arasındaki İlişki	50
Şekil 4.9.	Doğrusal Kanalda Tüm Oblonik Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Denge Oyulma Derinlikleri ile Ayağın Akıma Dik Genişliği Arasındaki İlişki	50
Şekil 4.10.	Doğrusal Kanalda Tüm Ayak Tipleri İçin Akım Ekseninde Maksimum Denge Oyulma Derinlikleri-Ayağın Akıma Dik Genişliği İlişkisi	52
Şekil 4.11.	Doğrusal Kanalda Tüm Ayaklarda Kenar Ayaklardaki Rölatif Oyulma Derinliği İçin Ortalama Çarpım Katsayısı	53
Şekil 4.12.	Doğrusal Kanalda Tüm Ayaklar İçin Yapılan Deney Sonuçlarıyla Daha Önceki Çalışmaların Karşılaştırması	54
Şekil 4.13.	Yapılan Deneysel Çalışma İle Laursen ve Toch (1956)'nın ve Üç (1979)'ün Çalışmalarının Karşılaştırması	55
Şekil 4.14.	Daha Büyük Narinlikli Ayaklar ($n>4$) İçin Laursen ve Üç'ün Verdiği Rölatif Oyulma Derinliği-Atak Açısı İlişkisi	56
Şekil 4.15.	Doğrusal Kanalda Tüm Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($H_{dmax,\alpha}/H_{dmax,90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)	57
Şekil 4.16.	Doğrusal Kanalda Tüm Oblonik Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($H_{dmax,\alpha}/H_{dmax,90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)	58
Şekil 4.17.	Doğrusal Kanalda Kenar Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Çarpım Katsayıları (K_n), ($\alpha=90^\circ$ için)	59

Şekil 4.18. Doğrusal Kanal Kenarında Dikdörtgen ve Oblonik Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Ortalama Çarpım Katsayıları, ($K_{n,ort}$), ($\alpha=90^\circ$ için)	60
Şekil 4.19. Doğrusal Kanalda Tüm Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	61
Şekil 4.20. Doğrusal Kanalda Tüm Oblonik Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	62
Şekil 4.21. Doğrusal Kanalda Kenar Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Çarpım Katsayıları (K_n), ($\alpha=0^\circ$ için)	63
Şekil 4.22. Doğrusal Kanalın Kenarında Dikdörtgen ve Oblonik Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Ortalama Çarpım Katsayıları, ($K_{n,ort}$), ($\alpha=0^\circ$ için)	63
Şekil 4.23. Doğrusal Kanalın Kenarında Rölatif Oyulma Derinliğinin Hd_{max} , ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)	64
Şekil 4.24. Doğrusal Kanal Akım Ekseninde Rölatif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)	64
Şekil 4.25. Doğrusal Kanal Kenarında ve Akım Ekseninde Rölatif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)	65
Şekil 4.26. Doğrusal Kanal Kenarındaki Dikdörtgen .Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	66
Şekil 4.27. Doğrusal Kanal Akım Eksenindeki Dikdörtgen .Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	66
Şekil 4.28. Doğrusal Kanal Kenar ve Akım Eksenlerindeki Dikdörtgen Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	67
Şekil 4.29. Doğrusal Kanal Kenarındaki Oblonik Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	67

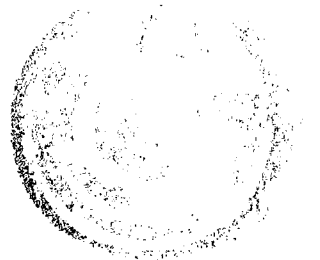
Şekil 4.30. Doğrusal Kanal Akım Eksenindeki Oblonik Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	68
Şekil 4.31. Doğrusal Kanal Kenar ve Akım Eksenlerindeki Oblonik Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)	68
Şekil 4.32. Kıvrım Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksen ve İç Kenarda Rölatif Oyulma ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Atak Açıları (α) Değişimi	70
Şekil 4.33. Kıvrım Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksen ve İç Kenarda Rölatif Oyulma ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Atak Açıları (α) Değişimi	74
Şekil 4.34. Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Narinlikle(n) Değişimi	78
Şekil 4.35. Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Narinlikle(n) Değişimi	79
Şekil 4.36. Kıvrımın Akım Eksen Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Narinlikle (n) Değişimi	81
Şekil 4.37. Kıvrımın Akım Eksen Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Narinlikle (n) Değişimi	82
Şekil 4.38. Kıvrımın İç Kenarında Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Narinlikle (n) Değişimi	83
Şekil 4.39. Kıvrım İç Kenarı Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kıv)} / Hd_{max, 90(dogeks)}$) -Narinlikle (n) Değişimi	84
Şekil 4.40. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \theta(kıv)} / Hd_{max, 90(n=2, dogeks)}$) Merkez Açılıyla (θ) Değişimi	86

- Şekil 4.41. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, do\check{g}.eks.)})$, Merkez Açılıyla (θ) Değişimi 88
- Şekil 4.42. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Tüm Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, do\check{g}.eks.)})$, Merkez Açılıyla (θ) Değişimi 90
- Şekil 4.43. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, do\check{g}.eks.)}$, Merkez Açılıyla (θ) Yerel Değişimi 91
- Şekil 4.44. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Oyulmaya Etkili Genişliği, Cidar Etki Sahası Dışında Kalan Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, do\check{g}.eks.)})$, Merkez Açılıyla (θ) Değişimi 92
- Şekil 4.45. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Oyulmaya Etkili Genişliği, Cidar Etki Sahası Dışında Kalan Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, do\check{g}.eks.)})$, Merkez Açılıyla (θ) Yerel Olarak Değişimi 93
- Şekil 4.46. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda Oblonik Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulmanın $(Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, do\check{g}.eks.)})$ Merkez Açılıyla (θ) Değişimi 94
- Şekil 4.47. Narinlik Ne Olursa Olsun Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2.2, do\check{g}.eks.)})$, Merkez Açılıyla (θ) Değişimi 97
- Şekil 4.48. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Tüm Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, do\check{g}.eks.)})$, Merkez Açılıyla (θ) Değişimi 98

Şekil 4.49. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max}, \theta(kiv.)/ Hd_{max}, 90(n=2, doğ.eks.))$, Merkez Açılıyla (θ) Yerel Değişimi	99
Şekil 4.50. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Cidar Etki Alanı Dışına Taşan Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max}, \theta(kiv.)/ Hd_{max}, 90(n=2, doğ.eks.))$, Merkez Açılıyla (θ) Değişimi	100
Şekil 4.51. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Cidar Etki Alanı Dışına Taşan Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin $(Hd_{max}, \theta(kiv.)/ Hd_{max}, 90(n=2, doğ.eks.))$, Merkez Açılıyla (θ) Yerel Olarak Değişimi	102
Şekil 4.52. Kanal Kıvrımında Akımın Etkisiyle Oluşan Taban Topoğrafyası	103
Şekil 4.53. Kıvrımın Kenarlarından 0.2 B Kadar İçerideki Bir Hat Boyunca ve Akım Ekseninde, Akımın Etkisiyle Oluşan Taban Şekli	104
Şekil 4.54. Kıvrımlı Kanalda Taban Topoğrafyası ile Yerel Oyulmanın İlişkisi	105

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Çeşitli Orta ve Kenar Ayaklar İçin Şekil Katsayıları	34
Tablo 4.1.	Çeşitli Araştırmacılara Göre $h=10$ cm. ve $d_{50}=1.28$ mm. İçin Kritik Hız Değerleri	45
Tablo 4.2.	Oyulmaya Etki Eden Parametreler	46
Tablo 4.3.	Deney Sonuçlarına Göre Elde Edilen Maksimum Denge Oyulma Derinliği Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları	51
Tablo 4.4.	Atak Açılarına Göre Elde Edilen Kenar Ayak Çarpım Katsayıları	59



TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı yöneten ve çalışmanın her safhasında değerli bilgilerinden yararlandığım, yakın ilgi ve alâkasını esirgemeyen saygı değer hocam **Prof. Dr. Sabahattin ÜÇ'e** teşekkürlerimi arz ederim.

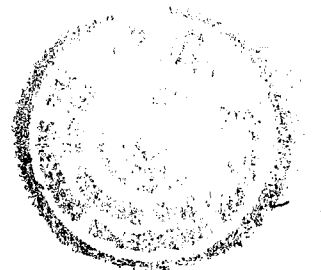
Deneyisel çalışmalarım esnasında, her türlü maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen **Prof. Dr. Adem BAŞTÜRK'e** ve Hidrolik Laboratuvarı sorumlusu **Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e** şükranlarımı sunarım. Teorik çalışmalarım esnasında değerli bilgilerinden istifade ettiğim **Prof. Dr. Necati AĞIRALIOĞLU'na**, ayrıca Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Anabilim Dalı Öğretim Üyeleri ve Araştırma Görevlilerine teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince, bana destek veren Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı **Prof. Dr. Hüsnü Yusuf GÖKALP'e** ve İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı **Prof. Dr. İbrahim ALYANAK'a** teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmamın bütün safhalarında her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen **Kıymetli Büyüklerime, Eşime ve Çocuklarıma** da teşekkür ederim.

İstanbul, 29 Temmuz 1997

Mahmud GÜNGÖR
İnş. Yük. Mühendisi



ÖZET

Akarsular üzerine inşaa edilen köprülerin yıkılma sebepleri, ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar sonucu stabilitelerini kaybetmeleridir. Bu açıdan yerel oyulmaların tesbiti, köprülerin projelendirilmelerinde önemli bir yer tutmaktadır. Bugüne kadar bu konuda pek çok araştırma yapılmış, fakat kesin bir sonuç elde edilememiştir. Çünkü, doğrusal eksenli kanallarda yapılan çalışmalarda bile etkili parametre sayısı oldukça fazladır. Bu çalışmada sırasıyla şu işlemler yapılmıştır:

1. Doğrusal kanala yerleştirilen ayaklar etrafında meydana gelen yerel oyulmalar incelenmiş ve sonuçların daha önceki çalışmalarla uyum içinde olduğu görülmüştür.
2. Kıvrım taban topoğrafyası çıkarılarak, sekonder akımın genel oyulmaya etkisi incelenmiştir. Ayrıca, akımdan dolayı oluşan taban topoğrafyasıyla yerel oyulmalar arasında çok yakın bir benzerlik olduğu tesbit edilmiştir.
3. Kanal kıvrımında atak açılarının oyulmaya etkisi incelenerek, atak açısı çarpım katsayıları elde edilmiştir. Kıvrımdaki oyulma derinliklerini bulmak için, doğrusal kanalda elde edilen oyulma derinliklerini, atak açısı çarpım katsayısıyla çarpmak yeterlidir.
4. Elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin, diğer parametrelere göre daha etkin oldukları düşünülen, ayağın akıma dik genişliği, atak açısı ve kıvrım merkez açılarıyla ilişkisi araştırılmıştır.

Sonuç olarak;

- Doğrusal kanalda kenara yerleştirilen ayaklardaki oyulma derinliklerinin, akım eksenine yerleştirilen ayaklardaki oyulma derinliklerinden, ayağın narinlik sayısına göre, dikdörtgen ayaklarda %29, oblonik ayaklarda ise %20 kadar daha büyük çıktığı belirlenmiştir.
- Doğrusal kanalda atak açıları ($\alpha \leq 60^\circ$) olduğunda; dikdörtgen ayaklarda, narinlik sayısı arttıkça rölatif oyulma azalmakta, atak açıları ($\alpha > 60^\circ$) olduğunda ise, narinlik sayısının rölatif oyulmaya etkisi ihmal edilebilir seviyede olmaktadır.
- Tüm kanal boyunca kenar ayaklarda, narinlik sayısı $n \leq 2$ olduğunda maksimum rölatif oyulma derinliği elde edilmekte, $n > 2$ olduğunda ise, rölatif oyulma derinlikleri akım eksenindeki kadar olmaktadır. Buna cidar etkisinin sebep olduğu düşünülmektedir.
- Pratik çözümlerde kıvrımlı kanalda merkez açısı, $\theta > 60^\circ$ için doğrusal kanal ekseninde elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin, kıvrımın dış kenarındaki dikdörtgen ayaklarda 1.3, oblonik ayaklarda 1.25 ile, akım ekseninde her iki ayak tipi için de ~ 1.0 ile, kıvrımın iç kenarında ise, dikdörtgen ayaklarda 0.8 ile, oblonik ayaklarda 0.77 ile, cidar etkisinin olduğu bölgelerde de; dikdörtgen ayaklarda 1.50 ile, oblonik ayaklarda 1.40 çarpım gerekmektedir.

ABSTRACT

The main reason of the fall down of bridges which are built over the river is related to the lose of their balances caused by scouring that occurs around the bridge piers. Hence, determination of the local scouring is quite important in projecting of the bridges. Up to date there has been numerous research works about this topic. But there were not satisfactory results even as there are a considerable number of affecting parameters on local scour in the straight channels.

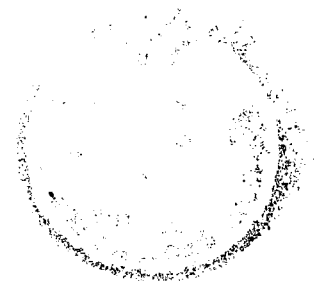
In the thesis the following subjects have been studied:

1. Local scour depth at the around of bridge piers in the straight channels has been investigated and a good agreement between the results has been obtained with previous studies in literature.
2. Bed deformations occuring by means of secondary flow's influence in the channel bend have been examined. A good agreement between bed topography occured by river flow and relative scour depth around piers and abutment was exist.
3. The effect on local scour depths of attack angle at channel bends has been worked. In addition, multiplying coefficient of attack angle was searched.
4. It is investigated that the change of the depth of local scour is depending on the width of projection normal to flow direction of bridge piers, to the attack angle and bend central angle, for the factors having substantial effects comparatively others.

The results obtained in the thesis are presented as follows:

- In the straight channels, for both of rectangular and oblonic piers, scour depth occuring around abutments located in channel bank was always higher than that in the channel axe. Relationships between them as depending on L/b , their rate is 1.29 for rectangular and 1.20 for oblonic.
- In the straight channels, for rectangular piers, while attack angle is less than 60° , by increasing with the L/b coefficient decreases relative local scour depth. On the other hand, while attack angle is higher than 60° , the impact of L/b can be negligible.
- Furthermore, along the channel when $n \leq 2$, maximum relative scour depth and when $n > 2$, relative scour depth was as scour depth around piers at the channel axe. It is estimated that the reason of this effect was resulting from wall effect of the channel edge. For practical applications, at the river channel bend, for central angle $\theta \geq 60^\circ$, relative scour depth obtained at straight channel axe should be multiplied by:

At outer bank	: 1.30 for rectangular piers
	: 1.25 for oblonic piers
At the flow axe	: ~ 1.0 for both type of piers
At the inner bank	: 0.80 for rectangular piers
	: 0.77 for oblonic piers
At the places existing wall effect	: 1.50 for rectangular piers
	: 1.40 for oblonic piers



BÖLÜM I

1. GİRİŞ

1.1. Akarsu Kıvrımlarına Yerleştirilen Köprü Orta ve Kenar Ayakları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmanın Önemi ve Çalışma Konusunun Tesbiti

Oyulma, akarsular ve sel yataklarındaki su akımının sebep olduğu tabii bir aşınmadır. Genellikle akarsu tabanları, aluvyal malzemelerden, bazen de su darbeleriyle parçalanmış kaya parçacıklarından oluşur. Tecrübeler, oyulmanın, ilerleyerek akarsu içine yerleştirilen yapının temelini altını oyduğunu göstermiştir. Bu tür yerel oyulmalara, köprü orta ve kenar ayakları ile mahmuz yapılarının bulunduğu kesitler, bağlama etekleri ve çakıl geçitlerinin sonları gibi akımın hızlanıp çevrintiler oluşturduğu yerlerdeki oyulmalar örnek olarak gösterilebilir, (Bayazit,1971). Nehir tabanları ve kıyıların davranışlarının bilinmesi, su yapılarının yok olmasına sebep olan yerel oyulmaların önlenmesi veya minimuma indirgenmesi, oyulma çukurunun derinliğinin tesbiti ve temelden gelecek tehlikelere karşı yapının korunması projelendirmede oldukça önemli yer tutar, (Altınbilek,1974).

Akım içine yerleştirilen köprü ayağı, köprü kenar ayağı ve mahmuzlar gibi yapıların bulunduğu daraltılmış kesitlerde türbülans şiddetinin artması, katı madde taşınımı ve bu ikisinin karşılıklı etkileşimi sonucunda, akarsuyun yerel katı madde taşıma kapasitesi artar, bunun sonucunda da yerel oyulma olayı başlamış olur. Daha sonra oyulma çukurunun geometrisi sürekli olarak değişir. Oyulma çukuruna gelen katı madde miktarı, giden katı madde miktarına eşit olunca dinamik denge oluşur. Bu durumdaki oyulma derinliğine, maksimum denge oyulma derinliği denmektedir.

Bu yapıların projelendirilmesinde, yerel oyulmaya etki eden parametrelere köprü ayağının şeklinin ve atak açısının da eklenmesiyle, yerel oyulma derinliğinin hesabı, daha da güçleşmekte ve proje mühendislerinin işini zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak, hesap edilen yerel oyulma derinliği ile gerçekte oluşacak oyulma derinliği genellikle birbirinden farklı olmaktadır. Bu yüzden, bu tür problemlerin çözümünde, teorik çalışmalardan daha çok deneysel çalışmalar önerilmekte, hatta kaçınılmaz olmaktadır.

Yerel oyulma olayına sadece akarsuya yerleştirilen yapılar sebep olmaz, yapılar olmadan da nehir kıvrımlarında, akarsu taban eğiminin aniden değiştiği yerlerde, taşkın



esnasında veya akımın azaldığı gibi durumlarda da oyulmalar meydana gelebilir. Taban malzemesinin granülometrisinin, akım derinliğinin ve hızının değişmesiyle meydana gelen taban kayma gerilmesinin, kritik taban kayma gerilmesinden büyük veya küçük olması durumuna göre, tabanda oyulma veya yığılmalar meydana gelir.

Kanal kıvrımlarında ise, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle su dış kıyıya doğru itilir. Böylece su seviyesi dış kıyıda yükselir, iç kıyıda azalır. Dış kıyıdaki bu yükselme sonucunda rölatif basıncın artmasıyla dıştan içe doğru normal akım yönüne dik ve kapalı devre şeklinde helikoidal akım oluşur. Bunun sonucunda da, kıvrımın dışında oyulma, içinde ise, yığılmalar meydana gelir. Köprü temellerini dizayn eden mühendisin bu durumu da göz önüne alması gerekmektedir.

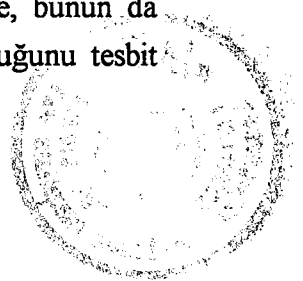
Oyulma olayını değişik karekterde pekçok parametre etkilemektedir. Bugüne kadar çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen, problemin bu denli karmaşık yapısından dolayı henüz genel bir teoriye ulaşılamamıştır, (Breusers and Raudkivi, 1991). Ayrıca, oyulma derinliğini belirlemeye yardımcı olan mevcut çalışmaların hemen hemen hepsi, doğrusal eksenli akarsularda yapılmıştır. Kaldı ki bu çalışmalarda bile, sonuçlar açısından birliktelik sağlanamamıştır. Bu sebeple; problem, ilmi çevrelerde hâla önemli olmaya devam etmektedir

Melville (1992), Brice et. al. (1978)'in, Amerika'da yaptıkları detaylı bir araştırmada, 1964-1972 yılları arasında bölgesel taşkınlardan dolayı hasar gören köprülerin ve yüksek yolların zararının yaklaşık olay başına 100.10^6 \$'a vardığını tesbit ettiklerini,

Sutherland (1986)'nın, 1960-1984 arasında Yeni Zelanda'da meydana gelen büyük çaplı köprü yıkılmalarıyla ilgili hazırladığı arşivde, 29 tanesi köprü kenar ayaklarında olmak üzere, 108 yıkılma olayı kaydettiğini,

Kandasamy ve Melville (1989)'ın yaptıkları bir araştırmada, Yeni Zelanda'da tamamen yıkılan 10 adet köprüden 6 tanesine, köprü kenar ayaklarındaki veya yaklaşım sahasındaki oyulmadan dolayı meydana gelen çamur hortumunun sebep olduğunu tesbit ettiklerini,

Macky (1990)'nın yaptığı araştırmada ise, Yeni Zelanda'daki yollarda, oyulmalardan dolayı meydana gelen hasarların onarımı için yapılan harcamalar üzerine bir rapor hazırladığını; bu raporda, toplam harcamanın yaklaşık %50'sinin köprülere, bunun da %70'den fazlasının, köprü kenar ayaklarına ve yaklaşım yapılarına ait olduğunu tesbit ettiğini bildirmektedir.



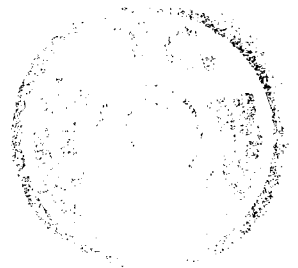
Bu tesbitler göz önüne alındığında, konunun önemi bir kez daha anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, kıvrımlı kanallara yerleştirilen köprü ayakları etrafında, özellikle de köprü kenar ayakları ve mahmuzlar etrafında meydana gelen oyulma derinlikleri ile ilgili detaylı araştırmaların olmaması, bu konuda yeni araştırmaların yapılmasını gerektirmiştir.

1.2. Yapılan Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı, akarsu kıvrımlarına yerleştirilen köprü orta ayakları ve özellikle köprü kenar ayakları etrafında meydana gelen denge oyulma derinliklerinin hesabı ve buna bağlı olarak temel derinliğinin tesbiti için proje mühendislerine yardımcı olacak bilgi ve verileri tesbit etmektir. Bu gaye için laboratuvarında pilot ölçekli tesislerde deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmanın ilk aşamasında, doğrusal ve kıvrımlı kanallara yerleştirilen köprü orta ve kenar ayağı etrafındaki oyulma olayına etkili parametreler, tesbit edilmiştir. İkinci aşamada, Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Hidrolik laboratuvarında kurulu pilot ölçekli doğrusal ve kıvrımlı akarsu kanalında deneysel çalışmalar yapılması planlanmıştır. Bu çalışmada;

- 1) Hareketli tabanlı kıvrımlı kanalda, akımdan dolayı meydana gelen taban hareketlerinin incelenmesi ve taban deformasyonlarının oluşumu,
- 2) Kanalin doğrusal kısmında; kenarlarda ve akım ekseninde çeşitli atak açıları için, farklı ayak modelleri etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliklerinin tesbit edilmesi ve buradan elde edilecek rölatif oyulma derinliklerinin kanal kıvrımında yapılan deney sonuçlarının irdelenmesi safhasında, referans olarak kullanılması,
- 3) Kanal kıvrımının dış kenar, iç kenar ve akım eksenine, çeşitli atak açılarında yerleştirilen ayakların etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliklerinin, gerek kıvrım boyunca ve gerekse her 30°'de bir enkesit üzerinde değişiminin incelenmesi,
- 4) Kanalin doğrusal kısmından elde edilen rölatif oyulma derinlikleriyle, kıvrımlı kısımda bulunacak sonuçların karşılaştırılması ve aralarındaki ilişkinin tesbit edilmesi,
- 5) Kıvrım etkisinden dolayı meydana gelen taban şekilleriyle, kıvrıma yerleştirilecek ayaklar etrafında meydana gelen oyulma derinlikleri arasındaki ilişkinin araştırılması, planlanmıştır.



BÖLÜM II

2. SABİT TABANLI KANAL KIVRIMLARINDAKİ AKIM OLAYI VE KÖPRÜ AYAKLARININ AKIMA ETKİSİ

2.1. Kıvrımlı Kanallardaki Akım Olayının Mekanizması

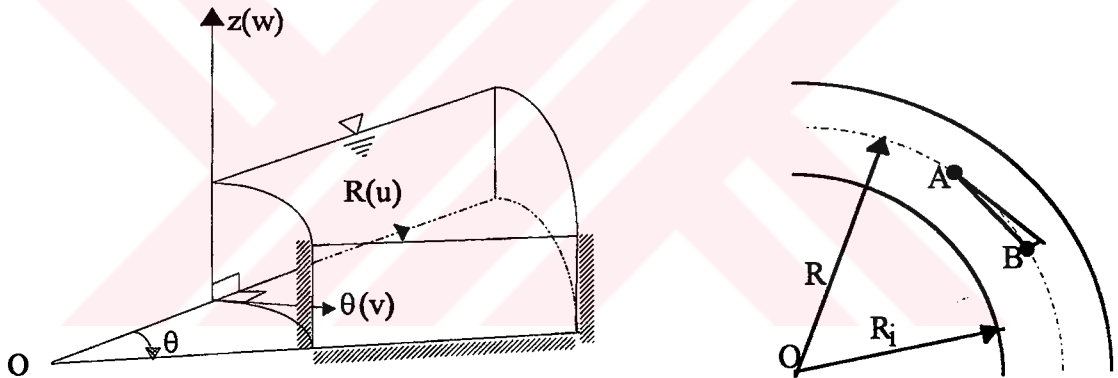
Akarsu kıvrımlarındaki akım olayının anlaşılması için, öncelikle açık kanal kıvrımlarındaki akım olayının mekanizmasının çok iyi bilinmesi gerekir. Akarsu kıvrımlarındaki akım olayı, uzun zamandan beri araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Ancak, bugüne kadar eğrilik yarıçapı ve kıvrım boyunca şev yapısı sabit olan kanal kıvrımlarında bile henüz kesinleşmiş bir bağlantı mevcut değildir. Bunun sebebi ise, kanal kıvrımlarındaki akım karakteristiklerinin, doğrusal kanallardan çok daha karmaşık olmasıdır. Doğrusal bir kanaldan kıvrımlı bir kanala geçişte, akım alanında oldukça önemli değişiklikler olmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalardaki gözlemlerden şu sonucu çıkarmak mümkündür: Kıvrım girişinden itibaren mansaba doğru gidildikçe, kıvrımın iç kenarı yakınında serbest yüzeyde ani ve hızlı bir alçalma görülürken, kıvrımın dış kenarında yavaş ve tedrici bir kabarma görülmektedir. Bu olayın başlıca iki sebebinin olduğu söylenebilir. Bunlardan birincisi, helikoidal akımdan dolayı dış kıyıda oluşan merkezci kuvvetin dengelenmesi için su yüzeyinin dış kenar civarında kabarmasının gerekmesi, ikincisi ise, kıvrımın giriş kesiti civarında iç kenar yakınında olduğu gibi akışkanın teğetsel ve taşımsal ivmesinin değişiminden dolayı kinetik ve potansiyel enerjiler arasında bir dönüşüm olayının oluşmasıdır. Suyun, bu hareketi sonucunda aynı düşey kesit içinde biri tabana yakın, diğeri serbest yüzey yakınında olmak üzere aynı biçim ve büyüklükte olan iki elementer sıvı kütlesi dikkate alınırsa; bu sıvı kütlelerinin momentumlarının birbirinden farklı olduğu görülür. Momentumları farklı olan bu sıvı kütleleri yer değiştirmeye çalışırlar. Öte yandan sürtünmeden dolayı, tabandaki sıvı kütlelerinin hızının serbest yüzeye yakın sıvı kütlelerinin hızından daha küçük olduğu bilinmektedir. Kıvrımlarda merkezkaç kuvvetinin etkisiyle serbest yüzeydeki su kütlesi, kıvrımın dışına itilirken, akarsu tabanındaki sıvı kütlesi de kıvrımın içine doğru hareket etmektedir. Dolayısıyla, akarsu kıvrımlarının en belirgin özelliklerinden biri olan helikoidal akım meydana gelir.

Ağaççioğlu ve Yüksel (1995), kanal kıvrımlarındaki yanal akımın hız dağılımına etkisi üzerine yaptıkları çalışmada; helikoidal akımın, sürtünme, merkezkaç ve atalet

kuvvetlerinin etkileşiminden kaynaklandığını tesbit etmişlerdir. Kanal tabanı yakınlarında akışkan zerreciklerinin hızları, sınır direnci tarafından büyük ölçüde geciktirilmektedir. Taban yakınlarında daha yavaş hareket eden akışkan, merkezkaç ve basınç kuvvetleri arasında bir denge meydana getirmek için daha keskin eğrisel bir yörüngeyi izlemek zorunda kalır. Yüzeydeki akışkan zerreciklerinin yörüngeleri, büyük hızların sebep olduğu daha büyük ataletten dolayı kanal tabanına doğru olmaktadır. Akışkan kütlelerinin sürekliliğini sürdürebilmesi için, su dış kıyıda tabana doğru hareket ederken, iç kıyıda da tabandan yukarı doğru hareket etmektedir. Böylece, teğetsel hız bileşenine ilave olarak kanal eksenine dik radyal hız bileşeni meydana gelmektedir. Oluşan radyal hız bileşeni de kanal enkesiti boyunca sekonder akımı oluşturmaktadır.

Kıvrımlı kanallardaki akımı en iyi şekilde silindirik koordinatlarla tanımlamak mümkün olduğundan burada bu koordinat sistemi kullanılmıştır.



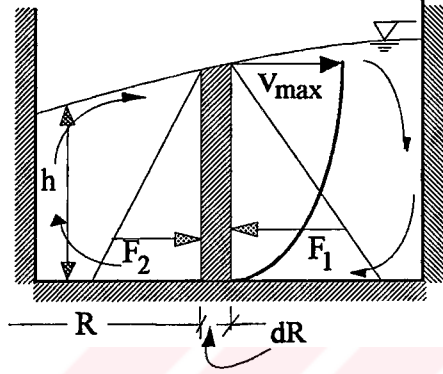
Şekil 2.1 Akarsu Kıvrımlarındaki Akışkan Parçacığının Hareketi ve Silindirik Koordinat Sistemi Gösterimi

Bir akışkan parçacığının akım eksenı boyunca hareketinde; v , akım doğrultusunda sahip olduğu hız, R , kıvrımın eğrilik yarıçapı, olarak göz önüne alınır ve akışkan parçacığının, A noktasından B noktasına a ivmesiyle vardığı düşünülürse, kanal kıvrımında, akışkan parçacığına etki ettiği düşünülen F kuvveti için,

$$F = \rho \cdot dR \cdot dz \cdot R \cdot d\theta \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2.1)$$

ifadesi yazılabilir. (2.1) bağıntısındaki ρ , akışkanın yoğunluğu, $\frac{v^2}{R}$, açısal ivme, $dR \cdot dz \cdot R \cdot d\theta$ ise, akışkan parçacığının hacmidir. Parçacığa etki eden F kuvveti, su

seviyesinin enine eğiminin bir sonucudur. Dış kıyıya doğru oluşan bu kuvvetin dengelenmesi için, su yüzeyi dış kıyıya doğru kabarıp, (Şekil 2.2.). Kanal kıvrımında akım iki boyutlu kabul edilirse, örneğin, akım hızı düşeyde sabit kabul edilirse, $\frac{\partial v}{\partial z} = 0$ aşağıdaki çözüm bulunabilir.



Şekil-2.2 Kıvrımlı Bir Kanalda Enine Su Yüzü Profili

$$\frac{\partial h}{\partial R} \rho g d R d z R d \theta = \rho d R d z R d \theta \frac{v^2}{R} \quad (2.2)$$

Buradan,

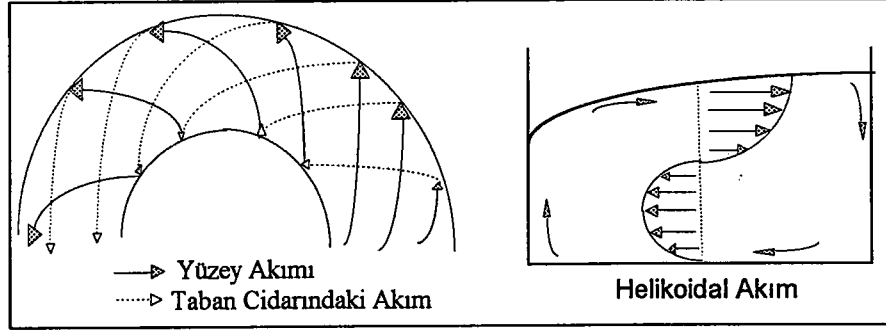
$$I_R = \frac{\partial h}{\partial R} = \frac{v^2}{gR} \quad (2.3)$$

ifadesi elde edilir. Düşey doğrultudaki hız da hesaba katılırsa, gerçek hızla hesap yapılacağı için, sürtünme etkisi de göz önüne alınmış olur. Bu durumda, akımın yüzeyindeki hız, tabandaki hızdan daha büyüktür. Öte yandan, kanal kıvrımlarında enine eğimin etkisiyle her bir akışkan parçacığının su yüzeyinde ve kanal tabanındaki hızı farklı olduğundan, $\frac{\bar{v}^2}{gR}$ 'nin değeri değişmektedir. Bu değişim, χ ile gösterilir ve düşeyde

ortalama hız değeri alınır, su yüzeyinde $\chi < \frac{\bar{v}^2}{gR}$, taban yakınında ise, $\chi > \frac{\bar{v}^2}{gR}$ olur.

Bu sebeple, su yüzeyi civarındaki akışkan parçacıkları dış kıyıya doğru, buna karşı taban civarındaki akışkan parçacıkları ise, iç kıyıya doğru hareket ederler. Bundan dolayı da Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi kanal kıvrımlarında helikoidal ve spiral akım meydana gelir.

Helikoidal akım, kanal eksenini boyunca ilerleyen esas akımla enkesit içindeki çevrimin birleşimidir.



Şekil 2.3. Kanal Kıvrımındaki Helikoidal Akım

Vries (1989)' göre, kanal kıvrımında su yüzeyi, akım eksenine dik bir eğime sahiptir. Kıvrımdaki bir enkesitte, kanalın her iki kenarı arasındaki seviye farkı ΔH , (2.9) bağıntısıyla hesaplanabilir.

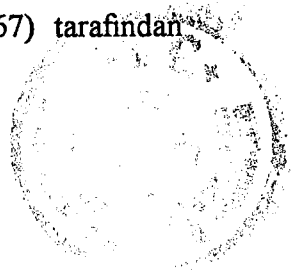
$$\Delta H \cong \frac{\bar{v}^2 \cdot B}{g \cdot (R_i + \frac{B}{2})} \quad (2.4)$$

Burada, R_i , kanal kıvrımı iç kenarının eğrilik yarıçapı, B , kanal taban genişliği ve v ise, akım yönünde hız bileşenidir. Helikoidal akımı da tanımladıktan sonra artık kanal tabanındaki τ , kayma gerilmesinin, doğrultusunu ve şiddetini göz önüne almak mümkündür. Kanal tabanındaki τ , kayma gerilmesi, kanal tabanı morfolojisi için oldukça önemlidir. Kayma gerilmesinin iki bileşeni vardır. Esas akım yönündeki kayma gerilmesi bileşeni, τ_{sb} radyal doğrultudaki ise, τ_{R_b} olsun. Bu bileşenler şöyle ifade edilebilirler.

$$\tau_{sb} = \rho \cdot g \cdot h \cdot I = \frac{v^2}{C^2} \rho \cdot g \quad (2.5)$$

$$\tau_{R_b} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{v^2}{gR} \cdot \beta \quad (2.6)$$

β indisi, taban yakınındaki seviyeyi gösterir. Yüksel (1987), Rozowski (1967) tarafından aşağıdaki bağıntının verildiğini bildirmektedir.



$$\tau_{R_b} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{\bar{v}^2}{gR} 2\beta \quad (2.7)$$

Burada β : κ , Von-Karman ve C, Chezy sabitlerine bağı bir parametredir. Toplam taban kayma gerilmesinin akım yönüyle yaptığı açı δ olmak üzere, radyal yöndeki taban kayma gerilmesi bileşeni ile gerilmesi ile akım yönündeki taban kayma gerilmesi bileşeni arasında, $\tan \delta = \frac{\tau_{R_b}}{\tau_{s_b}}$ yazılırsa (2.8) bağıntısı elde edilir.

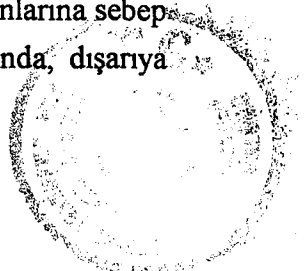
$$\tan \delta = \frac{2\beta \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \bar{v}^2 / gR}{\rho \cdot g \cdot \bar{v}^2 / C^2} = \xi \frac{h}{R} \quad (2.8)$$

$\xi = 2\beta \cdot \frac{C^2}{g}$ dir. Büyük C değerlerinde ve $\kappa=0,4$ için $\xi=10$ alınabilir. Bu sebeple, (2.8) ifadesi, (2.9)'daki gibi yazılabilir.

$$\tau_{R_b} = 10\rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{h}{R} \quad (2.9)$$

Bir akarsu kıvrımındaki ana akımın enine dağılımı şöylece açıklanabilir.

- 1) Kanalin kıvrım bölgesine yaklaşıldıkça akım, akım çizgisinin eğriliğini tedrici olarak arttırmaya çalışan memba tarafındaki basınç yükünün etkisiyle karşılaşır.
- 2) Kıvrıma girişte, akım çizgisinin eğriliği, kıvrımın iç kısmında akımın hızlanmasına yol açan enine ve boyuna basınç gradyanlarına sahiptir.
- 3) Kıvrıma girişten sonra akım tedrici olarak üniform olmayan derinlik dağılımına kendisini uydurmaya çalışır. $\bar{v}$ 'nin enine dağılımının dış kıyıya doğru sapmasına neden olur.
- 4) $\bar{v}$ 'nin enine dağılımının dış kıyıya doğru sapması, sekonder akımın düşey bileşeninin konvektif (taşımalsal) ivme etkisini arttırmaya çalışır.
- 5) Kıvrım çıkışına yakın kısımda, akım çizgisinin eğriliği tedrici olarak azalır.
- 6) Enine doğrultuda basınç gradyanındaki değişim kıvrımın iç kısmında akımı yavaşlatacak, dış kısmında ise hızlandıracak olan boyuna basınç gradyanlarına sebep olur. Bu da kıvrım çıkışına yakın bölgede $\bar{v}$ 'nin enlemesine dağılımında, dışarıya doğru olan daha fazla çarpılmaya saptmaya sebep olur.



- 7) Kıvrımın dışında bu değişiklikler tedricen kendisini taban topoğrafyasına uydurur, (de Vriend and Struikma, 1983).

2.1.1. Kıvrımlı Kanallarda Hız ve Basınç Dağılımı

Kıvrımlı kanallarda akım, eğrisel karakteristiklerin etkisiyle, düzgün üniform akımlı bir kanaldan oldukça farklıdır. Kıvrım boyunca akım kesitten kesite değişmektedir. Boyuna kütle transferine göre küçük olsa da, kıvrımda enine kütle transferi de etkilidir.

Yeh and Kennedy (1993), sabit tabanlı ve sabit yarıçaplı kanal kıvrımlarındaki akımla ilgili yaptıkları çalışmada, Blondeaux ve Seminara (1985)'in dikaate almadıklarını bildirdikleri, Johannes ve Parker (1989), Struikma et al. (1985)'nında, çalışmalarında ihmal ettikleri, kıvrım boyunca esas akım hız profillerindeki değişimi de göz önüne alarak, $h/R \ll 1$ olan uzun bir kıvrımdaki kararlı ve sıkıştırılmaz akım için silindirik koordinatlarda hareket ve süreklilik denklemlerini aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = \rho g_r + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \sigma_{rr})}{\partial r} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \quad (2.10)$$

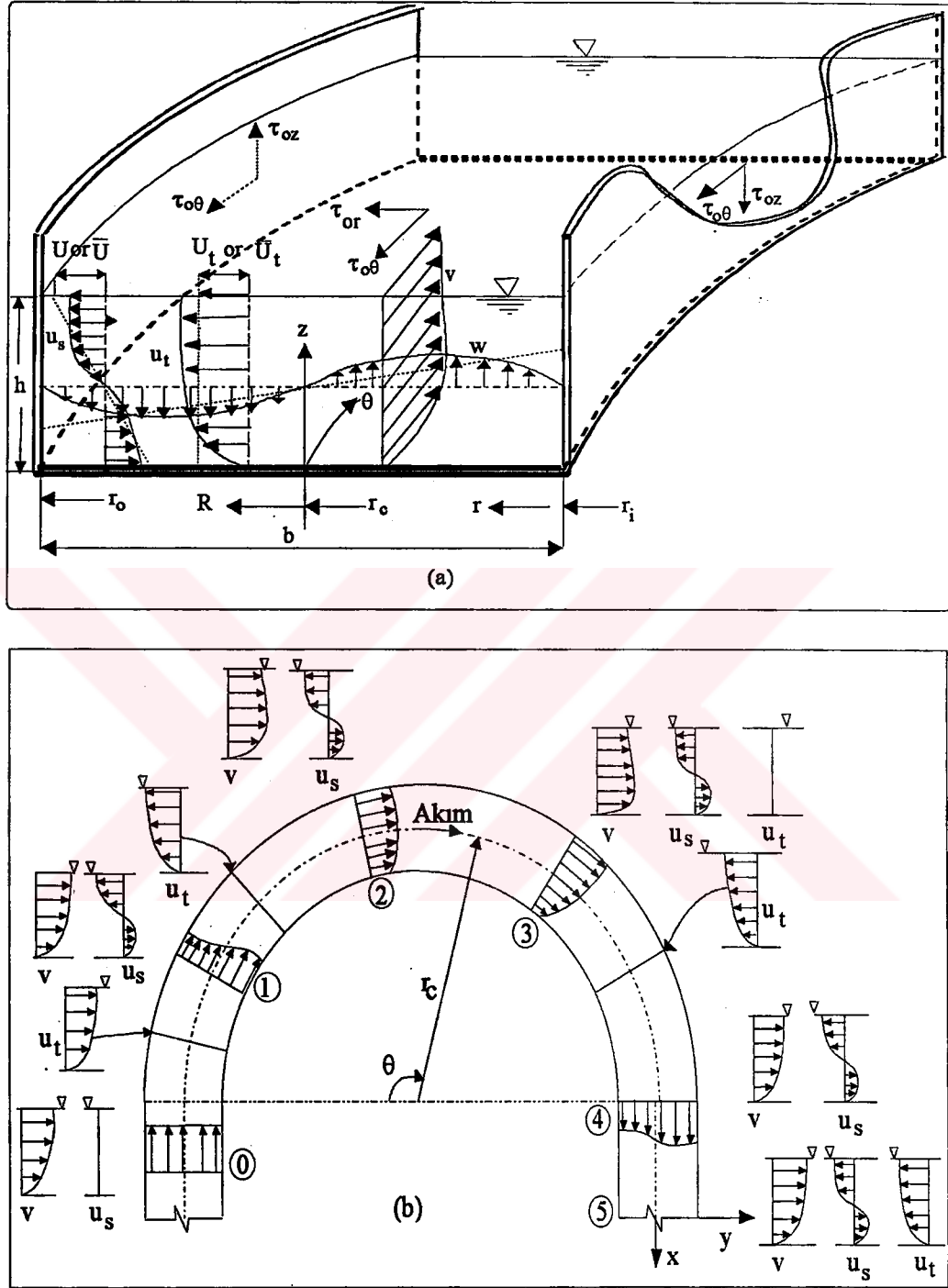
$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = \rho g_\theta + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \quad (2.11)$$

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = \rho g_z + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

Burada, ρ , Akışkanın özgül kütlesi; (u,v,w) : sırasıyla r , θ ve z yönündeki hız bileşenleri; $\rho g_{r,\theta,z}$ koordinat yönlerindeki özgül ağırlık bileşenleri; $\sigma_{ii} = -p + \tau_{ii}$, normal gerilme; p , basınç; τ_{ij} , kayma gerilmesidir.





Şekil 2.4. Sabit Tabanlı Bir Kanal Kıvrımındaki Akım ve Radyal Düzlemde Hız Profillerinin Dağılımı

Şekil 2.4.'te sabit tabanlı ve sabit yarıçaplı kıvrımlı kanalda akım ve hız dağılım profilleri verilmiştir. Şekil 2.4.'te görüldüğü gibi, esas akım hızı $U(r, \theta, z)$, düşeyde üniform olarak dağılmamaktadır.

Yeh ve Kennedy (1993), verdikleri bağıtlar için şunları kabul etmişlerdir:

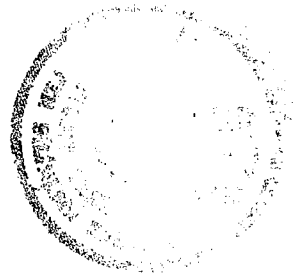
Sabit taban durumunda esas akım hızı üssel, $\bar{U}_t$, sekonder geçiş hızı kanal enkesiti boyunca üniform, u_s , sekonder çevrinti hızı, hem sabit taban, hem de hareketli taban durumunda lineer, w , düşey hız bileşeni ise, düşeyde lineer olarak dağılmaktadır (Şekil 2.4.). Ayrıca, basınç dağılımı da hidrostatiktir.

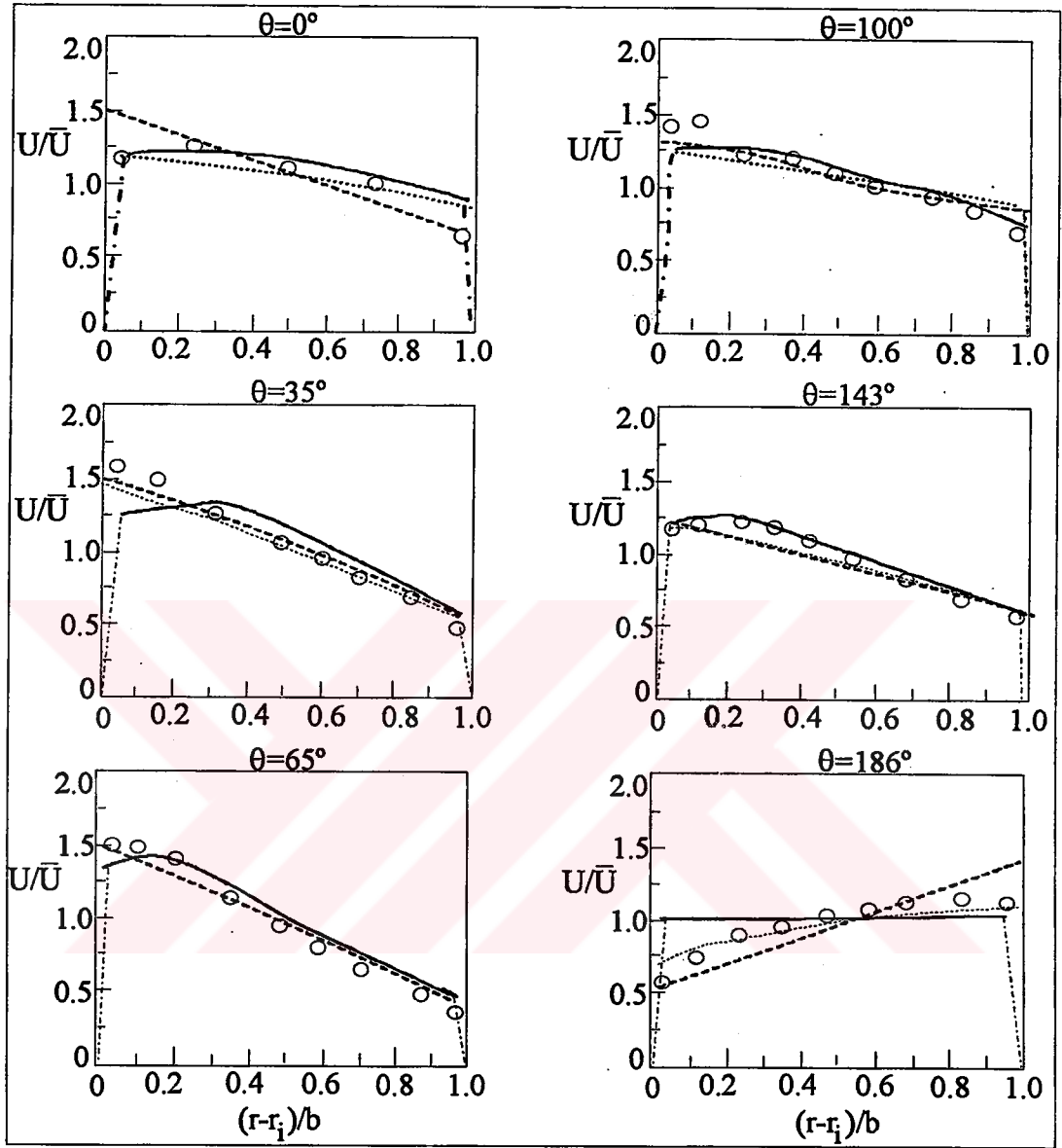
Yeh ve Kennedy (1993), yaptıkları çalışmanın sonucunda, kıvrım boyunca $V(r, \theta)$ dağılımını, ve taban kayma gerilmesinin, radyal yöndeki bileşeninin akım yönündeki bileşenine oranı ile radyal yönde ortalama hızın, akım yönündeki ortalama hıza oranının lineer olarak arttığını tesbit etmişlerdir.

Yeh ve Kennedy (1993), Keskin bir kıvrımda ($r/B=1$) yaptıkları bu model çalışmanın sonunda, 180° lik kıvrım boyunca $U/\bar{U}$ hız dağılımı için, kendi deneysel ve teorik sonuçlarıyla, Leschziner ve Rodi (1979) ve Johannesson (1988)'in çalışmalarını grafikte göstererek sonuçların uyum içinde olduğunu tesbit etmişlerdir, (Şekil 2.5).

Kanal kıvrımlarının girişinden sonra, sekonder akımın etkisiyle enine momentumdan dolayı genellikle maksimum esas akım hızı, iç kıyıdan dış kıyıya doğru yer değiştirir.

Buna karşılık, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi keskin kıvrımlarda yani, kıvrım yarıçapının kanal taban genişliğine oranı ~ 1 olarak alındığında maksimum hızlar kıvrımın sonuna kadar kıvrımın iç kenarı yakınında meydana gelmektedir. Ancak kıvrımın sonunda dış kenarda oluşmaktadır.





Şekil 2.5. Kanal kıvrımında $U/\bar{U}$ Hız dağılımı (Yeh ve Kennedy (1993) ölçülen (o) ve Hesaplanan (—), Leschziner ve Rodi (1979) (---), Johannesson (1988) (·····)'in Çalışmaları)

2.2. Köprü Ayakları Etrafındaki Akımın Belirlenmesi ve Olayın Mekanizması

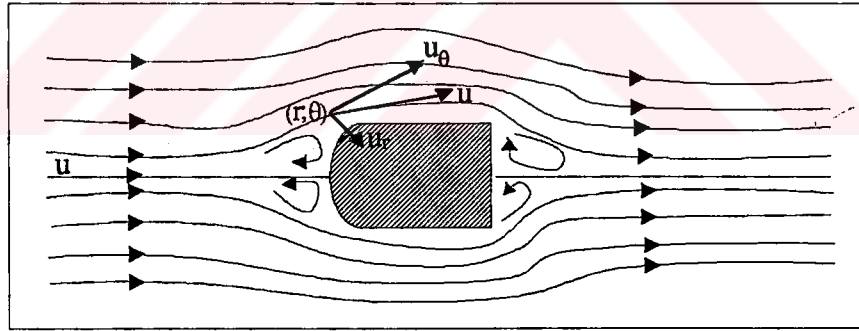
Akım alanına yerleştirilen köprü ayağı, akım alanında bazı önemli değişikliklere sebep olur. Bu değişim sonunda, kanalın tabanında önemli geometrik değişiklikler görülür.

Akıma yerleştirilen köprü ayağının meydana getirdiği olaylar şöylece sıralanabilir:

- Ayaktan dolayı akım çizgilerinde meydana gelen sapmalar ve bunun neticesinde de ayak etrafındaki hız ve basınç alanında önemli değişiklikler,
- Ayak etrafında sınır tabakasının oluşması, hız ve basınç alanındaki değişikliklerden dolayı sınır tabakasından ayrılmalara,
- Sınır tabakasından bu ayrılmaların neticesinde ayak etrafında çeşitli biçim ve büyüklükte vortekslerin oluşması ve sekonder hareketler.

2.2.1 Köprü Ayağının Hız Dağılımına Etkisi

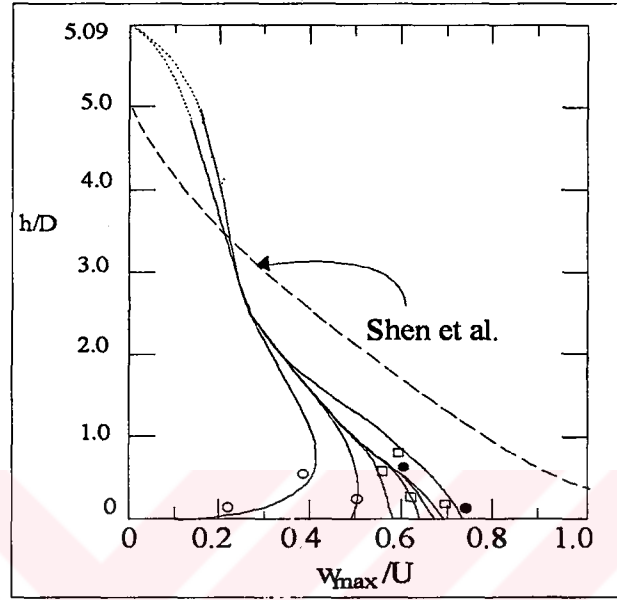
Engelin durgunluk düzlemindeki yaklaşım akımının hızı, engele yaklaştıkça azalır ve engelin cidarında sıfır olur. Durgunluk düzleminde her bir sıvı ipçığı hızının sıfır olduğu durgunluk noktasının konumu yaklaşım akımının, derinliğine, hızına ve engel önünde meydana gelen kabarma yüksekliğine bağlıdır. Ayağın memba ve mansabındaki durgunluk düzlemleri ve hız bileşenlerinin silindirik koordinatlarda gösterimi Şekil 2.6.'da görülmektedir.



Şekil-2.6 Silindirik Koordinat Sisteminde Ayak Etrafındaki Hız Bileşenleri ve Durgunluk Eksenleri

Üç (1988)'ün bildirdiğine göre, Hjort (1971,1975) yaptığı çalışmalarda, engelin memba ve mansabındaki hızın düşeydeki dağılımını ve engelden dolayı oluşan türbülansın bu hız dağılımına ne şekilde etkili olduğunu araştırmıştır. Sonuç olarak, türbülans çalkantı hızlarının çok büyük boyutlara vardığını, bunda engel etrafındaki hız dağılımını önemli ölçüde etkilediğini belirtmektedir. Bununla ilgili, Melville (1975)'nin yaptığı deneysel çalışmanın ve Shen et al. (1969)'un teorik çalışmalarının sonuçlarını Şekil 2.7.'de verilmiştir, (Raudkivi,1986), Burada, w_{max} aşağı

doğru hız bileşeni ve U , yaklaşım akımının hızıdır. Şekil 2.7.'den, engelin boyutu arttıkça türbülans çalkantı hızlarının da arttığı görülmektedir.



Şekil 2.7. Ayak Önünde Oluşan Düşey Hız Dağılımı

2.2.2. Köprü Ayağının Basınç Dağılımına Etkisi

Akıma yerleştirilen engelden dolayı hız alanında meydana gelen değişmelere paralel olarak, basınç alanında da değişimler görülmüştür.

Engelin membandaki durgunluk düzleminde yaklaşım akım hızı, yüzeyden aşağı doğru azaldığından, durgunluk basıncı da tabana doğru azalmaktadır. Yani aşağı doğru basınç gradyenti vardır, (Olsen and Melaaen, 1993). Durgunluk basıncı, aşağı doğru akıma sebep olduğu gibi, durgunluk düzleminin her iki yanında ayağı geçen akımın da hızlanmasına sebep olur. Durgunluk düzlemindeki bir noktanın basıncı, şu şekilde yazılabilir.

$$P = P_o + \frac{\rho U^2}{2} \quad (2.14)$$

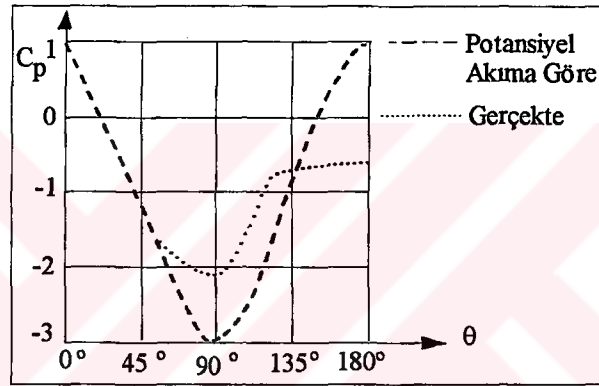
P_o , Engelden yeterli uzaklıktaki bir noktanın basıncını; p , durgunluk düzlemindeki bir noktanın basıncı ve $\frac{\rho U^2}{2}$, dinamik basıncı göstermektedir.



Hjort (1975), yaptığı deneysel çalışmanın sonucunda, engel etrafındaki basıncın değişimini C_p cinsinden, (2.15) bağıntısındaki gibi tanımlamıştır. C_p , boyutsuz basınç katsayısı, Şekil 2.8.'deki gibi dağılım göstermektedir.

$$C_p = \frac{P - P_o}{\frac{\rho U^2}{2}} \quad (2.15)$$

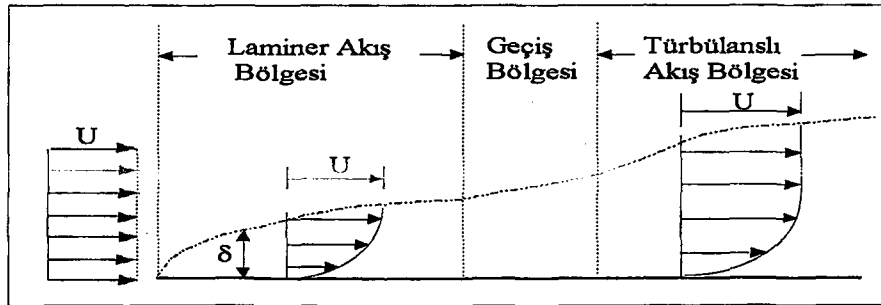
Burada P , durgunluk noktasının yakınında bir noktadaki basınç; P_o , durgunluk noktasındaki basınç; ρ , akışkanın yoğunluğu; u , yaklaşım hızıdır.



Şekil 2.8. C_p Basınç Katsayısının Dağılımı

2.2.3. Sınır Tabakasının Oluşumu ve Sınır Tabakasından Ayrılımlar

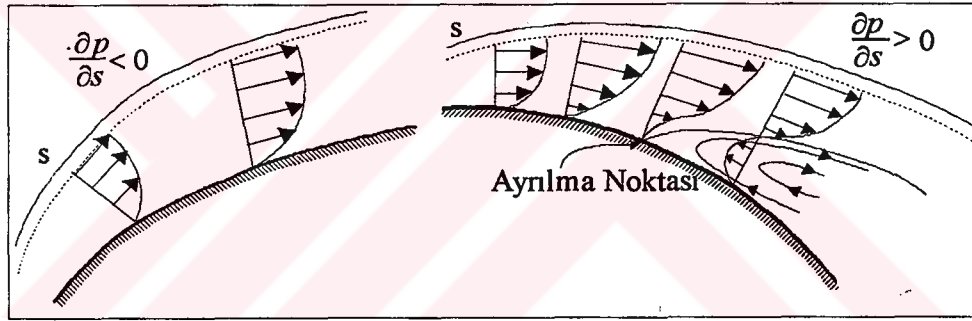
Sınır tabakası, kısaca akışkan hızının, cidardan itibaren viskozite etkisinin ihmal edildiği dış akım hızına %1 kadar yaklaştığı bölgedir. Sınır tabakaları, akım içindeki oluşum özelliklerine göre, Şekil 2.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Sınır Tabaka Bölgeleri ve Hız Dağılımları

Sınır tabakası dışında ideal kabul edilen akışkanın hareket yönünde basınç gradyeninin artması, sınır tabakası içindeki akışkan partiküllerinin bu ters basınç gradyenine karşı hareket ederken, kinetik enerjisinin büyük bir bölümünü kaybetmesine neden olur. Bu ters basınç gradyeninin tesirleri artık sınır tabakası içindeki partiküller tarafından belirli bir yerden itibaren yenilemez. Bu noktada yavaşlama başlar ve ardından da ayrılma meydana gelir. Bu olaya sınır tabakasının ayrılması adı verilir.

Sınır tabakasından ayrılma olayı, yüksek basınç artımı oluşturan küt burunlu engellerde veya sivri burunlu olmasına karşın akım doğrultusuna paralel yerleştirilmemiş engellerde meydana gelir. Bunun sebebi, engelin bütün yüzeyi üzerinde, sınır tabakasının bağlanması mümkün olmadığı gibi, engelin arka kısmında dış akım önemli derecede gecikmeye uğrar. Bu ise, sınır tabakasının sürekliliği ile uyuşmayan bir özelliktir. Şekil 2.10.'da sınır tabakası içinde hız dağılımı ve ayrılma noktası verilmiştir, (Üç, 1988).

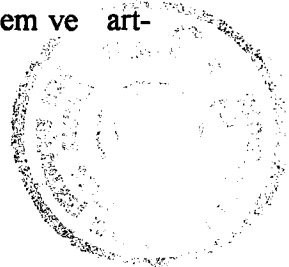


Şekil 2.10. Engel Boyunca Hız Dağılımı ve Sınır Tabakasının Ayrılması

2.2.4. Akıma Yerleştirilen Engel Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler

Akım içine yerleştirilen bir engel etrafındaki akımın en büyük özelliği, vortekslerin oluşmasıdır. Vorteksler, engelin etkisiyle sınır tabakası içinde oluşan ters basınç gradyeninin bir sonucu olarak meydana gelirler. Engelin membandaki akımın düşey bileşenini etkiler ve hız alanını enlemesine kesen çevrıntiler oluşturur. Bunun sonucu olarak da, engel önünde oyulma çukuru oluşmaya başlar.

Akıma yerleştirilen bir engel etrafında meydana gelen vorteks sistemler, üç ayrı biçimde incelenebilirler. Bunlar, sürüklenen vorteks sistem, atnalı vorteks sistem ve art-iz vorteks sistemdir.



2.2.4.1. Sürüklenen Vorteks Sistem

Bu vorteks sistemler aynı köşede birleşen yüzeyler arasında basınç farkları olduğunda meydana gelirler. Engelin durgunluk düzlemi ile kanal tabanının birleştiği yerde kabarmadan dolayı oluşan yüksek basınç gradyenleri bunların oluşmasını sağlar. Dargahi (1990), engelin membaında durgunluk düzleminde aşağı doğru inen akımın ve taban akımının sınır tabakasından ayrılmasıyla meydana gelen çevrinti hareketlerinin bu vorteks sistemi oluşturduklarını belirtmektedir.

Engel yakınındaki oyulmaya sebep olan sürüklenme vorteks sistemidir.

2.2.4.2. Atmalı Vorteks Sistem

Engelin membaında oluşan aşağı yönlü düşey hız bileşenleri tabana vardığında yansır veya sapar. Yön değiştiren bu hız bileşenlerinin bir kısmı sürüklenme vorteks sistemini oluştururken, bir bölümü de tekrar yükselerek hareketlerine devam ederler. Bu olayların sonucunda engelin tabanı yakınında çevrinti hareketi oluşur ki, buna atmalı vorteks sistemi denir. Bu hareketin hızları ile genel hareketin hızları birleşerek helikoidal hareketi meydana getiriler.

Atmalı vorteks sisteminin oluşması için yeter büyüklükte bir basınç değişiminin olması gerekir. Bu da, ancak küt burunlu engellerde sınır tabakasından ayrılmalarla olur. Böylece atmalı vorteks sistemi meydana gelir.

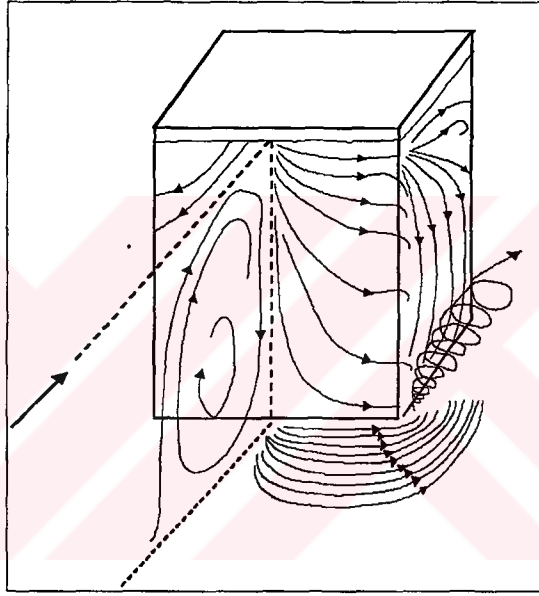
Sivri burunlu engeller etrafında vorteks sistemler oluşmasına rağmen, engelin membaında vorteksleri oluşturacak yeter büyüklükte basınç değişimi sağlanamadığından hiç bir vorteks sistem oluşmaz, (Üç, 1988).

Şekil 2.11.'de görüldüğü gibi, akıma yerleştirilen küt burunlu köprü orta ayakların membaındaki akım hızları, ayağın memba yüzeyi merkezindeki düşey eksen boyunca oluşan durgunluk düzleminde aşağı doğru vorteks oluştururlar. Bu vorteks, tabana varınca akıntıya karşı yönde taban boyunca bir miktar hareket ettikten sonra, akımın etkisiyle yukarı doğru yönelirler. Durgunluk düzleminin her iki yanında da akım çizgileri sağa ve sola saparlar. Sürüklenme vorteksi olarak bilinen, durgunluk düzlemindeki bu vorteks sistem, yaklaşım hızıyla birleşerek akımın ayaktan ayrılma bölgesinde atmalı

vorteksini oluştururlar. Atnalı vorteksinin içindeki yüksek hızlar, ayağın önündeki ve yanlarındaki oyulmada oldukça etkin rol oynarlar.

Gugten (1982)'e göre, atnalı vorteksin şiddetine, yaklaşım akımının ortalama hızı, yaklaşım akımının hızı ve derinliğı, ayağın şekli ve boyutları, oyulma çukurunun geometrisi ve akışkanın kinematik viskozitesi etkili olmaktadır.

Araştırmacılar, viskozite tesirini önemsiz bulmuşlar ve olayda Froude sayısının daha etkili olduğunu savunmuşlardır.

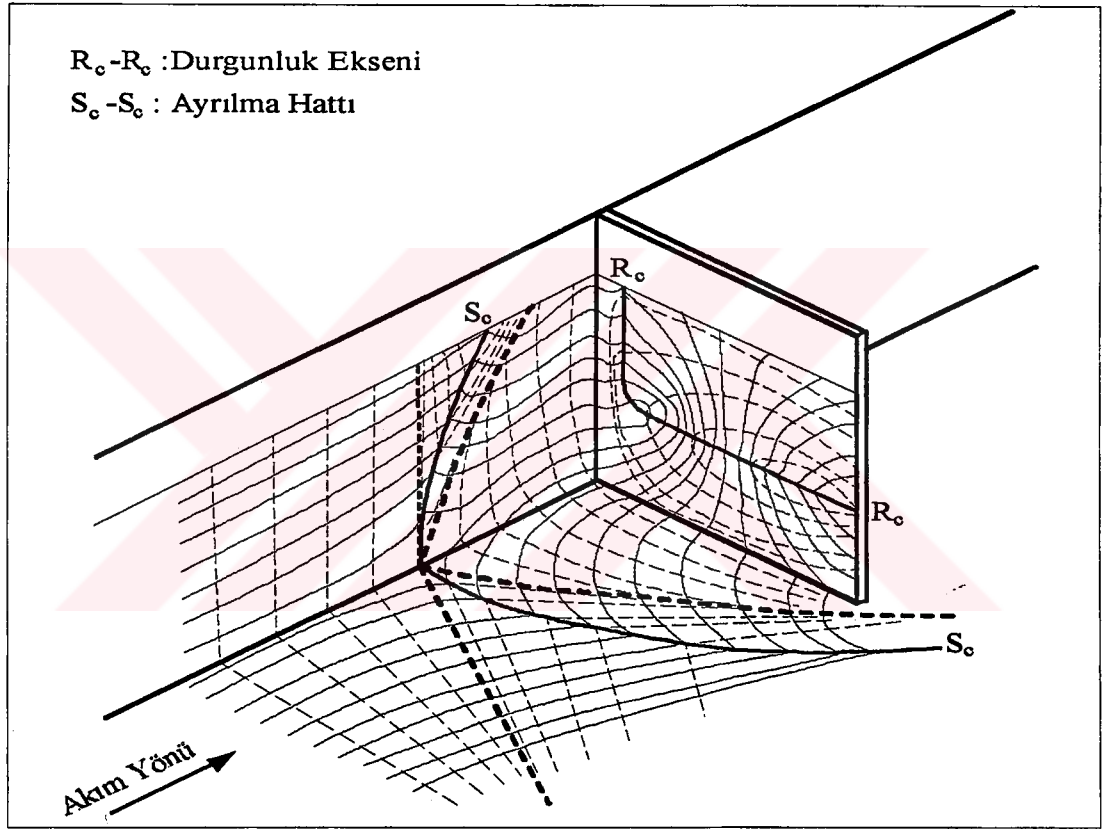


Şekil 2.11. Akıma Yerleştirilen Köprü Orta Ayakları Etrafında Meydana gelen Akım Çizgileri ve Vorteks Yapı

Buna karşın, Şekil 2.12.'den görüldüğü gibi, köprü kenar ayaklarında ise, durgunluk ekseni ilk önce ayağın memba yüzeyinde ve kenara yakın bölgede, düşey bir eksen boyunca meydana gelir. Ancak, tabana ulaşmadan tabana paralel bir hat boyunca akım eksenine doğru yönelerek ayağı terk eder. Öte yandan, Ayağın memba yüzeyine yaklaşan akım, yüzeyde aşağı doğru yönelir, durgunluk eksenine varınca, tabana varmadan akıma karşı yönde bir miktar hareket ettikten sonra yaklaşım akımının etkisiyle karşılaştıkları yerde bir ayrılma hattı oluşur. Yaklaşım akımının etkisiyle ayağın ayrılma bölgesine doğru yönelen akım, ayrılma hattı boyunca hareket eder ve ayağın ayrılma bölgesinde yaklaşım akımıyla birlikte direk atnalı vorteksini oluştururlar. Görüldüğü gibi,

ayağın membaında sürüklenme vorteksi oluşmamaktadır. Bu sebepten oyulma ayağın ucunda başlamaktadır.

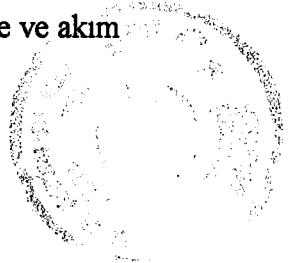
Kwan ve Melville (1994) de, kanatlı duvar tipi kenar ayaklardaki oyulmalarla ilgili yaptıkları çalışmada, başlangıç vorteksinin ayağın memba köşesinden itibaren, akıma paralel yüzeyin eksenine kadar arttığını daha sonra ayağı geçinceye kadar azaldığını bildirmektedirler.



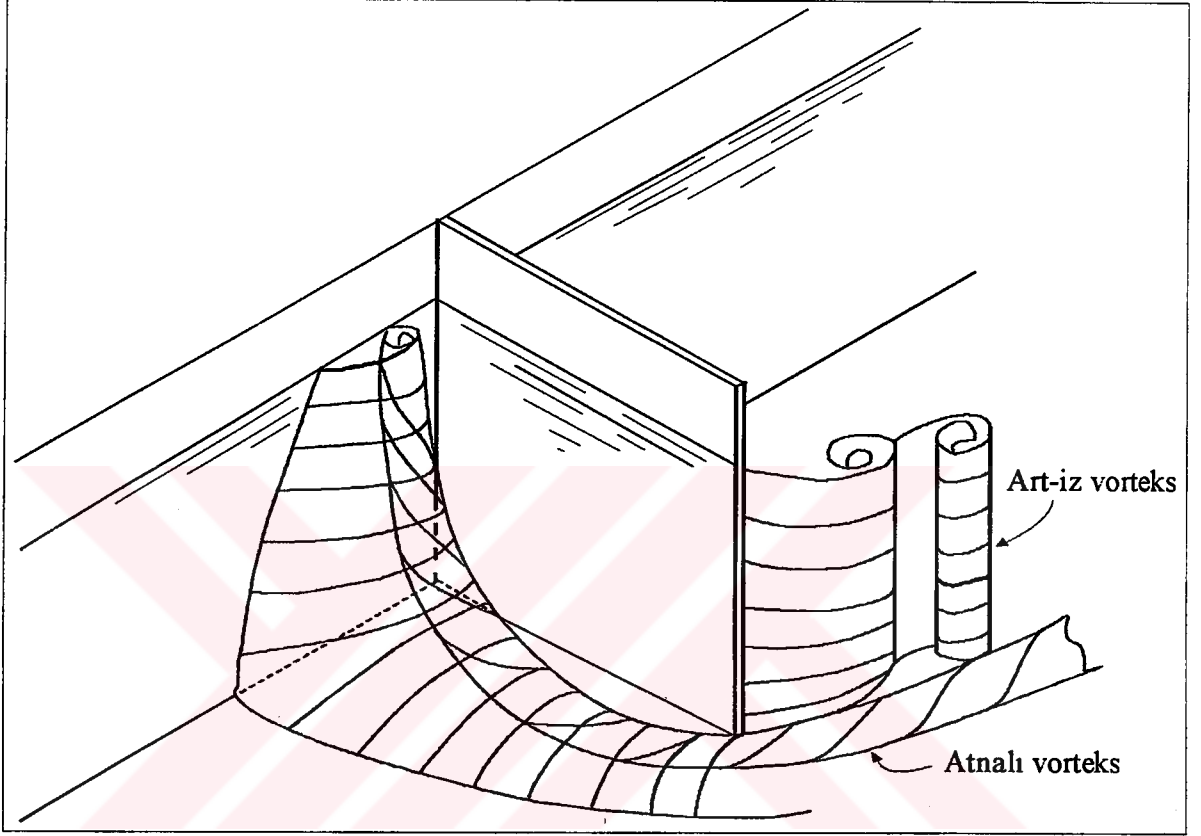
Şekil 2.12 Akıma Yerleştirilen Köprü Kenar Ayakları Etrafında Meydana Gelen Akım Çizgileri

2.2.4.3. Art-İz Vorteks Sistem

Engel yüzeyindeki kararsız sürtünme tabakasının yukarı doğru dönerek çıkmasından meydana gelir. Sürtünme tabakaları, ayrılma hattının her iki tarafından koparak ayrılırlar. Art-iz vorteks sisteminde çevrilerin şiddeti, engelin şekline ve akım



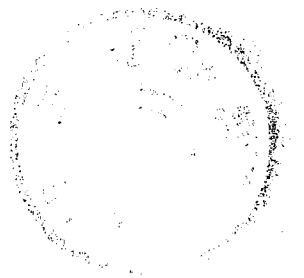
hızına bağılı olarak değışirler. Ayağıın arkasında tabandan yukarıya kalkan bir akım şeklinde gözlenirler.



Şekil 2.13. Dikdörtgen Kenar Ayak Civarında Meydana Gelen Vorteks Yapı

Atnalı vorteks sistemi tarafından ayağıın arkasına taşınan malzemeyi, emerek oyulma bölgesinden uzaklaştırılır.

Şekil 2.13.'de Akıma yerleştirilen bir dikdörtgen kenar ayak etrafında meydana gelen vorteks yapı görölmektedir.



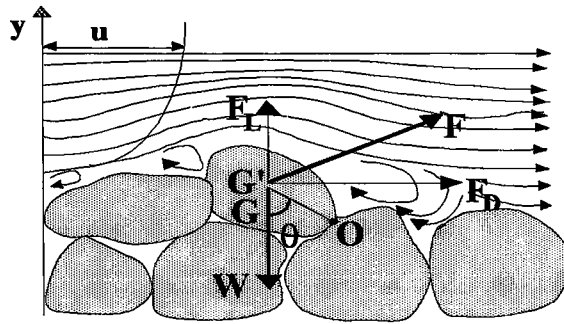
BÖLÜM III

3. HAREKETLİ TABANLI KIVRIMLI KANALLARA YERLEŞTİRİLEN KÖPRÜ AYAKLARININ KATI MADDE HAREKETİNE ETKİSİ

3.1 Taban Hareketinin Başlaması

Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi, akarsu tabanındaki danelere etkili kuvvetler direnç kuvvetleri ve hidrodinamik kuvvetlerdir. Kritik şartlar altında hidrodinamik kuvvetler danenin direnç kuvvetiyle dengelenir. Taban hareketi başlangıcında, kanal tabanındaki taban kayma hızının veya taban kayma gerilmesinin, kritik değeri aşmasıyla birlikte, katı madde yuvarlanmaya veya kaymaya başlar, (Kapdaşlı 1982). Daneler, taban kayma hızının artmasına paralel olarak düzenli veya düzensiz sıçrama yaparak taban boyunca hareket ederler. Taban kayma hızı, dane çökme hızını aşarsa askı hareketi, kayma hızı çökme hızından daha küçük olursa sıçrama hareketi etkili olur.

Eğer danenin direnç kuvveti, hidrodinamik (sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, dane yüzeyindeki viskoz kuvvetler) kuvvetlerden daha büyükse taban hareketi oluşmaz. Genellikle direnç kuvvetleri taban malzemesinin özelliklerine bağlıdır. Eğer hidrodinamik kuvvetler, dane stabilitesini temin eden ağırlık kuvvetinden büyükse tabandaki dane dengesi bozulur.

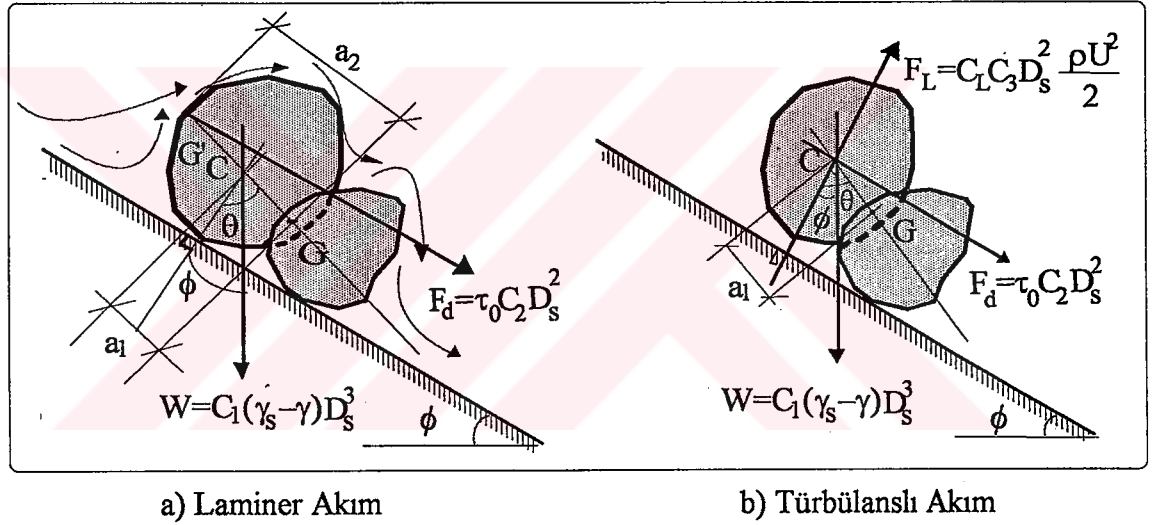


Şekil 3.1. Tabandaki Bir Daneye Etki Eden Kuvvetlerin Gösterimi

Laminer akımda olduğu gibi türbülanslı akımda da akım dane üzerinden geçerken akım çizgileri yön değiştirir ve sınır tabakasındaki asimetrik ayrılmadan dolayı danenin arkasında Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi, çevrıntiler oluşur. Ayrılmalar yukarı doğru oluşur.

Sınır tabaka ayrılması, katı madde danelerine etkili olan akışkan kuvvetlerini meydana getirir. Bu sebeple türbülanslı akımda atelet etkileri oldukça önemlidir. Bir dane üzerine etki eden akışkan kuvveti kendi içinde iki bileşene ayrılır. Birisi esas akım yönüne paralel yönde olan sürtünme kuvveti, diğeri de bunun yukarıya doğru normali yönündeki kaldırma kuvvetidir. Erkek ve Ağırlioğlu (1993), bu kuvvetlere parçacığın etrafındaki akımın sebep olduğunu; bu kuvvetlerin de, parçacığın etrafında basınç farkları ve kayma gerilmeleri doğurduğunu belirtmektedirler.

Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi, kritik durumda; yani, hareketin başlamasının hemen öncesinde bu kuvvetlerin momentleri dönme noktasına göre eşittir,



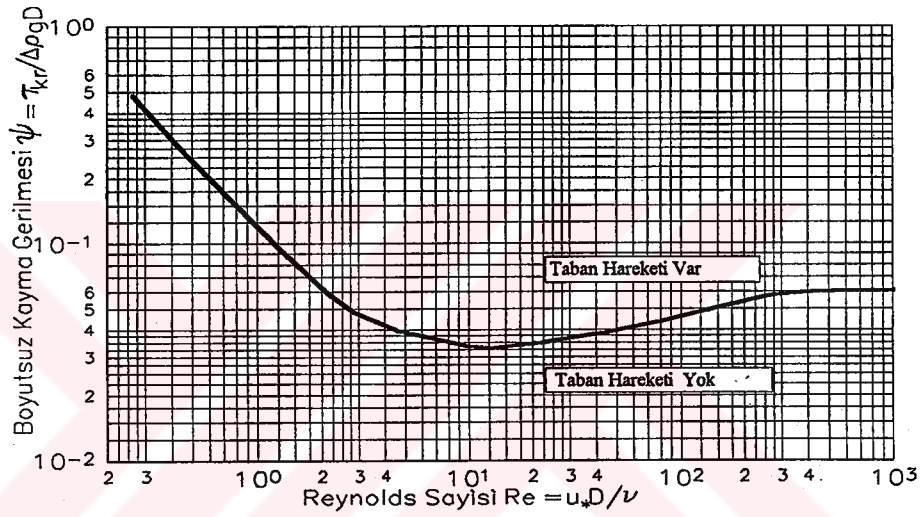
Şekil 3.2. Dengedeki Bir Dane Etrafındaki Akım

Şekil 3.2.a.'da görülen laminer akım durumunda, viskozite kuvvetleri ağır basacağından su iplikcikleri daneyi sarar ve etrafından dolaşırlar. Şekil 3.2.b.'de görülen türbülanslı akım durumunda ise, olay farklıdır. Bu durumda, taban yatay kabul edilir ve $a_1 = a_2$ olduğu düşünülürse, kritik şartlar için (3.1) bağıntısı yazılabilir.

$$\frac{\tau_{kr}}{(\gamma_s - \gamma)D_s} = f\left(\frac{u_{*kr} D_s}{\nu}\right) \quad (3.1)$$

(3.1) Bağıntısının sol tarafı Dane Froude Sayısını, sağ tarafı ise, Dane Reynolds Sayısını gösterir, (Demiröz, 1989).

Burada, , dane hareketi için gerekli kritik kayma gerilmesi; u_{*kr} , kritik kayma hızı; dane çapı; γ_s ve γ , Danenin ve akışkanın özgül ağırlıkları ve ν , akışkanın kinematik viskozitesidir. (3.1) denkleminde görüldüğü gibi, malzemenin sürüklenme başlangıcında, kritik kayma gerilmesi, dane çapı ve üniform malzemenin su altındaki birim hacim ağırlığıyla ($\gamma_s - \gamma$) orantılıdır, (Üç, 1988). Bu boyutsuz parametreler hakkında ilk çalışmayı, Shields (1936), kayma gerilmesine yalnızca hidrodinamik kuvvetlerin etkisinin olduğunu varsayarak yapmıştır, (Şekil 3.3.). Shields'in hatası, yaptığı çalışmada türbülans etkisini göz önüne almadığı olmasıdır..



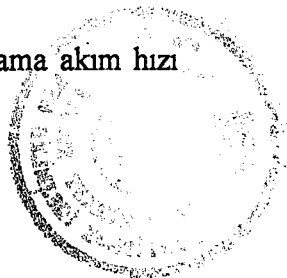
Şekil 3.3. Taban Hareketinin Başlangıcını Belirleyen Shields Eğrisi

3.2. Taban Şekillerinin Oluşumu

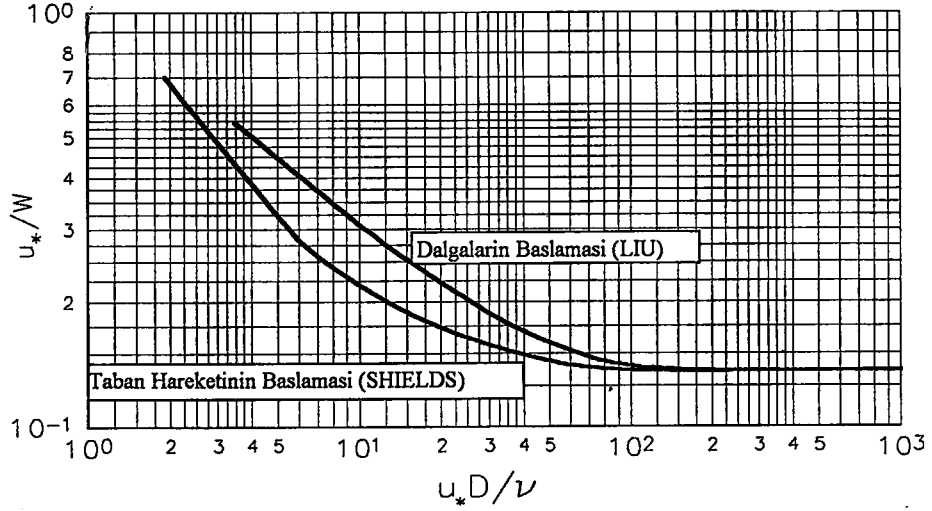
Taban şekillerinin oluşumu ile ilgili ilk çalışmayı yapan Liu'ya (1957) göre, taban dalgaları, akışkanla taban arasındaki ayırım yüzeyinin stabilitesinin bozulmasıyla meydana gelmektedir.

Taban şekillerinin meydana gelmesinin nedenleri, şu şekilde izah edilebilir.

- 1) Daha hızlı hareket eden danelerin, yavaş hareket eden daneleri engelleyip daha da yavaşlatması,
- 2) Türbülans çevrilerinin tabandan söktüğü danelerin bir kısmının ortalama akım hızı ile taşınmadıkları için yeniden yığılmaları,

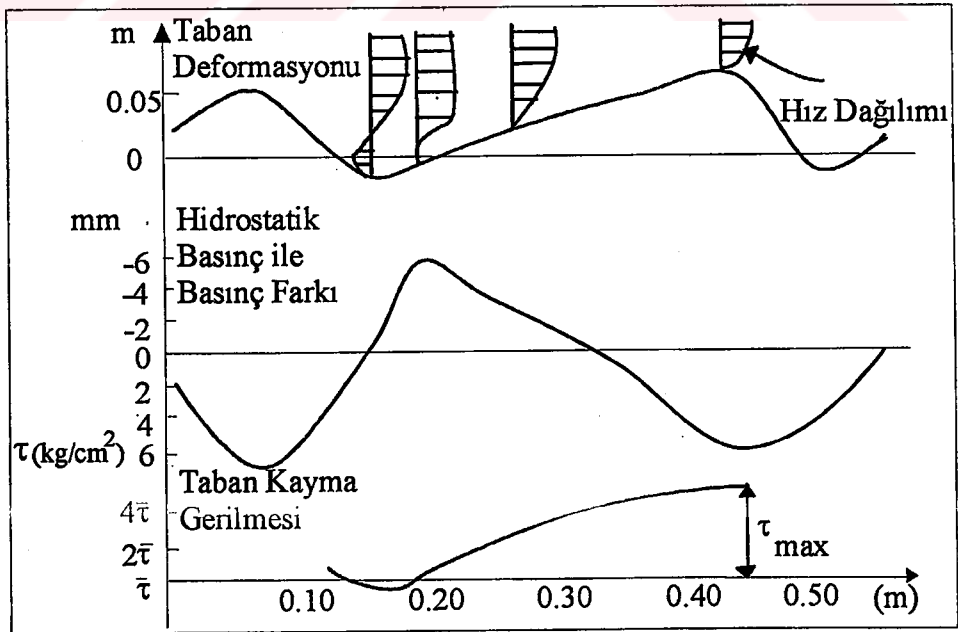


3) Danelerin üniform olmayışı halinde iri danelerin harekete geçmeyişi.



Şekil 3.4. Liu'nun Taban Şekillerinin Başlangıcı İçin Verdiği Eğriyle Shields'in Taban Hareketinin Başlangıcı İçin Verdiği Eğrinin Karşılaştırılması

Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi, laminar akımda önce tabandaki hareket başlar, sonra da taban şekilleri oluşur, buna karşın türbülanslı akımda, tabandaki hareketle taban şekilleri aynı anda oluşmaya başlar.



Şekil 3.5. Taban Deformasyonunun Basınç ve Kayma Gerilmesine Etkisi

Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi, tabanda oluşan deformasyonlar, taban yakınındaki hidrostatik basınç dağılımında ve taban kayma gerilmesinde önemli değişimlere neden olmaktadır, (Üç, 1979).

Kıvrımdaki katı madde hareketine etki eden parametrelerin karmaşıklığı, her kıvrım için ayrı ayrı neticelerin doğmasına sebep olduğundan, araştırmacılar bu konuda genel bir formül verememişlerdir. Böylece, hareketli tabanların stabil olmadığı anlaşılmaktadır, (Vries, 1985).

Chin-lien ve Shin-ya (1990), üniform malzemeli bir kanal kıvrımında yaptıkları deneysel çalışmada, kanal kıvrımlarında oluşan helikoidal akımdan dolayı taban yakınındaki taşınımın iç kıyıya doğru gerçekleştiğini tesbit etmişlerdir. Yanal momentum miktarındaki bu değişim sonucu, meydana gelen hız dağılımının dengelenmesi, taban kayma gerilmesinde ilave bir değişime sebep olmaktadır, (Yen, 1967).

Akarsu kıvrımlarındaki taban deformasyonunda, genel olarak aşağıdaki olaylar etkili olmaktadır.

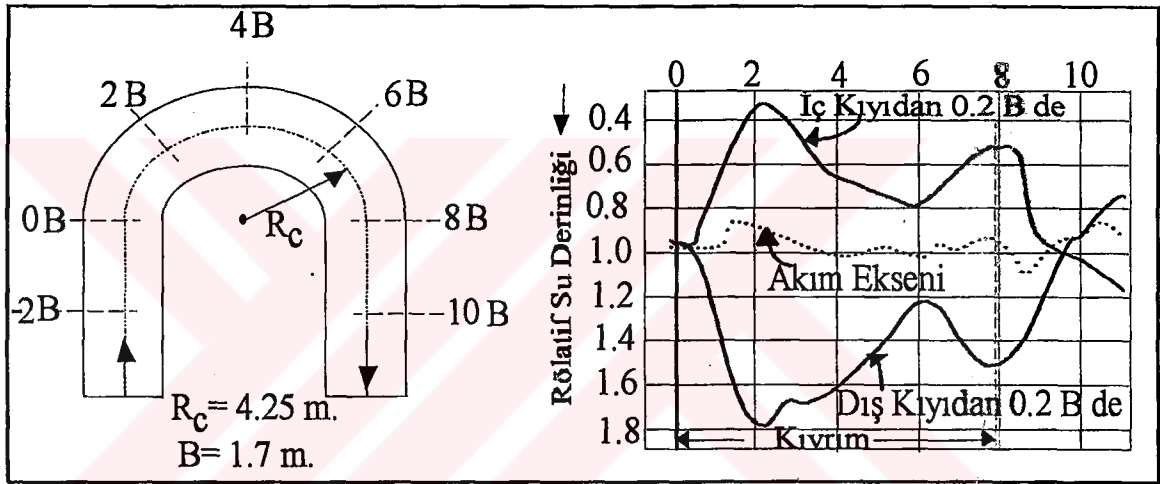
- 1) Kritik sürüklenme debisinin kıvrıma doğru yönelişi.
- 2) Akarsu tabanının genel pürüzlülüğünü değiştiren dalga ve eşiklerin oluşumu.
- 3) Stasyonier dalgaların meydana gelmesi.

Suga (1967) yaptığı çalışmada, taban deformasyonuna etkili parametrelerin,

$$F = f\left(\frac{R}{B}, \theta, \frac{h_m}{B}, \tau_*, Fr\right) \quad (3.2)$$

olduğunu belirtmiş ve dinamik denge halindeki deformasyon için, şu sonuçları vermiştir. Burada F, daneye etki eden kuvvet; R, kıvrımın eğrilik yarıçapı; B, kanal taban genişliği; h_m , ortalama akım derinliği, τ_* , taban kayma gerilmesi ve Fr, Froude sayısıdır. Kıvrımın hemen girişinde; membadan gelen katı madde, taşıma kapasitesini karşıladığından fazla oyulma olmaz. Buna karşın, doğrusal kanal ekseninin uzantısıyla dış kıyının çakıştığı noktadan itibaren, membadan gelen katı madde miktarı taşınan katı madde miktarını karşılayamadığı için, maksimum oyulma dış kıyı boyunca mansaba doğru yerleşerek ilerler. Genel olarak, kıvrımlardaki taban deformasyon modelleri; su derinliği, taban kayma gerilmesi, kıvrım ve katı madde özellikleri gibi, lokal parametreleri kullanarak enine taban eğimini hesaplamaktadır.

Vriend ve Struiksm (1983), kıvrımlardaki akımla taban deformasyonu arasındaki ilişkiyi tesbit etmek amacıyla yaptıkları çalışmada, katı madde hareketini ve bu hareketin, taban kayma gerilmesi ve taban topoğrafyasıyla ilişkisini incelemişlerdir. Daha sonra, Struiksm et al. (1985), altı ayrı tip kıvrımlı kanalda yaptıkları deney sonuçlarını kullanarak, kıvrımlı kanallardaki taban deformasyonunun belirlenmesi amacıyla bir model çalışması yapmışlardır. Yaptıkları tüm deneylerde (h/z) rölaf su derinliği ve cidar etkisinden emin olmak için iç ve dış kenarlardan kanal genişliğinin %20'si kadar içerideki bir hat ve kıvrım eksenini boyunca olmak üzere, üç ayrı ekseninde boyuna kıvrım taban profili elde etmişlerdir, (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. 180°'lik Bir Kanal Kıvrımında Boyuna Taban Profilleri

Buna göre 180° lik kıvrım boyunca dış kenarda oyulma, iç kenarda yığılma artmakta 60°~75° de maksimuma ulaşmakta, 135° ye kadar azalmakta ve tekrar mansaba doğru artmaktadır. Diğer kıvrımlarda ise maksimum oyulma ve yığılmalar genellikle kıvrımın birinci yarısında oluşmakta, ikinci yarısında ise 180°'lik kıvrıma benzer salınımlar gözlenmektedir. Chang (1985), Shimizu ve Itakura (1989), simetrik olmayan kanal kıvrımlarındaki taban deformasyonları için yaptıkları model çalışmasında, kıvrımın ilk yarısında giderek dış kenarda oyulmanın, iç kenarda da yığılmanın arttığını ve 75° civarında her ikisinin de maksimuma ulaştığını bildirmektedirler.



3.3. Köprü Ayakları Etrafında Meydana Gelen Oyulma

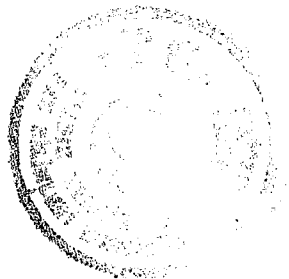
3.3.1. Köprü Ayakları Etrafındaki Yerel Oyulma Olayının Mekanizması ve Dinamik Dengenin Oluşması

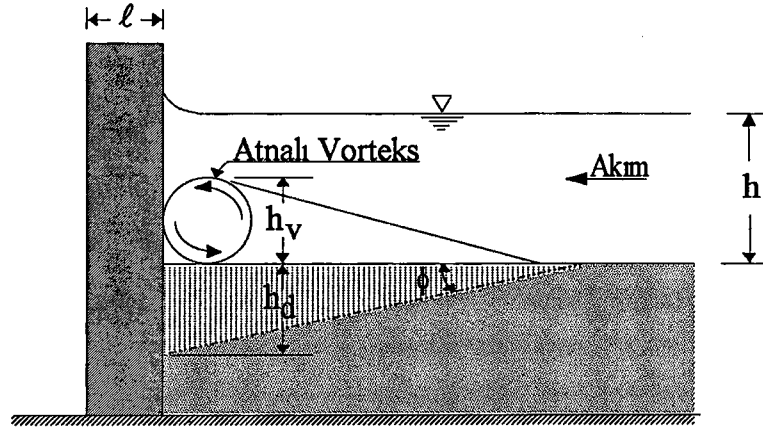
Köprü ayakları etrafındaki yerel oyulma olayı, buradaki akımın ve katı madde hareketinin birlikte etkisiyle oluşur. Kwan ve Melville (1994), kenar ayaklardaki oyulma derinlikleri ile ilgili çalışmalarında engelden dolayı akım hızının, ayağın mansabına geçerken, kenar ayağın memba köşesinde maksimuma ulaştığını ve denge durumunda da, maksimum denge oyulma derinliğinin, burada oluştuğunu bildirmektedirler. Öte yandan, tabanda sürüntü hareketi olmadığı durumda bile, ayak etrafında oyulma meydana gelmektedir. Bunun nedeni, ayaktan dolayı meydana gelen türbülans ve vortekslerdir. Çünkü, ayak etrafındaki taban kayma gerilmesini etkileyen bu olaylar zinciri akarsu tabanında oyulmaya neden olur, (Üç, 1981, 1988).

Dargahi (1990) tarafından yapılan çalışmaya göre, ayağın membanda oluşan bu vorteksler ve sekonder hareketlerden dolayı, kanal tabanında dengede bulunan danelerin tabandan fırlaması ve etraflarındaki yerel basıncın azalması sonucunda, katı madde dönerek mansaba doğru taşınmaktadır.

Görüldüğü gibi, kanala yerleştirilen köprü ayakları, gerek akım karakteristiklerinde meydana getirdiği değişikliklerden ve gerekse hareketli tabanlı kanalda bulunan katı madde hareketi üzerine yaptığı etkilerden dolayı, kanalda oyulma ve yığılmalara sebep olmaktadır.

Breusers et al. (1977)'a göre, akım hızlanarak engeli geçerken, küt burunlu ayakların yanlarında yüksek hızlar meydana gelmektedir. Melville (1997) de, oyulmanın ilk önce burada meydana geldiğini, sonra da bu iki yandaki oyulmanın küt burunlu ayağın önünde birleştiğini göstermiştir. Vittal et al. (1994)'a göre, ayağın akıma dik genişliği; oyulma çukurunu, ayak önünde oluşan aşağı doğru akımı ve atnalı vorteksi gelişimini sağlamaktadır. Atnalı vorteksi de, katı madde danelerinin yerinden sökülerek ayaktan uzaklaştırılma hareketinde oldukça etkilidir.





Şekil 3.7. Ayak Önünde Başlangıç Vorteksinin Oluşumu

Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi ayak etrafında oyulma başlamadan önce, esas vorteks daireseldir. Ayağın membaında kayma gerilmesi, yaklaşım akımındaki kayma gerilmesinin yaklaşık 4 katı olduğu, çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Bu durum, ayağın akıma dik genişliği göz önüne alınmadan, ayak membaında $\frac{u}{u_{kr}} = 0.5$ olduğu zaman, oyulmanın başladığı anlamına gelir. Bu da yine deneysel olarak ispatlanmıştır.. Burada u, esas akım hızını, u_{kr} , esas akımda katı madde hareket başlangıcı için gerekli hızı göstermektedir (Kothyari et al, 1992).

Alüvyal bir akarsuda taşınan katı madde miktarında meydana gelen yersel değişiklik şu şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{dV}{dt} = q_{tb} - q_{ts} \quad (3.3)$$

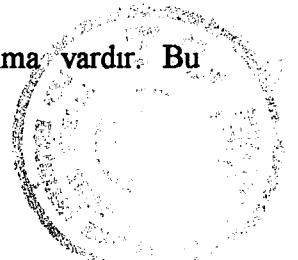
$\frac{dV}{dt}$ Birim zamanda yerel oyulmanın hacminde meydana gelen değişme.

q_{tb} , Birim zamanda akımın kapasitesiyle oyulma çukurundan taşınan malzeme miktarı.

q_{ts} , Birim zamanda engelin membaından gelen malzeme miktarıdır. (3.3) Denklemi incelenirse:

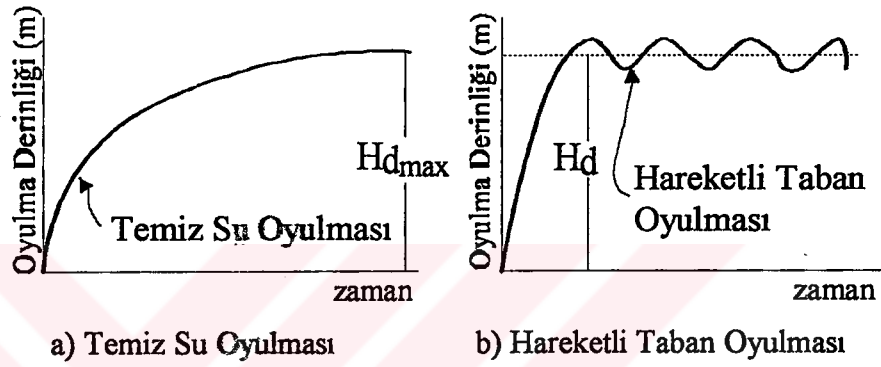
a) $\frac{dV}{dt} = 0$ olursa, yani $q_{tb} = q_{ts}$ ise oyulma yoktur.

b) $q_{tb} \gg q_{ts} \approx 0$ ise, akarsu tabanında sürüntü hareketi yokken oyulma vardır. Bu oyulmaya "temiz su oyulması" adı verilir.



c) $q_{tb} \geq q_{ts} > 0$ ise, akarsu tabanında hem sürüntü hareketi ve hem de oyulma vardır. Bu oyulma türüne de "hareketli taban oyulması" denmektedir.

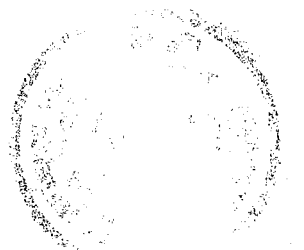
Şekil 3.8.'de gösterildiği gibi, oyulma derinliğinin değişimi zamanla karakterize edilir. Ayrıca, hareketli taban oyulmasının karakteristiklerinden birisi de, oyulma derinliğinin denge oyulma derinliği etrafında salınımlar yapmasıdır, (Tsujiimoto ve Mizukami, 1986).



Şekil 3.8. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi

Shen et al. (1969) yaptıkları çalışmada, hareketli taban oyulması durumundaki denge oyulma derinliğinin, temiz su oyulması durumundaki maksimum oyulma derinliğinden yaklaşık %10 daha az olduğunu belirtmektedirler, (Raudkivi, 1986).

Melville (1984) ile Breusers ve Raudkivi (1991)'nin yaptıkları çalışmaya göre, temiz su oyulmasında; yaklaşım akımıyla oyulma çukurundan kısa zamanda taban malzemesi taşınabildiğinden, denge oyulma derinliği asimtotik olarak meydana gelir. Baker (1980), temiz su oyulması durumunda; denge oyulması derinliğinin, oyulma çukuru üzerindeki kayma gerilmelerinin, malzemenin hareketi için gerekli olan değerden aşağı düşmesiyle meydana geldiğini belirtmektedir. Hareketli taban oyulmasında ise, belirli bir zaman diliminde ortalama malzeme miktarı, oyulma çukurundan taşınan ortalama malzeme miktarına eşit olduğu zaman denge oyulma derinliğine ulaşılır ve bundan sonra da, yerel oyulma derinliği, denge oyulma derinliği civarında periyodik olarak değişir.

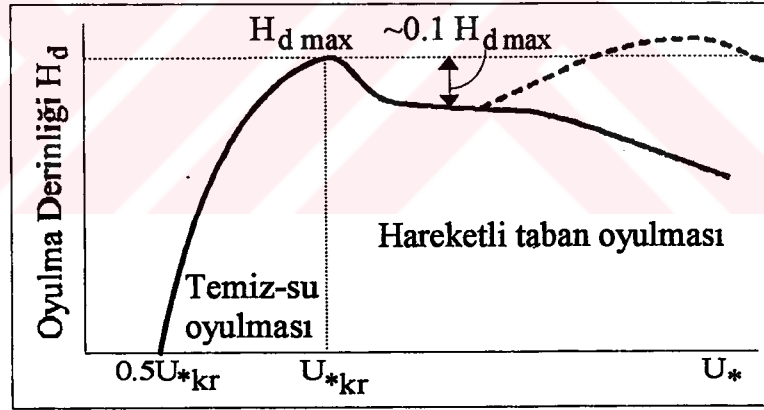


3.3.2. Oyulmaya Etkili Parametreler

Genel olarak, alüvyal tabanlı akarsulardaki oyulma olayına, taban malzemesi gronölometrisinin, akım derinliğinin, akım hızının, ayak şeklinin, ayağın akıma dik genişliğinin ve atak açısının etkili olduğu bilindiği halde, araştırmacılar kendilerine göre etkili bulduklarını, deneysel çalışmalarda dikkate alıp, diğer parametreleri sabit kabul etmektedirler, (Yanmaz ve Altınbilek, 1991). Ancak, bu çalışmada da kabul edildiği gibi, akım hızının, ayak şeklinin, ayağın akıma dik genişliğinin ve atak açısının, olayda etkili önemli parametreler oldukları tüm araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir.

3.3.2.1. Akım Hızının Oyulmaya Etkisi

Yaklaşım akım hızının oyulma olayına etkisi tüm araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir. Şekil 3.9.'da, Raudkivi ve Ettema (1985) tarafından, oyulma çukurunun gelişimi, kayma hızının veya yaklaşım hızının fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kayma Hızının veya Yaklaşım Hızının Fonksiyonu Olarak, Yerel Oyulma Derinliğinin Değişimi,

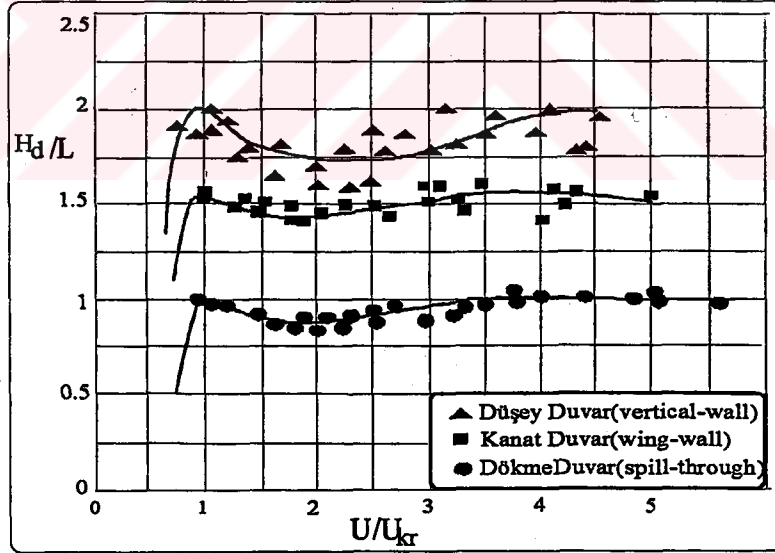
Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi oyulma olayı, hızın belli bir değerinde başlamakta ve giderek büyümektedir. Oyulma olayına etki eden hız değeri, adım adım incelenirse, şunları söylemek mümkündür.

- $\bar{U}/\bar{U}_{kr} \leq 0.5$ ise, oyulma yoktur.
- $0.5 \leq \bar{U}/\bar{U}_{kr} \leq 1.0$ ise, temiz su oyulması vardır. Bu aralıkta oyulma derinliğinin, $\bar{U}$ ile yaklaşık lineer artış gösterdiği söylenebilir.

c) $\bar{U}/\bar{U}_{kr} \geq 1.0$ ise, hareketli taban oyulması vardır. Bu bölgede ise, oyulma derinliği hızla birlikte artmaz. Çünkü, burada dinamik denge olayı gerçekleşmektedir.

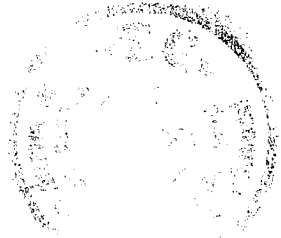
Raudkivi ve Ettema (1983,1985), Raudkivi (1986) ve Breusers ve Raudkivi (1991), Şekil 3.9.'da kesik kesik çizgiyle gösterildiği gibi, maksimum oyulma derinliğinde ikinci bir pikin oluştuğunu tesbit etmişlerdir. Oyulma derinliği ve akım hızı arasındaki ilişki, meydana gelen oyulma tipine bağlıdır.

Melville (1997) yaptığı çalışmada, Dongol (1994)'ün, hareketli taban durumunda, akım hızının kenar ayaklar etrafındaki oyulmaya etkisini araştırmak için, hem üniform ve hemde üniform olmayan taban malzemesi kullanarak, bir seri deney yaptığını ve elde ettiği sonuçların, Chiew (1984) ve Baker (1986)'nın yaptıkları çalışmaların sonuçlarını desteklediğini belirtmektedir. Temiz su oyulması halinde, maksimum oyulma derinliği, U_{*kr} 'te meydana gelir. Buna başlangıç piki denir. Üniform taban malzemeli hareketli taban halinde ise, rölatif oyulma derinliği, Şekil 3.10.'de görüldüğü gibi, başlangıçta artan hızla, bir miktar azalır. Daha sonra tekrar ikinci pike doğru artar.



Şekil 3.10. Akım Hızının Köprü Kenar Ayakları Etrafındaki Oyulmaya Etkisi

Şekildeki, H_d , denge oyulma derinliği; L , Kenar ayağın genişliği; U , Yaklaşım hızı ve U_{kr} , taban hareketi için gerekli hızdır.



3.3.2.2. Ayak Genişliğinin Oyulmaya Etkisi

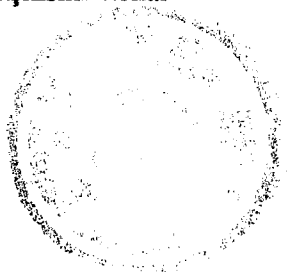
Ayak genişliğinin oyulmaya etkisi hakkında araştırmacıların ortak görüşü, ayağın akıma dik genişliği ne kadar büyük olursa, oyulma derinliğinin de, o kadar büyük olacağı şeklindedir. Oyulma derinliğinin (H_d), ayağın akıma dik genişliğinin (D) bir fonksiyonu olduğu düşüncesiyle, bir çok araştırmacının elde ettikleri bağıntılar, aşağıdaki gibidir, (Yüksel, 1987).

- | | |
|-------------|---|
| 1) Üç | $H_d=0.61 D^{0.766}$ |
| 2) Yüksel | $H_d=0.61 D^{0.769}$ |
| 3) Başak | $H_d=0.558 D^{0.586}$ (Dikdörtgen kesitli ayaklar için) |
| 4) Başak | $H_d=0.446 D^{0.586}$ |
| 5) Shen | $H_d= D^{0.619}$ |
| 6) Breusers | $H_d=1.4 D$ |
| 7) Larras | $H_d=1.05 D^{0.75}$ |
| 8) Neill | $H_d=1.5\sim 2.5 D$ |

Kandasamy ve Melville (1989), sığ sularda gerek köprü ayakları ve gerekse köprü kenar ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin, ayağın akıma dik genişliğiyle arttığını ve akımın derinliğine bağlı olmadığını belirtmektedir.

Melville (1997) yaptığı çalışmada, Kandasamy ve Melville (1989)'un tesbitlerine ilaveten, derin akımlarda, atnalı vorteksi gücünün ve ayağın membaındaki akımın aşağı yöndeki bileşeninin veya kenar ayaktaki benzer akım bileşenlerinin, ayağın akıma dik genişliğiyle bağıntılı olduğunu, bu sebeple de oyulma derinliğinin, ayağın veya kenar ayağın akıma dik genişliğine bağlı olarak gelişmesi gerektiğini belirtmektedir. Uzun kenar ayakların yerleştirildiği sığ sularda ise, oyulma çukuru kenar ayağın memba yüzeyi boyunca uzanamayacağından; kenar ayak uzunluğunun, oyulma derinliğini daha az etkilendiğini, hatta sınırdan bağımsız olduğunu belirtmektedir. Çok uzun ayaklarda ise, oyulma derinliği ayağın herbir ucunda iki çukur olarak gelişir.

Melville (1997), Dongol (1994)'ün, Melville (1992)'nin yaptığı çalışmanın datalarını çoğaltarak yaptığı araştırmada; akım derinliği ile ayak genişliği ilişkisini kenar ayaklar için şu şekilde tesbit ettiğini belirtmektedir.



$$K_{yL} = 2L, \quad \frac{L}{y} \leq 1 \text{ için} \quad (3.4a)$$

$$K_{yL} = 2\sqrt{yL}, \quad 1 < \frac{L}{y} < 25 \text{ için} \quad (3.4b)$$

$$K_{yL} = 10y, \quad \frac{L}{y} \geq 25 \text{ için} \quad (3.4c)$$

Burada, y , yaklaşım akım derinliği; L , kenar ayak genişliği ve K_{yL} , akım derinliğine ve kenar ayak genişliğine bağlı oyulma derinliği katsayısıdır. Bu bağıntılar, sırasıyla kısa, orta ve uzun kenar ayaklar için verilmiştir. $\frac{L}{y} \leq 1$ ise, oyulma derinliği, akım derinliğinden bağımsız ve oyulma olayı derin akımlara yerleştirilen ayaklarınkine benzer. Derin akımlarda, akım derinliğinin oyulmaya etkisinin olmadığı bilinmektedir. $\frac{L}{y} \geq 25$ ise, oyulma derinliği kenar ayağın akıma dik genişliğinden bağımsızdır.

Kandasamy ve Melville (1989)'a göre, uzun bir kenar ayakta yaklaşım akımının bir kısmı, ayağın memba yüzeyine paralel olarak yön değiştirir. Bu kısmın, ayağın önünde aşağı yönlü akımın meydana gelmesinde etkisi yoktur. Bu sebeple, oyulma derinliği, kenar ayak uzunluğuyla orantılı olarak azalır ve sonunda oyulma derinliği, kenar ayak uzunluğundan bağımsız olur.

3.3.2.3. Ayak Şeklinin Oyulmaya Etkisi

Akım içine yerleştirilmiş bir engelin etrafındaki oyulmalara, akım çizgilerindeki eğriliklerin etkili olduğu, tüm araştırmacıların kabul ettiği bir gerçektir. Ayak şeklinin oyulmaya etkisi atak açısının etkisine benzer ve oyulma derinliği hesaplanırken şekil faktörü olarak hesaba katılır. Melville ve Sutherland (1988)'nin yaptıkları çalışmaya göre, dairesel kesitli ayaklar baz alındığında bu değer, farklı kesitli ayaklar için en fazla ~1.40'a kadar çıkabilmektedir.

Yapılan tüm çalışmalarda ayakların, memba yüzey şekillerine göre küt burunlu veya sivri burunlu olarak tasnif edildiğini görmek mümkündür. Küt burunlu ayaklarda, atnalı vorteks yapısı güçlü olmakta ve oyulma ayağın önünde meydana gelmektedir. Buna karşın, sivri burunlu ayaklarda ise, atnalı vorteksin etkisi az olmakta ve maksimum oyulma derinliğinin olduğu nokta, ayağın mansabına doğru kaymaktadır. Üç (1988) ve Melville (1997)'ye göre, sırasıyla Dietz (1972) ve Dongol (1994), yaptıkları deneyler

sonucunda, değişik şekilli orta ve kenar ayaklar için, tesbit ettikleri ayak şekil katsayıları birlikte Tablo 3.1.'de verilmiştir.

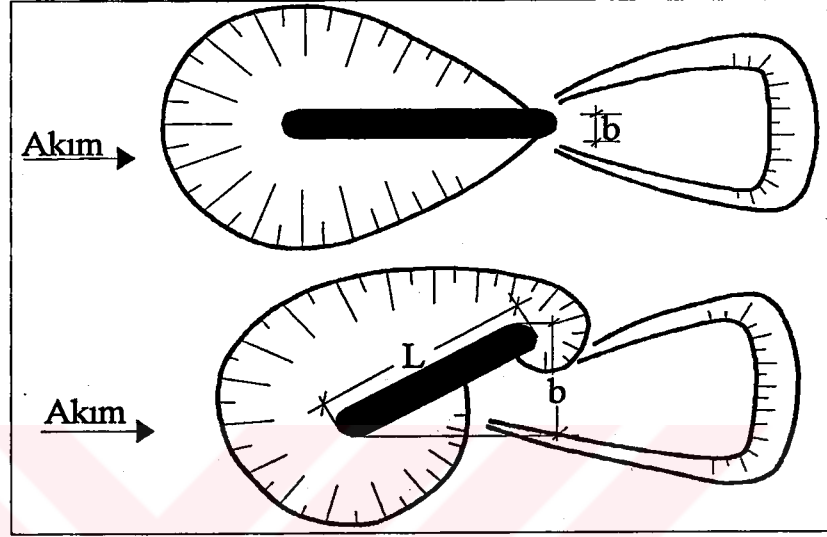
Tablo 3.1. Çeşitli Orta ve Kenar Ayaklar İçin Şekil Katsayıları

Ayak Şekli	Uzunluk/Genişlik (l/b)	Şekil Katsayısı (K_s)	
		Orta Ayak	Kenar Ayak
Dairesel		1.00	
Dikdörtgen	1:1	1.22	
	1:3	1.08	
	1:5	0.99	
Oblonik	1:3	0.90	
Yuvarlak köşeli dikdörtgen	1:4	1.01	
Eliptik	1:2	0.83	
	1:3	0.80	
	1:5	0.61	
Mercek	1:2	0.80	
	1:3	0.70	
Düşey duvar (Vertical-wall)			1.00
Kanatlı duvar (Wing-wall)			0.75
Dökme duvar (Spill-through)			
(H:V)			
0.5:1.0			0.60
1.0:1.0			0.50
1.5:1.0			0.45

3.3.2.4. Ayağın Atak Açısının Oyulmaya Etkisi

Dairesel kesitli ayaklar hariç, tüm ayaklar için yerel oyulma derinlikleri, atak açısından etkilenmektedir. Dairesel kesitli ayaklarda ayağın geometrisinden dolayı, akım çizgilerindeki eğrilik değişmediğinden, oyulma derinliği atak açısından etkilenmez. Oyulma derinliği, ayağın akım eksenine dik genişliğinin bir fonksiyonudur. Akım eksenine belli bir açı ile yerleştirilmiş bir ayağın akıma dik genişliği, gerçek genişliğinden daima daha büyüktür. Atak açısı, oyulma derinliğinin oluşmasına etki eden önemli bir faktördür, (Üç, 1984). Şekil 3.11.'de gösterildiği gibi, atak açısı artarken, maksimum

oyulma derinliğinin oluştuğu nokta ayağın açıkta kalan yanı boyunca arkaya doğru kayar ve burada, ayağın ön tarafına göre daha büyük bir oyulma derinliği oluşur, (Breusers ve Raudkivi, 1991).



Şekil 3.11. Farklı Atak Açılarındaki Oyulma Çukurları

Melville (1992,1997)'ye göre, kenar ayaktaki oyulma derinliği, genellikle atak açısıyla doğru orantılı olarak artar. Büyük oyulma derinlikleri, kenar ayağın membaya doğru yerleştirildiği durumlarda olmaktadır. Maksimum oyulma ise, atak açısı $\theta=90^\circ$ iken meydana gelmektedir. Membaya doğru $\theta=30^\circ$ açıyla yerleştirilen kenar ayak etrafında oluşan oyulma derinliği, mansaba doğru aynı açıyla, yani $\theta=150^\circ$ açıyla yerleştirilen kenar ayak etrafında oluşan oyulma derinliğinden %17 daha fazladır.

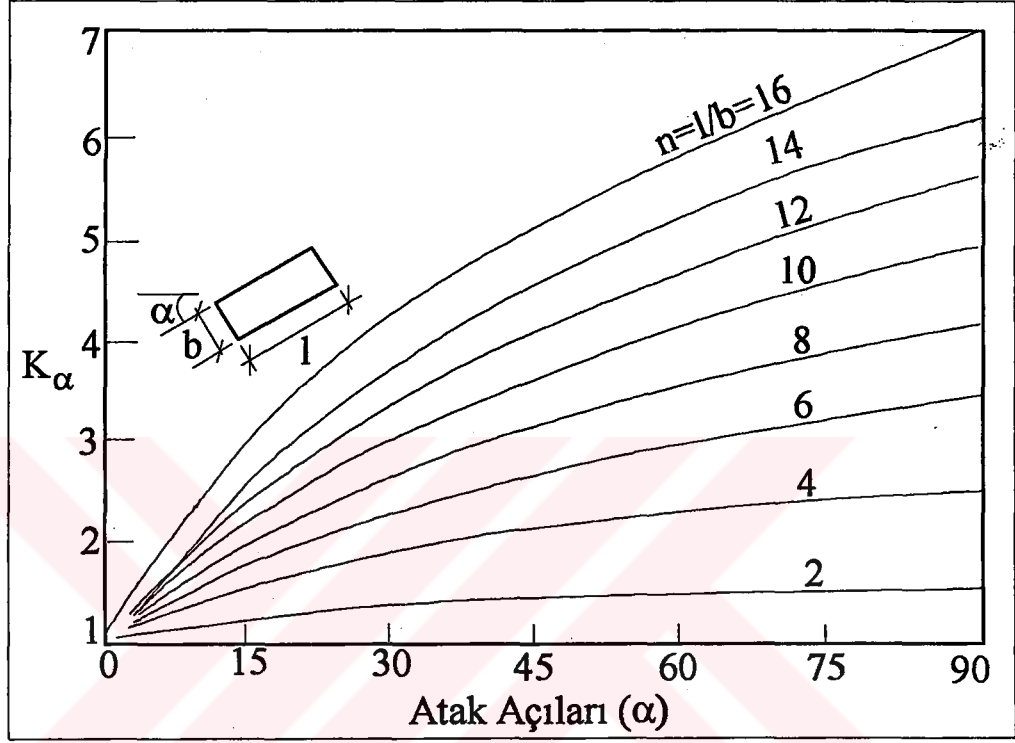
Laursen ve Toch (1956), çeşitli dikdörtgen kesitli ayaklar etrafında $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ arasında değişen atak açıları için K_α katsayılarını veren grafik Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.

Üç (1984), atak açısının (α), oyulmaya etkisiyle ilgili K_α değerini veren (3.5) bağıntısını geliştirmiştir.

$$K_\alpha = \lambda^{\sin \alpha} (1 + \sin \frac{\alpha}{3}) (0.05)^{-\sin \frac{\alpha}{6.6}} \quad (3.5)$$

Burada; α , atak açısı; n, ayak narinlik sayısı ve λ ise, (3.6) bağıntısındaki gibidir.

$$\lambda = \frac{n-1}{\sqrt{n}} - 0.20 \frac{n-1}{n} \quad (3.6)$$



Şekil 3.12. (α) Atak Açılıyla K_α Katsayısının Değişimi

(3.5) bağıntısıyla elde edilen neticelerin, Laursen ve Toch (1956)'nın Şekil 3.12.'de verilen çalışmalarıyla çok iyi bir uyum içinde oldukları görülmektedir.



BÖLÜM IV

4. DENEY ŞARTLARININ TESBİTİ DENEYLERİN YAPILMASI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Çalışmanın Amacı

Daha önceki bölümlerde incelenen teorik çalışmalar ve fikirler yönünde, hareketli tabanlı kıvrımlı bir akarsu yatağına yerleştirilen çeşitli köprü orta ve kenar ayaklarının, akım alanında ve katı madde taşınımında meydana getirdiği değişikliklerin tesbiti için, Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında bu tür olayları incelemek için inşaa edilmiş olan kıvrımlı kanalda, bir seri deney yapılmıştır. Yapılan bu deneylerin esas amacı, kanal kıvrımının iç kenarına, dış kenarına ve akım eksenine, kanal boyunca çeşitli atak açılarında yerleştirilen dikdörtgen ve oblonik ayaklar etrafında oluşan yerel oyulma olayının incelenmesidir.

Deneylerde, sabit genişlikli ve sabit eğrilik yarıçaplı, 0.001 taban eğimli bir kanal kullanılmıştır. Taban malzemesi olarak bütün deneylerde üniform dağılımlı aynı cins malzeme kullanılmıştır.

Kıvrımın mansabından ayrılan malzemeden dolayı membadan aynı tip malzeme ile kanal beslenerek sürekli denge hali muhafaza edilmiştir.

Her deneyde akım şartları sabit tutulmuş, ayrıca her deneyin öncesinde kanal tabanı düzlemleştirilmiş, böylelikle taban şekillerinin ve kanal kıvrımının etkisiyle oluşan, taban şekillerinin başlangıç etkisi önlenerek, deneyler için akım özellikleri, akışkan özellikleri ve katı madde özellikleri tamamen eşit tutulmuştur.

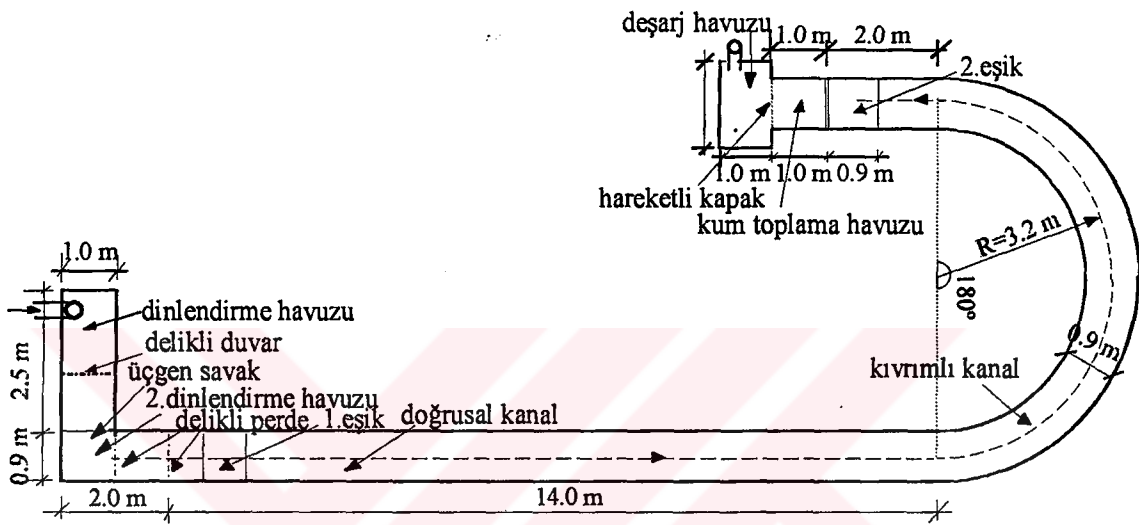
4.2. Deney Kanalının Genel Düzeni

4.2.1. Deney Kanalı

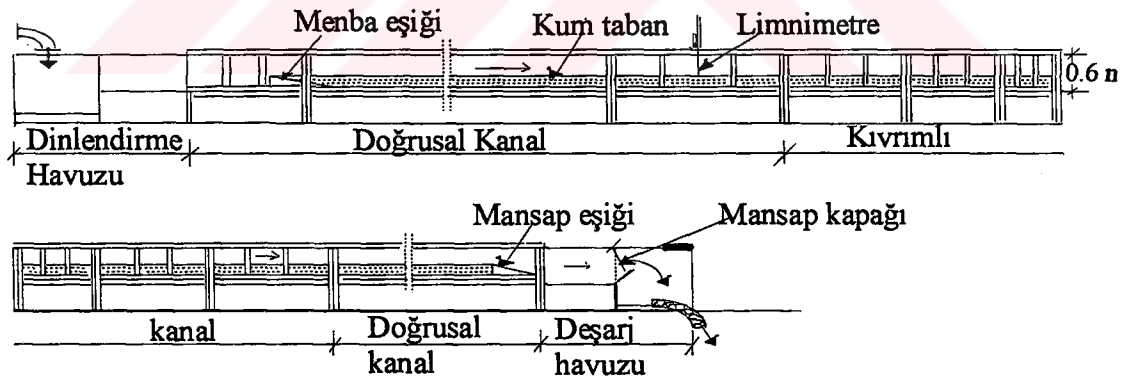
Deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında kurulu bulunan dikdörtgen kesitli kıvrımlı akarsu kanalında yapılmıştır.



Kanal 0.9 m. genişliğinde, 27 m. uzunluğunda ve 0.6 m. yüksekliğindedir. Deney kanalı doğrusal ve kıvrımlı olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Kanalın, 14 m. doğrusal kısmından sonra 180° sabit yarıçaplı 12 m. uzunluğunda kıvrımlı bölümü vardır. Kanal tabanı aliminyumdan, yan duvarları da plegsiglass'dan imal edilmiştir. Kanalın vaziyet planı ve boykesiti Şekil 4.1.'de verilmiştir.



(a) Deney Kanalının Vaziyet Planı

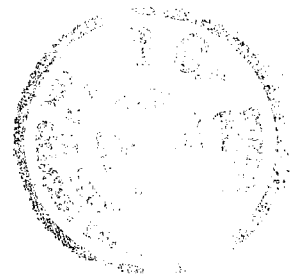


(b) Deney Kanalının Boyuna Kesiti

Şekil 4.1. Deney Kanalının Vaziyet Planı ve Boyuna Kesiti

Deney kanalının detaylı olarak bölümleri ve özellikleri aşağıdaki gibidir.

1) Deney kanalını besleyen dinlendirme havuzu ve üçgen savak:



Dinlendirme havuzu, $2.50 \times 1.00 \text{ m}^2$ boyutunda 0.70 m. yüksekliğindedir. Havuzun ortasına suyun sakinleştirilmesi için üç sıra delikli tuğladan ızgara teşkil edilmiştir.

Havuzun çıkışına ise; üst genişliği 0.9 m. olan bir dik üçgen savak tesis edilmiştir. Savağın tepe noktasının, havuz tabanından yüksekliği 0.24 m. olup, savak akarsu kanalına verilen suyun debisini ölçmekte kullanılmaktadır. Savaktaki su seviyesi, savak üzerine yerleştirilmiş olan limnimetre ile yapılmaktadır.

2) Savaktan sonraki dinlendirme havuzu:

Savaktan geçen su akarsu kanalına verilmek üzere $2.00 \times 0.90 \text{ m}$. boyutundaki ikinci bir dinlendirme havuzunda dinlendirilerek akarsu kanalına verilmektedir. Ayrıca, havuzun ortasına ve mansabına yerleştirilen delikli bir perde ile su sakinleştirilmektedir.

3) Deney Kanalı:

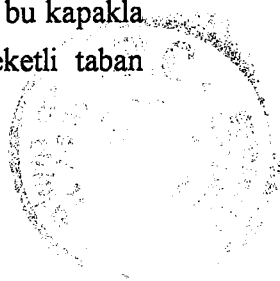
Deney kanalı üç bölümden oluşmaktadır. Baş tarafında, kanala giren suyun taban malzemesini bozmadan akmasını temin etmek için, 0,80 m. uzunluğunda ve 0.20 m. yüksekliğinde bir eşik yerleştirilmiş olan 14 m. uzunluğunda doğrusal bir kısım bulunmaktadır. Ortada, $R=3.20 \text{ m}$. eğrilik yarıçaplı ve 12 m. uzunluğunda 180° lik kıvrımlı kısım mevcuttur. Kıvrımdan sonra da, 2 m. uzunluğunda ikinci bir doğrusal kısım bulunmaktadır. Bu kısmın 1.5 m. mansabına uzunluğu 0.90 m., yüksekliği 0.17 m. olan ikinci bir eşik yerleştirilmiş ve akımdan dolayı taban malzemesinin kayması önlenmiştir.

4) Taban Malzemesinin Yerleştirildiği Bölüm:

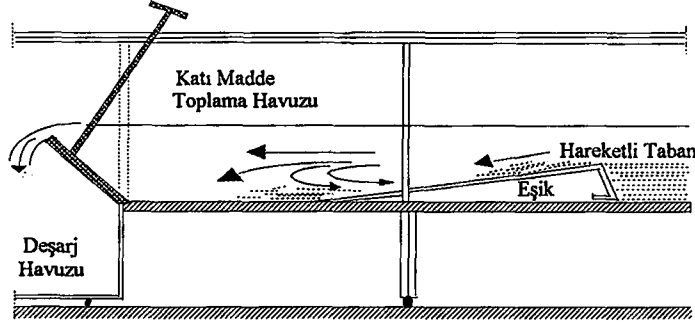
Taban malzemesi, yukarıda belirtilen eşikler arasındaki kanal tabanına yaklaşık 20 m. uzunluğunda ve 0.16 m. yüksekliğinde serilmiştir.

5) Mansap Kapağı:

Kanal Mansabına hareketli bir kapak yapılmıştır. Kanaldaki su seviyesi bu kapakla istenen düzeyde ayarlanabilmektedir. Ayrıca, bu kapağın membaında hareketli taban



seviyesinden 0.17 m. daha düşük kottaki 1.6 m. uzunluğunda kum toplama havuzunda mansap eşiğini geçen katı maddenin toplanması temin edilmiştir.



Şekil 4.2. Katı Maddenin Toplanması

Böylece bu mansap kapağı sayesinde hem tabii akım sağlanmış, hemde kum toplama havuzunda ters çevriler meydana getirilerek katı maddenin burada toplanması sağlanmıştır, (Şekil 4.2). Her deneyin sonunda buradan toplanan katı madde tekrar kanala geri verilmiştir.

4.2.2. Savak Anahtar Eğrisinin Elde Edilmesi

Kanala giren suyun debisinin bulunmasını sağlayan dik üçgen savağın anahtar eğrisi çeşitli formüllerle elde edilir. Bu çalışmada, şartlarımıza en uygun olan KINDSVATER formülü, kullanılmıştır, (Taner, 1977).

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

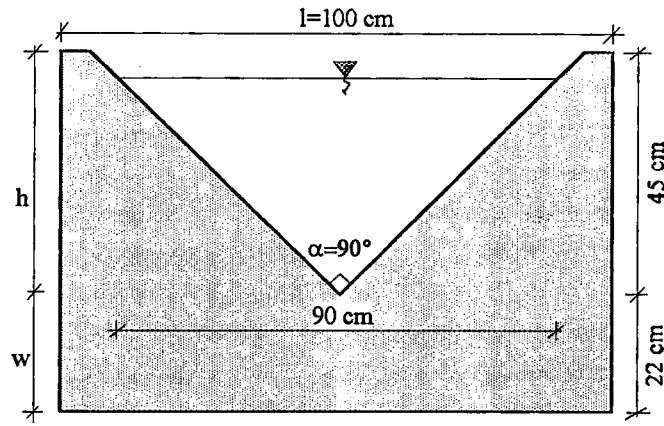
Burada;

Q , Savaklanan debi (m^3 / sn); h , savak yükü; α , üçgen savağın tepe açısı; k_h , $f(\alpha)$ katsayısı ve c_e , $f(\alpha)$ katsayısıdır. KINDSVATER formülü, $h \geq 0.06$ m., $w > 0.10$ m., $20^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$ ve $0.57 \leq c_e \leq 0.60$ için geçerlidir.

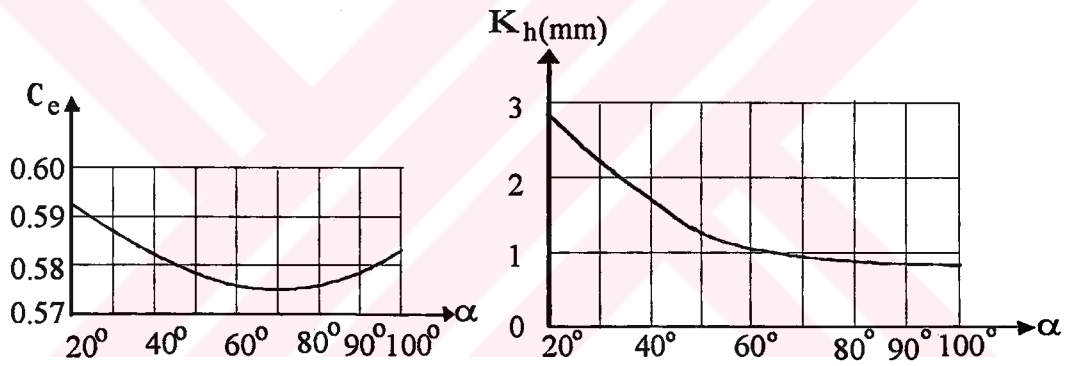
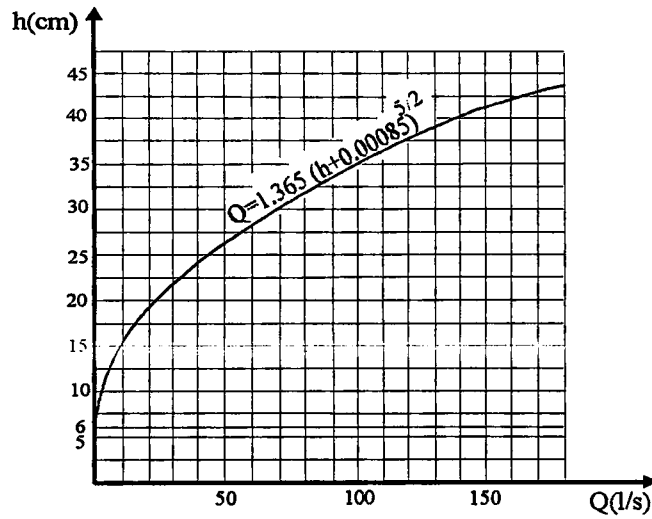
Deney sistemimizde, $l=1.00$ m. ve $w=0.221$ m. dir, (Şekil 4.3). c_e ve k_h katsayılarının savağın tepe açısıyla değişimi Şekil 4.4.'de verilmiştir. Bu değerler, (4.1) bağıntısında yerine konularak (4.2) savak formülü ve Şekil 4.5.'te gösterilen anahtar eğrisi elde edilmiştir.

$$Q=1.365(h+0.0085)^{5/2}$$

(4.2)



Şekil 4.3. İnce Kenarlı Dik Üçgen Savak

Şekil 4.4. c_e ve k_h Katsayılarının α 'ya Göre Değişimi.

Şekil 4.5. Üçgen Savak Anahtar Eğrisi



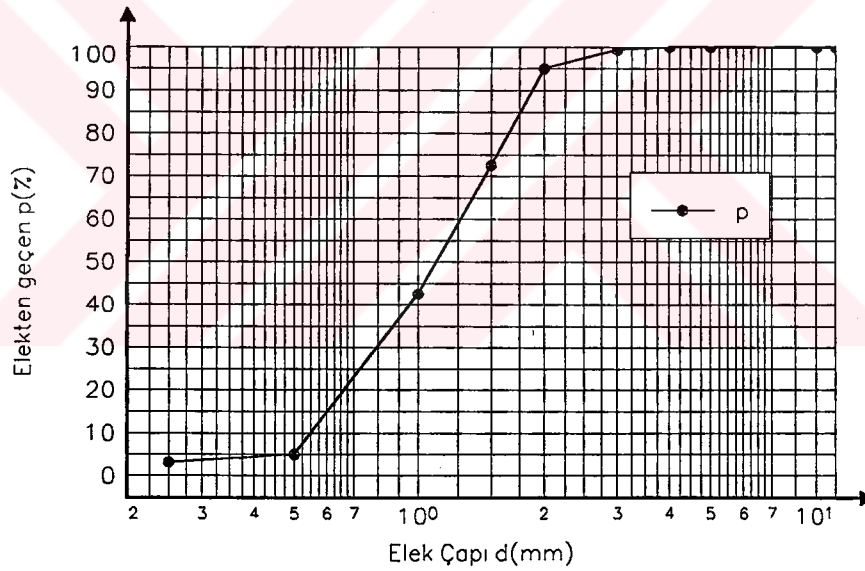
4.3. Deney Öncesi Yapılan Çalışmalar

4.3.1 Deneyde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri

Taban malzemesi olarak kuvars kumu kullanılmıştır. Bu malzemenin özgül ağırlığı ve granülometrisi, deney öncesi belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılan kuvars kumunun özgül ağırlığı, malzeme laboratuvarında yapılan deneylerden $\gamma_s = 26.5 \text{ kN/m}^3$ olarak belirlenmiştir.

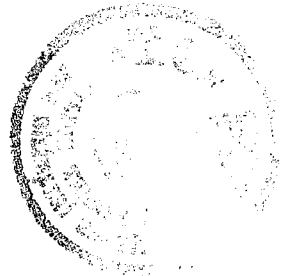
Malzeme laboratuvarında daha önce yapılan elek analizinden bu malzemenin granülometri eğrisi aşağıdaki gibi belirlenmiştir, (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Taban Malzemesinin Granülometri Eğrisi

Deneyde kullanılan kuvars kumunun özellikleri, Şekil 4.6.'daki grafikten, $d_{50} = 1.13 \text{ mm}$, $d_m = d_{60} = 1.28 \text{ mm}$, $d_{90} = 1.86 \text{ mm}$ olarak okunmuştur.

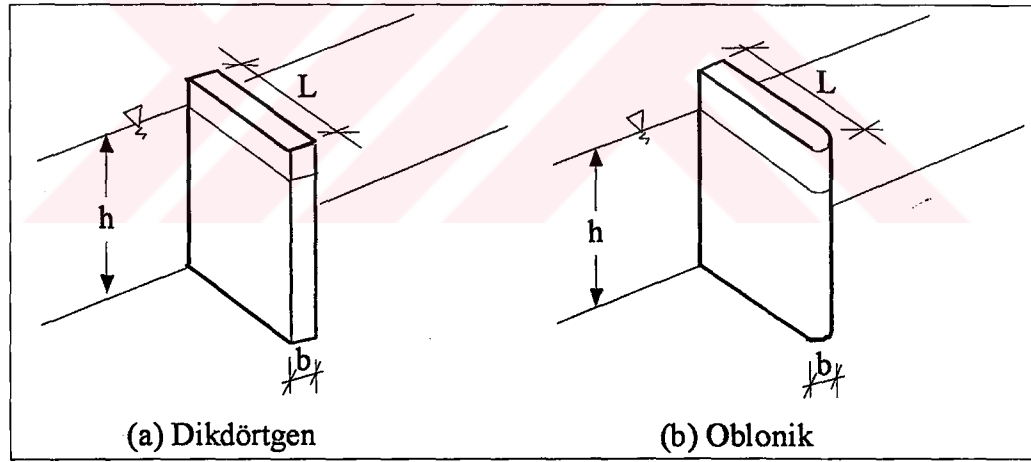
Zırhlama erozyonu ve malzeme yığılması gibi dinamik denge hali için uygun olmayan durumlara sebebiyet verilmemesi için granülometri eğrisinden de görüleceği gibi, yeterince üniform malzeme kullanılmıştır.



4.3.2. Deneyde Kullanılan Köprü Ayağı Modellerinin Seçimi ve Teşkil Edilmesi

1. Deneylerde kare, dikdörtgen ve oblonik kesitli ayaklar kullanılmıştır.
2. Boyutlar cm. cinsinden olmak üzere;
3. Dikdörtgen ayak kesitleri: 5*10, 5*15, 5*20 olarak tesbit edilmiştir.
4. Oblonik ayaklar ise, $r=2.5$ cm. yarıçaplı yarım daire kesitli elemanlarla ve dikdörtgen ayaklar birleştirilerek elde edilmiştir.
5. Kenar ayaklarda 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° lik üçgen kesitli kamalar herbir ayakla birleştirilerek atak açıları oluşturulmuştur.
6. Gerek elemanlar arası, gerekse kanal yan duvarları ile kenar ayaklar arasındaki sızdırmazlık lastik contalarla temin edilmiştir.
7. Deneylerde saç profiller kullanılmış, pürüzlülüğü minimuma indirmek için ayaklar yağlı boya ile boyanmıştır.

Deneylerde kullanılan ayaklar, Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Deneyde Kullanılan Köprü Ayağı Şekilleri

4.3.3. Deneysel Çalışma Programı

1) İlk önce tüm ayak çeşitleri için doğrusal kanalın kenarlarına ve akım eksenine yerleştirilen, köprü orta ve kenar ayakları etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri ve bu derinliklerin çeşitli parametrelere göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca, oyulma derinliklerinin kıvrım etkisinde kalmamaları için deneyler, kıvrımın

3.50 m. membaında gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlarla maksimum denge oyulma derinliğini veren bir bağıntı elde edilmiştir.

2) Kanal eksenini itibariyle 3.2 m. eğrilik yarıçaplı ve 180° merkez açılı kıvrımın, $\theta=0^\circ$ merkez açısından başlayarak her 30° de bir kanal eksenine, dış kenara ve i kenara, 7 değişik boyutlu dikdörtgen ve oblonik ayaklar tek tek yerleştirilerek meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri ölçölmöş ve çeşitli parametrelere göre değişimi araştırılmıştır.

3) Kanalın doğrusal ve kıvrımlı kısmında elde edilen maksimum rölatif oyulma derinlikleri ilişkisi çeşitli yönlerden incelenmiştir.

4) Kıvrımlı kanalın i kenarında, akım ekseninde ve dış kenarında, her 30°de bir enine kesit boyunca maksimum denge oyulma derinliklerinin, çeşitli parametrelere göre değişimi incelenmiştir.

5) Kıvrımda i kenar, kanal eksenini ve dış kenar boyunca meydana gelen oyulma derinliklerinin en büyüğünün yeri ve merkez açısı araştırılmıştır.

6) 180° lik kanal kıvrımında, aynı akım ve aynı taban malzemesi şartları korunarak tabanın topoğrafyası belirlenmiş, kanal kıvrımı taban topoğrafyası ile rölatif oyulma derinliklerinin ilişkisi araştırılmıştır.

Böylece, sonuçların elde edilmesi ve olayın ayrıntılarıyla izahı için, yaklaşık olarak 4200 adet maksimum denge oyulma derinliği ölçölmöş yapılmıştır.

4.3.4. Taban Malzemesi İçin Kritik Hızların Tesbiti

Bütün araştırmacıların ortak görüşü olarak, kanal tabanına yerleştirilen köprü ayağı etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliği için, $\bar{U} = \bar{U}_{kr}$ olduğu bilinmektedir.

Bu çalışmada deneyler hareketli taban şartlarında gerçekleştirileceğinden; araştırmacıların kritik hız için elde ettikleri amprik ifadelerden yararlanılmıştır, (Üç, 1979). Yapılacak deneysel çalışma şartları olan, akım derinliği, $h=10$ cm. ve ortalama dane çapı, $d_{60}=1.28$ mm. için, ortalama kritik hızlar hesaplanmış ve bunların da ortalaması alınarak Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.



Tablo 4.1. Çeşitli Araştırmacılara Göre $h=10$ cm. ve $d_{60}=1.28$ mm.
İçin Kritik Hız Değerleri

Araştırmacı Adı	Kritik Hız (U_{kr})
HANCU	0.344
GONCHAROV	0.434
SHIELDS	0.475
LEVI	0.379
M.PETER	0.620
BOGARDİ	0.510
$\bar{U}_{kr}$ (m/sn)	0.460
Deney sonucu U_{kr} (m/s)	0.455
Q_{ort} (lt/sn)	41

Tablo 4.1.'de görüldüğü gibi, kanaldaki akımın ortalama kritik hızı, 0.46 m/sn civarındadır. Bu hız göz önüne alınarak kanaldaki yaklaşım hızı akım derinliği ve geçirilecek debi bir seri deney sonucu tesbit edilmiştir. Bu deneylerin sonucunda ortalama akım hızı 0.455 m/sn akım derinliği de 10 cm. olarak bulunmuştur.

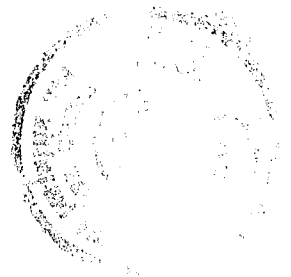
4.4. Oyulmaya Etki Eden Parametrelerin Tesbiti ve Boyut analizi

Hareketli tabanlı kararlı ve üniform olarak kabul edilen bir kıvrımlı akarsu kanalına yerleştirilen köprü ayağı ve köprü kenar ayağı etrafında meydana gelen oyulmaya etkiyen pekçok parametre vardır. Bu parametreleri Tablo 4.2'deki gibi gruplandırmak mümkündür.

Tablo 4.2'de görüldüğü gibi, kanal kıvrımındaki oyulma olayına etkili parametreler oldukça fazladır. Üstelik deneyde kullanılan malzemenin şekli ve kohezyonu gibi bazı karakteristiklerin tesbitinde güçlükler vardır.

Bu yüzden hemen işin başında aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- 1)- Taban malzemesi kohezyonsuz ve homojen dağılıma sahiptir.
- 2)- Akım yönünde taban kayma gerilmesi,

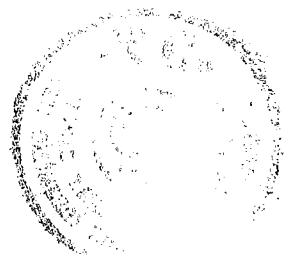


$$\tau = \frac{u_*^2}{\rho_w} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edildiği için kayma hızı (u_*), kayma gerilmesi (τ) yerine kullanılabilir.

Tablo 4.2. Oyulmaya Etki Eden Parametreler

	Parametre Adı	Sembol	Birim	Boyut
1-	Akışkanı karakterize eden parametreler			
a)	Akışkanın özgül kütlesi	ρ	$\frac{kg}{m^3}$	ML^{-3}
b)	Akışkanın kinematik viskozitesi	ν	$\frac{m^2}{s}$	L^2T^{-1}
c)	Yerçekim ivmesi	g	$\frac{m}{s^2}$	LT^{-2}
2-	Akım olayını karakterize eden parametreler			
a)	Akımın yaklaşım hızı	U	$\frac{m}{s}$	LT^{-1}
b)	Akımın derinliği	h	m	L
c)	Akımın taban kayma gerilmesi	τ	$\frac{kg}{m^2}$	ML^{-2}
3-	Akarsu kanalı taban malzemesini karakterize eden parametreler			
a)	Taban malzemesinin şekli	α_{ds}	-	-
b)	Taban malzemesinin özgül kütlesi	ρ_s	$\frac{kg}{m^3}$	ML^{-3}
c)	Taban malzemesinin granülometrisi	d	m	L
d)	Taban malzemesinin kohezyonu	c	-	-
4-	Kıvrımlı akarsu kanalını karakterize eden parametreler			
a)	Kanal kıvrımının taban genişliği	B	m	L
b)	Kanal kıvrımının merkez açısı	θ	-	-
c)	Kanal kıvrımının eğrilik yarıçapı	R	m	L
d)	Kanalın taban eğimi	J	-	-
5-	Köprü ayağını karakterize eden parametreler			
a)	Ayağın kıvrım merkezine olan uzaklığı	r	m	L
b)	Ayağın şekli	α_s	-	-
c)	Ayağın akım eksenine dik genişliği	D	m	L
d)	Ayağın yüzey şartları	α_v	-	-



3)- Köprü ayağı dikdörtgen ve oblonik kesitli olup yüzeylerinin pürüzlülüğü ihmal edilmiştir. Ayaklar, et kalınlığı 1mm. olan saçtan imal edilmiştir. Çelik macun çekilip zımparalandıktan sonra yağlı boya ile boyanarak cilalı konuma getirilmiştir.

4)- Deney esnasında akım üniform kabul edildiğinden taban eğimi, enerji çizgisi eğimi ve su yüzü eğimi birbirine eşittir, ($J_o = J = J_e$). Açık kanallar için, Strickler denklemi $u = kR^{2/3} J^{1/2}$ göz önüne alınırsa, burada; $k = \frac{1}{n}$ olduğundan; pürüzlülük, dane çapının (d), bir fonksiyonudur. Ayrıca u, h ve J birbirine bağlıdır. Dolayısıyla u ve h incelendiğinden J'nin göz önüne alınmasına gerek yoktur.

5)- Akımın içerisine yerleştirilen köprü ayağının etrafındaki gerek hız ve gerekse basınç dağılımının potansiyel akım teorisine uyduğu kabul edilebilir. Bu sebeple ayak etrafındaki daraltılmış kesitteki hız u_* ,

$$U_* = U \left(1 - \frac{y^2}{B^2}\right) \quad (4.4)$$

şeklinde elde edilebilir. Buradan, daraltılmış kesitin kanal cidarından olan uzaklığı y,

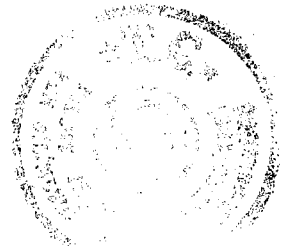
$$y \leq B \sqrt{\frac{U_*}{U} - 1} \quad (4.5)$$

şeklinde elde edilebilir. Kanaldaki akımın hızının %4 ten daha fazla değişmeme esasından hareketle ($U_*/U=1.04$) kanal cidarına en fazla 0.18 m yaklaşabilmek kaydıyla kanal genişliği ihmal edilebilir, (Yüksel, 1987).

Bu çalışmada, hareketli taban oyulması dikkate alındığından kısa zamanda dinamik denge olayının gerçekleşeceği düşünüülerek, zaman minimum 30 dakika olarak alınmıştır. Dolayısıyla oyulmanın zamanla değişimi ihmal edilebilir.

Yukarıdaki kabullerden hareketle maksimum oyulma derinliği H_{dmax} , şu parametrelere bağımlı olarak yazılabilir.

$$H_{dmax} = f_1(R, \theta, r, \alpha_s, D, \alpha, \rho, \nu, g, \Delta, d, h, \bar{u}, u_*) \quad (4.6)$$



Yapılan deneysel çalışmada, oyulma olayına etkili parametrelerin sayısını azaltmak ve deneysel bağıntıların teşkili için $\bar{u}$, D ve ρ parametrelerini tekrarlanan değişkenler olarak göz önüne alıp π teoremi uygulanırsa (4.7) bağıntısı elde edilir.

$$\frac{H_{d\max}}{D} = f_2\left(\frac{R}{D}, \theta, \frac{r}{D}, \alpha_s, \alpha, \frac{\nu}{D\bar{u}}, \frac{Dg}{\bar{u}^2}, \Delta, \frac{d}{D}, \frac{h}{D}, \frac{u_*}{\bar{u}}\right) \quad (4.7)$$

Δ , Rölatif batmış yoğunluğu, d , taban malzemesinin çapı; R , kıvrımın eğrilik yarıçapı; ρ , akışkanın özgül kütlesi; ν , akışkanın kinematik viskozitesi; g , yerçekim ivmesi; h , su derinliği ve $\bar{u}$, ortalama akım hızı sabit alındığından bunlarla ilgili boyutsuz büyüklükler ihmal edilirse; geriye θ, α, α_s ve r parametreleri kalır. α_s , şekil faktörü de atak açısının bir fonksiyonu olduğundan ihmal edilebilir. Yapılan deneysel çalışmada da gerek doğrusal kanalda gerekse kıvrımlı kanalda maksimum denge oyulma derinliklerinin kıvrımın merkez açısı, atak açısı ve ölçüm yapılan ayağın kanalın merkezinden uzaklığı göz önüne alındığından sonuç fonksiyonel bağıntı,

$$\frac{H_{d\max}}{D} = f_3(\theta, \alpha, r) \quad (4.8)$$

şeklinde ifade edilebilir.

4.5. Yerel Oyulma Deneylerinin Yapılması ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Deney kanalının kıvrımına yerleştirilen köprü kenar ve orta ayaklarının etrafında oluşan maksimum denge oyulma derinliklerinin kıvrımın, çeşitli merkez açılarındaki kesitler üzerindeki iç kenar, dış kenar ve akım eksenı boyunca değişiminin doğrusal kanala yerleştirilen aynı boyutlu köprü orta ve kenar ayaklarındaki oyulmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmesi için deneyler iki aşamada yapılmıştır.

Birinci aşamada kanalın doğrusal kısmında kanalın kenarına ve akım eksenine yerleştirilen köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmalar araştırılmıştır.

İkinci aşamada ise, kanal kıvrımının girişinden itibaren 180° lik kanal kıvrımı boyunca kıvrımın dış kenarı, iç kenarı ve akım ekseninde 0° den başlayarak her 30° de bir kanal enkesitlerine yerleştirilen ayaklar etrafındaki yerel oyulmalar araştırılmıştır.



Ayrıca, kanalın kıvrımlı kesitinde ayaklar etrafında meydana gelen yerel oyulmalarla, kıvrım taban taban topoğrafyası arasındaki ilişkinin araştırılması amacıyla; sadece akım etkisiyle meydana gelen kıvrım taban topoğrafyası çıkarılmıştır.

4.5.1. Doğrusal Kanalda Yerel Oyulma Olayının İncelenmesi ve Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kanal kıvrımının membaındaki doğrusal kısımda kıvrımdan dolayı deneylerin etkilenmemesi için kıvrım girişinin 3.5 m. membaında kanalın kenarına ve eksenine deneyde kullanılan ayaklar tek tek çeşitli atak açılarında yerleştirilerek ayaklar etrafında oluşan maksimum denge oyulma derinlikleri ölçülmüş ve oyulma çukurunun şekli ve yeri gözlenmiştir.

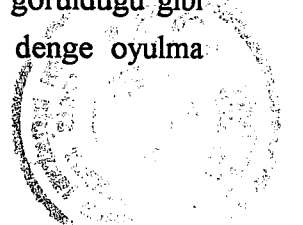
Yapılan deneylerde, hareketli taban oyulması hali göz önüne alınmıştır. Bu sebeple her bir deney süresi ortalama minimum 30 dakika ile sınırlandırılmıştır. Deneylerin hareketli taban halinde yapılmasının sebebi, temiz su oyulması durumunda maksimum denge oyulması haline ulaşabilmek için çok uzun zaman gerekirken buna karşılık hareketli taban oyulması durumunda maksimum denge oyulması haline daha kısa sürede ulaşılabilmesidir. Hareketli taban oyulması hali ise kanalın çıkışında bulunan hareketli savakla ayarlanmaya çalışılmıştır.

Böylece üç farklı boyutlu dikdörtgen kesitli ve dört farklı boyutlu oblonik kesitli ayaklar kullanılarak yerel oyulma derinlikleri tesbit edilmiştir. Her bir ayak tipi için yapılan ölçümler arasında uyum sağlanıncaya kadar deneyler tekrarlanmıştır.

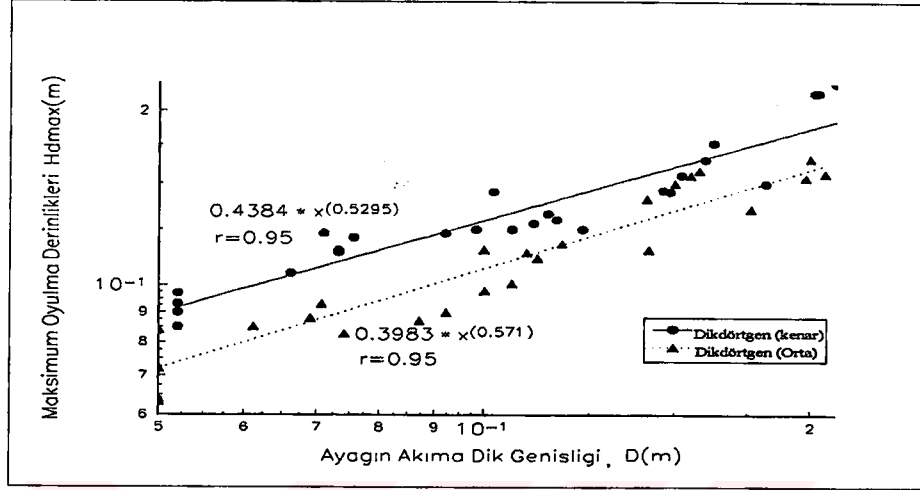
4.5.1.1. Doğrusal Kanalda Ayağın Akıma Dik Genişliğinin Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi

Maksimum denge oyulma derinliklerinin köprü ayağının akıma dik genişliğinin bir fonksiyonu olduğu araştırmacılar tarafından daha önceden tesbit edilmiştir, Yüksel (1979).

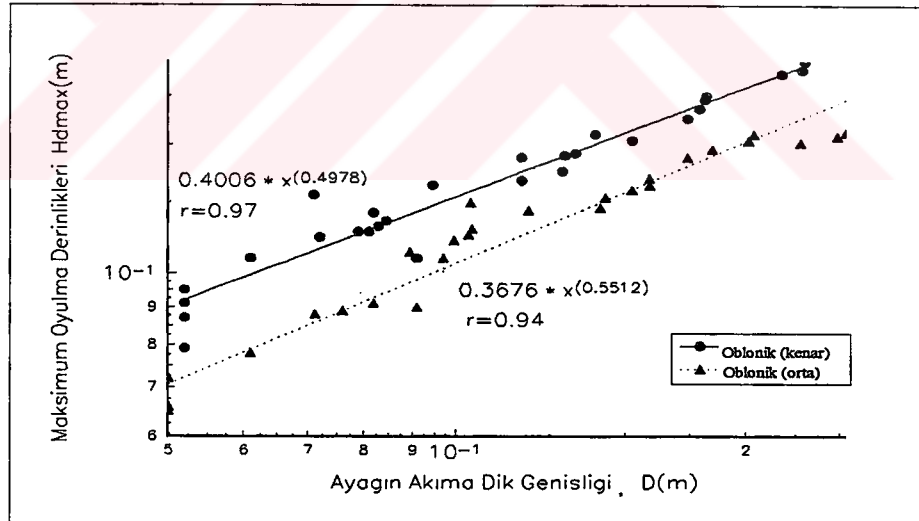
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yerel oyulma derinliklerini değerlendirmek amacıyla maksimum denge oyulma derinlikleri ile ayağın akıma dik genişliği arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun için Şekil 4.8. ve 4.9.'da görüldüğü gibi dikdörtgen ve oblonik ayakların etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma



derinliği değerleri doğrusal kanal kenarında ve akım ekseninde yapılan deneylerden elde edilmiş ve tam logaritmik forma işlenmiştir.



Şekil 4.8. Doğrusal Kanalda Tüm Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Denge Oyulma Derinlikleri ile Ayagın Akıma Dik Genişliği Arasındaki İlişki



Şekil 4.9. Doğrusal Kanalda Tüm Oblonk Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Denge Oyulma Derinlikleri ile Ayagın Akıma Dik Genişliği Arasındaki İlişki

Şekil 4.8. ve 4.9.'da görüldüğü gibi gerek dikdörtgen ve gerekse oblonk kesitler için maksimum denge oyulma derinlikleri logaritmik doğru civarında yoğunlaşmaktadır. Bu da, maksimum denge oyulma derinlikleri ile köprü ayaklarının akıma dik genişlikleri arasında eksponensiyel bir ilişkinin varlığını göstermektedir.

Kanal kenarına ve akım eksenine yerleştirilen ayakların etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliği ile ayağın akıma dik genişliği arasındaki ilişki dikdörtgen kesitler için (4.9), ve (4.10) denklemleriyle, oblonik kesitler için ise, (4.11) ve (4.12) denklemleriyle aşağıda verilmiştir.

Dikdörtgen kesitli ayaklar için:

Akım ekseninde:

$$Hd_{max,d(akımeks)} = 0.3983 * D^{0.571} \quad (4.9)$$

Kenarlarda:

$$Hd_{max,d(kenar)} = 0.4384 * D^{0.5295} \quad (4.10)$$

Oblonik kesitli ayaklar için:

Akım ekseninde:

$$Hd_{max,o(ortaeks)} = 0.3676 * D^{0.5512} \quad (4.11)$$

Kenar Eksende:

$$Hd_{max,o} = 0.4006 * D^{0.4978} \quad (4.12)$$

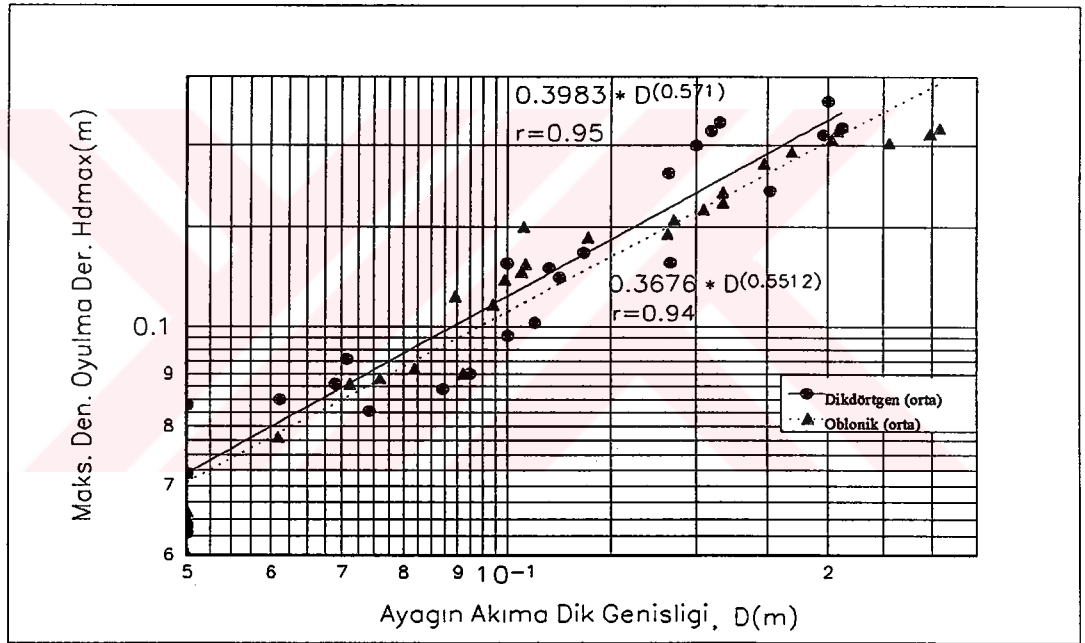
Maksimum denge oyulma derinlikleri-ayağın akıma dik genişliği ilişkisini veren eğri denklemleri ve korelasyon katsayıları Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Deney Sonuçlarına Göre Elde Edilen Maksimum Denge Oyulma Derinliği Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları

	Dikdörtgen Ayaklar		Oblonik Ayaklar	
	Kenarlarda	Akım Ekseni	Kenarlarda	Akım Ekseni
Korelasyon Katsayısı (r)	0.95	0.95	0.97	0.94
Maksimum. Denge Oyulma Derinliği İfadeleri (Hdmax (m))	$0.4384D^{0.5295}$	$0.3983D^{0.571}$	$0.4006D^{0.4978}$	$0.3676D^{0.5512}$

Tablo 4.3.'de görüldüğü gibi gerek dış kenarda gerek akım ekseninde maksimum denge oyulma derinliği ile ayak modellerinin akıma dik genişlikleri arasındaki korelasyon katsayıları dikdörtgen kesitli ve oblonik kesitli ayakların her ikisi için de $r \approx 1.00$ civarındadır. Korelasyon katsayısının 1.00'e yakın olması, ayağın akıma dik genişliği ile maksimum oyulma derinliği ilişkisinin çok iyi olduğunu göstermektedir.

Bu konuda yapılmış çalışmalar daha çok doğrusal kanal akım ekseninde yapıldığından dikdörtgen ve oblonik ayaklar için akım ekseninde ölçülen maksimum denge oyulma derinlikleri ile ayakların akım eksenine dik genişlikleri arasındaki ilişki, Şekil 4.10.'da çift logaritmik form üzerinde gösterilmiştir.

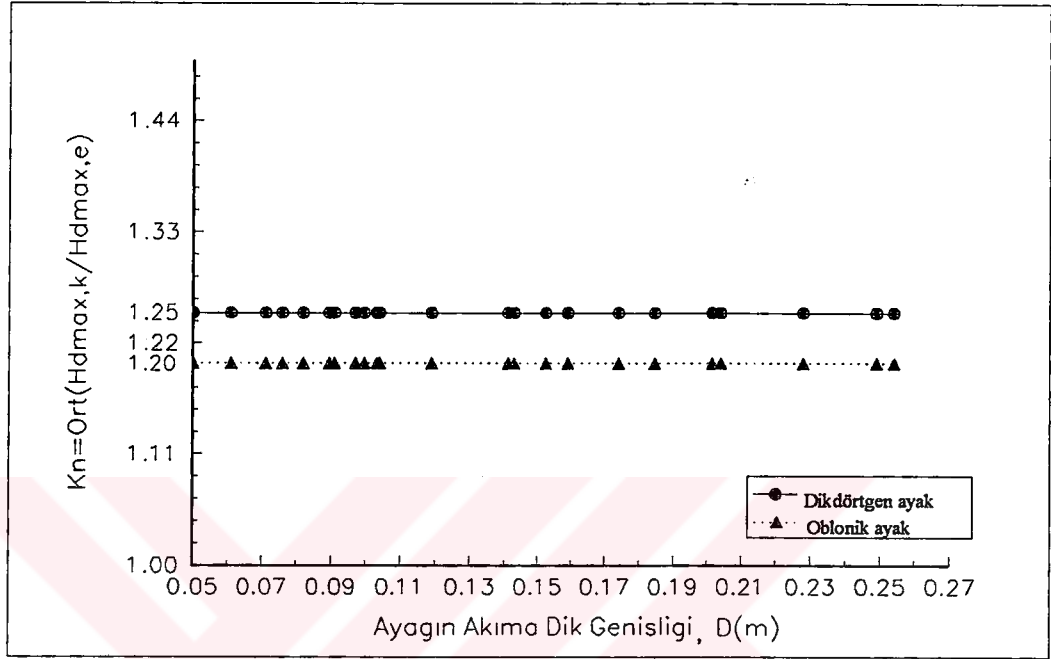


Şekil 4.10. Doğrusal Kanalda Tüm Ayak Tipleri İçin Akım Ekseninde Maksimum Denge Oyulma Derinlikleri-Ayağın Akıma Dik Genişliği İlişkisi

Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi, akım ekseninde dikdörtgen kesitli ayaklara göre, aynı dik genişlikli oblonik kesitli ayaklarda maksimum denge oyulma derinliği (H_{dmax}) daha küçük çıkmaktadır.

Şekil 4.8. ve 4.9.'da gösterilen dikdörtgen ve oblonik kenar ayaklar için, kenar ayaklarda ölçülen maksimum denge oyulma derinliklerini, akım ekseninde ölçülen maksimum denge oyulma derinliklerine bölerek elde edilen oranların aritmetik ortalaması alınmış, elde edilen oranlarla, kenar ayaklarda meydana gelen rölatif oyulma derinliği

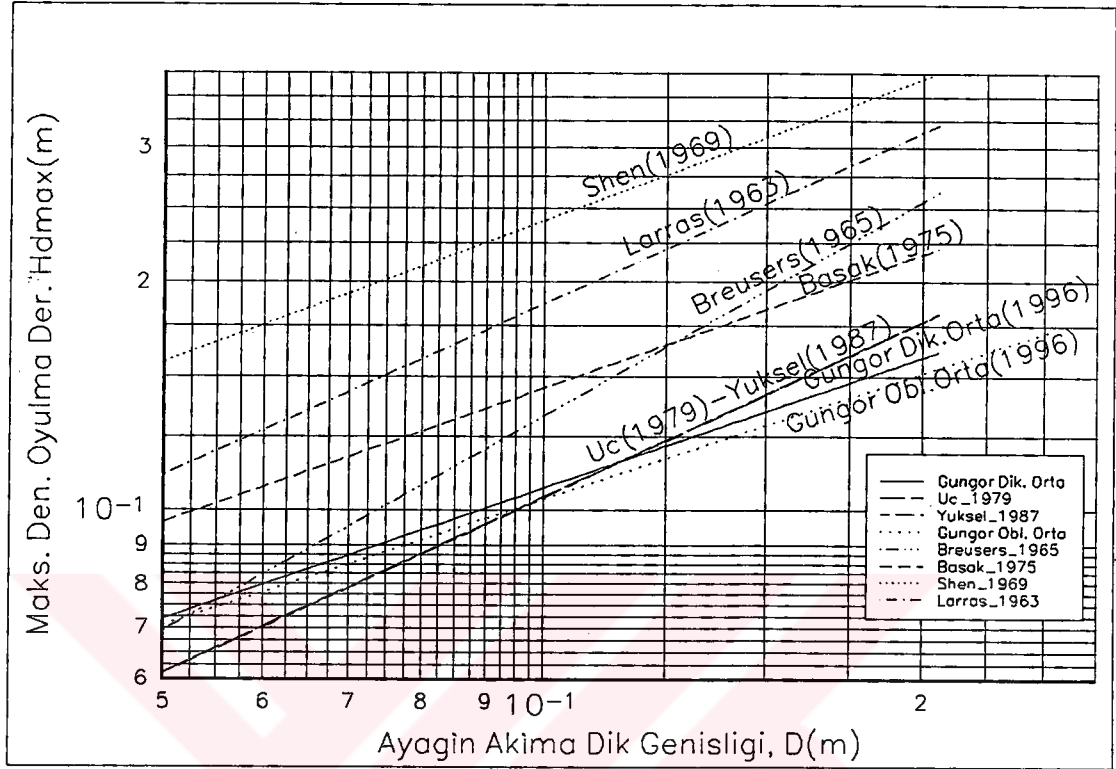
$K_n=(H_{dmax,k}/H_{dmax,e})$ -ayağın akıma dik genişliği (D) ilişkisi Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Doğrusal Kanalda Tüm Ayaklarda Kenar Ayaklardaki Rölatif Oyulma Derinliği İçin Ortalama Çarpım Katsayısı

Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi, ayağın akıma dik genişliği ne olursa olsun kenar eksene yerleştirilen dikdörtgen ayaklar etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliği orta eksene yerleştirilen ayak etrafında oluşan maksimum denge oyulma derinliğinin 1.25 katı olmakta, oblonik kesitli ayaklarda ise bu oran, 1.20 olarak elde edilmektedir. Bu katsayılar pratik yaklaşımlarda kullanılabilir. Şekil 4.11.'de dikdörtgen kesitli ayaklarda rölatif oyulma derinliğinin, aynı dik genişliğe sahip oblonik ayaklara göre ~%5 daha fazla olduğu görülmektedir.

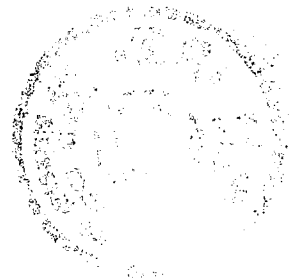
Yapılan deney sonuçlarıyla daha önceki çalışmaların bir karşılaştırması Şekil 4.12.'de gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın özellikle Üç (1979) ve Yüksel (1987)'nin elde ettiği eğri ile oldukça uyum sağladığı görülmüştür. Breusers'in çalışmasıyla da benzerlik gözlenmiştir. Ancak, diğer çalışmaların sonuçlarıyla Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi, biraz farklılık göstermektedir. Bu farklılığın, deney şartlarından ve taban malzemesinin gronülometrisinin farklılığından meydana geldiği düşünülmektedir.

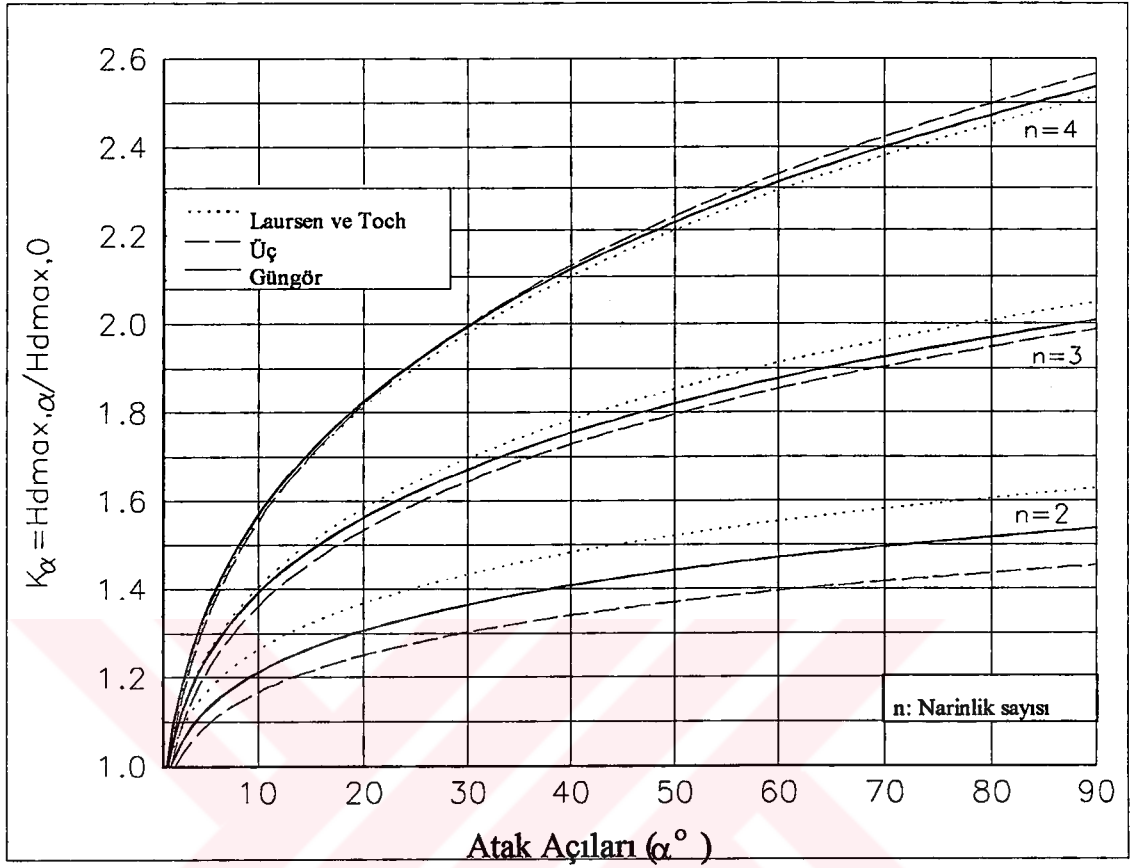


Şekil 4.12. Doğrusal Kanalda Tüm Ayaklar İçin Yapılan Deney Sonuçlarıyla Daha Önceki Çalışmaların Karşılaştırması

4.5.1.2. Doğrusal Kanalda Atak Açılarının Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi

Doğrusal kanalın akım ekseninde narinliği $n=2,3,4$ olan dikdörtgen kesitli ayaklar etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ atak açıları için ölçülmüş, sonra bu değerler $\alpha=0^\circ$ atak açısında ölçülen maksimum denge oyulma derinliğine bölünerek elde edilen rölatif oyulma derinliği katsayıları (K_α) ile atak açıları (α) arasındaki ilişki Şekil 4.13.'de araştırılmıştır.



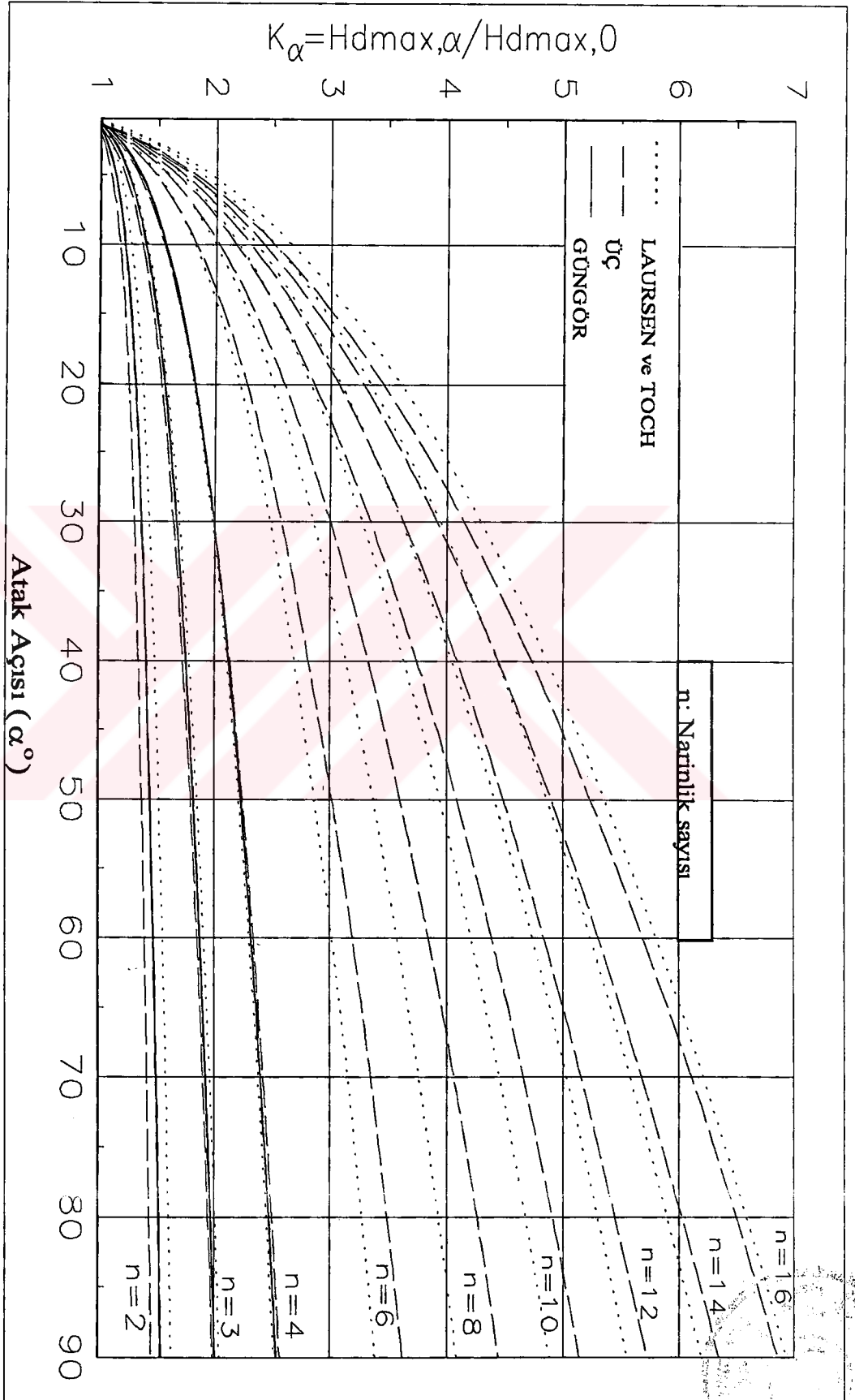


Şekil 4.13. Yapılan Deneysel Çalışma İle Laursen ve Toch (1956)'un ve Üç (1979)'ün Çalışmalarının Karşılaştırması

Şekil 4.13.'de görüldüğü gibi Laursen ve Toch (1956) ve Üç (1979)'ün çalışmalarıyla, yapılan deneysel çalışmadan elde edilen rölatif oyulma derinliği arasında çok iyi bir uyumun olduğu tesbit edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmadan elde edilen sonuçların tamamı, narinlik sayısı $n > 4$ olduğu durumlarda çeşitli atak açılarındaki ayaklar etrafındaki oyulma derinliklerini elde etmek için de uygulanabilir.

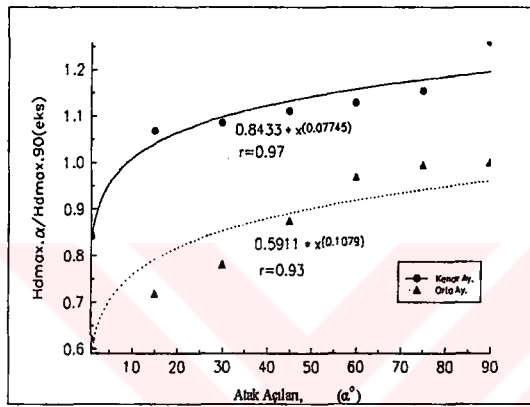
Ancak, Üç (1979) ve Laursen ve Toch (1956)'un verdikleri Şekil 4.14.'de görülen grafikten, herhangi bir atak açısı ve narinlik sayısına karşı gelen gerekli K_α katsayısı tayin edilmelidir. İstenen oyulma derinliğini bulmak için, K_α katsayısını, akım ekseninde dikdörtgen kesitli ayaklar için elde edilen maksimum denge oyulma derinliği ($H_{dmax.}$) formülüyle çarpmak yeterli olacaktır.



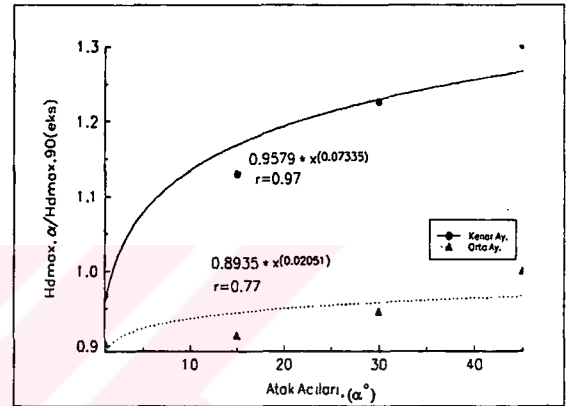


Şekil 4.14. Daha Büyük Narinlikli Ayaklar ($n > 4$) İçin (Laursen ve Toch) ve Üçün Verdiği Rölatif Oyluma Derinliği-Atak Açısı İlişkisi

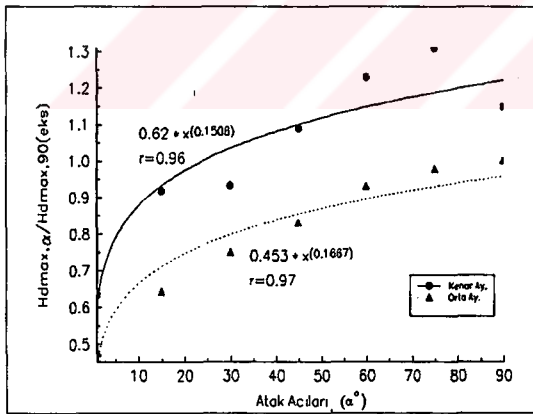
$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ atak açıları için kenar ayak etrafındaki oyulmanın orta ayak etrafındaki oyulma ile ilişkisi araştırılmıştır. $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ atak açıları için kanalın kenarlarında ve akım ekseninde her bir ayağın etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri, akım ekseninde aynı tip ve aynı boyutlu ayak etrafında $\alpha=90^\circ$ atak açıda meydana gelen maksimum denge oyulma derinliğine bölünmüştür. Daha sonra elde edilen bu rolarif oyulma derinlikleri ($H_{dmax,\alpha}/H_{dmax,90(eks)}$) ile atak açıları (α) ilişkisi, dikdörtgen ve oblonik kesitli tüm ayaklar için Şekil 4.15. ve 4.16.'da grafiklerle gösterilmiştir.



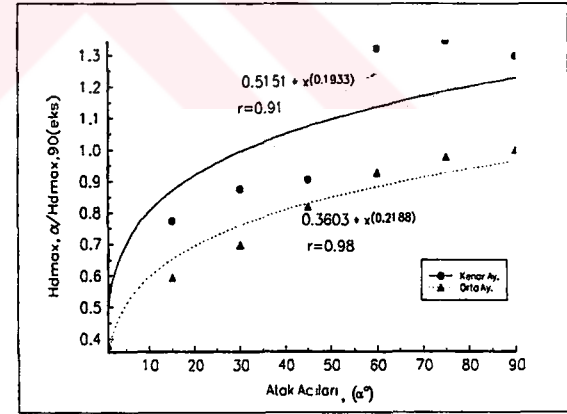
a) 5.0*5.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak



b) 5.0*10.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak

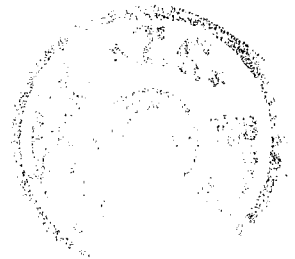


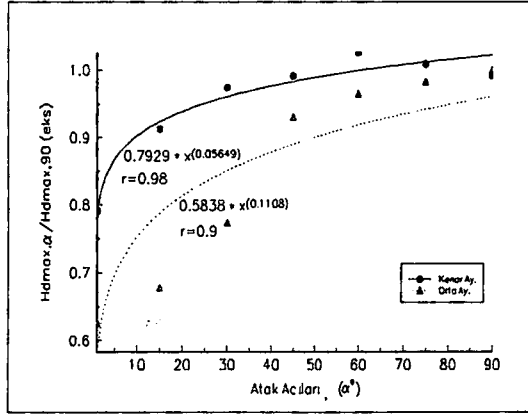
c) 5.0*15.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak



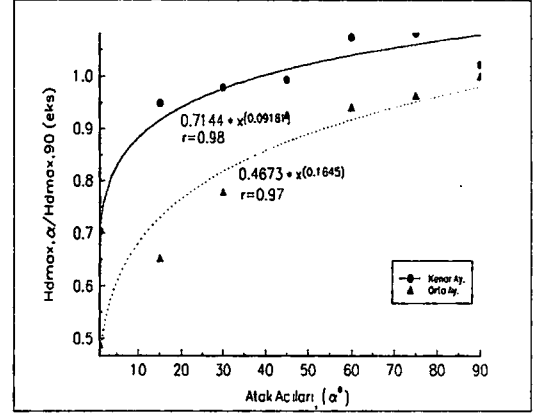
d) 5.0*20.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak

Şekil 4.15. Doğrusal Kanalda Tüm Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($H_{dmax,\alpha}/H_{dmax,90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)

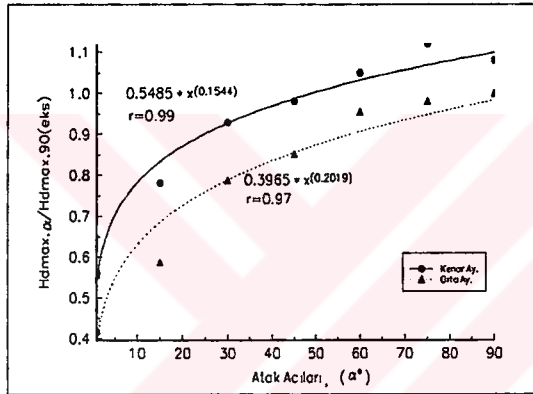




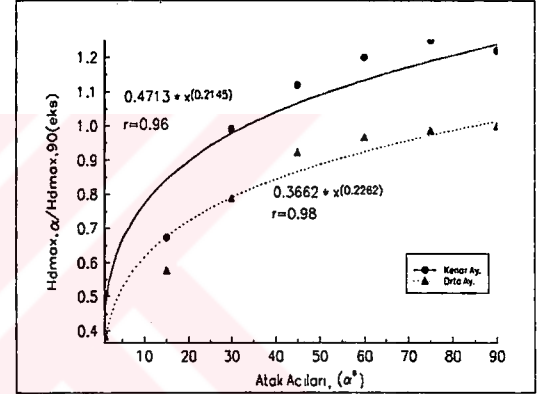
a) 5.0*11.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak



b) 5.0*16.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak



c) 5.0*21.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak

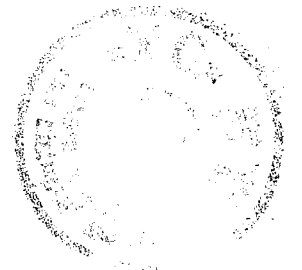


d) 5.0*26.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak

Şekil 4.16. Doğrusal Kanalda Tüm Oblonik Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($H_{dmax,\alpha}/H_{dmax,90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi

Şekil 4.15. ve 4.16.'daki grafikler tek tek incelendiğinde gerek dikdörtgen kesitli ayaklar, gerekse oblonik kesitli ayaklar için korelasyon katsayıları yeter büyüklükte ($r > 0.90$) olduğu görülmüştür. Böylece, kullanılan tüm ayaklar için her iki ekseninde de rölatif oyulma derinliği ($H_{dmax,\alpha}/H_{dmax,90(eks)}$)-atak açısı (α) arasında çok iyi eksponensiyel bir ilişkinin varlığı görülmüştür. Bu ilişkiyi gösteren bağıntılar ve korelasyon katsayıları eğriler üzerinde verilmiştir.

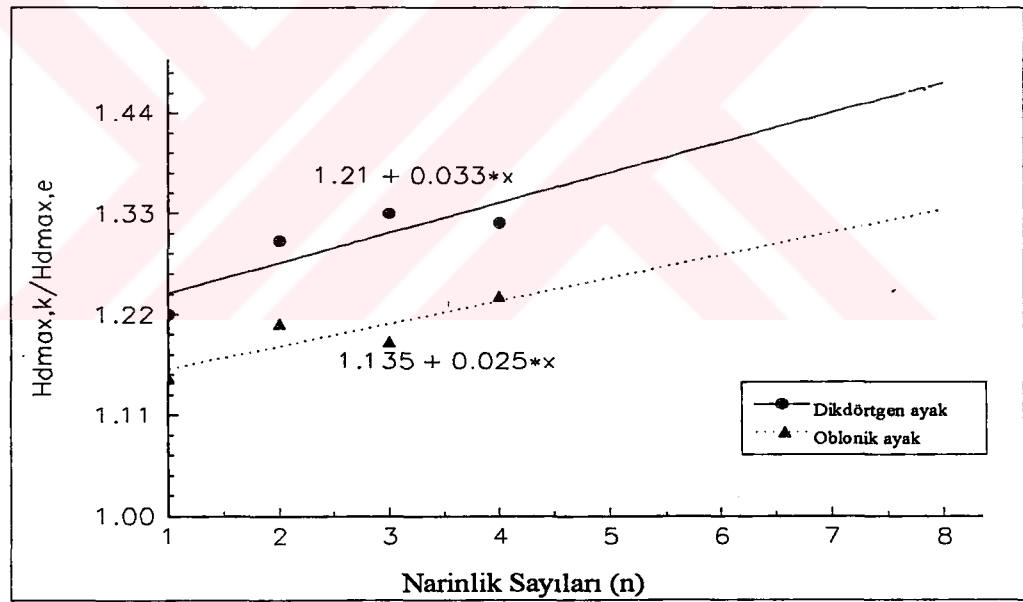
Daha sonra, dikdörtgen ve oblonik kesitli tüm ayaklar için kanal kenarında oluşan rölatif oyulma derinlikleri, akım ekseninde oluşan rölatif oyulma derinliklerine bölünerek, kenar ayaklar için Tablo 4.4.'deki çarpım katsayıları elde edilmiştir.



Tablo 4.4. Atak Açılarına Göre Elde Edilmiş Kenar Ayak Çarpım Katsayıları

Ayak Kesitinin Şekli			
Dikdörtgen Kesit		Oblonik Kesit	
Narinlik Sayısı	Çarpım Katsayısı	Narinlik Sayısı	Çarpım Katsayısı
1	1.22	2.2	1.15
2	1.30	3.2	1.21
3	1.33	4.2	1.29
4	1.32	5.2	1.24

Narinlik sayısının rölatif oyulma derinliğine etkisini tesbit için tabodaki katsayılar kullanılarak rölatif oyulma derinliği ($H_{dmax,k}/H_{dmax,e}$)-narinlik sayıları ilişkisi Şekil 4.17.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Doğrusal Kanalda Kenar Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Çarpım Katsayıları (K_n), ($\alpha=90^\circ$ için)

Dikdörtgen ve oblonik kesitler için narinlik bağıntısı (4.13) ve (4.14) denklemlerinde verilmiştir.

Dikdörtgen için:

$$K_{n,d} = 1.21 + 0.033 \cdot n$$

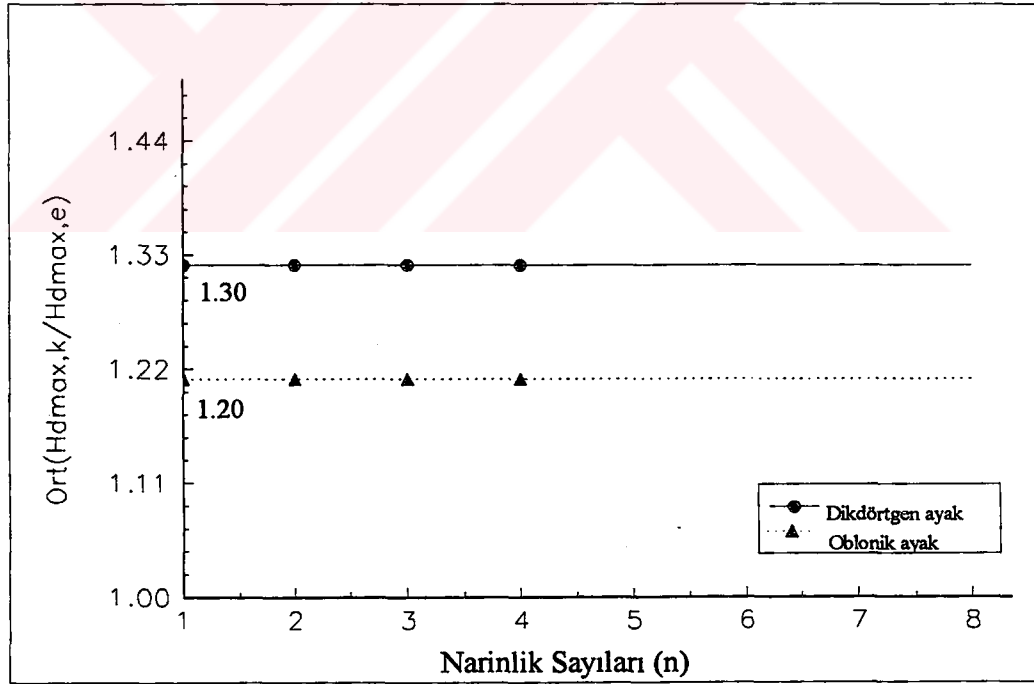
(4.13)

Oblonik ayaklar için:

$$K_{n,o} = 1.135 + 0.025 * n \quad (4.14)$$

Doğrusal kanalda gerek dikdörtgen ve gerekse oblonik kesitli ayaklar için, aynı boyutlu kenar ayaklardaki oyulma derinlikleri, akım eksenine yerleştirilen ayaklardaki oyulma derinliklerinden, daima büyük çıkmaktadır. Oyulma derinlikleri arasındaki oran ayak narinlik sayısına göre Şekil 4.17.'de gösterilmiştir. Artık, ayak narinliği ne olursa olsun Oyulma derinliğini bulmak için, Şekil 4.17.'deki grafikten okunan veya denklemlerden elde edilen narinlik çarpım katsayısı, (K_n) ile akım ekseninde bulunan oyulma derinliği değerini çarpmak yeterlidir.

Pratik yaklaşımlar için Tablo 4.4.'deki katsayıların aritmetik ortalaması alınarak dikdörtgen ve oblonik kesitli ayaklar için rölatif oyulma derinliği, ($K_n = H_{dmax,k}/H_{dmax,e}$)-narinlik sayısı (n) ilişkisi Şekil 4.18.'de verilmiştir.

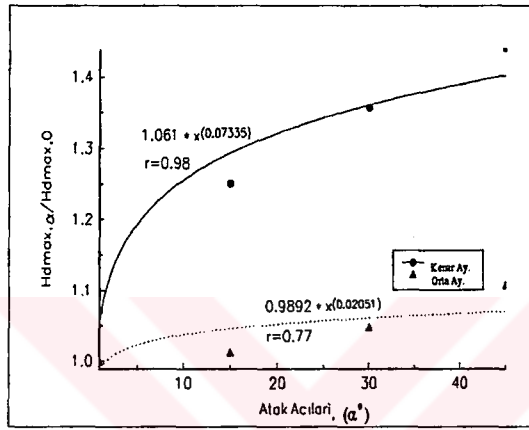


Şekil 4.18. Doğrusal Kanal Kenarında Dikdörtgen ve Oblonik Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Ortalama Çarpım Katsayıları, , ($\alpha=90^\circ$ için)

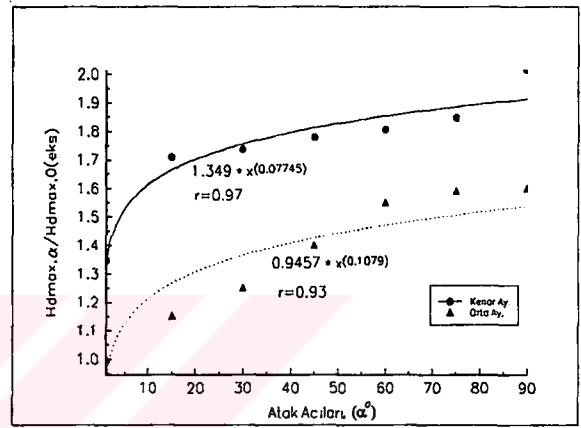


Şekil 4.18.'de görüldüğü gibi pratik yaklaşımlar için narinlik ne olursa olsun kenar ayaklarda narinlik katsayısı, ($K_{n,ort}$) dikdörtgen ayaklarda 1.30, oblonik ayaklarda ise, 1.20 alınabilir.

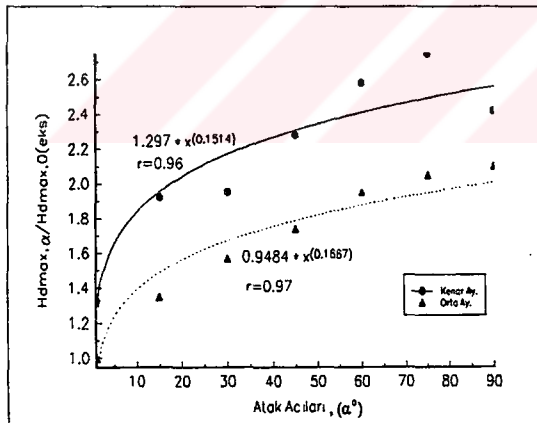
Böylece, akım eksenine yerleştirilen herhangi bir ayak etrafındaki yerel oyulma verilen formüllerle hesaplanabilir. Atak açısı $\alpha=0^\circ$ ve akım eksenini için $K_\alpha=1$ ve $K_n=1$ alınmalıdır.



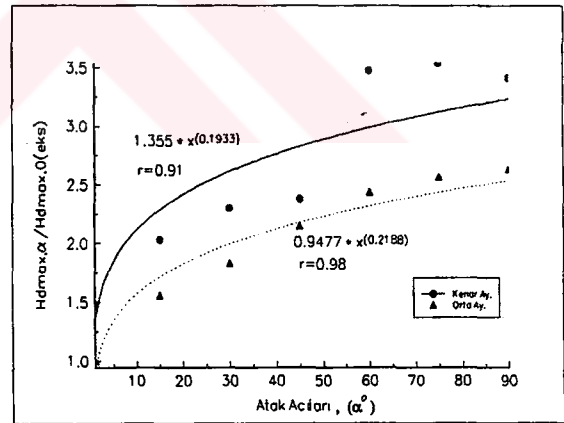
a) 5.0*5.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak



b) 5.0*10.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak



c) 5.0*15.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak

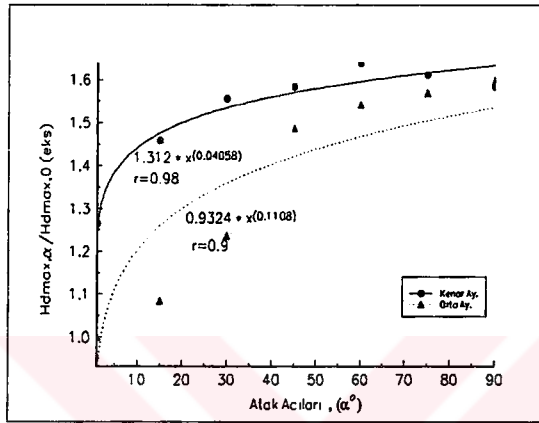


d) 5.0*20.0 cm. Boyutlu Dikdörtgen Ayak

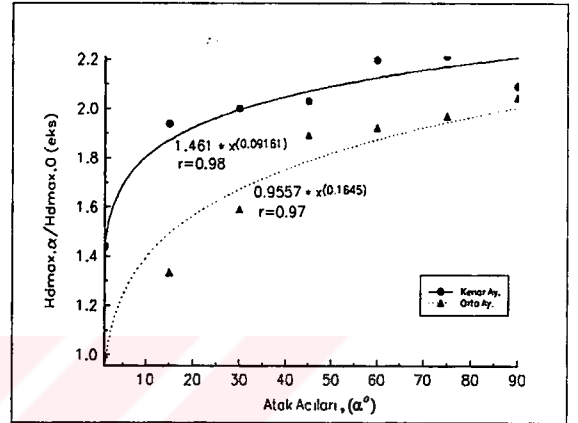
Şekil 4.19. Doğrusal Kanalda Tüm Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)

Yukarıda yapılan değerlendirmeler $\alpha=90^\circ$ alınarak yapılmıştır. Bunun yerine maksimum denge oyulma için $\alpha=0^\circ$ baz alınarak Şekil 4.19. ve 4.20.'de gösterildiği gibi dikdörtgen ve oblonik ayaklar için, rölatif oyulma derinliği, $Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$

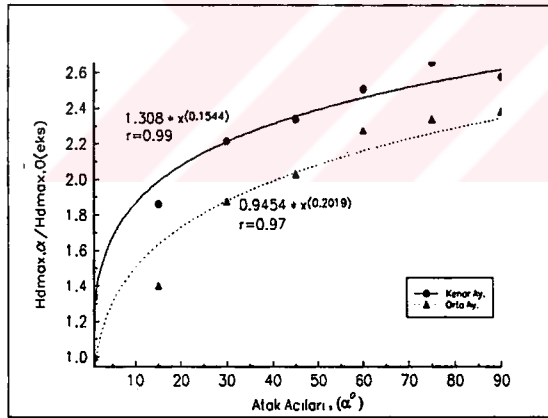
ile atak açısı, (α) ilişkisi araştırılmıştır. Sonuçta, Şekil 4.17. ve Şekil 4.21 karşılaştırıldığında, doğrusal kanal akım ekseninde atak açısı, $\alpha=90^\circ$ alınarak elde edilen rölatif oyulma derinlikleriyle, atak açısı, $\alpha=0^\circ$ alınarak elde edilen rölatif oyulma derinlikleri ~ 0.015 gibi çok küçük bir farkla hemen hemen aynı olmaktadır. Bu sebeple, $\alpha=90^\circ$ veya $\alpha=0^\circ$ atak açılarındaki oyulmaların baz alınması farketmemektedir.



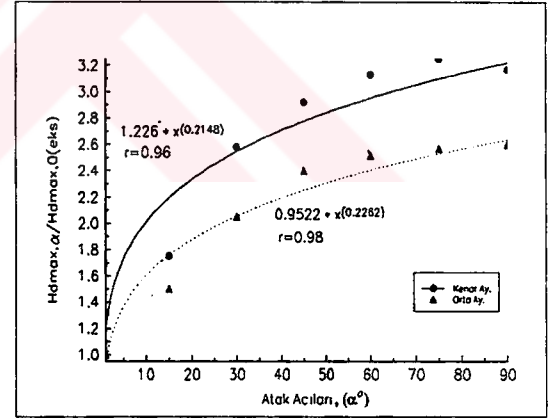
a) 5.0*11.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak



b) 5.0*16.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak

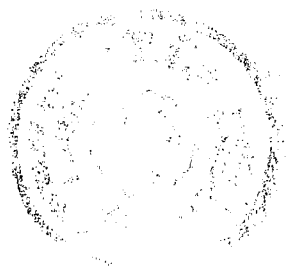


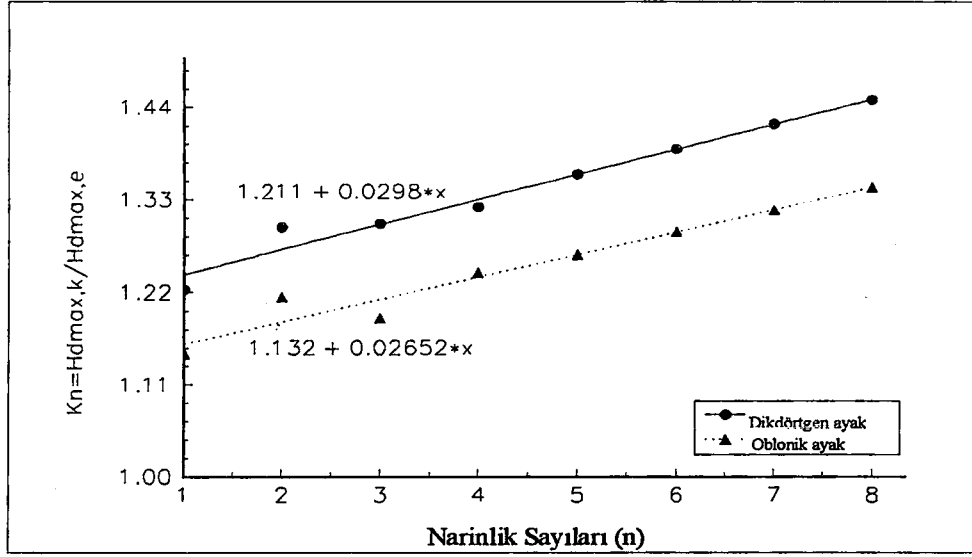
c) 5.0*21.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak



d) 5.0*26.0 cm. Boyutlu Oblonik Ayak

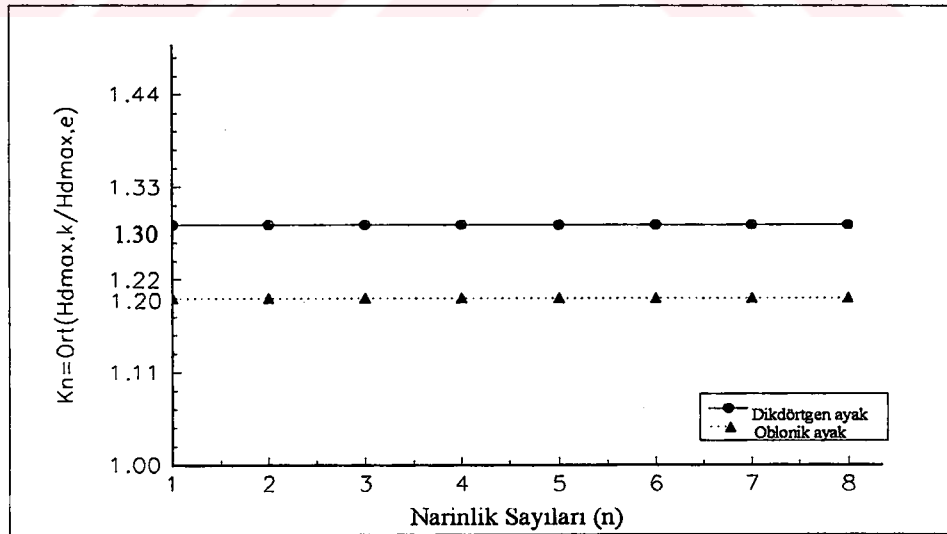
Şekil 4.20. Doğrusal Kanalda Tüm Oblonik Kesitli Ayaklar İçin Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}/Hd_{max,0(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)





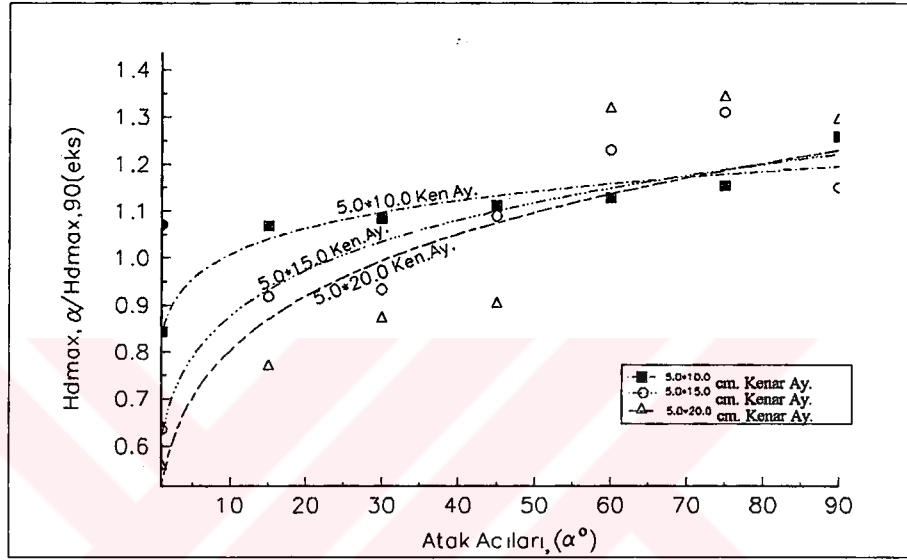
Şekil 4.21. Doğrusal Kanalda Kenar Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Çarpım Katsayıları (K_N), ($\alpha=0^\circ$ için)

Hatta, pratik yaklaşımda Şekil 4.22.'de görüldüğü gibi, akım ekseninde atak açısı, $\alpha=0^\circ$ iken elde edilen oyulmalar baz alınarak, bulunan rölatif oyulma derinlikleriyle, Şekil 4.18.'de görüldüğü gibi, atak açısı, $\alpha=90^\circ$ iken elde edilen oyulmalar baz alınarak bulunan rölatif oyulmalar aynı olmaktadır.

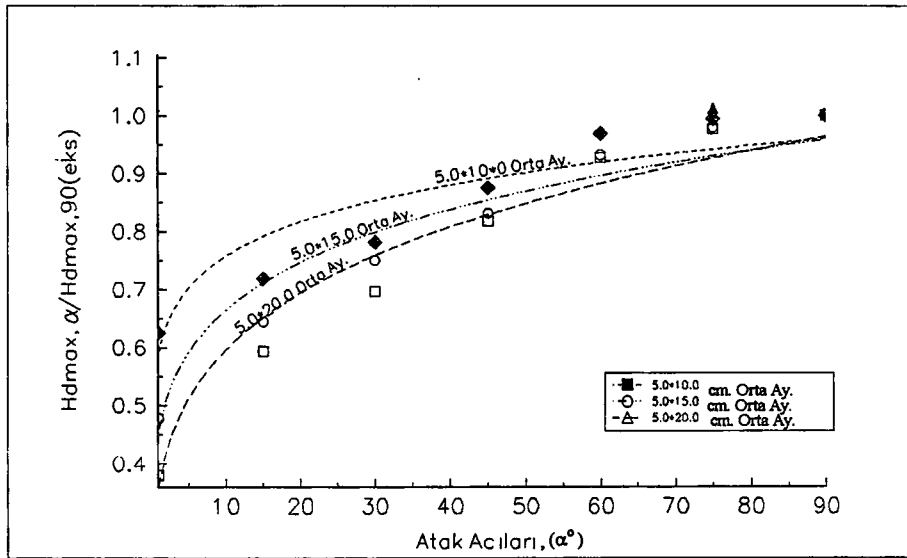


Şekil 4.22. Doğrusal Kanalin Kenarında Dikdörtgen ve Oblonik Ayaklar Etrafında Meydana Gelen Rölatif Oyulma Derinlikleri İçin Narinlik Sayısı Ortalama Çarpım Katsayıları, ($K_{n,ort}$), ($\alpha=0^\circ$ için)

Doğrusal kanalda gerek kenara ve gerekse akım eksenine yerleştirilen dikdörtgen ayaklarda $\alpha \leq 60^\circ$ olduğu bölgede narinlik sayısı (n) arttıkça, rölatif oyulma derinliğinin ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 90(eks)}$) azaldığı, buna karşılık $\alpha > 60^\circ$ olduğunda narinlik sayısının, rölatif oyulma derinliğine etkisinin ihmal edilebilir mertebede olduğu Şekil 4.23. ve 4.24.'den görülmektedir.

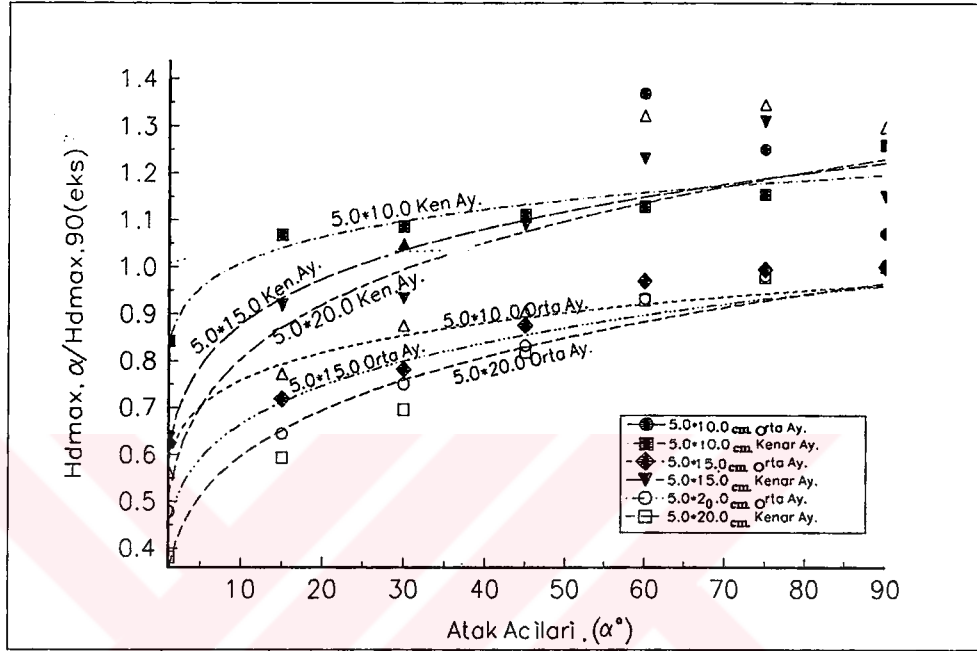


Şekil 4.23. Doğrusal Kanal Kenarında Rölatif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)



Şekil 4.24. Doğrusal Kanal Akım Ekseninde Rölatif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 90(eks)}$)-Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)

Ayrıca, Şekil 4.25.'de görüldüğü gibi, kanal kenarına yerleştirilen ayaklar etrafındaki yerel oyulmalar akım eksenine yerleştirilen ayaklar etrafındaki yerel oyulmalardan daima büyük olmaktadır.

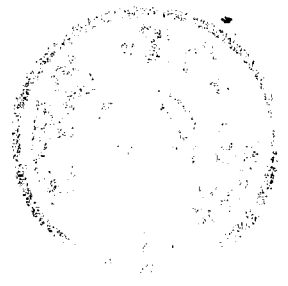


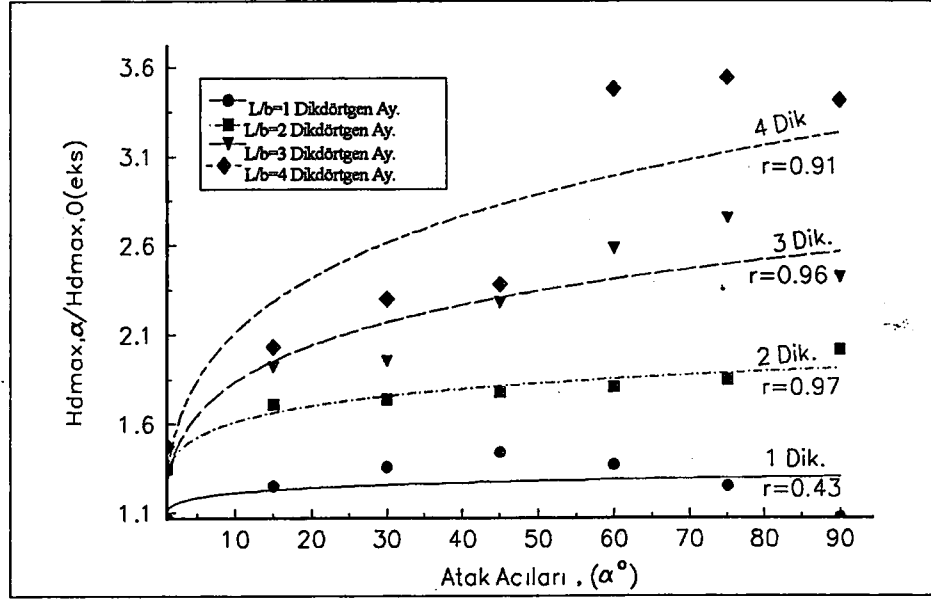
Şekil 4.25. Doğrusal Kanal Kenarında ve Akım Ekseninde Rölatif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 90(eks)}$) -Atak Açısı (α) İlişkisi, ($\alpha=90^\circ$ için)

4.5.1.3. Doğrusal Kanalda Cidar Etkisinin Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi

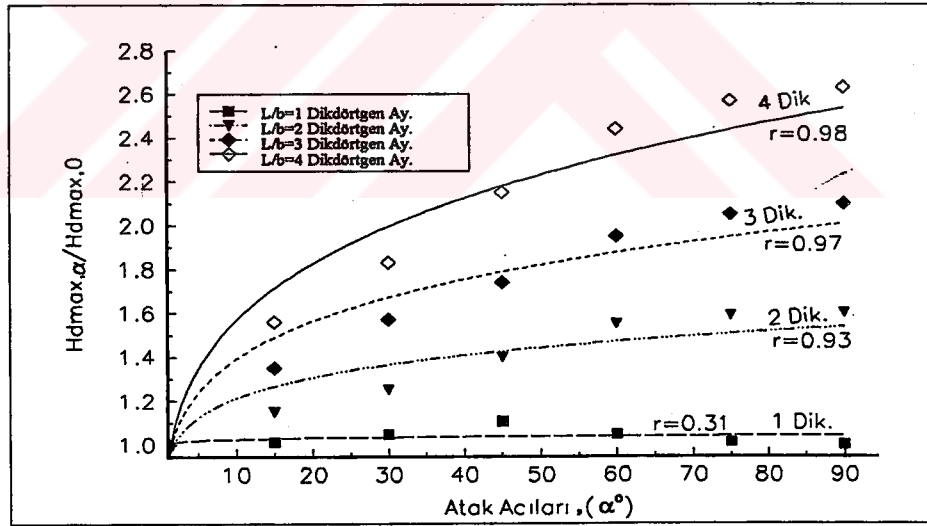
Cidar etkisinin yerel oyulmaya etkisini incelemek için, kanalın kenarındaki ve akım eksenindeki oyulma derinlikleri, akım eksenine $\alpha=0^\circ$ atak açısında yerleştirilen aynı narinlikli ayak etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliğine bölerek elde edilen rölatif oyulma derinliği ile atak açıları arasındaki ilişki dikdörtgen ayaklar için Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de, oblonik ayaklar için ise, Şekil 4.29. ve Şekil 4.30.'da gösterilmiştir.

Şekillerden görüldüğü gibi, kanalın hem akım ekseninde, hem de kenarında, dikdörtgen ve oblonik ayakların tamamında, rölatif oyulma derinliği narinlikle artmaktadır.





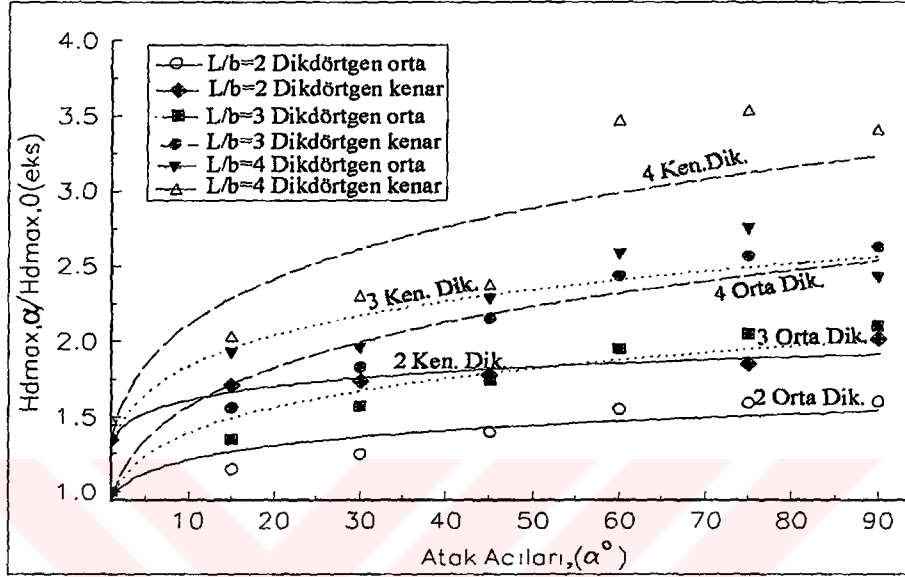
Şekil 4.26. Doğrusal Kanal Kenarındaki Dikdörtgen Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)



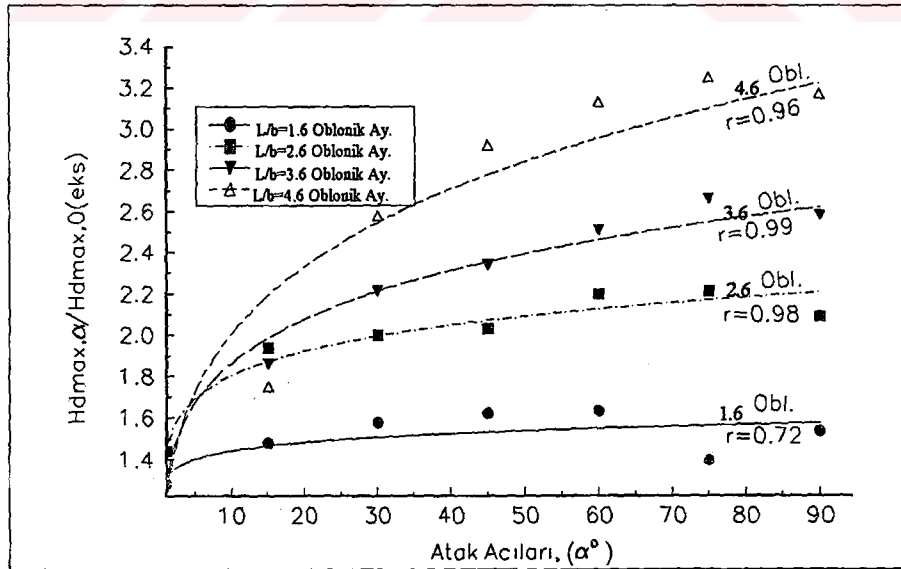
Şekil 4.27. Doğrusal Kanal Akım Eksenindeki Dikdörtgen Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)

Doğrusal kanal akım ekseninde ve kenarında, dikdörtgen ve oblonik ayaklardaki rölatif oyulmanın, atak açısıyla değişimi, Şekil 4.28. ile Şekil 4.31.'deki grafiklerde gösterilmiştir. Buradan görüldüğü gibi cidar etkisi daha açık bir şekilde gözlenmektedir.

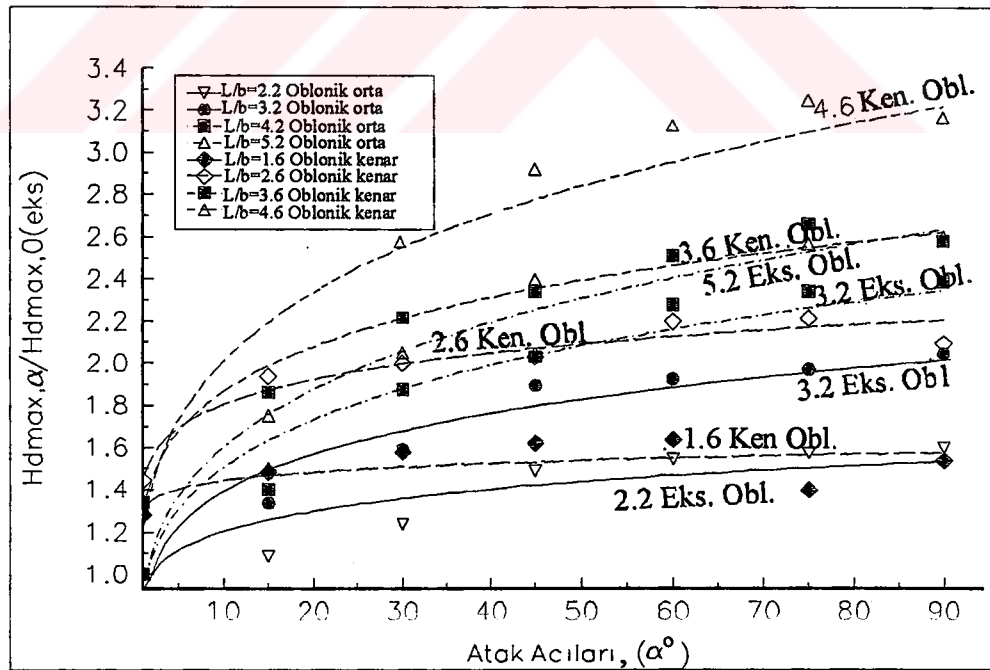
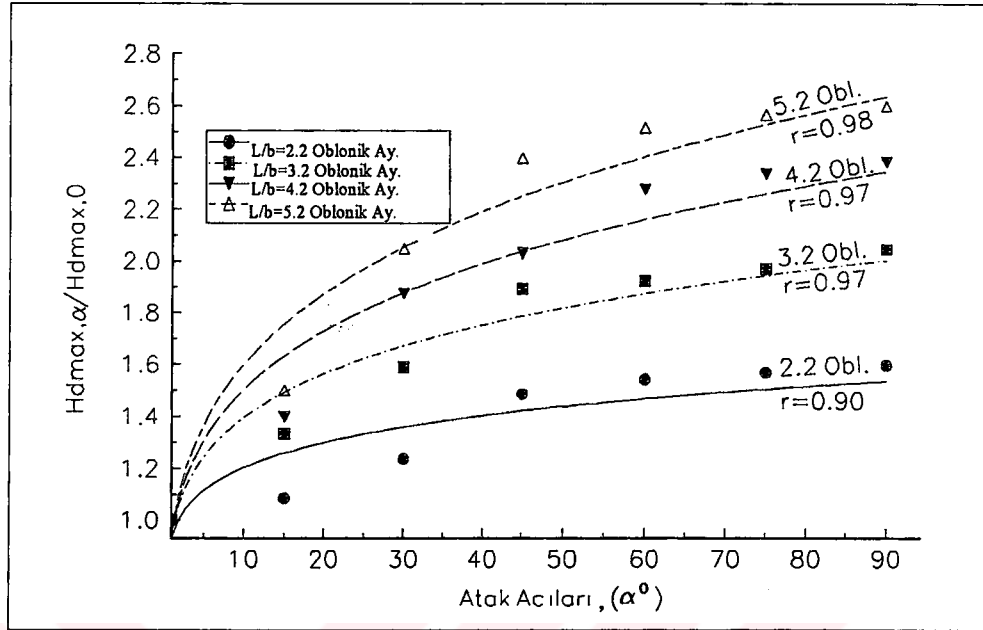
$n \leq 2$ için aynı şartlardaki kenar ayakta oluşan rölatif oyulma derinliği daha büyük, ancak $n > 2$ için daha küçük çıktığı görülmektedir. Buna, kanalın cidar etkisinin neden olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4.28. Doğrusal Kanal Kenar ve Akım Eksenlerindeki Dikdörtgen Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)



Şekil 4.29. Doğrusal Kanal Kenarındaki Oblonik Ayaklarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max, \alpha} / Hd_{max, 0(eks)}$) ile Atak Açıları (α) İlişkisi, ($\alpha=0^\circ$ için)



4.5.2. Kıvrımlı Kanalda Yerel Oyulma Olayının İncelenmesi ve Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kanal kıvrımının dış kenar, iç kenar ve akım eksenleri boyunca deneyde kullanılan ayaklar tek tek çeşitli atak açılarında yerleştirilerek ayaklar etrafında oluşan maksimum denge oyulma derinlikleri ölçülmüş, oyulma çukurunun şekli ve yeri gözlenmiştir.

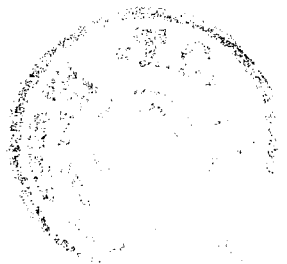
Yapılan deneylerde, doğrusal kanalda olduğu gibi hareketli taban oyulması hali göz önüne alınmış, deneylerin tamamında süre minimum 30 dakika ile sınırlandırılmıştır.

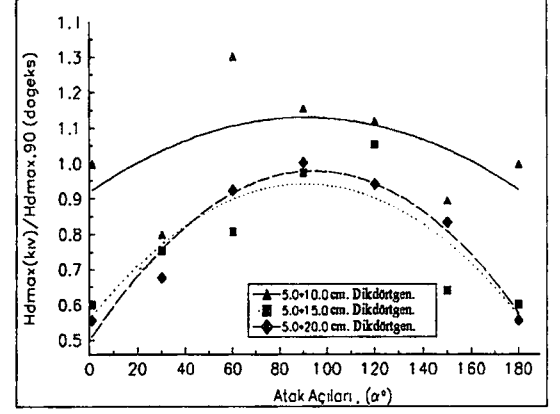
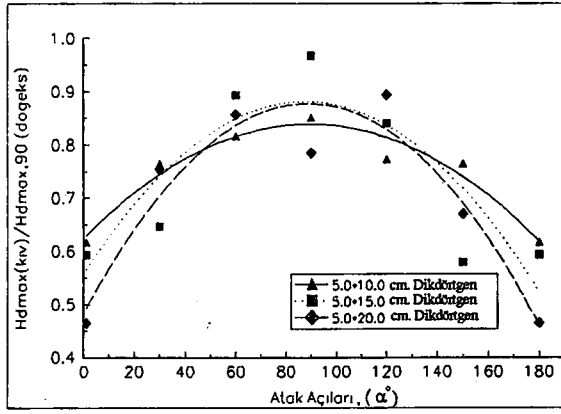
Böylece, üç farklı boyutlu dikdörtgen kesitli ve dört farklı boyutlu oblonik kesitli ayaklar kullanarak tesbit edilen yerel oyulma derinlikleri çeşitli açılardan değerlendirilmiştir.

4.5.2.1. Kıvrımlı Kanalda Her Konumda Atak Açısının Oyulmaya Etkisinin İncelenmesi

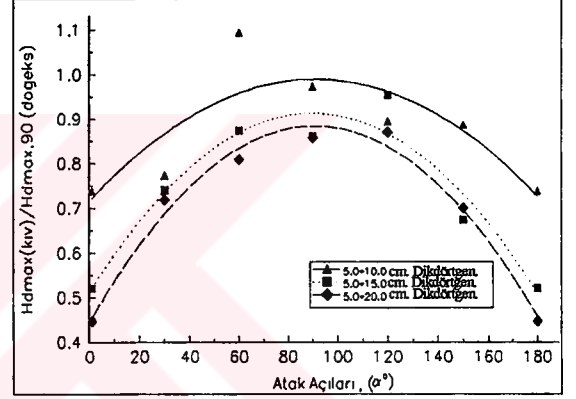
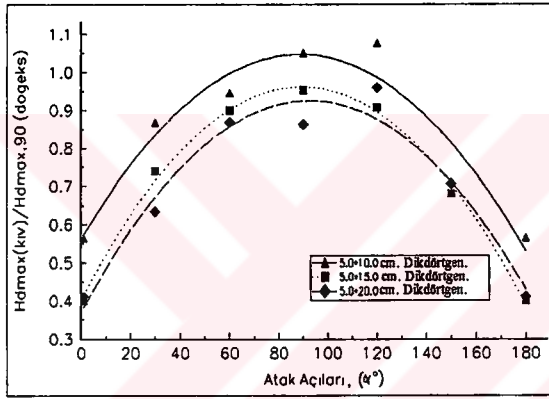
Kıvrımlı kanalın dış kenarında, akım ekseninde ve iç kenarında narinliği $n=2, 3, 4$ olan dikdörtgen kesitli ayaklar etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri, $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ atak açıları için ölçülmüş, sonra bu değerler aynı ayaklar için doğrusal kanalın akım ekseninde $\alpha = 90^\circ$ atak açısında ölçülen maksimum denge oyulma derinliklerine bölünerek elde edilen rölatif oyulma derinliği katsayıları (K_α) ile atak açıları (α) arasındaki ilişki Şekil 4.32.'de gösterilmiştir.

Şekil 4.32.'den görüldüğü gibi maksimum rölatif oyulma derinlikleri $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ için, atak açılarıyla orantılı olarak artmakta, $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ için de tersi olmaktadır. Ayrıca, narinlik katsayısı $n \leq 2$ için her konumda maksimum rölatif oyulma derinlikleri elde edilmektedir.

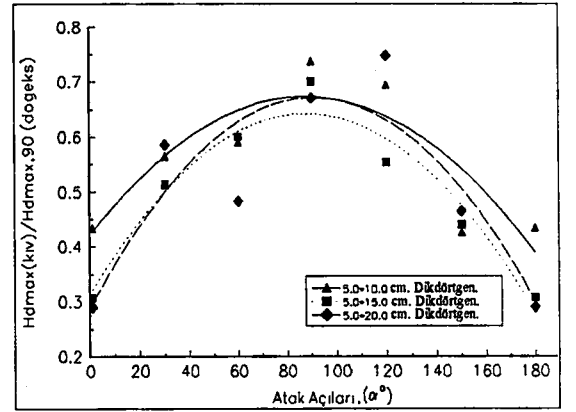
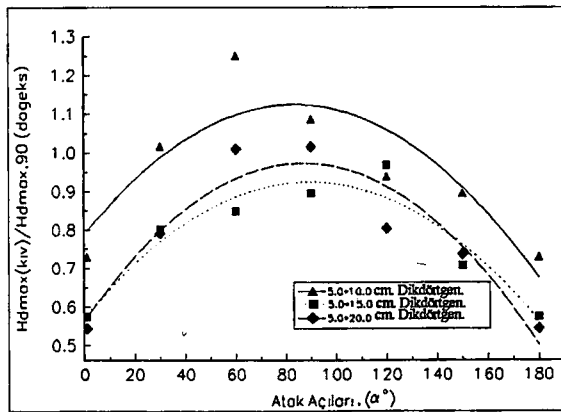




Dış Kenar



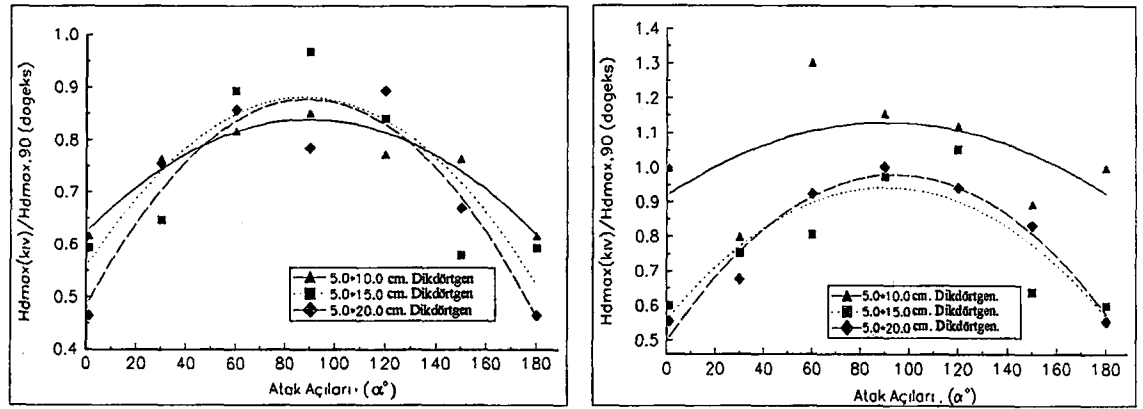
Akım Eksenini



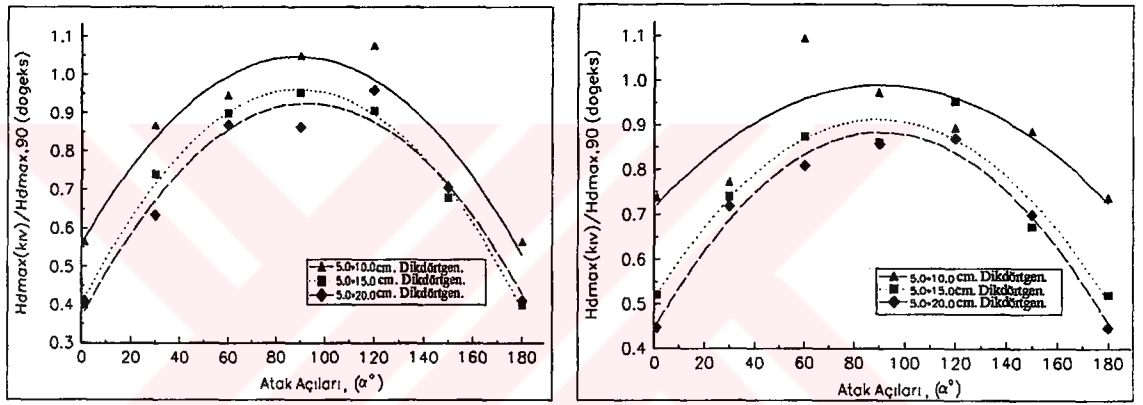
İç Kenar

a) Dikdörtgen Ayaklar ($\theta=0^\circ$)b) Dikdörtgen Ayaklar ($\theta=30^\circ$)

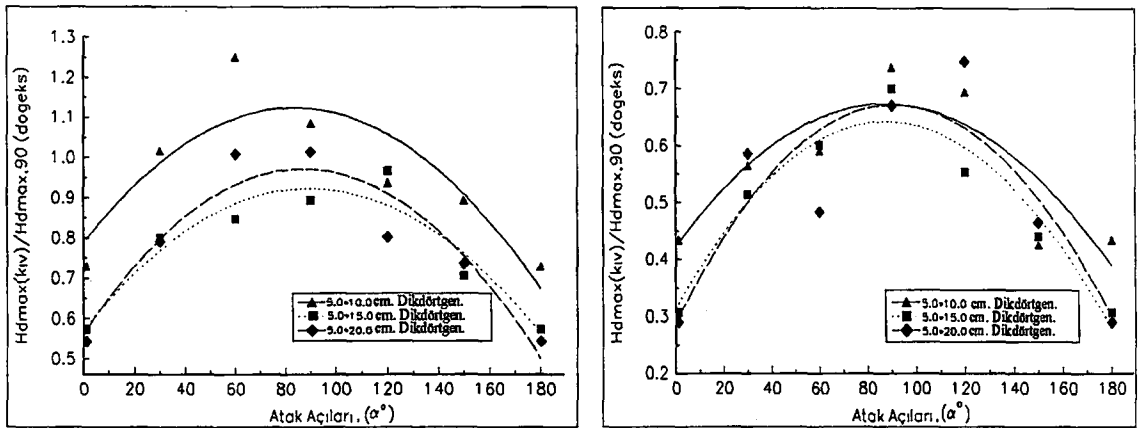
Şekil 4.32. Kıvrım Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksenini ve İç Kenarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}(kiv)/Hd_{max,90}(\text{dogeks})$)-Atak Açıları (α) Değişimi, (θ = Kıvrımın Merkez Açısı)



Dış Kenar



Akım Eksenini

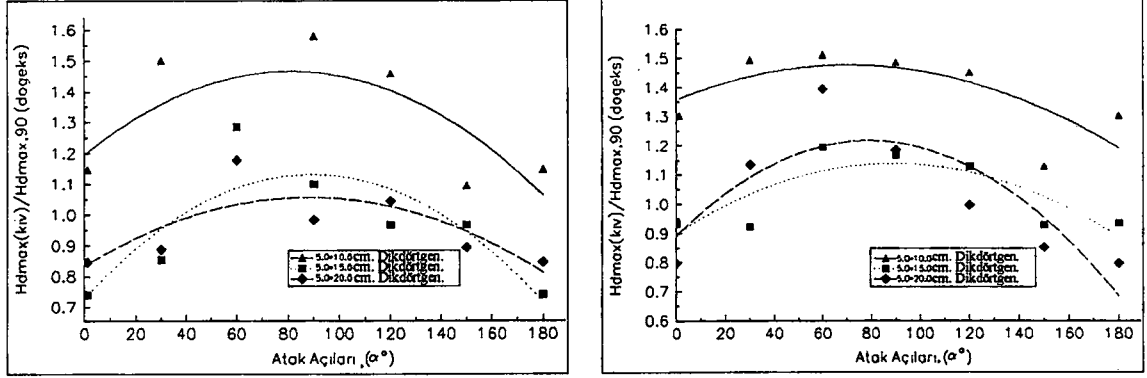


İç Kenar

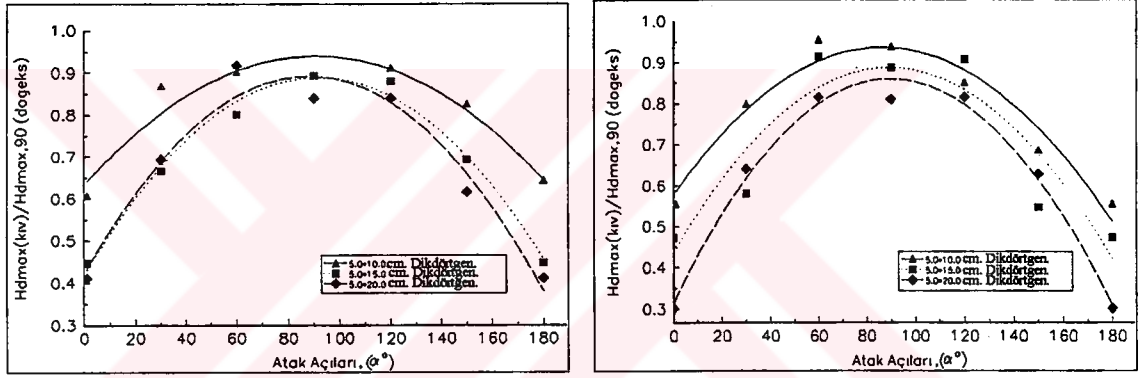
a) Dikdörtgen Ayaklar ($\theta=0^\circ$)b) Dikdörtgen Ayaklar ($\theta=30^\circ$)

Şekil 4.32. Kıvrım Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksenini ve İç Kenarda Rölatif Oyulma Derinliği ($Hd_{max,\alpha}(kv)/Hd_{max,90}(\text{dogeks})$)-Atak Açıları (α) Değişimi, (θ = Kıvrımın Merkez Açısı)

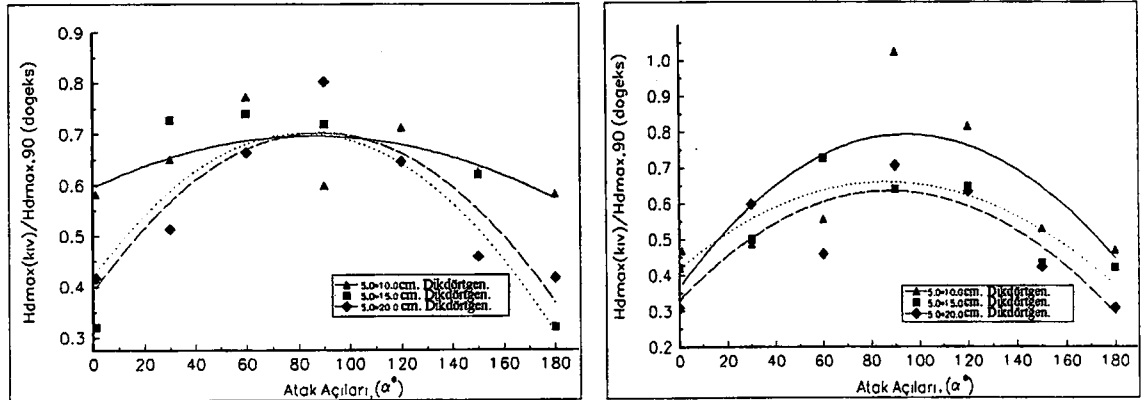
Şekil 4.32'nin devamı



Dış Kenar



Akım Eksenli

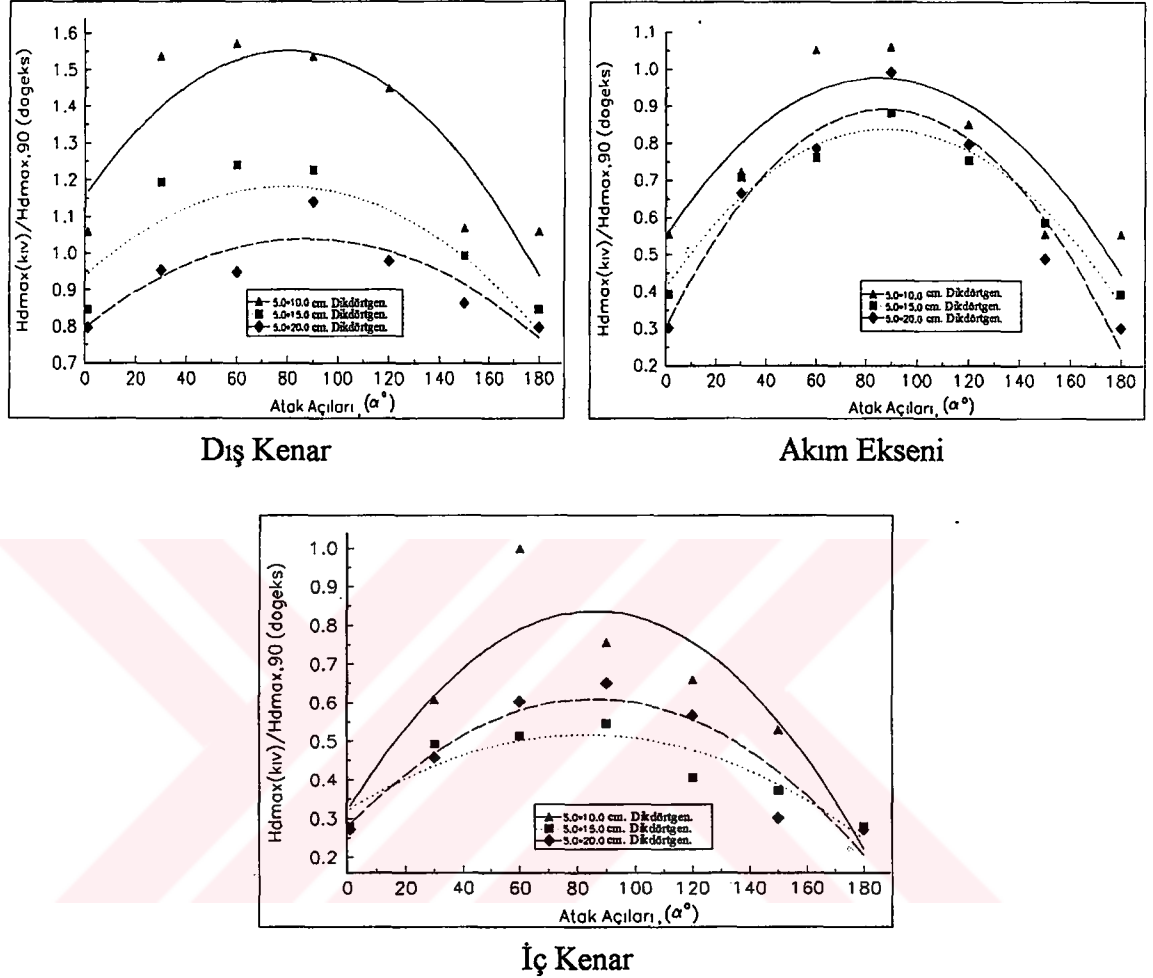


İç Kenar

e) Dikdörtgen Ayaklar ($\theta=120^\circ$)f) Dikdörtgen Ayaklar ($\theta=150^\circ$)

Şekil 4.32. Kıvrım Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksenli ve İç Kenarda Rölatif Oyulma ($Hd_{max,\alpha}(kv)/Hd_{max,90}(dogeks.)$)-Atak Açıları (α) Değişimi, (θ = Kıvrım Merkez Açısı)

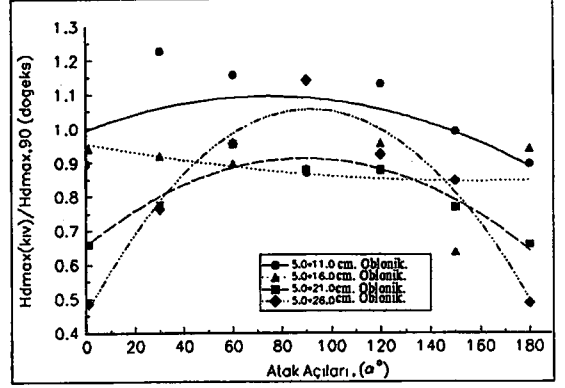
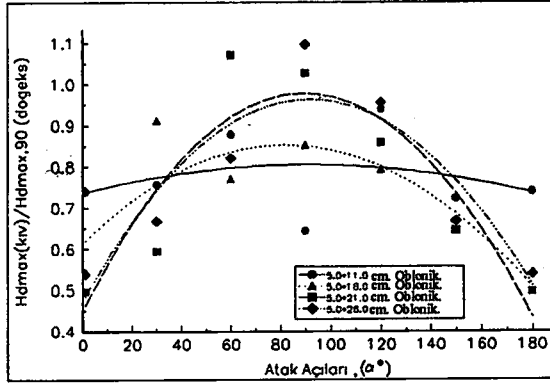
Şekil 4.32'nin devamı

g) Dikdörtgen Ayaklar ($\theta=180^\circ$)

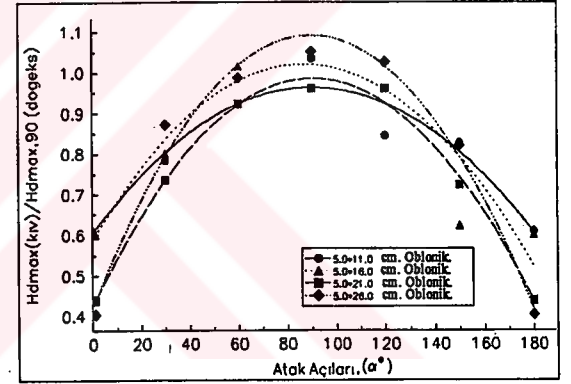
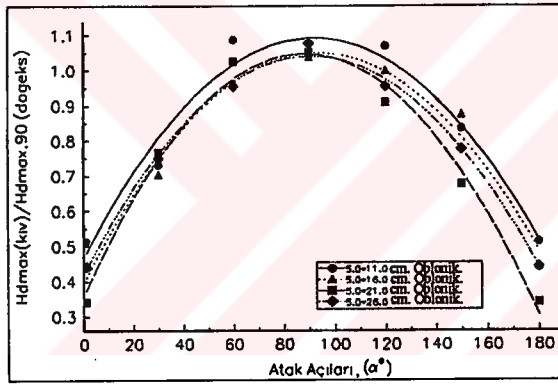
Şekil 4.32. Kıvrım Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksen ve İç Kenarda Rölatif Oyulma ($Hd_{max, \alpha}(kv.) / Hd_{max, 90}(dogeks.)$)-Atak Açıları (α) Değişimi (θ = Kıvrım Merkez Açısı)

Kıvrımlı kanalın dış kenarında, akım ekseninde ve iç kenarında narinliği $n=2.2, 3.2, 4.2, 5.2$ olan oblonik kesitli ayaklar etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri, $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ atak açıları için ölçülmüş, sonra bu değerler doğrusal kanalın akım ekseninde aynı ayaklar için, $\alpha = 90^\circ$ atak açısında ölçülen maksimum denge oyulma derinliklerine bölünerek elde edilen rölatif oyulma derinliği katsayıları (K_α) ile atak açıları (α) arasındaki ilişki Şekil 4.33.'de gösterilmiştir. Şekil 4.33.'de görüldüğü gibi

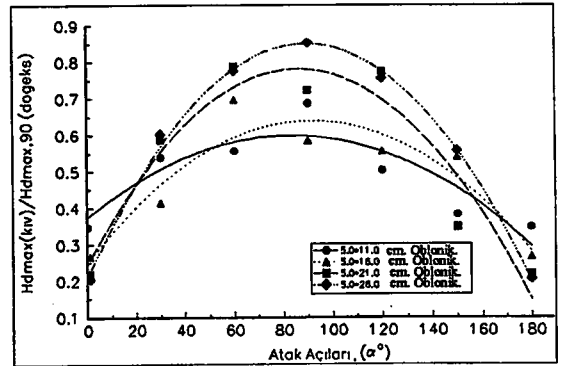
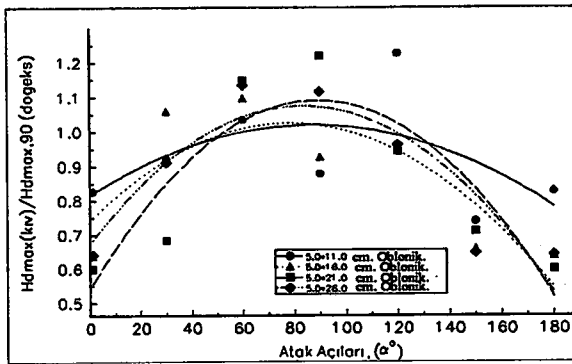
maksimum rölâtif oyulma derinlikleri $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ için, atak açılarıyla orantılı olarak artmakta, $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ için de tersi olmaktadır.



Dış Kenar



Akım Eksenine



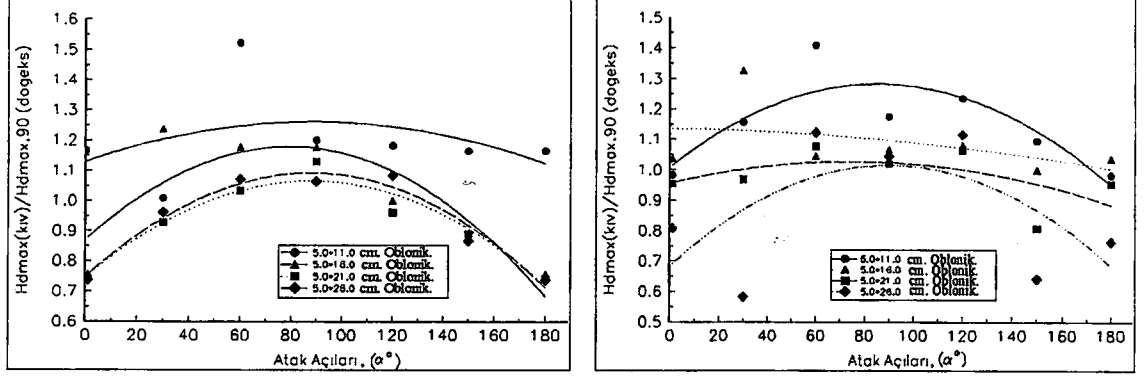
İç Kenar

a) Oblonik Ayaklar ($\theta=0^\circ$)

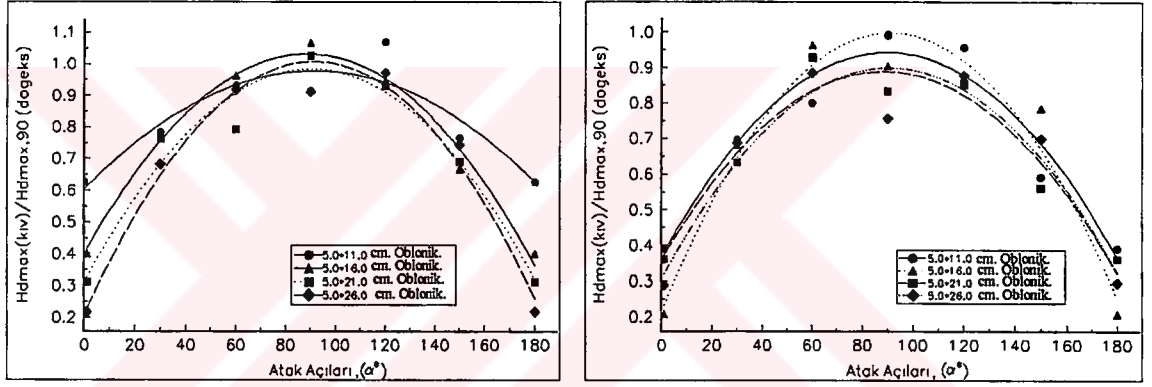
b) Oblonik Ayaklar ($\theta=30^\circ$)

Şekil 4.33. Kıvrım Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksenine ve İç Kenarda Rölâtif Oyulma ($Hd_{max,\alpha}(kv.) / Hd_{max,90}(dogeks.)$)-Atak Açıları (α) Değişimi (θ = Kıvrım Merkez Açısı)

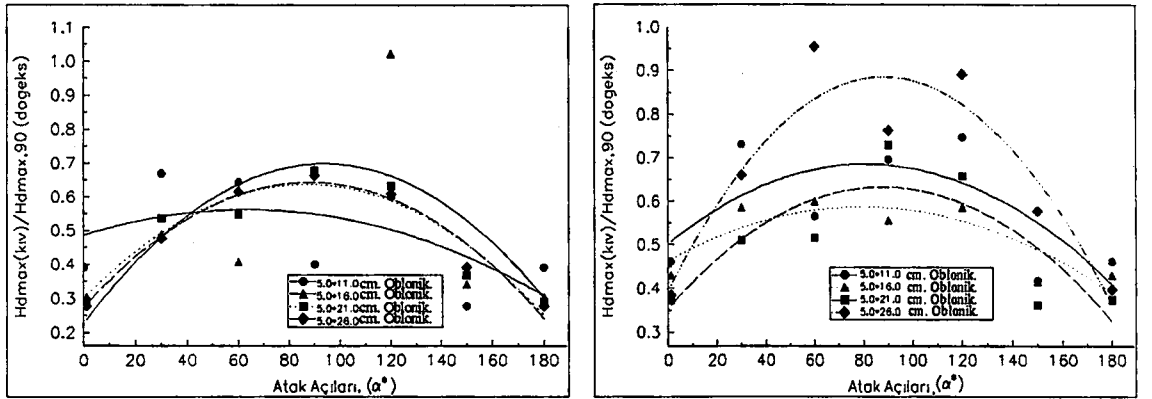
Şekil 4.33'ün devamı



Dış Kenar



Akım Eksen

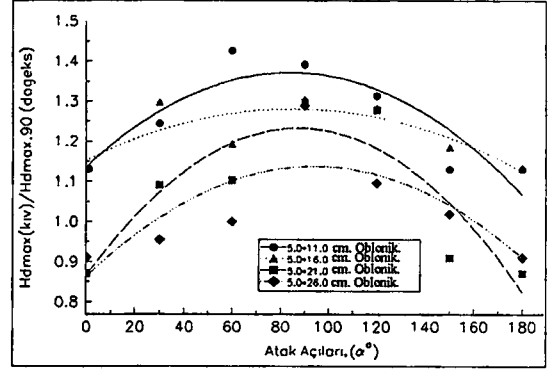
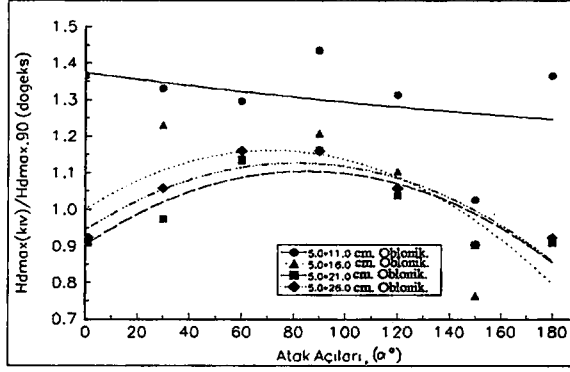


İç Kenar

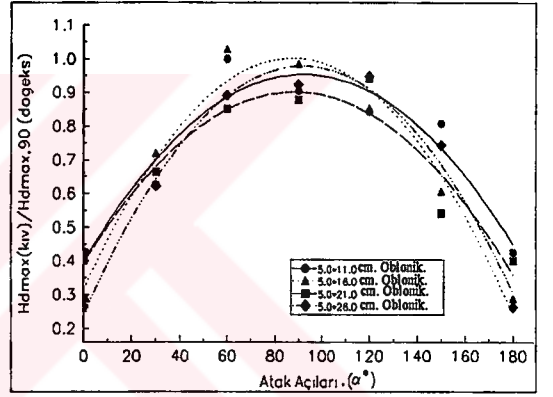
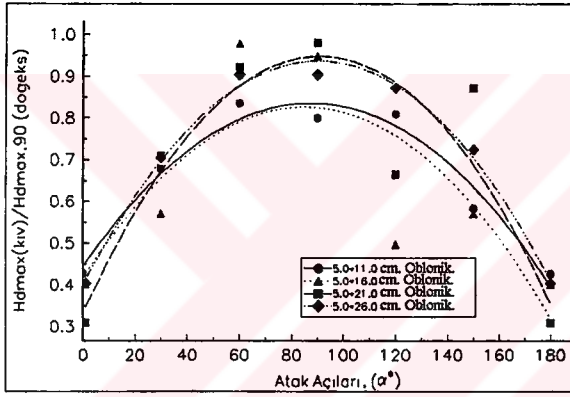
c) Oblik Ayaklar ($\theta=60^\circ$)d) Oblik Ayaklar ($\theta=90^\circ$)

Şekil 4.33. Kıvrım Boyunca Oblik Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksen ve İç Kenarda Rölatif Oyulma ($Hd_{max,\alpha(kv)}/Hd_{max,90(dogeks.)}$)-Atak Açılı (α) Değişimi (θ = Kıvrım Merkez Açısı)

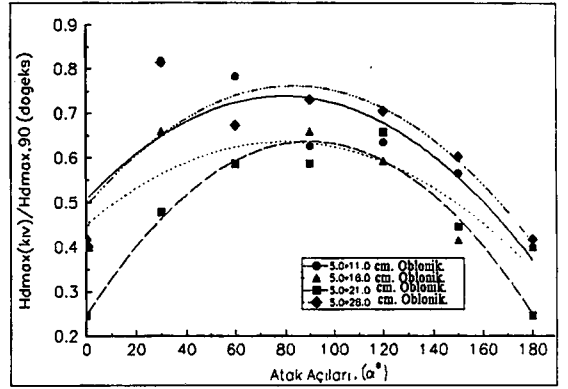
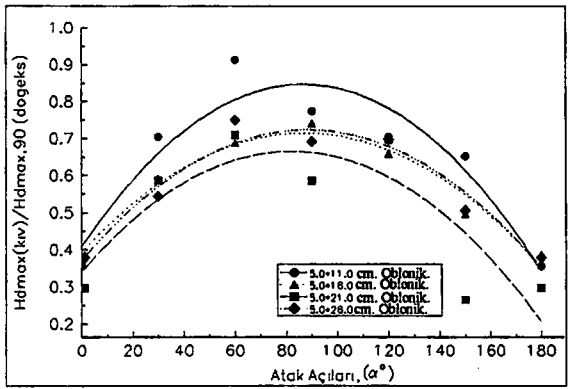
Şelik 4.33'ün devamı



Dış Kenar



Akım Ekseni

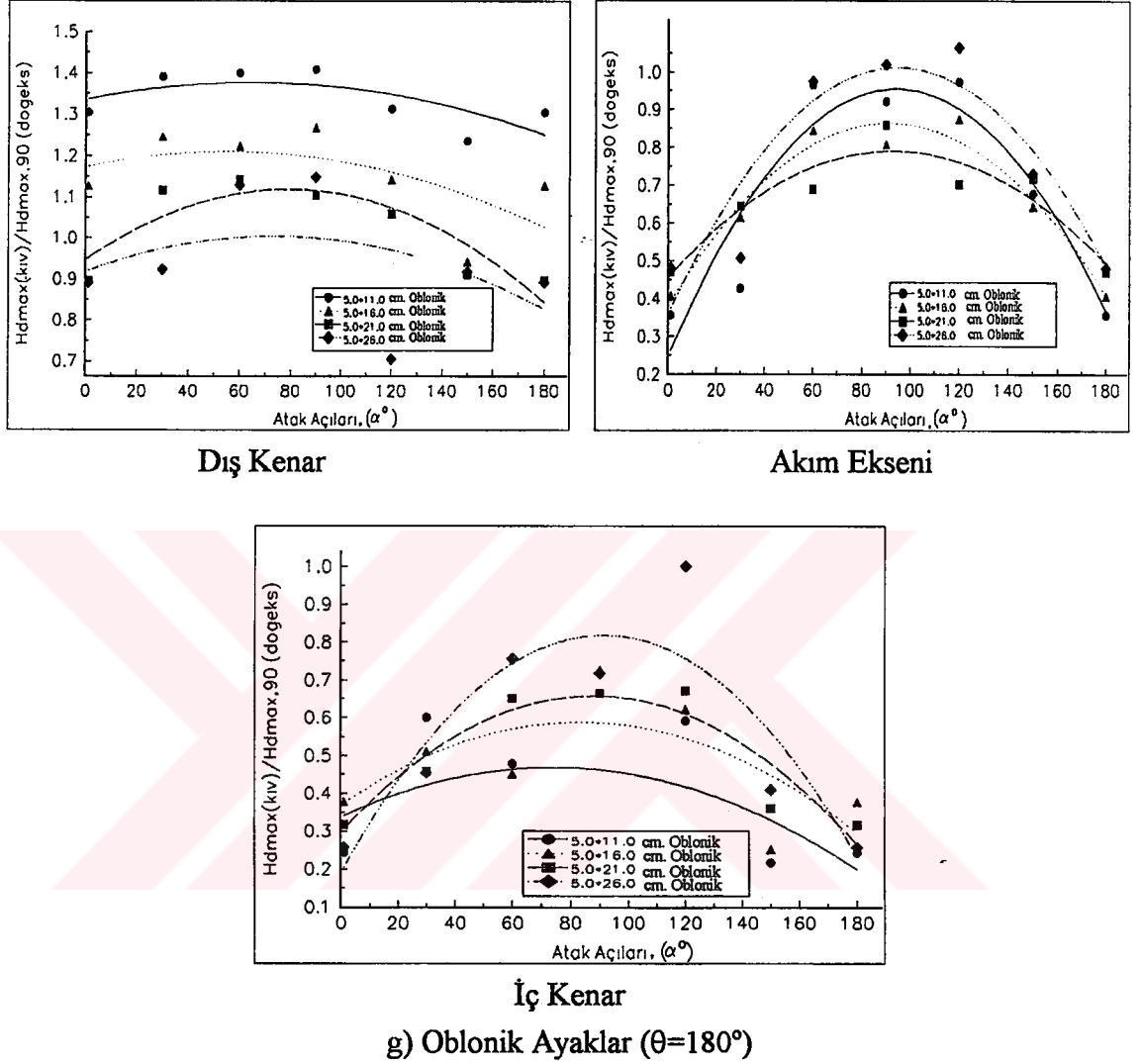


İç Kenar

e) Oblonik Ayaklar ($\theta=120^\circ$)f) Oblonik Ayaklar ($\theta=150^\circ$)

Şekil 4.33. Kıvrım Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Ekseni ve İç Kenarda Rölatif Oyuşma ($Hd_{max, \alpha(kw.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}$)-Atak Açıları (α) Değişimi, (θ = Kıvrım Merkez Açısı)

Şekil 4.33'ün devamı



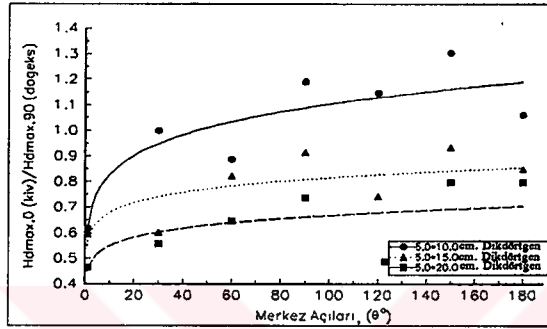
Şekil 4.33. Kıvrım Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Dış Kenar, Akım Eksenine ve İç Kenarda Rölatif Oyulma ($Hd_{max, \alpha(kıv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}$)-Atak Açıları (α) Değişimi, (θ = Kıvrım Merkez Açısı)

4.5.2.1.1. Kıvrımlı Kanalda Kıvrım Boyunca Atak Açıları Sabitken Narinlik Sayısının Rölatif Oyulmaya Etkisinin Araştırılması

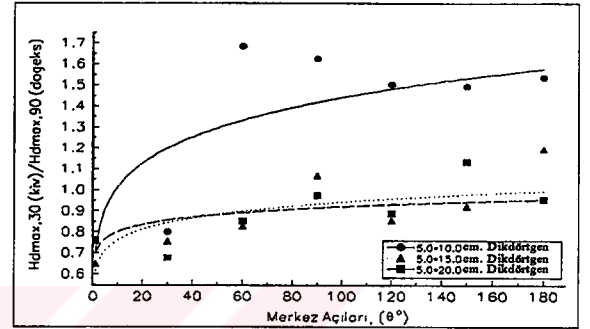
Kanalın kıvrımlı kesiminde atak açıları sabit tutularak, dış kenarda, akım eksenine ve iç kenarda kıvrım boyunca, köprü ayaklarının narinlik sayılarıyla rölatif oyulma derinliklerinin ($Hd_{max, \alpha(kıv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}$) değişimi incelenmiştir.

4.5.2.1.1.1. Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Atak Açısı Sabitken Rölatif Oyulmanın Ayakın Narinlik Katsayısıyla Değişimi

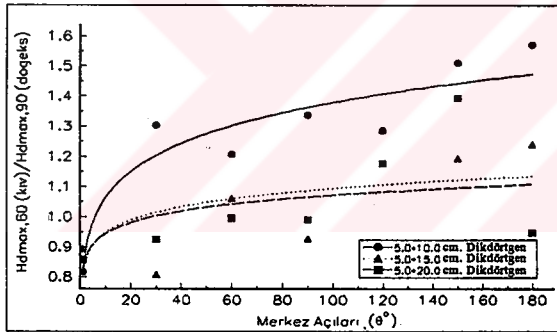
Kanal kıvrımı dış kenarı boyunca, dikdörtgen ve oblonik ayaklar için, atak açıları sabit tutularak her bir atak açısında rölatif oyulmaların narinlikle değişimi incelenmiş ve Şekil 4.34.ve 4.35.'de gösterilmiştir.



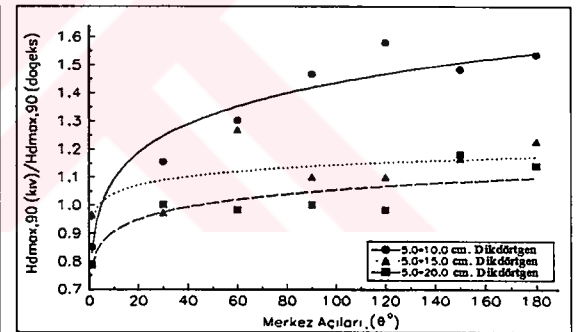
a) 0° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



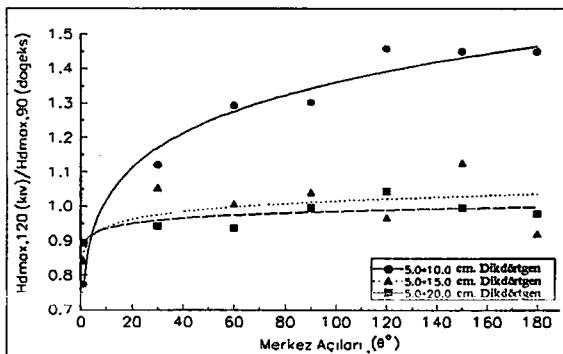
b) 30° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



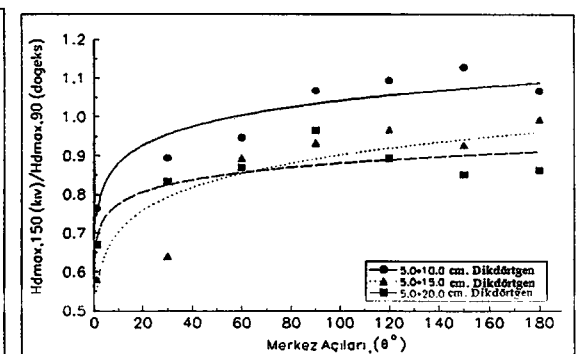
c) 60° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



d) 90° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

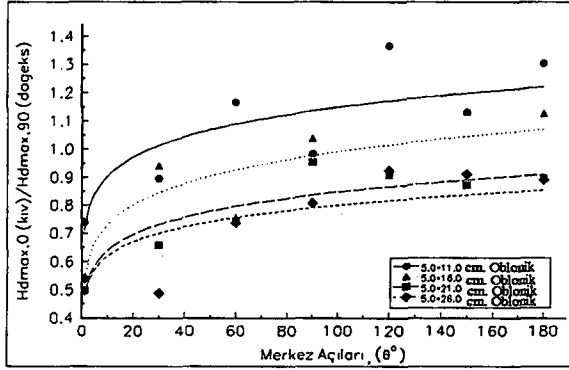


e) 120° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

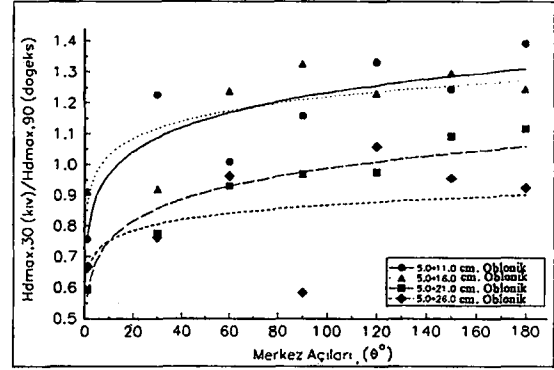


f) 150° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

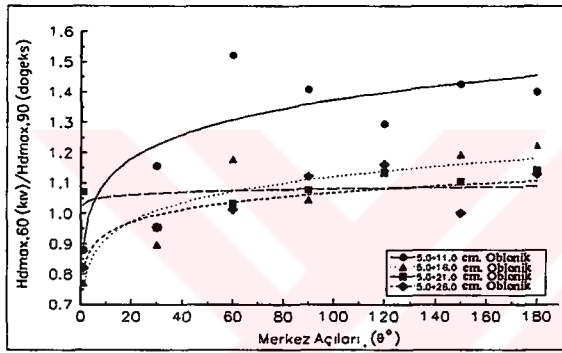
Şekil 4.34. Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kiv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}$)-Narinlikle(n) Değişimi



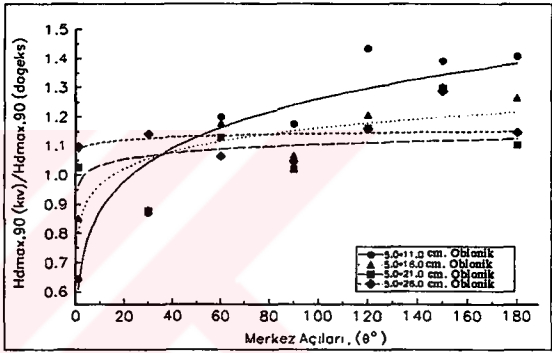
a) 0° Atak Açısında Oblonik Ayak



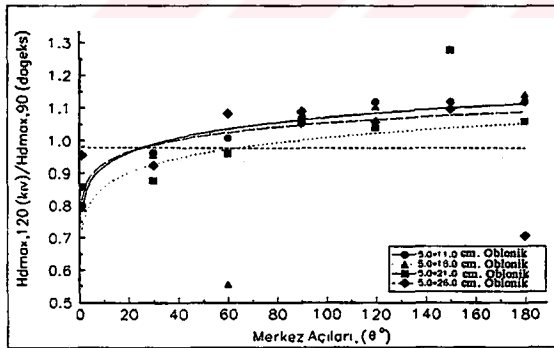
b) 30° Atak Açısında Oblonik Ayak



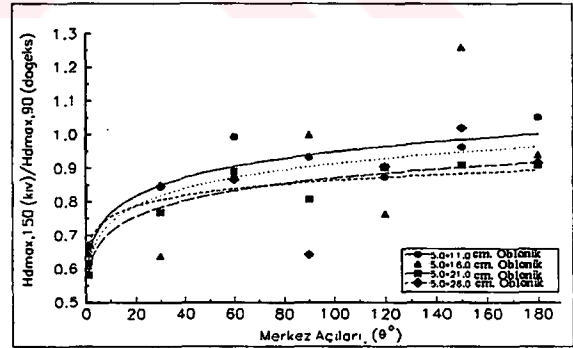
c) 60° Atak Açısında Oblonik Ayak



d) 90° Atak Açısında Oblonik Ayak



e) 120° Atak Açısında Oblonik Ayak



f) 150° Atak Açısında Oblonik Ayak

Şekil 4.35 Kıvrımın Dış Kenarı Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın
($Hd_{max, \alpha} (kw) / Hd_{max, 90} (dogeks) \cdot \eta$) -Narinlikle(n) Değişimi

Şekil 4.34. ve 4.35.'de görüldüğü gibi, kanal kıvrımı dış kenarında gerek dikdörtgen ayaklar ve gerekse oblonik ayaklar için:



1. Kenar ayakta narinlik katsayısı, $n \leq 2$ için maksimum rölatif oyulma derinliği elde edilmektedir. Bunun sebebi, ayakların akıma dik genişliğinin, kanalın cidar etkisinin hakim olduğu bölge içinde kalmasından kaynaklandığı gözlenmektedir.

2. Narinlik katsayısı, $n > 2$ olduğu durumlarda ise; dikdörtgen veya oblonik tüm ayaklar için rölatif oyulma derinlikleri orta ayaklardaki rölatif oyulma ile aynı olmaktadır. Diğer bir deyişle, narinlik katsayısı, $n > 2$ için kenar ayaklar da, orta ayak gibi çalışmaktadır..

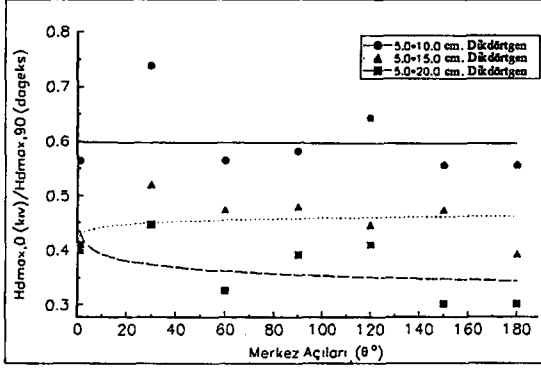
4.5.2.1.1.2. Kıvrımın Akım Eksenine Boyunca Atak Açısı Sabitken Rölatif Oyulmanın Köprü Ayağı Narinlik Katsayısıyla Değişimi

Kanal kıvrımı akım eksenine yerleştirilen dikdörtgen ve oblonik kesitli köprü ayakları etrafında atak açıları sabitken, $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ merkez açıları meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri, doğrusal kanal akım eksenine yerleştirilen ve narinlik katsayısı, $n=2$ olan köprü ayağı etrafında $\alpha=90^\circ$ atak açısında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliğine bölünerek elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin ($Hd_{\max, \alpha(kıv.)} / Hd_{\max, 90(dogeks.)}$), kıvrım akım eksenine boyunca narinlik katsayısı ile değişimi, Şekil 4.36. ve 4.37.'de gösterilmiştir.

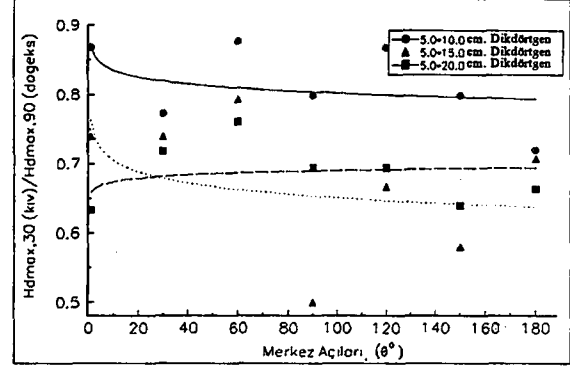
Şekil 4.36. ve 4.37.'de görüldüğü gibi kanal kıvrımı boyunca, ayağın narinlik katsayısı ne olursa olsun, kıvrımın mansabına gidildikçe rölatif oyulmada bir azalma gözlenmektedir.

Ayrıca, narinlik katsayısı $n \leq 2$ olan ayaklarda rölatif oyulma derinliği daha fazla olmaktadır. Bunun da sebebi, kanal cidar etkisine benzer olarak ayağın akıma dik genişliği arttıkça, sınır tabaka ayrılma hattı ile ayağın yüzeyi çakışmakta ve oyulmayı meydana getiren vorteksin gücü düşmekte ve buna paralel olarak oyulma derinliği azalmaktadır.

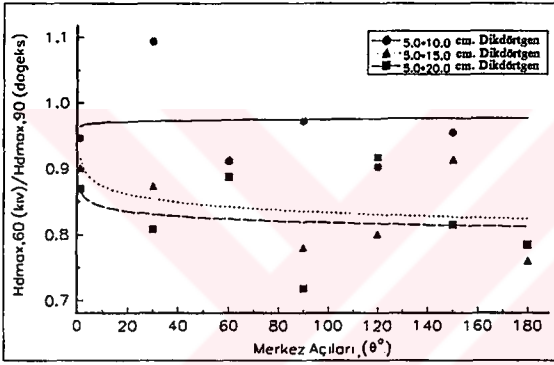




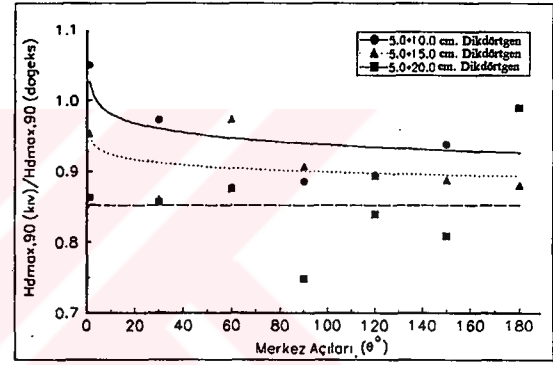
a) 0° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



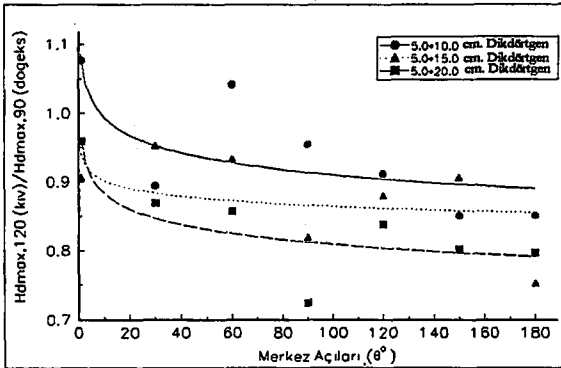
b) 30° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



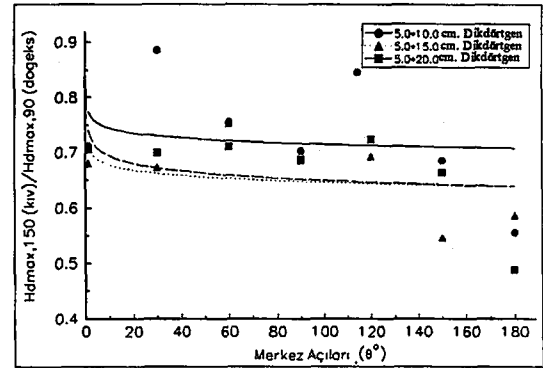
c) 60° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



d) 90° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

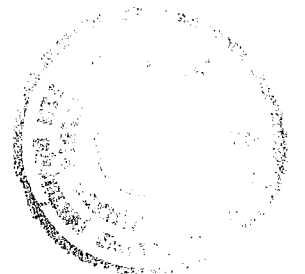


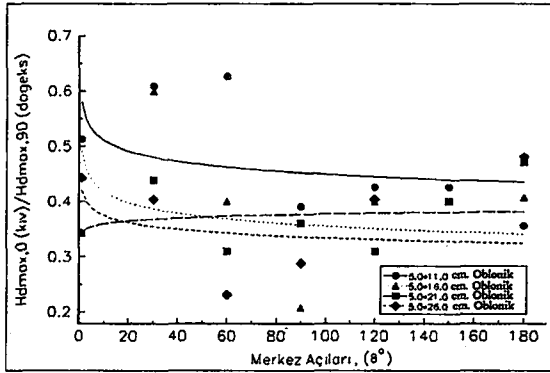
e) 120° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



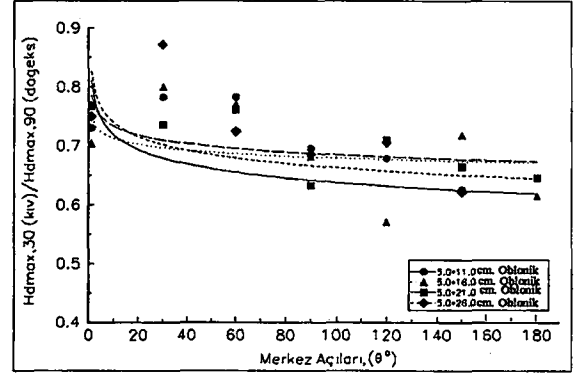
f) 150° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

Şekil 4.36. Kıvrımın Akım Eksenı Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Rölative Oyulmanın $(Hd_{max, \alpha(kv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)})$ -Narinlikle (n) Değişimi

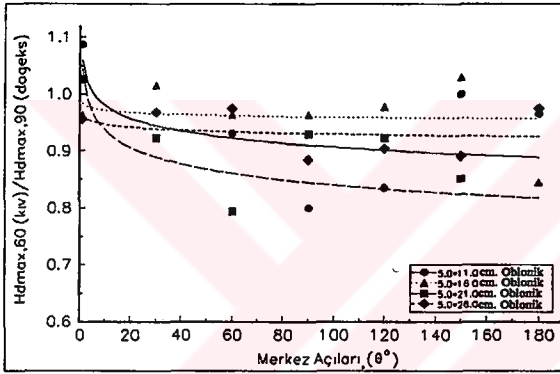




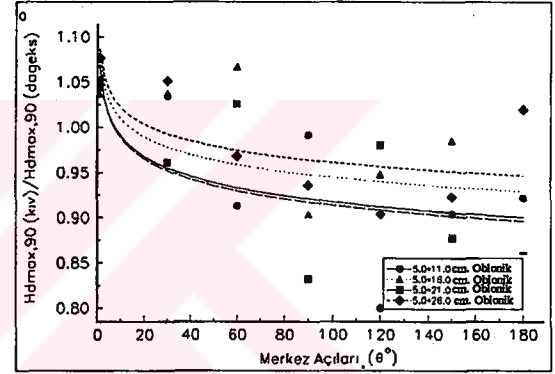
a) 0° Atak Açısında Oblonik Ayak



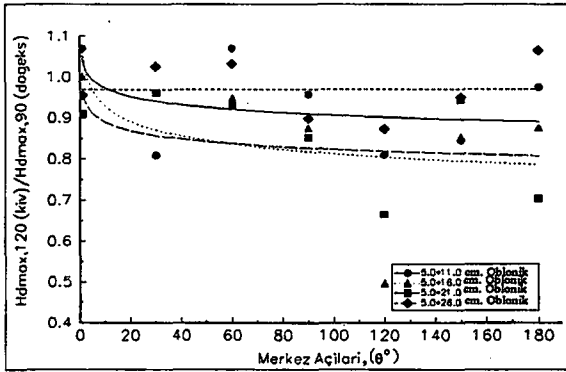
b) 30° Atak Açısında Oblonik Ayak



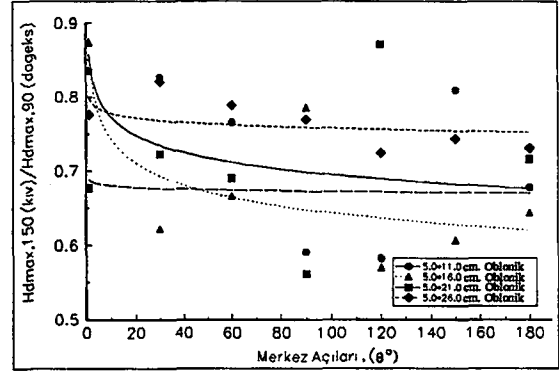
c) 60° Atak Açısında Oblonik Ayak



d) 90° Atak Açısında Oblonik Ayak



e) 120° Atak Açısında Oblonik Ayak



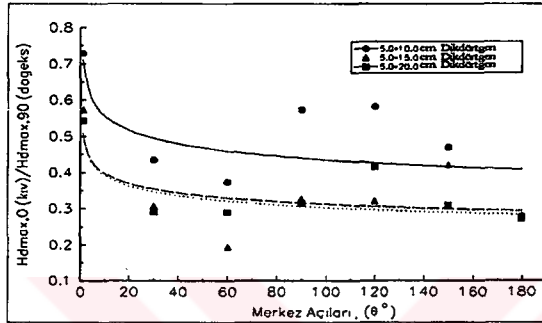
f) 150° Atak Açısında Oblonik Ayak

Şekil 4.37. Kıvrımın Akım Eksenı Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kw.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}$)-Narinlikle (n) Değişimi

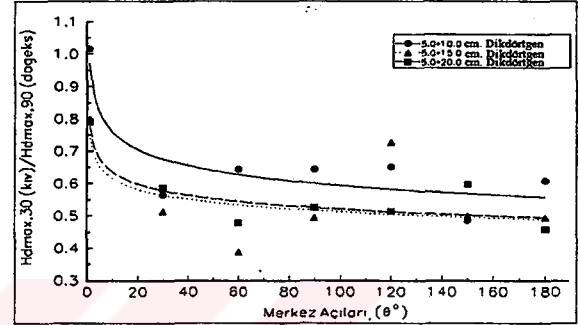


4.5.2.1.1.3. Kıvrımın İç Kenarı Boyunca Atak Açısı Sabitken Rölatif Oyulmanın Köprü Ayağı Narinlik Katsayısıyla Değişimi

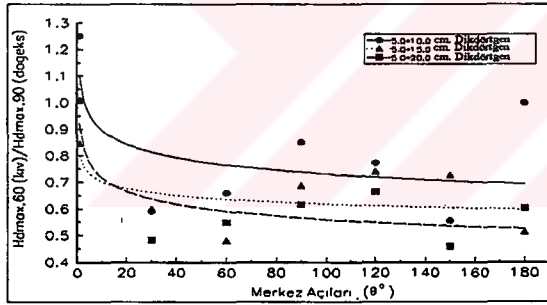
Kanal kıvrımının iç kenarı boyunca, dikdörtgen ve oblonik kesitli köprü ayakları etrafında atak açıları sabit tutularak, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ merkez açılarında her 30° 'de bir



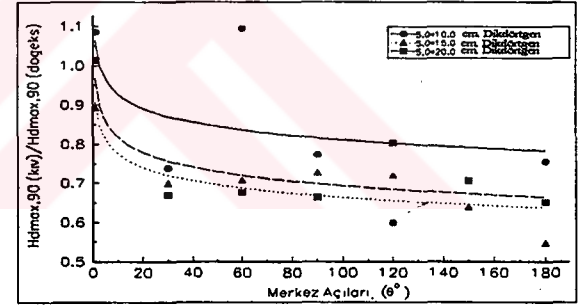
a) 0° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



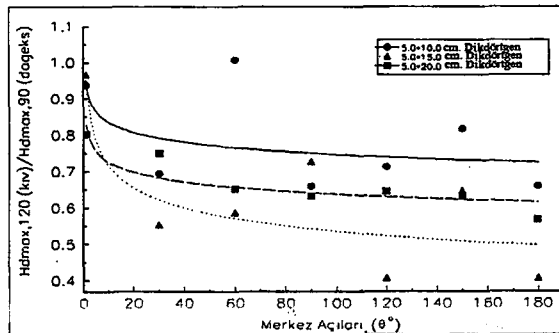
b) 30° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



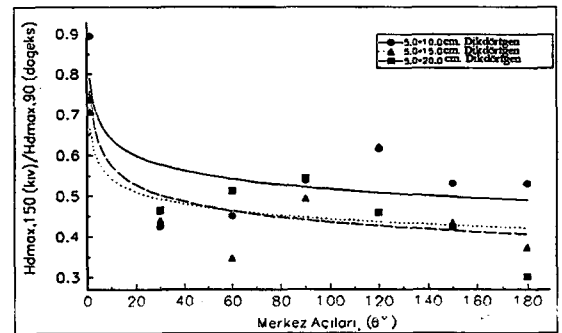
c) 60° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



d) 90° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



e) 120° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

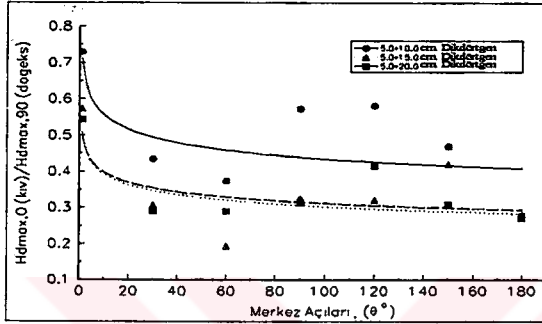


f) 150° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

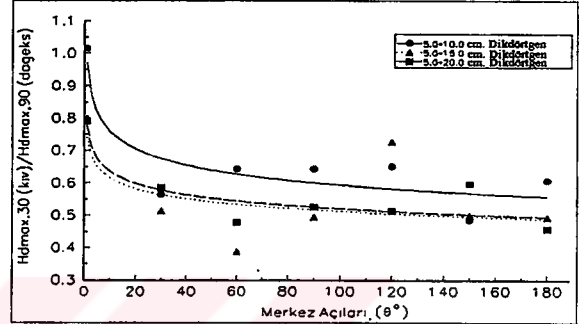
Şekil 4.38. Kıvrımın İç Kenarında Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}$)-Narinlikle (n) Değişimi

4.5.2.1.1.3. Kıvrımın İç Kenarı Boyunca Atak Açısı Sabitken Rölatif Oyulmanın Köprü Ayağı Narinlik Katsayısıyla Değişimi

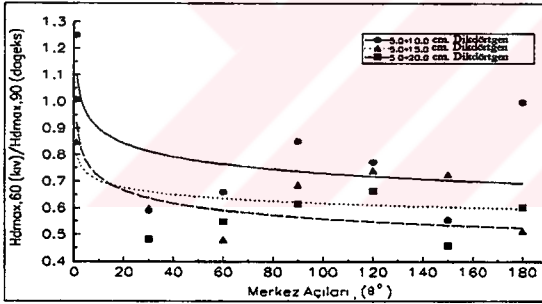
Kanal kıvrımının iç kenarı boyunca, dikdörtgen ve oblonik kesitli köprü ayakları etrafında atak açıları sabit tutularak, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ merkez açılarında her 30° 'de bir



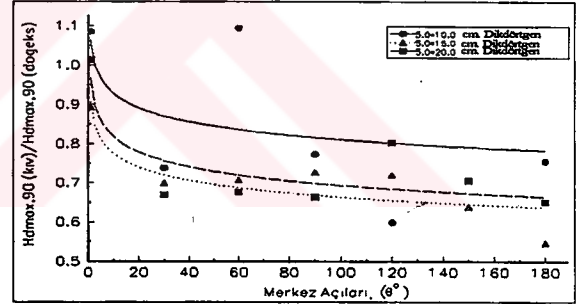
a) 0° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



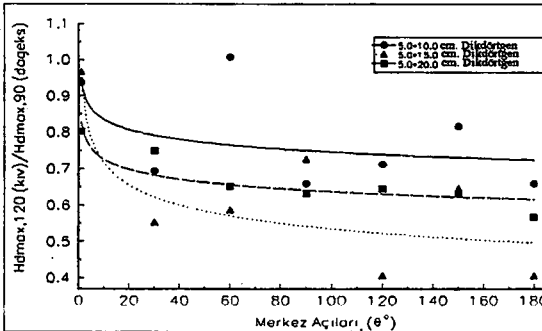
b) 30° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



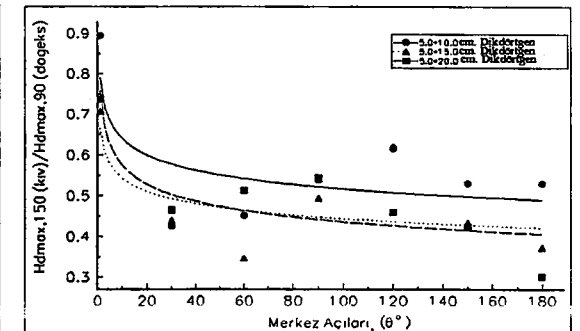
c) 60° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak



d) 90° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

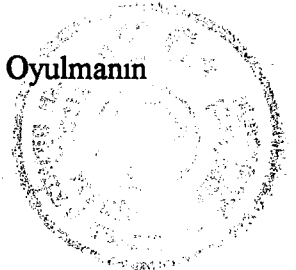


e) 120° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

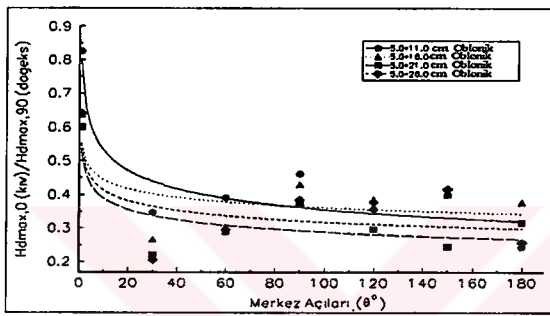


f) 150° Atak Açısında Dikdörtgen Ayak

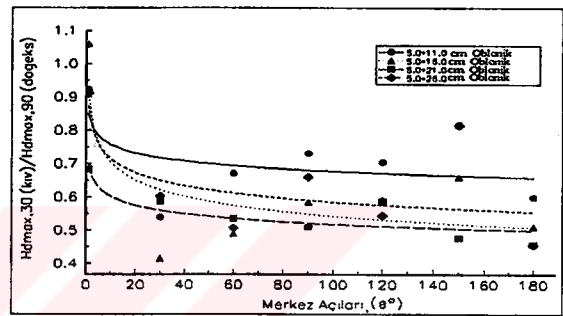
Şekil 4.38. Kıvrımın İç Kenarında Boyunca Dikdörtgen Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \alpha(kv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}$)-Narinlikle (n) Değişimi



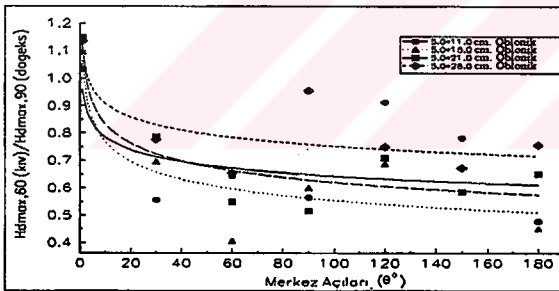
yerleştirilen dikdörtgen ve oblonik ayakların etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri, diğer eksenlerde olduğu gibi doğrusal kanal akım ekseninde narinlik katsayısı, $n=2$ olan köprü ayağı etrafında meydana gelen maksimum denge oyulma derinliğine bölünerek elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin $((Hd_{max, \alpha(kiv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}))$, ayağın narinlik katsayılarıyla (n) değişimi Şekil 4.38. ve Şekil 4.39.'da gösterilmiştir.



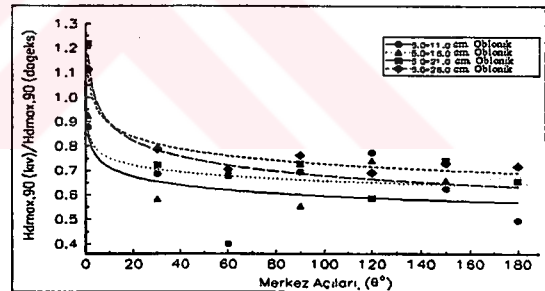
a) 0° Atak Açısında Oblonik Ayak



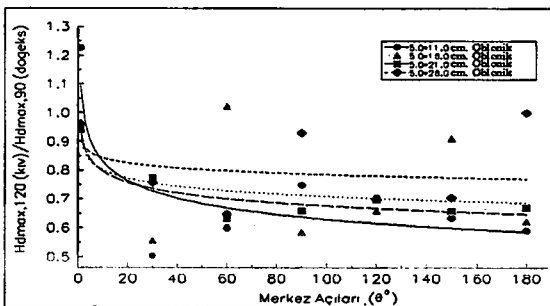
b) 30° Atak Açısında Oblonik Ayak



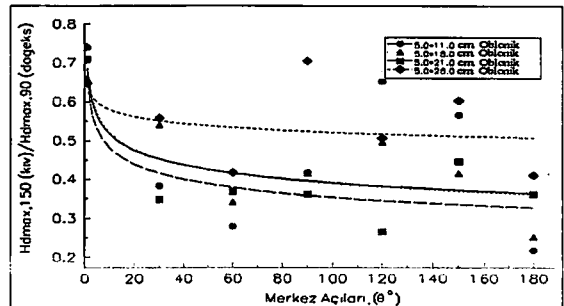
c) 60° Atak Açısında Oblonik Ayak



d) 90° Atak Açısında Oblonik Ayak



e) 120° Atak Açısında Oblonik Ayak



f) 150° Atak Açısında Oblonik Ayak

Şekil 4.39 Kıvrım İç Kenarı Boyunca Oblonik Ayaklar İçin Rölatif Oyulmanın $((Hd_{max, \alpha(kiv.)} / Hd_{max, 90(dogeks.)}))$ -Narinlikle (n) Değişimi.

4.5.2.2. Kanal Kıvrımı Boyunca Rölatif Oyulma İle Narinlik Sayısı İlişkisinin İncelenmesi

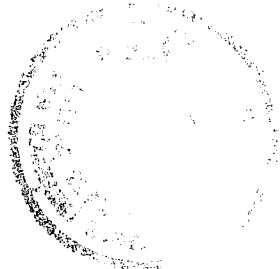
Kanal kıvrımı boyunca, kullanılan dikdörtgen ve oblonik ayakların tüm kesitleri için, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ merkez açıları arasındaki her $\theta=30^\circ$ 'lik enkesitlerde, kıvrımın dış kenara, akım eksenine ve iç kenara $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ atak açılarında yerleştirilen köprü kenar ve orta ayakları etrafında maksimum denge oyulma derinlikleri tesbit edilmiştir. Sonra da, doğrusal kanal eksenine, $\alpha=90^\circ$ atak açıda yerleştirilen dikdörtgen ayaklarda ($n=2$ narinlikli), oblonik ayaklarda ($n=2.2$ narinlikli) orta ayak etrafındaki maksimum denge oyulma derinlikleri baz alınmış, çeşitli açılardan değerlendirilmiştir.

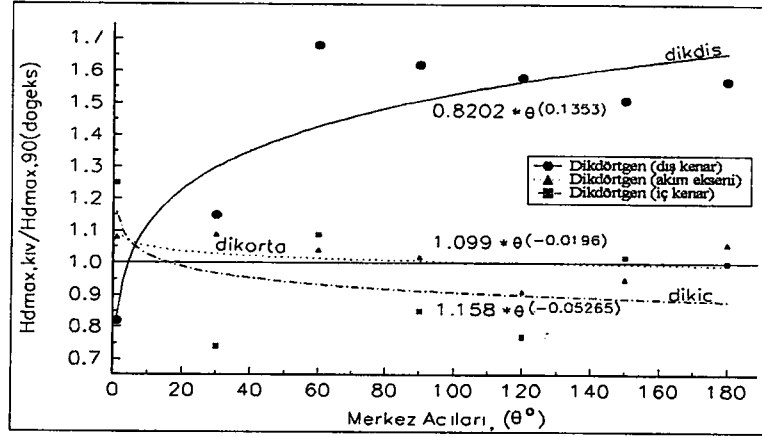
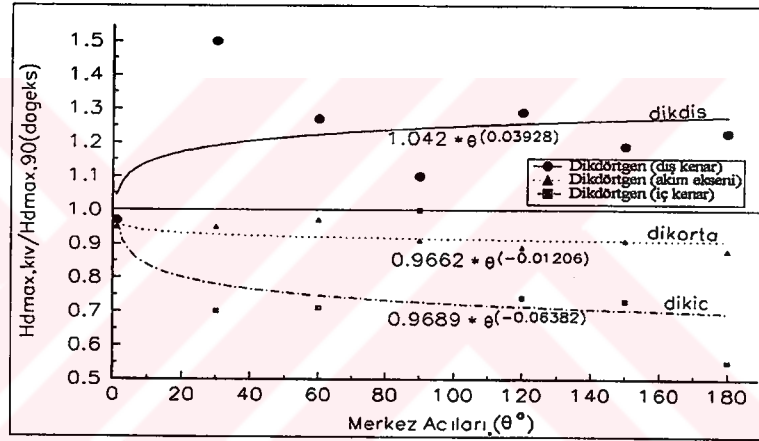
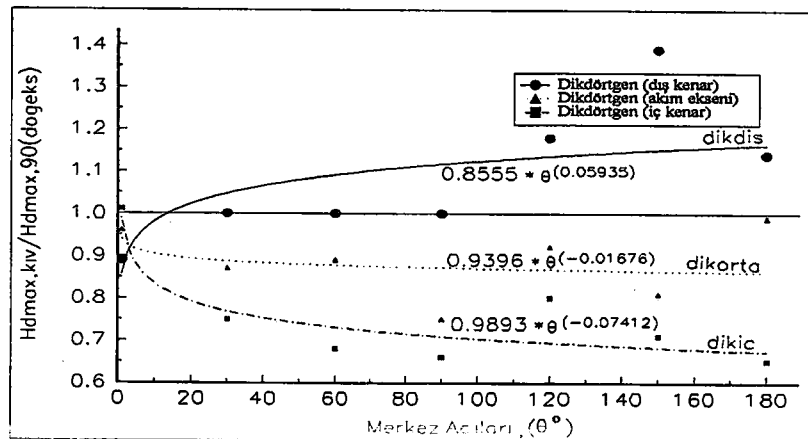
4.5.2.2.1. Kanal Kıvrımı Boyunca Dikdörtgen Kesitli Ayaklarda Rölatif Oyulma-Narinlik İlişkisinin İncelenmesi

Dikdörtgen kesitli ayaklar etrafında ölçülen maksimum denge oyulma derinlikleri, baz olarak alınan ayak etrafındaki maksimum oyulma derinliklerine bölünerek rölatif oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Daha sonra kanal boyunca her merkez açıda, herbir ayak için tesbit edilen maksimum rölatif oyulma derinliklerinin ($Hd_{max, \theta(kıv)} / Hd_{max, 90(n=2, doğ. eks.)}$), merkez açılarıyla (θ) değişimi Şekil 4.40.'da ayrı ayrı gösterilmiştir.

Şekil 4.40.'da görüldüğü gibi maksimum rölatif oyulma derinliği narinlik katsayısı, $n=2$ olan dikdörtgen ayakta kanalın dış kenarında oluşmaktadır. Bunun da sebebi, $n=2$ narinlikli ayağın akıma dik genişliğinin, kanalın cidar etki mesafesi içinde kalması şeklinde düşünülmüştür. Narinliklere göre, rölatif oyulma derinliklerini veren bağıntılar, ait oldukları eğriler üzerinde tek tek gösterilmiştir.

Pratik çözümler için doğrusal kanal akım ekseninde bulunan değeri, dış kenarda 1.6, akım ekseninde 1.00 ve iç kenarda ise, 0.9 katsayılarıyla çarpmak yeterli olacaktır.



a) Narinlik Katsayısı, $n=2$ Olan Dikdörtgen Kesitli Ayakb) Narinlik Katsayısı, $n=3$ Olan Dikdörtgen Kesitli Ayakc) Narinlik Katsayısı, $n=4$ olan Dikdörtgen Kesitli Ayak

Şekil 4.40. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda Dikdörtgen Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulmanın ($Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90}(n=2, dog.eks.)$) Merkez Açılıyla (θ) Değişimi

Dikdörtgen kesitli ayakların tamamında geçerli bir bağıntı elde edebilmek için, kanal boyunca her kesitte ayrı ayrı, maksimum rölatif oyulma derinliklerinin aritmetik ortalamaları alınarak, $Hd_{max, \theta(kiv)} / Hd_{max, 90(n=2, do\ddot{g}.eks.)}$ merkez açılarıyla, (θ) değişimi Şekil 4.41.'de gösterilmiştir. Şekil 4.41.'deki grafikte verilen eğriler, ayakların tamamı göz önüne alınarak elde edilmiştir.

Şekil 4.41.'deki grafikten görüldüğü gibi, kanal kıvrımının dış kenarında maksimum rölatif oyulma, akım ekseninde doğrusal kanal akım eksenine yakın bir rölatif oyulma derinliği, iç kenarında ise, minimum rölatif oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Kıvrımın çeşitli merkez açılarında; dış kenarda, akım ekseninde ve iç kenarda narinlik sayısı ne olursa olsun, herhangi bir dikdörtgen ayakda rölatif oyulma derinliğini bulmak için, doğrusal kanal akım ekseninde hesaplanan veya ölçülen oyulma derinliklerini aşağıda, denklem (4.15), (4.16) ve (4.17) de verilen bağıntılarla çarpmak yeterli olacaktır.

Kıvrımlı kanal dış kenardaki dikdörtgen kesitli köprü kenar ayağı için:

$$K_{\theta, dd} = 0.9062 * \theta^{(0.07949)} \quad (4.15)$$

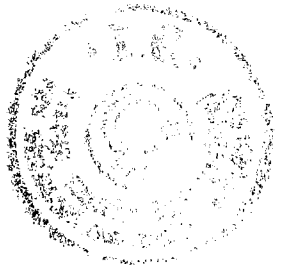
Kıvrımlı kanal akım eksenindeki dikdörtgen kesitli köprü ayağı için:

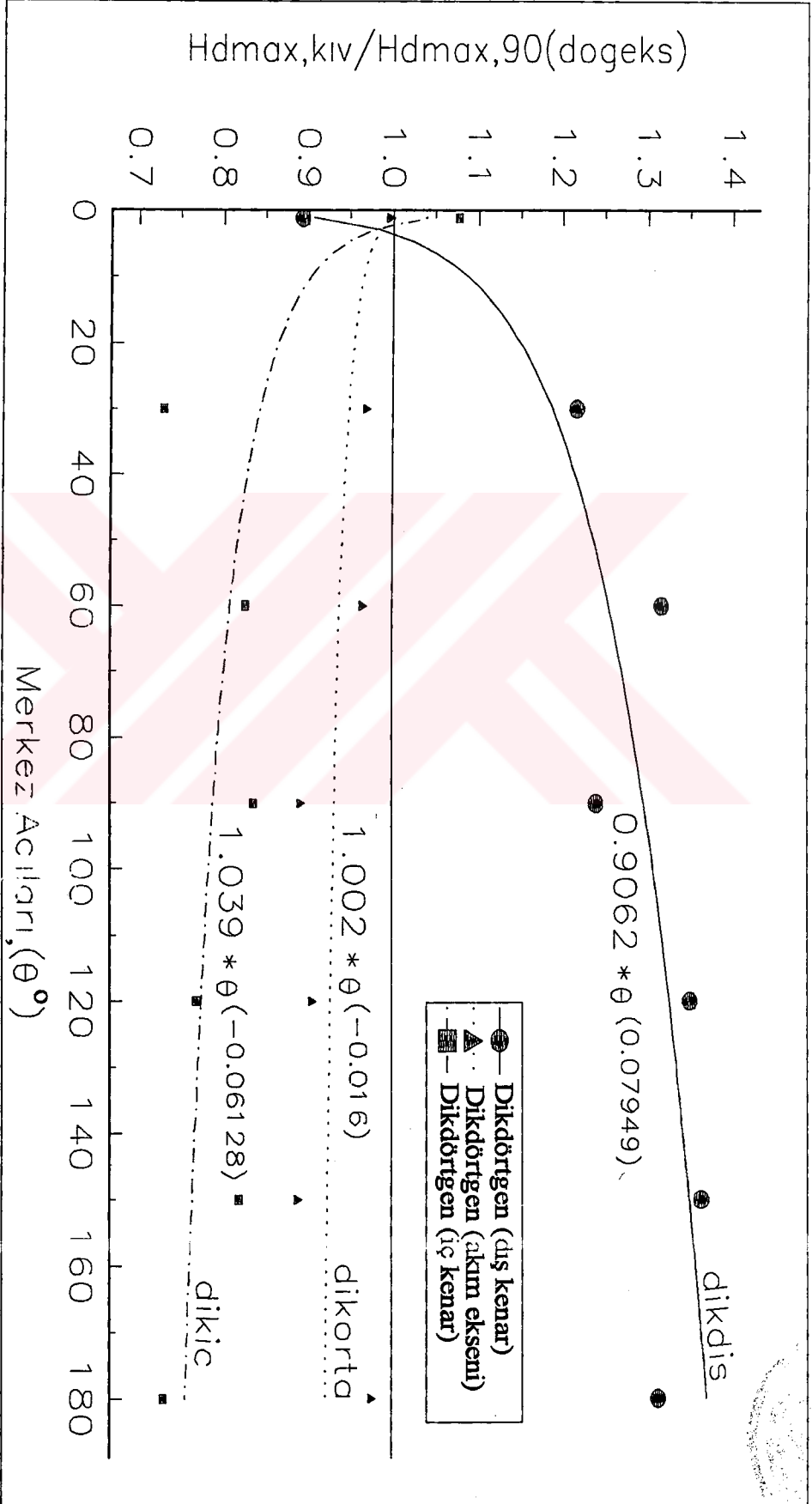
$$K_{\theta, ad} = 1.002 * \theta^{(-0.016)} \quad (4.16)$$

Kıvrımlı kanal iç kenardaki dikdörtgen kesitli kenar ayak için:

$$K_{\theta, id} = 1.039 * \theta^{(-0.06128)} \quad (4.17)$$

Burada, θ , derece cinsinden merkez açıdır. Ancak, pratik çözümlerde, merkez açısı, $\theta \geq 60^\circ$ olan kıvrım bölgesinde dış kenardaki oyulmalarda, rölatif oyulma derinliği katsayısı, $K_{\theta, dd} = Hd_{max, \theta(kiv)} / Hd_{max, 90}(do\ddot{g}.eks.) = 1.4$, akım ekseninde, $K_{\theta, ad} = 1.0$ ve iç kenarda ise, $K_{\theta, id} = 0.8$ alınabilir.



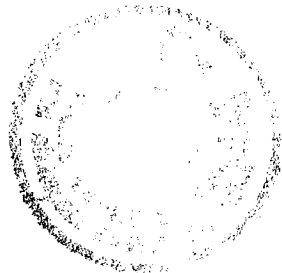


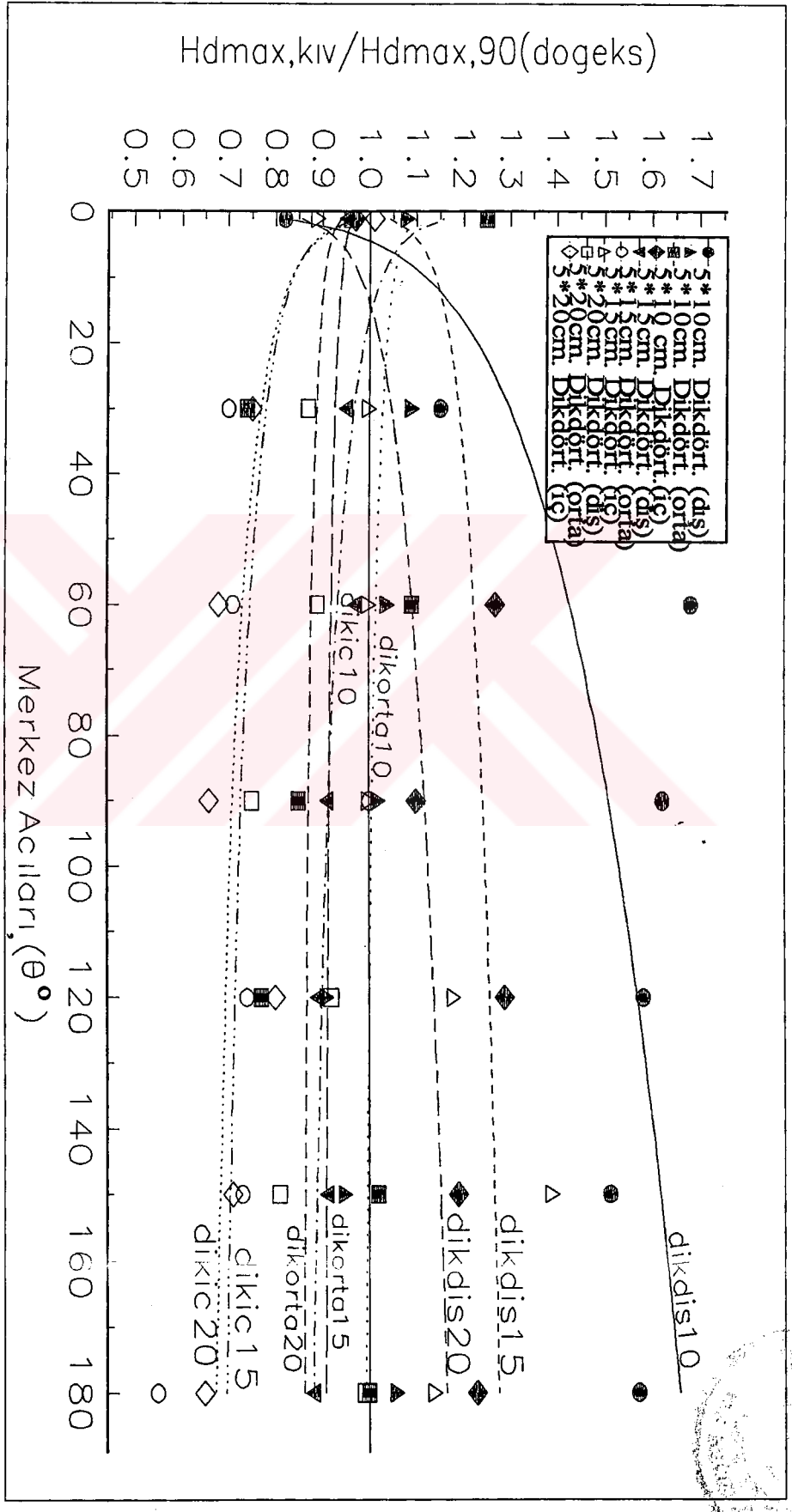
Şekil 4.41. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyuğuna Derinliğinin ($H_{dmax}, \theta(kv.) / H_{dmax,90}(n=2, dog. eks.)$), Merkez Açılıyla(θ) Değişimi

Şekil 4.42.'de daha önce tek tek her narinlik için verilen rölatif oyulma derinliği ile merkez açıları arasındaki ilişki aynı grafikte gösterilmiştir.

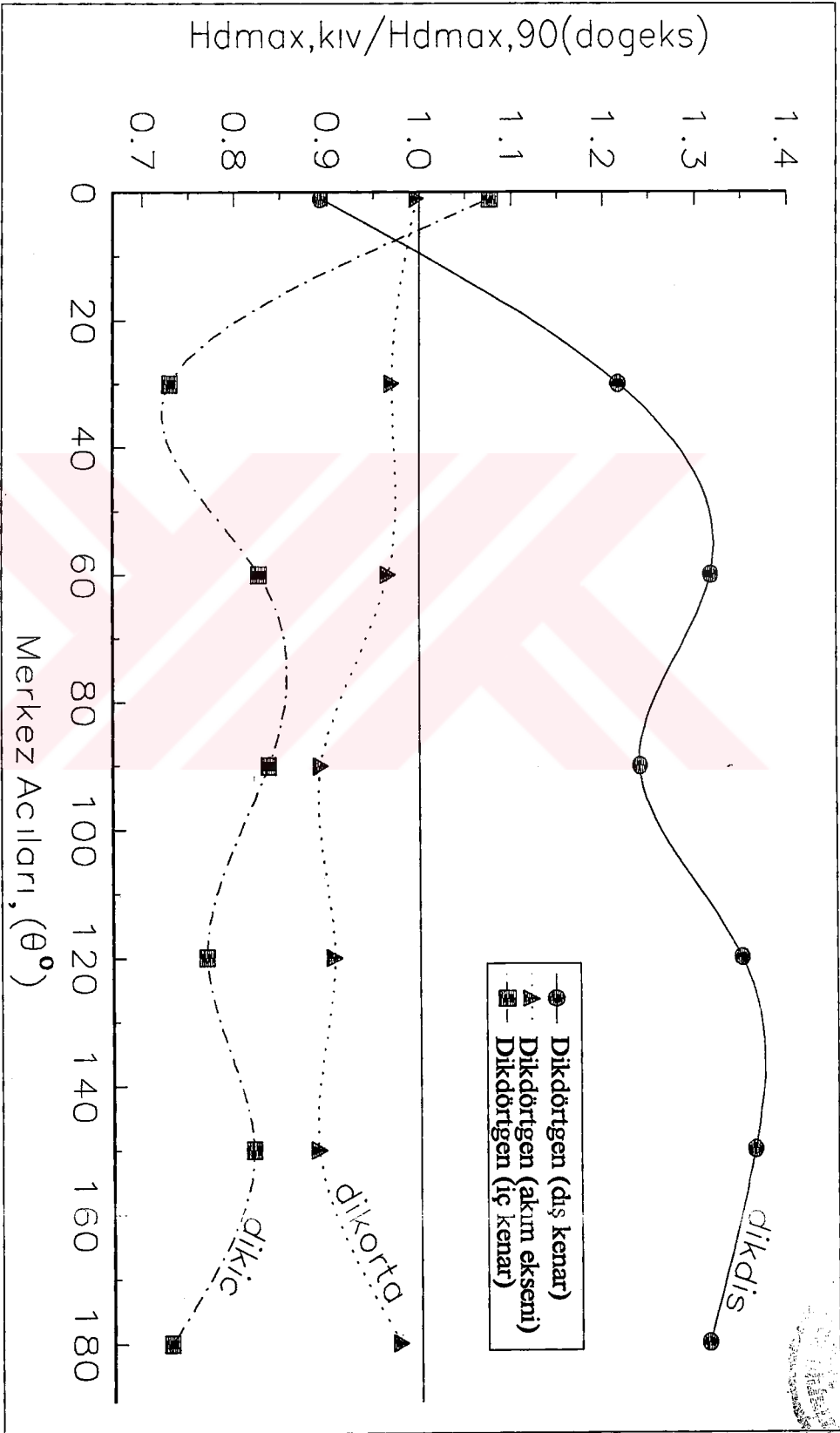
Şekil 4.42. incelendiğinde, pratik yaklaşımlar için şunları söylemek mümkündür. Herhangi bir akarsu kıvrımına inşaa edilecek olan hidrolik yapı $n > 2$ ise, doğrusal bölgelerde akım eksenlerine göre, kıvrımların dış kenarındaki ayaklarda oluşan rölatif oyulma derinlik katsayısı 1.20, iç kenarda ise 0.75 alınabilir. Şayet yapılan hidrolik yapıda $n \leq 2$ ise, kıvrım dış kenarında rölatif oyulma derinlik katsayısı 1.6, akım ekseninde 1.0 ve içkenarda ise, 0.9 alınabilir.

Şekil 4.43.'de ise, kıvrım boyunca her üç ekseninde Şekil 4.41.'de verilen ilişki, yerel olarak incelenmiştir. Burada da, kıvrım girişinde dış kenarda rölatif oyulmanın minimum, iç kenarda ise maksimum olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, kıvrım içinde dış kenarda $\theta = 60^\circ$ ve $\theta = 150^\circ$ de maksimum rölatif oyulma derinlikleri, iç kenarda $\theta = 90^\circ$ ve $\theta = 140^\circ$ de minimum rölatif oyulma derinlikleri gözlenmektedir.

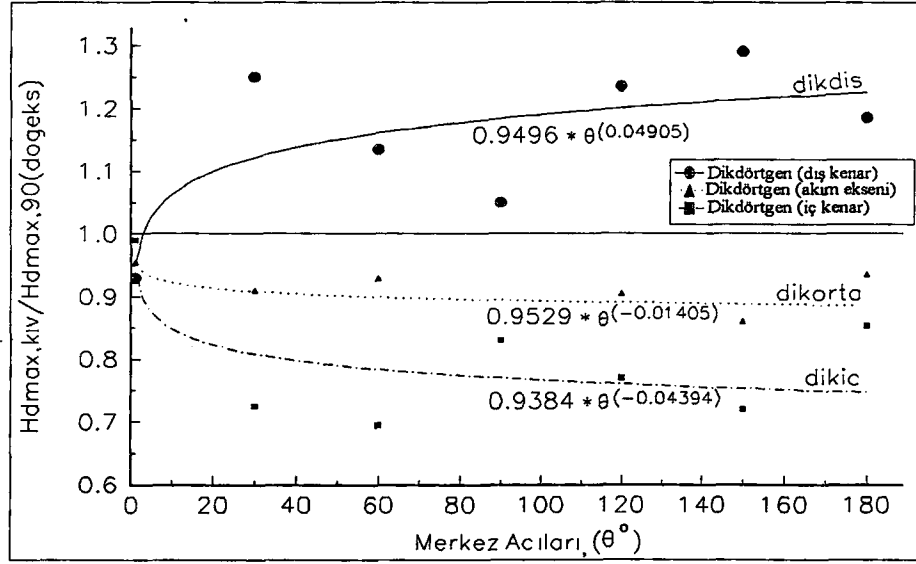




Şekil 4.42. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Tüm Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyluma Derinliğinin ($H_{dmax,kiv}/H_{dmax,90}(n=2, dogeks.)$), Merkez Açılıyla(θ) Değişimi



Şekil 4.43. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyuлма Derinliğinin ($H_{dmax}, \theta(kiv.) / H_{dmax, 90(n=2, dog. eks.)}$), Merkez Açılıyla(θ) Yerel Değişimi



Şekil 4.44. Kuvrim Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Oyulmaya Etkili Genişliği, Cidar Etki Sahası Dışında Kalan Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum rölâtif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max, \theta(kiv.)} / Hd_{max, 90(n=2, \text{doğ. eks.})}$), Merkez Açılıyla (θ) Değişimi

Kanalın cidar etki alanı dışındaki bölgede kalan dikdörtgen ayaklardaki rölâtif oyulma derinliğinin merkez açılarıyla değişimi incelenmiştir. Bunun için, göz önüne alınan merkez açılarında, narinlik katsayısı, $n > 2$ olan ayaklardaki maksimum rölâtif oyulma derinliklerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Daha sonra, bunlarla merkez açılarınun değişimi Şekil 4.44.'de gösterilmiştir. Kanal kıvrımının dış kenarında, akım ekseninde ve iç kenarında bu değişimi gösteren bağıntılar, sırasıyla denklem (4.18), (4.19) ve (4.20)'de verilmiştir. θ , Merkez açısı derece cinsindendir.

$$K_{\theta, dd} = 0.9496 * \theta^{(0.04905)} \quad (4.18)$$

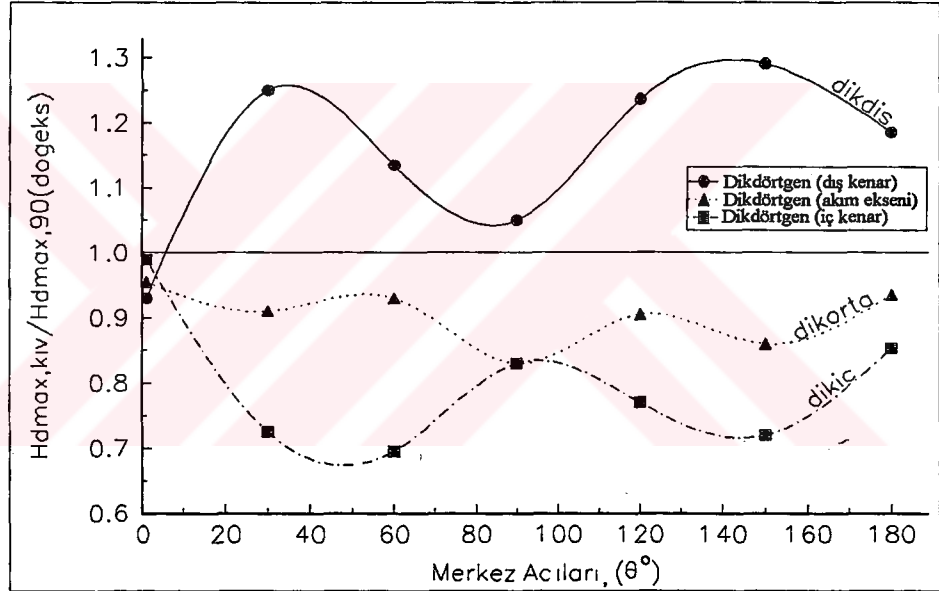
$$K_{\theta, ad} = 0.9529 * \theta^{(-0.01405)} \quad (4.19)$$

$$K_{\theta, id} = 0.9384 * \theta^{(-0.04394)} \quad (4.20)$$

Pratik çözümler için, Şekil 4.44.'de görüldüğü gibi cidar etki alanının dışında kalan ayakların etrafında meydana gelen maksimum oyulma derinliklerini bulmak için, rölâtif oyulma derinlik katsayıları, kıvrımın dış kenarında 1.2, akım ekseninde 0.95, iç kenarında

ise, 0.75 alınarak, doğrusal kanal akım ekseninde elde edilen maksimum oyulma derinliğiyle çarpılmalıdır.

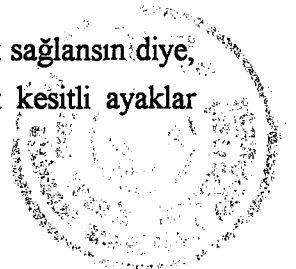
Şekil 4.45.'de ise, aynı şekilde, ayağın oyulmaya etkili genişliğinin cidar etki sahasının dışında kalan ayaklar için yerel olarak rölatif oyulmaların merkez açılarıyla değişimi incelenmiştir. Şekil 4.45.'te görüldüğü gibi, kıvrım giriş kesitinde minimum rölatif oyulma derinliği dış kenarda, maksimum rölatif oyulma da iç kenarda meydana gelmektedir. Ayrıca, kıvrım içinde maksimum oyulma, dış kenarda ve $\theta=150^\circ$ merkez açıda meydana gelmektedir. Minimum oyulma da, iç kenarda ve $\theta=60^\circ$ de meydana gelmektedir.



Şekil 4.45. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Oyulmaya Etkili Genişliği, Cidar Etki Sahası Dışında Kalan Dikdörtgen Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin ($H_{dmax, \theta(kıv.)} / H_{dmax, 90}(n=2, \text{doğ. eks.})$), Merkez Açılıyla (θ) Yerel Olarak Değişimi

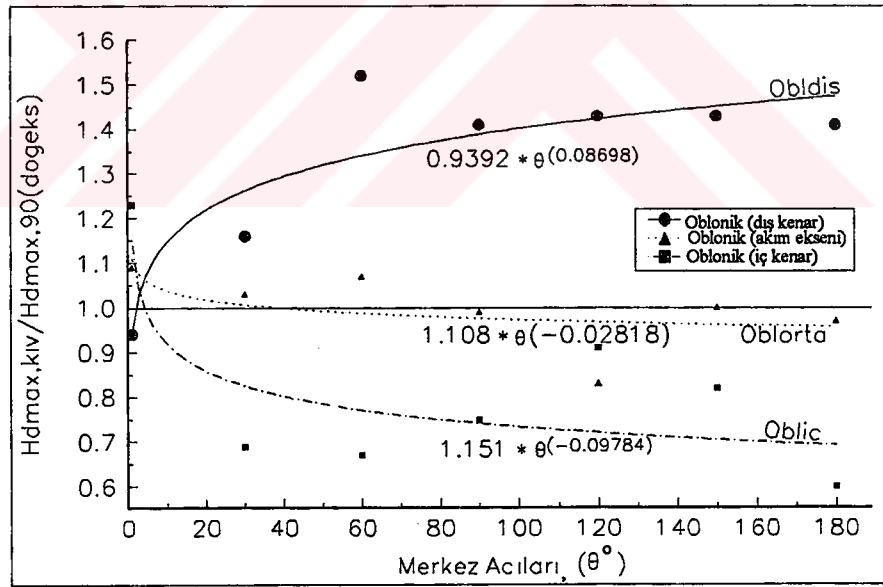
4.5.2.2.2. Kanal Kıvrımı Boyunca Oblonik Kesitli Ayaklarda Rölatif Oyulma-Narinlik İlişkisinin İncelenmesi

Oblonik kesitli ayaklarda da, dikdörtgen kesitli ayaklarla birliktelik sağlansın diye, doğrusal kanal akım eksenine $\alpha=90^\circ$ atak açısında yerleştirilen oblonik kesitli ayaklar



etrafında ölçülen maksimum denge oyulma derinlikleri baz olarak alınmıştır. Daha sonra, kıvrım boyunca kanal dış kenarına, akım eksenine ve iç kenarına yerleştirilen, tüm oblonik kesitli ayaklarda, $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ atak açıları için ölçülmüştür. Tesbit edilen maksimum denge oyulma derinlikleri, baz olarak göz önüne alınan değere bölünmüş, oblonik kesitli ayaklar için, tüm atak açılarındaki rölatif oyulma derinliği elde edilmiştir. Sonra da, kanal boyunca her merkez açıda, hangi atak açıda gerçekleşmişse gerçekleşsin, her bir ayak için, rölatif oyulma derinliklerinin $(H_{dmax, \theta(krv)}) / H_{dmax, 90(n=2, dog. eks.)}$ maksimumu alınarak, merkez açılarla (θ) değişimi Şekil 4.46.'da ayrı ayrı gösterilmiştir.

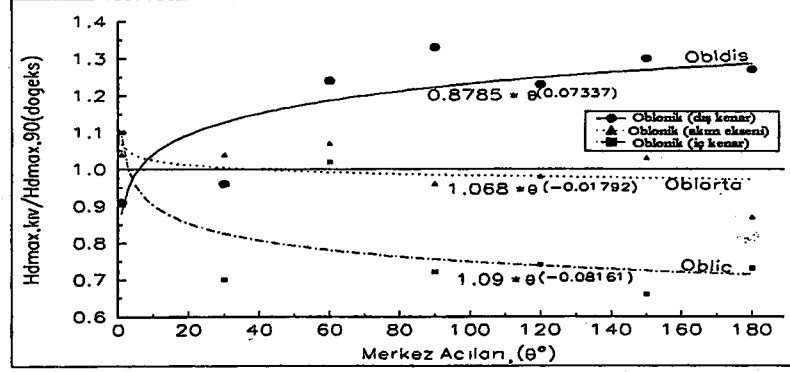
Şekil 4.46.'da görüldüğü gibi, maksimum rölatif oyulma derinliği, narinlik katsayısı ($n=2.2$), olan oblonik ayakta ve kanalın dış kenar ekseninde meydana gelmektedir. Bunun sebebi ise, $n=2.2$ narinlikli ayağın oyulmaya etkili genişliğinin, kanalın cidar etki mesafesi içinde kalması olarak düşünülmüştür. Narinliklere göre, maksimum rölatif oyulma derinliklerini veren bağıntılar, ait oldukları eğriler üzerinde tek tek gösterilmiştir.



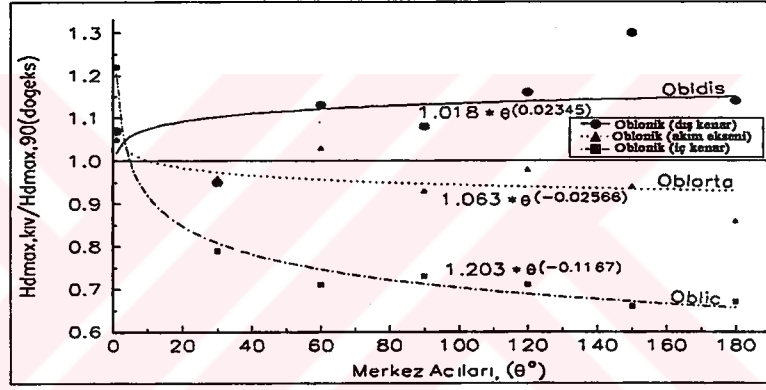
a) Narinlik Katsayısı, $n=(2.2)$ Olan Oblonik Kesitli Ayak

Şekil 4.46. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda Oblonik Kesitli Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulmanın $(H_{dmax, \theta(krv)}) / H_{dmax, 90(n=2, dog. eks.)}$, Merkez Açılıyla (θ) Değişimi

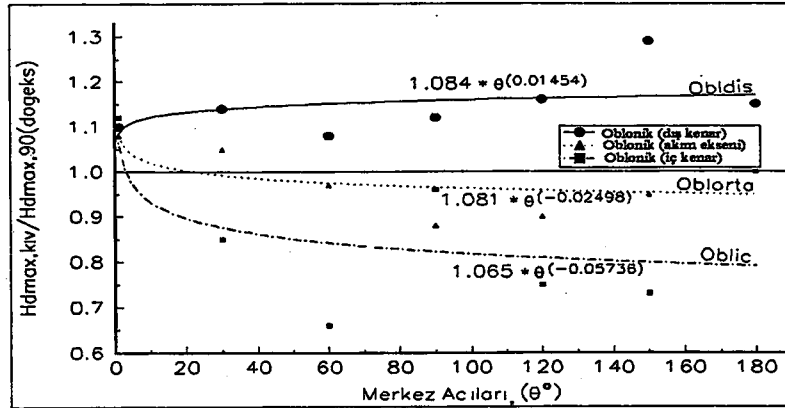
(Şekil 4.46.'nın devamı)



b) Narinlik Katsayısı, (n=3.2) Olan Oblonik Kesitli Ayak



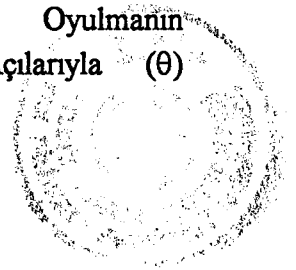
c) Narinlik Katsayısı, (n=4.2) Olan Oblonik Kesitli Ayak



d) Narinlik Katsayısı, (n=5.2) Olan Oblonik Kesitli Ayak

Şekil 4.46. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda Oblonik Kesitli

Ayaklar	İçin	Maksimum	Rölatif	Oyulmanın
($Hd_{max, \theta(kv.)} / Hd_{max, 90(n=2, dog. eks.)}$)	Değişimi	Merkez	Açılarıyla	(θ)



Oblonik kesitli ayakların tamamında geçerli bir bağıntı elde edebilmek için, kanal boyunca, göz önüne alınan tüm kesitlerde, herbir ayak için elde edilen maksimum rölatif oyulma derinliklerinin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Daha sonra, ayak narinlik katsayısı ne olursa olsun, oblonik ayakların tümünde geçerli olmak üzere, aritmetik ortalaması alınmış maksimum rölatif oyulmaların $(H_{d\max, \theta(kiv)} / H_{d\max, 90(n=2, \text{doğ.eks.})})$, merkez açılarıyla, (θ) ilişkisi Şekil 4.47.'de gösterilmiştir.

Şekil 4.47.'deki grafikten görüldüğü gibi, kanal kıvrımının dış kenarında maksimum rölatif oyulma, akım ekseninde doğrusal kanal akım eksenine yakın bir rölatif oyulma, iç kenarda ise, minimum rölatif oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Kıvrımın çeşitli merkez açılarında ve dış kenarda, akım ekseninde veya iç kenarda, narinlik sayısı ne olursa olsun, herhangi bir oblonik ayakda maksimum denge oyulma derinliğini bulmak için, doğrusal kanal akım ekseninde hesaplanan veya ölçülen oyulma derinliklerini aşağıda, denklem (4.21), (4.22) ve (4.23) de verilen bağıntılarla çarpmak gerekmektedir.

Kıvrımlı kanal dış kenardaki oblonik kesitli köprü kenar ayakları için, θ , Derece cinsinden merkez açı olmak üzere;

$$K_{\theta, do} = 0.981 * \theta^{(0.04966)} \quad (4.21)$$

Kıvrımlı kanal akım eksenindeki oblonik kesitli köprü ayakları için:

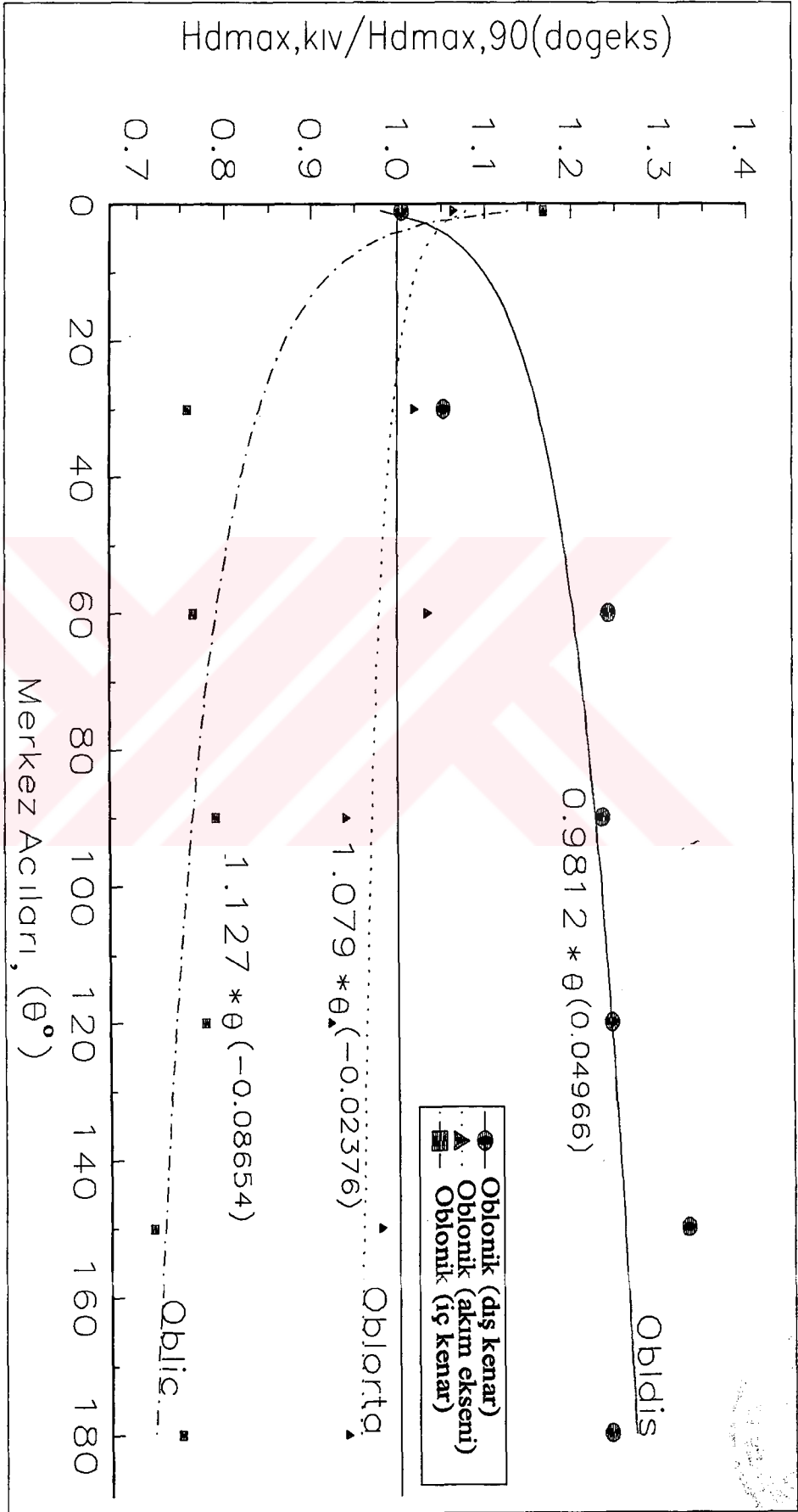
$$K_{\theta, ao} = 1.079 * \theta^{(-0.02376)} \quad (4.22)$$

Kıvrımlı kanal iç kenardaki oblonik kesitli köprü kenar ayakları için:

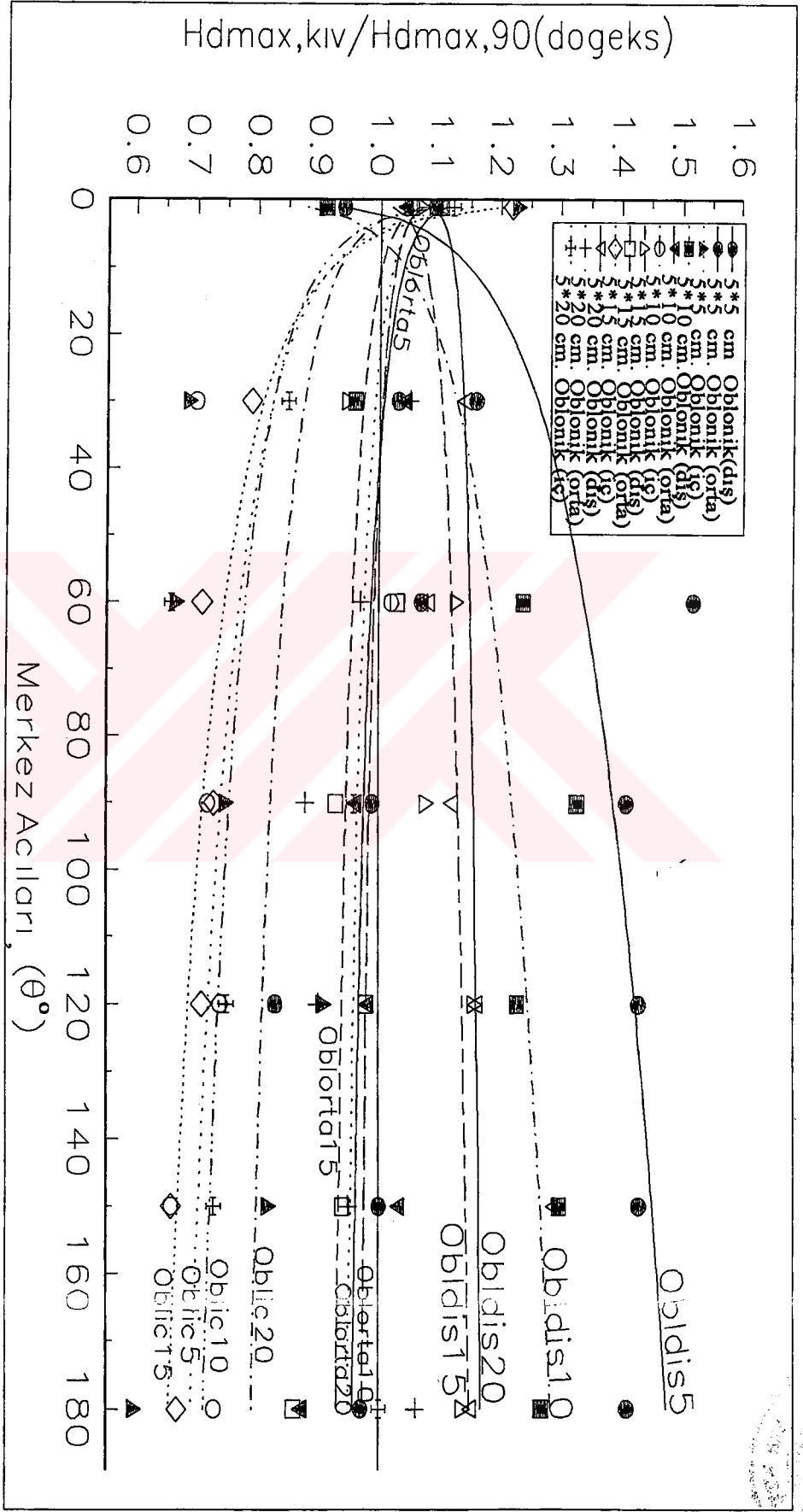
$$K_{\theta, io} = 1.127 * \theta^{(-0.08654)} \quad (4.23)$$

Ancak, pratik çözümlerde, merkez açısı, $\theta \geq 60^\circ$ olan kıvrım bölgesinde dış kenardaki oyulmalarda, maksimum rölatif oyulma derinliği katsayısı, $K_{\theta, do} = H_{d\max, \theta(kiv)} / H_{d\max, 90}(\text{doğ.eks.}) = 1.30$, akım ekseninde, $K_{\theta, ao} = 1.0$ ve iç kenarda ise, $H_{\theta, io} = 0.75$ alınabilir.

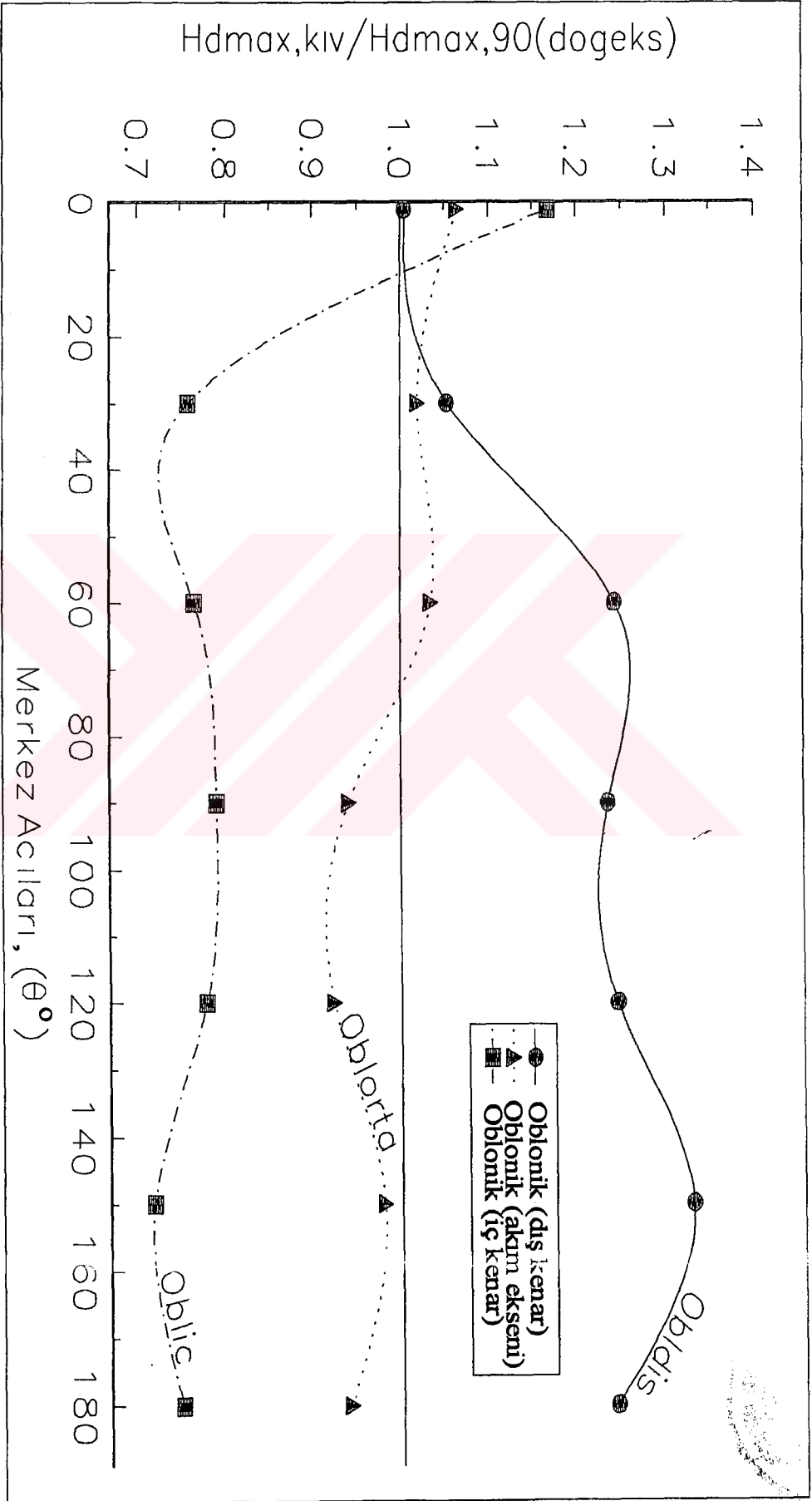
Şekil 4.48.'de ise, daha önce Şekil 4.46.'da tek tek her narinlik için verilen rölatif oyulma derinliği ile merkez açıları arasındaki ilişki aynı grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.47. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyuлма Derinliğinin ($H_{dmax,kiv}/H_{dmax,90}(n=2.2,dog.eks.)$), Merkez Açılıyla (θ) Değişimi



Şekil 4.48. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Tüm Oblonk Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyluma Derinliğinin ($Hd_{max}, \theta_{kiv} / Hd_{max, 90} (n=2, \text{doğ. eks.})$), Merkez Açılıyla (θ) Değişimi

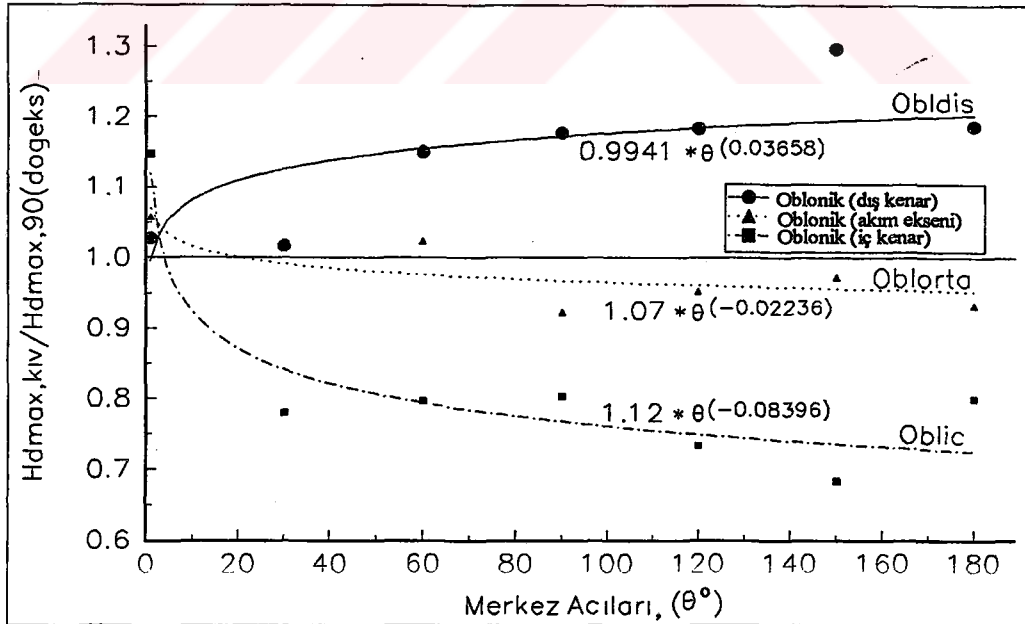


Şekil 4.49. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenar Ekseninde, Narinlik Ne Olursa Olsun Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyuлма Derinliğinin ($H_{dmax,kiv}/H_{dmax,90}(n=2, dogeks.)$), Merkez Açılıyla (θ) Yerel Değişimi

Şekil 4.48.'de görüldüğü gibi, pratik yaklaşımlar için şunları söylemek mümkündür: Herhangi bir akarsu kıvrımına inşaa edilecek olan hidrolik yapıda, $n > 2$ ise, doğrusal bölgelerde akım eksenlerine göre, kıvrımların dış kenarında oblonik kesitli hidrolik yapı için rölatif oyulma derinlik katsayısı 1.20, iç kenarında ise 0.75 alınabilir. Şayet inşaa edilecek hidrolik yapıda $n \leq 2$ ise, kıvrım dış kenarında rölatif oyulma derinlik katsayısı 1.45, akım ekseninde 1.00 ve iç kenarda ise, 0.80 alınabilir.

Şekil 4.49.'da ise, kıvrım boyunca dış kenar, akım eksen ve iç kenar için Şekil 4.47'de verilen ilişki, yerel olarak incelenmiştir. Burada da, kıvrım girişinde rölatif oyulmanın, dış kenarda minimum, iç kenarda ise, maksimum olduğu görülmektedir. Ayrıca, maksimum rölatif oyulma derinlikleri kıvrımın dış kenarında $\theta = 60^\circ$ ve $\theta = 150^\circ$ de, iç kenarında ise, $\theta = 90^\circ$ ve $\theta = 120^\circ$ de görülmektedir.

Minimum rölatif oyulma derinliği ise, iç kenarda $\theta = 150^\circ$ meydana gelmektedir.



Şekil 4.50. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Cidar Etki Alanı Dışına Taşan Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max, \theta(kıv.)} / Hd_{max, 90(n=2, doğ. eks.)}$), Merkez Açılıyla (θ) Değişimi

Kanalın cidar etki alanı dışındaki bölgede kalan oblonik ayaklardaki rölatif oyulma derinliğinin merkez açılarıyla değişimi incelenmiştir. Bunun için, göz önüne alınan merkez açılarında, narinlik katsayısı ($n > 2.2$), olan oblonik kesitli ayaklardaki maksimum rölatif oyulma derinliklerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Daha sonra, bunlarla merkez açılarının değişimi Şekil 4.50.'de gösterilmiştir. Kanal kıvrımı dış kenarında, akım ekseninde ve iç kenarında bu değişimi gösteren bağıntılar, sırasıyla denklem (4.24), (4.25) ve (4.26)'de verilmiştir. θ , merkez açısı, derece cinsinden alınmıştır.

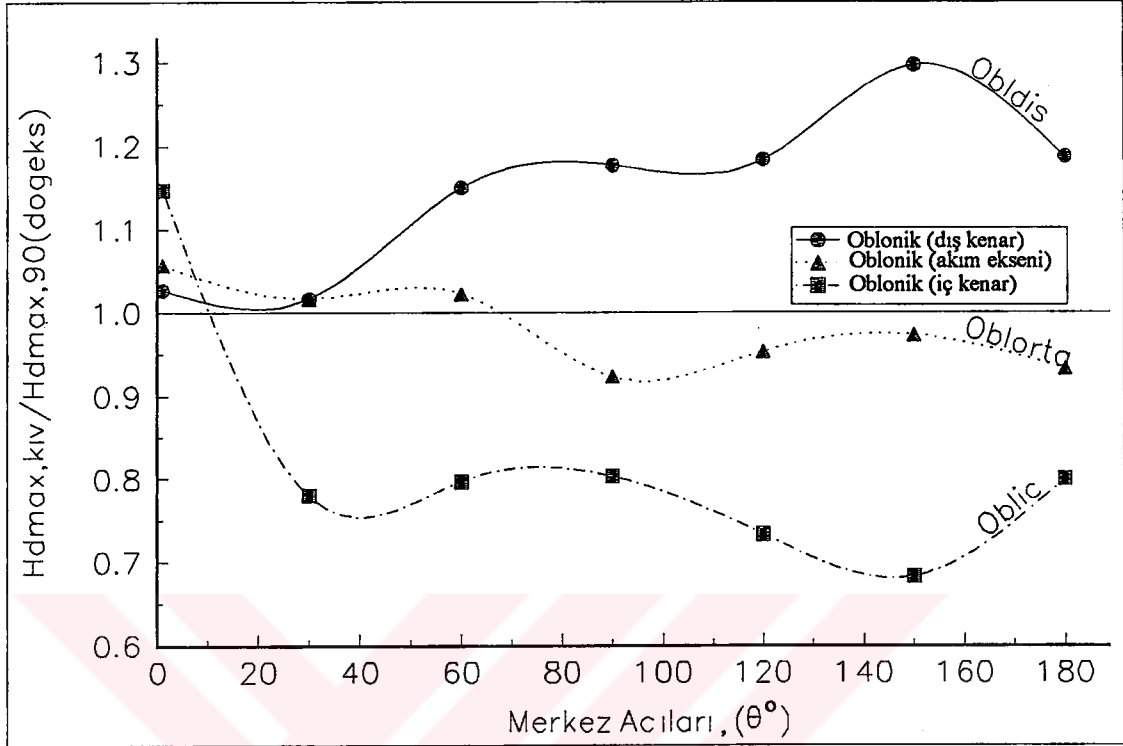
$$K_{\theta, do} = 0.9941 * \theta^{(0.03658)} \quad (4.24)$$

$$K_{\theta, ao} = 1.07 * \theta^{(-0.02236)} \quad (4.25)$$

$$K_{\theta, io} = 1.12 * \theta^{(-0.08396)} \quad (4.26)$$

Pratik çözümler için, Şekil 4.50.'de görüldüğü gibi cidar etki mesafesinin dışında kalan oblonik ayakların etrafında meydana gelen maksimum oyulma derinliklerini bulmak için, rölatif oyulma derinlik katsayıları, kıvrımın dış kenarında, 1.20, akım ekseninde 1.00, iç kenarında ise, 0.75 alınarak, doğrusal kanal akım ekseninde elde edilen maksimum oyulma derinliğiyle çarpılmalıdır.

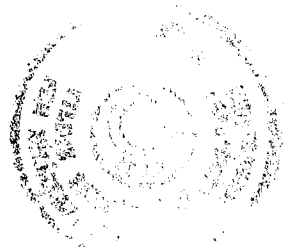
Şekil 4.51.'de ise, ayağın oyulmaya etkili genişliği, cidar etki sahasının dışında kalan ayaklar için, yerel olarak rölatif oyulmaların merkez açılarıyla değişimi incelenmiştir. Şekil 4.51.'de görüldüğü gibi, kıvrım giriş kesitinde minimum rölatif oyulma derinliği dış kenarda, maksimum rölatif oyulma derinliği de iç kenarda meydana gelmektedir. Ayrıca, kıvrım içinde maksimum oyulma, dikdörtgen ayaklardaki gibi, dış kenarda ve $\theta = 150^\circ$ merkez açıda meydana gelmektedir. Minimum oyulma da, içkenar ekseninde ve $\theta = 140^\circ$ civarında meydana gelmektedir.

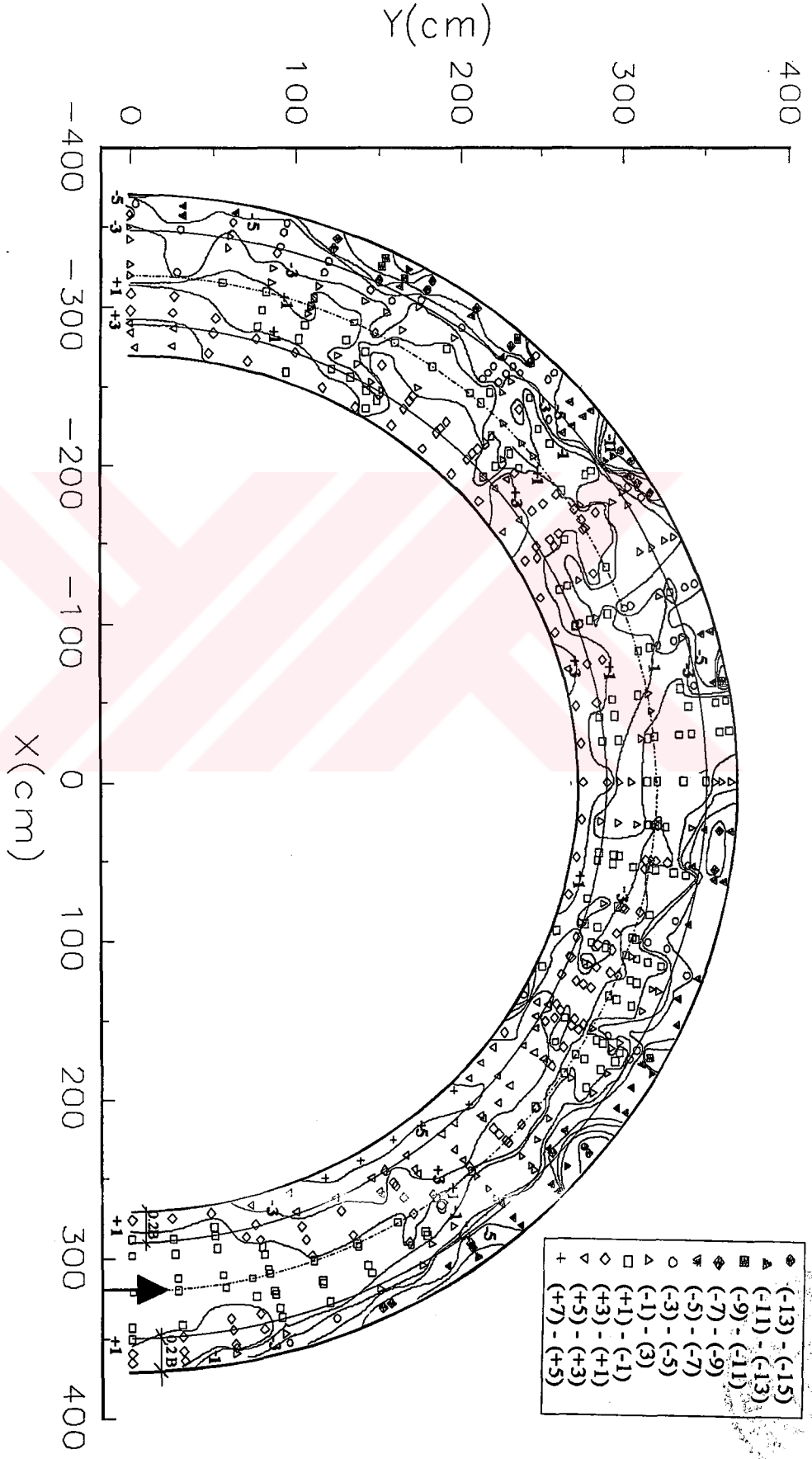


Şekil 4.51. Kıvrım Boyunca Dış Kenarda, Akım Ekseninde ve İç Kenarda, Narinlik Ne Olursa Olsun Cidar Etki Alanı Dışına Taşan Oblonik Ayaklar İçin Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin ($Hd_{max, \theta(kıv.)} / Hd_{max, 90(n=2, doğ. eks.)}$), Merkez Açılıyla (θ) Yerel Olarak Değişimi

4.5.3. Kanal Kırımında Taban Topoğrafyasının Elde Edilmesi ve Oyulma ile İlişkisi

Bundan önceki deneysel çalışmalarda, kıvrıma yerleştirilen köprü orta ve kenar ayakları etrafında meydana gelen oyulmalar incelenmişti. Burada ise, 180°'lik kıvrımda, sadece akımdan dolayı meydana gelen taban deformasyonları incelenmiştir.





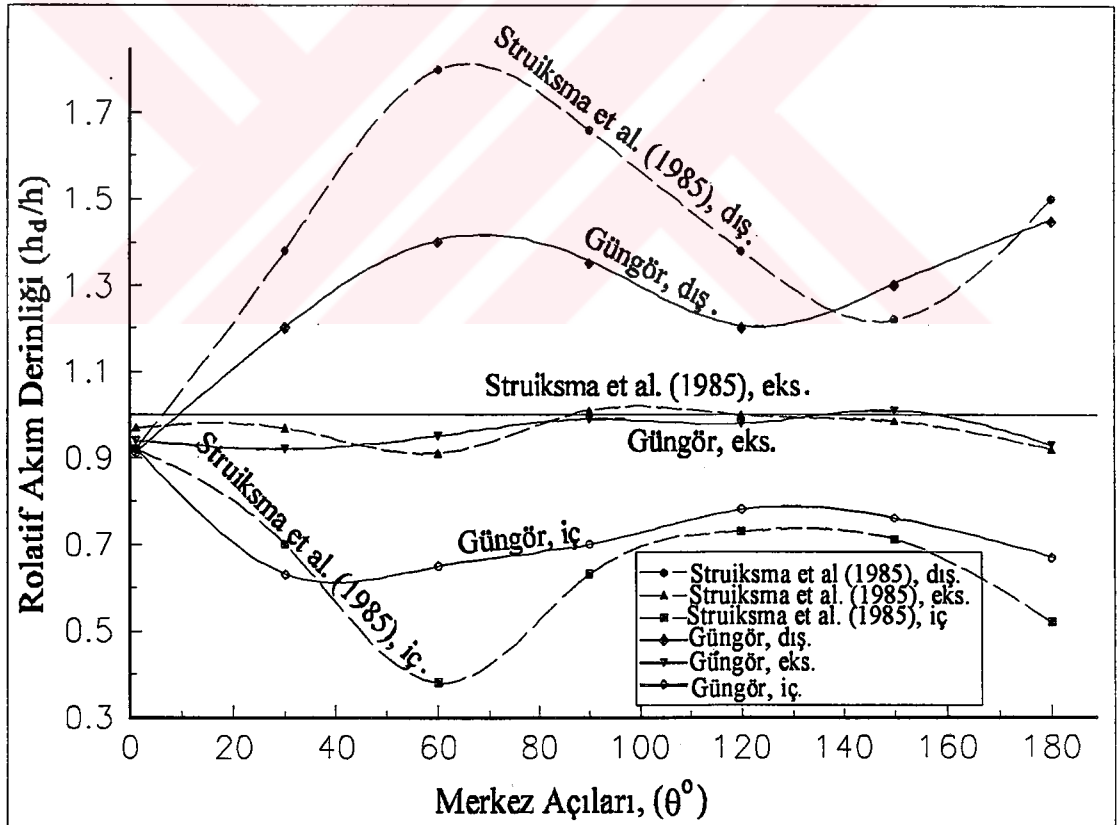
Şekil 4.52. Kanal Kıvrımında Akımın Etkisiyle Oluşan Taban Topoğrafyası

Bunun için bir seri deney yapılarak her $\theta=5^\circ$ merkez açıda enkesit boyunca taban seviyeleri ölçülmüş ve kıvrım taban topoğrafyası çıkarılmıştır, (Şekil 4.52.).

Kıvrımın girişinde membadan gelen malzeme, taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamış, ancak daha sonra gelen malzemenin yetersizliğinden dolayı oyulma artmıştır.

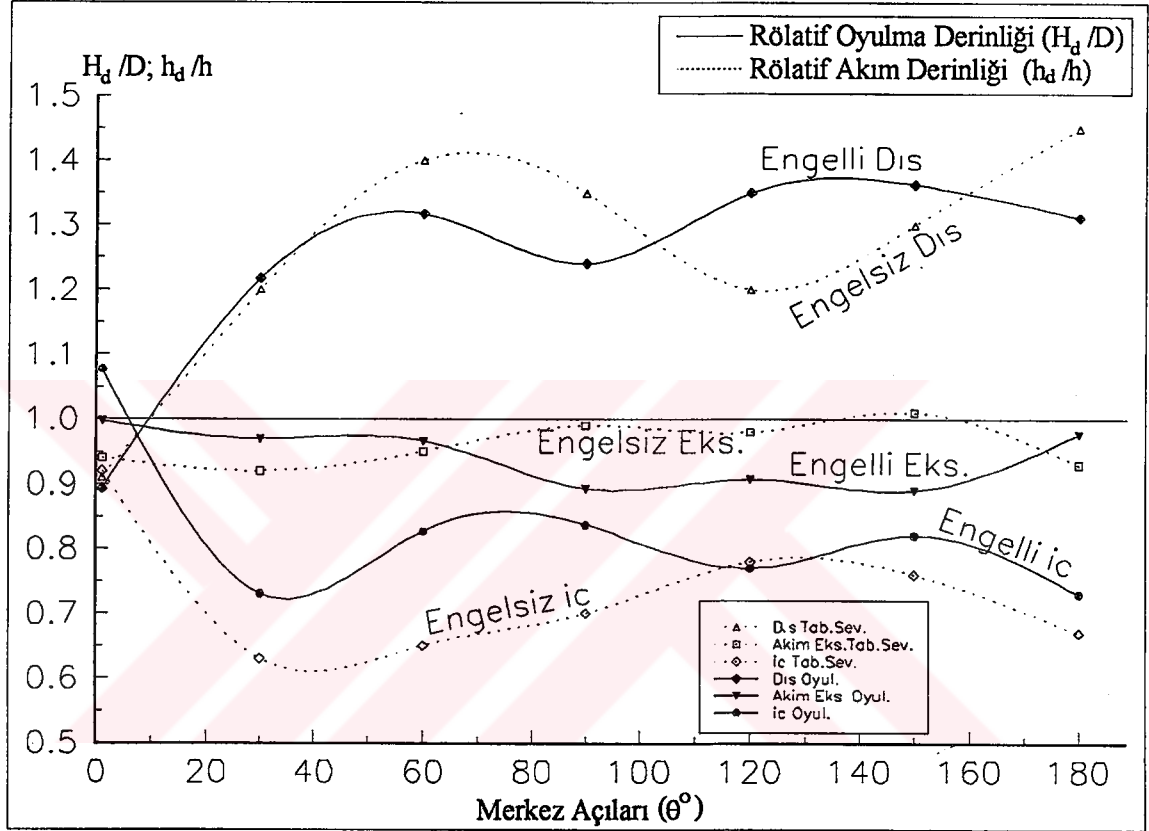
Kanal kenarlarından cidar etkisinin olmadığı düşünülen 0.2 B kadar içerideki bir hat boyunca ve akım ekseninde oluşan rölatif akım derinlikleri tesbit edilmiştir, (Şekil 4.53.). B, kanal taban genişliğidir.

Struiksma et. al. (1985)'in yaptığı çalışmalarla, elde edilen rölatif akım derinliği değerleri arasında çok iyi bir uyumun olduğu açıkça görülmektedir.



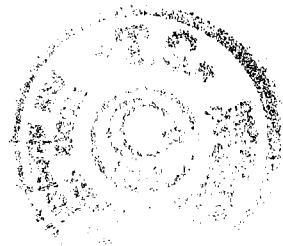
Şekil 4.53. Kıvrımın Kenarlarından 0.2 B Kadar İçerideki Bir Hat Boyunca ve Akım Ekseninde Akımın Etkisiyle Oluşan Taban Şekli

Ayrıca, kanal kıvrımı taban topoğrafyasıyla kıvrıma yerleştirilen ayaklar etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliklerinin çok yakın bir benzerlik gösterdiği tesbit edilmiştir. Şekil 4.54.'de bu durum açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.54. Kıvrımlı Kanalda Taban Topoğrafyasıyla Yerel Oyulmanın İlişkisi

Şekil 4.54.'te görüldüğü gibi, kıvrımlı kanalda akımın etkisiyle oluşan taban topoğrafyasına etki eden parametrelerin, engel yerleştirildiğinde meydana gelen yerel oyulmaların oluşumunda da aynen etkili oldukları görülmektedir.



BÖLÜM V

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hareketli tabanlı akarsular üzerinde yapılan köprüler, akım alanında meydana getirdikleri değişiklikler neticesinde, ayakları etrafında oluşan yerel oyulmalarla stabiliteelerini kaybeder ve sonunda da yıkılırlar. Bunun önüne geçmek için, köprü ayakları etrafında oluşacak maksimum denge oyulma derinliklerinin projeciler tarafından bilinesi gerekir.

Bu amaçla, Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonunda elde edilen verilerin, teorik görüşlerle birlikte değerlendirilmesiyle varılan sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

1) Doğrusal kanalda atak açısı ile oyulma derinliği ilişkisini veren grafikten görüldüğü gibi, narinlik sayısı, $n=2,3,4$ için Laursen ve Toch (1956) ve Üç (1979)'ün yapmış olduğu çalışmalarla, bu deneylerden elde edilen sonuçların çok iyi bir uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle bu çalışmalardan elde edilen sonuçların tamamı $n=4$ 'ten daha büyük narinliğe sahip ayaklar için de uygulanabilir. Ancak, $n>4$ için Laursen ve Toch ile Üç'ün sonuçları dikkate alınarak, atak açısı katsayısı (K_α) tayin edilmelidir.

2) Doğrusal kanalda, gerek dikdörtgen ve gerekse oblonik ayaklar için aynı boyutlu kenar ayaklardaki oyulma derinlikleri akım eksenine yerleştirilen ayaklardaki oyulma derinliklerinden daima daha büyük çıkmaktadır. Ayak narinlik sayısı değerine göre, oyulma derinlikleri arasındaki oran olan narinlik sayısı katsayısı (K_n), dikdörtgen ayaklar için 1.29; oblonik ayaklar için 1.20 olarak alınmalıdır.

3) Doğrusal kanalda atak açısının küçük olduğu bölgelerdeki ($\alpha \leq 60^\circ$) dikdörtgen ayaklarda, narinlik sayısı arttıkça rölatif oyulma derinliği ($Hd_{\max, \alpha} / Hd_{\max, 90(eks)}$) azalmaktadır. Atak açısının büyük olduğu ($\alpha > 60^\circ$) olduğu bölgelerde ise, narinlik sayısının rölatif oyulma derinliğine ($Hd_{\max, \alpha} / Hd_{\max, 90(eks)}$) etkisi ihmal edilebilir, (Şekil 4.23. ve Şekil 4.24.).

4) Doğrusal kanalda yapılan çalışmalar sonunda, doğrusal kanalın akım eksenine ve kenarlarına yerleştirilen dikdörtgen ve oblonik kesitli köprü ayakları için, ayak

genişliğine göre maksimum denge oyulma derinliğini veren formüller elde edilmiştir. Bu formüller şu şekildedir.

	Dikdörtgen Ayaklar		Oblojik Ayaklar	
	Kenar	Akım Eksen	Kenar	Akım Eksen
Korelesyon katsayısı (r)	0.95	0.95	0.97	0.94
Maks. denge oyulma derinliğini veren formüller (H_{dmax})	$0.4384 * D^{0.5295}$	$0.3983 * D^{0.571}$	$0.4006 * D^{0.4978}$	$0.3676 D^{0.5512}$

5) Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi gerek dış kenarda, gerek akım ekseninde ve gerekse iç kenarda maksimum denge oyulma derinliği (H_{dmax}) ile ayağın akıma dik genişliği arasındaki korelasyon katsayıları ~1.00 civarında çıkmıştır. Bu da, her konumda yerleştirilmiş ayağın akıma dik genişliği ile maksimum denge oyulma derinlikleri arasında çok iyi bir ilişkinin olduğunu gösterir.

6) Gerek doğrusal kanaldaki, gerekse kıvrımlı kanaldaki kenar ayaklarda $n \leq 2$ için maksimum rölatif oyulma derinliği elde edilmekte, $n > 2$ için rölatif oyulma derinlikleri akım eksenindeki kadar olmaktadır. Bu durum oldukça dikkat çekici olup, buna cidar etkisinin sebep olabileceği düşünülmektedir.

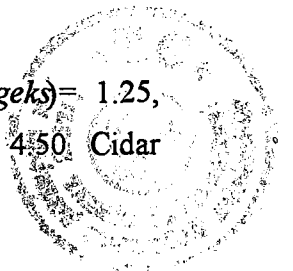
7) Kanal kıvrımı boyunca rölatif oyulma derinliğinin değişimi incelendiğinde merkez açıları, $\theta \geq 60^\circ$ olan kıvrım bölgesine yerleştirilen;

a) Dikdörtgen ayaklar için,

Rölatif oyulma derinliği dış kenarda, $H_{dmax} \alpha(kıv) / H_{dmax} 90(dogeks) = 1.30$, akım ekseninde 1.00, iç kenarda ise, 0.80 alınabilir, (Şekil 4.41. ve Şekil 4.44). Ancak, cidar etkisinin olduğu bölgede kalan dış kenar ayaklardaki rölatif oyulma derinliği, $H_{dmax} \alpha(kıv) / H_{dmax} 90(dogeks) = 1.50$ civarında gerçekleşmektedir, (Şekil 4.40a).

b) Oblojik ayaklarda:

Rölatif oyulma derinliği dış kenarda, $H_{dmax} \alpha(kıv) / H_{dmax} 90(dogeks) = 1.25$, akım ekseninde 1.00, iç kenarda ise; 0.77 alınabilir, Şekil 4.47 ve Şekil 4.50. Cidar



etkisinin olduğu bölgede kalan dış kenarda $H_{dmax,\alpha(kıv)}/H_{dmax,90(dogeks)}\cong 1.4$ olmaktadır, (Şekil 4.46a).

Görüldüğü gibi gerek dikdörtgen ayaklarda ve gerekse oblonik ayaklarda doğrusal kanal akım ekseninde $\alpha=90^\circ$ atak açısındaki maksimum oyulma derinlikleri baz alınarak, kıvrımda elde edilen rölatif oyulma derinlikleri dış kenar, akım eksen ve iç kenarda hemen hemen aynı olmaktadır.

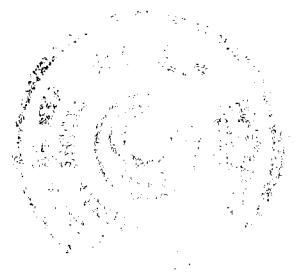
8) Kanal kıvrımında dış kenar, akım eksen ve iç kenar boyunca her konumda atak açıları da göz önüne alınarak oyulma olayı incelenmiş, bulunan maksimum denge oyulma derinlikleri, doğrusal kanalda aynı ayaktaki 90° atak açısında elde edilen maksimum oyulma derinliklerine bölünerek merkez açısı katsayıları (K_θ), bulunmuştur. Böylece, Kıvrımdaki maksimum denge oyulma derinlikleri, aşağıdaki formülle elde edilir.

$$H_{dmax,\theta,kıv}=K_\theta \cdot H_{dmax,dog}$$

Yani; Kıvrımın herhangi bir yerindeki maksimum denge oyulma derinliğini bulmak için, doğrusal kanaldaki maksimum denge oyulma derinliğini, o noktaya ait K_θ katsayısı ile çarpmak yeterlidir.

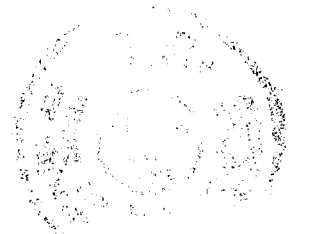
9) Kanal kıvrımı taban topoğrafyası çıkartılmış, kıvrımın dış kenarına, akım eksenine ve iç kenarına yerleştirilen köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma derinlikleriyle taban topoğrafyası arasında çok yakın bir benzerliğin olduğu tesbit edilmiştir.

Yukarıda 6. maddede bahsedilen cidar etkisi, tüm kanal boyunca kenar ayaklarda gözlenmiştir. Bu sebeple, cidar etkisinin çok önemli olduğu düşünülerek detaylı bir araştırmanın yapılması tarafımızdan önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Ağaçcıoğlu, H., ve Yüksel, Y., 1995.** “Kıvrımlı Kanallarda Yanal Akımın Kıvrım Hız Dağılımına Etkisi”, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler II. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, s.203-211, 18-20 Eylül, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Altınbilek, H. D., 1974.** “Su Yapılarında Yerel Oyulmalar”, D.S.İ. Yaz Okulu, Keban.
- Baker, C. J., 1980.** “Theoretical Approach to Prediction of Local Scour Around Bridge Piers”, Jour. of Hydraulics Res., I.H.A.R., 18:1-12.
- Bayazıt, M., 1971.** “Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği”, İ.T.Ü. Sayı.835, İstanbul.
- Breusers, H. N. C., 1977.** “Local Scour”, I.H.E., Delft.
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W., 1977.** “Local Scour Around Cylindrical Piers” Jour. of Hydraulics Res., I.H.A.R., Vol. 15, No. 3, 211-253.
- Breusers, H. N. C., and Raudkivi, A. J., 1991.** “Scouring”, Hydraulic Structures Design Manual, No. 2, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Chang, H. H., 1985.** “Water and Sediment Routing Through Curved Channels”, Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 111, No. 4, 644-658.
- Chiew, Y. M., and Melville, B. W., 1987.** “Local Scour Around Bridge Piers”, Jour. of Hydraulic Research, Vol. 25, No. 1, 16-26
- Chin-lien, Y., and Shin-ya, H., 1990.** “Bed Evolution in Channel Bends”, Jour. of Hydraulic Eng., Vol. 116, No. 12, 544-561
- Cunha, L. Veiga da, 1973.** “Eroseões Localizadas Junto De Obstáculos Salientes De Margens”, Doutor em Engenharia Civil, Laboratório Nacional De Engenharia Civil, Memória No.428, Lisboa.



- Dargahi, B., 1990.** "Controlling Mechanism of Local Scouring", Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 116, No. 10, 1197-1214.
- De Vriend, H. J., and Struiksma, N., 1983.** "Flow and Bed Deformation in River Bends", Pub. 317, Rivers' 83, October 24-26, New Orleans.
- Demiröz, E., 1989.** "Initiation of Particle Motion", Post-Graduate Course in Seiment Transport Technology, Vol.1, 4.1-4.24, Ankara-Turkey.
- Erkek, C. ve Ağralıoğlu, N., 1993.** "Su Kaynakları Mühendisliği", 2.bası, BETA Basım yayım dağıtım, İstanbul.
- Ettema, R., 1980.** "Scour at Bridge Piers", University of Auckland, School of Engeneering, Report No.216, Auckland, New Zealand.
- Gugten, C. A., 1982.** "Scour Around Bridge Piers at High Flow Velocities", A.S.C.E. HY2, No.2
- Günyaktı, A., 1989.** "Characteristics of Alluvial Streams and River Training", Post-Graduate Course in Seiment Transport Technology, Vol.2, 12.1-12.12.60, Ankara-Turkey.
- Hancu, S., 1971.** "Sur le Calcul des Affouillements Loaux Dans la Zone des Piles du Pont", 14th. I.A.H.R. Congress, 3:299-305, Paris.
- Hjorth, P., 1975.** "Studies on the Nature of Local Scour", Lund, Sweden.
- Johannesson, H., and Parker, G., 1989.** "Velocity Redistribution in Meandering Rivers", Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 115, No. 8, 1019-1039.
- Kandasamy, J. K., and Melville, B. W., 1989.** "Abutment Scour", Report No.458, School of Engeneering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Kapdaşlı, S., 1982.** "Hareketli Tabanlı Açık Kanallarda Kısmi Sürüntü Maddesi Hareketi Üzerine Bir İnceleme", Doktora Tezi, İ.T.Ü. İstanbul.

- Kothyari, U. C., Garde, R. J. and Ranga Raju, K. G., 1992.** "Temporal Variation of Scour Around Circular Bridge Piers", Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 118, No. 8, 1091-1106.
- Kwan, R. T. F., and Melville, B. W., 1994.** "Local Scour and Flow Measurements at Bridge Abutments", Jour. of Hyd. Res., Vol. 32, No. 5. 661-672
- Laursen, E. M., and Toch, A., 1956.** "Scour Around Bridge Piers and Abutments", Bull. No. 4, Iowa Highway Res.Board, Ames, Iowa.
- Leschziner, M. A., and Rodi, W., 1979.** "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow", Jour.of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.105, No. HY10, 1297-1314.
- Melville, B. W., 1984.** "Live-Bed Scour at Bridge Piers", Jour.of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.110, No. 9, 1234-1246.
- Melville, B. W., and Sutherland, A. J., 1988.** "Design Method for Local Scour at Bridge Piers", Jour.of Hydraulics Eng., ASCE, 114(10), 1210-1226.
- Melville, B. W., 1992.** "Local Scour At Bridge Abutments", Jour.of Hydraulic Eng., ASCE, 118:615-631.
- Melville, B. W., 1997.** "Pier and Abutment Scour: Integrated Approach", Jour.of Hydraulics Eng., ASCE, Vol. 123, No. 2, 125-133.
- Nicollet, G., 1971.** "Deformation des Lits Alluvionaires Affouillements Autour des Piles de Ponts Cylindriques", L.N.H. Chatau, HC-043-689, Paris.
- Olsen, N. R. B., and Melaaen, M. C., 1993.** " Three-Dimensional Calculation of Scour Around Cylinders", Jour. of Hydraulic Eng., Vol. 119, No. 9, 1048-1054.
- Parola, A. C., Mahavadi, S. K., Brown, B. M., and El Khoury, A., 1996.** "Effect of Rectangular Foundation Geometry on Local Pier Scour", Jour. of Hydraulic Eng., Vol. 122, No.1, 35-40.



- Qadar, A., 1981.** "The Vortex Scour Mechanism at Bridge Piers", Proc. Instn. Civ. Eng., Part 2, p.1773-1783.
- Raudkivi, A. J., Ettema, R., 1983.** "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", Jour. of Hydraulic Eng., Vol. 109, No. 3, 338-350.
- Raudkivi, A. J., Ettema, R., 1985.** "Scour at Cylindrical Bridge Piers in Armored Beds", Jour. of Hydraulic Eng., Vol. 111, No. 4, 713-731.
- Raudkivi, A. J., 1986.** "Functional Trends of Scour at Bridge Piers", Jour. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.112, No.6, 1-13.
- Shen, H. W., Schneider, V. R., and Karaki, S. S., 1969.** "Local Scour Around Bridge Piers", Jour. of the Hydraulic Division, Vol. 95, No. HY6, 1919-1940.
- Shimizu, Y., and Itakura, T., 1989.** "Calculation of Bed Variation in Alluvial Channels", Jour. of Hydraulic Eng. Vol. 115. No.3, 367-384.
- Shimizu, Y., Yamaguchi, H., and Itakura, T., 1990.** "Thre-Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation", Jour. of Hydraulic Eng., Vol. 116, No.9, 1090-1108.
- Struiksma, N., Olesen, K. W., Flokstra, C., and de Vriend, H. J., 1985.** "Bed Deformation in Curved Aluvial Cannels", pub.no. 333, Delft Hy. Lab.
- Suga, K., 1967.** "The Stable Profiles of the Curved Open Channel Beds", Jour. of Hydraulics Res., I.A.H.R. 1:487-495.
- Şentürk, F., 1988.** "Barajların Projelendirilmesinde Hidrolik Esaslar", DSI, Ankara
- Taner, N., 1977.** "Hidrolik -V", Kurtulmuş Matbaası, İstanbul.
- Tsujimoto, T., and Mizukami, T., 1986.** "Effect of Migration to Local Scour Around a Bridge Pier", Memoirs, Faculty of Technology, Kanazawa University, Vol.19, No. 1, pp. 25-34.

- Üç, S., 1979. "Akarsu Kıvrımlarındaki Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Yerel Oyulmalar", Doçentlik Tezi, İ.D.M.M.A., İstanbul.
- Üç, S., 1981. "Doğrusal Bir Akarsu Üzerine Sıralanmış Dairesel Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Maksimum Denge Oyulma Derinlikleri İçin Bir Ampirik Formülün Elde Edilmesi", İ. D. M. M. Akademisi Dergisi, No.7, 132-151.
- Üç, S., 1984. "Köprü Ayakları Etrafında Oyulma Derinliklerinin Atak Açısı ile Değişimi", Yıldız Üniversitesi Dergisi, No.3, 21-26.
- Üç, S., 1988. "Vorteks Yayılma Frekansının Oyulma Derinliğine Etkisi", Doktora Tezi, Yıldız Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Van Rijn, L. C., 1993. "Principle of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas", Lecturer Fluid Mechanics University of Utrecht, Ruinen The Netherland.
- Vittal, N., Kothiyari, U. C., and Haghighat, M., 1994. "Clear-Water Scour Around Bridge Pier Group", Jour. of Hydraulic Eng. , Vol. 120, No.11, 1309-1318.
- Vries, M., 1985. "Rivers", I.H.E., Delft.
- Yanmaz, M., ve Altınbilek, H. D., 1991. "Study of Time-Depending Local Scour Around Bridge Piers", Jour. of Hyd.Eng., Vol.117, No.10, October. p.1247-1269.
- Yeh, K. C., and Kennedy, J. F., 1993. "Moment Model of Nonuniform Channel-Bend Flow. II: Erodible Beds", Jour. of. Hyd. Eng. Vol. 119. No.7, July.
- Yen, B. C., 1967. "Some Aspects Of in Meandering Channels", Jour. of Hydraulics Res., I.A.H.R., 1:465.
- Yüksel, Y., 1987. "Dairesel Köprü Ayaklarındaki Maksimum Oyulmanın 180° lik Bir Akarsu Kıvrımı Boyunca Değişiminin Araştırılması", Doktora Tezi, Yıldız Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mahmud GÜNGÖR
Doğum Yeri : Arpaçay
Doğum Tarihi : 20.03.1959
Eğitim Durumu :
-Ortaokul : 1969-1973 Otuz Ekim Ortaokulu, Kars.
-Lise : 1973-1977 İ.H. Lisesi, Kars.
-Lisans 1 (Ön Lisans) : 1977-1980 Selçuk Eğitim Enstitüsü, Matematik Böl., Konya.
-Lisans Tamamlama : 1992-1993 AÜ. Aç. Öğr. Fak., Matematik Böl.,
Lisans Tamamlama Programı, Eskişehir.
-Lisans 2 : 1980-1985 AÜ. Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Böl., Isparta.
-Yüksek Lisans : 1986-1989 SÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
Doktora : 1991-..... Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Mühendisliği
Bilim Dalı, İstanbul.
Görevi : 1986-1992 DEÜ. Denizli Müh. Fak. İnş. Müh. Böl. Hidrolik
Anabilim Dalı Araştırma Görevliliği.
1992-..... PAÜ. Müh. Fak. İnş. Müh. Böl. Hidrolik
Anabilim Dalı Araştırma Görevliliği.
Yabancı Dili : İngilizce

