

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAREKETLİ TABANLI AKARSULARDA YANAL
AKIMIN HİDRODİNAMİĞİNİN İNCELENMESİ**

168506

İnşaat Yük. Müh. Fevzi ÖNEN

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 17 Ocak 2005

Tez Danışmanı

: Doç. Dr. Hayrullah AĞAÇCIOĞLU (YTÜ)

Jüri Üyeleri

: Prof. Dr. M. Emin KARAHAN (İTÜ)

: Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL (YTÜ)

: Doç. Dr. Esin ÇEVİK (YTÜ)

: Doç. Dr. Şevket ÇOKGÖR (İTÜ)

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. YAN SAVAK AKIMININ HİDROLİĞİ	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Yan Savak Boyunca Ana Kanalda Su Yüzü Profilinin Değişimi	1
1.3 Yan Savak Debi Katsayısı ve Değişimi	11
1.4 Yan Savak Kesitinde Hız Dağılımı ve Sekonder Akım.....	20
2. KATI MADDE HAREKETİ	24
2.1 Giriş.....	24
2.2 Sürüklenme Hareketinin Başlaması	25
2.3 Hareketli Tabanın Aldığı Şekiller	28
2.3.1 Taban Şekillerinin Özellikleri.....	28
2.3.2 Dalgaların Meydana Gelış Nedenleri.....	30
2.4 Katı Madde Taşınımında Denge ve Dengenin Bozulması.....	32
2.5 Oyulmanın Zamanla Değişimi.....	35
3. KIVRIMLI KANALLAR.....	39
3.1 Giriş.....	39
3.2 Kıvrımlı Kanallarda Basınç Dağılımı	41
3.3 Kıvrımlı Kanallarda Hareket Denklemleri.....	42
3.4 Kıvrımlı Kanallarda Hız Dağılımı ve Sekonder Akım	51
3.5 Kıvrımlı Kanallarda Enine ve Boyuna Su Yüzü Profilleri	54
3.6 Hareketli Tabanlı Kıvrımlı Kanallarda Akımın Davranışı	62
4. AKIM ALANINA YERLEŞTİRİLEN ENGELLER ETRAFINDAKİ AKIM VE OLUŞAN VORTEKS SİSTEMLER	80
4.1 Giriş.....	80
4.2 Engel Etrafındaki Akım Karakteristiklerinde Değişim.....	80
4.3 Sınır Tabakasının Oluşumu ve Sınır Tabakasından Ayrılmalar	81

4.4	Engel Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler	82
4.4.1	Sürüklenen Vorteks Sistem.....	83
4.4.2	Atnalı Vorteks Sistem	83
4.4.3	Art-iz Vorteks Sistem	83
5.	KIVRIMLI KANALLARDA YAN SAVAK AKIMI.....	85
5.1	Giriş.....	85
5.2	Konu ile İlgili Çalışmalar.....	85
6.	DENEY KANALI VE DENEYSEL ÇALIŞMA.....	97
6.1	Giriş.....	97
6.2	Deney Kanalı	98
6.3	Giriş Üçgen Savak Anahtar Eğrisi	101
6.4	Çıkış Üçgen Anahtar Eğrisi	101
6.5	Deneyde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri.....	102
6.6	Taban Malzemesi Kritik Hızlarının Tayini.....	103
6.7	Akım Hızı-Katı Madde Debisi Arasındaki İlişki	104
6.8	Deneysel Çalışmada Etkili Parametrelerin Belirlenmesi	105
6.9	Boyut Analizi	106
6.10	Deneysel Çalışma.....	108
7.	DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	113
7.1	Giriş.....	113
7.2	Doğrusal Kanalda Oyulma Derinliği H_d 'nin t (zaman) ile Değişimi.....	113
7.3	Doğrusal Kanalda Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin Rölatif Akım Derinliği h_1/p ile Değişimi	120
7.4	Doğrusal Kanalda Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile Değişimi	121
7.5	Hareketli Tabanlı Doğrusal Kanallarda Yanal Akımın Taban Profiline Etkisi ...	128
7.6	Kıvrımlı Kanalda Oyulma Derinliği H_d 'nin t (zaman) ile Değişimi.....	136
7.7	Kıvrımlı Kanalda Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin Rölatif Akım Derinliği h_1/p ile Değişimi	139
7.8	Kıvrımlı Kanal Boyunca $H_d/p-V_1/V_{kr}$ Değişimi.	142
7.9	Hareketli Tabanlı Kıvrımlı Kanallarda Yanal Akımın Taban Profiline Etkisi	156
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	165
8.1	Sonuçlar.	165
8.2	Öneriler	168
	KAYNAKLAR.....	169
	ÖZGEÇMİŞ	175

SİMGE LİSTESİ

A	Ana kanal ıslak kesit alanı (m^2)
b	Ana kanal genişliği (m)
b_s	Su yüzü genişliği (r_0-r_i)
b_d	Daralma oranı
b_f	Yaklaşım kanalı mansap genişliği (m)
b_0	Yaklaşım kanalı memba genişliği (m)
b_{ns}	Bağımlı direnç katsayısı
c	İntegral sabiti
C	Chezy katsayısı
C_θ	Yersel teğetsel su yüzü eğimi katsayısı
C_d	Yan savak debi katsayısı
C_f	Sürtünme katsayısı
C_r	Yersel enine su yüzü eğimi katsayısı
C_s	Kabarma katsayısı
D	Silindirik ayak çapı (m)
D_*	Boyutsuz malzeme çapı
d	Volümetrik katı madde çapı
d_0	Katı maddenin başlangıçtaki medyan çapı
d_{50}	Malzemenin yüzde ellisini geçiren elek çapı (Medyan çap, mm)
d_{60}	Malzemenin yüzde altmışını geçiren elek çapı
d_{90}	Malzemenin yüzde doksanını geçiren elek çapı
E	Herhangi bir kesitteki özgül enerji yüksekliği (m)
F_D	Sürüklenme kuvveti,
F_L	Kaldırma kuvveti,
Fr	Froude sayısı
Fr_1	Yan savak başlangıcındaki Froude sayısı
Fr_*	Tane Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi (m^2/s)
h	Herhangi bir kesitteki akım derinliği (m)
h_a	Bir en kesitteki ortalama su derinliği (m)
h_1	Yan savak membasında ana kanal eksenindeki su derinliği (m)
h_2	Yan savak mansabında ana kanal eksenindeki su derinliği (m)
h_{kr}	Kritik akım halinde su derinliği (m)
h_L	Yan savak boyunca meydana gelen yük kaybı (m)
h_m	Ana kanal eksenindeki su derinliği (m)
h_0	Başlangıç akım derinliği (m)
h_r	Rölatif yük (Savak üzerindeki nap kalınlığı /Toplam su derinliği)
h_w	Rölatif savak yükü
H_d	Oyulma derinliği (m)
H_{de}	Denge zamanındaki oyulma derinliği (m)
H_θ	Su yüzeyindeki boyuna değişim (m)
H_{re}	En kesitteki iki nokta arasındaki su yüzü farkı (m)
H_s	Su yüzündeki yanal değişim (m)
J	Enerji çizgisi eğimi
J^t	Teğetsel enerji gradyanı
J_θ	Teğetsel su yüzü eğimi
J^{tt}	Radyal enerji gradyanı
J_{kr}	Kritik taban eğimi
J_0	Ana kanal taban eğimi

J_r	Radyal doğrultuda su yüzü eğimi
k	Pürüz yüksekliği
K	Su yüzü yanal değişim katsayısı
K_0	Rölatif yan savak debi katsayısı
L	Yan savak uzunluğu (m)
L_s	Kalın kenarlı savak uzunluğu (m)
n	Manning sürtünme katsayısı
p	Yan savak kret yüksekliği (m)
P	Islak çevre (m)
Q_r	Savaklanma oranı
Q_w	Yan savak debisi (m^3/s)
Q_1	Ana kanal debisi (m^3/s)
Q_2	Yan savaktan sonraki ana kanal debisi (m^3/s)
Q_s	Katı madde (sediment) debisi (m^3/s)
q_r	Birim genişlikte enine doğrultudaki katı madde oranı
q_s	Birim uzunluktan savaklanan debi ($m^3/s.m$)
q_w	Yan savaktan savaklanma oranı (%)
$q_{T(B)}$	Tabanın geometrisine bağlı olarak taşıma kapasitesi,
$q_{T(S)}$	O kesite membadan gelen katı madde miktarı,
r	Kıvrım eğrilik yarıçapı (m)
r_i	İç kıyı eğrilik yarıçapı (m)
r_0	Dış kıyı eğrilik yarıçapı (m)
r_e	Kanal ekseni eğrilik yarıçapı (m)
R	Hidrolik yarıçap (m)
Re	Reynolds sayısı
Re^*	Tane Reynolds sayısı
S	Batmış tane özgül ağırlığı ($(\gamma_s - \gamma) / \gamma$)
S_{xy}	Helikoidal akımın gücü (%)
t	zaman (dakika)
t_e	Denge zamanı
τ	Kayma gerilmesi (N/m^2)
τ_{kr}	Kritik kayma gerilmesi (N/m^2)
τ_0	Taban kayma gerilmesi (N/m^2)
τ_r	Radyal yöndeki kayma gerilme
τ_{0r}	Taban Kayma gerilmesinin enine bileşeni
$\tau_{0\theta}$	Taban Kayma gerilmesinin boyuna bileşeni
U_b	Kayma (Slip) hızı
u^*	Taban kayma hızı (m/s)
u^*_e	Kanal eksenindeki kayma hızı (m/s)
u^*_r	Radyal yöndeki ortalama kayma hızı
u^*_{kr}	Kritik kayma hızı (m/s),
V	Ana kanaldaki ortalama akım hızı (m/s)
V_a	Bir en kesitteki ortalama hız (m/s)
V_{ac}	Bir düşey üzerindeki ortalama hızın ortalama teğetsel bileşeni
V_0	Su yüzeyindeki boyuna hız (m/s)
V_θ	Kıvrımda teğetsel (boyuna) hız bileşeni (m/s)
V_{0b}	Kanal tabanındaki teğetsel hız (m/s)
V_e	Kanal eksenindeki derinlik boyunca ortalama hız (m/s)
V_m	Doğrusal kanalda ortalama hız
V_{0m}	Akım derinliklerine göre ortalama teğetsel hız (m/s)
V_1	Yan savak membasında ana kanal eksenindeki ortalama akım hızı (m/s)

V_2	Yan savak mansabında ana kanal eksenindeki ortalama akım hızı (m/s)
V_s	Sağanak kanalındaki hız (m/s)
V_{kr}	Kritik hız (m/s)
V_r	Kıvrımda radyal (enine) hız bileşeni
V_{rb}	Tabandaki sekonder akımın yanal hız bileşeni (m/s)
V_{xy}	xy planındaki ortalama hız vektörü
V_z	Eğrilik merkezinden r radyal uzaklıkta kıvrımdaki teğetsel hız (m/s)
w	Çökelme hızı (cm/s)
β	Momentum katsayısı
α	Üçgen yan savak tepe açısı
α_0	Ortalama merkezkaç kuvveti radyal bileşeni
ε	Eddy viskozitesi
ε_s	Difüzyon katsayısı
x	Yan savağın herhangi bir noktasının yan savak başlangıcına olan mesafesi (m)
x_0	integral sabiti
ψ	Savaklanma (sapma) açısı
γ	Akışkanın özgül ağırlığı
γ_s	Tane özgül ağırlığı
γ_s^*	Bağıl özgül ağırlık
λ	Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı
ν	Kinematik viskozite
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
η	Rölatif derinlik (z/h)
χ	Von Karman sabiti
ξ	Vorteks bileşeni
ΔE	Özgül enerji gradyanı
Δh	Su yüzündeki enine kabarma miktarı
δ	Viskoz alt tabaka kalınlığı (m)
δ_i	Sapma açısı
Ψ	Sekonder akım fonksiyonu
ρ	Akışkanın özgül kütlesi (kg/m^3)
θ	Kıvrım açısı
θ_0	Boyuna taban eğimi
θ_r	Enine taban eğimi
θ_f	Toplam kıvrım açısı
ϕ	Dinamik sürtünme açısı
ΔZ_b	Taban seviyesindeki değişim
σ	Yüzey gerilmesi
σ_g	Geometrik standart sapma
σ_0	Katı madde büyüklüğünün başlangıç geometrik standart sapması,
∇	Taban geometrisi,

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Sabit özgül enerjiye sahip kanal akımında derinlik ile kanal debisinin ilişkisi (De Marchi, 1934).....	1
Şekil 1.2	Özgül enerji diyagramında debi derinlik ilişkisi (Yüksel, 2000)	2
Şekil 1.3	Yan savak akımının planı ve kesiti (Ağaçcıoğlu, 1998).....	3
Şekil 1.4	Deneysel olarak gözlenen su yüzü profilleri (Engels, 1920; Coleman ve Smith, 1923; Tyler, Carollo ve Steyskal, 1929).....	4
Şekil 1.5	Muhtemel su yüzü profilleri (De Marchi, 1934)	7
Şekil 1.6	$\phi(h/E)$ fonksiyonunun (p/E) parametresinin farklı değerleri için değişimi (De Marchi, 1934).....	9
Şekil 1.7	Trapez enkesitli bir kanalda trapez enkesitli yan savak genel görünüşü (Ramamurty, Tim ve Carballada, 1986)	10
Şekil 1.8	Yan savak boyunca durgunluk bölgesi ve ters akım (Ağaçcıoğlu ve Yüksel, 1998)	11
Şekil 1.9	Nehir rejimli akım şartlarında C_d yan savak debi katsayısının Fr_1 ile değişimi (Subramanya ve Awasthy, 1972)	14
Şekil 1.10	Sel rejimli akım şartlarında C_d yan savak debi katsayısının Fr_1 ile değişimi (Subramanya ve Awasthy, 1972)	14
Şekil 1.11	Üçgen yan savak görünüşü (Kumar-Pathak, 1987)	17
Şekil 1.12	Doğrusal kanalda farklı L/b oranları için yan savak debi katsayısının Subramanya ve Awasthy denklemiyle karşılaştırılması (Ağaçcıoğlu, 1995).....	19
Şekil 1.13	Yanal akım sebebiyle kanal enkesitindeki akımın hareketi (El-Khashab, 1975)	21
Şekil 1.14	Yanal akım sebebiyle kanal enkesitinde oluşan sekonder akım (El-Khashab, 1975)	21
Şekil 1.15	Dikdörtgen enkesitli doğrusal kanalda nehir rejimli akım durumunda yan savak boyunca sekonder akımın gücünün değişimi (El-Khashab, 1975)	22
Şekil 1.16	Dikdörtgen enkesitli doğrusal kanalda sel rejimli akım durumunda yan savak boyunca sekonder akımın gücünün değişimi (El-Khashab, 1975)	23
Şekil 2.1	Üniform bir kanalın birim boyunda etkili kuvvetler.(Bayazıt, 1971).....	24
Şekil 2.2	Shields diyagramı (Shields, 1936).....	26
Şekil 2.3	Bonnefille'in verdiği diyagram (Bonnefille, 1963).....	27
Şekil 2.4	Hareketli tabanın akım hızı arttıkça alabileceği çeşitli şekiller (Bayazıt, 1971).....	30
Şekil 2.5	Akımın rejimine göre dalgaların ilerleme yönü (Bayazıt, 1971)	30
Şekil 2.6	Taban hareketinin başlangıcı için Liu ve Shields eğrilerinin karşılaştırılması (Liu, 1957).....	31
Şekil 2.7	Shields ve Lui'nun diyagramlarının karşılaştırılması (Liu, 1957)	32
Şekil 2.8	Taban deformasyonunun basınç ve kayma gerilmelerine etkisi (Üç, 1979)	32
Şekil 2.9	Maksimum oyulma derinliğinin, V/V_{kr} ile değişimi (Chiew, 1984)	34
Şekil 2.10	Oyulma derinliğinin zamanla değişimi (Tsujimoto ve Mızukami, 1985)	35
Şekil 2.11	Oyulma derinliğinin akım hızı ve zamanla değişimi (Melville ve Chiew, 1999).....	37
Şekil 2.12	Temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin gelişimi (Melville ve Chiew, 1999)	38
Şekil 2.13	(2.14) denklemine göre oyulma derinliğinin gelişimi (Melville ve Chiew, 1999).....	38

Şekil 3.1	Kıvrımlı kanaldaki akışkan parçacığına etki eden basınç kuvvetleri (Francis ve Asfari, 1971)	42
Şekil 3.2	Silindirik koordinat sistemi (Rozovskii, 1957).....	43
Şekil 3.3	a) $r_c=450$ cm, $B=100$ cm ve $J_{ort}=0,00057$ 'li sabit eğrilikli kanalda sekonder akımın akım çizgileri b) f 'in dağılımı (Kikkawa, 1973).....	47
Şekil 3.4	Üniform açık kanalda hız dağılımı (Rozovskii, 1961)	50
Şekil 3.5	Kanal enkesiti (Chow,1959).....	52
Şekil 3.6	Bir açık kanal kıvrımında enerji çizgisi ve su yüzü profili (Müller, 1943)	55
Şekil 3.7	Deney kanalı (C.L.Yen ve B.C.Yen, 1971).....	58
Şekil 3.8	Deney seti (Georgiadou ve Smith, 1986)	62
Şekil 3.9	Enine eğimli düzlemdeki katı madde partikülünün hareketi (Engelund, 1975) ...	63
Şekil 3.10	Menderesli akım analizinde kullanılan eğrisel koordinatlar (Engelund, 1974)....	64
Şekil 3.11	(2.61) Denkleminde elde edilen taban topografyası (Engelund, 197).....	65
Şekil 3.12	(a) Taban kayma gerilmesinin enine dağılımı (b) Derinlik boyunca ortalama boyuna akımın enine dağılımı (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976) ..	67
Şekil 3.13	Derinlik boyunca boyuna hız (V_θ) dağılımı (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)	67
Şekil 3.14	Enine akımın (V_r) dağılımı : (a) $Q=20$ lt/s ; (b) $Q=30$ lt/s (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)	68
Şekil 3.15	Enine taban profilinin zamanla değişimi (a) $Q=25$ lt/s; (b) $Q=30$ lt/s (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)	69
Şekil 3.16	Kıvrımlı kanalda tabakalaşma olayı (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976).....	69
Şekil 3.17	Enine tane büyüklüğü dağılımı (Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda, 1987)	71
Şekil 3.18	Enine taban profili (Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda, 1987).....	71
Şekil 3.19	(a) Helm nehrinin kıvrımında taban malzemesi dağılımının tahmini ve ölçülen değerlerinin karşılaştırılması, (b) Taban topoğrafyası için tahmini ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması (Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda, 1987).....	72
Şekil 3.20	Vektörel hız ölçümleri ve akım ipçikleri $V_2/V_1=0.6$ (a) Pürüzlü taban (b) Pürüzsüz taban (Neary ve Odgaard, 1994)	73
Şekil 3.21	Deneylerde kullanılan hidrograflar (Yen ve Lee, 1995).....	76
Şekil 3.22	1 Nolu deney için taban topoğrafyası (Yen ve Lee, 1995).....	77
Şekil 3.23	1 Nolu deney için ortalama tane büyüklük dağılımı (Yen ve Lee, 1995)	77
Şekil 3.24	Maksimum yığılma kesitinde enine taban profilleri (Yen ve Lee, 1995).....	78
Şekil 3.25	Maksimum oyulma kesitinde enine taban profilleri (Yen ve Lee, 1995).....	78
Şekil 3.26	$\theta=90^\circ$ 'de tane büyüklüğünün enine değişimi (Yen ve Lee, 1995)	79
Şekil 4.1	Sınır tabaka bölgeleri ve hız dağılımları (Üç, 1988)	81
Şekil 4.2	Engel boyunca hız dağılımı ve sınır tabakasının ayrılması (Üç, 1988).....	81
Şekil 4.3	Engel etrafında oluşan vorteks sistemler (Raudkivi, 1986).....	82
Şekil 5.1	Dış kıyısında yan savağa sahip 60° 'lik bir kanal kıvrımı (Fares ve Herbertson,1993).....	85
Şekil 5.2	Dış kıyısındaki yan savak üzerinden yanal akıma sahip 60° 'lik kanal kıvrımında derinlik boyunca hız dağılımları (Y.R.Fares ve J.G. Herbertson ,1993).....	86
Şekil 5.3	$Fr_1<0.3$ için yan savak boyunca akım çizgilerinin değişimi (Ağaçcıoğlu, 1995)	88
Şekil 5.4	$Fr_1>0.3$ için yan savak boyunca akım çizgilerinin değişimi (Ağaçcıoğlu ve Yüksel, 1998)	88
Şekil 5.5	$L/b=0.625$ için yan savak debi katsayılarının Froude sayısı ile kıvrım boyunca değişimi (Ağaçcıoğlu, 1995)	91
Şekil 5.6	$L/b=1.25$ için yan savak debi katsayılarının Froude sayısı ile kıvrım boyunca değişimi (Ağaçcıoğlu, 1995)	91

Şekil 5.7	$L/b=1.875$ için yan savak debi katsayılarının Froude sayısı ile kıvrım boyunca değişimi (Ağaçcıoğlu, 1995).....	92
Şekil 5.8	Allan Water'daki yan savak kanalı (Fares, 1995)	95
Şekil 5.9	Allan Water'daki yan savak bölgesindeki taban profilleri (Fares, 1995).....	95
Şekil 6.1	Deney kanalı planı	98
Şekil 6.2	Üçgen savak anahtar eğrisi	101
Şekil 6.3	Çıkış üçgen savak anahtar eğrisi	102
Şekil 6.4	Taban malzemesinin granülometri eğrisi	103
Şekil 6.5	Katı madde debisinin (Q_s) V_1/V_{kr} ile değişimi	104
Şekil 7.1	$L/b=0.625$ ve $p=17\text{cm}$ 'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	115
Şekil 7.2	$L/b=0.625$ ve $p=12\text{cm}$ 'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	115
Şekil 7.3	$L/b=0.625$ ve $p=7\text{cm}$ 'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	116
Şekil 7.4	$L/b=1$ ve $p=17\text{cm}$ 'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	116
Şekil 7.5	$L/b=1$ ve $p=12\text{cm}$ 'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	117
Şekil 7.6	$L/b=1$ ve $p=7\text{cm}$ 'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	117
Şekil 7.7	Doğrusal kanalda temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin gelişimi.....	119
Şekil 7.8	(7.1) denklemine göre oyulma derinliğinin gelişimi	119
Şekil 7.9	$L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ genişliğindeki yan savaklarda H_d/p 'nin h_1/p ile değişimi	121
Şekil 7.10	$L/b=0.625$ ve $p=7\text{ cm}$, $p=12\text{ cm}$, $p=17\text{ cm}$ yüksekliğindeki yan savaklarda H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi.....	122
Şekil 7.11	$L/b=1$ ve $p=7\text{ cm}$, $p=12\text{ cm}$, $p=17\text{ cm}$ yüksekliğindeki yan savaklarda H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi.....	123
Şekil 7.12	$L/b=1.25$ ve $p=7\text{ cm}$, $p=12\text{ cm}$, $p=17\text{ cm}$ yüksekliğindeki yan savaklarda H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi.....	123
Şekil 7.13	$p=17\text{ cm}$ ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ genişliğindeki yan savaklarda H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi	125
Şekil 7.14	$p=12\text{ cm}$ ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ genişliğindeki yan savaklarda H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi	125
Şekil 7.15	$p=7\text{ cm}$ ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ genişliğindeki yan savaklarda H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi	126
Şekil 7.16	$p=7\text{ cm}$ için $H_d/p-Re^*$ değişimi.....	127
Şekil 7.17	Temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması halindeki deneysel verilerin Shields diyagramında gösterilişi	127
Şekil 7.18	$V_1=0.31\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	130
Şekil 7.19a	$V_1=0.31\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	130
Şekil 7.19b	$V_1=0.31\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	130
Şekil 7.20	$V_1=0.38\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	131
Şekil 7.21a	$V_1=0.38\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	131
Şekil 7.21b	$V_1=0.38\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	131
Şekil 7.22	$V_1=0.59\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	133
Şekil 7.23a	$V_1=0.59\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	133
Şekil 7.23b	$V_1=0.59\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	133
Şekil 7.24	$V_1=0.78\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	134
Şekil 7.25a	$V_1=0.78\text{ m/s}$ için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	134

Şekil 7.25b	$V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	134
Şekil 7.26	$V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	135
Şekil 7.27a	$V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	135
Şekil 7.27b	$V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	135
Şekil 7.28	30° 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=17$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	136
Şekil 7.29	30° 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=12$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	137
Şekil 7.30	30° 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=7$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi	137
Şekil 7.31	30° 'lik kıvrım bölgesinde temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin gelişimi.....	138
Şekil 7.32	(7.2) denklemine göre oyulma derinliğinin gelişimi	139
Şekil 7.33	$\theta=30^\circ$ 'de $L/b=0.625$, $L/b=1$ ve $L/b=1.25$ için $H_d/p-h_1/p$ değişimi	140
Şekil 7.34	$\theta=120^\circ$ 'de $L/b=0.625$, $L/b=1$ ve $L/b=1.25$ için $H_d/p-h_1/p$ değişimi	140
Şekil 7.35	Doğrusal kanal ($\theta=0^\circ$), $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ 'de $H_d/p-h_1/p$ değişimi	141
Şekil 7.36	Kıvrımlı kanalda $L/b=1$ ve $p=7$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi	143
Şekil 7.37	Kıvrımlı kanalda $L/b=1$ ve $p=12$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi	143
Şekil 7.38	$\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=0.625$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	146
Şekil 7.39	$\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	146
Şekil 7.40	$\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1.25$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	147
Şekil 7.41	$\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=17$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	147
Şekil 7.42	$\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=12$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	148
Şekil 7.43	$\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=7$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	148
Şekil 7.44	30° 'lik kıvrım bölgesinde $p=7$ cm ve $L/b=1$ için $H_d/p-Re^*$ değişimi	150
Şekil 7.45	30° 'lik kıvrım bölgesinde temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması halindeki deneysel verilerin Shields diyagramında gösterilişi.....	150
Şekil 7.46	$\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=0.625$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	151
Şekil 7.47	$\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	152
Şekil 7.48	$\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1.25$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	152
Şekil 7.49	$\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=17$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	153
Şekil 7.50	$\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=12$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	153
Şekil 7.51	$\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=7$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	154
Şekil 7.52	Doğrusal kanalda ($\theta=0^\circ$), $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=7$, 12 ve 17 cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi.....	155
Şekil 7.53	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	157
Şekil 7.54a	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	157

Şekil 7.54b	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	157
Şekil 7.55	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	158
Şekil 7.56a	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	158
Şekil 7.56b	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	158
Şekil 7.57	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	160
Şekil 7.58a	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	160
Şekil 7.58b	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	160
Şekil 7.59	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	162
Şekil 7.60a	Kıvrımlı Kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	162
Şekil 7.60b	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	162
Şekil 7.61	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.99$ için taban topoğrafyasındaki değişimler.....	163
Şekil 7.62a	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü	163
Şekil 7.62b	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü.....	163
Şekil 7.63a	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.99$ m/s için yan savağın membasında oluşan taban dalgalarının görünümü.....	164
Şekil 7.63b	Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$) $V_1=0.99$ m/s için yan savağın mansabında oluşan taban dalgalarının görünümü.....	164

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Savak katsayıları (Collinge, 1957)	12
Çizelge 1.2	Savak boyutları ve akım karakteristikleri (Kumar ve Pathak, 1987)	17
Çizelge 1.3	Nehir rejimli akım için doğrusal kanalda yan savak debi katsayısı ilgili denklemler (Ağaçcıoğlu ve Yüksel, 1998).....	20
Çizelge 3.1	Hidrografların karakteristikleri (Yen ve Lee, 1995).....	76
Çizelge 6.1	Yan savak akımına etki eden parametreler	105
Çizelge 6.2	Yan savak katsayısına etki eden parametreler için boyut analizi	106
Çizelge 6.3	Yan savak katsayısına etki eden boyutsuz parametreler	107
Çizelge 6.4	Doğrusal kanalda kullanılan dokuz farklı yan savak için akım şartları.....	111
Çizelge 6.5	Kıvrımlı kanalda $\theta=30^0$ 'de kullanılan dokuz farklı yan savak için akım şartları	111
Çizelge 6.6	Kıvrımlı kanalda $\theta=120^0$ 'de kullanılan dokuz farklı yan savak için akım şartları	112
Çizelge 7.1	$L=40$ cm ve $p=7$ cm'lik yan savak için akım şartları	128

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı yöneten ve çalışmanın her aşamasında ilgi ve desteğini esirgemeyen hocam Doç.Dr. Hayrullah Ağaçcıoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince ilgi ve desteğini esirgemeyen değerli görüş ve tavsiyelerinden büyük ölçüde istifade ettiğim sayın hocalarım merhum Prof.Dr. Sabahattin Üç, Prof.Dr. M.Emin Karahan ve Prof.Dr. Yalçın Yüksel'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca manevi desteklerini esirgemeyen Hidrolik Anabilim Dalının tüm elemanlarına teşekkür ederim.



ÖZET

Yan savaklar, herhangi bir kanaldan ihtiyaç duyulan debinin temini veya fazla suyun uzaklaştırılması için sulama, arazi drenajı ve kanalizasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kararlı kesitli kanallarda yan savaklarla ilgili çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen, hareketli tabanlı kanallara inşa edilen yan savaklarla ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Ancak doğal akarsu yatakları genellikle hareketli tabana sahiptir.

Bu çalışma, nehir rejimli akım şartlarında ve serbest savaklanma durumunda hareketli tabanlı 180°'lik kıvrımlı bir kanal boyunca, dikdörtgen kesitli ve keskin kenarlı yan savaklar için gerçekleştirilmiştir. Boyut analizi sonucunda rölatif denge oyulma derinliği H_d/p 'nin; rölatif akım şiddeti V_1/V_{kr} , savak kret yüksekliği h_1/p , yan savak uzunluğu L/b ve θ boyutsuzlarına bağımlı olduğu bulunmuştur. Hem doğrusal kanalda hem de kıvrımlı kanalda temiz su oyulması ($0.5 < V_1/V_{kr} < 0.95-1.0$) ve hareketli taban oyulması ($0.95-1.0 < V_1/V_{kr} < 2.5$) hallerinde H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

Doğrusal kanal ve kıvrımlı kanalda temiz su oyulmasında oyulma derinliği H_d 'nin zamana bağlı olarak lineer arttığı ve belli bir süre sonra asimptota yaklaşarak denge konumuna ulaştığı belirlenmiştir. Hem doğrusal kanalda hem de kıvrımlı kanalda h_1/p ve V_1/V_{kr} 'e bağlı olarak oyulma derinliği; denge zamanının %10'unda denge oyulma derinliğinin %40-70'ine ve denge zamanının %50'sinde ise denge oyulma derinliğinin %90-95'ine ulaştığı tespit edilmiştir.

Doğrusal kanalda, temiz su oyulması halinde H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile hemen hemen lineer arttığı, hareketli taban oyulmasında ise oyulmaya sebep olan yanıl akımın (V_1/V_{kr} artmasıyla) zayıflaması ve membadan gelen taban dalgalarının oyulma çukurunu doldurmasıyla H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile azaldığı belirlenmiştir. Kıvrımlı kanalda ise, temiz su oyulması halinde doğrusal kanalda olduğu gibi H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile lineer olarak artmış, ancak kıvrımın yarattığı helikoidal akımın yanıl akım yapısını bozmasıyla doğrusal kanaldaki H_d/p 'den daha küçük değerler elde edilmiştir. Kıvrımlı kanaldaki hareketli taban oyulmasında ise, kıvrım tarafından yaratılan helikoidal akımın etkisinin artmasıyla birlikte oyulma derinliğinin temiz su oyulması pik değerinin etrafında salınım gösterdiği belirlenmiştir. Kıvrımlı kanalın $\theta=30^\circ$ lik kıvrım kesitinde maksimum hız yörüngesinin dış kıyıya yönelmesiyle, maksimum rölatif denge oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Ayrıca, hem doğrusal kanalda hem de kıvrımlı kanalda rölatif denge oyulma derinliği H_d/p , h_1/p ve L/b boyutsuzlarındaki artışla birlikte büyümüşür. Kıvrımlı kanalın $\theta=30^\circ$ lik kıvrım kesitinde h_1/p ve L/b 'ye bağılı olarak daha büyük rölatif denge oyulma derinlikleri de elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yan savak, kritik hız, helikoidal akım, kıvrımlı kanal, temiz su oyulması, hareketli taban oyulması.

ABSTRACT

Side-weirs, also known as lateral weir, are widely used in irrigation, land drainage, urban sewer systems by flow diversion or intake structures. In the literature, considerable interest and research on the side weirs located on a fixed bed could be come crossed however, the same think can not be said for the movable bed conditions. It is known that the rivers in nature have movable beds.

This investigation carried out along the 180° bend rectangular channel for sharp crested side weirs in movable bed and the subcritical flow conditions. As a result of Dimensional Analysis, it is found that the dimensionless equilibrium scour depth (H_d/p) depends on the dimensionless parameters of velocity V_1/V_{kr} , depth h_1/p , length L/b and bend angle of θ . The dimensionless equilibrium scour depth (H_d/p) versus V_1/V_{kr} is experimentally investigated for clear water ($0.5 < V_1/V_{kr} < 0.95-1.0$) and movable bed scour conditions ($0.5 < V_1/V_{kr} < 0.95-1.0$) at the straight and curved channels together.

Scour depth H_d linearly increased with time for clear water scour both at the straight and curved channel and after some times which goes near the equilibrium scour. Approximately 10% and 50% of the test durations, almost 40%-70% and 90%-95% of the equilibrium scour depths achieved, respectively. Time to equilibrium also depends on the dimensionless parameters of velocity V_1/V_{kr} and depth h_1/p .

H_d/p almost increases linearly with the dimensionless parameter of velocity V_1/V_{kr} for clear water scour and decreases for live bed conditions at the straight channel due to the decrease the intensity of lateral overflow (with an increasing of V_1/V_{kr}) and dune from the upstream. The values of H_d/p are smaller than the values of obtained at the straight channel section, even though H_d/p also increases with V_1/V_{kr} for clear water scour along the bend. Because of the effect of the helicoidal flow created by bends, H_d/p fluctuated with V_1/V_{kr} at the maximum value of clear water scour for movable bed conditions in a bend. At the 30° section of the bend, H_d/p is achieved as maximum values due to the deviation on the path of maximum velocity towards the outer bank. Besides the dimensionless equilibrium scour depth (H_d/p) increases with the higher dimensionless parameter of h_1/p and L/b , H_d/p obtained bigger than increasing of h_1/p and L/b at the 30° of the bend.

Keywords: Side weir, threshold velocity, helicoidal flow, curved channel, clear water scour, live bed.

1.YAN SAVAK AKIMININ HİDROLİĞİ

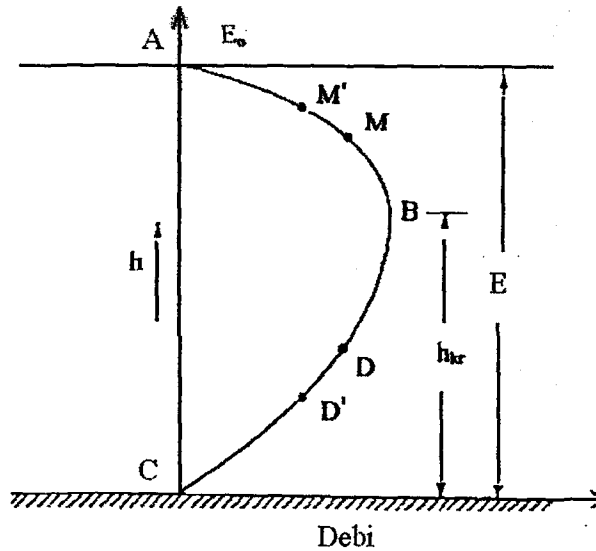
1.1 Giriş

Sulama, hidroelektrik ve diğer hidrolik yapıların su temini amaçlı tesislerinin iletim kanalları, ihtiyaç ve ekonomi göz önüne alınarak optimum kapasiteye göre projelendirilir. Kanala giren fazla suyun taşarak çevreye zarar vermemesi için gerekli yerlere yan savaklar yapılır. Yan savaklar bazen kanalın bir veya iki yanına, bazen de çökeltim havuzları gibi tesislerin yan tarafına yapıldıkları için yan savak olarak adlandırılırlar. Meskun bölgelerdeki birleşik kanalizasyon sistemlerinde de yan savaklar oldukça sık kullanılır.

Yan savaklarla ilgili günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. 1928'den önce dikdörtgen kesitli kanallarda yapılan deneysel çalışmalarda ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Daha sonraları konu teorik olarak incelenmeye başlanmış ve deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır.

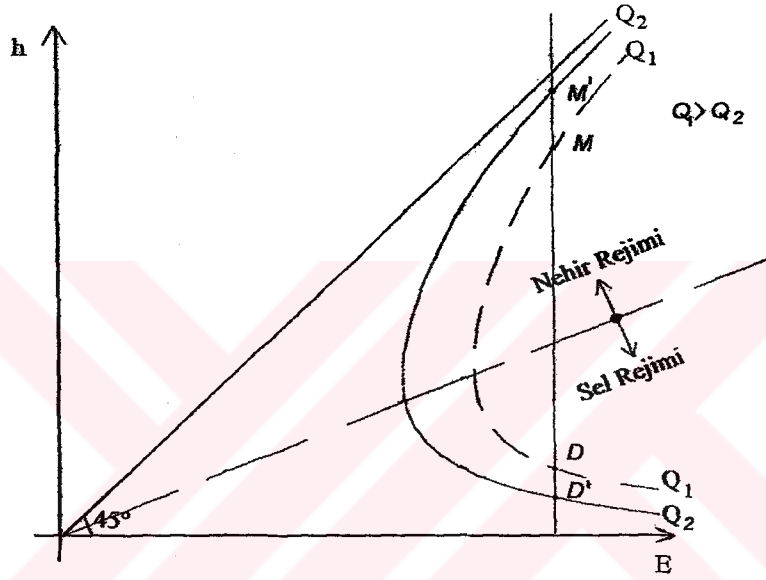
1.2 Yan Savak Boyunca Ana Kanalda Su Yüzü Profiline Değişimi

Sabit bir enerji seviyesi için herhangi bir kanaldaki akım derinliği ile debi arasındaki ilişki Koch parabolü ile verilebilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Sabit özgül enerjiye sahip kanal akımında derinlik ile kanal debisinin ilişkisi (De Marchi, 1934)

Yan savak başlangıç kesitinde sel rejimli akım ($h_1 < h_{kr}$) mevcut ise bu D noktası ile verilir. Yan savak kesiti boyunca ana kanaldaki debi savaklanmadan dolayı azalacağından yan savak sonundaki akım D' noktası ile ifade edilecektir. Eğer yan savak başlangıç kesitinde nehir rejimli akım ($h_1 > h_{kr}$) mevcut ise bu M noktası ile ifade edilebilir ve aynı şekilde savaklanmadan dolayı ana kanaldaki debi azalacağından yan savak sonundaki akım bu sefer M' noktası ile ifade edilebilir. Dolayısıyla, Şekil 1.1'den görüleceği gibi ana kanal eksenindeki su derinliği, akımın yan savak kesitine karşı gelen bölümünde akım sel rejiminde ise azalarak, nehir rejiminde ise artarak gider. Aynı sonuca sabit bir debi için verilen özgül enerji-derinlik diyagramı ile de varılabilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Özgül enerji diyagramında debi derinlik ilişkisi (Yüksel, 2000)

Yan savak boyunca ana kanaldaki su yüzü profilinin değişimi, özgül enerji bağıntısından da tayin edilebilir.

Herhangi bir kesitteki özgül enerji,

$$E = h + \frac{Q^2}{2gA^2} = \text{sabit} \quad (1.1)$$

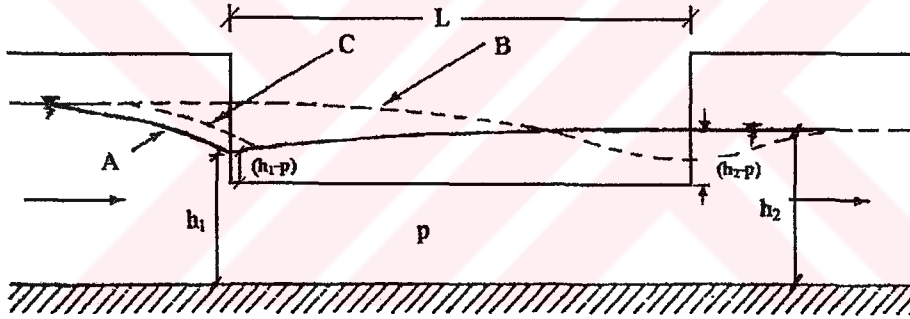
ifadesi ile verilebilir. Özgül enerjinin yan savak boyunca sabit kaldığını kabul ederek ifadenin 'x' savak uzunluğu boyunca türevi alınıp bütün terimler gA^3 ile çarpılırsa,

$$gA^3 \frac{dh}{dx} + QA \frac{dQ}{dx} - Q^2 \frac{dA}{dx} = 0 \quad (1.2)$$

yüzü profili bulunabilir. Bu denklemde, nehir rejimli akım durumunda ($V < \sqrt{2gh}$) dh/dx 'in pozitif değerde, sel rejimli akım durumunda ($V > \sqrt{2gh}$) ise dh/dx 'in negatif olduğu görülebilir. Yani ilk durumda profilin yükseldiği ikincisinde ise profilin alçaldığı görülmektedir. Burada V , en kesitteki ortalama akım hızıdır.

Engels (1920), nehir rejimli akım şartlarında yaptığı deneysel çalışmalarda su yüzü profillerinin yan savak memba kesitinden önce azalmaya başladığını ve yan savak girişinden itibaren arttığını gözlemlemiştir. Engels (1920) tarafından gözlenen su yüzü profili Şekil 1.4'de A profili olarak verilmiştir.

Coleman ve Smith (1923), sabit dikdörtgen en kesitli kanallarda sel rejimli akım şartlarında yapmış oldukları yan savaklarla ilgili çalışmalarda su yüzü profilinin yan savak boyunca membadan mansaba doğru azaldığını ve mansap kısmında tekrar artarak normal akım derinliğine ulaştığını gözlemişlerdir (Şekil 1.4, B Profili).



Şekil 1.4 Deneysel olarak gözlenen su yüzü profilleri (Engels, 1920; Coleman ve Smith, 1923; Tyler, Carollo ve Steyskal, 1929)

Nimmo (1928), problemi teorik olarak incelemiş ve sabit dikdörtgen en kesitli bir kanalda momentum prensibini kullanarak su yüzü eğimini veren ifadeyi aşağıdaki şekilde elde etmiştir.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{(J - J_0) - \frac{Q_1}{gA^2} \frac{dQ_w}{dx}}{1 - Fr_1^2} \quad (1.5)$$

Burada;

J = Enerji çizgisi eğimi,

J_0 = Ana kanal taban eğimi,

g = Yerçekimi ivmesi (m^2/sn),

A = Dikdörtgen en kesitli ana kanaldaki ortalama ıslak alan (m^2),

dQ_w/dx = Savağın dx uzunluğundan savaklanan debi (m^3/sn) ve

Fr_1 = Yan savak başlangıcındaki Froude sayısını ifade etmektedir.

Tyler, Carollo ve Steyskal (1929), dalgıç perdeli ve perdesiz yan savak tipleri üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda Engels'in (1920) elde ettiği su yüzü profiline benzer profil gözlemlemişler, fakat minimum derinliğin yan savak başlangıcından biraz ileride meydana geldiğini söylemişlerdir (Şekil 1.4, C Profili).

Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda dalgıç perdenin yan savak debisini arttırıcı bir etki yaptığını ve dalgıç perdenin ana kanalla 90° lik açı yapacak şekilde yerleştirilmesi durumunda bu etkinin maksimum olacağını ifade etmişler ve yan savak debisinde % 20-30 bir artış gözlemlemişlerdir.

Forchheimer (1930), özgül enerjinin sabit olduğu kabulü ile yan savak memba ve mansap su derinlikleri arasındaki farkı veren ifadeyi aşağıdaki şekilde elde etmişlerdir.

$$h_2 - h_1 = \frac{Q_1^2 - Q_2^2}{2gA^2} - \left[\frac{Q_1 + Q_2}{2A} \right]^2 \frac{n^2}{R^{1.4}} L \quad (1.6)$$

Burada,

Q_1 = Ana kanal debisi (m^3/sn),

Q_2 = Yan savaktan sonraki ana kanal debisi (m^3/sn),

n = Manning sürtünme katsayısı ve

R = Hidrolik yarıçap (m) dır.

De Marchi (1934), yan savak boyunca özgül enerjinin sabit kaldığını kabul ederek bir teori geliştirmiş ve aşağıdaki kabulleri yapmıştır;

- Ana kanalda kararlı akım şartları mevcuttur.
- Yan savak üniform en kesitli uzun bir kanala yerleştirilmiştir.
- Yan savak eşiği ana kanal tabanına paraleldir.
- Yan savağın memba ve mansabından belirli bir uzaklıkta ana kanaldaki akım üniformdur.
- Savak uzunluğu boyunca savaklanan debi aşağıda verilen normal (akıma dik) savak

formülünden hesaplanabilir.

$$\frac{dQ_w}{dx} = C_d \sqrt{2g} (h - p)^{3/2} \quad (1.7)$$

f) Enerji çizgisi kanal tabanına paraleldir.

De Marchi (1934), bu yaklaşımla (1.4) ifadesine uygun şekilde üç farklı profil gözlemlediğini ifade etmiştir. Bunlar:

a) Yan savak membasında akım üniform sel rejiminde ve kanal büyük eğimli ise akım memba kontrollüdür ve akım derinliği yan savak boyunca tedricen azalır. Memba tarafına yan savağın etkisi yoktur (Şekil 1.5a).

b) Yan savak membasında nehir rejiminde bir akım oluşacak şekilde bir kanal eğimi mevcut ise yan savağın etkisi memba tarafında da hissedilir. Yani akım mansap kontrollüdür. bb kesitinin mansap tarafındaki derinlik, kanalda kalan Q_2 debisine karşı gelen normal akım derinliğidir. Yan savak boyunca derinlik tedricen artacak ve aa kesitinin memba tarafındaki derinlik, başlangıçtaki Q_1 debisine karşı gelen normal akım derinliğine asimptot olacaktır (Şekil 1.5b).

c) Yan savak eşik yüksekliğinin Q_1 debisine karşı gelen kritik derinlikten küçük olması durumunda, akım sel rejimindedir ve su seviyesi membadan mansaba doğru alçalarak gider ve bb kesitindeki akım derinliği kritik derinlikten küçük olur. Bu da yan savak mansap kısmında hidrolik sıçramaya sebep olur (Şekil 1.5c).

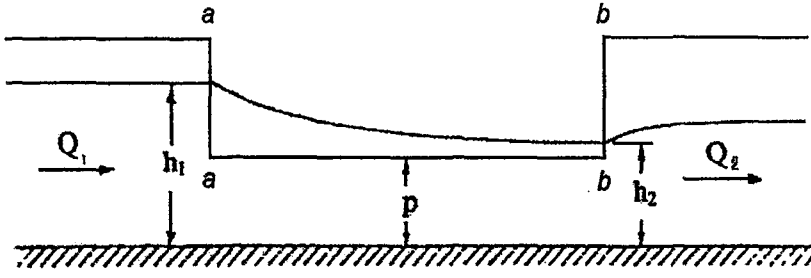
De Marchi (1934), dikdörtgen kesitli bir kanal için (1.4) eşitliğinin kesin çözümünün elde edilebileceğini göstermiştir. Buna göre (1.4) eşitliği yeniden yazılırsa,

$$\frac{dh}{dx} = \frac{Qh}{Q^2 - gb^2h^3} \frac{dQ}{dx} \quad (1.8)$$

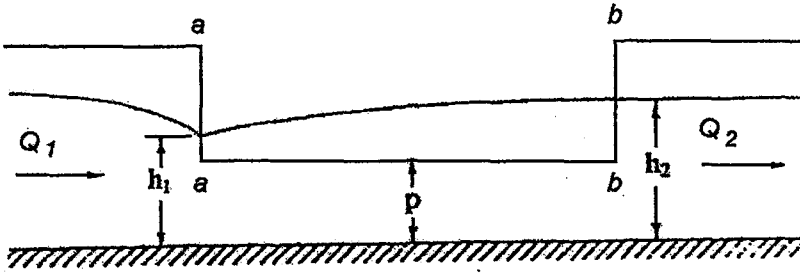
olur. (1.1) eşitliğinden elde edilen.

$$Q = bh\sqrt{2g(E - h)} \quad (1.9)$$

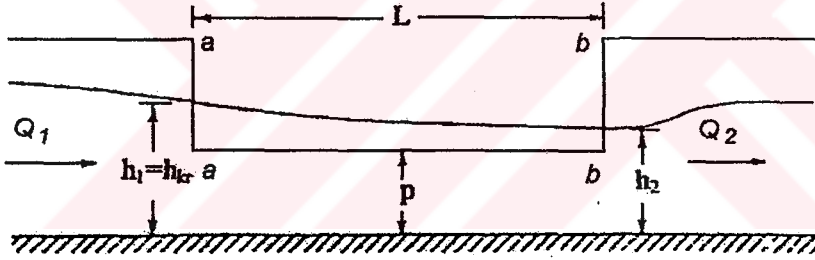
bağıntısı ve



a-) Akım sel rejiminde (Büyük eğimli kanal; $J_0 > J_{\text{kritik}}$)



b-) Akım nehir rejiminde (Yani $J_0 < J_{\text{kritik}}$; Ayrıca $p > h_{\text{kritik}}$)



c-) Akım sel rejiminde (Küçük eğimli kanal; Fakat $J_0 < J_{\text{kritik}}$; Ayrıca $p < h_{\text{kritik}}$)

Şekil 1.5 Muhtemel su yüzü profilleri (De Marchi, 1934)

$$\frac{dQ_w}{dx} = -\frac{dQ}{dx} = C_d \sqrt{2g} (h-p)^{3/2} \quad (1.10)$$

kabulü yapılarak denklemler birlikte kullanılırsa, (1.8) eşitliği,

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{2C_d}{b} \frac{\sqrt{(E-h)}(h-p)^{3/2}}{2E-3h} \quad (1.11)$$

şeklinde yazılabilir. Tekrar düzenlenerek,

$$\frac{dx}{dh} = \frac{b}{2C_d} \frac{2E-3h}{\sqrt{(E-h)(h-p)^{3/2}}}$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitliğin integrasyonu sonucunda ise,

$$x - x_0 = \frac{b}{C_d} \left\{ \frac{2E-3p}{E-p} \sqrt{\left(\frac{E-h}{h-p} \right)} - 3 \text{Arc sin} \sqrt{\left(\frac{E-h}{E-p} \right)} \right\} \quad (1.12)$$

bağıntısı elde edilir. Burada, x_0 =integral sabitidir.

Derinliklerin sırasıyla h_1 ve h_2 olduğu kesitler arasındaki mesafe (x_2-x_1),

$$x_2 - x_1 = \frac{b}{C_d} \left[\left\{ \frac{2E-3p}{E-p} \sqrt{\left(\frac{E-h_2}{h_2-p} \right)} - 3 \text{Arc sin} \sqrt{\left(\frac{E-h_2}{E-p} \right)} \right\} - \left\{ \frac{2E-3p}{E-p} \sqrt{\left(\frac{E-h_1}{h_1-p} \right)} - 3 \text{Arc sin} \sqrt{\left(\frac{E-h_1}{E-p} \right)} \right\} \right] \quad (1.13)$$

şeklinde yazılabilir. Genel parantez içindeki terim $\phi(h/E)$ ile ifade edilirse ve $L=x_2-x_1$ kabulü yapılırsa,

$$L = \frac{b}{C_d} \left\{ \phi\left(\frac{h_2}{E}\right) - \phi\left(\frac{h_1}{E}\right) \right\} \quad (1.14)$$

olarak bulunur. Burada C_d , yan savak debi katsayısı olup, $2/3 \mu$ 'e eşittir. μ , debi katsayısıdır.

p/E parametresinin çeşitli değerleri için $\phi(h/E)$ eğrileri Şekil 1.6'da verilmiştir. Eğer yan savak debisi, memba veya mansap uçlarının herhangi birindeki akım rejimi (aynı zamanda (h/E)) biliniyorsa, (1.14) eşitliğinden yan savağın diğer ucundaki (h/E) değeri bulunabilir.

Babbitt (1953), 0.46 m ve 0.61 m çapa sahip dairesel borular üzerine yerleştirilen 0.41 m ve 1.07 m uzunluklu yan savaklar ile deneysel çalışma yapmış ve dairesel en kesitli kanallar için de, Coleman ve Smith'in (1923) elde etmiş olduğu su yüzü profillerine benzer profiller gözlemlemiştir.

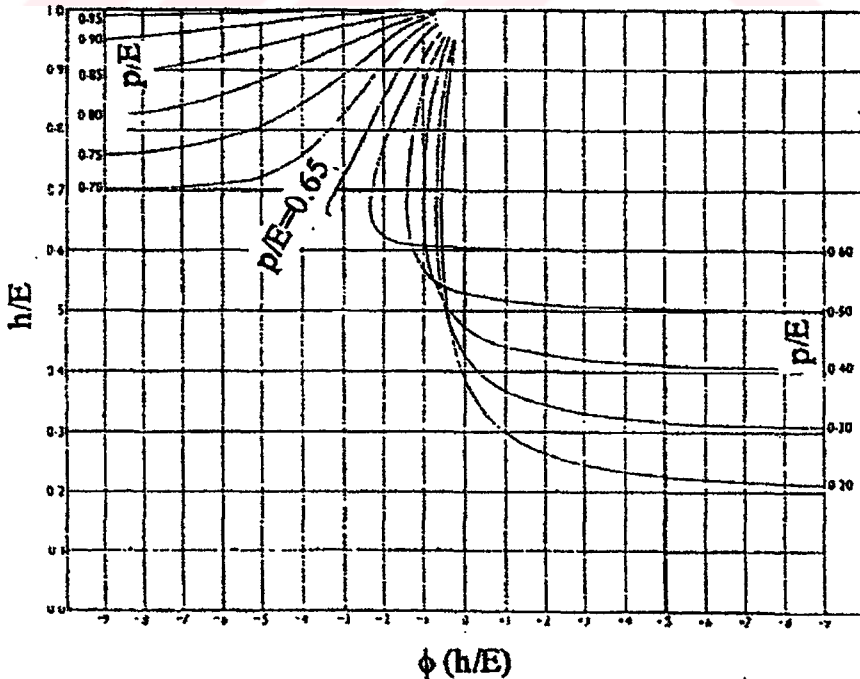
Frazer (1954), dikdörtgen en kesitli kanaldaki yan savaklarda yaptığı deneylerle konuyu teorik ve deneysel olarak incelemiş, çalışmalarında hem ana kanaldaki akım miktarını ve ana

kanal genişliğini, hem de yan savak boyutları ve savaklanan akım miktarını değiştirmiştir.

Araştırmacı, teorik incelemeleri sonucunda büyük eğimli kanallarda üç farklı su yüzü hareketinin olabileceğini ifade etmiştir. Bunlar;

- a) Yan savak boyunca su derinliği azalan sel rejimli ana kanal akımı,
- b) Yan savak boyunca su derinliği artan nehir rejimli ana kanal akımı,
- c) Yan savak başlangıcından ana kanalda sel rejimli akım, yan savak kesitinde hidrolik sıçrama meydana geldikten sonra nehir rejimli akım şeklindedir.

Frazer (1954), yan savak üzerindeki hidrolik sıçramayı inceleyen ilk araştırmacıdır. Araştırmacı, yan savak üzerinde meydana gelen hidrolik sıçramanın, sıçramadan önceki akım şartlarını değiştirmedikçe ama sıçramadan sonraki kesitlerde sıçramadan dolayı bir etkinin görüldüğünü söylemiştir. Ayrıca sıçramadan sonraki nehir rejimli akım, sıçramadan önceki sel rejimli akımın özgül enerjisinden daha küçük bir özgül enerjiye sahiptir. Araştırmacı bu özgül enerji değerinin bulunabilmesi için sel rejiminden nehir rejimine geçişte meydana gelen su yüzü artışının dikkate alınabileceğini belirtmiştir. Sel rejiminden nehir rejimine geçiş uzunluğunun sıçrama yüksekliğinin beş katı olduğu bilinmesine rağmen yan savakta olayın daha kısa bir uzunlukta meydana geldiği görülmüştür. Froude sayısının 1-2 değerleri arasında meydana gelen sıçrama dalgali yüzeysel sıçrama şeklindedir.

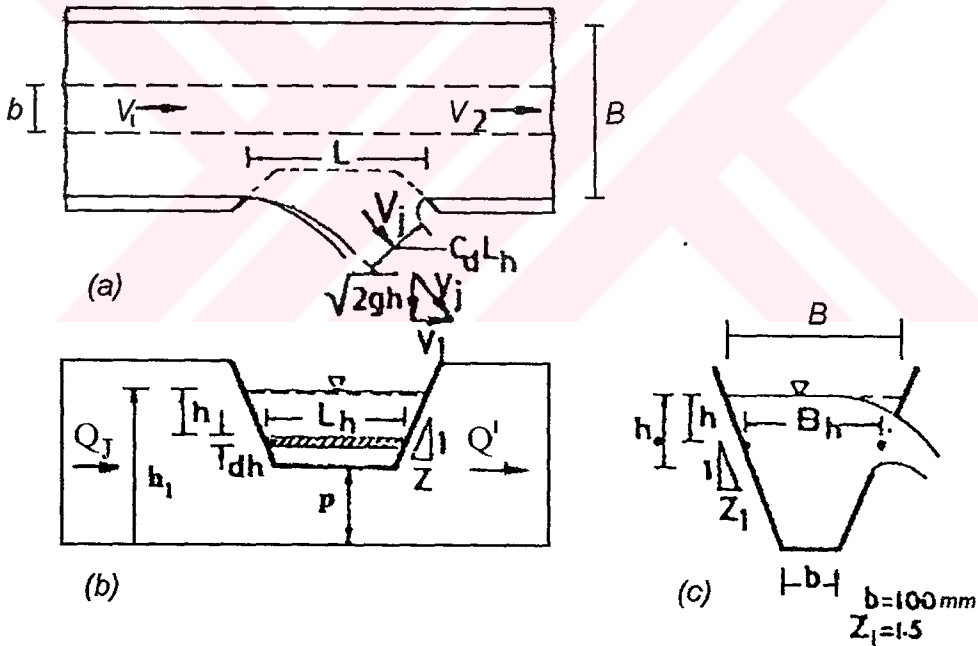


Şekil 1.6 $\phi(h/E)$ Fonksiyonunun (p/E) parametresinin farklı değerleri için değişimi (De Marchi, 1934).

Uyumaz (1982), dairesel enkesitli kanallardaki yan savaklarda ana kanal eksenindeki su yüzü profilinin differansiyel denklemini çıkartarak bu denklemin nümerik çözümünü yapmış ve çözümünün deneysel veriler ile uygunluğunu araştırmıştır. Ayrıca dikdörtgen enkesitli kanallardaki çözümlerle karşılaştırmış ve dikdörtgen enkesitli kanallardaki yan savaklar için verilen bağıntıların dairesel enkesitli kanallardaki yan savaklar için geçerli olmadığını belirtmiştir.

Araştırmacı, nehir ve sel rejimli akım şartlarında yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda nehir rejimli akım şartlarında yan savak enkesitinde ana kanal eksenindeki su yüzü profilinin membadan mansaba doğru giderek arttığını, sel rejimli akım şartlarında ise membadan mansaba doğru gittikçe azaldığını gözlemlemiştir.

Ramamurty, Tim ve Carballada (1986), trapez enkesitli kanalda trapez kesitli yan savaklar için bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelde, yan savaktaki akımın ana kanaldan belli bir açıyla sapan çok sayıda jet akısının toplamı olduğunu kabul etmişlerdir (Şekil 1.7).

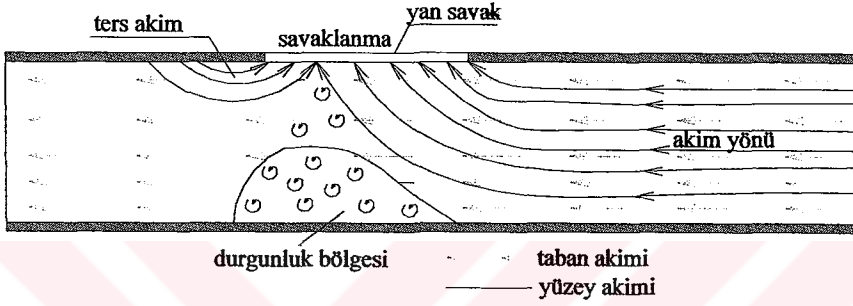


Şekil 1.7 Trapez enkesitli bir kanalda trapez yan savak genel görünüşü (Ramamurty, Tim ve Carballada, 1986)

Ağaçcıoğlu ve Yüksel (1998), dikdörtgen enkesitli bir kanala yerleştirilen dikdörtgen yan savak boyunca, ana kanaldaki nehir rejimli akım şartları için su derinliğinin yan savak başlangıcında minimuma ulaştıktan sonra yan savak ortasına kadar hızla yükseldiğini daha sonra da artış oranı azalarak yan savak sonuna doğru su yüzünün hemen hemen yatay olduğunu belirtmişlerdir. Yan savak boyunca mansaba doğru gidildikçe savaklanmadan

dolayı ana kanaldaki akımın yavaşlayarak kinetik enerjisinin azaldığını (yan savak boyunca Froude sayısı azalıyor), yan savağa doğru yanal akımdan kaynaklanan sekonder akımın şiddetlenerek yan savağın ilk yarısı sonunda ayrılma bölgesi, ikinci yarısında ise ters akımın meydana geldiğini belirtmişlerdir (Şekil 1.8).

Borghei vd., (1999), yanal akımdan dolayı ana kanaldaki enerji seviyesinin savak boyunca %3.7 azaldığını, dolayısıyla yan savak boyunca özgül enerjinin sabit olduğunu kabul etmekle fazla bir hata yapılmadığını öne sürmüştür.



Şekil 1.8. Yan savak boyunca durgunluk bölgesi ve ters akım (Ağaçcıoğlu ve Yüksel, 1998).

1.3 Yan Savak Debi Katsayısı ve Değişimi

Engels (1920), büyük ölçekli bir modelde yaptığı seri deneyler sonucunda dikdörtgen kanallardaki yan savaklar üzerindeki su yüzü profillerini gözlemleyerek, yan savak debisi için şu bağıntıyı vermiştir:

$$Q_w = C_d \sqrt{2g} L^{0.83} (h_2 - p)^{1.67} \quad (1.15)$$

burada,

Q_w = Yan savaktan savaklanan debi ($m^3/s.$),

L = Yan savak uzunluğu (m.),

h_2 = Yan savak mansabında ana kanal eksenine üzerindeki su derinliği (m.),

p = Yan savak kret yüksekliği (m.),

C_d = Yan savak debi katsayısı

olarak verilmiştir.

Engels (1920) tarafından verilen (1.15) eşitliği sabit genişlikli dikdörtgen kanal için geçerlidir. Engels aynı zamanda, genişliği savak uzunluğu boyunca tedricen azalan dikdörtgen en kesitli kanaldaki yan savak debisi için,

$$Q_w = C_d \sqrt{2g} L^{0.9} (h_2 - p)^{1.60} \quad (1.16)$$

ifadesini vermiştir. Ancak, C_d yan savak debi katsayısının değişimi ile ilgili herhangi bir açıklamada bulunmamıştır.

Collinge (1957), De Marchi'nin (1934) çalışmalarını baz alarak yan savak debi katsayısı için deneysel çalışmalarda bulunmuştur.

Araştırmacı, De Marchi'nin (1934) teoreminde vermiş olduğu 1.7 ifadesini,

$$Q_w = C_d \sqrt{2g} L (h - p)^{n'} \quad (1.17)$$

olarak dikkate almış, C_d ve n' katsayılarını bulmak için yan savak üzerinden savaklanan akımla ilgili deneyler yapmıştır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1 Savak katsayıları (Collinge, 1957)

Kanal Genişliği (m.)	Batık Nap		Serbest Nap	
	C_d	n'	C_d	n'
0.305	---	---	0.35	1.42
0.102	1.33	1.80	0.37	1.46

Collinge (1957), $Fr_1=0.95$ civarında ve $Fr_1=1,15$ değerinden daha büyük değerlerde deneysel sonuçların De Marchi'nin (1934) teoremine çok iyi uyum sağladığını söylemiş fakat $Fr_1=1.0$ civarında teori ile deneysel çalışmalar arasında büyük farklılıklar olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, teori ile deneysel sonuçlar arasındaki bu farklılığı enerji kayıplarına ve savak katsayısına bağlamıştır.

Hem sel rejimli hem de nehir rejimli akımlarda enerji kayıplarından dolayı deneysel sonuçlardan elde edilen su yüzü profilleri teorik ifadeden elde edilenlerden daha büyüktür.

Bunun sonucu olarak, deneysel olarak bulunan yan savak debisi teoriye göre daha fazladır. Çalışmada, C_d yan savak debi katsayısının yaklaşık değeri kullanılarak teorik debi hesaplanmıştır. Kanaldaki akım hızı artarken C_d debi katsayısı azaldığından yan savaktan savaklanan debi teorik debiden daha küçüktür. Collinge (1957), De Marchi (1934) teoreminin yalnızca nehir rejimli akım şartlarında iyi sonuçlar verdiğini ifade etmiştir.

Subramanya ve Awasthy (1972), yan savaklarla ilgili çalışmalarının çoğunun ampirik formda olduğunu ve konu ile ilgili ilk gerçekçi yaklaşımın De Marchi (1934) tarafından ortaya konulmasına rağmen denklemdeki yan savak debi katsayısının değişimi hakkında yeterli bilgi olmadığını söylemişlerdir.

Subramanya ve Awasthy (1972), yan savağın birim boyundan geçen debi için (1.7) ifadesini dikkate alarak, C_d katsayısının değişimini incelemişler ve boyut analizi sonucunda, C_d 'ye etkili boyutsuz parametreleri,

$$C_d = f \left\{ Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{L}{b}, \frac{h_1}{L}, \frac{p}{h_1} \right\} \quad (1.18)$$

olarak elde etmişlerdir.

Araştırmacılar C_d 'ye etkili en önemli parametrenin ana kanaldaki Froude sayısı (Fr_1) olduğunu belirlemişler, diğer parametrelerin etkisinin az olduğunu öne sürmüşlerdir. Nehir rejimli bir akımda yan savak debi katsayısı için,

$$C_d = 0.407 \left\{ 1 - \sqrt{\left[\frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2} \right]} \right\} \quad (1.19)$$

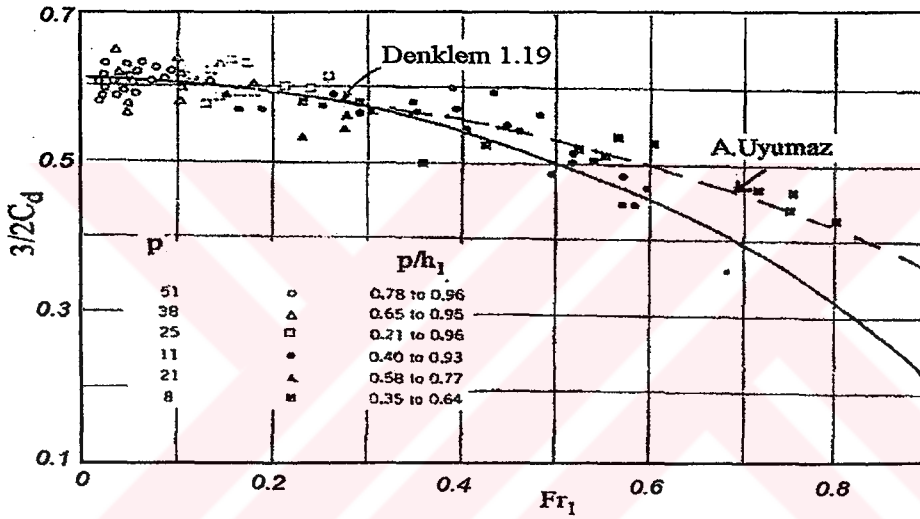
ifadesini vermişlerdir. Bu bağıntının sıfır savak kret yükseklikli yan savaklar için nehir rejimine sahip kanal şartlarında, deneysel olarak bulunan C_d değerleriyle çok iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir. Sonlu yükseklikli yan savakta ise aynı akım şartlarında $Fr_1 > 0.6$ için ortaya çıkan küçük sapmalar, deneysel çalışmalarda meydana gelen hatalara bağlanmıştır (Şekil 1.9). Uyumaz (1982), deneysel veriler kullanılarak elde edilen (1.19) bağıntısının uygun olarak geçirilmediğini bu verilerin Şekil 1.9'daki eğri ile daha iyi temsil edilebileceğini belirtmiştir.

Subramanya ve Awasthy (1972), sel rejimine sahip akım şartlarında ise, L/b , h_1/L , p/h_1

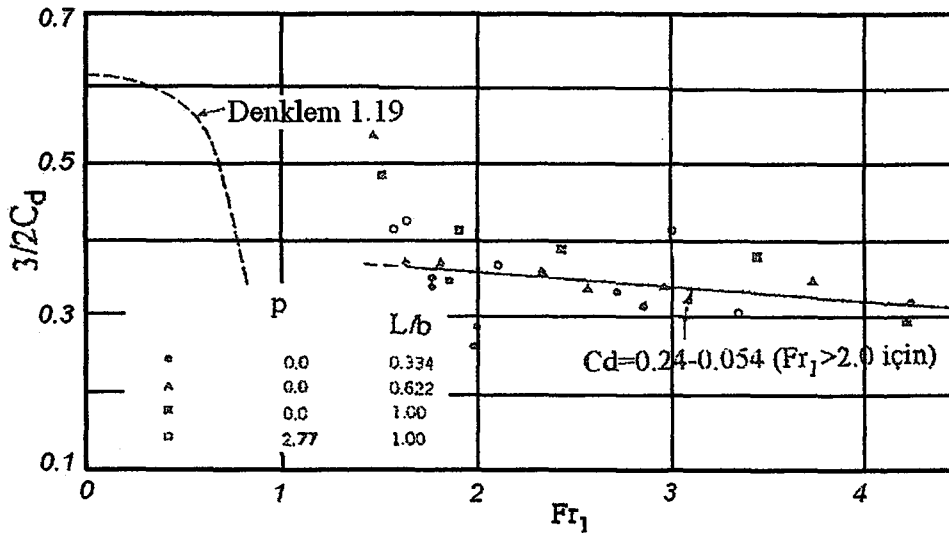
parametrelerinin etkilerinin hissedilmediği gibi, nehir rejiminde debi katsayısına etki eden Fr_1 sayısının etkisinin de az olduğu görülmüştür. Araştırmacılar, sel rejiminde Fr_1 sayısının etkisinin az olmasını sürtünme tesirlerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, $Fr_1 > 2.0$ için C_d 'nin değişimini,

$$C_d = 0.24 - 0.053 Fr_1 \quad (1.20)$$

olarak belirtmişlerdir (Şekil 1.10). Araştırmacılar, gerek nehir rejimi için elde edilen (1.19) bağıntısı ve gerekse sel rejimi için elde edilen (1.20) bağıntısının, yan savaklar üzerinden geçen debinin tahmininde kullanılabileceğini, bunun hem sıfır eşik yükseklikli hem de sonlu yükseklikli yan savaklar için mümkün olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 1.9 Nehir rejimli akım şartlarında C_d yan savak debi katsayısının Fr_1 ile değişimi (Subramanya ve Awasthy, 1972)



Şekil 1.10 Sel rejimli akım şartlarında C_d yan savak debi katsayısının Fr_1 ile değişimi (Subramanya ve Awasthy, 1972)

El-Khashap (1975), dikdörtgen en kesitli bir kanalda C_d yan savak debi katsayısına etkili parametreleri boyut analizi yardımıyla,

$$C_d = f\{Fr_1, p/h_1, L/h_1, b/h_1\} \quad (1.21)$$

olarak elde etmiş ve ayrıca akımın yan savaktan sapma açısı ψ 'ye etki eden boyutsuz parametreleri de,

$$\psi = f\{Fr_1, p/h_1, L/h_1, b/h_1\} \quad (1.22)$$

olarak belirlemiştir. Yukarıdan da görüleceği gibi C_d ve ψ aynı boyutsuz parametrelerin fonksiyonudur ve birbirleriyle doğrudan ilişkilidir.

Araştırmacıya göre, C_d yan savak debi katsayısı ile ilgili çalışmalardaki farklılıklar, yan savak boyunca değişen boyuna hız değerleri ve akımın yan savağa sapma açısından meydana gelmektedir.

Uyumaz (1982), dairesel en kesitli kanallarda yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda nehir rejimli akım şartlarında C_d yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile exponansiyel bir şekilde değiştiğini, L/D 'nin (D dairesel en kesitli kanal çapı) büyük değerlerinde Froude sayısına fazla bağlı olmadığı ama küçük L/D değerlerinde bağımlılığın arttığını gözlemlemiştir. Araştırmacı, nehir rejimli akım şartları için yan savak debi katsayısını,

$$C_d = B + C\sqrt{1 + Fr_1} \quad (1.23)$$

olarak vermiştir. Burada B ve C katsayıları

$$B = 0.21 + 0.094\sqrt{1.74\frac{L}{D} - 1} \quad (1.24)$$

ve

$$C = 0.22 - 0.08\sqrt{1.68\frac{L}{D} - 1} \quad (1.25)$$

şeklinde verilmiştir.

Sel rejimli akım şartlarında ise yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile az bir değişim gösterdiğini ve değişimin lineer olduğunu belirterek,

$$C_d = MFr_1 + N \quad (1.26)$$

ifadesini vermiştir. Araştırmacı, M ve N katsayılarının p/D'ye fazla bağımlı olmadığını, L/D'ye ise bağılı olduğunu belirtmiş ve p/D'yi ihmal ederek M ve N katsayılarını,

$$M = 0.046 + 0.054 \sqrt{1.67 \frac{L}{D} - 1} \quad (1.27)$$

ve

$$N = 0.24 + 0.021 \sqrt{1 + 35.3 \frac{L}{D}} \quad (1.28)$$

şeklinde vermiştir.

Kumar ve Pathak (1987), dikdörtgen en kesitli kanallarda nehir rejimli akım şartlarında keskin ve kalın kenarlı üçgen yan savaklarla ilgili deneysel çalışmalar yaparak C_d yan savak debi katsayısını belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmacılar ayrıca De Marchi (1934) tarafından verilen (1.14) denkleminin yan savak uzunluğunun hesaplanmasında kullanılabileceğini ve (1) ile (2) kesitlerinde ölçülen debi ve derinlik değerlerinden C_d 'nin hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir (Şekil 1.11). Bu bağıntı üçgen yan savaklar için aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

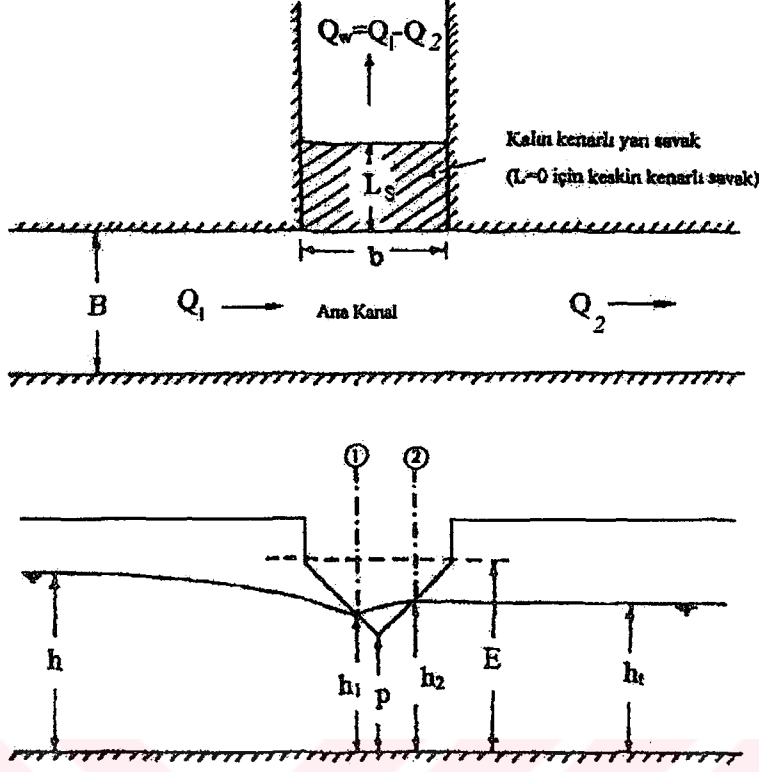
$$L = x_2 - x_1 = \frac{15b}{4C_d} \left\{ \phi \left(\frac{h_2}{E} \right) - \phi \left(\frac{h_1}{E} \right) \right\} \quad (1.29)$$

Araştırmacılar, olaya etkili boyutsuz parametreleri keskin kenarlı üçgen yan savaklar için (1.30) ifadesi ile, kalın kenarlı yan savaklar için ise (1.31) ifadesi ile vermişlerdir.

$$C_d = f(Fr_1, \alpha, p/h_1) \quad (1.30)$$

$$C_d = f(Fr_1, \alpha, p/h_1, h/L_s) \quad (1.31)$$

Burada; α , üçgen yan savak tepe açısı, L_s , kalın kenarlı savak uzunluğudur.



Şekil 1.11 Üçgen yan savak görünüşü (Kumar ve Pathak, 1987)

Ayrıca yan savaklara ve akım karakteristiklerine ait değerler Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2 Savak boyutları ve akım karakteristikleri (Kumar ve Pathak, 1987)

Savak Tipi	α	p (m)	Q_1 (lt/s)	Q_w (lt/s)	Fr
Keskin kenarlı	$60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$	0.0608-0.2422	19.5-118.1	4-43.1	0.09-0.694

Kumar ve Pathak (1987), Subramanya ve Awasthy’nin (1972) dikdörtgen yan savaklarda p/h ’in etkisini ihmal ettiklerini belirterek, kendilerinin de bu çalışmada p/h_1 ’in etkisini ihmal ettiklerini ifade etmişlerdir. Bunun sonucunda yan savak debi katsayısı C_d ’nin yalnızca Fr_1 ve α ’ya bağlı olduğunu kabul ederek C_d için aşağıdaki ifadeleri vermişlerdir.

$$C_d = 0.668 - 0.381Fr_1 \quad (\alpha = 60^\circ)$$

$$C_d = 0.619 - 0.203Fr_1 \quad (\alpha = 90^\circ)$$

$$C_d = 0.642 - 0.042Fr_1 \quad (\alpha = 120^\circ)$$

(1.32)

Araştırmacılar, farklı tepe açlarına sahip üçgen yan savakların kullanılması durumunda ise C_d yan savak debi katsayısının,

$$C_d = \left[0.811 - 0.321 \tan \frac{\alpha}{2} + 0.129 \tan^2 \frac{\alpha}{2} \right] - \left[0.695 - 0.638 \tan \frac{\alpha}{2} + 0.150 \tan^2 \frac{\alpha}{2} \right] Fr_1 \quad (1.33)$$

ifadesinden hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

Kalın kenarlı üçgen yan savaklarda ise ince kenarlı üçgen yan savaklar için verilen yan savak debi katsayısı C_d 'nin K gibi bir katsayı ile çarpılarak kullanılması gerektiğini ve K katsayısının da,

$$K = 0.8 + 0.10 \left(\frac{h_1 - p}{L_s} \right) \quad (1.34)$$

ifadesinden hesaplanması gerektiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca savaklanan debinin keskin kenarlı üçgen yan savaklar için,

$$Q_w = 0.5908 C_d \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} (h_1 - p)^{5/2} \quad (1.35)$$

kalın kenarlı üçgen yan savaklar için ise,

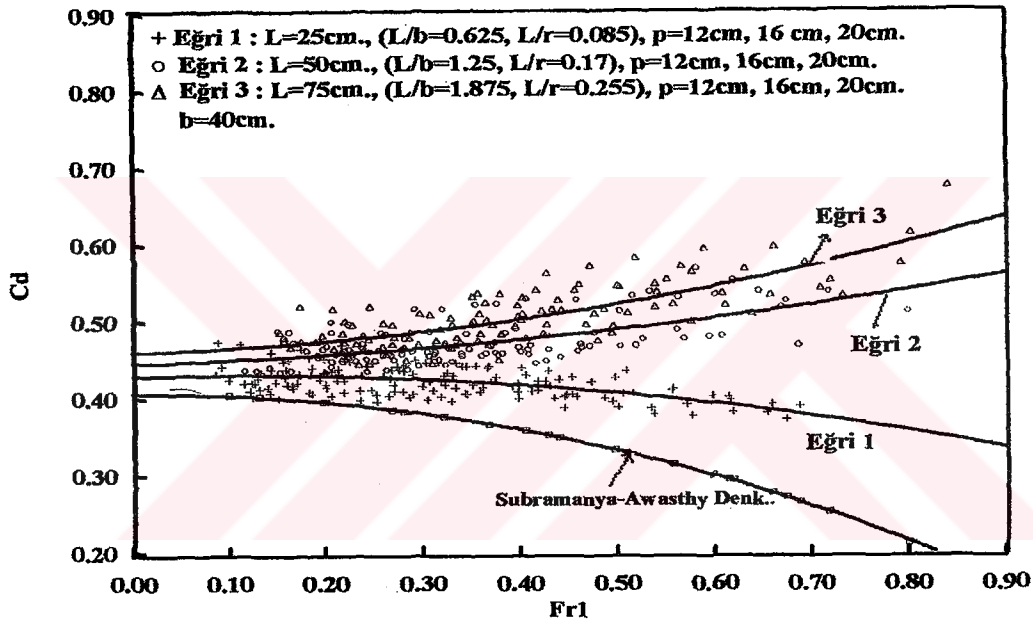
$$Q_w = 0.5566 K C_d \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} (h_1 - p)^{5/2} \quad (1.36)$$

ifadesinden hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

Tozluk (1994), yan savak probleminin çözümünde en uygun yaklaşımlardan birinin De Marchi (1934) tarafından enerjinin korunumunu kullanılarak yapıldığını, Subramanya ve Awasthy (1972) tarafından verilen C_d yan savak debi katsayısının yan savaktan savaklanan akımın kanal eksenine ile yapmış olduğu ψ savaklanma açısının sabit olması hali için verildiğini, fakat gerçekte bu açının savak boyunca değişerek her bir akışkan jeti için farklı bir değer aldığını ifade etmiştir.

Ağaçcıoğlu (1995), dikdörtgen enkesitli doğrusal kanalda farklı uzunluklara sahip yan savaklarla yaptığı deneysel çalışmalarda C_d yan savak debi katsayısının Fr_1 ile değişimini

incelemiş ve elde ettiği eğrileri Awasthy'nin (1.19) eşitliğinden elde ettiği eğri ile karşılaştırmıştır (Şekil 1.12). Araştırmacı $L/b=0.625$ için elde ettiği C_d yan savak debi katsayısı eğrisinin Subramanya ve Awasthy'nin (1972) elde ettiği eğri ile aynı eğilime sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca araştırmacı $L/b=1,25$ ve $L/b=1,875$ için elde ettiği C_d yan savak debi katsayılarının Subramanya ve Awasthy'nin (1972) elde ettiği eğriyle karşılaştırmış ve büyük farklılıklar gösterdiğini belirtmiştir. Subramanya ve Awasthy (1972) deneylerini $L/b < 1$ için yaptıklarından dolayı vermiş oldukları eşitliğin $L/b > 1$ için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Araştırmacı, büyük uzunluklu yan savaklarda yanal akımın yarattığı sekonder akımın şiddetinin arttığını ve bunun sonucunda da daha büyük C_d yan savak debi katsayısı elde edildiğini ifade etmiştir.



Şekil 1.12 Doğrusal kanalda farklı L/b oranları için yan savak debi katsayısının Subramanya ve Awasthy denklemiyle karşılaştırılması (Ağaçcıoğlu, 1995)

Ağaçcıoğlu ve Yüksel (1998), çeşitli araştırmacıların doğrusal kanallardaki nehir rejimli akımlar için C_d yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimini veren bağıntıları toplu halde Çizelge 1.3'te göstermişlerdir.

Muslu (2002), yan savak akımıyla ilgili nümerik bir analiz geliştirerek deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve iyi sonuçlar elde etmiştir.

Çizelge 1.3 Nehir rejimli akım için doğrusal kanalda yan savak debi katsayısı ilgili denklemler (Ağaçcıoğlu ve Yüksel, 1998)

Kaynak (1)	C_d Katsayısıyla İlgili denklemler (2)	Froude Sayısı (3)	L/b (4)	p/h_1 (p, m) (5)	Standart Sapma (6)
Subramanya ve Awasthy (1972)	$C_d = 0.576 \left\{ \frac{1 - F_1^2}{2 + F_1^2} \right\}^{0.5}$	0.02-0.85	0.2-1.0	0.2-0.96 (0.0-0.6)	0.09
Nandesamoorthy and Thomson (1979)	$C_d = 0.288 \left\{ \frac{2 - F_1^2}{1 + 2F_1^2} \right\}^{0.5}$	—	—	(0.0-0.6)	—
Yu-Tech (1972)	$C_d = 0.415 - 0.148F_1$	—	—	(0.0-0.6)	—
Ranga Raju vd., (1979)	$C_d = 0.54 - 0.40F_1$	0.1-0.5	0.1-0.7	(0.2-0.5)	0.08
Cheong (1991) yamuk kanallar için	$C_d = 0.30 - 0.14F_1^2$	0.28-0.78	0.5-1.64	(0.0)	0.09
Sing vd., (1994)	$C_d = 0.99 - 1.26F_1$				0.07
	$C_d = 0.24 + 0.54p/h_1$	0.23-0.43	0.25-0.5	0.42-0.85	0.09
Jalili ve Borghei (1996)	$C_d = 0.474 - 0.273F_1 - 0.146p/h_1$	0.671	9.42	0.86	—
Borghei vd., (1999)	$C_d = 0.467 - 0.32F_1 - 0.2p/h_1 + 0.04L/b$	0.1-0.9	0.66-2.3	0.86	—

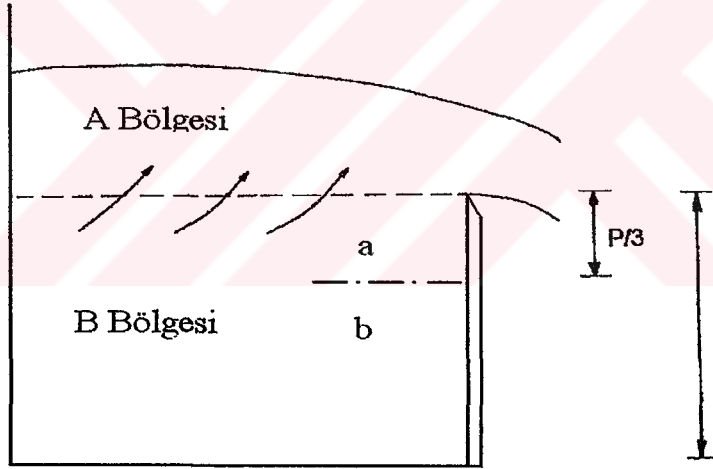
1.4 Yan Savak Kesitinde Hız Dağılımı ve Sekonder Akım

El-Khashab (1975), yan savak boyunca akımın hareketini ve sekonder akımın yapısını aşağıdaki gibi özetlemiştir:

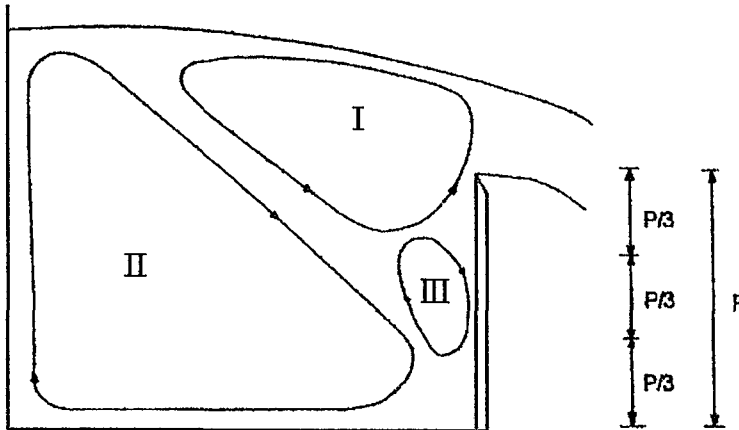
Yan savak eşiği üzerinde A bölgesindeki su kütlesi doğrudan yan savağa hareket ederek savaklanır (Şekil 1.13). Yan savak eşiği altındaki B bölgesindeki akım iki farklı davranış gösterir.

a) Savak eşiği yakınlarındaki su kütlesi (Savak eşik yüksekliğinin yaklaşık 1/3 lük kısmı) A bölgesindeki su kütlesine katılır ve savağa yönelir. Bu, sekonder akım planındaki her su zerreciğinin hızının düşey bileşeninden kaynaklanmaktadır.

b) Savak eşiği altındaki $2/3 p$ 'lik kısımdaki su kütlesi doğrudan kanal tabanına yönelir. Yan savağın ikinci yarısı boyunca sekonder akımın etkisi daha belirgin hale gelir. Bundan sonra sekonder akımda bozulmalar olur. İç kıyıda düşük hız alanı (durgunluk bölgesi) hızla gelişir. Bu bölgede iç kıyıya yakın çok şiddetli sekonder akımın mevcut olduğu tespit edilmiştir. Kanal tabanı yakınlarında düşük enerjili akışkan savak tarafından iç kıyıya süpürülür ve iç kıyıda yükselerek, akımın üst bölgelerinde iç kıyıda düşük enerjili bir durgunluk bölgesi oluşur (II bölgesi). Yüksek hızlı akım çizgileri durgunluk bölgesinin daha da üzerinden geçerek savaklanır (Şekil 1.14). Bunun sonucunda, yüksek hızlı akım yeni bir bölge oluşturarak bunu yan savağa doğru iter (I bölgesi). Yan savak boyunca bu alanın değişimi hızlıdır fakat bu değişim savak sonuna doğru kararlı hale gelir. Bu yeni bölgenin (I bölgesi) büyüklüğü yan savak mansabına doğru gidildikçe küçülerek, savağa yakın bölgeler hariç tüm en kesitte küçük hızlar elde edilir. Ana kanal boyunca en kesitteki durgunluk bölgesi devam ederken, I bölgesindeki su kütlesi yan savağa yönelir. I ve II bölgeleri arasında, büyük hız azalması sebebiyle, süreksizlik meydana gelir (III bölgesi). Bu bölgede de sınıra yakın çok şiddetli sekonder akım görülür.



Şekil 1.13 Yanal akım sebebiyle kanal en kesitindeki akımın hareketi (El-Khashab, 1975)

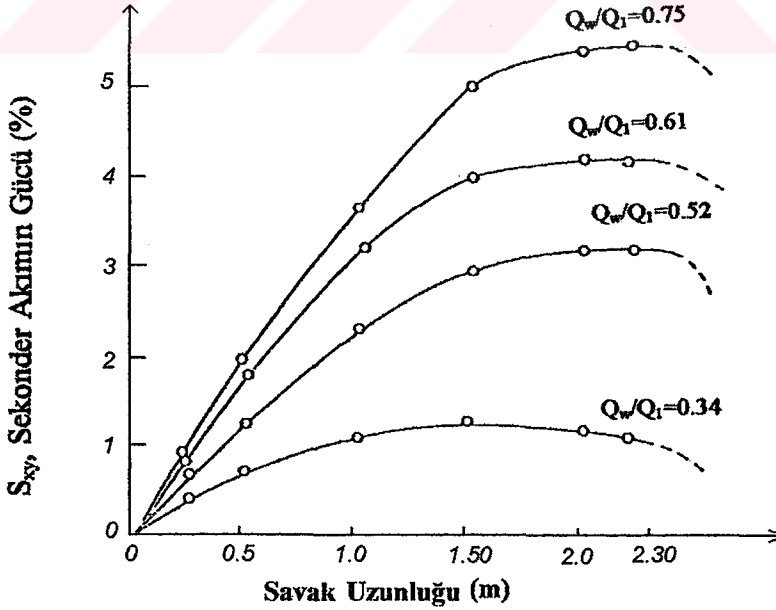


Şekil 1.14 Yanal akım sebebiyle kanal en kesitinde oluşan sekonder akım (El-Khashab, 1975)

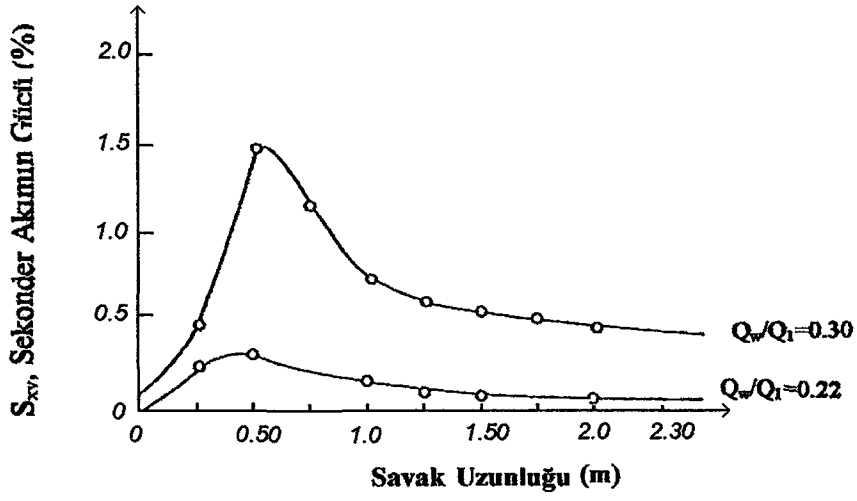
Araştırmacının en önemli tespitlerinden biri de daha önceki çalışmalarda belirtilmeyen yanal akımdan dolayı ana kanalda meydana gelen sekonder akımdır. Sekonder akımın tayini için Shukry'nin (1950) yaklaşımı kullanılarak elde edilen sekonder akımın gücünün yan savak boyunca değişimi Şekil 1.15 ve Şekil 1.16'de nehir ve sel rejimli akım şartları için ayrı ayrı verilmiştir. Şekillerde verilen sekonder akımın gücü, kanal en kesiti 20 cm^2 'lik alanlara bölünmüş ve her bir alanın kinetik enerjisi $(V_x^2/2g + V_y^2/2g)$ beş delikli pitot tüpü ile, akımın toplam enerjisi $(V^2/2g)$ ise klasik pitot tüpü ile hesaplanmış ve aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir.

$$S_{xy} = \left\{ \sum V_x^2/2g + \sum V_y^2/2g \right\} / \sum \{ V^2/2g \} \quad (1.37)$$

Şekil 1.15' den de görüleceği gibi, nehir rejimli akım durumunda sekonder akımın gücü yan savak boyunca artarak gitmekte ve yan savaktan b kanal genişliği kadar mesafe sonra azalmaktadır. Yan savak yüksekliği ve yan savak uzunluğu sabit tutulursa Q_w/Q_1 oranı (savaklama oranı) arttıkça yani yan savak üzerindeki nap kalınlığı arttıkça sekonder akımın gücü artar. Sel rejimli akımlarda ise sekonder akımın gücü hızlı bir şekilde artarak maksimuma ulaşmakta ve sonra hızla azalmaktadır.



Şekil 1.15 Dikdörtgen en kesitli doğrusal kanalda nehir rejimli akım durumunda yan savak boyunca sekonder akımın gücünün değişimi (El-Khashap, 1975).



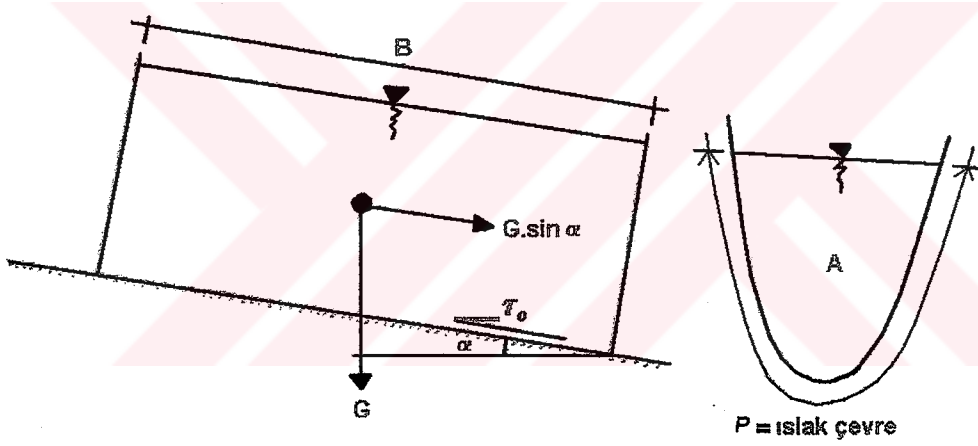
Şekil 1.16 Dikdörtgen en kesitli doğrusal kanalda sel rejimli akım durumunda yan savak boyunca sekonder akımın gücünün değişimi (El-Khashap, 1975)

2. KATI MADDE HAREKETİ

2.1 Giriş

Doğal akarsuların yatakları akımın belli şartları altında hareket eden kum, çakıl ve kaya gibi katı madde tanelerinden oluşmaktadır. Bu taneler daha önceden akarsu yatağında bulunabileceği gibi, akarsu tarafından taşınan aşınma malzemeleri de olabilir.

Üniform bir akımda kuvvetlerin dengesi, akışkanın kanal sınırlarına etkilediği kayma gerilmesinin (τ_0), akışkan kütlesini etkileyen yerçekimi kuvvetinin kanal eksenine paralel bileşenine eşit olmasını gerektirir (Şekil 2.1). Bu (2.1) eşitliğinde gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Üniform bir kanalın birim boyunda etkili kuvvetler (Bayazıt, 1971)

$$G \cdot \sin \alpha = \tau_0 \cdot B \cdot P \quad (2.1)$$

$$\gamma \cdot B \cdot A \cdot \sin \alpha = \tau_0 \cdot B \cdot P \quad \text{ve} \quad R = \frac{A}{P} \quad \text{olduğuna göre,}$$

$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot J \quad (2.2)$$

bulunur.

Aralarında elektro kimyasal kuvvetler bulunmayan, kohezyonsuz kum ve çakıl gibi ayrık taneleri tabanda tutan en önemli faktör tanelerin ağırlığıdır. Akım ise, taneye kayma gerilmesi

uygulayarak onu hareket ettirmeye çalışır. Akımın yarattığı kayma gerilmesinin (τ_0) belli bir değere erişmesi halinde (τ_{kr}), tabanda bazı taneler kayarak ve yuvarlanarak ilerler. Bu hareket şekline “sürüntü hareketi” denilmektedir. Akımın taban kayma gerilmesini daha da artması durumunda, sürüntü hareketi yapan tanelerinden bir kısmı tabandan koparak akıma karışıp, kısa bir zaman akım içinde hareket ettikten sonra tekrar tabana dönerek “sıçrama” hareketi yapar. Sıçramanın başlamasının nedeni tane yakınındaki basıncın değişmesi ya da başka bir tanenin çarpmasıdır. Akım hızının daha da artırılması, büyüyen taban kayma gerilmesinin etkisi ile tabandan ayrılan tanelerin türbülans çevrileri yardımıyla tabandan daha uzak noktalara taşınmasına yol açar. Bu hareket şekline “askı” hareketi denir. Askı hareketi yapan tanelerin çökme hızları, akımın türbülans hızının düşey bileşeni tarafından karşılanır. Bu etkiler altında, tanelerin bir kısmı uzun zaman akarsu içinde askı halinde taşınabilir veya askı halindeki tane tekrar tabana dönebilir (Bayazıt, 1971).

Tanenin gerek tabandan ayrılmasında gerekse askı halinin devam etmesinde, türbülansın önemli ölçüde etkisi vardır. Türbülans çevrilerinin meydana getirdiği pozitif basınç gradyanı ile taneler tabandan ayrılmaktadır.

2.2 Sürüklenme Hareketinin Başlaması

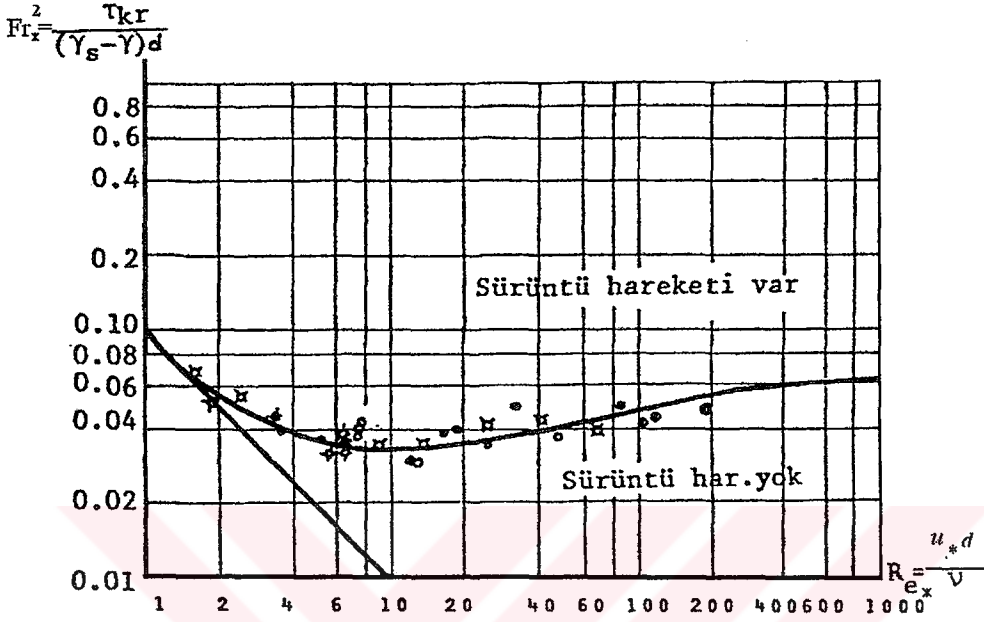
Akımın yarattığı taban kayma gerilmesinin (τ_0) taneyi hareket ettirebilecek kritik kayma gerilmesinden (τ_{kr}) daha büyük olduğu değerlerde tabanda hareket başlar.

Bu kavramı ilk defa ortaya atan Shields (1936), kayma gerilmelerine sadece düzen bozucu kuvvetlerin neden olduğu kabulünden hareketle, yaptığı deneysel çalışmalardan şu sonuçları çıkarmıştır.

1) Taban kayma gerilmesi, yalnızca verilmiş bir sıvıdaki verilmiş bir malzeme tipi için, sürüklenme başlangıcı tane Reynolds sayısına bağlıdır ($Re_* = \frac{u_* d}{\nu}$).

2) Malzemenin sürüklenme başlangıcındaki kritik kayma gerilmesi tane çapıyla, üniform geometrik malzeme için, su altındaki birim hacim ağırlığı ($\gamma_s - \gamma$) ile orantılıdır. ($\gamma_s - \gamma$) değerleri 0,3 - 3,3 arasında geçerlidir.

Shields'in bu sonuçlardan hareketle verdiği tane Froude sayısının, tane Reynolds sayısına göre değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir. Eğrinin üzerinde kalan bölgede taban hareketli, altında kalan bölgede ise hareketsizdir. Eğri üzerinde laminar, geçiş ve türbülanslı olmak üzere üç bölge söz konusudur.



Şekil 2.2 Shields diyagramı (Shields, 1936)

Ancak Shields diyagramına iki yönden itiraz gelmiştir.

1) Fr_* ve Re_* sayılarında bulunan kayma hızı (u_*) bilinmemektedir. u_* 'ın deneme yanılma yoluyla bulunması pratik değildir.

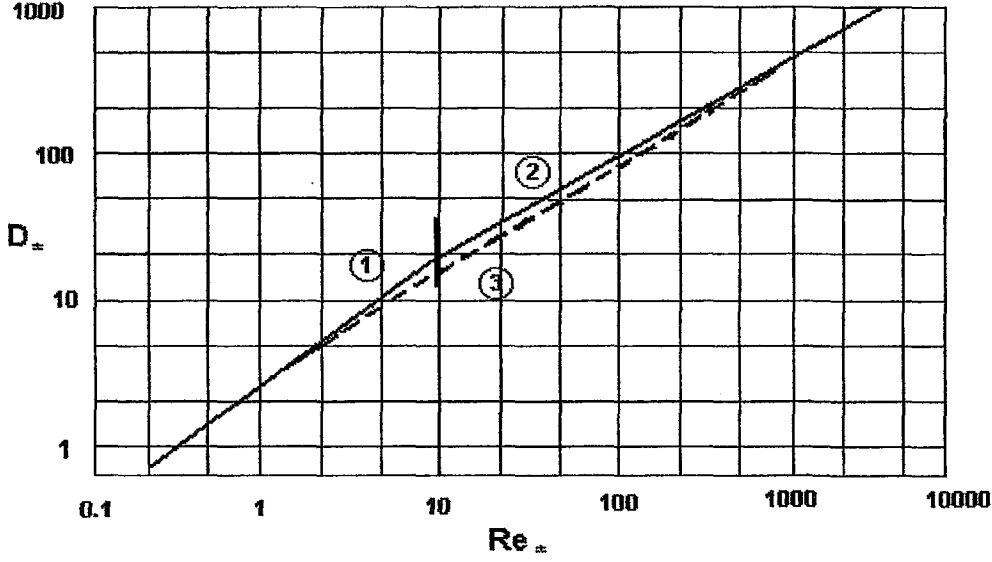
2) Bu diyagram elde edilirken türbülans dikkate alınmamış, sadece düzen bozucu kuvvetler göz önüne alınmıştır. Fakat akarsuların hemen hepsinde belli miktarda bulunan türbülans akım alanına ve buna bağlı olarak da taban malzemesi üzerine etki etmektedir.

Shields diyagramına yapılan bu itirazlardan birincisi Bonnefille (1963) tarafından şöyle giderilmiştir.

$\frac{Fr_*^2}{(Re_*)^2}$ oranında elde edilen “boyutsuz malzeme çapı” olan :

$$D_* = \left[\frac{(\gamma_s - \gamma)}{\rho \nu^2} \right]^{1/3} d \quad (2.3)$$

ile, Re_* ilişkisi kurularak, Shields diyagramı yeniden çizilmiştir (Şekil 2.3). Şekil 2.3’de



Şekil 2.3 Bonnefille’in verdiği diyagram (Bonnefille, 1963)

$$1 \text{ nolu eğri için ; } D_* = 2,5(Re_*)^{4/5} \quad (2.4)$$

$$2 \text{ nolu eğri için ; } D_* = 3,7(Re_*)^{5/8} \quad (2.5)$$

$$3 \text{ nolu eğri için ; } D_* = 2,7(Re_*)^{2/3} \quad (2.6)$$

bağıntıları verilmiştir.

Kritik taban kayma gerilmesinin bulunmasında, Shields eğrisi bugün en çok uygulanan bir kriter olmakla birlikte, kritik kayma hızının deneme-yanılma ile bulunmasının zorluğu sebebiyle türbülanslı akımdan sürüklenme başlangıcı için kritik akım hızını göz önüne alan bağıntılar verilmiştir. Bunlardan Goncharov (1964) ve Hancu (1971) tarafından verilen bağıntılar aşağıda sunulmuştur.

$$V_{kr} = \sqrt{\frac{2\rho\gamma_s^* d}{\alpha} \log \frac{8,8h}{d}} \quad (2.7)$$

h : Kanaldaki su derinliği,

γ_s^* : Bağlı özgül ağırlık,

α : 1,75 (tanelerin ortalama hız değerinde harekete geçmesi hali için),

α : 3,5 (tabanda türbülans hızının en büyük değerinde bile hiç hareket olmaması hali için).

Hancu (1971):

$$V_{kr} = a \cdot (gd \frac{\rho_s - \rho}{\rho})^{1/2} \cdot (\frac{h}{d})^{0.2} \quad (2.8)$$

$d_{90} > 0,7$ ise $a=1$

$d_{90} < 0,7$ ise $a=1,2$ ve $1,4$

2.3 Hareketli Tabanın Aldığı Şekiller

2.3.1 Taban Şekillerinin Özellikleri

Akarsuda katı madde taşınımı, kaynağına göre taban ve yüzey erozyonu olmak üzere ikiye ayrılır. Taban ve akım şartlarına bağlı olan taban erozyonu iri tanelerin akarsu yataklarından sökülmesidir. Taban erozyonu sürüntü ve askı malzemesinin ana kaynağıdır. Yüzey erozyonu ise ince tanelerin yeryüzünden sökülmesidir. Akarsu tabanında hareket eden katı madde içinde çok az yüzde ile bulunur. Bu malzeme havzadan akarsuya ulaşarak askı malzemesine kaynak teşkil eder.

Tabanı akımın hareket ettirebileceği tanelerden oluşan bir açık kanalda yapılacak gözlemler, tanelerin hareketi ve bu hareketin taban şeklinde meydana getirdiği değişiklikler belirlenebilir. Belli bir derinlikte bir V_{kr} değerinden itibaren bazı taneler önce hafif titreme ve sıçramalar yapmak suretiyle harekete başlar. Tabandan sökülen bir tane taban yakınlarında sürüklenme, yuvarlanma ya da küçük sıçramalarla belli bir yol aldıktan sonra yeniden sükunete geçer. Bu sırada taban yüzünün ortalama şekli bir düzlemdir.

Tanelerin harekete geçmesiyle taban yakınındaki akım hızı ve türbülans karakteristikleri önemli miktarda değişime uğrar. Akım hızının biraz daha artırılmasıyla tabanın artık düzlem olarak kalmadığı, akım eksenine dik doğrultuda küçük dalgacıkların (ripple) meydana geldiği görülür. Gözlemler, bu dalgaların teşekkülünde tabanın bazı bölgelerinde tanelerin sürekli olarak yığılması buna karşılık buralardan sökülen tanelerin çok az olması ile başladığını göstermektedir. Dalgacıkların mansaplarındaki çevriler hareket halindeki taneleri tutarak

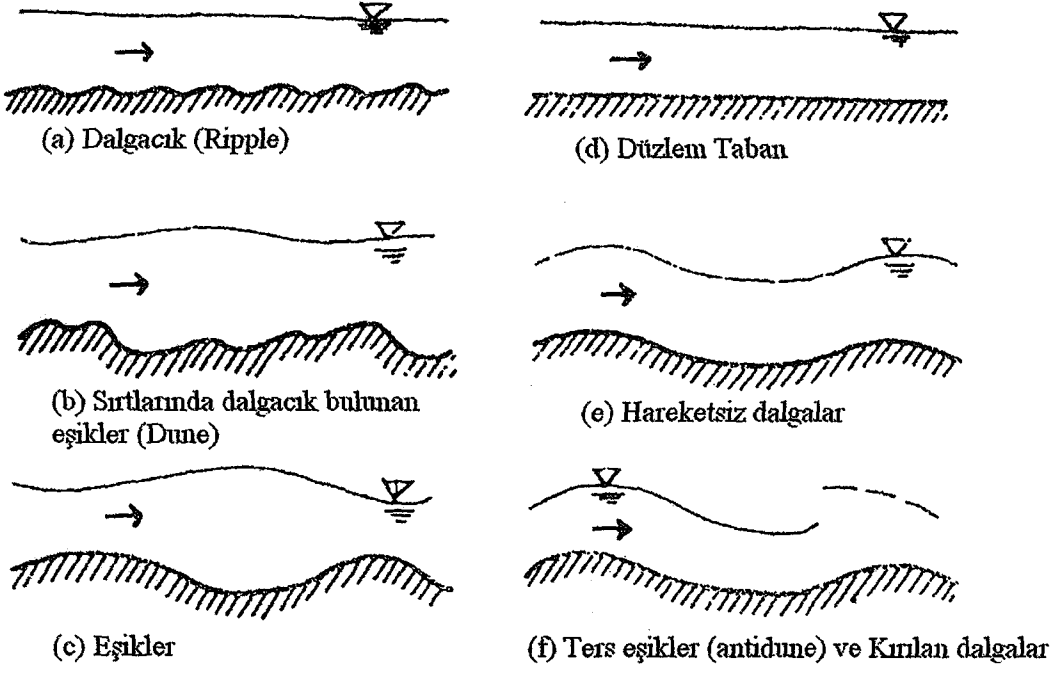
dalga yüksekliğini gittikçe arttırır ve kısa bir süre içinde memba yüzleri yatık, mansap yüzleri dik (katı malzemenin su altındaki şev açısına yakın bir eğimde) dalgalar (eşik) meydana gelir.

Akım hızı biraz daha arttırılırsa, taneler bir dalgadan diğerine atlamak imkanı bulur ve dalgaların uzunlukları artmaya devam ettiği halde yüksekliklerinin ya çok az arttığı ya da sabit kaldığı görülür. Hızın daha büyük değerlerinde dalgalar hemen hemen tamamıyla ortadan kalkarlar ve taban başlangıçtaki gibi bir düzlem halini alır. Ancak, dalgalardan düz tabana geçiş keskin bir sınırla olmamakta, tabanın bazı bölgesinde dalgaların bulunduğu, bazı bölgelerinde tabanın düz olduğu bir geçiş bölgesi görülür.

Ayrıca hızın artmasıyla dalgaların biçimleri de değişir. Önce nispeten kısa ve üç boyutlu (yanal uzunluğu küçük) olan dalgacıklar (ripple) sonra boyutları daha büyük olan kanalın bir kenarından diğerine kadar uzayan eşikler (dune) şeklini alırlar. Bu eşiklerin sırtlarında ayrıca küçük dalgacıklar teşekkül eder. Dalgacıkların uzunlukları 30 cm'den, yükseklikleri 3 cm'den küçük olduğu halde eşiklerin boyutları daha büyüktür. Tabanın dalgacıklarla kaplı olması halinde su yüzeyinde bir değişme meydana gelmediği halde eşiklerin tepeleri üzerinde su yüzünün hafifçe alçaldığı, eşiklerin alçak noktaları üzerinde ise yükseldiği görülür (Bayazit, 1971). Tabanın alabileceği çeşitler Şekil 2.4'de toplu olarak gösterilmiştir.

Akımın hızı daha da arttırılacak olursa (sel rejimi) tabanda hareketsiz dalgalar (antidune) meydana gelir. Bu dalgalar su yüzeyinde de dalgalar meydana getirir. Su yüzündeki dalgalar memba yüzleri gittikçe dikleşir ve sonunda kırılırlar

Tabandaki dalgalar nehir rejimindeki akımlarda ($F_r < 1$) akım yönünde, sel rejimindeki akımlarda ($F_r > 1$) ters yönde hareket ederler. Bilindiği gibi nehir rejimindeki bir akımda tabandaki bir eşğin üzerindeki su alçalır, sel rejiminde ise su kabarır. Yani nehir rejiminde eşğin tepesine doğru akımın hızı artmakta, sel rejiminde azalmaktadır. Akımın hızı arttıkça tabandaki katı madde hareketi de artar. Katı madde hareketinin akım doğrultusunda artması süreklilik denkleminde göre tabandaki dalga yüksekliğinin azalmasına yol açar. Nehir rejiminde ise dalganın memba yüzü boyunca bu hal görülür, böylece dalga akım yönünde ilerler. Sel rejiminde ise dalganın memba yüzü boyunca katı madde hareketinin akım doğrultusunda azalması dalga yüksekliğinin artmasına yol açar, dalga akım yönüne ters yönde ilerler (Şekil 2.5).



Şekil 2.4 Hareketli tabanın akım hızı arttıkça alacağı çeşitli şekiller (Bayazıt, 1971)



Şekil 2.5 Akımın rejimine göre dalgaların ilerleme yönü (Bayazıt, 1971)

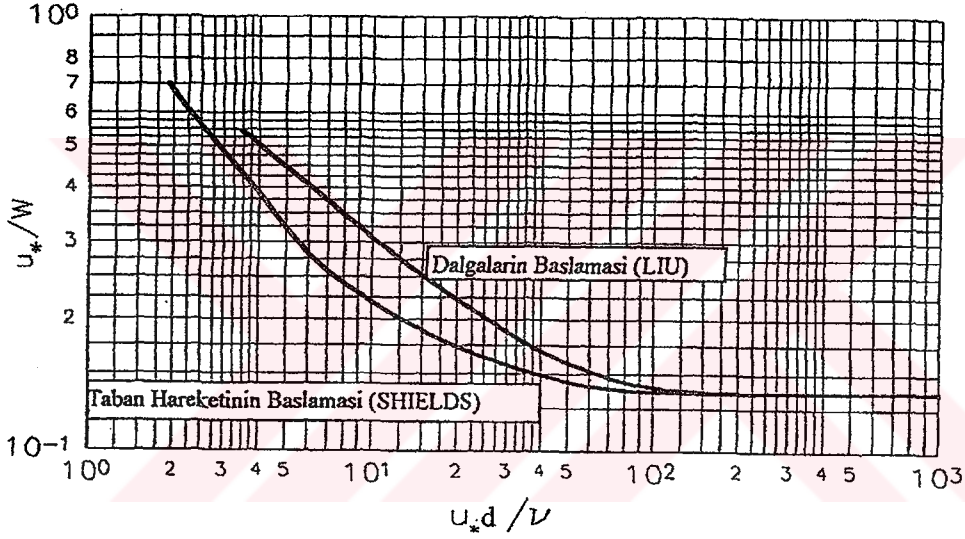
2.3.2 Dalgaların Meydana Geliş Nedenleri

Taban dalgalarının oluşumunda türbülans çevrileri ile birlikte viskoz etkiler de önemli rol oynar. Türbülans çevrilerinin laminar alt tabakayı aralıklarla delerek tabandaki tanelere varmaları ve sonra bu tanelerle birlikte akımın içine doğru fırlamaları taban dalgalarını başlatır. Ancak, taban dalgalarının teşekkülünün hem türbülans hem de viskozite ile yakından ilgisi olması bu olayın incelenmesini güçleştirmektedir.

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.

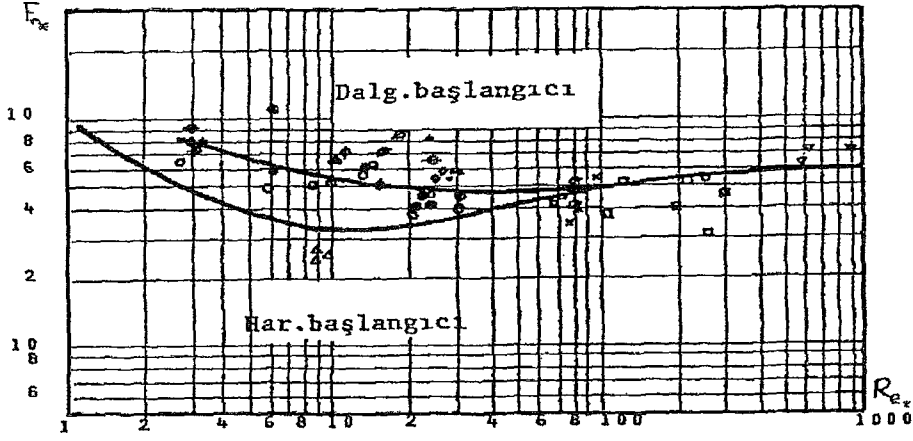
- 1) Daha hızlı hareket eden tanelerin, yavaş hareket eden taneleri engelleyip daha da yavaşlatması,
- 2) Türbülans çevrilerinin tabandan söktüğü tanelerin bir kısmının ortalama akım hızı ile taşınmadıkları için yeniden yığılmaları,
- 3) Tanelerin üniform olmayışı halinde iri tanelerin harekete geçmeyişi.



Şekil 2.6 Taban hareketinin başlangıcı için Liu ve Shields eğrilerinin karşılaştırılması (Liu, 1957)

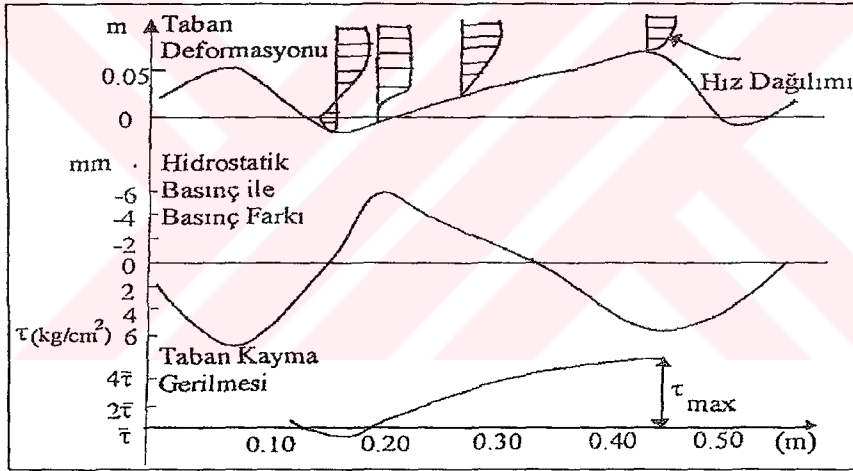
Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, laminar akımda önce tabanda hareket başlar, sonra taban şekilleri oluşur, buna karşın türbülanslı akımda, tabandaki hareketle taban şekilleri aynı anda oluşmaya başlar. Şekil 2.6'da w , tane çökme hızı olarak verilmektedir.

Shields parametreleri cinsinden Şekil 2.6 yeniden çizilirse, Şekil 2.7 elde edilir. Görüldüğü gibi, laminar bölgede, hareketin başlaması taban şekillerinin başlangıcından daha önce meydana gelmekte, buna karşılık, türbülanslı bölgede hareketin başlangıcı ile taban şekilleri aynı anda oluşmaktadır.



Şekil 2.7 Shields ve Liu'nun diyagramlarının karşılaştırılması (Liu, 1957)

Diğer taraftan, tabanda oluşan deformasyonlar, taban yakınındaki basınç dağılımında ve taban kayma gerilmesinde önemli değişimlere neden olmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Taban deformasyonunun basınç ve kayma gerilmelerine etkisi (Üç, 1979)

2.4 Katı Madde Taşımında Denge ve Dengenin Bozulması

Hareketli tabanlı bir akarsu taşıdığı debi ve katı madde miktarına uygun bir denge durumundadır. Böyle bir akarsuyun tabanı hareketli olmakla birlikte taban seviyesinde hiçbir değişim meydana gelmez. Gelen malzeme miktarında meydana gelen değişimler akarsuyun tabanında kısa süreli değişimlere neden olsa da gelen malzeme miktarı ile taşıma kapasitesinin eşit olduğu “dinamik denge” hali söz konusudur. Dinamik denge halinin en büyük özelliği katı madde hareketinin kararlı karakterde oluşudur.

Kararlı karakterde katı madde hareketi olan akımın önüne bir engel yerleştirilirse, akım karakteristiklerinde önemli değişiklikler olur. Diğer taraftan katı madde hareketi, taban yakınlarındaki akım karakteristiklerinin bir fonksiyonu olduğundan, katı madde taşınımındaki dinamik denge bozulur. Bozulma, oyulma ve ardından yığılma şeklinde kendini gösterir. Çünkü engel, akım hızının yerel olarak büyümesi nedeniyle akımın katı madde taşıma kapasitesinin artmasına neden olmaktadır.

Oyulma çukurunun geometrisinin zamanla değişimi, akım alanını ve yersel akım hızını değiştirir. Akımdaki bu değişiklikler sürüntü yükünü de değiştirir. Oyulma devam ettikçe hız ve taşıma kapasitesi de azalır, ve nihayet membadan gelen katı maddeye eşit olduğunda oyulma durur. Bu, engel konulmadan önceki dinamik denge durumundan farklı karakterde, zamanla değişmeyen bir “statik denge” halidir.

Engel, sadece akımın karakteristiklerini değiştirmekle kalmaz, oluşturduğu vorteks sistemler ve türbülans nedeniyle oyulma olayı üzerinde etkili olur. Bunların oluşturduğu çevrintili akımın hızlarından doğan oyulma potansiyeli, tanelerin harekete karşı direncini yenecek şiddette ise engel yakınlarında oyulma başlar.

Oyulma çukuru derinleştikçe sınırında malzemeler çukura doğru kayar. Bunun nedeni, vorteks sistemin dengede olmayışıdır. Böylece oyulma çukuru genişler. Vorteksin taban malzemesini taşıyacak veya askıda tutacak gücü kalmadığı zaman oyulma son bulur.

Oyulma olayının kantitatif değerlendirilmesi Laursen (1963) tarafından yapılmış, dinamik denge durumunda yerel bir değişiklik olması hali için, bu değişim

$$dV/dt = q_{T(B)} - q_{T(S)} \quad (2.9)$$

olarak verilmiştir. (2.9) bağıntısında,

V = Tabanın geometrisi,

$q_{T(B)}$ = Tabanın geometrisine bağlı olarak taşıma kapasitesi,

$q_{T(S)}$ = O kesite membadan gelen katı madde miktarı,

olarak verilmektedir.

$q_{T(B)} = q_{T(S)}$ ise, oyulma yoktur. Bu durumda $dV/dt=0$ olacaktır. Yani dinamik denge hali söz

konusudur.

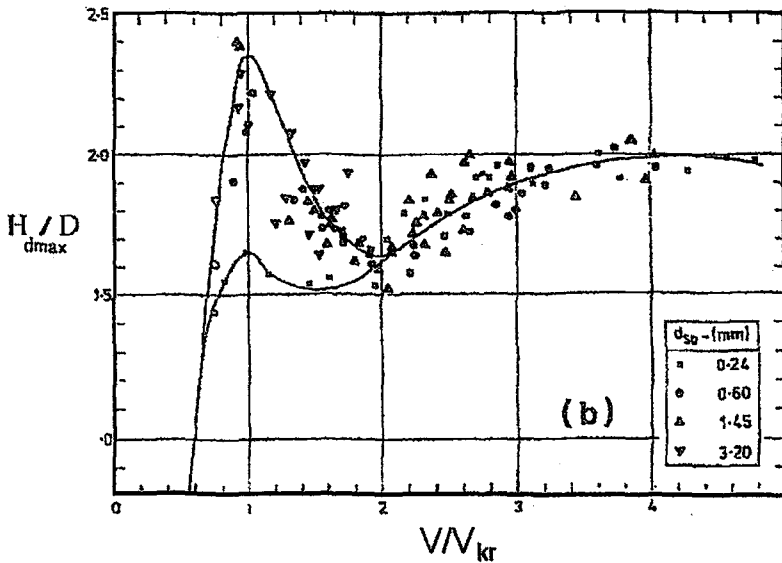
$q_{T(B)} > q_{T(S)} = 0$ ise, yatakta sürüntü hareketi yokken oyulma vardır (temiz su oyulması). Bunun nedeni, engelden dolayı oluşan vorteks sistem ve türbülanstır.

$q_{T(B)} > q_{T(S)} > 0$ ise, daimi sürüntü maddesi hareketi halinde oyulma vardır. Yani hem sürüntü hareketi, hem de oyulma vardır.

$q_{T(B)} < q_{T(S)}$ ise, yerel yığılma vardır.

Köprü ayakları için yapılan çalışmalarda, engele yaklaşım hızının oyulma olayına etkisi tüm araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir. Oyulma belli bir hız değerinde başlamakta ve büyümektedir. Oyulmaya sebep olan hız değeri şu şekilde sınıflandırılmıştır (Hancu,1971 ve Nicollet, 1971).

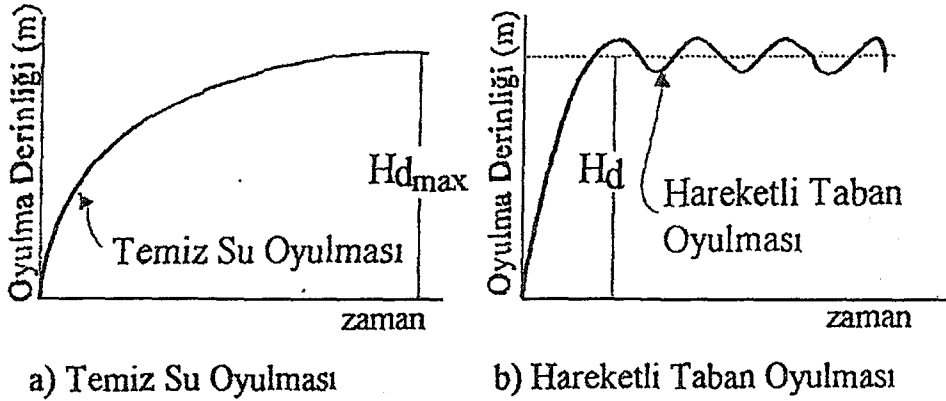
- 1) $V/V_{kr} < 0,5$ ise oyulma yoktur.
- 2) $0,5 < V/V_{kr} < 1,0$ ise temiz su oyulması söz konusudur ve bu bölgede oyulma V/V_{kr} ile hemen hemen lineer olarak artmaktadır.
- 3) $V/V_{kr} > 1,0$ ise daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulması (hareketli taban oyulması) söz konusudur. Bu bölgede oyulma hız ile artmaz, çünkü oyulma çukurundan çıkan malzeme ile membadan taşınan malzeme arasındaki dinamik denge sediment debisinin şiddetinden etkilenmez. Burada V , engele yaklaşım hızı, V_{kr} , taban malzemesini harekete geçirecek kritik hızdır.



Şekil 2.9 Maksimum oyulma derinliğinin, V/V_{kr} ile değişimi (Chiew, 1984)

2.5 Oyulmanın Zamanla Değişimi

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, oyulma derinliğinin değişimi zamanla karakterize edilebilir. Ayrıca, hareketli taban oyulmasının karakteristiklerinden biri de, oyulma derinliğinin denge oyulma derinliği etrafında salınımlar yapmasıdır (Tsujimoto ve Mızukami, 1985).



Şekil 2.10 Oyulma derinliğinin zamanla değişimi (Tsujimoto ve Mızukami, 1985)

Shen vd., (1969) yaptıkları çalışmada, hareketli taban oyulması durumundaki denge oyulma derinliğinin, temiz su oyulması durumundaki maksimum oyulma derinliğinden yaklaşık %10 daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Melville (1984) ve Raudkivi (1986) tarafından yapılan çalışmaya göre, temiz su oyulmasında; yaklaşım akımıyla oyulma çukurundan kısa zamanda taban malzemesi taşınabildiğinden, denge oyulma derinliği asimptotik olarak meydana gelir. Baker (1980), temiz su oyulması durumunda; denge oyulma 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.

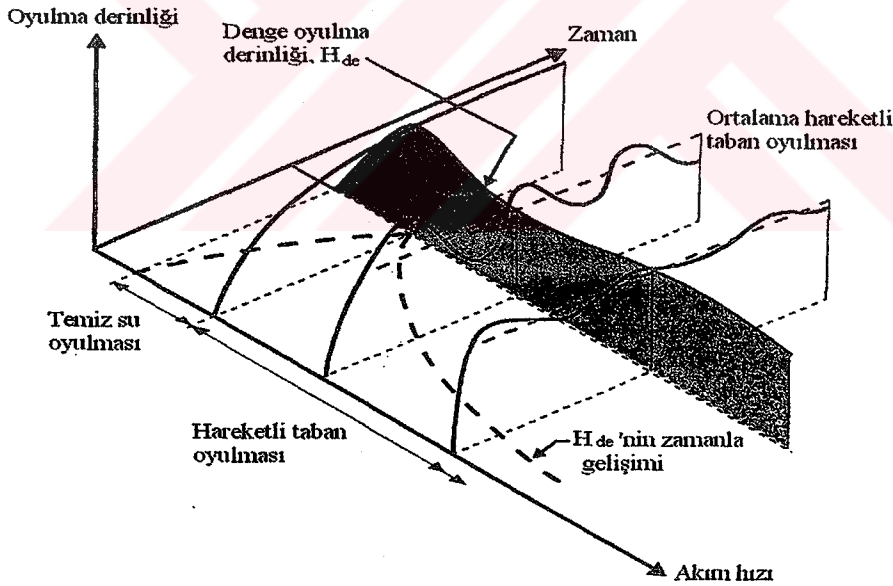
Üç (1988), vorteks yayılma frekansının oyulma derinliğine etkisi ile ilgili yaptığı çalışmada, boyut analizi sonucunda boyutsuz maksimum denge oyulma derinliğinin aşağıdaki boyutsuzlara bağlı olduğunu bulmuştur.

$$H_d/D = f(V/V_{kr}, h/D, d/D) \quad (2.11)$$

Burada, H_d , maksimum denge oyulma derinliği, D , ayak çapı, V , akımın yaklaşım hızı, V_{kr} , tabandaki malzemeyi harekete geçirecek kritik hız, h , akımın su derinliği, d , taban malzemesinin büyüklüğüdür.

Yanmaz ve Altınbilek (1991), doğrusal kanalda temiz su oyulması hali için kare ve silindirik köprü ayakları etrafında oluşan denge oyulma derinlikleri ile ilgili deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, deneyleri 240-300 dakika aralığında yapmışlar ve bu süreler sonunda denge oyulma derinliğinin zamana bağlı olarak asimptotik olarak devam ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca denge zamanının %33 ile %67'lik kısımlarında denge oyulma derinliklerinin %87 ile %95'lik kısmına ulaşıldığını belirtmişlerdir.

Melville ve Chiew (1999), temiz su oyulması halinde farklı büyüklükteki köprü ayaklarında meydana gelen maksimum denge oyulma derinlikleri ile ilgili deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması halinde oyulma derinliklerinin akım hızı ve zamanla değişimini Şekil 2.11'de göstermişlerdir.



Şekil 2.11 Oyulma derinliğinin akım hızı ve zamanla değişimi (Melville ve Chiew, 1999)

Araştırmacılar, viskoz etkileri ihmal ederek boyut analizi sonucunda boyutsuz maksimum denge oyulma derinliği ile ilgili aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir.

$$H_d/D = f(V/V_{kr}, h/D, d_{50}/D, t/t_e) \quad (2.12)$$

Burada, t , zaman, t_e , dengeye ulaşma zamanı, H_d , dengeye ulaşma zamanında maksimum denge oyulma derinliği, d_{50} , medyan çaptır. V/V_{kr} , rölatif hız (akım şiddeti), h/D , boyutsuz akım derinliği, d_{50}/D , boyutsuz katı madde büyüklüğü olarak ifade edilmiştir.

Araştırmacılara göre, temiz su oyulmasında dengeye ulaşma süresi çok uzun belki de sonsuzdur. Laboratuvar şartlarında denge oyulmasına ulaşma süresini belirtmek ve deneylerin ne zaman durdurulması gerektiğini bilmek zordur. Araştırmacılar, birbirini takip eden 24 saatlik bir zaman diliminde oyulma derinliklerindeki artış ayak çapının %5'ini geçmez ise, bu süreyi denge oyulma süresi olarak alınabileceğini ifade ederek

$$\frac{d(H_{de})}{dt} \leq \frac{0.05D}{24h} \quad (2.13)$$

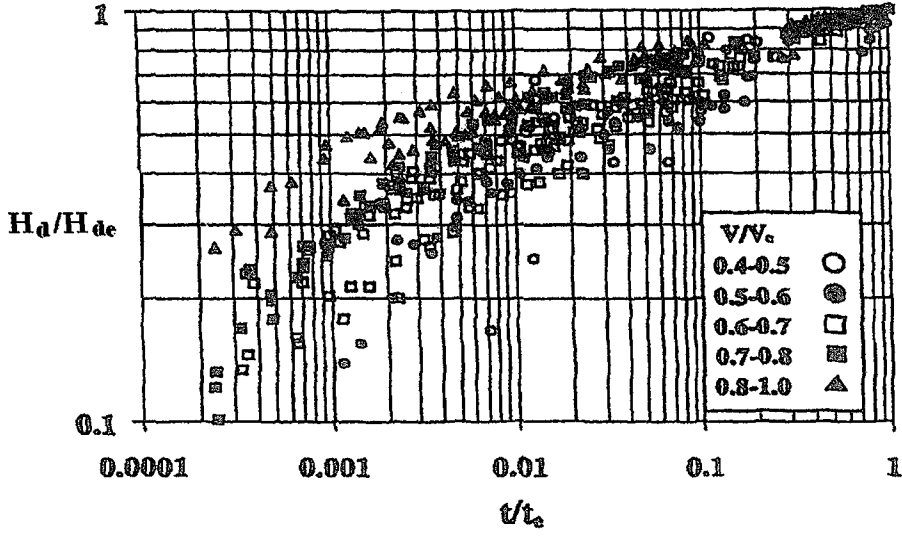
bağıntısını vermişlerdir. Örnek olarak da $D=100$ mm çaplı bir ayakta 24 saatte oyulma derinliğinde 5 mm'den daha az bir artış olursa denge oyulmasına varıldığının kabul edilebileceğini belirtmişlerdir.

Araştırmacılar, temiz su oyulması için deneysel verileri logaritmik formda Şekil 2.12'de göstermişlerdir. Şekilde $H_d/H_{de} - t/t_e$ değişimi farklı V/V_{kr} değerleri için incelenmiştir. H_d , t zamanındaki oyulma derinliği, H_{de} , t_e zamanındaki denge oyulma derinliği olarak verilmiş ve bütün eğrilerin (1,1) noktasından geçtikleri de görülebilmektedir. Ayrıca Şekil 2.12'deki eğriler, rölatif hız (V/V_{kr}) ve oyulma derinliklerinin artmasıyla (veya zamanın azalması) artmaktadır. Araştırmacılar Şekil 2.12'deki verilerin aşağıdaki ifadeyle tanımlanabileceğini belirtmişlerdir.

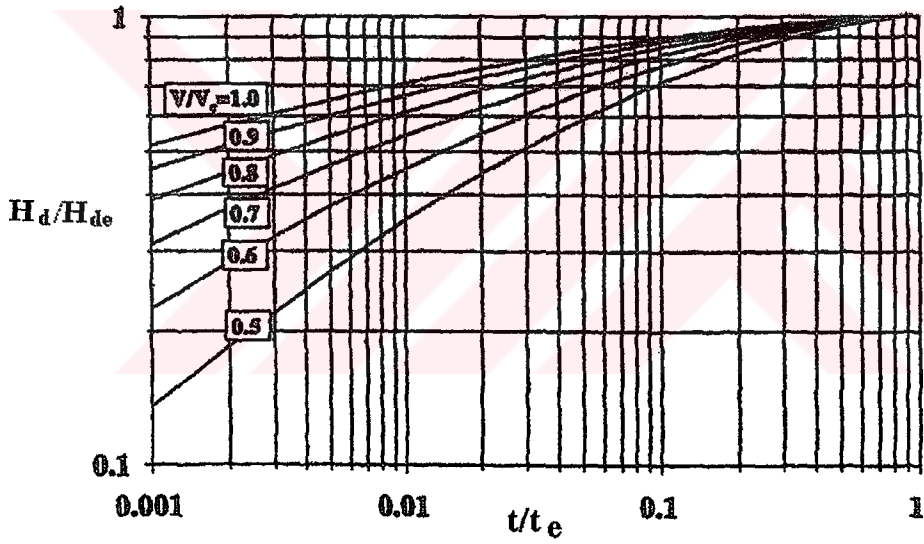
$$\frac{H_d}{H_{de}} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{V_{kr}}{V} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (2.14)$$

Bu ifade Şekil 2.13'de farklı V/V_{kr} 'e göre gösterilmiştir. Bu denklem üstel (eksi) bir ifadeyi göstermektedir. Araştırmacılar, önceki araştırmacıların temiz su oyulması hali için köprü ayaklarında denge oyulma derinliği için elde ettikleri denge zamanlarının kısa tutulduğunu ve denge oyulma derinliğine ulaşma sürelerinin çok daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, akım hızına bağlı olarak denge zamanının %0.1 ile %10'lik kısımlarında denge oyulma derinliğinin %50'lik kısmına ulaşıldığını ve benzer şekilde denge zamanının %5 ve %40'lik kısımlarında denge oyulma derinliğinin %80 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca denge zamanı 3 gün (72 saat) olan bir deney 4 saat sonunda

durdurulursa denge oyulma derinliğinin yaklaşık %50 ile %80'lik kısmına ulaşıldığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.12 Temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin gelişimi (Melville ve Chiew, 1999)



Şekil 2.13 (2.14) denkleminde göre oyulma derinliğinin gelişimi (Melville ve Chiew, 1999)

3. KIVRIMLI KANALLAR

3.1 Giriş

Bir açık kanaldaki kıvrım veya eğrilik ek bir dirence sebep olur. Akım direncinde meydana gelen değişim, kıvrımın memba kısmında su derinliğinin artmasına ve akım hızında azalmaya yol açar. Kabarma etkisi, dış kıyının mansap bölgesi yakınlarında özellikle, sınır tabakasından ayrılma sonucu oluşan keskin eğriliklerde daha belirgin hale gelir.

Kıvrımda meydana gelen akımın en önemli karakteristikleri, helikoidal akım ve maksimum hız yörüngesinin hareketidir. Helikoidal akım sürtünme, merkezkaç ve atalet kuvvetlerinin birbiriyle etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır. Kanal tabanı yakınlarında akışkan zerreciklerinin hızları tabanda oluşan sınır direncinden dolayı büyük ölçüde azalır. Taban yakınlarında daha yavaş hareket eden akışkan zerrecikleri, merkezkaç ve basınç kuvvetleri arasında bir denge oluşturmak için daha keskin eğrisel bir yörünge izlerken, daha büyük ataletle sahip olan yüzeydeki akışkan zerreciklerinin yörüngeleri kanalın tabanına doğru olur. Akışkan kütlesi, sürekliliğini devam ettirmek için dış kıyıda tabana doğru hareket ederken, iç kıyı boyunca tabandan yukarı doğru hareket eder. Bunun sonucu, teğetsel hız bileşenine ilave olarak kanal eksenine dik radyal hız bileşeni meydana gelir. Bu radyal hız bileşeni en kesit planında sekonder akımı oluşturur (Ağaçcıoğlu, 1995).

Doğal akarsularda olduğu gibi kanal kıvrımlarındaki katı madde taşınımının mekanizması doğrusal kanallara göre çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu farklılık iki şekilde açıklanabilir. Birincisi, kanal kıvrımlarındaki üniform olmayan katı maddenin hem boyuna hem de enine doğrultuda taşınım göstermesi ve kıvrımdan dolayı sekonder akımın yarattığı tabakalaşma olayıdır. İkincisi ise doğal akarsulardaki kararsız akımın, akım yapısını ve bu suretle katı madde tanelerinin hareketini etkilemesidir. Kıvrımlarda akımın kompleks yapısı ve katı madde taşınımı ile ilgili pek çok araştırmacı çalışmalar yapmış ve katkıda bulunmuşlardır.

Tam gelişmiş alüviyal tabanlı menderesli nehirler enine tabakalaşmanın gözlemlendiği kıvrımlardan oluşmaktadır. Tane büyüklükleri iç kıyı yakınında ince malzemeli bar ve dış kıyıda kaba malzemeli çukur şeklinde davranış gösterir.

Bir nehrin kıvrımında büyük bir taşkın olması durumunda taban profilinde zamanla değişiklikler gözlenir ve kısa sürede yeni bir taban profili oluşur. Oyulma ve yığılmanın gelişim biçiminin bilinmesiyle nehir kıyıları ve hidrolik yapılar emniyet altına alınabilir. Bundan dolayı kıvrımdaki oyulma ve yığılmanın mekanizmasının iyi bilinmesi gerekmektedir.

Hareketli tabana sahip kıvrımlı kanallarla ilgili hem teorik hem de deneysel pek çok çalışma yapılmıştır. Rozovskii (1957) ve Yen (1965) sabit tabanlı kıvrımlı kanallarda akım yapısı ve sınır kayma gerilmesi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Yen (1967), taban denge durumu, akım yapısı ve ikisi arasındaki etkileşimi araştırmak için bir kanal kıvrımında deneysel çalışmalar yapmıştır. Englund (1974), Kikawa vd., (1976), Falcon ve Kennedy (1983), kararlı akım şartlarında nehir kıvrımlarında taban topoğrafyası ve akım yapısı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Ayrıca kanal kıvrımındaki üniform olmayan katı madde ile ilgili ilk kapsamlı çalışma Allen (1970) tarafından sunulmuştur. Çalışmasında tane büyüklük dağılımını, idealleştirilmiş ampirik taban profillerindeki tanelere etki eden kuvvetlerin dengesinden iyi bir şekilde tahmin etmiştir. Bridge (1976), kıvrımlı kanallarda tabakalaşma olayı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Odgaard (1982), katı madde hareketi için kritik kayma gerilmesi yaklaşımına dayanan bir analiz sunmuş ve yanal tabakalaşmadan kaynaklanan enine yöndeki katı madde büyüklük dağılımını belirlemek için katı maddenin ağırlığının enine bileşeni ve enine taban kayma gerilmesi arasında kuvvetler dengesini kurmuştur. Ikeda vd., (1987), kıvrımlardaki taban malzemesinin tabakalaşmasının maksimum denge oyulma derinliğini %30-40 azaltabileceğini belirtmiştir. Yen ve Lin (1990), farklı irilikteki katı maddeleri kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlar ve tane irilik derecesinin kanal kıvrımlarındaki taban üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Graf ve Suszka (1985), doğrusal bir kanalda kararlı ve kararsız akım şartlarında katı madde taşınımını araştırmışlardır. Nouh (1989), doğrusal bir kanalda kararsız akım durumunda tane büyüklüğü ile ilgili deneysel çalışma yapmıştır.

Kararsız akım şartlarında kanal kıvrımlarındaki katı madde hareketi ve akım karakteristiklerinin bilinmesi çok önemlidir. Yapılan çoğu araştırma doğrusal bir kanalda kararlı akım durumunda katı madde hareketi ile ilgilidir. Kararsız akım durumunda eğrisel bir kanaldaki taban topoğrafyası ve enine tabakalaşma ile ilgili pek araştırma yapılmamıştır. Fakat akarsu kıvrımları ile ilgili mühendislik problemleri ile karşılaşıldığında, kararsız akım durumunda üniform olmayan katı maddenin davranışının bilinmesi gerekmektedir. Nehirlerin

plan, proje ve kontrollerinin iyi yapılması için kararsız akım durumunda üniform olmayan katı madde davranışının iyi bilinmesi gerekmektedir.

3.2 Kıvrımlı Kanallarda Basınç Dağılımı

Francis ve Asfari (1971), r yarıçaplı ve j taban eğimli kıvrımlı bir kanalda bir akışkan elamanına etkiyen kuvvetlerin dengesini yazarak (Şekil 3.1), kıvrımlı bir kanalda oluşacak basınç dağılımının yaklaşık olarak hidrostatik basınç dağılımına uyduğunu göstermişlerdir. Söz konusu akışkan elamanına etki eden kuvvetler;

-y doğrultusunda;

$$-\frac{\delta P}{\delta r} + \frac{\rho V_r^2}{r} = 0 \quad (3.1)$$

-z doğrultusunda;

$$-\frac{\delta P}{\delta z} + \rho g \cos \alpha = 0 \quad (3.2)$$

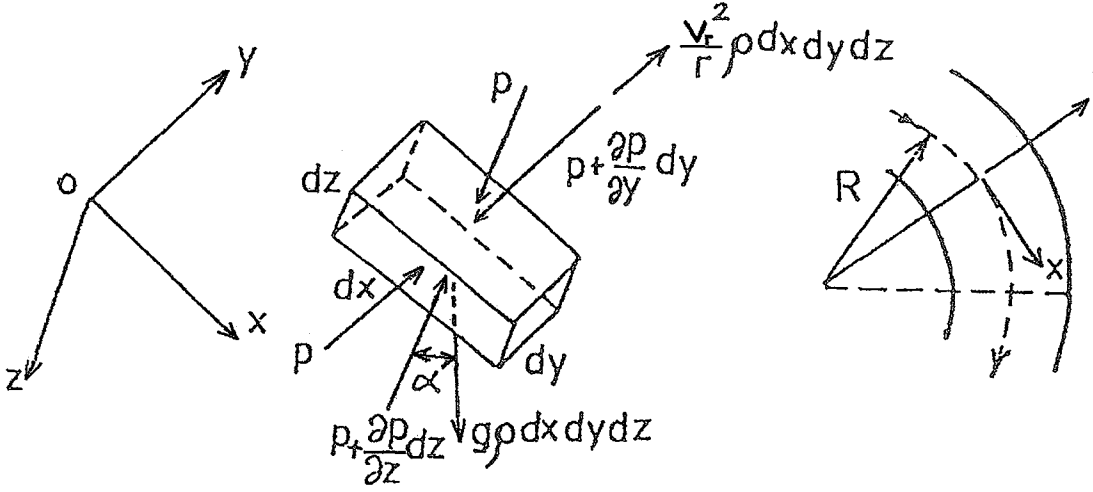
şeklinde yazılabilir. (3.1) ve (3.2) eşitlikleri integre edilip sınır şartları göz önüne alınırsa;

$$\frac{P}{\gamma} = \frac{V_r^2}{r} \frac{y}{g} \quad (3.3)$$

ve

$$\frac{P}{\gamma} = z \cos \alpha \quad (3.4)$$

elde edilir. (3.3) ve (3.4) eşitliklerinden görüleceği gibi, kıvrımın iç kıyısından dış kıyısına doğru gidildikçe su derinliğinin arttığı, buna karşılık kanaldaki basınç dağılımının yaklaşık olarak hidrostatik basınç dağılımına uyduğu görülebilir.



Şekil 3.1 Kıvrımlı kanaldaki akışkan parçacığına etki eden basınç kuvvetleri (Francis ve Asfari, 1971)

3.3 Kıvrımlı Kanallarda Hareket Denklemleri

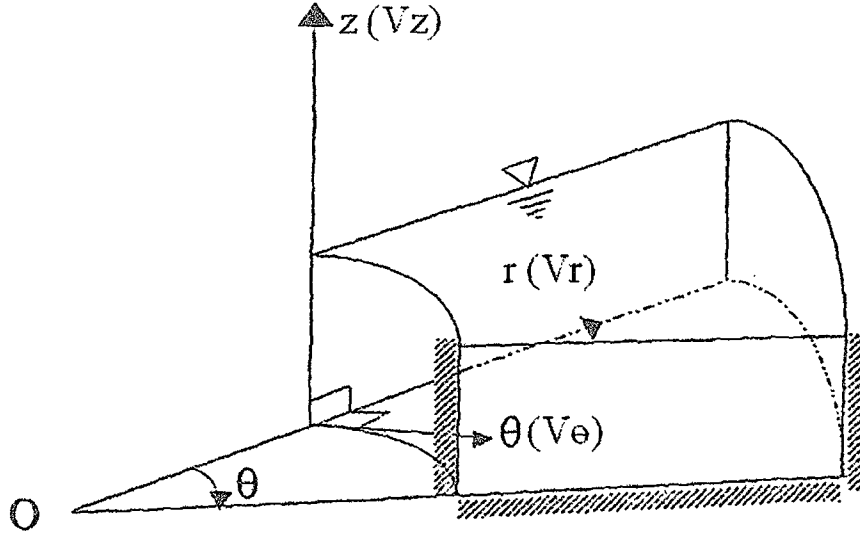
Rozovskii (1957), çeşitli kabuller yaparak, hareket denklemlerini basitleştirmiş, radyal hız ile ilgili ifadeler vermiştir. Rozovskii'nin (1957) yaptığı kabuller aşağıdaki gibidir;

- Akım kararlıdır,
- Kıvrım yeterince uzundur,
- Kanal genişliğinin su derinliğine oranı 10'dan büyüktür (geniş kanal kabulü),
- Kıvrım eğrilik yarıçapı ve kanal genişliği hemen hemen aynı büyüklüktedir,
- Türbülans kayma gerilmesi, kinematik eddy viskozitesi ε ile verilebilir.

Bu kabullerle, radyal (enine) doğrultudaki hareket denklemi silindirik koordinat sisteminde (Şekil 3.2),

$$-\frac{V_{\theta}^2}{r} + gJ_r = \frac{\delta}{\delta z} \left(\varepsilon \frac{\delta V_r}{\delta z} \right) \quad (3.5)$$

ile verilmektedir. Araştırmacının belirttiğine göre (3.5) eşitliği ilk olarak Makkaveev (1940) tarafında kullanılmıştır. (3.5) eşitliğinde,



Şekil 3.2 Silindirik koordinat sistemi (Rozovskii, 1957)

V_r = Kıvrımda radyal (enine) hız bileşeni

V_θ = Silindirik koordinatlarda teğetsel (boyuna) hız bileşeni,

J_r = Radyal doğrultuda su yüzü eğimi,

r = Kıvrım eğrilik yarıçapı

ϵ = Eddy viskozitesi,

olarak verilmektedir. Araştırmacı, $\eta = z/h$ rölatif derinliğini, Prandtl'ın yarı logaritmik düşey hız dağılımını veren,

$$V = V_{Max} + \frac{1}{\chi} u_* \ln(\eta) \quad (3.6)$$

bağıntısı ve radyal su yüzeyi eğimi için,

$$J_r = \frac{V_{\theta m}^2}{gr} \quad (3.7)$$

eşitliğini kullanarak (3.5) eşitliğinden radyal hız bileşeni için,

$$V_r = \frac{h}{\chi^2 r} V_\theta \left[F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{C\chi} F_2(\eta) \right] \quad (3.8)$$

eşitliğini çıkarmıştır. Burada; χ = Karman sabitidir ve $F_1(\eta)$ ve $F_2(\eta)$ fonksiyonları,

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

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

olarak verilmektedir. Araştırmacı $\chi = 0,5$ alarak (3.8) eşitliğini,

$$V_r = 4V_\theta \frac{h}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{2\sqrt{g}}{C} F_2(\eta) \right] \quad (3.9)$$

şeklinde düzenlenmiştir.

Rozovskii (1957), bir açık kanalda sekonder akımın neden olduğu enerji kaybı içinde aşağıdaki ifadeyi vermiştir:

$$J'' = \left(12 \frac{\sqrt{g}}{C} + 30 \frac{g}{C^2} \right) \left(\frac{h}{r_c} \right)^2 Fr_1^2 \quad (3.10)$$

Burada J'' , sekonder akım tarafından yaratılan enerji gradyanı ve C , Chezy katsayısı olarak verilmektedir.

Eşitlikteki ilk terim, sekonder akımdan dolayı meydana gelen içsel türbülans sürtünmesinin sebep olduğu enerji kaybını, ikinci terim ise radyal sınır kayma gerilmesinin sebep olduğu enerji kaybını ifade etmektedir. Eşitlikten görüldüğü gibi, kanal eğriliğinin sebep olduğu enerji kaybı, h/r_c oranı ve Froude sayısı ile orantılıdır ve kanal pürüzlülüğünün artmasıyla daha büyük değerler almaktadır.

Muramoto (1967), kıvrımdaki çevrinti hareketini inceleyerek kanal tabanının oluşturduğu vortisitenin viskoz difüzyonundan hareketle,

$$\frac{\delta \xi}{\delta \theta} = -2\eta_s + \frac{r^2}{D} \frac{\delta^2 (\epsilon_s \xi)}{\delta z} \quad (3.11)$$

eşitliğini elde etmiştir. Burada;

D = Silindirik ayak çapı,
 ξ = Vorteks bileşeni,
 ϵ_s = Difüzyon katsayısı,

olarak verilmiştir.

Araştırmacı bu eşitliği, helikoidal akımın doğuş bölgesi için ele almış ve $\delta\xi/\delta\theta=0$, $\delta V_\theta/\delta\eta=0$ ($\eta(z/h)=1$ için) sınır şartlarını kullanarak radyal hız için,

$$V_r = \frac{Dh}{\chi^2 r^2} (\ln \eta - 2 \ln \eta + \eta) \quad (3.12)$$

bağıntısını vermişlerdir. Francis ve Asfari (1971) ise kıvrımın giriş kesitinde V_θ teğetsel hızının logaritmik hız dağılımına uyduğunu ifade ederek,

$$\frac{V_\theta - V_{\theta m}}{u_*} = \frac{1}{\chi} (1 + \ln \eta) \quad (3.13)$$

eşitliğini vermişlerdir. Burada;

$V_{\theta m}$ = Akım derinliklerine göre ortalama teğetsel (boyuna) hız,

u_* = Taban kayma hızı,

η = Akım içindeki herhangi bir noktanın rölatif derinliği (z/h),

dir. $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ olduğu göz önüne alınarak,

$$u_* = V_{\theta m} \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (3.14)$$

ifadesi elde edilir. (3.14) eşitliği (3.13) eşitliğinde yerine konulursa, kıvrımdaki akımın herhangi bir kesitindeki teğetsel hız bileşeninin değeri için;

$$V_\theta = V_{\theta m} \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\chi C} + \ln \eta \right] \quad (3.15)$$

eşitliği elde edilir.

Francis ve Asfari (1971), helikoidal akımdan dolayı teğetsel hızda önemli değişimlerin olacağını belirterek hesaplanan değişim miktarının (3.15) eşitliğinden elde edilen değere ilave edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, değişim miktarının hesabı için de bir yöntem vermişlerdir.

Araştırmacılara göre, V_r ve V_z hız bileşenleri, kıvrımları izleyen akışkan zerreciklerinin deplasmanına dayanır. Eğri boyunca hızların değişimine sebep olan bu gerçek, farklı alanlar arasında oluşacak hareket miktarındaki değişimi ifade etmektedir. Cidar etkisi hissedilmeyen, büyük genişlikli bir kanaldaki akım durumu için hareket denkleminin teğetsel doğrultudaki bileşeni,

$$V_r \frac{\delta V_\theta}{\delta r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} + V_z \frac{\delta V_\theta}{\delta z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = gJ_\theta + \frac{1}{\rho} \frac{\delta \tau_0}{\delta z} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılabilir.

Kıvrımda V_θ 'da oluşacak değişimlerin, $r\Delta\theta$ yayının sınırında aniden meydana geldiği yaklaşımı ile her $r\Delta\theta$ yay parçası boyunca ağırlık ve teğetsel kuvvetler arasındaki bir dengenin olduğu düşünülürse, (3.16) eşitliğinin sağ tarafı sıfır olur. Ayrıca V_r ve V_z hızlarının hesaplanmış değerleri eşitlikte yerine konulursa (3.16) eşitliği sonlu farklar yöntemi ile çözülebilir. Çünkü, eşitlik;

$$V_r \frac{\Delta V_\theta}{\Delta r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\Delta V_\theta}{\Delta \theta} + V_z \frac{\Delta V_\theta}{\Delta z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = 0 \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan ΔV_θ 'yı çözersek,

$$\Delta V_\theta = \frac{r\Delta\theta}{V_\theta} \left[V_r \frac{\Delta V_\theta}{\Delta r} + V_z \frac{\Delta V_\theta}{\Delta z} + \frac{V_r V_\theta}{r} \right] = 0 \quad (3.18)$$

ifadesi bulunur. (3.18) eşitliğinden elde edilen ΔV_θ hesaplanabilir. Bu durumda yeni teğetsel hızın değeri;

$$V'_\theta = V_\theta + \Delta V_\theta \quad (3.19)$$

formülünden hesaplanabilir. Bu yeni hız, değiştirilmiş teğetsel hız olarak adlandırılır. Francis ve Asfari (1971), V_θ hızlarının kıvrımlı bir kanaldaki dağılımı için, $\max V_\theta$ 'nın kıvrımın giriş

kesitinde iç kenara yakın kısmında meydana geldiğini ve daha sonra kıvrımın dış kenarına doğru yer değiştirerek çıkış kesitinde en büyük değere ulaştığını belirtmişlerdir.

Nehirlerin genellikle hidrolik pürüzlü sınırlara sahip olduklarını kabul ederek, Kikkawa (1973), Rozovskii'nin (1961) hareket denklemlerinden boyuna hız dağılımı için aşağıdaki ifadeyi vermiştir.

$$\frac{V_\theta}{u_{*e}} = f \frac{r}{r_e} \left(\frac{1}{\chi} \ln \frac{z+h}{k} + 8.5 \right) \quad (3.20)$$

burada,

V_θ = Boyuna hız dağılımı,

u_{*e} = Kanal eksenindeki kayma hızı,

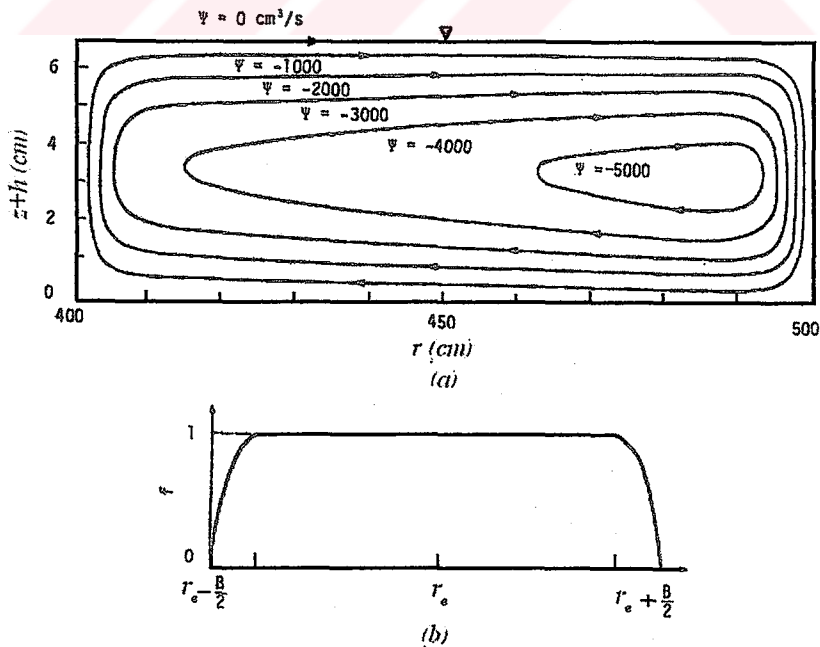
r = Kıvrım eğrilik yarıçapı,

r_e = Kanal eksenindeki eğrilik yarıçapı,

h = Akım derinliği,

f = Şekil 3.3'de tanımlanmıştır, cidar yakınları hariç her yerde sabit (r 'ye bağlı),

k = Pürüz yüksekliği, $z+h=k$ olduğunda, kanal tabanındaki teğetsel hız, $V_{\theta b}$, aşağıdaki formu alır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 a) $r_e=450$ cm, $B=100$ cm ve $J_{ort}=0,00057$ 'li sabit eğrilikli kanalda sekonder akımın akım çizgileri b) f 'in dağılımı (Kikkawa, 1973)

$$\frac{V_{\theta b}}{u_{*e}} = f \frac{r}{r_e} 8.5 \quad (3.21)$$

Tabandaki sekonder akımın yanal hız bileşeni V_{rb} ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{V_{rb}}{V_e} = f^2 \left(\frac{r}{r_e} \right)^2 \frac{h}{\chi r} \left(-4.167 + 2.64 \frac{u_{*e}}{\chi V_e} \right) \quad (3.22)$$

burada, V_e = Kanal eksenindeki derinlik boyunca ortalama hızdır.

Dolayısıyla $\tan \delta = V_{rb}/V_{\theta b}$ aşağıdaki şekli alır. δ , ortalama tane yörüngesinin teğetsel yönden sapma açısıdır (Şekil 3.9'a bakınız).

$$\frac{V_{rb}}{V_{\theta b}} \tan \delta = f \left(\frac{r}{r_e} \right) \frac{h}{r} \frac{1}{\chi 8.5} \left(-4.167 \frac{V_e}{u_{*e}} + \frac{2.64}{\chi} \right) \quad (3.23)$$

Engelund (1974), kıvrımlı kanallarda taban topoğrafyası ve akım yapısını incelemiştir. Kararlı kesitli kıvrımlı kanallardaki kararlı akım durumunda helikoidal akım teorisini inceleyerek elde ettiği sonuçları hareketli tabanlı ve kıvrımlı akarsulara uygulamıştır.

Araştırmacı, kararlı ve üniform akıma sahip kanallarda derinlik boyunca hız dağılımını “hız eksikliği” kanununu ile tanımlamıştır.

$$\frac{V_0 - V}{u_*} = f \left(\frac{z}{h} \right) \quad (3.24)$$

Burada;

V_0 = Su yüzeyindeki boyuna hız,

V = Derinlik boyunca değişen hız,

h = Akım derinliği,

u_* = Kayma hızıdır.

Engelund'a (1974) göre eğer, eddy (ϵ) viskozitesi sabit olarak dikkate alınırsa, geniş bir kanaldaki kararlı üniform akım şartlarındaki hareket denklemleri göz önüne alınmalıdır. Kayma gerilmesinin derinlik boyunca değişimi:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = -\rho g J_0 \quad (3.25)$$

bağıntısı ile verilebilir. Bağıntıda,

ρ = Akışkanın özgül kütlesi,

g =Yerçekimi ivmesi,

J_0 = Kanal eğimi dir.

$$\tau = \rho \varepsilon \frac{dV}{dz} \quad (3.26)$$

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -\frac{g J_0}{\varepsilon} \quad (3.27)$$

olarak göz önüne alınırsa, (3.27) denkleminin çözümüyle (3.24) denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{V_0 - V}{u_*} = \frac{h u_*}{2\varepsilon} \left(\frac{z}{h} \right)^2 \quad (3.28)$$

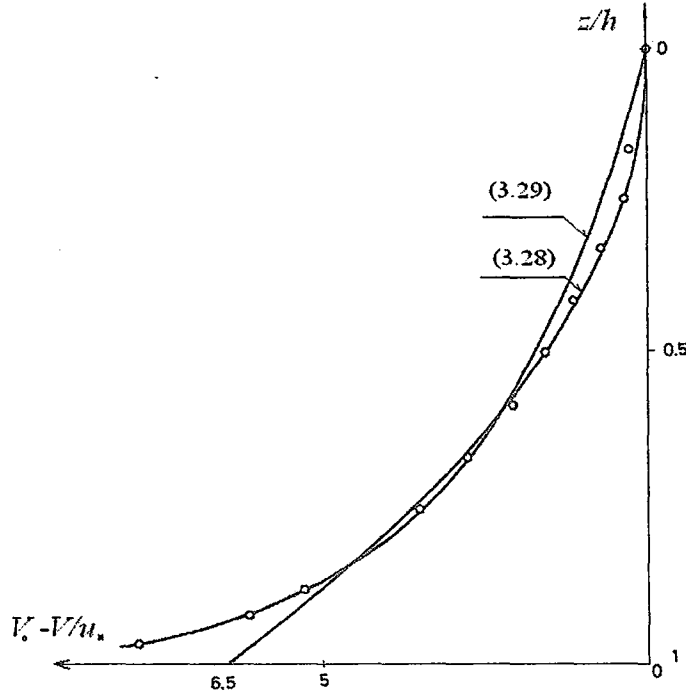
$$u_*^2 = ghJ$$

(3.24) denkleminin en uygun kullanılışı $\varepsilon = 0.077 u_* h$ alınarak logaritmik formdaki aşağıdaki bağıntıdır (Şekil 3.4).

$$\frac{V_0 - V}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{h}{h - z} \right) \quad (3.29)$$

Denklem (3.24)'deki üniversal hız dağılımı cidar yakınındaki bölgeler hariç çok pürüzlü yüzeyler için kullanılabilir. Dalgacıklarla kaplı kanal tabanlarındaki akım için (3.24) denklemi önemlidir. Çünkü küçük dalgacıklar çok pürüzlü elemanlar gibi davranır.

Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa (1976), sabit eğrilikli kıvrımlı kanallarda ortalama akım karakteristikleri, taban kayma gerilmeleri ve taban topoğrafyasındaki değişimlerle ilgili teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır.



Şekil 3.4 Üniform açık kanalda hız dağılımı (Rozovskii, 1961)

Araştırmacılar, Kikkawa (1973) ve Rozovskii (1961) tarafından verilen sekonder akımı ifade eden hareket denklemini kullanarak, geniş açık kanallar için kıyı civarı hariç, kıvrım merkez bölgesi için;

$$\frac{\partial^4 \Psi}{\partial z^4} = \frac{2}{\varepsilon} V_\theta \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \quad (3.30)$$

bağıntısını elde etmişlerdir. Burada;

Ψ = Sekonder akım fonksiyonu

r = Radyal koordinat

z = Düşey koordinat

ε = Eddy viskozitesi

V_θ = Ana akım doğrultusundaki boyuna hızdır.

Eğer sekonder akım ile ana akımın etkileşimi ihmal edilirse, ana akımın derinlik boyunca dağılımı hız eksikliği kanunu ile belirtilebileceği ifade edilmiş ve herhangi bir en kesitteki hız dağılımını için aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$\frac{V_\theta}{u_{*r}} = f \left[\frac{V_a}{u_{*r}} + \frac{1}{\chi} \left(\ln \frac{z}{h} + 1 \right) \right] \quad (3.31)$$

burada,

V_a = Bir en kesitteki ortalama hız

u_{*r} = Radyal yöndeki ortalama kayma hızı

(3.30) ifadesi aşağıdaki sınır şartları yardımıyla integre edilirse ve $\varepsilon = u_* h / 15$ alınarak,

$$z = 0 : \Psi = 0, \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.32.a)$$

$$z = h : \Psi = 0, \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.32.b)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_r}{V_a} &= f^2 \frac{h}{r} \frac{1}{\chi} \left[F_A(\xi) - \frac{1}{k} \frac{u_{*r}}{V_a} F_B(\xi) \right] = f^2 \frac{h}{r} \frac{1}{\chi} F(\xi); \\ F_A(\xi) &= -15 \left(\xi^2 \ln \xi - \frac{1}{2} \xi^2 + \frac{15}{54} \right); \\ F_B(\xi) &= \frac{15}{2} \left(\xi^2 \ln^2 \xi - \xi^2 \ln \xi + \frac{1}{2} \xi^2 - \frac{19}{54} \right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

bağıntılarından radyal hız ifadesi bulunur.

3.4 Kıvrımlı Kanallarda Hız Dağılımı ve Sekonder Akım

Kıvrımlardaki akımın en önemli karakteristiklerinden biri olan helikoidal akım ilk olarak 1868'de Joseph Boussinessq ve 1876'da James Thomson tarafından incelenmiştir.

Shurky (1950), helikoidal akımı, kıvrımda oluşan kabarma miktarını ve kıvrımdaki maksimum hız yörüngesini deneysel olarak araştırmıştır. Değişik akım şartlarına sahip farklı kıvrımlarda, helikoidal akımın etkisini ve büyüklüğünü ifade etmek için, helikoidal hareketin gücü olarak bilinen bir ifade kullanmıştır. Bu ifade, verilen bir en kesitte sekonder hareketin ortalama kinetik enerjisinin, akımın toplam kinetik enerjisine oranı olarak tarif edilmektedir. Akımın kinetik enerjisi hızın karesiyle orantılıdır. Şekil 3.5'deki xy planında gösterilen kanal en kesitine göre, helikoidal akımın gücü,

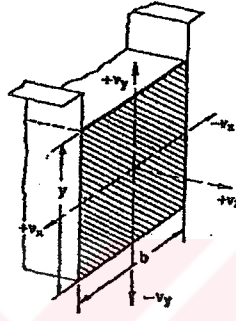
$$S_{xy} = \frac{V_{xy}^2}{V^2} 100 \quad (3.34)$$

olarak verilir. Burada,

V_{xy} = xy plandaki ortalama hız vektörü

V = En kesitteki ortalama hız,

dır. Böylece, kanal eksenine paralel olan bütün akım çizgileri için $S_{xy} = 0$ olur.



Şekil 3.5 Kanal en kesiti (Chow, 1959)

Shurky (1950) dikdörtgen en kesitli bir kanal kıvrımında, nehir rejimli akım şartlarında yapmış olduğu deneyler sonucunda elde ettiği sonuçları aşağıdaki şekilde özetlemiştir:

- S_{xy} , r_e/b (kıvrımın eksen eğrilik yarıçapı/kanal genişliği) oranının artışı ile dereceli olarak azalır ve $r_e/b=3$ 'de minimuma ulaşılır (yani eğrilik etkisi en düşük sevedir).
- S_{xy} , akımın Re sayısı büyüdükçe küçülür.
- S_{xy} , h/b (derinlik/genişlik) oranı arttıkça azalır.
- S_{xy} , θ kıvrım açısı büyüdükçe artar. S_{xy} 'deki artış miktarı, $\theta/180 = 0.0-0.5$ arasında (kıvrımın ilk yarısında), $\theta/180 = 0.5-1.0$ (kıvrımın ikinci yarısında) arasındaki değerlerden hemen hemen iki kat daha büyüktür.
- Sekonder akımın kinetik enerjisi, teğetsel akımın kinetik enerjisine kıyasla daha küçüktür ve dolayısıyla kıvrım direncinden meydana gelen enerji kaybında küçük bir kısmı oluşturur.
- Kıvrım direncinden meydana gelen enerji kaybı katsayısı Re , r_e/b ve θ parametrelerinin her biriyle önemli ölçüde değişir.
- Kıvrım direnç katsayısı $Re > 3 \cdot 10^4$ değerlerinde daha büyük bir değişim gösterir.

Burada θ kıvrım açısını, r_e kanal ekseninin eğrilik yarıçapını göstermektedir.

Bu sonuçlara göre, kıvrımlı bir kanalda maksimum hız yörüngesi kıvrımın membasındaki bir kesitte normalinden saparak, hemen hemen iç kıyıya dokunur ve su derinliği minimum olur. Daha sonra maksimum hız yörüngesi kademeli olarak dış kıyıya doğru hareket eder.

Choudhary ve Narasimhan (1977), 180° 'lik bir açık kanal kıvrımında dar ve geniş kanallarda nehir rejimli akım şartlarında, şev ve taban kayma gerilmesi (erozyon kapasitesi) ve helikoidal hareketin gelişimini (taşıma kapasitesi) deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler eksen eğrilik yarıçapı $r_e=80$ cm, genişliği $b=96$ cm, derinliği $h=25$ cm olan bir dikdörtgen kanalda gerçekleşmiştir. Kıvrımdan önce 10,33m, kıvrımdan sonra 11,45 m'lik doğrusal kanal kısmı mevcuttur. Değişik akım şartlarında dar kanal $b/h=5$ ve geniş kanal $b/h=10$ için Froude sayılarının 0.2, 0.4 ve 0,6 değerlerinde çalışılmıştır.

Araştırmacılar ölçümleri, kıvrımda 15° 'lik radyal aralıklarla, doğrusal kısımda 50 cm'lik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Radyal ve teğetsel hızlar pitot tüpü yardımıyla her en kesitte 5 düşey boyunca, taban ve şev kayma gerilmeleri ve boyuna hız bileşeni V_θ 'nın kanal eksenine yaptığı β sapması ölçülmüştür. Su yüzü profilindeki değişimler de preston tüpü yardımıyla belirlenmiştir.

Araştırmacılara göre, helikoidal hareket $\theta=15^\circ$ 'de dış kıyıda başlamakta ve $\theta=105^\circ-120^\circ$ civarında maksimuma ulaşmaktadır. Froude sayısındaki artış veya b/h oranındaki azalma, helikoidal hareketin daha erken oluşmasına ve daha hızlı gelişmesine yol açmaktadır. Helikoidal hareket $\theta=135^\circ$ 'de dış kıyı bölgesinde maksimuma ulaşmaktadır. Aynı zamanda, $\theta=135^\circ$ 'de dış kıyı yakınlarında büyük kayma gerilmesi meydana gelmekte ve helikoidal hareketin yönü ve şiddeti taban malzemesini hareket ettirmeye çalışmaktadır. Bundan dolayı taban koruma çalışmalarının, kıvrımın bu bölgesinde yapılması daha uygun olmaktadır. Merkezi rejim bölgesinde helikoidal hareketin Froude sayısından bağımsız olduğu görülmektedir. Helikoidal hareket $\theta=120^\circ$ 'den sonra iç kıyıda bozulmaya başlamakta ve b/h oranındaki azalmayla helikoidal hareketin bozulma oranı azalmaktadır.

Chang (1983a; 1983b), nehir rejimli akım şartlarında tam gelişmiş türbülanslı akıma sahip hafif eğrilikli bir açık kanal kıvrımındaki enerji kayıplarını analiz etmiştir. Araştırmacılar, kıvrımlı bir kanalda enerji kayıplarındaki artışın aşağıdaki nedenlerden meydana geldiği ifade etmişlerdir.

- 1) Sekonder akımdan dolayı içsel akışkan sürtünmesi,
- 2) Radyal kayma gerilmesinin sonucunda sınır direnci ,
- 3) Keskin kıvrımlarda sınır tabakasındaki ayrılma sonucunda oluşan eddy kaybı,
- 4) Büyük Froude sayılarında oluşan ani sıçramadan dolayı eddy kaybı.

Sekonder akımdan dolayı oluşan enerji kaybı, h/r oranı, Froude sayısı ve kanal pürüzlülüğü ile doğru orantılıdır. Radyal enerji kaybının toplam enerji kaybına oranı, h/r oranı ile doğrudan ilişkilidir, fakat kanal pürüzlülüğü ile ters orantılıdır. Sekonder akım kanal geometrisinden etkilenir. Dolayısıyla, diğer şartları aynı olan dar bir kanaldaki radyal enerji kaybı daha geniş bir kanala göre daha küçüktür. Bunun nedeni, cidar yakınında radyal hızların bozulmasıdır. Büyük h/r oranlarında ya da küçük kanal pürüzlülüklerinde radyal kayıplar toplam kayıplardan daha büyük olabilir.

De Vriend ve Struiksma (1983), bir açık kanal kıvrımındaki akımın yapısını aşağıdaki şekilde özetlemiştir.

Kıvrım bölgesine yaklaştıkça akım, akım çizgisinin eğriliğini tedrici arttırmaya çalışan memba tarafındaki basınç yükünün etkisiyle karşılaşır. Kıvrıma girişte, akım çizgisinin eğriliği, kıvrımın iç kıyısında akımın hızlanması yol açan (potansiyel akım etkisine yol açan) radyal ve teğetsel basınç gradyanlarına sahiptir. Kıvrım girişinden sonra akım, üniform olmayan derinlik dağılımına tedrici olarak kendine uydurmaya çalışır. Derinlik boyunca ortalama hızın radyal dağılımının dışa doğru sapmasına neden olur. Bu dışa doğru sapma, sekonder akımın düşey bileşenin konvektif ivme etkisini arttırmaya çalışır.

Kıvrım çıkışına doğru ise, akım çizgisinin eğriliği tedrici olarak azalır. Radyal doğrultudaki basınç gradyanındaki değişim, kıvrımın iç kıyısında akımı yavaşlatan, dış kıyısında ise hızlandıran teğetsel basınç gradyanlarına neden olur. Kıvrım çıkışında da akımdaki bu değişiklikler kendisini taban topoğrafyasına uydurmaya çalışır.

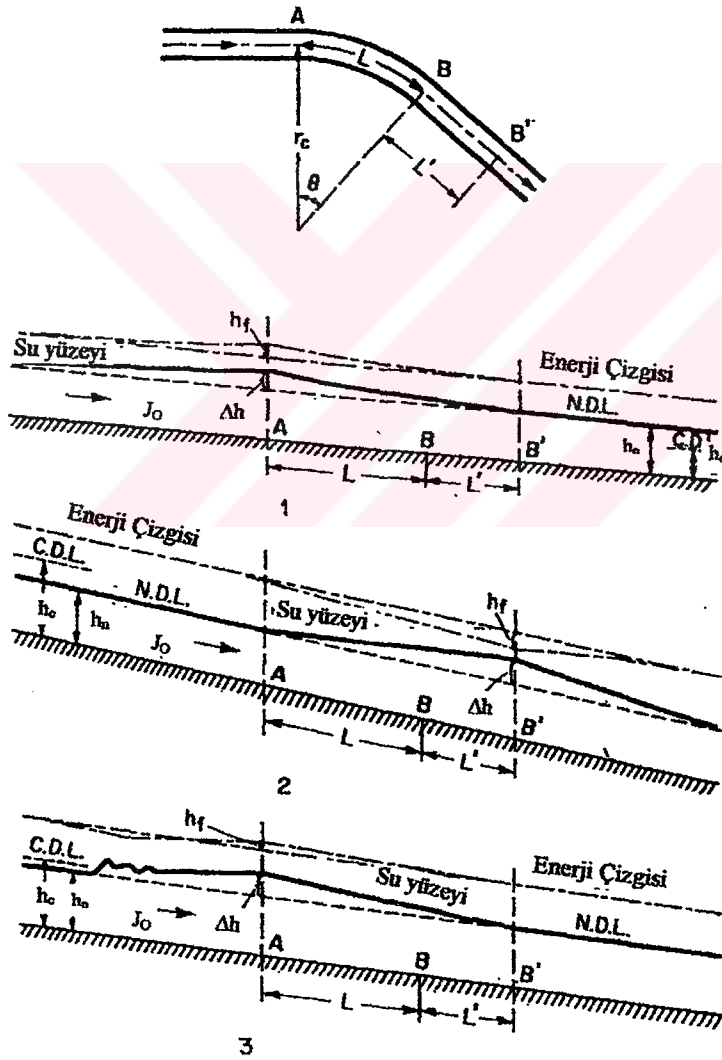
3.5 Kıvrımlı Kanallarda Enine ve Boyuna Su yüzü Profilleri

Müller (1943), bir kanal kıvrımında sel ve nehir rejimli akım şartlarında, teğetsel su yüzü profillerinin değişimini incelemiş ve nehir rejimli akım şartlarında, kanal kıvrımında oluşan teğetsel su yüzü profili Şekil 3.6 (1)'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, kanaldaki akımın özgül enerjisinde meydana gelecek ΔE kadarlık bir artış, su yüzeyinde Δh kadarlık bir

artıya karşılık gelir. Su yüzündeki bu artış, nehir rejimli bir kanalda kıvrımın mevcudiyetinin, savak veya barajdakine benzer kabarma etkisine sahip olduğunu gösterir. Kabarma profili M1 tipindedir ve A noktasından membaya doğru üniform derinliğe asimptot olur.

Şekil 3.6 (2)'de sel rejimi akım şartlarına sahip bir kıvrımdaki enerji çizgisi su yüzü profili görülmektedir. Enerji seviyesi kıvrımda ve doğrusal kısımda azalır ve B' noktasında ΔE kadarlık azalma meydana gelir. Bu noktada su yüzeyi, Δh kadar yükselir. Su derinliği kritik derinliği geçerse hidrolik sıçrama meydana gelir.

Şekil 3.6 (3)'de ise normal akım derinliğinin, kritik derinlikten çok az küçük olması durumunu göstermektedir.



Şekil 3.6 Bir açık kanal kıvrımında enerji çizgisi ve su yüzü profili (Müller, 1943)

Grashof (1937), her bir akım çizgisine Newton'un 2.hareket kanununu uygulamış ve tüm kanal kesiti boyunca integre ederek, radyal (enine) su yüzü profilini logaritmik bir ifade ile vermiştir. Buna göre kabarma miktarı;

$$\Delta h = 2.30 \frac{V_z^2}{g} \log \frac{r_0}{r_i} \quad (3.35)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Burada, r_i ve r_0 sırasıyla iç kıyı ve dış kıyı eğrilik yarıçaplarıdır.

Chow'a (1959) göre, kıvrımdaki tüm teğetsel hızların V_z ortalama hızına eşit olduğu ve tüm akım çizgilerinin r_e eğrilik yarıçapına sahip olduğu kabul edilerek ve enine su yüzeyinin lineer olarak değiştiğini kabul edilirse, kıvrımlı kanallarda meydana gelecek kabarma miktarını basit olarak,

$$\Delta h = \frac{V_z^2}{gr_e} \quad (3.36)$$

eşitliği ile vermiştir.

C.L Yen ve B.C Yen (1971), hareket denklemini kullanarak su yüzü profilinin ve kabarmanın, helikoidal akımdan ve kanal taban topoğrafyasından ne şekilde etkilendiğini araştırmışlardır.

Araştırmacıların, silindirik koordinat sisteminde türbülanslı akımın Reynolds denklemlerinden yararlanarak elde ettikleri radyal ve teğetsel su yüzü eğimini veren ifadeler, sırasıyla;

$$J_r = \frac{1}{gh} \left[-u_*^2 \sin \phi + \int_{z_0}^{z_1} \left(\frac{V_\theta^2}{r} - V_\theta \frac{\delta V_r}{r \delta \theta} \right) dz \right] \quad (3.37)$$

$$J_\theta = \frac{1}{gh} \left[-u_*^2 \sin \phi + \int_{z_0}^{z_1} \left(V_\theta \frac{\delta V_\theta}{r \delta \theta} + V_r \frac{\delta V_\theta}{\delta r} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\delta V_\theta}{\delta z} \right) dz \right] \quad (3.38)$$

şeklindedir. Burada;

J_r, J_θ = Sırasıyla enine ve teğetsel su yüzü eğimleri,

V_r, V_θ, V_z = Sırasıyla r, θ ve z doğrultularındaki geçici ortalama hız bileşenleri,

h =Yersel akım derinliği (z_1-z_0),

$\sin \phi = V_r / V_\theta$ oranı,

olarak verilmektedir. (3.37) eşitliği yeniden yazılırsa;

$$J_r = \frac{V_m^2}{2gr} \left\{ -2 \frac{r}{h} \left(\frac{u_*}{V_m} \right)^2 \sin \phi + \int_{z_0/h}^{z_2/h} 2 \left[\left(\frac{V_\theta}{V_m} \right)^2 - \frac{V_\theta}{V_m} \frac{\delta \left(\frac{V_r}{V_m} \right)}{\delta \theta} \right] d \left(\frac{z}{h} \right) \right\} \quad (3.39)$$

bulunur. Burada V_m , kanalın doğrusal kısmındaki ortalama hızı ifade etmektedir. (3.39) eşitliğinin sağ tarafındaki parantez içindeki ilk terim, taban kayma gerilmesinin radyal bileşeninin enine su yüzü eğimine etkisini göstermektedir. İkinci terim, teğetsel hızın doğrultusundaki değişimden dolayı radyal ivmenin dikkate alındığını ve son terim de θ doğrultusundaki değişimden dolayı konvektif momentum akısındaki değişimi ifade etmektedir.

C.L Yen ve B.C Yen (1971), (3.39) eşitliğindeki parantez içindeki terimleri sırasıyla C_{r1} , C_{r2} ve C_{r3} olarak ifade etmişler ve yersel enine su yüzü eğimi katsayısını,

$$C_r = C_{r1} + C_{r2} + C_{r3} \quad (3.40)$$

olarak tariflemişler ve enine su yüzü eğimini veren (3.39) eşitliğini,

$$j_r = C_r \frac{V_m^2}{2gr} \quad (3.41)$$

şeklinde basitleştirmişlerdir. Araştırmacılar aynı yaklaşımla (3.38) eşitliğini,

$$C_\theta = C_{\theta1} + C_{\theta2} + C_{\theta3} + C_{\theta4} \quad (3.42)$$

olarak teğetsel su yüzü eğimini veren ifadeyi,

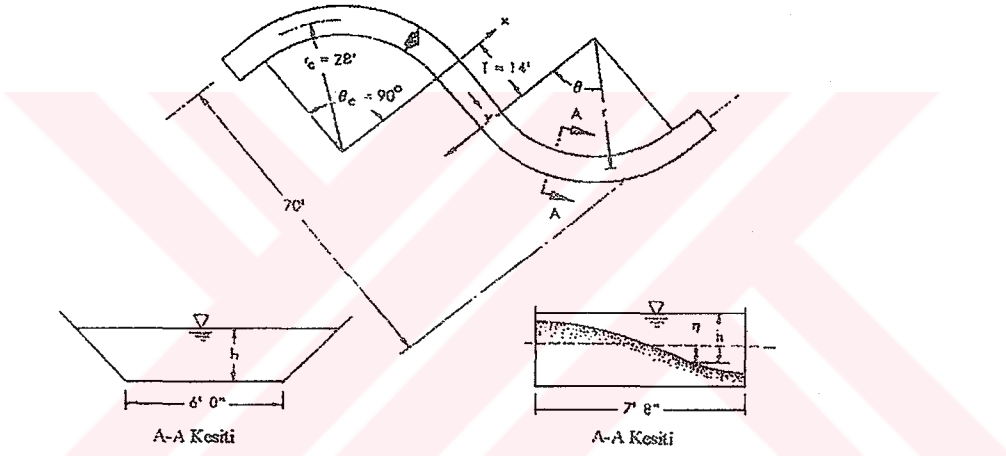
$$J_\theta = C_\theta \frac{V_m^2}{2gr_e} \quad (2.43)$$

olarak basitleştirmişlerdir. Burada;

C_0 = Yersel teğetsel su yüzü eğimi katsayısı,

r_e = Kıvrımda eksene olan eğrilik yarıçapıdır.

Araştırmacılar, mevcut analizlerini 1962-1966 yılları arasında Mississippi ve Missouri gibi nehirleri temsil eden 90° 'lik kıvrımlara sahip iki farklı modelde (Şekil 3.7) değerlendirmişlerdir. İlk kıvrımda, şev eğimleri 1/1 olan üniform trapez en kesitli bir kanal, diğesinde ise denge yatak modeli olarak isimlendirdikleri, taban topoğrafyası stabil hale gelinceye kadar kum taban üzerinde su resürkülasyonu doğal olarak deforme edilmiş dikdörtgen en kesitli kıvrımlı bir kanal kullanmışlardır.



Şekil 3.7 Deney kanalı (C.L Yen ve B.C Yen, 1971)

Araştırmacılar, taban kayma gerilmesi ve hız bileşenlerini çeşitli en kesitlerde ölçerek Cr_1 , Cr_2 ve Cr_3 değerlerini nümerik integrasyonla hesaplamış ve ölçümlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

C.L Yen ve B.C Yen (1971), herhangi bir en kesitteki enine su yüzü profili için, enine su yüzü eğimini veren (3.41) eşitliğini r doğrultusunda integre ederek;

$$H_{re} = \int_{r_e}^r J_r dr = \frac{V_m^2}{2g} \int \frac{C_r}{r} dr \quad (3.44)$$

eşitliğini elde etmişlerdir. Burada;

r_e =Kanal eksen yarıçapı

r =Dikkate alınan noktanın yarıçapı

H_{re} =En kesitteki r ve r_e eğriliklerine sahip iki nokta arasındaki su yüzeyi yükseklik farkı olarak verilmektedir.

Eğer Kıvrımdaki radyal ve teğetsel hız bileşenlerinin dağılımı biliniyorsa radyal su yüzü eğimi ve radyal su yüzü profili (3.41) ve (3.44) eşitliklerinden elde edilebilir.

Araştırmacılar (3.41) eşitliğini iç kıyıdan dış kıyıya kadar integre ederek su yüzeyindeki yanal değişimi veren ifadeyi;

$$H_s = \frac{V_m^2}{2g} \int_{r_i}^{r_0} \frac{C_r}{r} dr \quad (3.45)$$

şeklinde elde etmişlerdir. Burada,

H_s = Su yüzeyindeki yanal değişim,

r_i = İç kıyı eğrilik yarıçapı,

r_0 = Dış kıyı eğrilik yarıçapıdır.

C_s kabarma katsayısı da,

$$C_s = \frac{H_s}{\frac{V_m^2}{2g} \frac{r_e}{b_s}} = \frac{r_e}{b_s} \int_{r_i/r_e}^{r_0/r_e} \frac{C_r}{r} d\left(\frac{r}{r_e}\right) \quad (3.46)$$

ifadesi ile verilmiştir. Burada, $b_s=r_0-r_i$ su yüzü genişliği olarak verilmektedir. Üniform en kesitli kıvrımlar için $C_s=2.2$ alınmasının uygun bir yaklaşım olduğu ve üniform olmayan en kesite sahip kanal kıvrımlarında ise,

$$C_s = \left(\frac{V_{ac}}{V_m}\right)^2 \left(\frac{r_0}{r_e} + \frac{r_i}{r_e}\right) \quad (3.47)$$

ifadesinden hesaplanmasının daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Burada, V_{ac} = Bir düşey üzerindeki ortalama hızın ortalama teğetsel bileşenidir. Su yüzünde meydana gelecek boyuna doğrultudaki değişimlerin de,

$$H_{\theta} = \int_0^L (J_{\theta} - J_0) dL = \int_0^L \left(C_{\theta} \frac{V_m^2}{2gr_e} - J_0 \right) dL \quad (3.48)$$

eşitliği ile belirleneceği ifade edilmiştir. Burada J_0 , su yüzü eğimidir.

Apmann'a (1972a; 1972b) göre, kayma gerilmesi dağılımı, kanal sınır deformasyonu ve su yüzündeki yanal değişim, bir kıvrım boyunca teğetsel hız bileşeninin değişimine bağlıdır. Daha önce yayınlanan çözümlerde, hareket denklemlerinin radyal ve düşey hız bileşenlerinin yanal ve düşey değişimleri, yalnızca kararlı üniform akım şartlarında geniş bir kıvrım dikkate alınarak verilmiştir.

Araştırmacı daha önceki çalışmalarda belirtilen su yüzündeki yanal değişim katsayılarının, b/r_e eğrilik oranlarının küçük değerlerinde birbiriyle iyi uyum içinde olduğunu fakat b/r_e nin büyük değerlerinde eşitlikler arasında belirgin farklılıkların bulunduğunu ifade etmiştir.

Araştırmacı, dr genişliğini, $rd\theta$ uzunluğuna ve dz yüksekliğine sahip sonsuz küçük bir akışkan elamanı etki eden merkezkaç kuvveti, radyal kayma gerilme bileşeni ve basınç kuvvetlerinin (hidrostatik dağılımlı) birbirlerine dengelediklerini kabul ederek, su yüzeyindeki yanal değişim katsayısı için;

$$K = \frac{5}{4} \tanh\left(\frac{r_e}{b}\right) \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (3.49)$$

ifadesi verilmiştir. Su yüzündeki yanal değişimden hareketle kıvrımdan geçen akım miktarı,

$$Q = A \sqrt{\frac{gH_s}{K}} \quad (3.50)$$

eşitliği ile verilmiştir. Burada,

A =Kabarmanın ölçüldüğü kesitteki radyal en kesit alanı

H_s =Kıvrımda iç ve dış kıyı arasındaki maksimum su yüzü yükseklikleri farkı,

K =Su yüzü yanal değişim katsayısıdır.

Araştırmacı (3,49) ve (3,50) ifadelerinin sabit akım şartlarında geçerli olduğunu ifade ederek bu durumda yapılacak hatanın %8-12 arasında kalacağı belirtmiştir.

Choudhary ve Narasimhan'a (1977) göre, su yüzündeki maksimum yanal değişim $\theta=90^\circ$ civarında oluşmakta ve iç kıyıda minimum su derinliğinin oluşmasıyla maksimum kabarma meydana gelmektedir. Froude sayısındaki artış ve b/h oranındaki azalma su yüzü profili ve kabarmanın yerini etkilemez. Araştırmacılar, dar kanallarda $\theta=75^\circ$ ve $r/r_e=1,279$ civarında düşük şiddette ikinci bir helikoidal hareketin yüzey yakınlarında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Georgiadou ve Smith (1986), genişliği kıvrım boyunca tedricen azalan 90° 'lik bir kıvrımlı yaklaşım kanalındaki akımı teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir (Şekil 3.8).

Araştırmacılar deneysel çalışmalarında, yüzey ve taban akımlarını gözlemlemişler ve üç boyutlu hız ölçümlerini yapmışlardır. Kıvrımlı yaklaşım kanalı akımları için uygulanabilir basitleştirilmiş nümerik model geliştirmişlerdir. Branş kanalı probleminde, branşın mevcudiyetinin ana kanala etkisini belirleyebilmek için deneysel çalışma yapmışlardır.

Georgiadou ve Smith (1986), silindirik koordinat sisteminde momentum ve süreklilik denklemlerinden hareketle, çeşitli kabul ve basitleştirmeler yaparak, ortalama teğetsel su yüzü eğimi J_θ ve radyal su yüzü eğimi J_r ifadelerini aşağıdaki şekilde elde etmişlerdir.

$$J_\theta = \frac{\delta h}{r \delta \theta} = \frac{\frac{Q^2 h}{g b^2} \left[\frac{\lambda}{2} + \frac{b_0}{b} \frac{1-b_d}{r_e \theta_f} \right]}{\left[h^3 - \frac{Q^2}{g b^2} \right]} \quad (3.51)$$

$$J_r = \frac{\delta h}{r \delta} = \alpha_0 \frac{V_\theta^2}{g r} + \frac{\tau_{0r}}{\rho g h} \quad (3.52)$$

Burada;

b_0 =Yaklaşım kanalı memba genişliği,

b_d =Daralma oranı (b_f/b_0)

θ_f =Toplam kıvrım açısı,

α_0 =Ortalama merkezkaç kuvveti radyal bileşeni

τ_{0r} =Taban kayma gerilmesi radyal bileşeni,

b_f =Yaklaşım kanalı mansab genişliğidir.

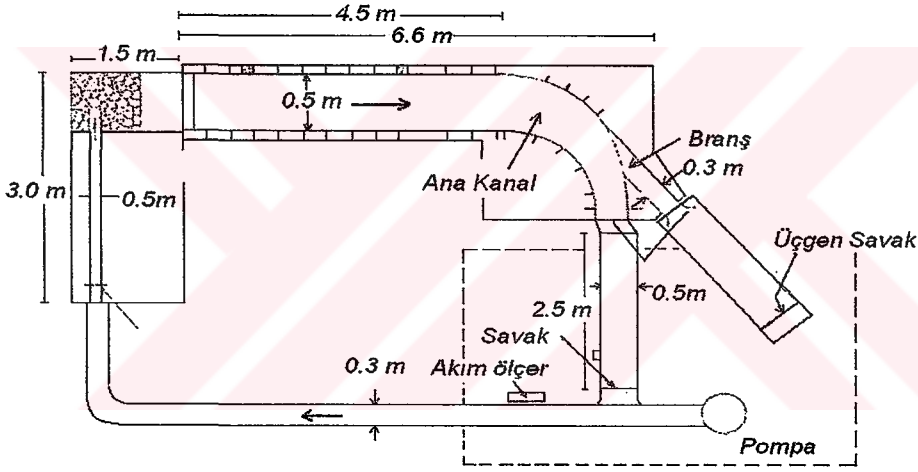
Araştırmacılar, λ sürtünme katsayısı ve α_0 ortalama merkezkaç kuvveti katsayısı için de

$$\lambda = \frac{2g \left[1 + 8 \times 2 \left(\frac{h}{r_e} \right)^2 \right]}{(C^2 h)} \quad (3.53)$$

ve

$$\alpha_0 = \left(\frac{1}{V_\theta^2} \right) \left(\frac{1}{h} \right) \int_0^h V_\theta^2 dz \quad (3.54)$$

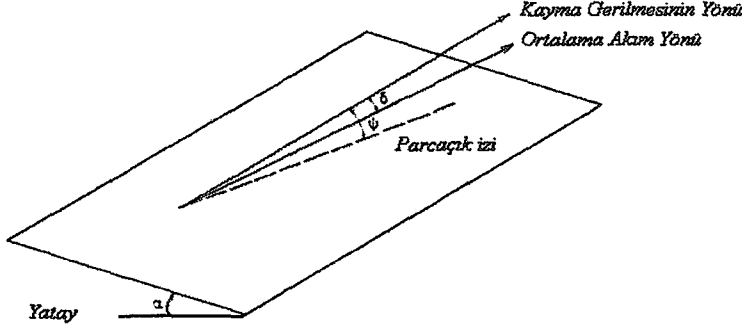
ifadelerini vermişlerdir.



Şekil 3.8 Deney seti (Georgiadou ve Smith, 1986)

3.6 Hareketli Tabanlı Kıvrımlı Kanallarda Akımın Davranışı

Engelund (1974), Hareketli tabanlı bir kıvrımdaki akımın nicel bir tanımını yaparak küçük enine eğimli (α) kıvrımlardaki taban malzemesinin hareketini incelemiştir (Şekil 3.9). Araştırmacı, kayma gerilmesinin yönünü teğetsel olarak, taban yakınındaki yerel akım yönüne eşit olarak farz etmiş ve helikoidal hareketten dolayı kayma gerilmesinin doğrultusunun ana akım yönünden δ açısı kadar saptığını belirtmiştir. Ağırlık kuvvetinden dolayı katı madde partiküllerinin taşınımının aşağı doğrultuda olduğunu (iç kıyıya doğru), bundan dolayı akım yönünden biraz sapma meydana geldiğini ve taban kayma gerilmesi ile partikül yörüngesi arasındaki ψ açısının tanımlanması gerektiğini belirtmiştir.



Şekil 3.9 Enine eğimli düzlemdeki katı madde partikülünün hareketi (Engelund, 1974)

Araştırmacı, tek bir parçacığa etkili boyuna kuvvetlerin dengesini aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$F_D = \left[\gamma_s (S-1) \frac{\pi}{6} d^3 - F_L \right] \tan \phi \cos \alpha \quad (3.55)$$

F_D = Sürüklenme kuvveti,

F_L = Kaldırma kuvveti,

γ_s = Tane özgül ağırlığı,

S = Katı maddenin rölatif yoğunluğu,

d = Tane çapı

ϕ = Dinamik sürtünme açısıdır.

Ayrıca, parçacığa etkili ters yöndeki kuvvetlerin bileşenleri de aşağıdaki şekilde ifade edilerek

$$\left[\gamma_s (S-1) \frac{\pi}{6} d^3 - F_L \right] \sin \alpha - F_D \tan \delta \quad (3.56)$$

enine ve boyuna kuvvet bileşenlerinin oranı $\tan \psi$

$$\tan \psi = \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} - \tan \delta \quad (3.57)$$

olarak ifade edilmiştir.

Katı maddenin hareket yönünü belirlemek için (3.57) ifadesinin kullanılabileceğini ve bu yaklaşımda askıdaki katı maddelerin göz önüne alınmaması gerektiğini belirtmiştir.

Bu sonuçlar hareketli tabanlı bir kanal kıvrımındaki kararlı ve üniform akıma uygulanabilir. Eğrilik merkezine doğru taşınan katı madde bileşeni göz önüne alınmalıdır. Kararlı akım durumunda enine katı madde taşınımı oranı sıfır olmalıdır. Aksi takdirde sabit bir taban elde edilemez. Bundan dolayı, kıvrımdaki sekonder akımdan dolayı iç tarafa doğru olan enine taşınımı dengelemek için dış kıyıda derinliğin artmasıyla enine taban eğimi gelişir. Sonra enine taban eğiminden dolayı iç tarafa yönelen taşınım, dış yöndeki bileşenle dengelenir. δ ve ψ birbirine eşit olduğunda denge sağlanmış olur. Araştırmacılar, su derinliği ile ilgili de aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir.

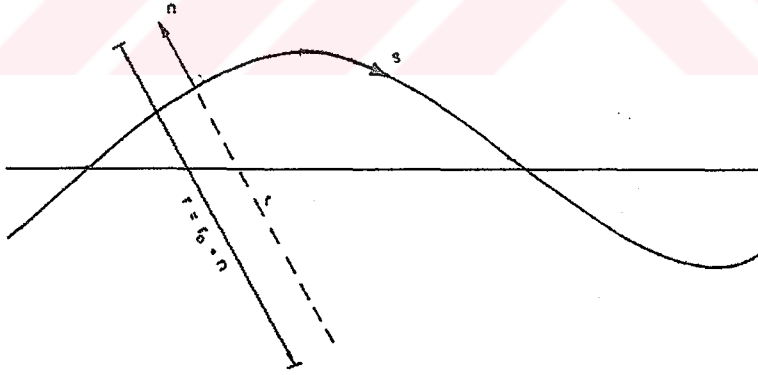
$$y = cr^{7 \tan \phi} \quad (3.58)$$

y =Lokal su derinliği

c = İntegral sabiti

ϕ = Sürtünme açısı (yaklaşık 30°)

(3.58) ifadesi üniform eğrilikli bir kıvrım için kullanılmaktadır. Pratikte menderesli kıvrımlar üniform eğrilığe ve akıma sahip değildir. Bundan dolayı sonraki aşamalarda üniform olmayan eğrilığe sahip kıvrımlardaki akım göz önüne alınmış ve eğrisel koordinatlar kullanılarak (Şekil 3.10) sinüzoidal yapıdaki bir kıvrım için,



Şekil 3.10 Menderesli akım analizinde kullanılan eğrisel koordinatlar (Engelund, 1974)

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R} \cos \frac{2\pi s}{L} \quad (3.59)$$

r = Yerel eğrilik yarıçapı

R = r_0 'ın minimum değeri

L = Menderes uzunluğu

s = Boyuna eğrisel koordinat

n = Enine eğrisel koordinat

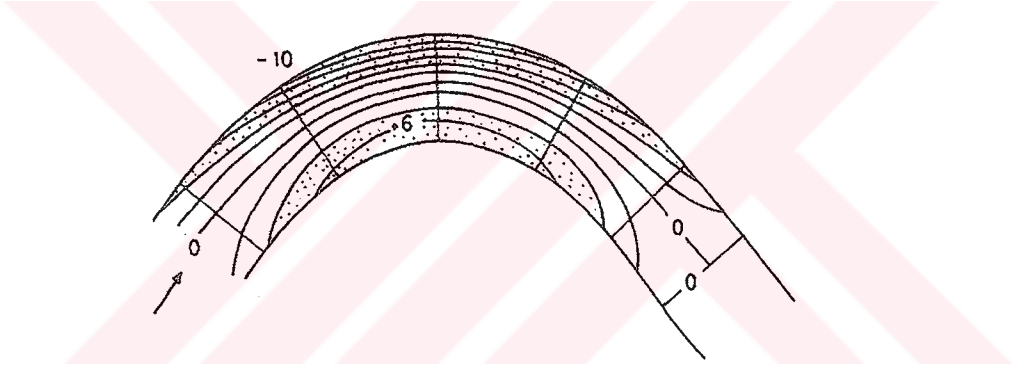
bağıntısı verilmiştir. (3.59) denklemi basit bir sinüzoidal biçimli kıvrım için geçerlidir. (3.59) denklemi, (3.58) denklemi yardımıyla düzenlenirse aşağıdaki şekli alır.

$$y = c(r_0 + n)^{7 \tan \phi} = c \left(\frac{R}{\cos} \frac{2\pi s}{L} - n \right)^{7 \tan \phi} \quad (3.60)$$

Bu denklem, ortalama derinlikle boyutsuz hale getirilirse,

$$\frac{y}{h_{ort}} = \left(1 + \frac{n}{R} \cos \frac{2\pi s}{L} \right)^{7 \tan \phi} \quad (3.61)$$

olur. Bu ifadenin örnek bir uygulaması Şekil 3.11’da gösterilmiştir. Eğer uygun bir sürtünme açısı seçilirse hesaplanan ve ölçülen taban geometrileri arasında iyi bir paralellik sağlanır.



Şekil 3.11 (3.60) denkleminden elde edilen taban topoğrafyası (Engelund, 1974)

Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa (1976), tabandaki kayma gerilmesinin ana akımın derinlik boyunca ortalama hızının (V_m^2) karesiyle orantılı olduğunu belirtmişlerdir.

$$\tau_0 = \frac{\rho}{2} C_f V_m^2 \quad (3.62)$$

ρ = Akışkanın özgül kütlesi

τ_0 = Taban kayma gerilmesi,

C_f = Sürtünme katsayısıdır.

V_m ile V_a arasındaki ilişki $V_m = f V_a$ şeklinde ifade edilmiştir. Burada, V_a =Bir en kesitteki ortalama hız dır.

Sürtünme katsayısı Manning formülü kullanılarak ifade edilirse, $C_f=2gn^2/h^{1/3}$, radyal yöndeki kayma gerilme dağılımı aşağıdaki şekli alır.

$$\tau_r = \rho g n^2 f^2 h^{-1/3} V_a^2 \quad (3.63)$$

Silindirik koordinatlarda ortalama taban profilinin zamanla değişimi aşağıdaki denklem ile iyi bir şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) = 0 \quad (3.64)$$

η =Oyulma

λ =Boşluk oranı

q_r =Birim genişlikte enine doğrultudaki katı madde oranıdır.

Kararlı taban profili aşağıdaki denklem ile iyi bir şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{h}{h_a} = \exp \left[\frac{1}{2} A \left(\frac{r^2}{r_a^2} - 1 \right) \right] \quad (3.65)$$

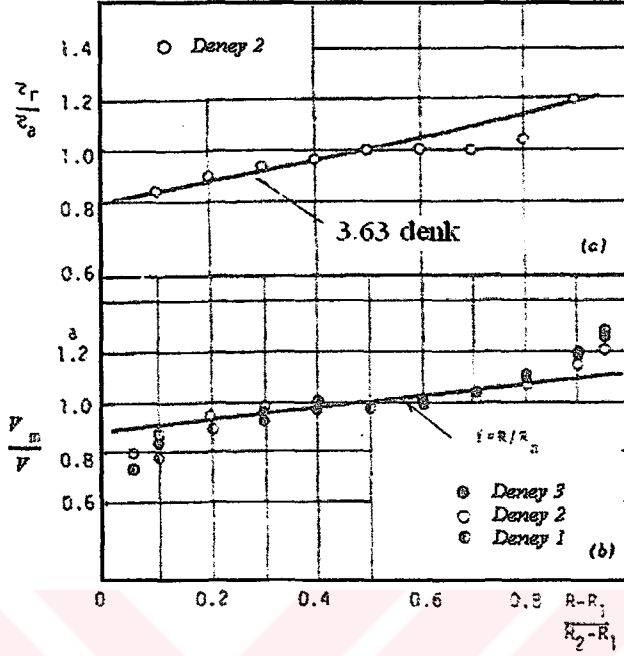
$$A = - \left(\frac{3}{4} \frac{\mu C_D}{1 + \frac{C_L}{C_D}} \right)^{1/2} \frac{u_{*a}}{\left[\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d \right]^{1/2}} \frac{\lambda_0}{k} \frac{V_a}{u_{*a}} F(0) \quad (3.66)$$

Maksimum oyulma derinliği ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir. $h=h_a+\eta$, η =Oyulma, h_a =Bir en kesitteki ortalama su derinliği

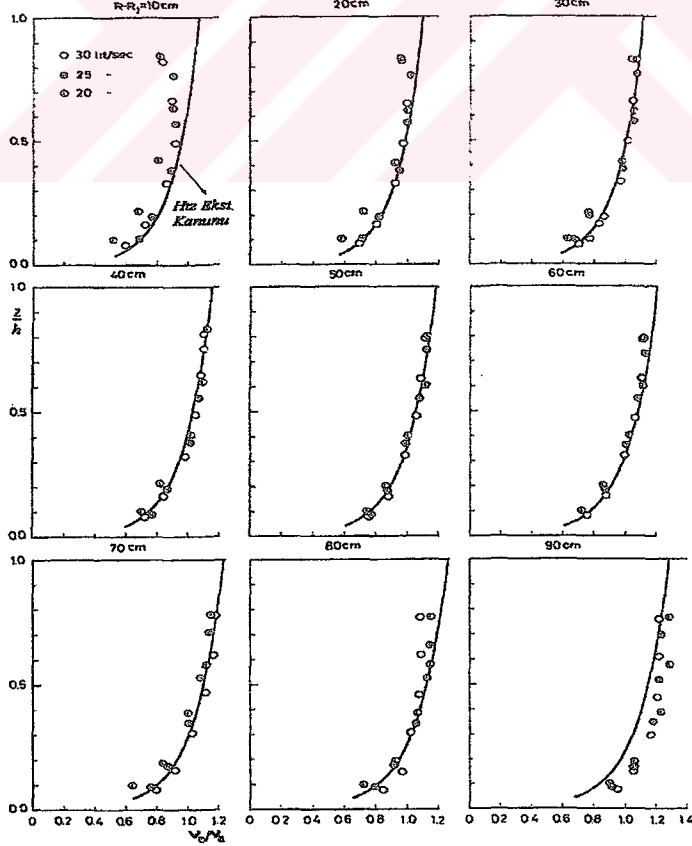
$$\frac{\eta}{h_a} = \exp \left[\frac{1}{2} A \left(\frac{r^2}{r_a^2} - 1 \right) \right] - 1 \quad (3.67)$$

Araştırmacılar, kıvrım girişinden itibaren kayma gerilmelerini $\theta=20^\circ$, $\theta=51^\circ$, $\theta=83^\circ$, $\theta=165^\circ$, $\theta=180^\circ$ ve $\theta=216^\circ$ 'daki 7 en kesitte ölçmüşlerdir (25 lt/s debi değerinde). Dağılımlar $\theta=83^\circ$ de en iyi gelişimi göstermiş ve deneysel sonuçlar ile (3.63) denklemini karşılaştırılarak Şekil 3.12a'da verilmiştir. Şekil 3.12b'de enine doğrultuda boyuna akımın hız dağılımı

görülmektedir (V_m =Derinlik boyunca ortalama boyuna hız). Şekil 3.13'de deneysel sonuçlarla (3.31) denklemi (Hız eksikliği) karşılaştırılmıştır (V_0 = Boyuna hız).

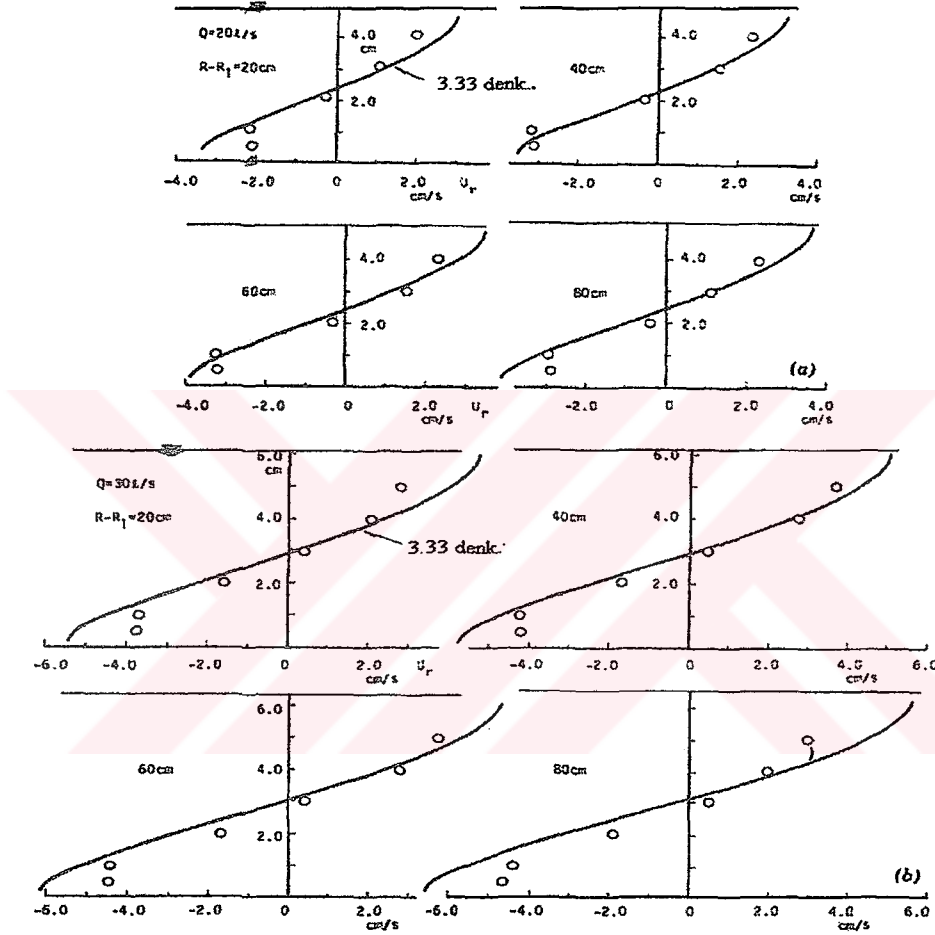


Şekil 3.12 (a) Taban kayma gerilmesinin enine dağılımı (b) Derinlik boyunca ortalama boyuna akımın enine dağılımı (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)



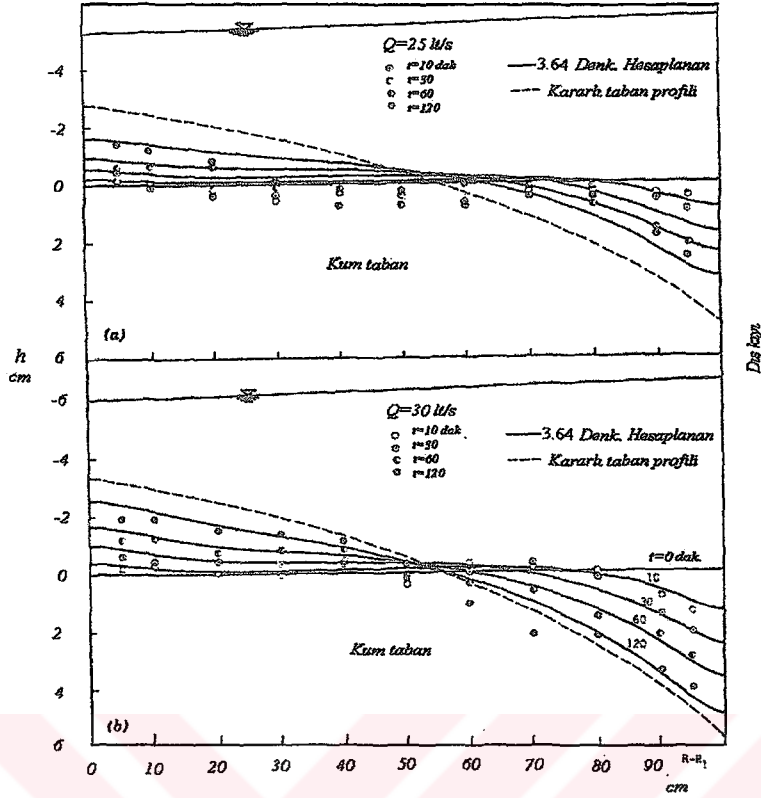
Şekil 3.13 Derinlik boyunca boyuna hız (V_0) dağılımı (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)

Şekil 3.14a ve 3.14b'de hız dağılımının enine bileşeni gösterilmiş ve (3.33) denklemiyle deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir. Kıyı yakınları haricinde sekonder akımın düşey bileşeni daha etkin olmaktadır. Deneysel ve teorik değerler arasında iyi bir ilişki sağlanmıştır. De Vriend (1973), Reynolds denklemlerindeki lineer olmayan konvektif (taşımalsal) terimlerin ihmal edilmesinin sekonder akımı küçük çıkardığını ifade etmiştir. Bundan dolayı teorik ve deneysel değerler arasında biraz farklılık görülmektedir.



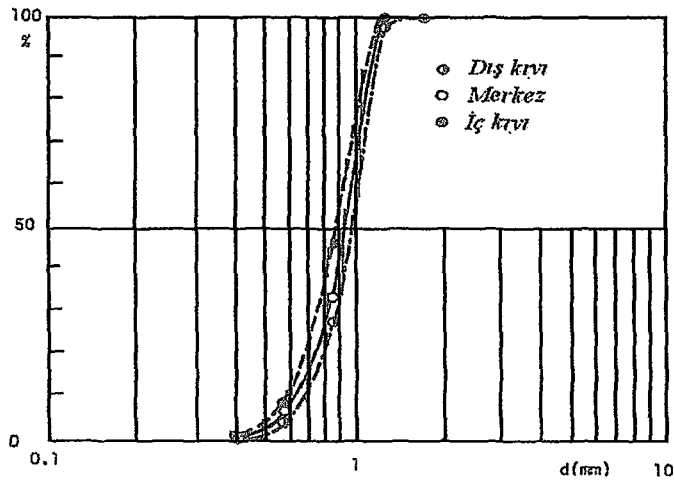
Şekil 3.14 Enine akımın (V_r) dağılımı : (a) $Q=20$ lt/s ; (b) $Q=30$ lt/s (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)

Şekil 3.15.a ve 3.15.b'de hareketli tabanlı deneyler için enine taban profilinin zamanla değişimi gösterilmiştir. (3.64) denkleminde hesaplanan nümerik değerlerle, deneysel değerler karşılaştırılmış ve iyi bir uygunluk göstermiştir. Başlangıç oyulma halinde, boyuna doğrultuda bütün bölgelerde üniform oyulma görülmüştür. Oyulma derinliği artarken taban dalgalarının gelişimi artmakta ve yükseklikleri de zamanla büyümektedir.



Şekil 3.15 Enine taban profilinin zamanla değişimi (a) $Q=25$ lt/s; (b) $Q=30$ lt/s (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)

Deneyler tamamlandıktan sonra kanalın iç, orta ve dış kıyısından numuneler alınmış ve granülometrik dağılımı çıkarılmıştır (Şekil 3.16). Şekilden de görüldüğü gibi dış kıyıda kaba, iç kıyıda ince malzeme birikmiştir. Bunun nedeninin ince malzemenin kaba malzemedan daha kolay taşınması olarak ifade edilmiştir. Tane tabakalaşmasının sekonder akımdan kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 3.16 Kıvrımlı kanalda tabakalaşma olayı (Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa, 1976)

Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda (1987), sabit eğrilikli kıvrımlı kanallarda tabakalaşma (sorting) ve taban topoğrafyası için matematiksel bir model geliştirilmişlerdir. Deneysel çalışmalar ve pratik uygulamalarla model sonuçlarını karşılaştırılmışlardır.

Araştırmacılar, tabakalaşma olayını şu şekilde açıklamaya çalışmışlardır; kohezyonsuz ve askı halinde olmayan taban malzemesine sahip geniş, üniform eğrilikli bir kanalda, kritik kayma gerilmesinden daha büyük değerlerde taban malzemeleri harekete geçerek kıvrımın dış kıyısında oyulmaya ve iç kıyısında ise yığılmaya sebep olurlar. Bir taneye etkiyen enine akışkan kuvveti enine ağırlık kuvvetine eşit olduğu zaman kararlı bir taban profili elde edilir. Sekonder hareketten dolayı aşağı yönlü ağırlık kuvveti yukarı yönlü akışkan kuvvetinden büyük olduğu zaman kanal eksenindeki iri bir partikül dış kıyıya doğru bir hareket yapar. İnce bir partikülün aşağı yönlü ağırlık kuvveti yukarı yönlü akışkan kuvvetinden küçük ise tane kıvrımın iç tarafına doğru hareket eder. Bu şekilde kıvrımda tabakalaşma olayı meydana gelir.

Araştırmacılar, enine taban topoğrafyası ve enine taban malzemesinin dağılımı ile ilgili ifadeler geliştirmişlerdir. Enine taban topoğrafyası ile ilgili aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir.

$$\frac{dh}{dr} = f^2 \left(\frac{r}{r_e} \right)^2 \frac{h}{r} \frac{u_{*e}}{\sqrt{Sgd}} \frac{-1.941 + 1.226 \frac{u_e}{u_{*e}}}{5.382 \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}} \quad (3.68)$$

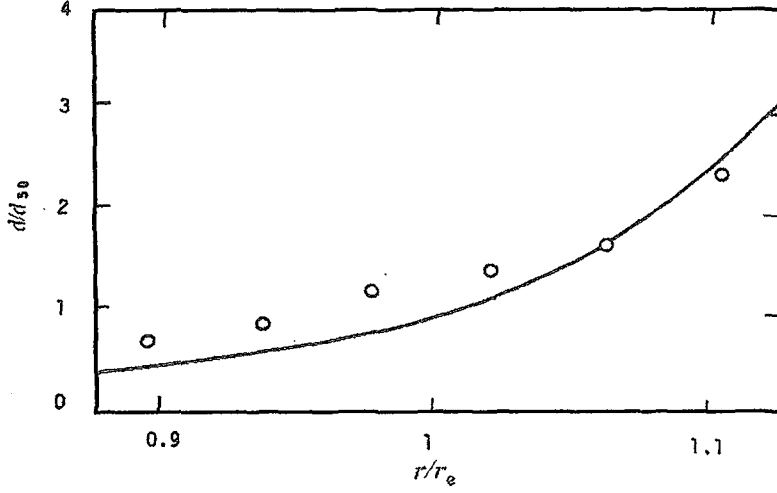
burada; h=Lokal derinlik, d=tane büyüklüğü, S= batmış tane özgül ağırlığıdır $((\gamma_s - \gamma) / \gamma)$.

Enine taban malzemesi dağılımı için de,

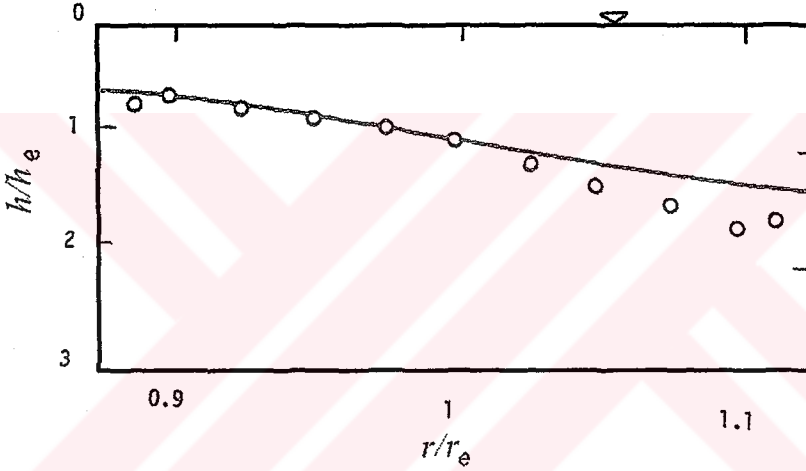
$$\frac{dd}{dr} = \frac{1}{\Psi(d)} \frac{r}{br_e} \quad (3.69)$$

vermişlerdir. Burada, b= Kanal genişliği ve $\psi(d)$, sekonder akım fonksiyonudur.

Araştırmacılar, deneysel çalışmalardan elde ettikleri enine tane büyüklük dağılımlarını (3.69) denklemiyle kıyaslayarak Şekil 3.17'de ve enine taban topoğrafyasını da (3.68) denklemiyle karşılaştırarak Şekil 3.18'de vermişlerdir.



Şekil 3.17 Enine tane büyüklüğü dağılımı (Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda, 1987)

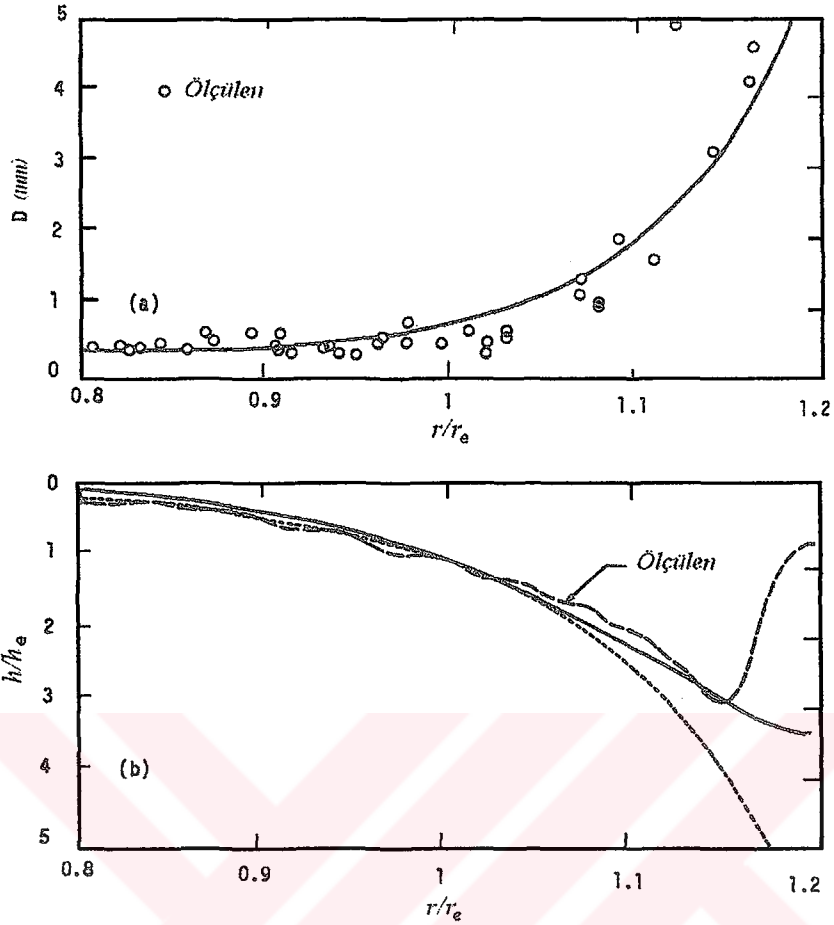


Şekil 3.18 Enine taban profili (Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda, 1987)

Araştırmacılar, geliştirdikleri teorik yaklaşımları gerçek bir nehir uygulayarak Şekil 3.19'da göstermişlerdir. Şekil 3.19a'da deneysel sonuçlarda olduğu gibi tane büyüklüğü dış kıyıda hızlıca artmaktadır. Şekil 3.19b'de dış kıyıdaki kaba taban malzemesi enine taban eğimini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Araştırmacılar yaptıkları deneysel ve teorik çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara varmışlardır.

Kaba malzeme dış kıyıya doğru ilerlemekte ve bu bölgede büyük bir artış göstermektedir. Tabakalaşma, kıvrımın dış kıyısında enine taban eğiminde önemli bir azalmaya neden olmaktadır. Lower Wabash nehrinde tabakalaşmadan dolayı maksimum oyulma %30-40 civarında azalmıştır. Bu etki askı malzemesinden kaynaklanandan (oyulma artışından) çok daha fazladır ve bu çalışmada askı malzemesinden dolayı maksimum derinlik %3-4 civarında artmıştır.



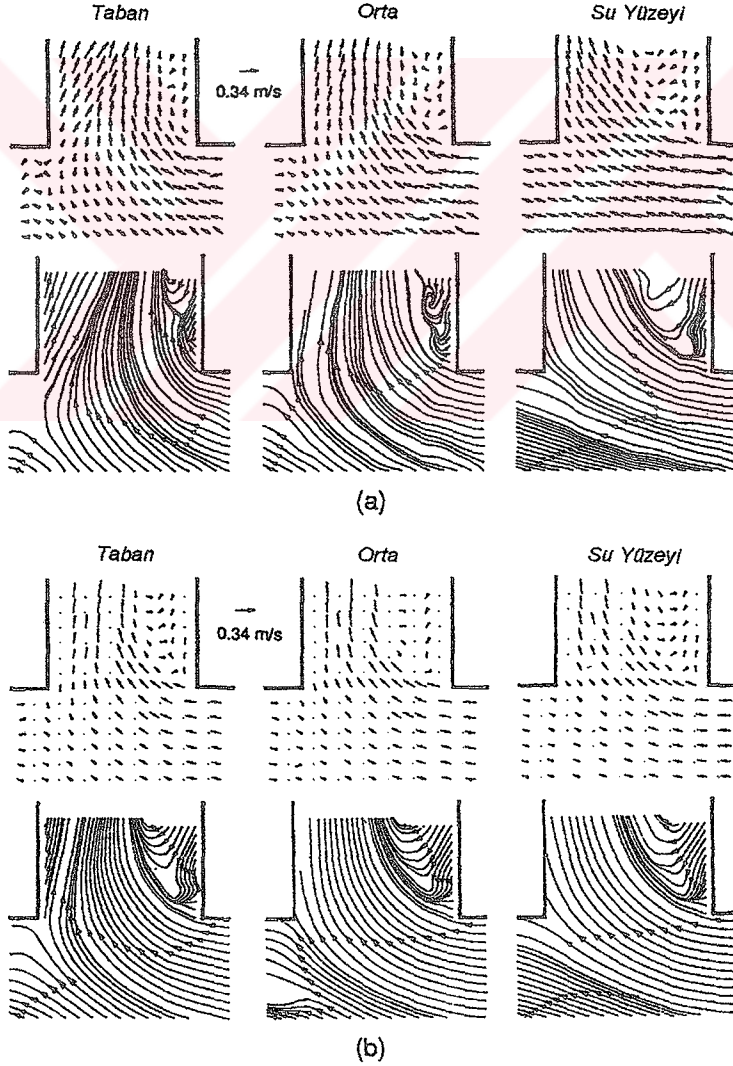
Şekil 3.19 (a) Helm nehrinin kıvrımında taban malzemesi dağılımının tahmini ve ölçülen değerlerinin karşılaştırılması, (b) Taban topoğrafyası için tahmin ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması (Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda, 1987)

Neary ve Odgaard (1994), $\theta=90^\circ$ ’lik bir açık kanal branşmanında (ayrımında) üç boyutlu akım yapısını deneysel olarak incelemiştir. Üç boyutlu akımın davranışının ana kanal pürüzlülüğüne ve yanal akım hızının ana kanal hızının oranına (savaklanma oranı) bağlı olduğunu ve ayırmadaki katı madde hareketinin davranışını belirlemek için üç boyutlu akım yapısının iyi bilinmesi gerektiğini belirtmişlerdir (V_1 =Ana kanal membасыndaki ortalama hız, V_2 = Branş kanalındaki ortalama hız).

Araştırmacılar, pürüzlü tabanda ($V_2/V_1=0.6$) 1.2 cm, 3.0 cm ve 15.2 cm derinliklerdeki hız vektörlerini ve akım çizgilerini Şekil 3.20.a’da göstermişlerdir. Gözlemlendiği gibi ayrım girişinde büyük bir ayrılma bölgesinin geliştiği, ayrılma bölgesinde hız, eddy ve döngülerin küçük olduğunu belirtmişlerdir. Ana kanalın akım yönünde kanala giren akımın önemli bir momentuma sahip olmasından dolayı ayrılma bölgesinin oluştuğunu, yüzeydeki ayrılma bölgesinin tabandakinden daha küçük olduğunu ve taban yakınındaki hız vektörlerinin yönünün yüzeydekilere göre daha fazla saptığını belirtmişlerdir.

Akım çizgilerinin Şekil 3.20.a'da görüldüğü gibi derinlik boyunca değişim gösterdiğini ve yüzeydekine oranla tabanda daha geniş bir bölgeyi kapladığını ifade etmişlerdir. Yüksek momentumdan dolayı yüzeydeki akım, ana akım yönünde hareketini sürdürürken tabandaki yavaş hareketli akımın branş kanalına yöneldiğini ve ana kanalda katı madde taşınımı olması durumunda tabanda büyük bir katı madde yığılmasının oluşacağını belirtmişlerdir.

Şekil 3.20.b'de görüldüğü gibi pürüzsüz tabandaki akım yapısının pürüzlü tabandakine göre derinlik boyunca daha üniform olduğunu, ayrılma bölgesinin büyüklüğü ve bölünmüş akım alanının derinlik boyunca daha az bir değişim gösterdiğini ve sekonder akımın pürüzlü tabana göre biraz zayıf olduklarını belirtmişlerdir. Pürüzsüz taban şartlarında hız oranının artmasıyla (savaklanma oranı) ayrılma bölgesinin küçüldüğünü ve akım çizgilerinin ana kanal doğrultusunda geliştiğini belirtmişlerdir.



Şekil 3.20 Vektörel hız ölçümleri ve akım çizgileri $V_2/V_1=0.6$ (a) Pürüzlü taban (b) Pürüzsüz taban (Neary ve Odgaard, 1994)

Yen (1965, 1967), yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda taban kayma gerilmeleri bileşenlerinin oranını ($\tau_{0r}/\tau_{0\theta}$) aşağıdaki şekilde tanımlamıştır.

$$\frac{\tau_{0r}}{\tau_{0\theta}} = f\left(\frac{h}{r}, \theta, \frac{\Delta Z_b}{h}\right) \quad (3.70)$$

r = Kıvrım eğrilik yarıçapı,

θ = Kıvrım açısı,

h = Akım derinliği,

ΔZ_b = Taban seviyesindeki değişim

Üniform kıvrımlı bir kanalda tabanda deformasyon olmaması durumunda $\tau_{0r}/\tau_{0\theta}$, h/r 'nin fonksiyonu olur. Zimmermann ve Kennedy (1978); Falcon ve Kennedy (1983) üniform eğrisel bir akım için $\tau_{0r}/\tau_{0\theta}=b_{ns}(h/r)$ ifadesini vermişler ve b_{ns} 'i bağımlı direnç katsayısı olarak tanımlamışlardır.

Yen ve Lee (1995), üniform olmayan kararsız akım şartlarında hareketli tabanlı kıvrımlı bir kanalda, taban topoğrafyası ve enine doğrultudaki katı madde dağılımını incelemişlerdir. Araştırmacılar, sabit yarıçaplı 180° lik kıvrımlı bir kanalda beş farklı hidrograf için deney yapmışlar, çeşitli kıvrım kesitlerinde tabanda oluşan değişimleri, her bir deneydeki hidrografın pikinde ve sonunda tabandaki katı madde dağılımını incelemişlerdir.

Araştırmacılar, kanal kıvrımlarındaki oyulma ve yığılmanın, boyuna ve enine akımın davranışına bağlı olduğunu, enine akımın tabandaki katı maddenin akımın boyuna yönünden sapmasına neden olduğunu belirterek sapma açısını aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\tau_{0r}}{\rho} + \frac{2}{3} \frac{\beta g}{\alpha \lambda} d_i \sin \theta_r}{\frac{\tau_{0\theta}}{\rho} + \frac{2}{3} \frac{\beta g}{\alpha \lambda} d_i \sin \theta_\theta} \right) \quad (3.71)$$

δ_i = Sapma açısı

τ_{0r} = Taban Kayma gerilmesinin enine bileşeni

$\tau_{0\theta}$ = Taban Kayma gerilmesinin boyuna bileşeni

$\beta = (\rho_s - \rho)/\rho$ =Rölatif tane özgül kütlesi (ρ =Suyun özgül kütlesi, ρ_s =Katı maddenin özgül kütlesi)

g = Yerçekimi ivmesi

d_i = i. derecedeki ortalama çap

α = Şekil faktörü

θ_0 = Boyuna taban eğimi

θ_r = Enine taban eğimi

Bu denklemde görüleceği gibi sapma açısı, taban kayma gerilmesi, taban eğimi ve katı madde tanelerinin büyüklüğüne bağlıdır.

Lee (1991), yaptığı boyut analizi sonucunda Re sayısının yeterince büyük ve Fr sayısının yeterince küçük olduğunu belirterek, Re ve Fr sayılarını ihmal etmiş ve aşağıdaki ifadeyi sunmuştur.

$$\frac{\Delta Z_b}{h_0}, \frac{d}{d_0}, \frac{\sigma}{\sigma_0} = F_{1,2,3} \left(\frac{r}{r_e}, \theta, W_t, P \right) \quad (3.72)$$

r =Kıvrımın eğrilik yarıçapı,

θ =Kıvrımın açısı,

$W_t = u_{*0}^2 \nabla / (g h_0^3 B)$ (Taban toplam akım indeksi)

$P = (h_p - h_0) / (t_d u_{*0})$ (Kararsızlık oranı)

r_e = Kanal ekseni eğrilik yarıçapı,

b = Kanal genişliği,

h_0 = Başlangıç akım derinliği,

h_p = Hidrografın pikindeki akım derinliği,

u_{*0} = Tabandaki akımın kayma hızı,

∇ = Hidrografın altındaki toplam su hacmi,

d = Deney sonundaki medyan çap,

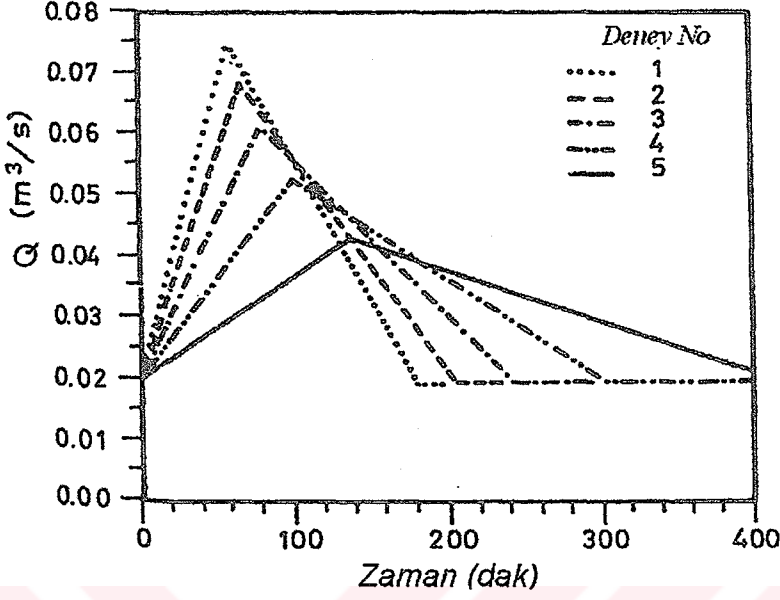
d_0 = Katı maddenin başlangıçtaki medyan çapı,

σ_0 = Katı madde büyüklüğünün başlangıç geometrik standart sapması,

∇ ve taban akımı sabit ise toplam deformasyon sadece hidrografın dikliğine bağlıdır. Lee (1991) deneylerde W_t 'yi sabit tutarak (3.72) bağıntısını aşağıdaki şekilde dikkate almıştır.

$$\frac{\Delta Z_b}{h_0}, \frac{d}{d_0}, \frac{\sigma}{\sigma_0} = F_{4,5,6} \left(\frac{r}{r_e}, \theta, P \right) \quad (3.73)$$

Deneylerde kullanılan hidrograflar Şekil 3.21’de ve hidrografların karakteristikleri de Çizelge 1’de verilmiştir.

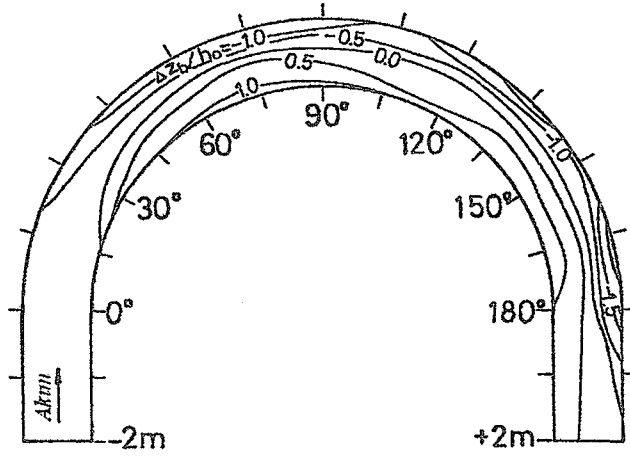


Şekil 3.21 Deneylerde kullanılan hidrograflar (Yen ve Lee, 1995)

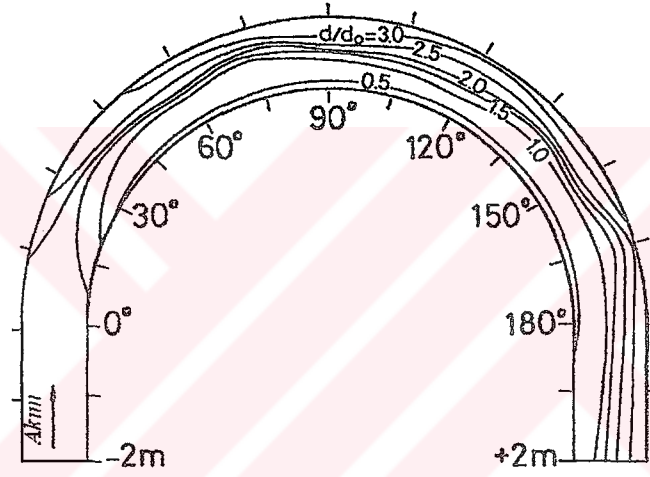
Çizelge 3.1 Hidrografların karakteristikleri (Yen ve Lee, 1995)

Deney	Pik akım Q_p (m^3/s)	Pik akım derinliği (m)	Zaman t_d (dak)	Kararsız akım parametresi P (10^4)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0.0750	0.129	180	2.21
2	0.0685	0.121	204	1.76
3	0.0613	0.113	240	1.31
4	0.0530	0.103	300	0.86
5	0.0436	0.091	420	0.46

Yapılan deneyler sonucunda birinci deneyde $\theta=75^\circ$ ’de iç kıyı bölgesinde maksimum yığılmanın ($\Delta Z_b/h_0=1.13$), $\theta=165^\circ$ ’de ise dış kıyı bölgesinde maksimum oyulmanın ($\Delta Z_b/h_0=-2.06$) meydana geldiğini (Şekil 3.22) ve maksimum oyulma kesitinde enine taban eğiminin 1. nolu deneyde $\theta_r=0.176$, 5 nolu deneyde $\theta_r=0.045$ olarak belirlemiştir. Ayrıca, en büyük d/d_0 değişiminin ve en yoğun enine dağılımın $\theta=90^\circ$ ’de olduğunu, 1 nolu deneyde maksimum d/d_0 değerinin 3.60 ve minimumunda 0.63 olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.22 1 Nolu deney için taban topoğrafyası (Yen ve Lee, 1995)



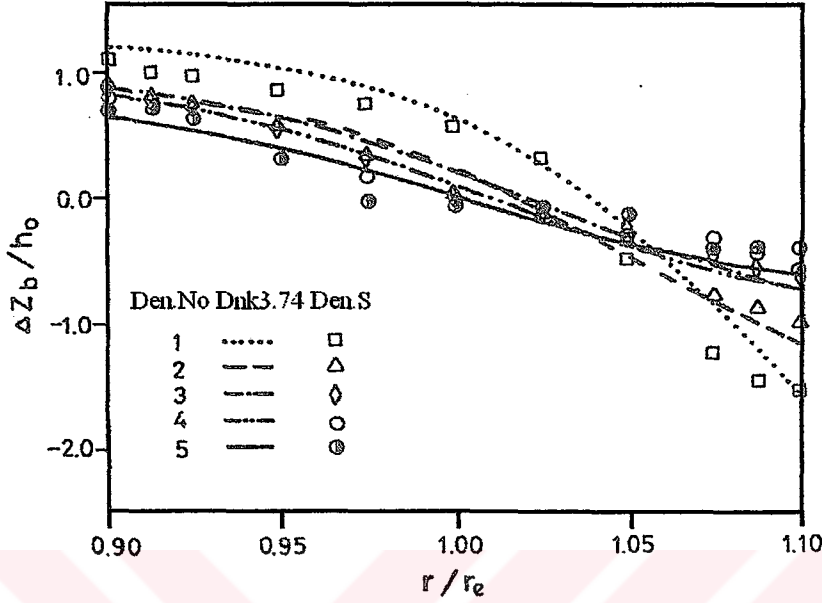
Şekil 3.23 1 Nolu deney için ortalama tane büyüklük dağılımı (Yen ve Lee, 1995)

Deneylerde, taban topoğrafyası ve boyuna profillerden, maksimum yığılma bölgesinin $\theta=75^\circ$ ve $\theta=90^\circ$ kesitleri arasında ve maksimum oyulma bölgesinin de $\theta=165^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ kesitleri arasında olduğu belirtilmiştir. Maksimum yığılma kesitlerindeki enine taban profilleri Şekil 3.24'de verilmiştir. Şekil 3.24'den görüleceği gibi, yüksek kararsızlık oranlarında dış kıyıda daha büyük oyulma derinliği ve iç kıyıda daha büyük yığılma yükseklikleri görülmüştür. Maksimum oyulma kesitlerindeki enine taban profilleri de Şekil 3.25'de verilmiştir. Ayrıca, araştırmacılar tarafından regresyon analizi sonucu enine taban profili ile ilgili aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

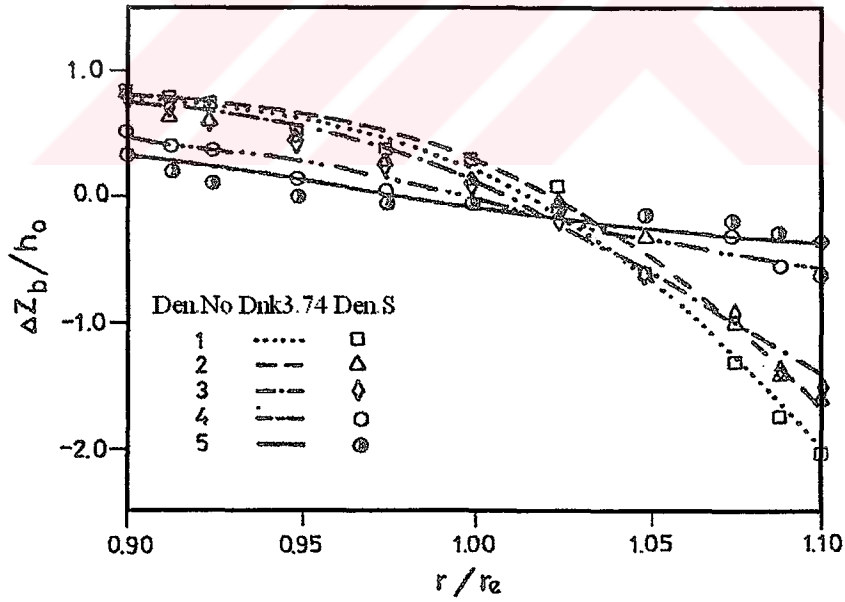
$$\frac{\Delta Z_b}{h_0} = -a_1 \tanh \left[10 \left(\frac{r}{r_e} - b_1 \right) \right] - c_1 \quad (3.74)$$

burada,

a_1 , b_1 ve c_1 , P 'ye bağılı katsayılarıdır.



Şekil 3.24 Maksimum yığılma kesitinde enine taban profilleri (Yen ve Lee, 1995)



Şekil 3.25 Maksimum oyulma kesitinde enine taban profilleri (Yen ve Lee, 1995)

Deneylerde, enine dağılımın $\theta=15^0$ 'lik kesitte başlamakta ve $\theta=180^0$ 'ye kadar devam etmektedir. Akım kıvrımı terlettikten sonra sekonder akımın azalmasıyla enine dağılım tedricen azalmaktadır. Ayrıca büyük kararsızlık oranlarında dış kıyıdaki d/d_0 (Rölatif medyan çap) değerleri düşük, düşük P değerlerinde ise daha büyük çıkmıştır. Diğer taraftan iç kıyıda

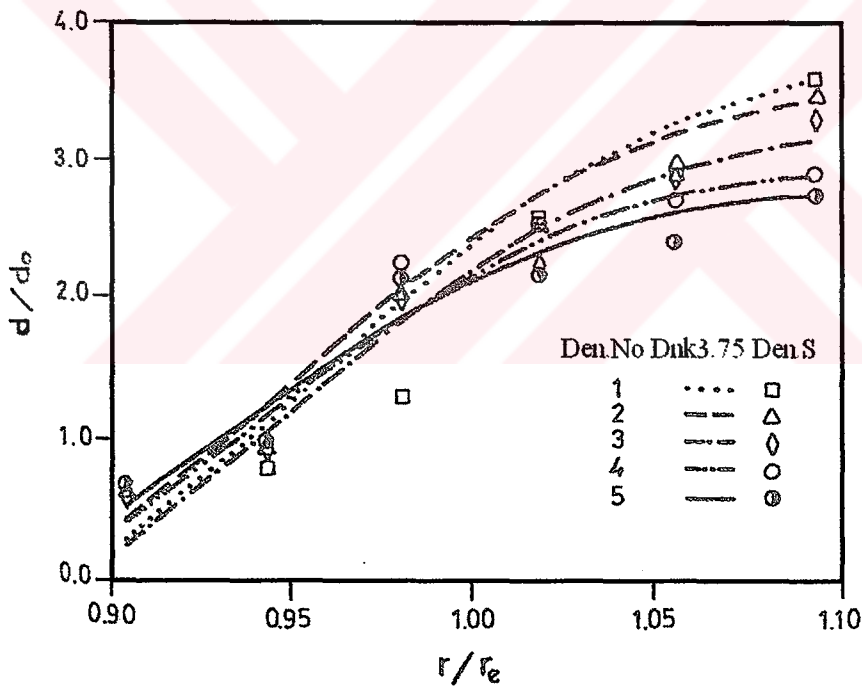
d/d_0 değerleri P 'nin azalmasıyla artar. Yani büyük P değerlerinde dış kıyıda büyük oyulma derinliği olurken, iç kıyıda büyük yığılma olmaktadır. Bunun sonucunda enine taban eğimi büyümektedir.

$\theta=90^0$ 'lik kesitte d/d_0 'ın enine değişimleri Şekil 3.26'da verilmiş ve maksimum enine taşınım için,

$$\frac{d}{d_0} = a_2 \tanh \left[10 \left(\frac{r}{r_e} - b_2 \right) \right] + c_2 \quad (3.75)$$

verilmiştir. a_2 , b_2 ve c_2 , P 'ye bağlı katsayılardır.

Ayrıca, kıvrımın iç ve dış kıyısındaki katı maddelerin kıvrımın eksenindeki katı maddelere göre dağılımının daha üniform olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3.26. $\theta=90^0$ 'de tane büyüklüğünün enine değişimi (Yen ve Lee, 1995)

Deneysel sonuçlardan; hidrografın karakteristiklerinin taban topoğrafyası ve enine katı madde dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu, hidrografın dikliğinin artmasıyla dış kıyıda daha büyük oyulma derinlikleri ve iç kıyıda daha büyük yığılma yüksekliklerinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca hidrografın fazla dik oranlarında dış kıyıda kaba, iç kıyıda ise ince malzemenin biriktiğini gözlemlemişlerdir.

4. AKIM ALANINA YERLEŞTİRİLEN ENGELLER ETRAFINDAKİ AKIM VE OLUŞAN VORTEKS SİSTEMLER

4.1 Giriş

Hareketli tabanlı bir akarsuya yerleştirilen herhangi bir engel, o noktadaki akım karakteristiklerinde değişmelere yol açar. Engel etrafındaki akıma ait hız ve basınç alanlarındaki değişmeler, bunlara bağlı olarak da engel etrafında sınır tabakasından ayrılmalar meydana gelir. Ayrılmalar sonucu çeşitli biçim ve büyüklükte vorteks sistemler ve sekonder hareketler oluőr.

Akarsulardaki taban malzemesi hareketi, akım karakteristiklerindeki yukarıda sözü edilen değişikliklerin bir fonksiyonu olduğundan, akarsuda böyle bir değişikliğe yol açan engel etrafındaki katı madde hareketini ve varsa oyulma ve yığılma gibi problemlerin incelenme ihtiyaını ortaya çıkarmaktadır.

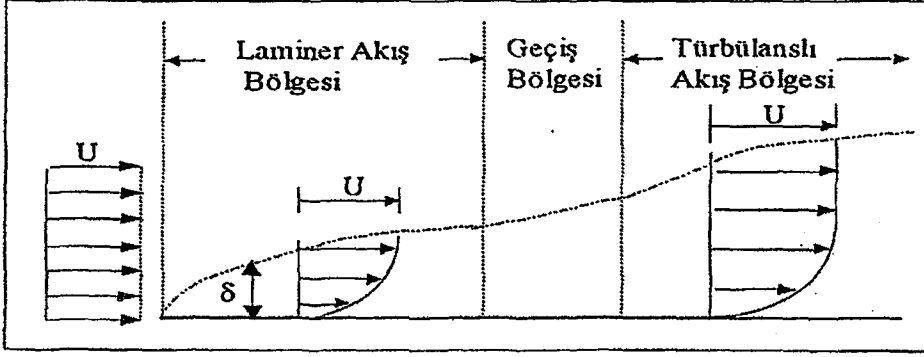
4.2 Engel Etrafındaki Akım Karakteristiklerinde Değişim

Doğrusal bir kanalda akıma yerleştirilen herhangi bir engel, yerel olarak akımın karakteristiklerinde çok önemli değişikliklere neden olur (, 1979). Bu değişimler;

- 1) Engelden dolayı akım çizgilerinde meydana gelen sapmalar ve bunun neticesi olarak da engel etrafında hız ve basınç alanlarında değişmeler,
- 2) Engel etrafında sınır tabakasının oluőrması, hız ve basınç alanlarındaki değişmelerin neticesi olarak, sınır tabakasından ayrılmalar,
- 3) Sınır tabakasından ayrılmanın neticesinde engel etrafında çeşitli biçim ve büyüklükte vorteks sistemlerin oluőrması ve sekonder hareketler,
- 4) Engel etrafında oluőr vorteks sistemler ve sekonder akımın etkisiyle tabanda dengede bulunan katı maddelerin yerinden sökülmesi ve taşınması,
- 5) Engel etrafında oyulmanın başlaması ve oyulma çukurunun oluőrması, olarak sıralanabilir.

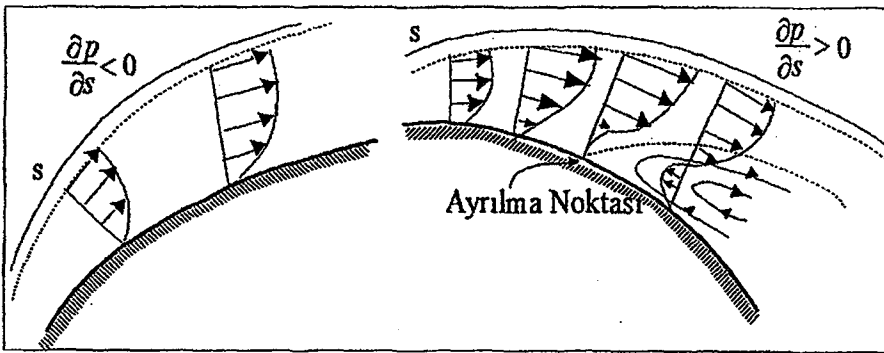
4.3 Sınır Tabakasının Oluşumu ve Sınır Tabakasından Ayrılımlar

Sınır tabakası, kısaca akışkan hızının, cidardan itibaren viskozite etkisinin görülmediği dış akım hızına %1 kadar yaklaştığı bölgedir. Sınır tabakaları, akım içindeki oluşum özelliklerine göre Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Sınır tabaka bölgeleri ve hız dağılımları (Üç, 1988)

Sınır tabakası dışında ideal kabul edilen akışkanın hareket yönünde basınç gradyanının artması, sınır tabakası içindeki akışkan partiküllerinin bu ters basınç gradyanına karşı hareket ederken, kinetik enerjisinin büyük bir bölümünü kaybetmesine neden olur. Bu ters basınç gradyanının 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.



Şekil 4.2 Engel boyunca hız dağılımı ve sınır tabakasının ayrılması (Üç, 1988)

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 akımın önemli derecede gecikmeye uğramasıdır. Bu ise, sınır tabakasının sürekliliği ile uyuşmayan bir özelliktir. Şekil 4.2’de sınır tabakası içinde hız dağılımı ve ayrılma noktası verilmiştir (Üç, 1988).

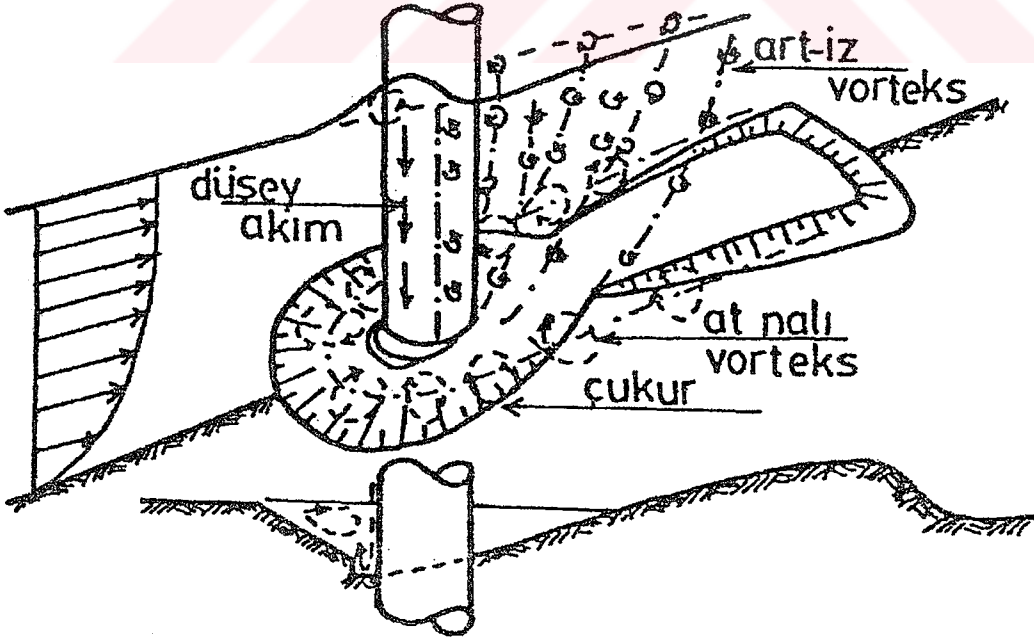
4.4 Engel Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler

Bir engel etrafında yer alan akımın en belirgin özelliği, büyük ölçekli çevrinti yapısı veya vorteks sistemlerdir.

Çevrinti sistemleri akım yapısının bütünleyici bir parçasıdır. Engelin yakınındaki hızın düşey bileşenine etki ederler. Rahatsız edilmiş iki boyutlu bir hız alanındaki akımı enlemesine kesen vorteks katmanları (çevrinti ve dönümlü akım) oluştururlar.

Engel etrafında oluşan bu vorteks sistemler, esas itibariyle üç ayrı biçimdedirler.

- 1) Sürüklenen vorteks sistem,
- 2) Atnalı vorteks sistem,
- 3) Art-iz vorteks sistem,



Şekil 4.3 Engel etrafında oluşan vorteks sistemler (Raudkivi, 1986)

4.4.1 Sürüklenen Vorteks Sistem

Bu vorteks sistemler, aynı köşede birleşen yüzeyler arasında sonlu basınç farkları olan durumlarda meydana gelmektedir. Engelin duraklama düzlemi ile kanal tabanının birleştiği yerde, kabarmadan dolayı oluşan yüksek basınç gradyanları bu vortekslerin oluşmasına neden olur. Genellikle, tamamen batık engellerde meydana gelir.

Taban akımının sınır tabakasından ayrılması ve durgunluk düzleminden aşağı doğru inen akımın sınır tabakasından ayrılması neticesinde oluşan çevri hareketleri bu vorteks sistemleri oluştururlar (Shen vd., 1969).

4.4.2 Atnalı Vorteks Sistem

Engelin membasında oluşan aşağı yönlü düşey hız bileşeninin tabana vardığında yansıdığını veya saptığını biliyoruz. Yön değiştiren bu hız bileşenlerinin bir bölümü sürüklenen vorteks sistemini oluştururken, diğer bir bölümü de tekrar yükselerek hareketlerine devam ederler. Bu olayların sonucu olarak engelin tabanı yakınında bir çevrinti hareketi oluşur. Bu çevri hareketine atnalı vorteks sistem adı verilir. Gerçekte, bu hareketin hızları ile genel hareketin hızları birleşerek bir helikoidal hareket oluştururlar.

Atnalı vorteks sistemin oluşması için, yeter büyüklükte bir basınç değişiminin olması gerekir. Bu ise, ancak küt burunlu engeller için söz konusudur. Bu taktirde, sınır tabakasından ayrılma meydana gelir.

Küt burunlu engel, rahatsız edilmemiş akımda aslında varolan vorteksleri, bir noktaya yığıcı olarak hizmet görür. Diğer bir deyişle, vorteksleri bir noktada toplayan ve büyüten bir aygıt görevini görür.

4.4.3 Art-iz Vorteks Sistem

Hızların daha büyük ve akım çizgilerinin eğrilik yarıçaplarının küçük olduğu hallerde, sekonder hareket artan hız yönünde yükselerek gider. Yüzeyden kaçmak için dönerek yükselmekte olan bu iki çevri, genel hareket tarafından sürekli olarak beslenirler. Bunun

sonucu olarak helikoidal yörüngeli bir hareket meydana gelir. Engelin mansabında bu iki çevriden biri, ötekinden daha önce oluşur. Fakat bu çevri, kendi parçacıklarıyla genel hareketin sürtünmesi sonucu frenlenir.



5. KIVRIMLI KANALLARDA YAN SAVAK AKIMI

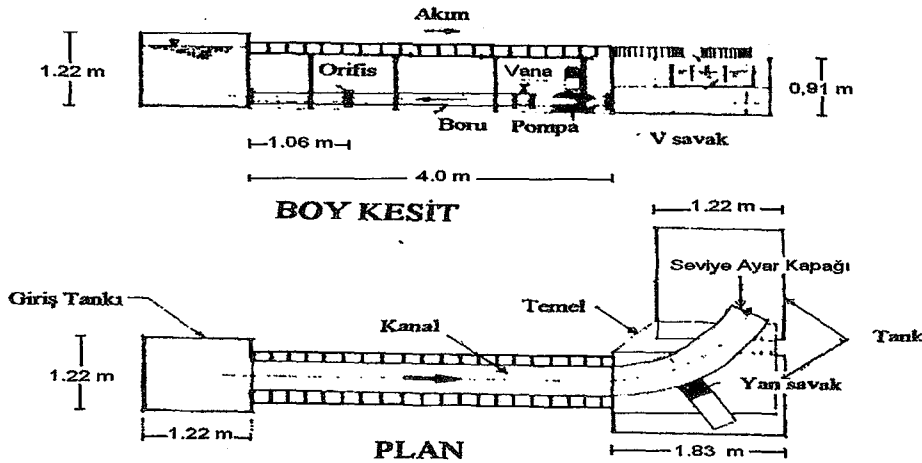
5.1 Giriş

Tabiattaki akarsular, eğimlerinin azaldığı mansap bölgelerinde genellikle kıvrımlar yaparak akarlar. Kıvrımlı kanallarda meydana gelen sekonder akım, dış kıyıda oyulmalara ve iç kıyıda da yığılmaya neden olur. Su alma yapısından katı madde girişine engel olmak için kıvrımlarda sular dış kıyıdan alınır. Dolayısıyla, kıvrımlı akıma sahip yapılarda kıvrım ve yanal akımların birlikte değerlendirilmesi gerekir.

Kıvrımlı kanallarda kıvrımdan dolayı meydana gelen sekonder akım, yan savak bölgesindeki yanal akım sebebiyle meydana gelen sekonder akımın daha da şiddetlenmesine sebep olmaktadır. Bu da, giriş yapısının önünde ana kanalda oldukça karmaşık bir akım yapısı oluşturur.

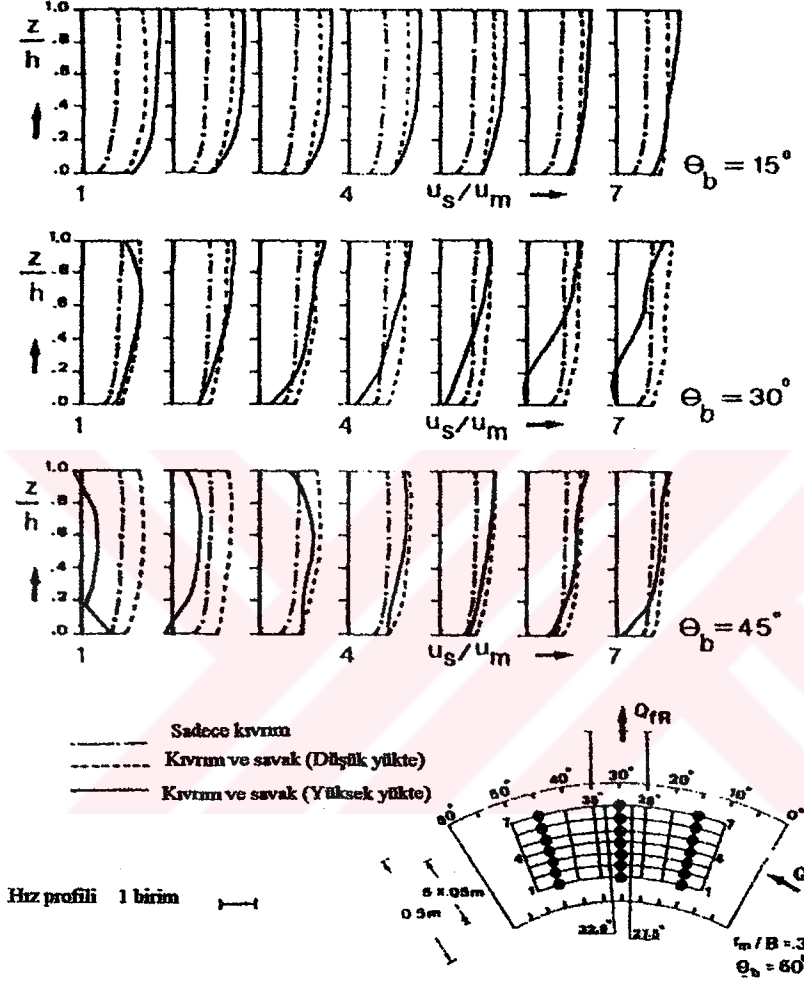
5.2 Konu ile İlgili Çalışmalar

Fares ve Herbertson (1993), dikdörtgen en kesitli 0,50 m genişliğindeki 60°'lik (25°-30° arasında) bir kıvrımlı kanalın dış kıyısına kalın kenarlı yan savak yerleştirerek, yanal akımın kıvrımdaki akım yapısına etkisini deneysel olarak araştırmışlardır (Şekil 5.1). Araştırmacılar derinlik boyunca teğetsel hızlarla ilgili şu sonuçları elde etmişlerdir.



Şekil 5.1 Dış kıyısında yan savağa sahip 60°'lik bir kanal kıvrımı (Fares ve Herbertson, 1993)

Düşük savaklanma oranlarında ($Q_r = Q_w/Q_1 < 0.26$, $h_r = h_w/h_1 < 0.36$) yan savak akımı memba kısmındaki teğetsel hız dağılımını etkilememiş ve yalnız kıvrım halindeki hız dağılımlarına yakın hız dağılımları elde edilmiştir (Şekil 5.2). Burada, Q_r =Savaklanma oranı (yan savaktan savaklanan debi /yan savak membasında ana kanal debisi), h_r =Rölatif yük (savak yükü/ana kanaldaki su derinliği) olarak verilmektedir.



Şekil 5.2 Dış kıyısındaki yan savak üzerinden yanal akıma sahip 60°'lik kanal kıvrımında derinlik boyunca hız dağılımları (Fares ve Herbertson, 1993)

Büyük savaklanma oranlarında ($Q_r > 0.40$, $h_r > 0.36$) ise, maksimum hız yörüngesi yan savak membasında iç kıydan dış kıyıya doğru (yan savağa doğru) yönelmiş ve yan savağın hemen membasında akım hızlanarak artan kinetik enerji ile enine eğimi azaltmıştır. Yan savak boyunca teğetsel (boyuna) hızlar, yanal akımdan etkilenerek ayrılma ve durgunluk bölgeleri meydana getirmiştir. Durgunluk bölgesi, Q_r savaklanma oranı ve yan savak mansabındaki su derinliğine bağlıdır. Durgunluk bölgesi yan savağın yarısını kaplamış, iç kıydaki hızları azaltarak akımı dış kıyıya yöneltmiştir. Kıvrımın dış kıyısında taban yakınlarında ters akım meydana gelmiş ve iç kıyıda gelişen durgunluk bölgesi düşey akım hızında derinlik boyunca

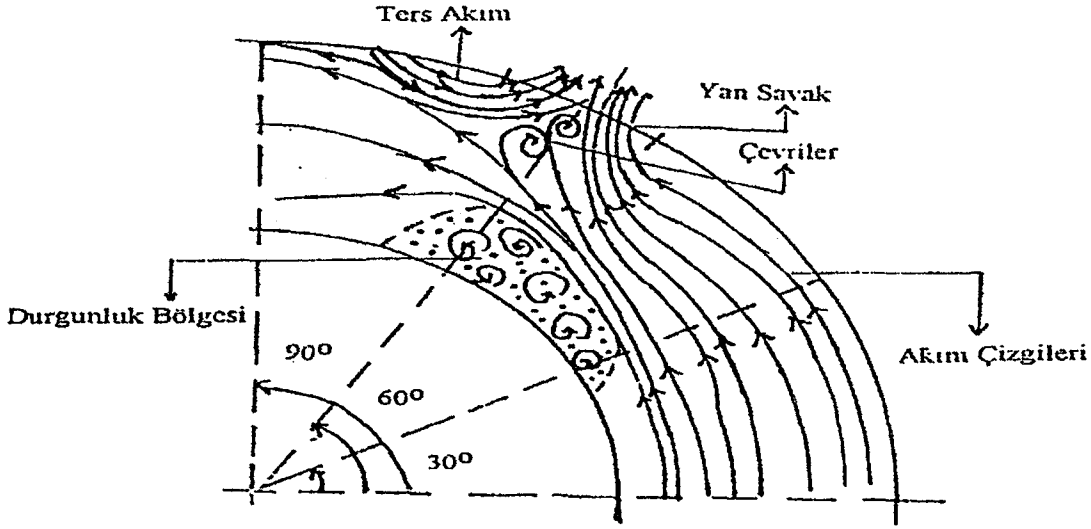
değişikliklere neden olmuştur. Bu da, akımın dış kıyıya doğru yönelmesine neden olarak, yüzeyde rölatif olarak daha büyük hızlar meydana getirmiştir.

Kıvrımlı kanallarda yan savak akımı ile ilgili çalışmalardan biri de Ağaçoğlu (1995) tarafından yapılmıştır. Araştırmacı, 180°'lik kıvrımlı bir kanal boyunca yan savak akımını incelemiş, farklı akım şartları için kanal ekseni ve kreti boyunca su yüzü profillerini, boyuna (teğetsel) hız dağılımlarını ve yan savak debi katsayılarını belirlemiştir.

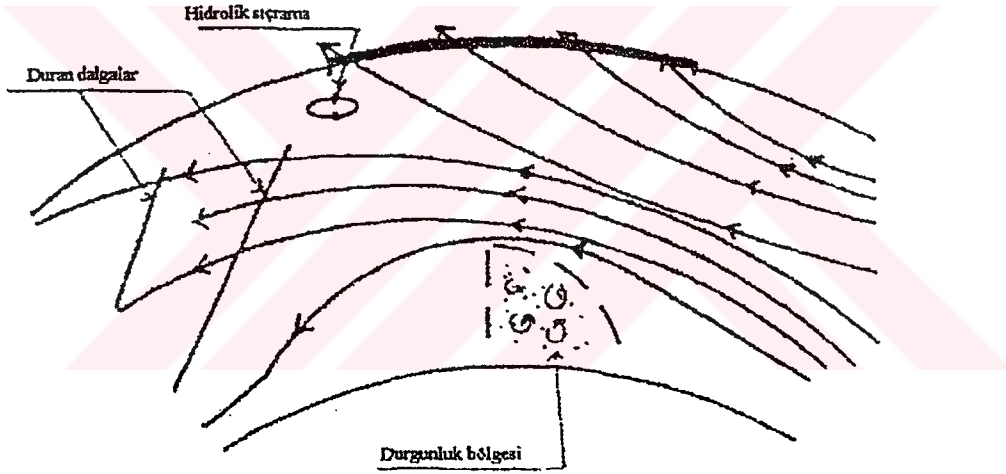
Çalışmada 0.12 m, 0.16 m ve 0.20 m eşik yüksekliklerine sahip 0.25 m, 0.50 m ve 0.75 m uzunluklu dikdörtgen en kesitli yan savaklar kullanmıştır. Deneyler 7.95-68.8 lt/s'lik debi aralıklarında ve Froude sayısının $Fr=0.1-0.8$ aralığında nehir rejimli akım şartlarında yapılmıştır.

Ağaçoğlu (1995), ana kanal ekseni boyunca su yüzü profillerinin fazla değişiklik göstermediğini, su yüzünün yataya yakın olduğunu ifade etmiştir. Kıvrım girişine yerleştirdiği savak bölgesinde ($\theta=0^\circ$) ise, yan savak kreti boyunca su yüzü profilinin yan savak membasından biraz önce azalmaya başladığını ve savak başlangıcından sonra minimuma ulaştığını gözlemlemiştir. Yan savak üzerindeki nap kalınlığının ve Froude sayısının değişmesiyle minimum noktanın yerinin ileri geri yer değiştirdiğini, ayrıca savak yükü arttıkça ve Froude sayısı azaldıkça daha belirgin hale geldiğini gözlemlemiştir. Araştırmacıya göre, minimum noktadan sonra su yüzü profili yan savak ortasına kadar hızla yükselmekte ve savak sonuna doğru artış oranı azalarak devam etmektedir. Bu profil küçük savak uzunluklarında daha belirgin olmakta, büyük savak uzunluklarında ise savağın yarısından sonra yataya yakın gitmektedir.

Araştırmacı, savak kesitinde ana kanalın iç kısmında bir durgunluk bölgesi gözlemlemiş ve bunun nedenini yan savağın ilk yarısının sonunda ayrılma bölgesi, ikinci yarısında ise ters akımın meydana gelmesiyle izah etmiştir. Ayrıca ana kanaldaki akımın Froude sayısı arttıkça ters akımın küçüldüğünü, yan savak mansabına ilerleyerek kaybolduğunu ve bu noktadan itibaren yan savak ucunda hidrolik sıçramanın meydana geldiğini gözlemlemiştir.



Şekil 5.3 $Fr_1 < 0.3$ için yan savak boyunca akım çizgilerinin değişimi (Ağaçcıoğlu, 1995)



Şekil 5.4 $Fr_1 > 0.3$ için yan savak boyunca akım çizgilerinin değişimi (Ağaçcıoğlu ve Yüksel, 1998)

Kıvrımlı kanalda ise $\theta=60^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde savak ekseninde su yüzü profilindeki minimum noktanın daha belirgin olduğu ve bunun kıvrım etkisinden kaynaklandığını belirtmiştir. Doğrusal kanalda gözlenenlerin kıvrımlı kanalda da meydana geldiğini, fakat kıvrımlı kısımda etkilerin daha belirgin olduğunu ifade etmiştir (Şekil 5.3). Ana kanaldaki akımın Froude sayısı 0.4 civarında iken ters akımın küçüldüğünü ve yan savak mansabına doğru giderek kaybolduğunu, Froude sayısı 0.7 civarında ise doğrusal yaklaşım kanalındaki gibi hidrolik sıçramanın meydana geldiğini belirtmiştir (Şekil 5.4). Froude sayısının daha büyük değerinde ise ($Fr_1=0.8$) hidrolik sıçramanın daha da mansaba kayarak duran dalgaların oluştuğunu gözlemlemiştir. Bunun nedeni de, maksimum hız yörüngesinin 60° 'de dış kıyıya

yerleşmesinden dolayı yan savak civarındaki Froude sayısının ana kanaldaki ortalama Froude sayısından daha büyük olması olarak açıklanmıştır. Araştırmacı diğer savak bölgelerinde benzer su yüzü profilleri gözlemlemiştir.

Ağaçcioğlu (1995), su yüzü profilinin dışında teğetsel hız dağılımlarının değişimini de inceleyerek maksimum hız yörüngesinin doğrusal yaklaşım kanalında ana kanal ekseninde, kıvrım girişinden itibaren $\theta=120^\circ$ 'ye kadar dış kıyıda kaldığı, $\theta=120^\circ$ den sonra ise tekrar kanal eksenine döndüğünü belirtmiştir. Ayrıca ana kanalda aynı en kesitte iç kıyı ve kanal ekseninde olmak üç ayrı düşey kesit boyunca, savaklanma olması ve yan savaklar kapalı iken teğetsel hızları ölçmüştür.

Araştırmacı, aktif savaklanma durumunda savak membasındaki akım hızlarının değişmediğini akımın savak başlangıcından önce hızlanmaya başladığını, maksimum hız yörüngesinin $\theta=30^\circ$ 'de kanal eksenine yönelerek yan savak mansap ucunda yanal akımdan dolayı dış kıyıda teğetsel hızların düştüğü ve üst bölgede daha hızlı bir akımın meydana gelmesine neden olduğunu ifade etmiştir. İç kıyıda ise üst bölgelerde akımın tamamen durduğu ve bu etkinin kanal eksenine kadar yayıldığı gözlemlenmiştir. $\theta=60^\circ$ 'de ise maksimum teğetsel hızları savak kesitinde dış kıyıda tespit etmiştir. Bunlara bağlı olarak araştırmacı maksimum hız yörüngesinin $\theta=30^\circ$ 'den sonra 45° 'de dış kıyıya yerleştiğini ve maksimum hız yörüngesini doğrultusunun, bu bölgedeki yanal akım doğrultusuna yakın olduğunu ifade etmiştir.

Araştırmacı, diğer yan savak bölgelerinde ($\theta=90^\circ$, $\theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$) ise savaklar kapalı iken ölçtüğü teğetsel hızlara yakın değerler elde etmiştir. Ayrıca yan savak üzerindeki su yüzü profilleri ve teğetsel hız dağılımlarına sekonder akımın etkisinin oldukça fazla olduğunu ifade etmiştir.

Ağaçcioğlu (1995), yan savak debi katsayısına etkili boyutsuz parametreleri boyut analizi sonucunda;

$$C_d = f(F_r, p/h_1, L/b, \theta) \quad (5.1)$$

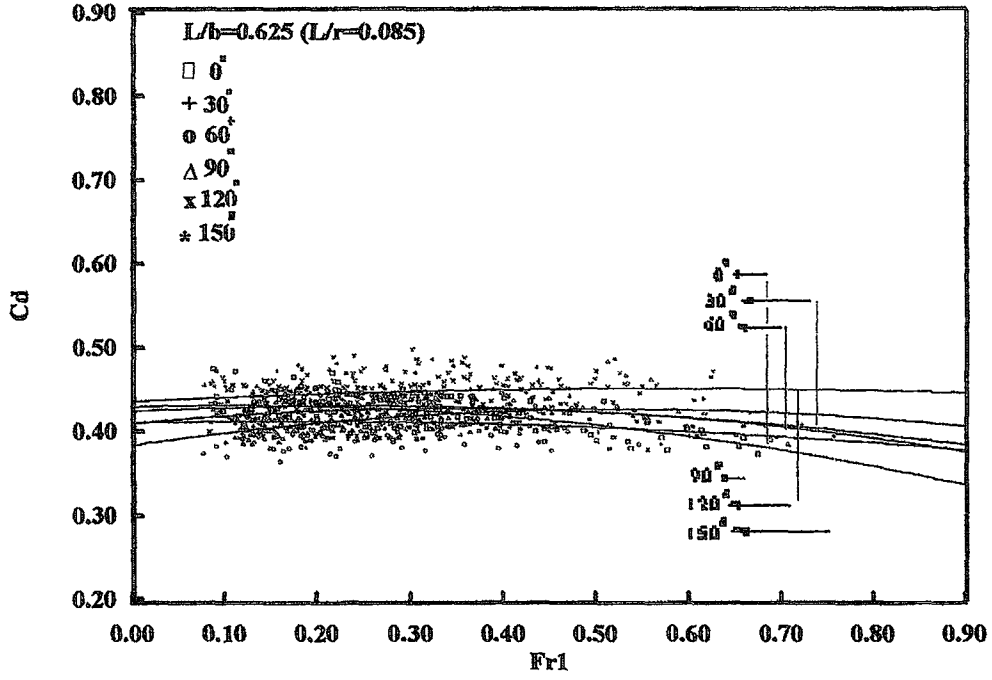
olarak belirlemiştir.

Araştırmacı, nehir rejimli akım halinde dikdörtgen en kesitli kıvrımlı bir kanaldaki C_d yan savak debi katsayısını, boyut analizi ile belirlenen parametrelerin ışığı altında detaylı olarak incelemiştir. İlk önce kıvrım girişine ($\theta=0^\circ$) yerleştirilen ve farklı L/b değerlerine sahip yan

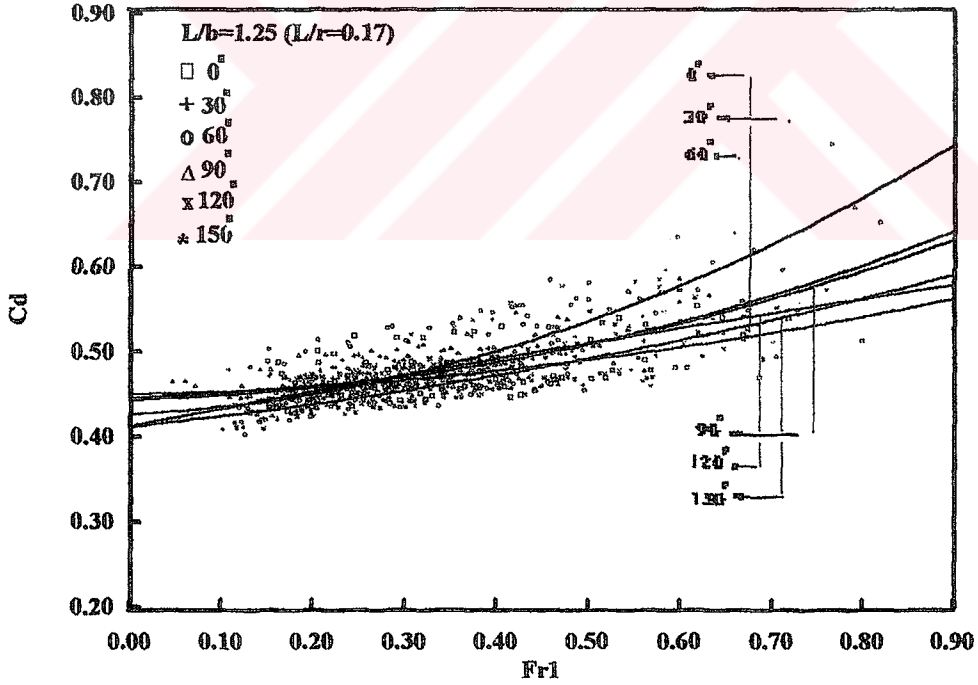
savaklarda C_d yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimini incelemiş ve doğrusal kanallardaki yan savaklarda Subramanya ve Awasthy (1972) tarafından verilen eşitlikle (1.19 denklemi) karşılaştırmıştır. Bunun sonucunda, kıvrımdan kaynaklanan sekonder akımın çok az hissedildiği kıvrım girişindeki ($\theta=0^\circ$) C_d yan savak debi katsayıları, küçük Froude sayılarında farklı L/b değerlerinde birbirine oldukça yakın olmasına rağmen büyük Froude sayılarında ($Fr>0.3-0.4$) ve büyük L/b değerlerinde daha büyük değerler aldığını tespit etmiştir. Bu etkinin, yan savak uzunluğu arttıkça yanal akım tarafından yaratılan sekonder akımın şiddetlenmesinden kaynaklandığını ve Subramanya ve Awasthy tarafından verilen eşitliğinin $L/b>1$ için kesinlikle uygulanamayacağını tespit etmiştir.

Aynı savak bölgesi ve aynı savak uzunluğu için p/h_1 boyutsuz parametresinin Froude sayısına bağlı olarak C_d yan savak debi katsayısına fazla etki etmediğini, büyük p/h_1 değerlerinde (küçük nap kalınlıklarında) biraz daha büyük C_d değerleri elde etmiştir. Küçük Froude sayılarında, L/b boyutsuz parametresinin C_d yan savak debi katsayısına kıvrım boyunca etkisi fazla olmamasına rağmen, $Fr>0.3-0.4$ değerleri için büyük L/b değerlerinde, C_d yan savak debi katsayılarının hızla arttığını tespit etmiştir.

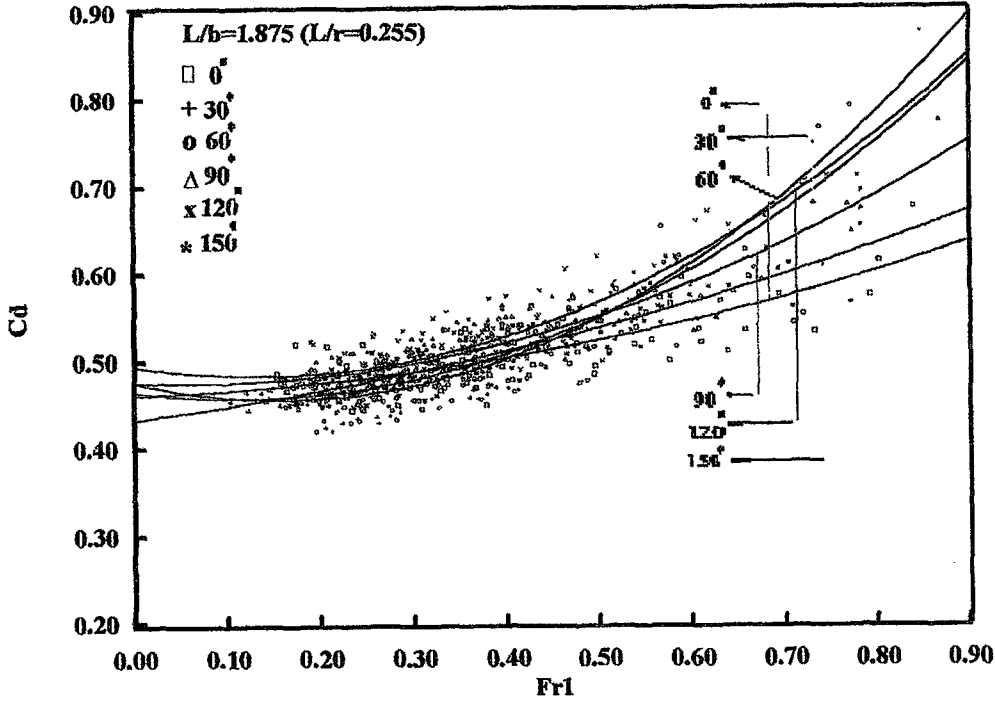
Çalışmada herhangi bir yan savak boyutu için C_d yan savak debi katsayısının kıvrım boyunca değişimi de incelenmiştir. $L/b=0.625$ için C_d yan savak debi katsayısının değişiminin küçük Froude sayılarında çok küçük olduğunu ve kıvrım etkisinin az olduğunu ifade etmiştir (Şekil 5.5). $L/b=1.25$ için küçük Froude sayılarında fazla değişim olmadığını, $Fr_1>0.3$ 'ten büyük değerlerde sapmalar gösterdiğini ve en büyük değerin $\theta=60^\circ$ 'de elde edildiğini tespit etmiştir (Şekil 5.6). Bunun, maksimum hız yörüngesinin $\theta=45^\circ$ 'den sonra dış kıyıya yönelmesi ve yerleşmeye başlamasıyla yanal akımı artırıcı etki yapmasından kaynaklandığını belirtmiştir. $L/b=1.875$ için ise C_d yan savak debi katsayısının büyük Froude sayılarında büyük değerler aldığını ve $Fr_1>0.4-0.5$ 'den büyük değerlerde büyük sapmalar gösterdiğini belirtmiştir (Şekil 5.7). Kıvrımlı bir kanal boyunca nehir rejimli akım şartlarında, C_d yan savak debi katsayısının 2. dereceden parabolik karakter taşıdığını belirtmiştir.



Şekil 5.5 $L/b=0.625$ için yan savak debi katsayılarının Froude sayısı ile kıvrım boyunca değişimi (Ağaçcioğlu, 1995)



Şekil 5.6 $L/b=1.25$ için yan savak debi katsayılarının Froude sayısı ile kıvrım boyunca değişimi (Ağaçcioğlu, 1995)



Şekil 5.7 $L/b=1.875$ için yan savak debi katsayılarının Froude sayısı ile kıvrım boyunca değişimi (Ağaçcioğlu, 1995)

Coşar (1999); Coşar ve Ağaçcioğlu (2004), 180° 'lik kıvrımlı bir kanalda $p=0.12$ m, $p=0.16$ m ve $p=0.20$ m eşik yükseklikli, $\alpha=60^\circ$, $\alpha=90^\circ$ ve $\alpha=120^\circ$ 'lik tepe açlarına sahip üçgen yan savaklarda, nehir rejimli akım şartlarında yan savak akımını incelemişlerdir.

Araştırmacılar, dikdörtgen en kesitli kıvrımlı bir kanalda C_d yan savak debi katsayısına etki eden parametreleri boyut analiziyle belirlemiş ve üçgen yan savak debi katsayısının

$$C_d = f(Fr_1, b/h_1, \theta, \psi, \alpha) \quad (5.2)$$

boyutsuzlarına bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

İlk önce doğrusal kanal bölgesine yerleştirilen farklı eşik yüksekliklerine ve tepe açlarına sahip üçgen yan savaklarda C_d yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimini inceleyerek, doğrusal kanaldaki üçgen yan savaklar için Kumar ve Pathak (1987) tarafından verilen bağıntılarla (1.32 denklemi) karşılaştırmışlardır. Kumar ve Pathak (1987) tarafından verilen bağıntılardan elde edilen debi katsayılarının kendi çalışması sonucunda elde ettiği değerlerle aynı eğilimde olduğunu fakat farklı değerler aldığını ve bu farklılığın araştırmacıların olaya etkili parametreler olan L/b ve p/h_1 boyutsuzlarını ihmal etmelerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Araştırmacılar, her bir yan savak için C_d yan savak debi katsayısının kıvrım boyunca Froude sayısı ile değişimini incelemiş ve en büyük debi katsayılarını kıvrımın 30° 'lik kısmında elde etmişlerdir. $\theta=60^\circ$ ve $\theta=90^\circ$ 'lik kıvrım bölgelerinde ise C_d yan savak debi katsayılarının azalarak gittiğini ve en düşük değerlerin kıvrım girişinde ($\theta=0^\circ$) meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, kıvrım boyunca C_d yan savak debi katsayısının $\alpha=60^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$ 'lik tepe açılara sahip yan savaklarda Froude sayısının azalmasıyla azaldığını, buna karşılık $\alpha=120^\circ$ 'lik yan savaklarda ise arttığını belirtmişlerdir. Doğrusal kanalda ve kıvrım boyunca C_d yan savak debi katsayısının Froude sayısı ile değişimini incelemiş, yan savak tepe açısının artmasıyla C_d yan savak debi katsayısının da arttığını tespit etmişlerdir. $\alpha=60^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$ 'lik yan savaklar arasında artışın fazla olmadığını fakat $\alpha=120^\circ$ 'lik yan savakta diğer yan savaklara göre %30'luk bir artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Aksu (2001), hareketli tabana sahip bir kanalda, yanal akımın taban profiline etkisini deneysel olarak incelemiştir.

Çalışmada, yan savak membasında ana kanaldaki akımın hızının kritik hıza ulaşmasından itibaren taban malzemesinin harekete başlayarak yan savağa doğru ilerlediği gözlenmiştir. Yan savak mansabındaki hızlar, taban malzemesini hareket ettirebilecek " V_{kr} " hızından daha küçük olduğu takdirde yan savak membasından taşınan malzeme daha fazla ilerleyememekte ve yan savak önünde yığılmaktadır. Bu yığılma noktası ters akım alanının olduğu en kesittir. Akımın hızı dolayısıyla Froude sayısı arttıkça ters akım alanı da mansaba doğru hareket ederek, yığılma kesitini yan savak mansabına doğru taşımaktadır.

Memba ve mansaptaki akım hızları V_{kr} hızından büyük olursa gelen taban dalgası yüksekliği azalarak mansapta ilerlemeye devam etmektedir. Yaklaşık olarak aynı akım şartlarında, doğrusal kanalda savak önünde oluşan eşik yüksekliği kıvrımdakine nazaran daha yüksek olmaktadır. Aynı akım şartlarında oluşan taban profillerinde, yan savak önündeki yığılma kıvrımda, doğrusal kanaldakinden biraz daha mansap tarafında oluşmaktadır.

Fares (1995, 2000), eğrisel bir kanalda yanal savaklanma durumunda sınır kayma gerilmesinin karakteristik değişimini incelemiştir. Ayrıca kıvrımlı Allan Water nehrinin yan savak (cutoff) kesitinde taban topoğrafyasındaki değişimleri incelemiş ve buna uygun idealleştirilmiş rijit tabanlı bir model geliştirerek sınır kayma gerilmesiyle ilgili detaylı çalışmalar yapmıştır. Bu model çalışmasında hem matematiksel hem de deneysel yaklaşımlar kullanmıştır. Sonuçlardan elde edilen analizler; kayma gerilmesindeki sürekli azalmanın

kıvrımın yan savak bölgesinde olduğunu göstermiştir. Düşük savaklanma olması halinde kayma gerilmesindeki maksimum azalmanın %37, yüksek savaklanma halinde ise %82 olduğunu tespit etmiştir. Bu azalmanın, yan savak bölgesindeki kuvvetli yanal akımdan kaynaklanan ayrılma bölgesi ve durgunluk bölgesinin gelişimine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Araştırmacı çalışmalarını Allan Water'daki yan savak bölgesinde gerçekleştirmiştir (Şekil 5.8). Nehirde, taban profilleri üç farklı en kesitte ölçülmüştür (Şekil 5.9). Bunlar; memba (A-A kesiti), orta (B-B kesiti) ve mansap (C-C kesiti) kesitleridir. Bu profiller 1987-1990 yılları arasında elde edilmiştir. Allan Water'da yapılan saha gözlemlerinde, yanal savaklanmadan dolayı taban topoğrafyasında belirgin değişimler belirlenmiş ve aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Yan savağın (cutoff) mansabında kanal genişliğinin % 40'ı kadar bir mesafede boyunca bir bar oluşmaktadır,
- Mansap kesitinde tam yan savağın önünde bir oyulma çukuru oluşmaktadır,
- Talveg çizgisi kıvrımın iç tarafına doğru kaymaktadır.

Araştırmacı taban topoğrafyasındaki değişimlerin sebeplerini şu şekilde izah etmiştir; Bar ile iç kıyı arasında daha küçük bir sekonder akım oluşmaktadır. Şekil 5.9'daki C-C kesitinde birbirine ters yönde oluşan iki farklı sekonder akım kanaldaki katı maddelerin yığılmasına ve boyuna barın oluşumuna sebep olmaktadır. Yan savağın mansap kısmında oluşan oyulma çukuru, dış kıyıda aşağı yönlü oluşan kuvvetli akımlardan kaynaklanmakta ve dış kıyıdaki sekonder hareket taban malzemesinin oyulmasına ve yan savağın önünde yığılmasına neden olur. İç kıyıdaki ikinci sekonder akım talveg çizgisinin değişimine neden olur. McKeogh ve Kiely (1989) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Fares (1995), rijit tabanlı modelde yaptığı nümerik ve deneysel çalışmalarda aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır;

Yan savak bölgesinde tahmin edilen ve ölçülen kayma gerilme değerleri arasındaki farklılık en fazla %7 sapma göstermiştir.

Yapılan bütün deneylerde kanal kıvrımının dış kıyısında yanıl savaklanma sınır kayma gerilmesinde bir azalmaya neden olmakta ve kayma gerilmesindeki maksimum azalma her zaman kıvrımın dış kıyısında ($r/r_e=1.1$) olmaktadır.

Düşük savaklanma oranlarında ($Q_r \leq 0.4$ ve $h_r \leq 0.36$) yan savağın mansabında yanıl akımın kayma gerilmesi profiline etkisinin az olduğu, yan savak boyunca kayma gerilmesinde kademeli bir azalmanın olduğu ve kıvrımın iç kıyısında ($r/r_e=0.9$) daha büyük kayma gerilmelerinin oluştüğünü belirtmiştir. Bu bölgedeki kayma gerilmesindeki maksimum azalmanın %32 (ölçülen) ve %37 (tahmini) olduğunu saptamıştır. Kıvrımın mansabındaki savaklanma durumu için kıvrımın iç kıyısı boyunca kayma gerilmesi ($r/r_e=0.9$) düzenli olarak azalmakta, kanal eksenini ($r/r_e=1.0$) ve dış kıyı ($r/r_e=1.1$) bölgelerinde hemen hemen sabit kalmıştır.

Büyük savaklanma oranlarında ($Q_r > 0.4$ ve $h_r > 0.36$), yanıl akımın kayma gerilme alanı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Yan savak bölgesi boyunca kuvvetli dış akımlar, durgunluk bölgesi (iç kıyıda) ve ayrılma bölgesi (yanıl savaklanmanın mansab köşesi) kayma gerilmesinde önemli bir azalmaya neden olmuştur. Kayma gerilmesinde gözlenen azalma dış kıyıda %82 ($r/r_e=1.1$) ve iç kıyıda %67 ($r/r_e=0.9$) olarak saptanmıştır. Yan savak bölgesinin önündeki durgunluk noktasının devam etmesinin sonucu olarak kayma gerilmesi iç kıyıda önemli bir ölçüde azalırken dış kıyı boyunca artmıştır.

6. DENEY KANALI VE DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Giriş

Hidrolik mühendisliği ile ilgili problemler; teori, ampirik ve yarı ampirik metotlar, matematik ve fiziksel modeller yardımıyla çözümlenmektedir (Yüksel, 2000).

Sırf teorik yaklaşım, laminar akımın birkaç hali dışında kullanılamamaktadır. Ampirik metotlar ise fiziksel sistemde gözlenen etkili değişkenler arasındaki korelasyona dayandırılmakta ve ancak benzer verilerin olması halinde kullanılabilir. Yarı ampirik metotlar ise uygun şekilde tasarlanmış deneylerle elde edilen teorik kavramlar esas alınarak bulunan matematiksel formüllerdir.

Matematik modelleme ise son yıllarda yüksek hızlı bilgisayarların ortaya çıkmasıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Matematik modelde, önce sistemin fiziği ortaya konularak matematik denklemlerle tanımlanmakta, daha sonra denklemler sayısal yöntemlerle çözümlenmektedir.

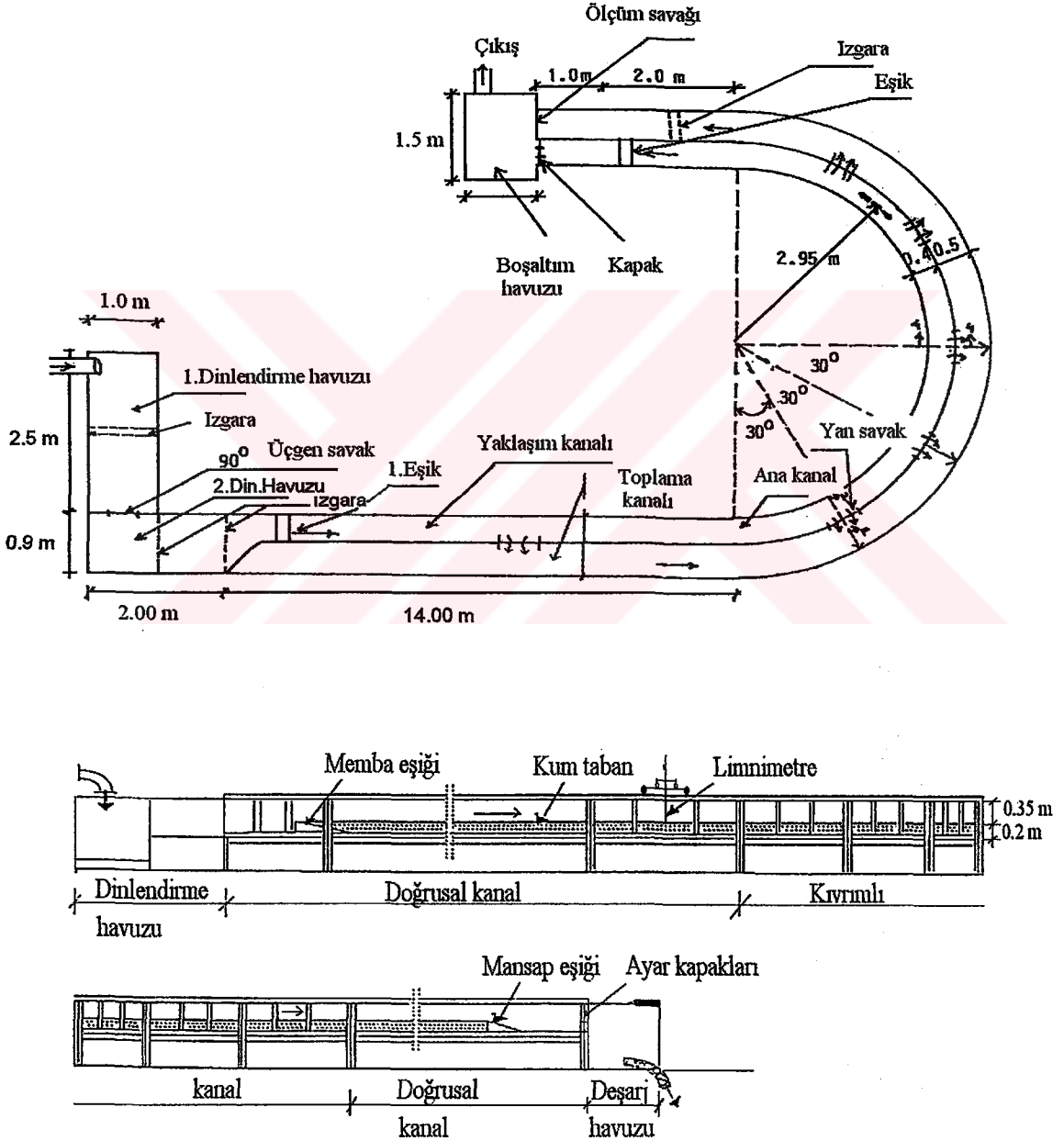
Fiziksel model ise, matematik modelle problemlerin tam olarak ifade edilememesi halinde, çözüme ulaşmak için yapılan kabullerin ve hesaba katılmayan diğer faktörlerin etkisini belirlemek için laboratuarda yapılan deneysel çalışmaları kapsar. Böylece, teorik sonuçların model çalışmalarıyla karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, incelenecek problemle ilgili boyut analizi yapılarak olaya etkili boyutsuz parametreler belirlenmiş ve 180°'lik kıvrıma sahip kum tabanlı dikdörtgen bir kanalda temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması için meydana gelen denge oyulma derinlikleri fiziksel model kurularak deneysel olarak incelenmiştir.

Bu bölümde, deney sistemi ve özellikleri, ölçüm teknikleri ve deneysel çalışmanın özelliklerinden bahsedilmiş, deneysel çalışmada göz önüne alınan olaya etkili boyutsuz parametreler boyut analizi yardımıyla ortaya konmuştur.

6.2 Deney Kanalı

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı Hidrolik ve Kıyı Liman Laboratuvarında mevcut dikdörtgen en kesitli 180°'lik kıvrımlı kanalda gerçekleştirilmiştir. Mevcut kanal toplam 0,90 m genişliğinde ve 0,60 m yüksekliğinde alüminyum tabanlıdır. Deney kanalının planı ve boyuna kesiti Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Deney kanalının planı ve boyuna kesiti

Mevcut kanal, ana kanal genişliği net 0,40 m ve toplama (sağanak) kanalı genişliği 0.5 m olacak şekilde birbirine paralel iki kanaldan oluşmaktadır.

İhtiyaç duyulan su bodrum katta bulunan büyük depodan pompa vasıtasıyla zemin kattaki ana depoya basılmış; ana depodaki fazla su ise dolu savaktan savaklanarak bir by-pass borusundan tekrar büyük depoya döndürülmüştür. Bu sirkülasyon sırasında ana depodaki su yüksekliği sabit tutulmuş ve buradan üzerinde bir vana bulunan boru vasıtasıyla istenilen miktarda sabit debi deney kanalını besleyen dinlendirme havuzuna alınmıştır.

Kanalın başındaki dinlendirme havuzu 2,5x1,0 m boyutlarında ve 0,7 m yüksekliğinde olup ana depodan gelen suyu deney kanalına iletmektedir. Suyu sakinleştirmek için havuzun içine delikli tuğla ve ızgara yerleştirilmiştir. Havuzun sonunda ise üst genişliği 0,7 m olan bir üçgen ölçüm savağı mevcuttur. Savağın tepe noktasının havuz tabanından yüksekliği 0,24 m olup, bu üçgen savak ana kanala verilen debinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Üçgen savak üzerindeki savak yükünün ölçümü için savak kesitinden 0,35 m geride sabit bir limnimetre yerleştirilmiştir.

Üçgen savaktan savaklanarak kanala akan su 2,0x0,90 m boyutlarında ikinci bir dinlendirme havuzunda sakinleştirilmiştir. Bu havuzun ortasına ve mansabına birer delikli perde konulmuştur.

Deney kanalı birbirine seri olarak bağlanmış yedi bölümden meydana gelmiştir. Bunlar sırasıyla;

1) Yaklaşım Kanalı:

Yaklaşım kanalı 14.0 m uzunluğunda 0,40x0,40 m² en kesite sahip doğrusal ana kanaldan oluşmaktadır. Yaklaşım kanalına giren su, daralma kesitinden doğrusal kanal bölgesindeki ilk yan savak istasyonunun başlangıcına kadar 7,02 m'lik uzunluğa sahiptir.

2) Kıvrımlı Kanal:

Kıvrımlı kanal $r=2,95$ m eksen yarıçaplı ve 9,27 m radyal eksen uzunluğuna sahip 180° lik bir kanaldır.

3) Doğrusal Çıkış Kanalı:

3) Doğrusal Çıkış Kanalı:

3,00 m uzunluklu ikinci doğrusal çıkış kanalının sonunda 0,40.0,20 m boyutlarında 2 parçalı radyal seviye ayar kapağı bulunmaktadır. Radyal kapaklarla ana kanaldaki su derinlikleri ayarlanmıştır.

4) Yan Savak Ayırma Duvarı:

Ana kanal dış kıyısı taban ve üstten 3,0.2,0 cm'lik kutu profillerle tutturulan 3,0 mm'lik sabit ve değişebilir saç levhalardan yapılmıştır. Alttaki kutu profiller alüminyum tabana sabitlenmiştir.

5) Toplama (Sağanak) Kanalı:

Yan savaktan savaklanan su 0,50 m genişlikli toplama (sağanak) kanalı ile uzaklaştırılmıştır. Toplama kanalı ana kanala paralel olarak düzenlenmiştir. Toplama kanalı sonuna yerleştirilen 0,5 m genişlikli 0,05 m eşik yüksekliğine sahip 90° tepe açılı üçgen savakla, yan savaktan savaklanan debi belirlenmiştir. Bunun için savaktan 0,35 m membada yerleştiren limnimetreden ($\pm 0,1$ mm hassasiyetli) yararlanılmıştır. Ayrıca, kıvrımdan sonra doğrusal çıkış kanalı başına iki sıra delikli tuğla yerleştirilerek akımın savağa çalkantısız ulaşması sağlanmaya çalışılmıştır.

6) Boşaltım Havuzu:

Ana kanal ve toplama kanalından gelen akım boşaltım havuzuna dökülerek, buradan büyük depoya düşey bir boru vasıtasıyla geri verilmiştir.

7) Hareketli Seviye Ölçüm Arabası:

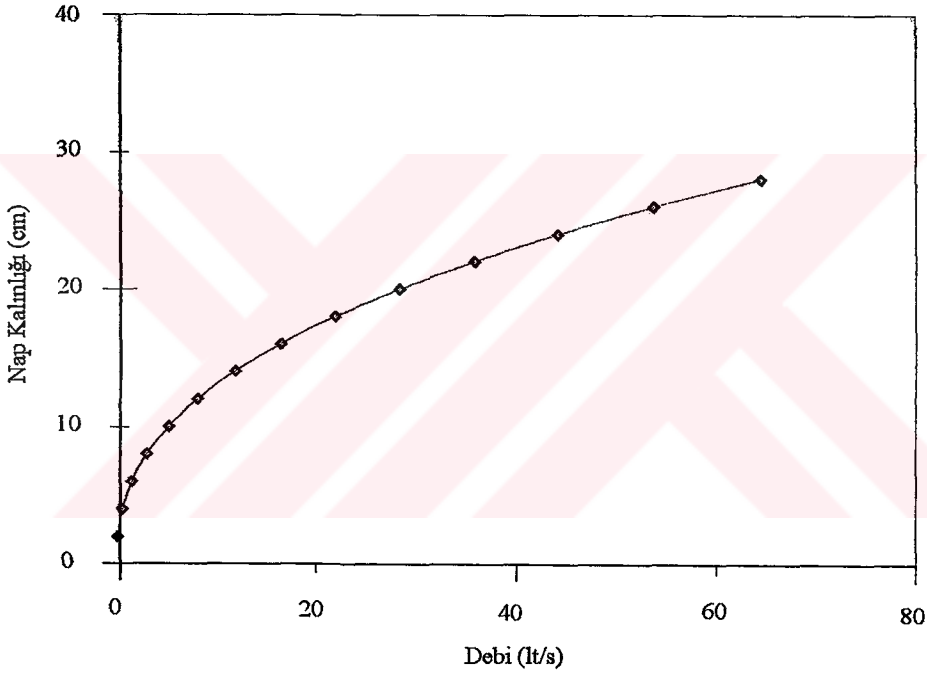
Ana kanal ve yan savak üzerinde yapılan su ve taban seviyesi ölçümleri için raylar üzerinde hareket eden arabaya yerleştirilmiş bir limnimetreden ($\pm 0,1$ mm hassasiyetli) yararlanılmıştır. Araba, iç ve dış eğrilik yarıçaplarını kıvrımlı kanala uydurulacak şekilde özel olarak dizayn edilmiştir.

6.3 Giriş Üçgen Savak Anahtar Eğrisi

Ana kanala verilen akımın debisinin tayini için, farklı hacimlere sahip kaplar ve kronometre yardımıyla giriş üçgen savağın anahtar eğrisi belirlenmiştir. Üçgen savak için elde edilen anahtar eğrisi Şekil 6.2’de verilmiş ve bunun analitik ifadesi ;

$$Q = \left[\frac{h}{5,108} \right]^{2,4469} \text{ (lt/sn)} \quad (6.1)$$

şeklinde elde edilmiştir. Burada, h cm olarak üçgen savak üzerindeki savak yüküdür.



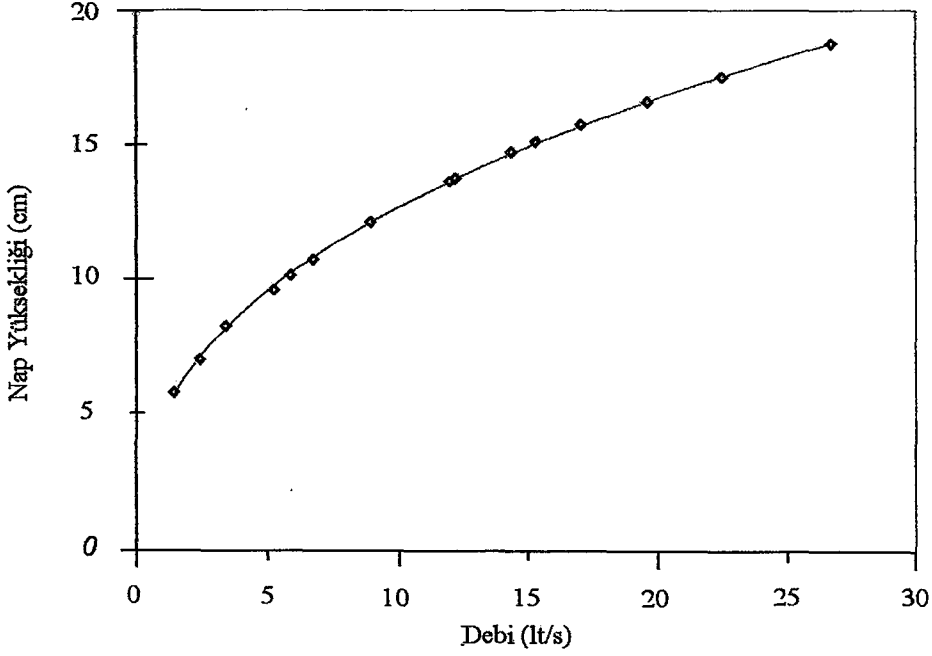
Şekil 6.2 Üçgen savak anahtar eğrisi

6.4 Çıkış Üçgen Savak Anahtar Eğrisi

Çıkış üçgen savağı anahtar eğrisi, ana kanaldaki akımın tamamı toplama kanalına yönlendirilerek elde edilmiştir. Çeşitli ana kanal debilerinde üçgen çıkış savağı üzerindeki nap kalınlıkları ölçülerek elde edilen anahtar eğrisi Şekil 6.3’de verilmiş ve yan savaktan savaklanan debi için,

$$Q_w = 0,0134 \times h^{2,5896} \text{ (lt/sn)} \quad (6.2)$$

ifadesi elde edilmiştir. Burada, h cm olarak üçgen savak üzerindeki savak yüküdür.



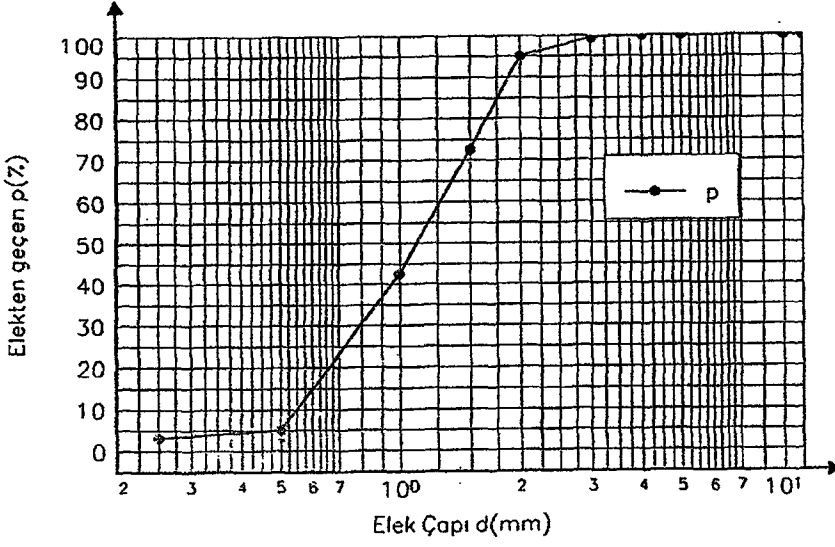
Şekil 6.3 Çıkış üçgen savak anahtar eğrisi

6.5 Deneyde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri

Deneyisel çalışmada, taban malzemesi olarak kuvars kumu kullanılmıştır. Bu malzemenin özgül ağırlığı ve granülometrisi deneyler öncesinde Y.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kuvars kumunun özgül ağırlığı, deneylerden $\gamma_s=2,650 \text{ kg}^*/\text{m}^3$ ve $\sigma_g=1.74$ olarak elde edilmiştir.

Malzeme laboratuvarında yapılan elek analizinden bu malzemenin granülometri eğrisi elde edilerek Şekil 6.4'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan kuvars kumunun özellikleri, Şekil 6.4'den $d_{50}=1.15 \text{ mm}$, $d_{60}=1.28 \text{ mm}$ ve $d_{90}=1.86 \text{ mm}$ 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.



Şekil 6.4 Taban malzemesinin granülometri eğrisi

6.6 Taban Malzemesi Kritik Hızlarının Tayini

Taban malzemesini harekete geçirecek kritik akım hızları V_{kr} , logaritmik formdaki 6.3 ifadesinden hesaplanmıştır (Melville ve Chiew, 1999).

$$\frac{V_{kr}}{u_{*kr}} = 5.75 \log \left(5.53 \frac{h}{d_{50}} \right) \quad (6.3)$$

Burada; u_{*kr} , kritik kayma hızı (m/s), h , su derinliği (m) ve d_{50} , malzemenin yüzde ellisini geçiren elek çapıdır (medyan çap, mm). Kayma hızları, Shields Diyagramı kullanılarak bulunmuştur. 20 °C'de kuvars kumu için Shields diyagramı kullanılarak aşağıdaki ifade yazılabilir (Melville ve Chiew, 1999):

$$u_{*kr} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1}, 1mm < d_{50} < 100mm \quad (6.4)$$

$d_{50} = 1,15$ mm için (6.3) ve (6.4) bağıntıları birlikte kullanılarak, akımın çeşitli derinlikleri için taban malzemesini hareket ettirebilecek kritik hızlar için 6.5 bağıntısı bulunmuştur.

$$V_{kr} = 0.1556 \log(4809h) \quad (6.5)$$

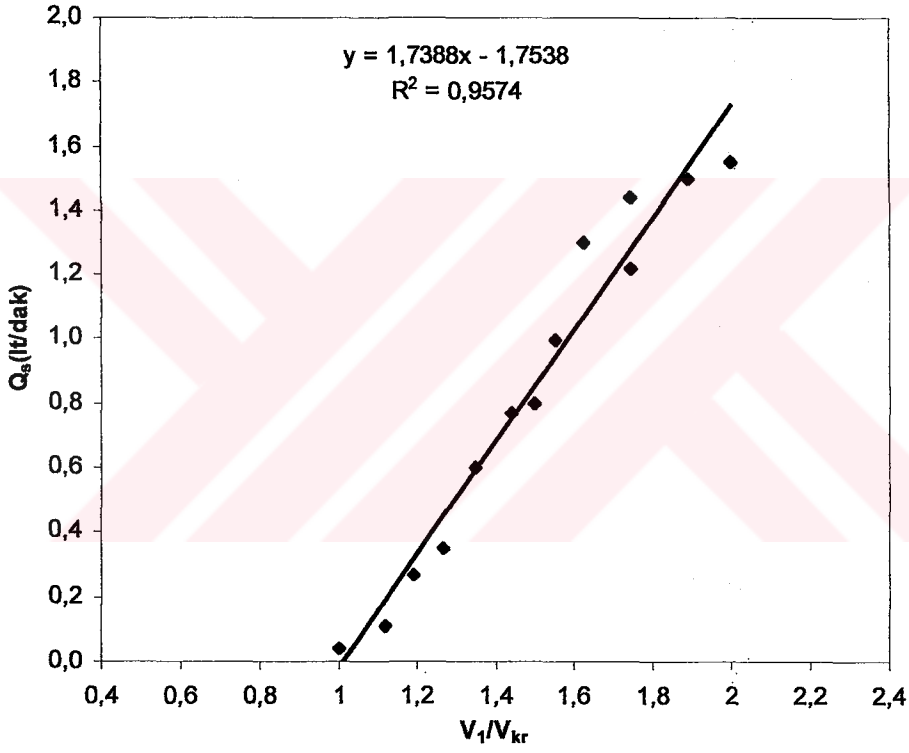
Bu bağıntı pilot deneylerle test edilerek doğrulanmıştır.

6.7 Akım Hızı-Katı Madde Debisi Arasındaki İlişki

Hareketli taban oyulması deneylerine başlamadan pilot deneylerle tabandaki sürüntü debileri belirlenmiş ve Şekil 6.5’de verilmiştir. Şekil 6.5’den katı madde debisinin analitik ifadesi

$$Q_s = 1.7388 (V_1 / V_{kr}) - 1,7538 \quad (6.6)$$

olarak elde edilmiştir. Burada Q_s katı madde debisi olarak ifade edilmiş ve lt/dak olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.5 Katı madde debisinin (Q_s) V_1/V_{kr} ile değişimi

6.8 Deneysel Çalışmada Etkili Parametrelerin Belirlenmesi

Dikdörtgen en kesitli ve hareketli tabanlı kıvrımlı bir kanalda dikdörtgen yan savak üzerindeki akıma bir çok değişken etki etmektedir. Bunlar Çizelge 6.1’de sıralanmıştır.

Çizelge 6.1 Yan savak akımına etki eden parametreler

DEĞİŞKENLER	İŞARET	BİRİM	BOYUT
1) Kanala Ait Değişkenler			
a) Kanal Taban Eğimi	J_0	---	---
b) Ana Kanal Genişliği	b	m	L
c) Kıvrım Eğrilik Yarıçapı	r	m	L
d) Kıvrım Merkez Açısı	θ	---	---
2) Akışkana Ait Değişkenler			
a) Akışkanın Özgül Kütlesi	ρ	kg/m^3	ML^{-3}
b) Akışkanın Kinematik Viskozitesi ν		m^2/sn	$\text{L}^{+2}\text{T}^{-1}$
c) Yüzey Gerilmesi	σ	kg^*/m^2	KL^{-2}
d) Yerçekimi İvmesi	g	m/sn^2	LT^{-2}
3) Akıma Ait Değişkenler			
a) Akım Derinliği	h_1	m	L
b) Yan Savak Başlangıcında Ortalama Hız	V_1	m/sn	LT^{-1}
c) Ana Kanaldaki Akımın Yan Savağa Sapma Açısı	ψ	---	---
4) Yan Savağa Ait Değişkenler			
a) Yan Savak Eşik Yüksekliği	p	m	L
b) Yan Savak Su Yüzü Genişliği	L	m	L
5) Taban Malzemesine Ait Değişkenler			
a) Taban Malzemesinin Özgül Kütlesi	ρ_s	kg/m^3	ML^{-3}
b) Taban Malzemesinin Medyan Çapı	d_{50}	m	L
$\text{kg}^* = \text{kg.kuvvet}$			

6.9 Boyut Analizi

Hareketli tabanlı kıvrımlı bir kanalda yan savağın mansap kısmında meydana gelen oyulma derinliği H_d , aşağıdaki parametrelerin fonksiyonudur.

$$f(H_d, v, g, \rho_s, h_1, b, p, L, \psi, V_1, \rho, d_{50}, \theta, J_0, \sigma, r)=0 \quad (6.7)$$

Elementer bir akım parçacığı için J_0 ve σ etkileri küçük olduğundan, olaya etkileri ihmal edilebilir. Sonuç olarak H_d 'ye etki eden parametreler,

$$f(H_d, v, g, \rho_s, h_1, b, p, L, \psi, V_1, \rho, d_{50}, \theta, r)=0 \quad (6.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; h_1 yan savak membasında ana kanal eksenindeki su derinliği, V_1 bu akım derinliğine göre elde edilen yan savak memba ucundaki ortalama akım hızıdır.

Deneysel çalışmada olaya etkili değişkenleri azaltmak ve deneysel çalışmaların sonuçlarını daha kolay ortaya koymak için boyut analizi uygulanarak, ρ , V_1 ve p değişkenleri tekrarlanan (esas) değişkenler olarak dikkate alınmış ve Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Yan savak katsayısına etki eden parametreler için boyut analizi.

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}
	H_d	v	g	ρ_s	h_1	b	d_{50}	L	ψ	θ	r	p	ρ	V_1
L	1	+2	1	-3	1	1	1	1	0	0	1	1	-3	1
M	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
T	0	-1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Çizelge 6.2'den;

$$k_4 + k_{13} = 0$$

$$-k_2 - 2k_3 - k_{14} = 0$$

$$k_1 + 2k_2 + k_3 - 3k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_{11} + k_{12} - 3k_{13} + k_{14} = 0$$

bağıntıları yazılabilir. Bu üç denklemden k_{12} , k_{13} ve k_{14} çekilerek,

$$k_{13} = -k_4$$

$$k_{14} = -k_2 - 2k_3$$

$$k_{12} = -k_1 - 2k_2 - k_3 + 3k_4 - k_5 - k_6 - k_7 - k_8 - k_{11} + 3k_{13} - k_{14}$$

$$k_{12} = -k_1 - 2k_2 - k_3 + 3k_4 - k_5 - k_6 - k_7 - k_8 - 3k_4 + k_2 + 2k_3 - k_{11}$$

$$k_{12} = -k_1 - k_2 + k_3 - k_5 - k_6 - k_7 - k_8 - k_{11}$$

eşitlikleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak elde edilen boyutsuz parametreler Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Yan savak katsayısına etki eden boyutsuz parametreler.

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}
	H_d	v	g	ρ_s	h_1	b	d_{50}	L	ψ	θ	r	p	ρ	V_1
Π_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
Π_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1
Π_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-2
Π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
Π_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
Π_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0
Π_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
Π_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0
Π_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Π_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Π_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0

Çizelge 6.3’den boyutsuz parametreler;

$$\Pi_1 = H_d/p \quad \Pi_2 = v/pV_1 = 1/Re^* \quad \Pi_3 = g p/V_1^2 = 1/Fr^{*2} \quad \Pi_4 = \rho_s/\rho$$

$$\Pi_5 = h_1/p \quad \Pi_6 = b/p \quad \Pi_7 = d_{50}/p \quad \Pi_8 = L/p \quad \Pi_9 = \psi \quad \Pi_{10} = \theta \quad \Pi_{11} = r/p$$

olarak belirlenmiştir.

Bu boyutsuz büyüklükler arasında dönüşümler yapılarak;

$$\Pi_8/\Pi_6 = (L/p)/(b/p) = L/b \quad \text{ve} \quad \Pi_7/\Pi_{11} = (d_{50}/p)/(r/p) = d_{50}/r$$

boyutsuzları elde edilir. O halde olaya etkili boyutsuz parametreler;

$$H_d/p = f(v/V_{1p}=1/Re^*, gp/V_*^2=1/Fr_*^2, \rho_s/\rho, h_1/p, L/b, d_{50}/r, \psi, \theta) \quad (6.9)$$

olarak bulunur. Yüksek türbülanslı akım sebebiyle taban malzemesinin hareket başlangıcında etkili olan $1/Re^*$ terimi (Melville ve Sutherland, 1988) ile ρ_s/ρ , d_{50}/r , ψ sabit terimleri elimine edilerek

$$H_d/p = f(1/Fr_*^2, h_1/p, L/b, \theta) \quad (6.10)$$

boyutsuzları bulunur. $1/Fr_*^2$ terimi, akımın ataletini ifade etmek üzere V_1/V_{kr} ifadesi ile değiştirilirse,

$$H_d/p = f(V_1/V_{kr}, h_1/p, L/b, \theta) \quad (6.11)$$

boyutsuzları bulunur.

6.10 DeneySEL Çalışma

Bu çalışma, 14 m'lik doğrusal yaklaşım kanalı, 180° 'lik 2.95 m eksen eğrilik yarıçapına sahip 90 cm genişliğinde kıvrımlı kanal ve kıvrımdan sonra 3 m'lik doğrusal mansap kanalında gerçekleştirilmiştir. Kıvrımlı kanalın “kıvrımdan etkilenmeyen” doğrusal memba kısmında ayırma duvarının üzerinde çeşitli kret yüksekliklerinde ve uzunluklarında dikdörtgen yan savaklar yerleştirilmiştir (Şekil 6.1). Ana kanal taban eğimi % 0.1'dir. Deneyler nehir rejimli ve kararlı akım şartlarında ve serbest savaklanma hali için gerçekleştirilmiştir. Yan savak nap kalınlığı (savak yükü) olarak, yan savak membasında ana kanal eksenindeki su derinliğine göre elde edilen nap kalınlığı dikkate alınmıştır. Deneyler, önce doğrusal kanalda $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluklu ve kum tabandan itibaren $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklar için yapılmıştır. Daha sonra kıvrımlı kanalda $\theta=30^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$ 'lik kıvrım açılarında $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ ve 12 cm kret yükseklikli yan savaklar ile $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ de doğrusal kanalda yapılan tüm savak boyutları için gerçekleştirilmiştir.

Ana kanalın memba ve mansab uçlarına 20 cm yüksekliğinde iki eşik yerleştirilmiş ve aralarına 20 cm yüksekliğinde, $d_{50}=1.15$ mm ve $\sigma_g=1.74$ olan kuvars kumu serilmiştir. Ayrıca membadaki eşikten 1 m kadar geride iki sıra delikli tuğla yerleştirilerek akımın doğrusal

kanala çalkantisız ulaşması sağlanmıştır. Her deneyden önce kanaldaki kum karıştırılarak taban düzlenmiş ve daha sonra vana biraz açılarak kanala yavaş bir şekilde su verilmeye başlanmıştır. Kanalin mansabındaki eşğin üzerine 20 cm yüksekliğinde ikinci bir eşik yerleştirilerek kanala verilen su yavaşça bu bölümde şişirilmiş ve tabanda herhangi bir bozulmaya meydan verilmemiştir. Doğrusal kanalın bu kısmında su seviyesi ikinci eşik seviyesine (kanal tabanından itibaren 40 cm) geldikten sonra bütün kanaldaki su seviyesinin eşit olması beklenmiştir. Bütün kanal boyunca su seviyesi eşit olduktan sonra ihtiyaç debisine ulaşılması sağlanmış ve daha sonra tabandaki kumun bozulmaması için kanala bırakılan ikinci eşik yavaşça çıkarılmıştır. Kanalda akım hızları kanalın sonunda bulunan radyal kapaklarla ayarlanmıştır. Deney bittikten sonra vana yavaşça kapatılarak tabanda oluşan topoğrafyanın bozulmaması için 20 cm'lik eşik doğrusal kanalın mansabındaki eşğin üzerine tekrar konulmuş ve bu sayede suyun kanaldan yavaşça tahliyesi sağlanmıştır. Bütün bu işlemlerden sonra limnimetre yardımıyla yan savak bölgesinde oluşan maksimum oyulma derinliği ölçülmüştür. Ayrıca taban topoğrafyası için yan savak bölgesinde (120 cm uzunluk ve 40 cm genişlik) 5 cm aralıkla 216 noktada limnimetre yardımıyla taban seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Doğrusal kanaldaki deneyler için yapılan işlemler benzer şekilde kıvrımlı kanalda yapılan deneyler için de uygulanmıştır.

Doğrusal kanalda yapılan deneylerde önce, $L=25$ ve 40 cm uzunluklu ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklarda temiz su oyulması hali için oyulma derinliği H_d 'nin zamanla değişimi incelenmiştir. Temiz su oyulması halinde deneyler, 720 dakikaya kadar yapılmıştır. Deneylerde, ilk bir saatte 15'er dakikada, ikinci saatte 20'şer dakikada, üç ve dördüncü saatlerde 30'ar dakikada ve sonraki sürelerde 60'şar dakikalık zaman aralıklarında oyulma derinlikleri ölçülmüştür. Denge oyulma süresi olarak, oyulma derinliğinin değişiminin birbirini takip eden bir saatte savak kret yüksekliğinin %1'inden küçük olması halinde denge oyulma derinliğine ulaşıldığı kabul edilmiştir. Daha sonra denge oyulma süresi ile denge oyulma derinliği arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Bu ilişkide deney süresinin denge oyulma süresinin %50'si olması halinde oyulma derinliğinin denge oyulma derinliğinin %90-95'ini geçtiği görülmüştür. Daha sonra diğer temiz su oyulması deneylerinde elde edilen bu sonuçların ışığında savak kret yüksekliği ve V_1/V_{kr} 'e bağlı olarak 150-400 dakika civarında seçilmiştir. Temiz su oyulması hali için yapılan deneylerden sonra aynı yan savaklarla hareketli taban oyulması için de deneyler yapılmıştır. Hareketli taban hali için önce pilot deneylerle çeşitli akım şartları için sürüntü debileri belirlenmiş, diğer deneylerde ana kanal membasından deney süresince belirlenen katı madde ilave edilmiştir. Hareketli taban hali deneyleri 15-90 dakika arasındaki sürelerde ve her deney için en az 4-5 taban dalgasının yan

savaktan geçişine imkan sağlayacak şekilde sürdürülmüştür. Ayrıca, hareketli taban hali deneyleri oyulma çukurunu dolduran bir taban dalgasının etkisinin geçmesi ve bu noktada yeni bir taban dalgası gelip oyulma çukurunu doldurmadan kesilmiştir. $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ cm kret yükseklikli yan savakta temiz su oyulması halinde iki, hareketli taban oyulması halinde ise üç deney sonunda oluşan taban topoğrafyası ölçümleri alınarak Netcad programında taban topoğrafyası ile ilgili çizimler yapılmış ve ayrıca, bu hız değerlerinde oluşan taban topoğrafyalarının resimleri de çekilmiştir. Doğrusal kanalda temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması için toplam 250'ye yakın deney yapılmıştır. Doğrusal kanalda dokuz farklı yan savak için yapılan deneylerdeki akım şartları Çizelge 6.4'de özetlenmiştir.

Kıvrımlı kanalda ise önce kıvrım boyunca ($\theta=30^0$, $\theta=60^0$, $\theta=90^0$, $\theta=120^0$ ve $\theta=150^0$) $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ ve 12 cm kret yükseklikli yan savaklarla temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması ile ilgili deneyler yapılmıştır. Kıvrım boyunca bu iki yan savak için yapılan deneylerde $\theta=30^0$ 'de maksimum oyulma derinlikleri $\theta=120^0$ 'de ise daha küçük oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, daha sonra $\theta=30^0$ ve $\theta=120^0$ 'de doğrusal kanalda kullanılan dokuz farklı yan savak için deneyler tamamlanmıştır. $\theta=30^0$ 'de $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$, 12 ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklarda temiz su oyulması halinde oyulma derinliği H_d 'nin zamanla değişimi de incelenmiş (720 dakika) ve doğrusal kanalda olduğu gibi denge oyulma süresi ile denge oyulma derinliği arasındaki ilişki belirlenmiştir. Ayrıca, denge oyulma süresi olarak, oyulma derinliğinin değişiminin birbirini takip eden bir saatte savak kret yüksekliğinin %1'inden küçük olması halinde denge oyulma derinliğine ulaşıldığı kabul edilmiştir. Daha sonra kıvrımda yapılan diğer temiz su oyulması deneylerinde doğrusal kanalda olduğu gibi, savak kret yüksekliği ve V_1/V_{kr} 'e bağlı olarak 150-400 dakika seçilmiştir. Hareketli taban oyulması halindeki deneyler ise 15-90 dakika aralığında yapılmış ve deney süresince kanal başından katı madde ilave edilmiştir. $\theta=30^0$ 'de $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ cm kret yükseklikli yan savakta temiz su oyulması halinde iki, hareketli taban oyulması halinde ise üç deney olmak üzere toplam beş deney için taban topoğrafyası çıkarılmış (doğrusal kanalda yapılan deneylerdeki aynı akım şartlarında) ve resimleri çekilmiştir. Kıvrımlı kanalda toplam olarak 650'ye yakın deney yapılmış ve yapılan deneylerdeki akım şartları Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 6.4 Doğrusal kanalda kullanılan dokuz farklı yan savak için akım şartları

L (cm)	h_1 (cm)	h_1/p	Q_1 (lt/s)	Q_w (lt/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_{kr} (m/s)	V_1/V_{kr}	V_2/V_{kr}
(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
25	12.6-22.0	1,82-3,13	10.0-52.1	5,1-25.6	0.20-0.91	0.10-0.78	0.43-0.47	0.46-2.08	0.20-1.78
25	17.2-27.7	1.43-2,33	18.0-57.8	5.0-29.8	0.22-0.84	0.10-0.70	0.45-0.49	0.47-1.85	0.15-1.65
25	25.2-32.5	1.47-1,92	33.0-63.5	7.0-25.0	0.30-0.63	0.16-0.56	0.48-0.50	0.62-1.31	0.30-1.68
40	14.0-20.0	1.96-2.86	12.0-54.1	10.7-27.2	0.22-0.99	0.04-0.74	0.44-0.46	0.50-2.26	0.08-1.68
40	19.2-27.4	1.43-2.27	17.7-66.6	10.5-30.7	0.23-0.98	0.05-0.72	0.45-0.49	0.50-2.16	0.11-1.59
40	24.5-28.7	1,33-1.70	25.9-71.8	4.6-27.7	0.26-0.79	0.07-0.75	0.47-0.49	0.54-1.67	0.15-1.57
50	12.5-19.2	1.75-2.70	10.5-47.8	7.0-40.1	0.21-1.0	0.09-0.76	0.43-0.46	0.49-2.32	0.12-1.76
50	15.4-26.2	1.28-2.17	14.0-60.2	6.2-46.0	0.21-0.95	0.08-0.78	0.45-0.48	0.47-2.13	0.15-1.70
50	24.1-28.7	1.25-1.79	26.6-72.0	4.2-47.6	0.28-0.81	0.10-0.73	0.47-0.49	0.58-1.72	0.18-1.63

Çizelge 6.5 Kıvrımlı kanalda $\theta=30^\circ$ 'de kullanılan dokuz farklı yan savak için akım şartları

L (cm)	h_1 (cm)	h_1/p	Q_1 (lt/s)	Q_w (lt/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_{kr} (m/s)	V_1/V_{kr}	V_2/V_{kr}
(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
25	14.7-20.7	2.02-2.94	19.0-62.0	7,2-28,3	0.31-1.06	0.12-0.76	0.44-0.47	0.70-2.40	0.25-1.72
25	18.2-27.2	1.52-2.27	27.0-74.0	10,1-33	0.31-1.02	0.14-0.72	0.45-0.49	0.66-2.23	0.28-1.64
25	22.4-29.4	1.32-1.73	38.0-85.0	12,3-36,4	0.31-0.95	0.14-0.70	0.47-0.49	0.65-2.01	0.28-1.50
40	14.0-20.0	2.00-2.86	19.2-63.0	11,0-32	0.31-1.15	0.19-0.71	0.44-0.47	0.7-2.62	0.38-1.50
40	18.0-27.0	1.47-2.27	27.0-72.2	13,3-35	0.31-1.02	0.18-0.73	0.46-0.49	0.66-2.24	0.36-1.58
40	22.4-29.2	1.32-1.73	38.1-85.1	10,8-33	0.31-0.95	0.13-0.70	0.47-0.49	0.65-2.01	0.28-1.40
50	14.2-19.2	2.00-2.78	19.0-60.0	12-45,7	0.31-1.06	0.20-0.72	0.44-0.46	0.70-2.40	0.40-1.55
50	17.7-25.2	1.47-2.10	26.0-74.3	13-50,3	0.31-1.02	0.19-0.75	0.46-0.49	0.66-2.23	0.38-1.60
50	22.7-29.4	1.33-1.73	38.1-81.0	8,2-55	0.31-0.90	0.15-0.70	0.47-0.49	0.65-1.91	0.30-1.40

Çizelge 6.6 Kıvrımlı kanalda $\theta=120^\circ$ de kullanılan dokuz farklı yan savak için akım şartları

L (cm)	h_1 (cm)	h_1/p	Q_1 (lt/s)	Q_w (lt/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_{kr} (m/s)	V_1/V_{kr}	V_2/V_{kr}
(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
25	15.7-20.7	2.08-2.94	19.0-65.0	7,2-28,3	0.31-1.00	0.12-0.76	0.44-0.47	0.70-2.40	0.25-1.72
25	18.2-27.2	1.52-2.27	27.0-73.0	10,1-33	0.31-1.00	0.14-0.72	0.46-0.49	0.66-2.19	0.28-1.64
25	22.4-29.4	1.32-1.73	50.0-80.0	12,3-36,4	0.35-0.90	0.14-0.70	0.47-0.49	0.74-1.91	0.28-1.50
40	14.2-21	1.96-2.86	19.0-65.0	13,0-32	0.31-1.10	0.19-0.71	0.44-0.47	0.70-2.48	0.38-1.50
40	18.5-27	1.47-2.27	27.0-73.0	15,3-35	0.31-0.99	0.18-0.73	0.46-0.49	0.66-2.15	0.36-1.58
40	22.4-29.4	1.32-1.72	38.1-80.6	10,8-33	0.31-0.90	0.13-0.70	0.47-0.49	0.65-1.90	0.28-1.40
50	14-19.2	2.00-2.78	19.0-60.0	12-45,7	0.31-1.02	0.20-0.72	0.44-0.46	0.70-2.30	0.40-1.55
50	18.2-25.2	1.47-2.00	26.0-74.3	13-50,3	0.31-1.02	0.19-0.75	0.46-0.48	0.66-2.23	0.38-1.60
50	22.7-29.4	1.33-1.75	38.1-75.8	8,2-55	0.31-0.83	0.15-0.70	0.47-0.49	0.65-1.74	0.30-1.40

7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1 Giriş

İlk olarak doğrusal kanalda $L=25$ ve 40 cm uzunluklu ve $p=7, 12, 17$ cm kret yükseklikli yan savaklarda farklı akım şartlarında oyulma derinliği H_d 'nin zamanla değişimi, temiz su oyulması için incelenerek, denge oyulma süresi ile denge oyulma derinliği arasındaki bağıntı elde edilmiştir. Daha sonra doğrusal kanalda dikdörtgen kesitli $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluğunda ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yüksekliğindeki yan savaklarda farklı akım şartlarında boyut analizinde elde edilen boyutsuz parametrelere göre $H_d/p-h_1/p$ ve $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimleri, boyutsuz yan savak uzunluğuna (L/b) bağlı olarak hem temiz su oyulması ve hem de hareketli taban oyulması hali için belirlenmiştir. Son olarak da, $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ cm kret yükseklikli yan savakta temiz su oyulması hali için iki, hareketli taban oyulmasında da üç deney için oluşan taban topoğrafyaları alınarak fotoğraflanmıştır.

Kıvrımlı kanalda ise, önce $\theta=30^\circ$ 'de $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklar için oyulma derinliği H_d 'nin zamanla değişimi incelenerek, denge oyulma süresi ile denge oyulma derinliği arasındaki bağıntı elde edilmiştir. Daha sonra kıvrım boyunca ($\theta=30^\circ, \theta=60^\circ, \theta=90^\circ, \theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$) $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ ve 12 cm kret yükseklikli yan savaklarda farklı akım şartlarında $H_d/p-h_1/p$ ve $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimleri temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması hali için incelenmiştir. Üçüncü olarak $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ 'de tüm yan savaklar için farklı akım şartlarında $H_d/p-h_1/p$ ve $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimleri boyutsuz yan savak uzunluğu L/b için incelenmiştir. Son olarak, $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7$ cm kret yükseklikli yan savakta temiz su oyulması hali için iki, hareketli taban oyulması için de üç deney olmak üzere toplam beş deney için taban topoğrafyaları alınmış, resimleri çekilmiş ve doğrusal kanaldaki taban topoğrafyalarıyla karşılaştırılmıştır.

7.2 Doğrusal Kanalda Oyulma Derinliği H_d 'nin t (zaman) ile Değişimi

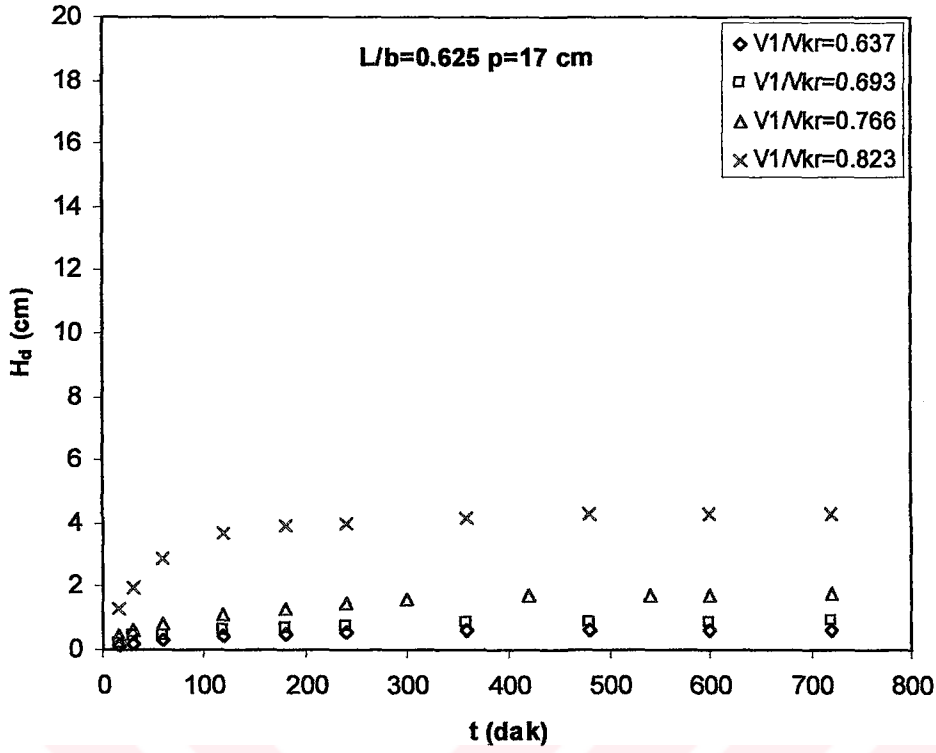
Bu bölümde $L=25$ ve 40 cm uzunluklu ve $p=7, 12, 17$ cm kret yükseklikli yan savaklarda farklı akım şartlarında (V_1/V_{kr}) oyulma derinliği H_d 'nin zamanla değişimi temiz su oyulması için incelenmiş ve sırasıyla Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da

verilmiştir. Temiz su oyulması için ana kanaldaki hız, tabanda hareketin başlangıç hızı olan V_{kr} 'den küçük seçilmiştir. Deneyler $V_1/V_{kr}=0.45-1.0$ aralığında gerçekleştirilmiş ve her bir deney 720 dakika sürdürülmüştür. Oyulma derinliği olarak yan savağın mansabında ters akımdan dolayı oluşan oyulma dikkate alınmıştır.

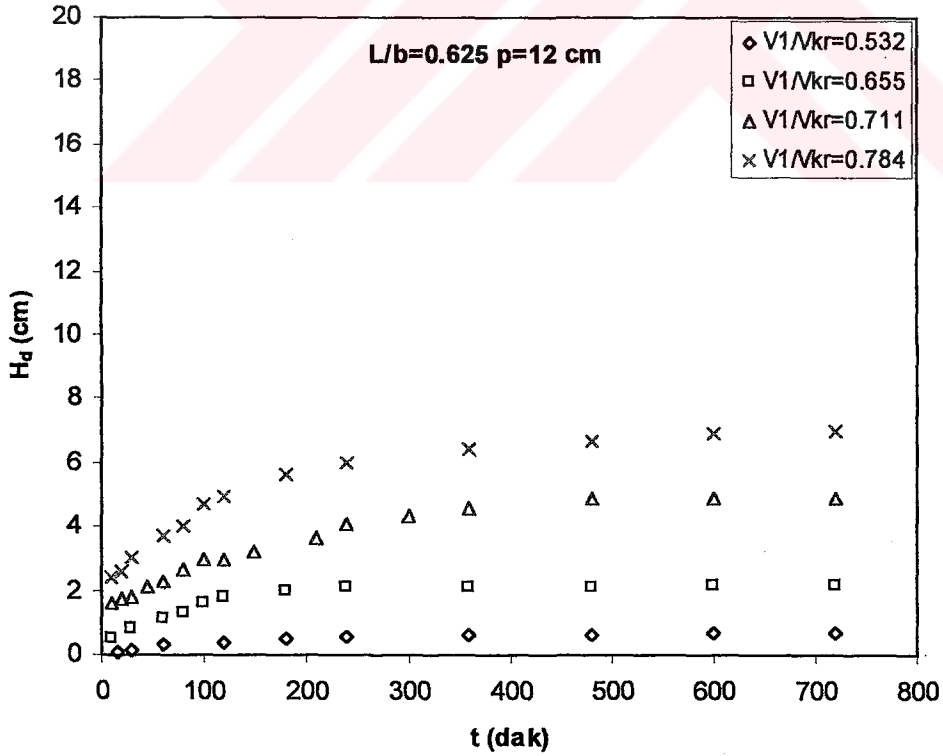
Şekil 7.1'de $L/b=0.625$ ve $p=17$ cm kret yüksekliğine sahip yan savakta, küçük V_1/V_{kr} değerlerinde yaklaşık 150 dakika sonunda oyulma derinlikleri hemen hemen asimptotik olurken, daha büyük V_1/V_{kr} değerlerinde denge oyulma derinliğine ulaşma süreleri de artmaktadır. Büyük V_1/V_{kr} değerlerinde denge oyulma derinliğine yaklaşık 300 dakika sonunda ulaşılmıştır. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'te $L/b=0.625$, $p=12$ ve $p=7$ cm kret yüksekliğindeki yan savaklarda, küçük V_1/V_{kr} değerlerinde yaklaşık 200 dakika sonunda oyulma derinlikleri hemen hemen asimptotik olurken, büyük V_1/V_{kr} değerlerinde ise denge oyulma derinliğine yaklaşık 400 dakika sonunda ulaşılmıştır. Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da görüldüğü üzere, $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklarda denge oyulma derinliklerine ulaşma süreleri $L=25$ cm uzunluklu yan savaklara göre biraz daha uzun sürmüştür (200-400 dakika). Temiz su oyulması hali için yan savak boyutlarına ve V_1 hızına bağlı olarak 150-400 dakika arasında denge oyulma derinliğinin önemli bir kısmına ulaşıldığı ve eğrinin asimptotik olduğu görülmektedir. Diğer taraftan aynı V_1/V_{kr} değerleri için daha büyük kret yüksekliğine sahip yan savaklarda hem denge oyulma derinliğinin daha küçük olduğu ve hem de daha kısa sürede denge zamanına ulaşıldığı görülmüştür.

Tsujimoto ve Mizukami (1986) yaptıkları araştırmalarda temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin zamanla arttığını ve belli bir zamandan sonra asimptot olarak devam ettiğini tespit etmişlerdir.

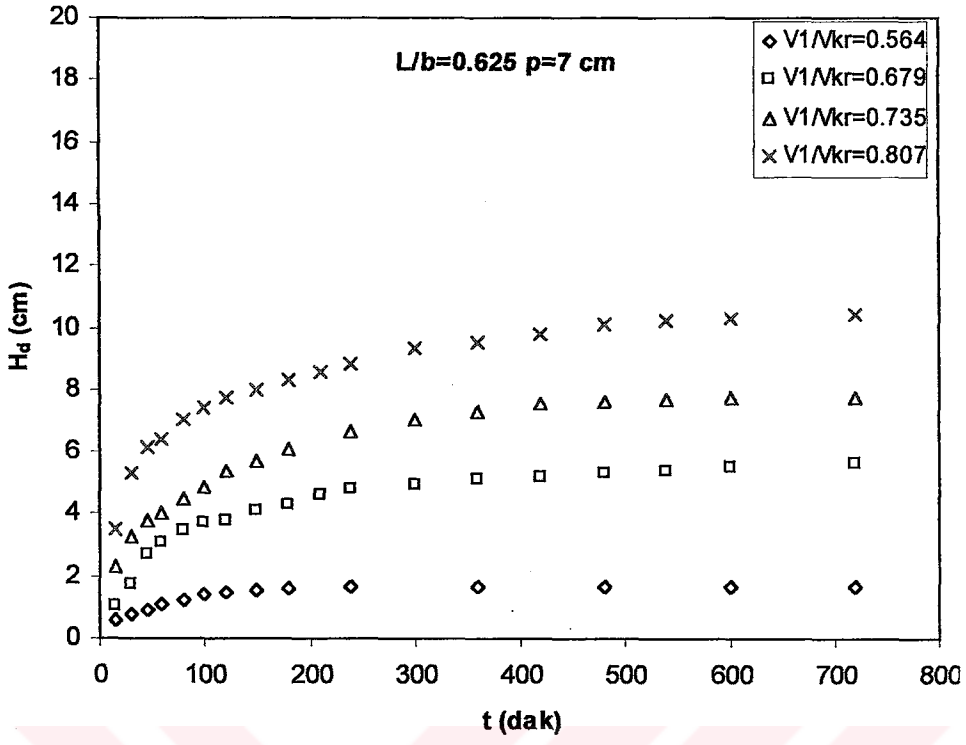
Yanmaz ve Altınbilek (1992), temiz su oyulması için köprü ayaklarında deneylerini 240-300 dakika aralığında yapmışlar ve bu süreler sonunda denge oyulma derinliğinin zamana bağlı olarak asimptotik olarak devam ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca denge zamanının %33 ile %67'lik kısımlarında denge oyulma derinliklerinin %87 ile %95'lik kısmına ulaşıldığını belirtmişlerdir.



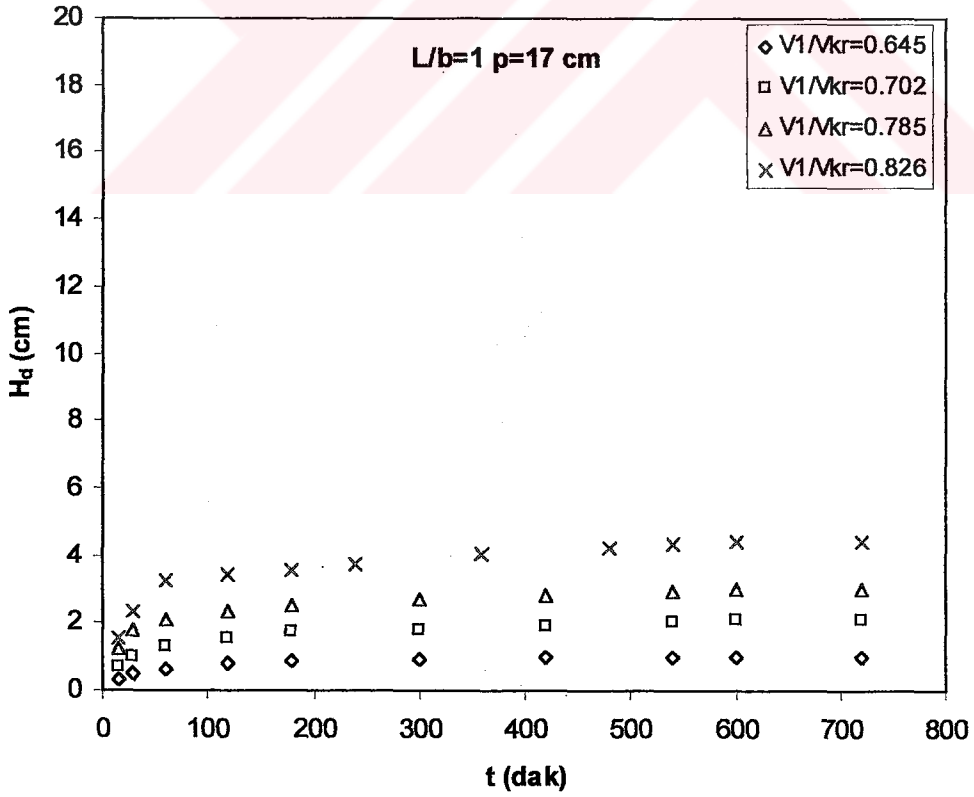
Şekil 7.1 $L/b=0.625$ ve $p=17$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi



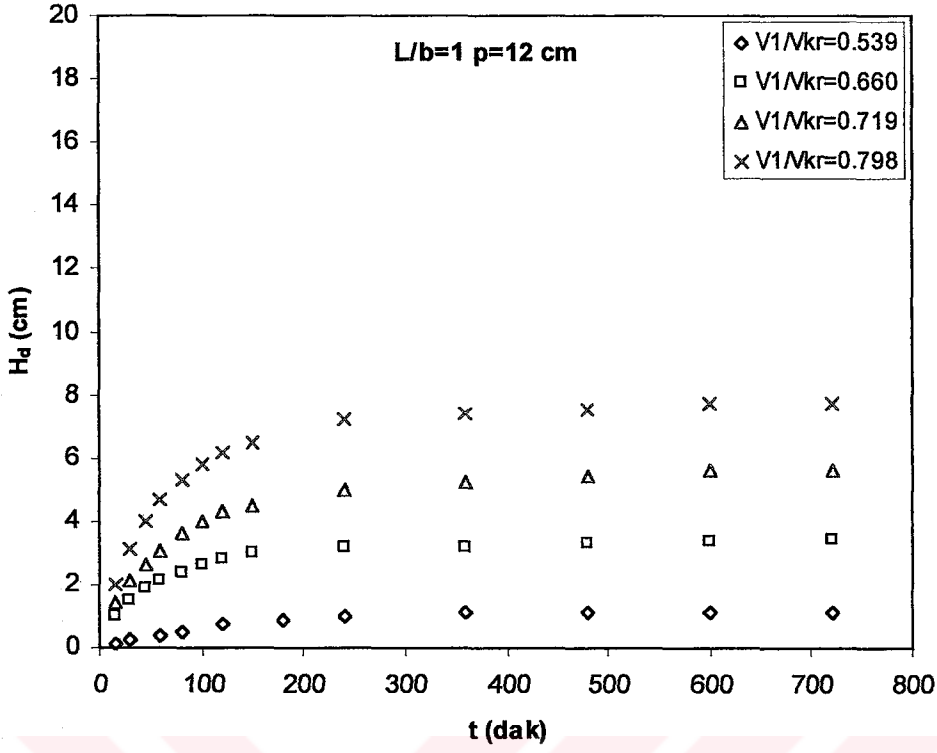
Şekil 7.2 $L/b=0.625$ ve $p=12$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi



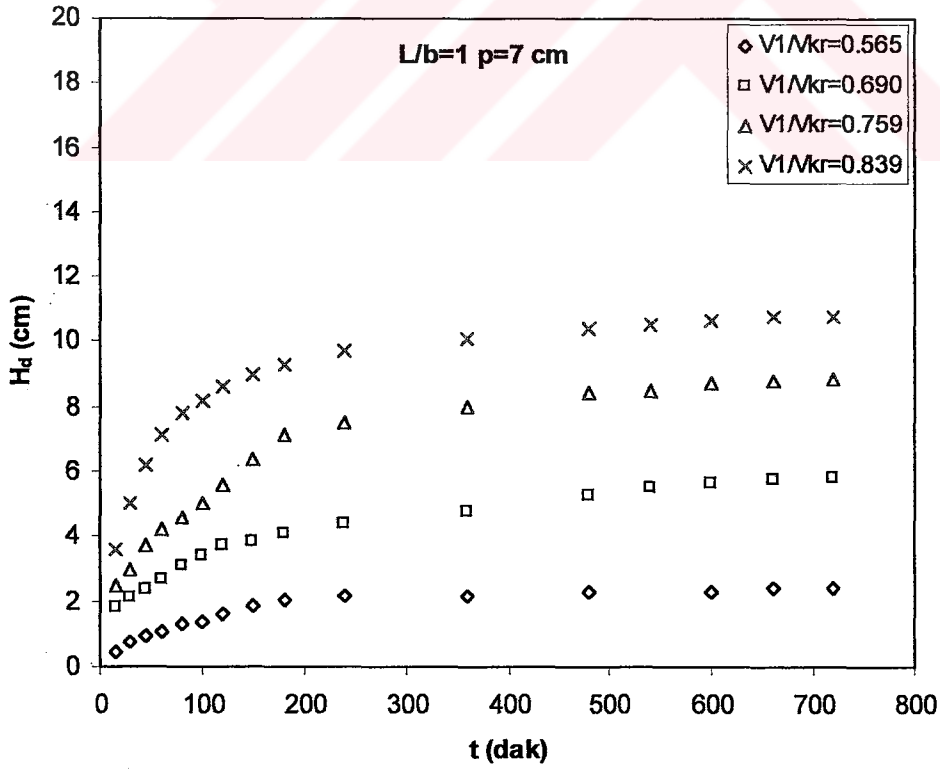
Şekil 7.3 L/b=0.625 ve p=7 cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi



Şekil 7.4 L/b=1 ve p=17 cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi



Şekil 7.5 L/b=1 ve p=12 cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi



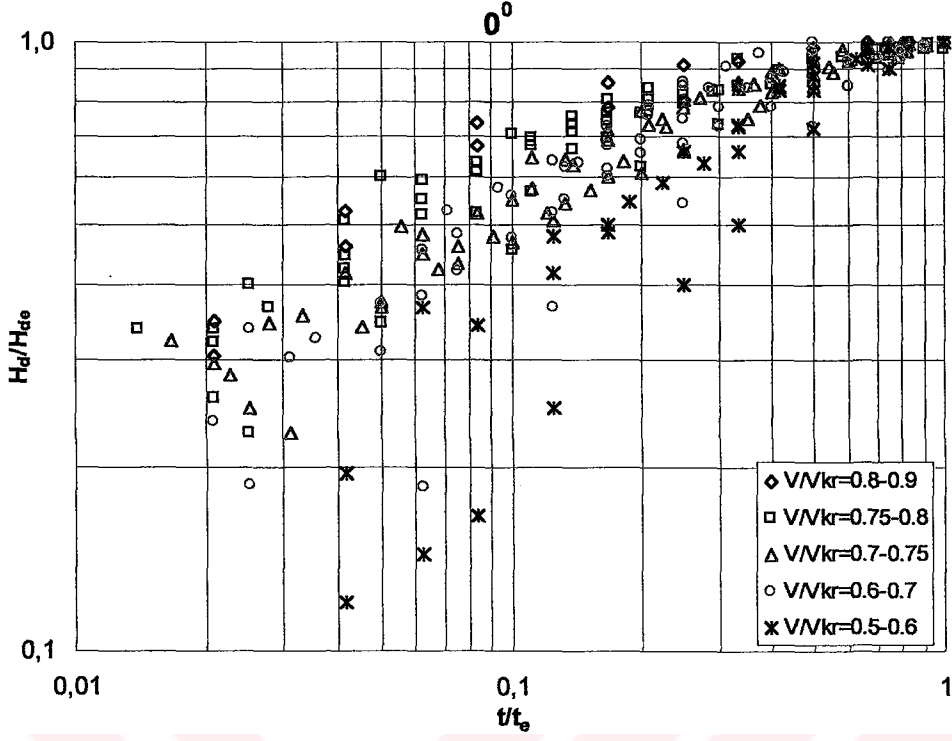
Şekil 7.6 L/b=1 ve p=7cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi

Melville ve Chiew (1999), köprü ayaklarında temiz su oyulması halinde, $H_d/H_{de}-t/t_e$ değişimini farklı V/V_{kr} değerleri için incelemişlerdir. Araştırmacılar, önceki araştırmacıların temiz su oyulması hali için köprü ayaklarında denge oyulma derinliği için elde ettikleri denge zamanlarının az olduğunu ve denge oyulma derinliğine ulaşma sürelerinin çok daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, V/V_{kr} 'a (rölatif hız) bağlı olarak denge zamanının %0.1 ile %10'lık kısımlarında denge oyulma derinliğinin %50'lik kısmına ulaşıldığını ve benzer şekilde denge zamanının %5 ve %40'lık kısımlarında denge oyulma derinliğinin %80 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca denge zamanı 3 gün (72 saat) olan bir deney 4 saat sonunda durdurulursa denge oyulma derinliğinin yaklaşık %50 ile %80'lik kısmına ulaşıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar V/V_{kr} ve t/t_e 'ye bağlı olarak boyutsuz denge oyulma derinliği H_d/H_{de} 'nin değişimi ile ilgili üstel bir ifade (2.14 denklemi) geliştirmişlerdir.

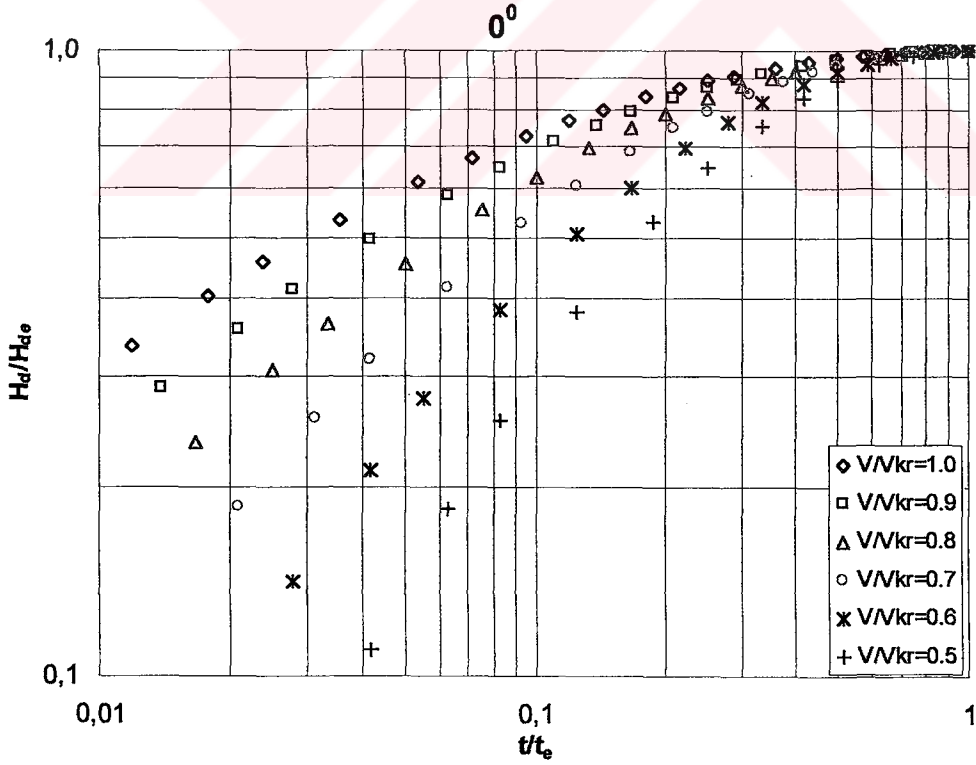
Temiz su oyulması halinde $H_d/H_{de}-t/t_e$ değişimi; $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli ve $L=25$ ve 40 cm uzunluğundaki yan savaklardaki veriler kullanılarak logaritmik formda elde edilmiş ve Şekil 7.7'de verilmiştir. Şekil 2.12'de olduğu gibi bütün eğriler (1,1) noktasından geçmekte ve eğriler rölatif hız (V_1/V_{kr}) ve oyulma derinliklerinin artmasıyla (veya zamanın azalması) artmaktadır. Şekil 7.7'den temiz su oyulması için (7.1) bağıntısı elde edilmiş ve aşağıda verilmiştir.

$$\frac{H_d}{H_{de}} = \exp \left\{ -0.06 \left| \frac{V_{kr}}{V_1} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.95} \right\} \quad (7.1)$$

7.1 bağıntısı kullanılarak çeşitli V_1/V_{kr} değerleri için $H_d/H_{de}-t/t_e$ değişimi çizilerek Şekil 7.8'de verilmiştir. Şekil 7.8 incelendiğinde denge oyulma derinliklerine ulaşma süreleri rölatif akım hızı V_1/V_{kr} 'e bağlı olup, V_1/V_{kr} hızındaki artış ile daha büyük oyulma derinlikleri elde edilmektedir. Ayrıca akım hızına bağlı olarak denge zamanının %10'luk kısmında denge oyulma derinliğinin %40-70'lik kısmına ulaşıldığı ve benzer şekilde denge zamanının %50'lik kısmında denge oyulma derinliğinin %90-95 civarında olduğu görülmektedir. Doğrusal kanalda temiz su oyulması ile ilgili diğer deney süreleri savak kret yüksekliği ve V_1/V_{kr} 'e bağlı olarak 150-400 dakika arasında seçilmiş ve elde edilen oyulma derinlikleri rölatif denge oyulma derinliği olarak ifade edilmiştir. Hareketli taban oyulması halinde membadan gelen taban dalgaları oyulma çukurunu kapattıkları için temiz su oyulmasına göre denge oyulma derinliğine ulaşma süresi azalmaktadır. Bundan dolayı hareketli taban oyulması hali için deneyler 15-90 dakika arasında yapılmıştır.



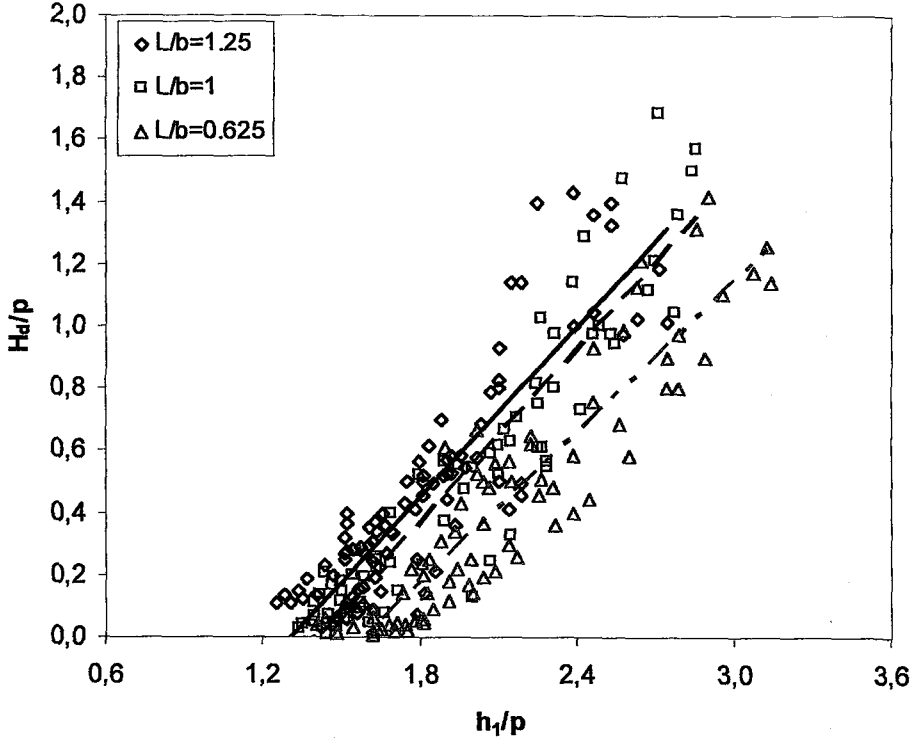
Şekil 7.7 Doğrusal kanalda temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin gelişimi



Şekil 7.8 (7.1) denklemine göre oyulma derinliğinin gelişimi

7.3 Doğrusal Kanalda Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin Rölatif Akım Derinliği h_1/p ile Değişimi

Bu bölümde, doğrusal kanalda dikdörtgen en kesitli $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluğunda ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yüksekliğindeki yan savaklarda farklı akım şartlarında rölatif denge oyulma derinliği H_d/p 'nin boyutsuz savak kret yüksekliği h_1/p ile değişimi incelenmiş ve üç farklı boyutsuz yan savak uzunluğu L/b için Şekil 7.9'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması hali için yapılan deneylerde h_1/p arttıkça (savak yükü, dolayısıyla savaklanma oranı) rölatif denge oyulma derinliği H_d/p 'nin arttığı görülmektedir. Şekil 1.14'de görüldüğü gibi (I) ve (II) bölgeleri arasında büyük hız azalması sebebiyle meydana gelen süreksizlik (III) nolu sekonder akımı oluşturmakta ve yan savağın mansabında oyulma çukurunun oluşmasına neden olmaktadır. Büyük kret yüksekliğine sahip yan savaklarda, cidar sürtünme etkisi daha fazla olduğundan (III) bölgesindeki sekonder akımın gücü de azalmakta ve bunun sonucunda rölatif denge oyulma derinliği de azalmaktadır. Ayrıca, aynı akım derinliğinde savak kret yüksekliği arttıkça savak yükü ve dolayısıyla yan savaktan savaklanan akım küçülmekte, buna karşılık ana kanal mansabına devam eden akım ve boyuna kinetik enerji büyümektedir. Bu da yan savak sonundaki sekonder akımın şiddetini azaltmakta ve daha küçük oyulmalar meydana getirmektedir. Öte yandan Şekil 1.15'de görüldüğü gibi yan savak uzunluğu ve savaklanma oranı Q_w/Q_1 (dolayısıyla h_1/p) arttıkça (boyuna akımın kinetik enerjisi azalmakta) yanal akımın yarattığı sekonder akımın gücünün de arttığı görülmektedir. Bundan dolayı aynı boyutsuz savak kret yüksekliği için, boyutsuz yan savak uzunluğu L/b büyüdükçe H_d/p değeri de artmaktadır.



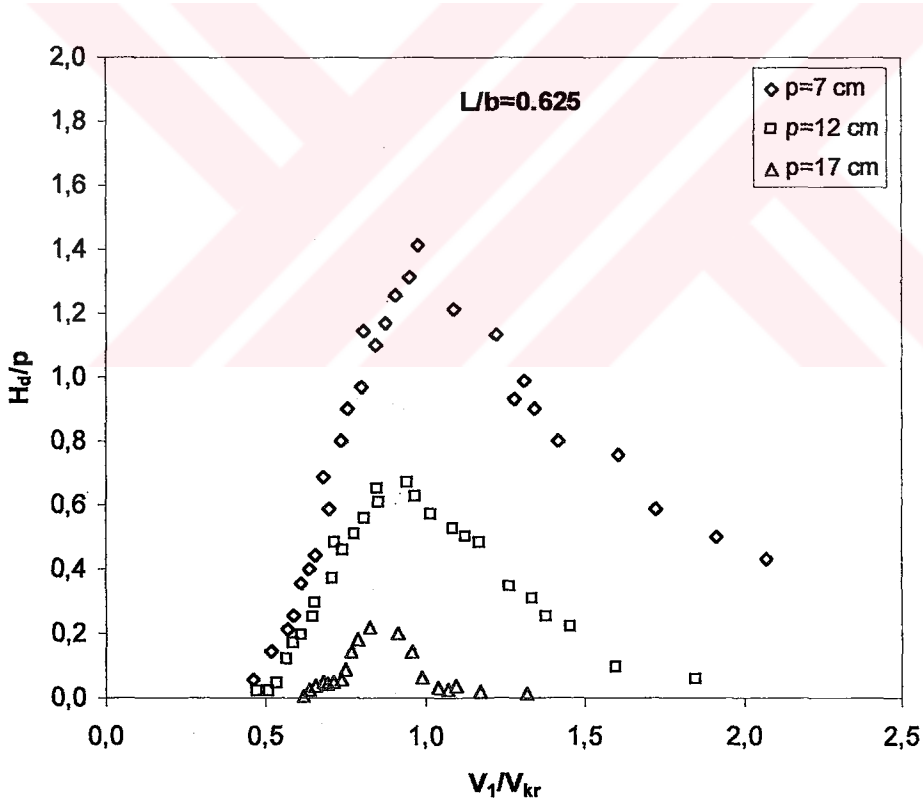
Şekil 7.9 $L/b=0.625$, $L/b=1$ ve $L/b=1.25$ için $H_d/p-h_1/p$ değişimi

7.4 Doğrusal Kanalda Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile Değişimi

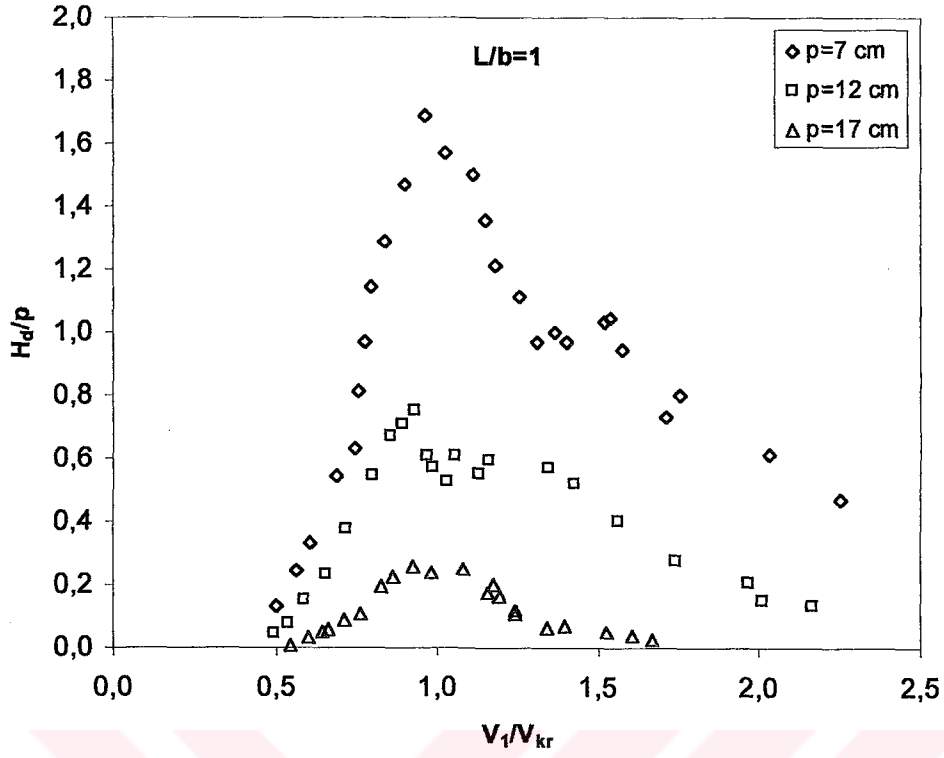
Bu bölümde, doğrusal kanalda dikdörtgen en kesitli $L=25$, 40 ve 50 cm uzunluğunda ve $p=7$, 12 ve 17 cm kret yüksekliğindeki yan savaklar için farklı akım şartlarında H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi incelenmiş ve Şekil 7.10, Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de verilmiştir.

Her üç şekilde de görüldüğü gibi $V_1/V_{kr} < 0.45$ değerlerinde oyulma yoktur. Küçük kret yükseklikli yan savaklarda temiz su oyulması daha küçük V_1/V_{kr} değerlerinde başlamaktadır. Farklı kret yükseklikli ve farklı uzunluklu yan savaklar için yapılan deneylerde, temiz su oyulması hali için H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi lineer bir artış göstermekte ve $V_1/V_{kr}=0.95-1.0$ arasında maksimum denge oyulma derinliğine ulaşmaktadır. Bu durum Hancu (1971) ve Nicollet (1971), tarafından köprü ayakları ile ilgili oyulmaya sebep olan hız sınıflandırmasına uymaktadır. Adı geçen araştırmacılar $0.5 < V/V_{kr} < 1.0$ için temiz su oyulması, $V_1/V_{kr} \geq 1.0$ için ise hareketli taban oyulması olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, Şekil 1.14'de görüldüğü gibi küçük kret yükseklikli yan savaklarda, ana kanal boyunca en kesitteki durgunluk bölgesi devam ederken, (I) bölgesindeki su kütlesi yan savağa yönelmekte, (I) ve (II) bölgeleri arasında büyük hız azalması sebebiyle süreksizlik meydana gelmektedir. Böylece (III)

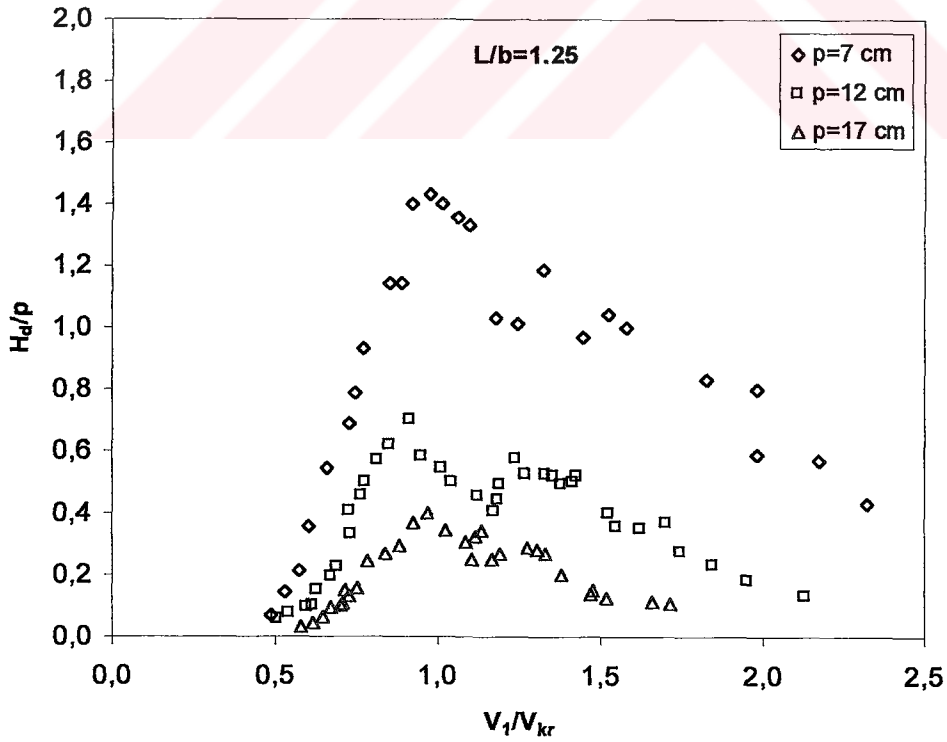
bölgesinde sınıra yakın çok şiddetli sekonder akım görülmekte ve bu da oyulma derinliğini artırıcı bir etken olmaktadır. Dolayısıyla aynı akım şartları için kret yüksekliği arttıkça oyulma derinliği azalmaktadır. Her dokuz yan savak için $V_1/V_{kr} \geq 0.95-1.0$ değerlerinden sonra yan savak membasındaki hız V_{kr} hızından büyük olduğu için daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulması başlamaktadır. Daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulmasında, V_1/V_{kr} değeri arttıkça H_d/p değeri azalmaktadır. Bunun nedeni de, membadan gelen dalgaların oyulma çukurunu doldurması, yan savak mansabında boyuna akım doğrultusundaki kinetik enerjinin artarken, yanal akım doğrultusundaki sekonder akımın şiddetinin azalması ve (III) nolu sekonder akım yapısının bozulmasıdır. Aynı akım şartlarında ve aynı L/b değerlerinde daha küçük kret yükseklikli yan savaklarda daha büyük H_d/p değerlerine ulaşılmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi, küçük kret yükseklikli yan savaklarda cidar sürtünmesine harcanan enerji daha azdır. Temiz su oyulmasında olduğu gibi aynı akım şartlarında hareketli taban oyulmasında da küçük kret yükseklikli yan savakta daha büyük H_d/p değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 7.10 $L/b=0.625$ ve $p=7$ cm, $P=12$ cm, $p=17$ cm için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



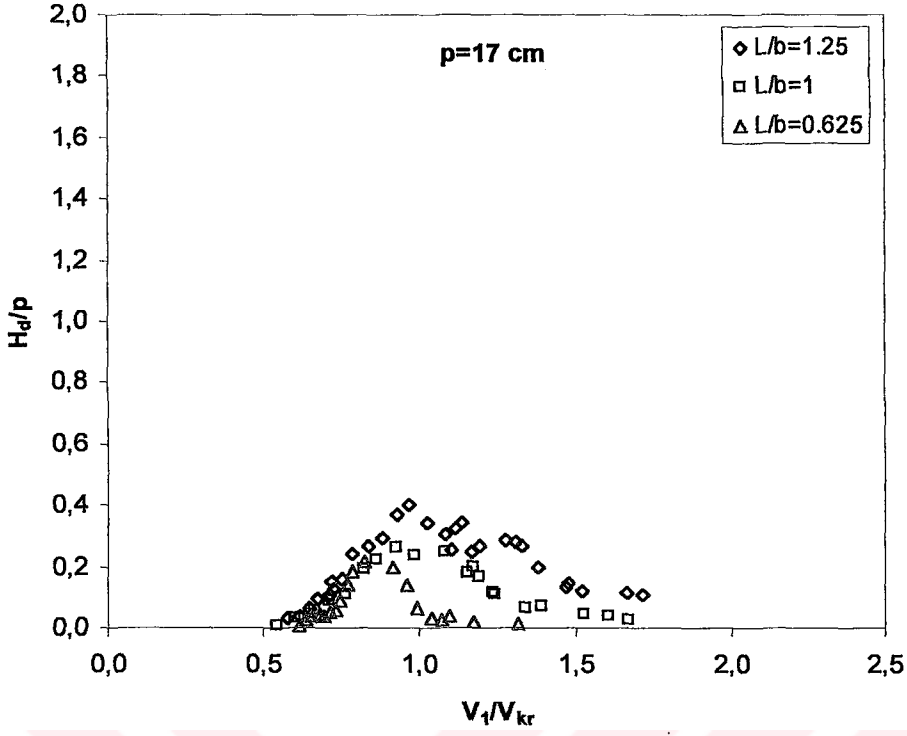
Şekil 7.11 $L/b=1$ ve $P=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi



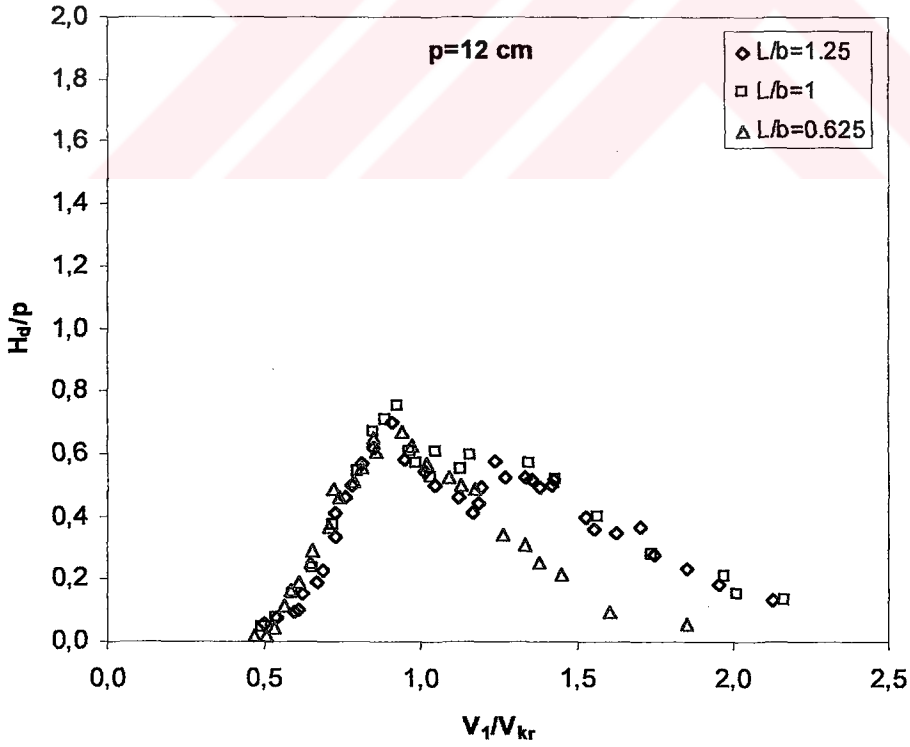
Şekil 7.12 $L/b=1.25$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi

Melville ve Chiew (1999), temiz su oyulmasının akım hızı ile hızla artarak denge zamanına ulaştığını, hareketli taban oyulmasında ise oyulmanın hızdaki artış ile azaldığını belirtmişlerdir. Diğer taraftan, hareketli taban oyulmasında kısa sürede denge oyulma derinliğine ulaşılırken, temiz su oyulmasında denge oyulma derinliğine çok daha uzun bir sürede ulaşıldığı da bilinmektedir. Köprü ayakları için yapılan çalışmalarda oyulmanın, engele yaklaşım hızının belli bir değerinde başladığı ve büyüdüğü tüm araştırmacıların ortak görüşüdür. Şekil 7.10'da $p=17$ cm yükseklikli yan savakta $V_1/V_{kr}=1.2$ değerinde H_d/p değeri sıfıra yaklaşmaktadır. Bu V_1/V_{kr} değerinden sonra oyulma çukuru oluşmadan taban dalgası gelerek oyulma çukurunu doldurmaktadır. $p=12$ cm yükseklikli yan savakta $V_1/V_{kr}=1.8$ değerinde H_d/p değeri sıfıra yaklaşmıştır, $p=7$ cm yükseklikli yan savakta ise $V_1/V_{kr}=2$ değerinde H_d/p değeri 0.25 civarında olmuştur. Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de $p=17$ cm ve $p=12$ cm kret yükseklikli yan savakta savak uzunluğu arttığı için H_d/p 'nin sıfıra ulaşması daha büyük V_1/V_{kr} değerlerinde meydana gelmiştir.

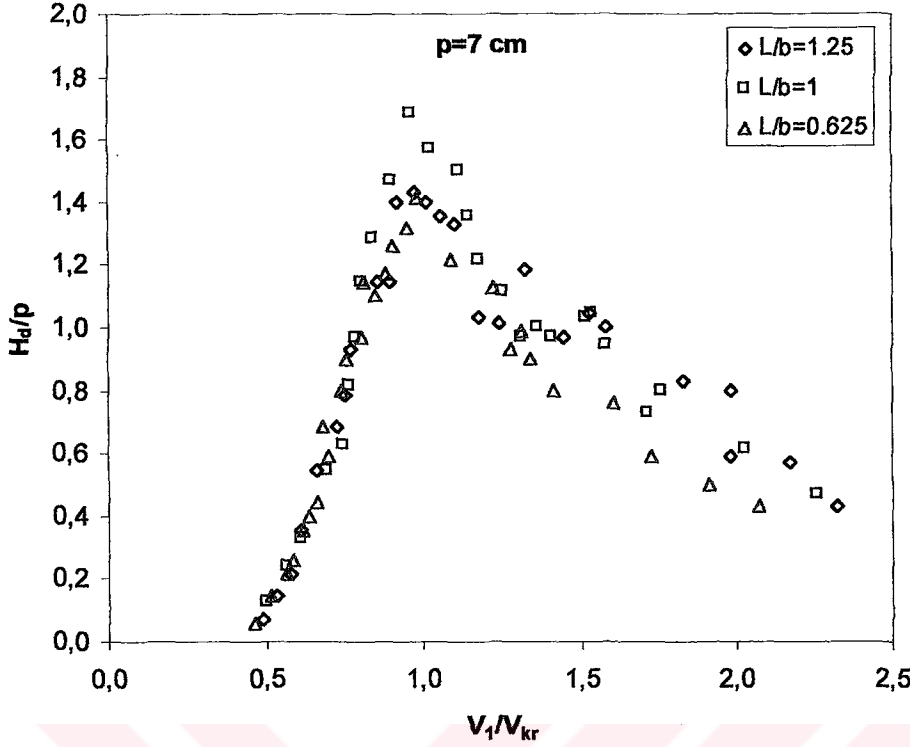
Şekil 7.13'de $p=17$ cm kret yüksekliğinde ve $L=25$ cm, 40 cm ve 50 cm uzunluğundaki yan savaklarda farklı akım şartlarında H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi boyutsuz yan savak uzunluğu (L/b) 'ye göre incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi büyük uzunluklu yan savaklarda, temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması hali için biraz daha büyük H_d/p değerlerine ulaşılmıştır. Ağaçoğlu ve Yüksel (1998), El-Khashab (1975), büyük uzunluklu yan savaklarda savaklanma oranı Q_r fazla olduğu için boyuna doğrultudaki kinetik enerjinin azaldığı, sekonder akımın şiddetinin de fazla olacağını belirtmişlerdir. Bundan dolayı büyük uzunluklu yan savaklarda daha büyük oyulma derinliklerine ulaşılmıştır. Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'de $L=40$ ve 50 cm uzunluklu yan savaklarda temiz su oyulması hali için H_d/p değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Çünkü bu kret yükseklikli yan savaklarda aynı h_1 yüksekliklerine çıkılamadığından dolayı savaklanma oranı Q_r azalmıştır. Hareketli taban oyulması hali için daha büyük H_d/p değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan deneylerde temiz su oyulmasına nazaran hareketli taban oyulmasında L/b 'ye bağlı olarak H_d/p 'nin artışı daha belirgin olarak gözlenmiştir. Diğer taraftan, hareketli taban oyulmasında $V_1/V_{kr}=1.1-1.3$ civarında oyulma derinliklerinde saçılım görülmektedir. Bu saçılımın, kanal tabanının dalgacık formundan eşik formuna geçişte taban pürüzlülüğünün değişmesi (Raudkivi, 1999) ve ayrıca rölatif savak kret yüksekliği h_1/p 'de dalga tepesi veya çukurunun geliş durumuna göre değişiklik olmasıdır.



Şekil 7.13 $p=17$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



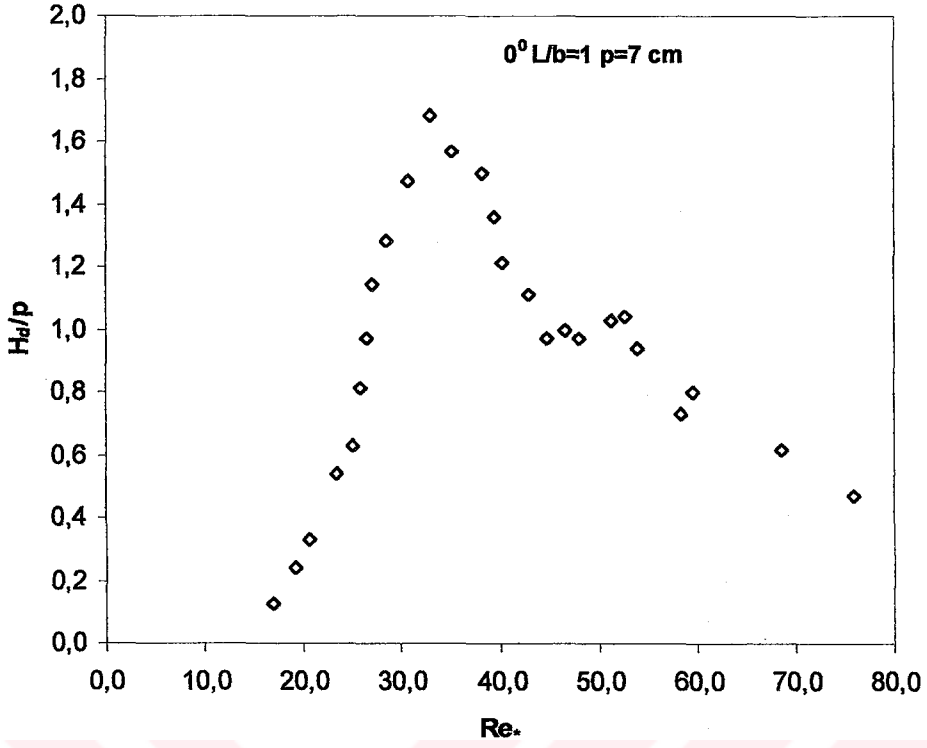
Şekil 7.14 $p=12$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



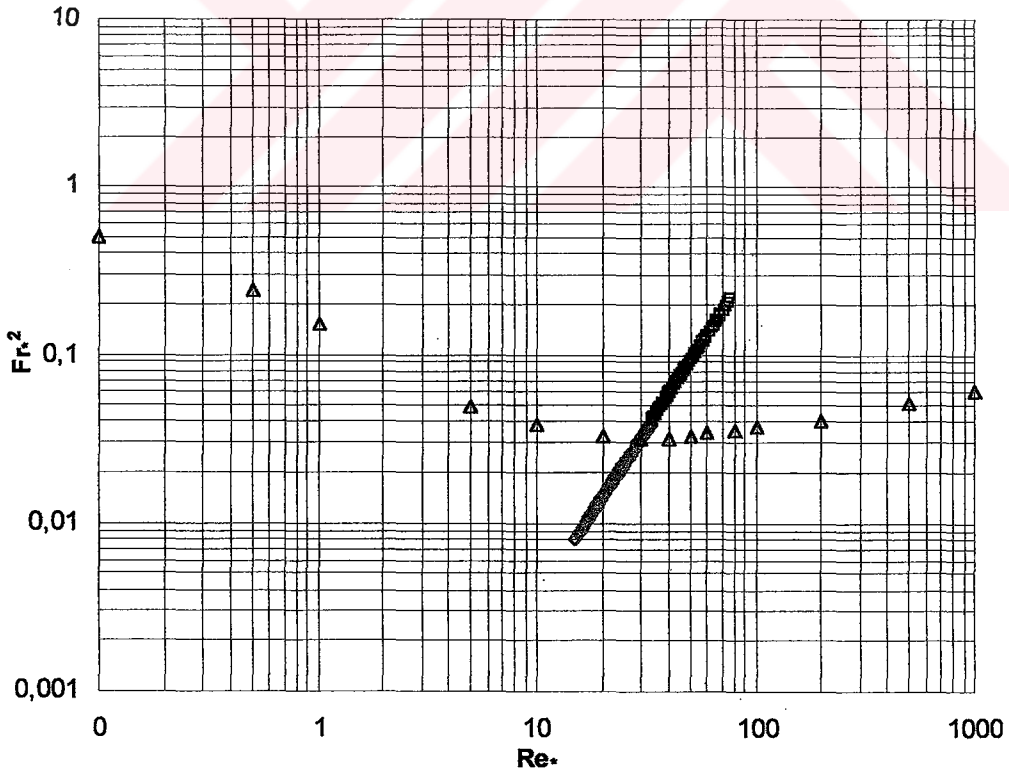
Şekil 7.15 $p=7 \text{ cm}$ ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi

Şekil 7.16'da $p=7 \text{ cm}$ kret yükseklikli ve $L=40$ uzunluklu yan savakta temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması için rölatif denge oyulma derinliği H_d/p 'nin tane Reynolds sayısı Re_* (u_*d/v) ile değişimi verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi temiz su oyulması halinde H_d/p 'nin Re_* ile değişimi hemen hemen lineer artmakta ve fazla saçılım görülmemektedir. Buna karşın hareketli taban oyulması halinde ise rölatif denge oyulma derinliği Re_* ile azalmakta ve saçılım daha fazla olmaktadır.

Şekil 7.17'de ise doğrusal kanalda temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması halinde dokuz farklı yan savakla yapılan deneysel veriler Shields diyagramında gösterilmiştir. Akarsularda genellikle $Re_* > 400$ değerinden sonra Fr_*^2 (Ψ) değeri sabit (0.06) bir değer olmaktadır. Deneyler $Re_*=10-100$ aralığında yapılmıştır (Geçiş bölgesi). Şekil 7.17'de görüldüğü gibi temiz su oyulması için yapılan deney verileri eğrinin altında kalmakta ve hareketli taban oyulması için yapılan deneylerdeki veriler ise eğrinin üstünde kalmaktadır. Ayrıca hem temiz su oyulmasında hem de hareketli taban oyulmasında lineer bir artış görülebilmektedir.



Şekil 7.16 $p=7$ cm ve $L/b=1$ için $H_d/p-Re$ değişimi



Şekil 7.17 Temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması halindeki deneysel verilerin Shields diyagramında gösterilişi.

7.5 Hareketli Tabanlı Doğrusal Kanallarda Yanal Akımın Taban Profiline Etkisi

Bu bölümde, farklı akım şartlarında kum tabandan itibaren $p=7$ cm kret yüksekliğine sahip $L=40$ cm uzunluğundaki yan savak için $V_1/V_{kr}>0.45$ için kanal taban topoğrafyasında meydana gelen değişimler “temiz su oyulması” ve “hareketli taban oyulması” halleri için incelenmiştir. $V_1/V_{kr}<0.45$ için yanal akımdan dolayı yan savak boyunca herhangi bir yerel oyulma gözlenmemiştir. Taban topoğrafyası ile ilgili akım şartları Çizelge 7.1’de özetlenmiş ve elde edilen taban topoğrafyaları sırasıyla Şekil 7.18, Şekil 7.20, Şekil 7.22, Şekil 7.24 ve Şekil 7.26’de verilmiştir. Ayrıca bu topoğrafyalarla ilgili alınan fotoğraflar Şekil 7.19, Şekil 7.21, Şekil 7.23, Şekil 7.25 ve Şekil 7.27’de sunulmuştur.

Çizelge 7.1 $L=40$ cm ve $p=7$ cm’lik yan savak için akım şartları

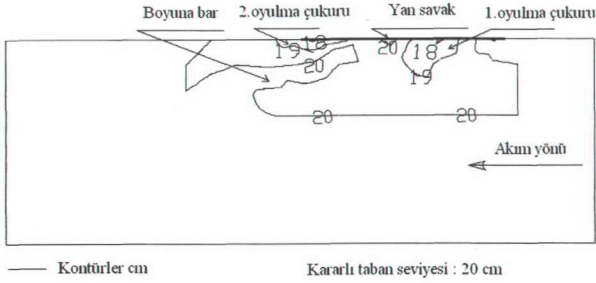
Deney No	Ana Kanal Debisi Q_1 (lt/s)	Savaklanma Debisi Q_w (lt/s)	Savak Mem. Ort. Hız V_1 (m/s)	h_1 (cm)	Savak Mans. Ort. Hız V_2 (m/s)	V_{kr} (m/s)	V_1/V_{kr}	Fr_1	V_2/V_{kr}
1	17,9	15,4	0,31	14,5	0,018	0,449	0,69	0,247	0,04
2	25,9	23,2	0,38	17	0,039	0,453	0,84	0,249	0,087
3	41,0	23,9	0,59	17,2	0,250	0,454	1,30	0,458	0,55
4	52,6	21,2	0,78	16,9	0,465	0,453	1,72	0,602	1,03
5	54,1	15,4	0,99	13,8	0,701	0,439	2,25	0,851	1,59

İlk iki deneyde, yan savak membasındaki akım hızı, tanenin harekete başlama hızı V_{kr} hızından küçük olduğu için “temiz su oyulması”, sonraki üç deneyde ise yan savak mambadaki akım hızı V_{kr} hızından büyük olduğu için “hareketli taban oyulması” görülmüştür.

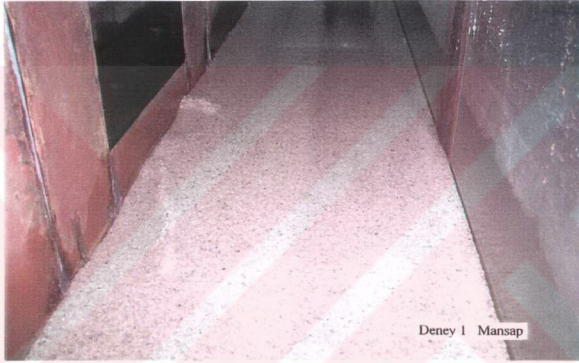
Çizelge 7.1’de görüldüğü gibi ilk deneyde yan savağın memba ve mansabındaki ana kanaldaki ortalama hız kritik hızdan küçüktür ($V_1/V_{kr}<1$ ve $V_2/V_{kr}<1$). Yan savak boyunca yerel oyulmaların başladığı gözlenmiş ve iki farklı oyulma çukuru meydana gelmiştir. Şekil 7.18’de birinci oyulma çukuru yan savak membasında, ikinci oyulma çukurunun ise yan savak mansabında meydana geldiği gözlenmiştir. Yan savağın memba kısmındaki hız, mansaptaki hızdan büyük olduğu için basınç farkından ve ayrıca giriş etkisinden dolayı yan savağın orta kısmı ile memba kısmı arasında, su yüzünden tabana doğru saat ibresi yönünde

vorteks sisteminin olduğu ve bu vorteks sistemin yan savağın ilk yarısında yerel oyulmaya neden olduğu gözlenmiştir. Bu oyulma çukuru yan savağa hemen hemen bitişik ve yarım daire şeklinde büyüyerek gelişmiş ve büyük hızlarda oyulma çukurunun çapı yan savağın memba kısmına kadar gelişmiştir. Ayrıca birinci oyulma çukurundan sökülen malzeme yan savağın membasında bir eşik oluşturmuştur. İkinci oyulma çukuru ise yan savağın orta kısmı ile mansab kısmı arasında gelişmiş ve oyulma çukurundan taşınan malzeme, dış kıyı ile belli bir açı yapan bir barın oluşmasına neden olmuştur. Bu oyulmaya sebep olan Şekil 1.14’de görülen, (III) nolu vortektir. Oluşan bu bar ile dış kıyı arasındaki açının 20° - 30° arasında değiştiği ve ana kanaldaki hızın artmasıyla bu açının da azalarak kıyıya paralel hale geldiği gözlenmiştir. Yan savak boyunca mansaba doğru sekonder akımın gücü arttığı (savaklanma sebebiyle boyuna hız azalarak sekonder akım şiddetlenmekte) için en büyük oyulma derinliği yan savağın mansap kısmında gelişmiş ve bar yüksekliği de artmıştır. Bundan dolayı temiz su oyulması hali için rölatif denge oyulma derinliği olarak, bar ile dış kıyı arasındaki oyulma derinliği dikkate alınmıştır. Her iki oyulma çukurunun genişliğinin ana kanal eksenini geçmediği ve oyulma çukurunun yan savağın mansabını $b/2$ (kanal genişliğinin yarısı) kadar geçtiği gözlenmiştir. Bu hız kriterinde birinci ve ikinci oyulma çukuru derinlikleri birbirine yakın çıkmıştır. Meydana gelen bar ana kanal genişliğinin %25 lik kısmına kadar gelişmiş (dış kıyidan 10 cm) ve 150 dakika sonunda denge oyulma derinliğine ulaşılmıştır. 1 nolu deney için çekilen resimler Şekil 7.19’da görülmektedir.

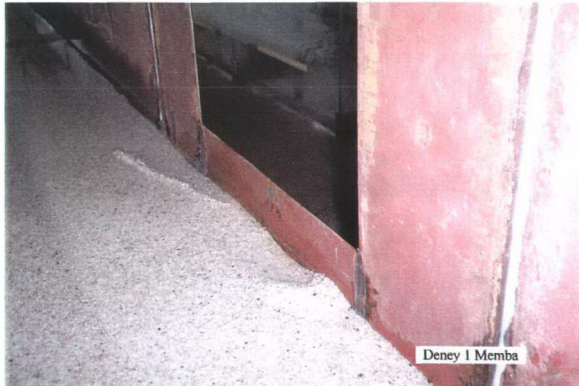
2 nolu deneyde 1 nolu deneyde olduğu gibi V_1/V_{kr} ve V_2/V_{kr} boyutsuz hız değerleri 1’den küçüktür. Şekil 7.20’de görüldüğü gibi, giriş etkisi sebebiyle yan savağın orta kısmı ile memba kısmı arasında bir eşik olduğu gözlenmiştir. Ana kanaldaki akım hızının büyümesiyle akımın ataleti daha da artmış, böylece giriş etkisinden dolayı oluşan vorteksin şiddetinin azalmasıyla birinci oyulma çukuru gözlenmemiş ve ters akımdan dolayı meydana gelen ikinci oyulma çukurundan taşınan malzeme birinci oyulma çukurunu kapatarak bir eşik oluşturmuştur. Bu eşik Şekil 7.18’deki eşikten daha yüksek ve geniş olmuştur. İkinci oyulma çukuru da Şekil 7.18’deki gibi yan savağın orta kısmı ile mansab kısmı arasında oluşmuş ve Şekil 7.18’deki oyulma çukurundan daha derin ve daha geniş olarak oluşmuştur. Zamana bağlı olarak bar ilk önce yan savağın orta kısmı ile mansab kısmı arasında dış kıyı ile belli bir açı yaparak oluşmuş, zamanla bu bar yan savağın dış kıyısına paralel bir hale gelmiş ve nihai durumda dış kıyı ile ters yönde belli bir açı yaparak iç kıyıya kadar gelişmiştir. Barın yüksekliği dış kıyidan iç kıyıya doğru azalmıştır. İkinci oyulma çukurundan taşınan malzemenin bir kısmı barı oluştururken bir kısmı da yanal akımdan dolayı sağanak kanalına savaklanmıştır.



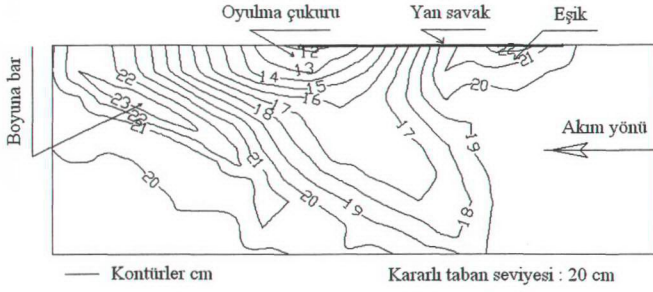
Şekil 7.18 $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler



Şekil 7.19 a $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü



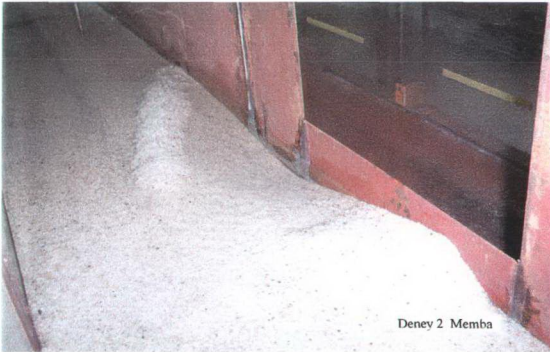
Şekil 7.19 b $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü



Şekil 7.20 $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler



Şekil 7.21 a $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görüntüsü



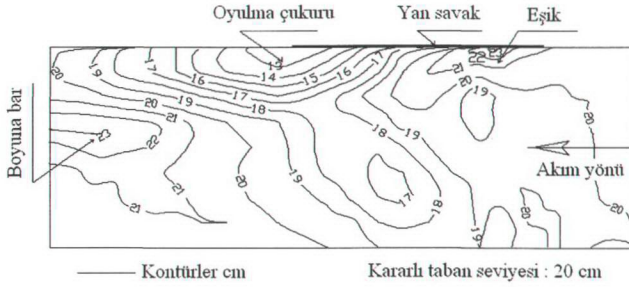
Şekil 7.21 b $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görüntüsü

Rölatif denge oyulma derinliği Şekil 7.18'deki rölatif denge oyulma derinliğinden daha büyük olmuş ve biraz mansaba doğru ilerlediği gözlenmiştir (5 cm). Yapılan deneylerde V_1/V_{kr} ve V_2/V_{kr} değerlerinin artmasıyla (boyuna hız) maksimum oyulma çukurunun yeri mansaba doğru kaymaktadır. Ağaçcioğlu (1995), ana kanaldaki akımın Froude sayısının (boyuna kinetik enerjinin) artmasıyla ters akımın küçüldüğünü, yan savak mansabına ilerleyerek kaybolduğunu ve bu noktadan itibaren yan savak uçunda hidrolik sıçramanın meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu deneye ait resimler Şekil 7.21'de görülmektedir.

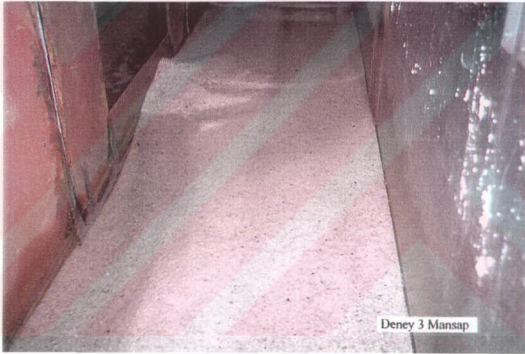
Şekil 7.23'de verilen 3 nolu deneye ait fotoğraflarda yan savak membasındaki akım hızı V_{kr} hızından büyük olduğu için taban dalgaları görülmüştür. Yan savağın mansabında ise kanaldaki hız V_{kr} 'den küçük olduğu için taban dalgaları gözlenmemiştir ($V_1/V_{kr}>1$ ve $V_2/V_{kr}<1$). Şekil 7.20'deki gibi yan savağın ortası kısmı ile memba kısmı arasında giriş etkisinden dolayı dış kıyıya yapışık bir eşğin olduğu gözlenmiştir. Yan savağın membasına doğru ilerleyen taban dalgası giriş etkisiyle yan savak membasında oluşan eşği daha da büyütmüş ve yan savağın mansabında ters akımdan dolayı oluşan oyulma çukurundan taşınan bir miktar malzeme ile de eşğin yüksekliğini daha da artırmıştır. Ayrıca membadan gelen taban dalgaları ve mansab oyulma çukurundan taşınan malzemenin bir kısmı, oluşan eşğin üzerinden sağanak kanalına savaklanmıştır. Yan savağın mansabına doğru hareket eden taban dalgası, ters akımdan dolayı yan savağın orta kısmını geçememiş ve yan savağın membasında yığılmıştır. Yan savağın mansabında ise ters akımdan dolayı Şekil 1.14'deki (III) nolu ve aşağı yönlü olan vorteks dolayısıyla büyük bir oyulma çukuru oluşmuştur. Oluşan bu taban topoğrafyasının Fares (1995) tarafından Allen Water'da görülen ve Şekil 5.8 C-C kesitinde verilen taban profilinde de görülmektedir. Yan savağın mansabında dış kıyıya paralel bir bar oluşmuştur. Yan savak membasındaki taban dalgasının yüksekliği 1,5 cm ölçülmüştür.

Şekil 7.24 ve Şekil 7.26'da Çizelge 7.1'de verilen 4 ve 5 nolu topoğrafyada ise, hem yan savak membasındaki akım hızının ve hem de yan savağın mansabındaki akım hızının V_{kr} 'ten büyük olduğu görülmektedir ($V_1/V_{kr}>1$ ve $V_2/V_{kr}>1$). Bundan dolayı, yan savağın memba ve mansabında taban dalgaları görülmektedir. Yan savağın membasında büyük bir eşik oluşmuştur. Yan savağın mansabında da tabanda hareket başladığı için ve ters akımın şiddetinin de azalmasıyla (ana kanalda boyuna hız daha büyük) membadan gelen taban dalgalarının mansaba doğru ilerledikleri gözlenmiş ve oyulma çukurunu biraz doldurdıkları görülmüştür. Oyulma çukuru derinliği diğer deneylerdeki oyulma çukuru derinliklerinde daha azdır (hareketli taban oyulması). Aynı şekilde yan savağın mansabında dış kıyıya paralel bir bar görülmüştür. 4 ve 5 nolu deneylerde oluşan taban topoğrafyalarının fotoğrafları da Şekil

7.25 ve Şekil 7.27’de görülmektedir. V_1 ve V_2 hızları farklı olduğundan membadan daha fazla katı madde taşınmaktadır. Memba-mansap arasında taşınan katı madde farkı sağanak kanalına savaklanmaktadır.



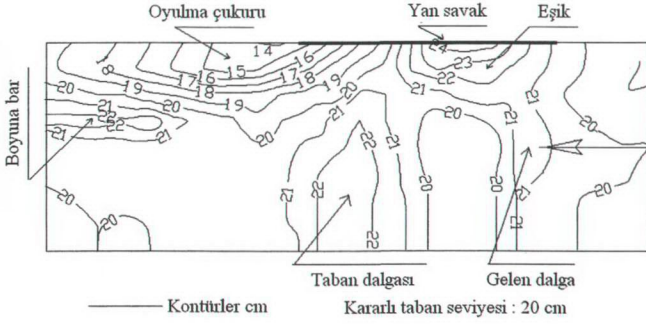
Şekil 7.22 $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler



Şekil 7.23 a $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü



Şekil 7.23 b $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü



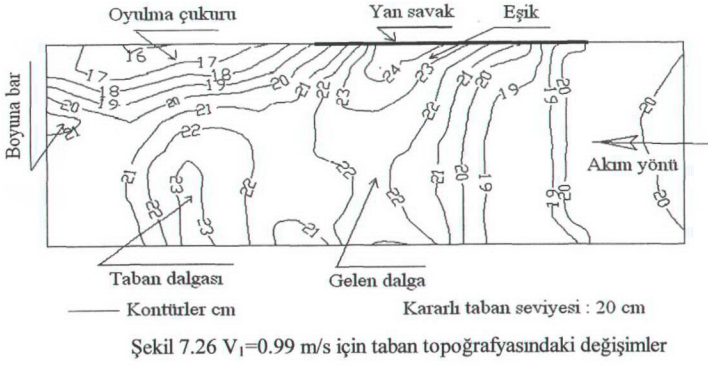
Şekil 7.24 $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler



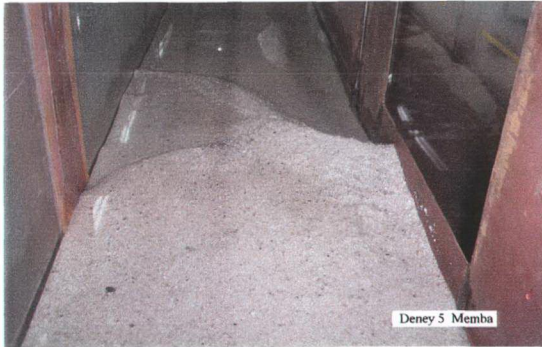
Şekil 7.25 a $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü



Şekil 7.25 b $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü



Şekil 7.27 a $V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görüntüsü

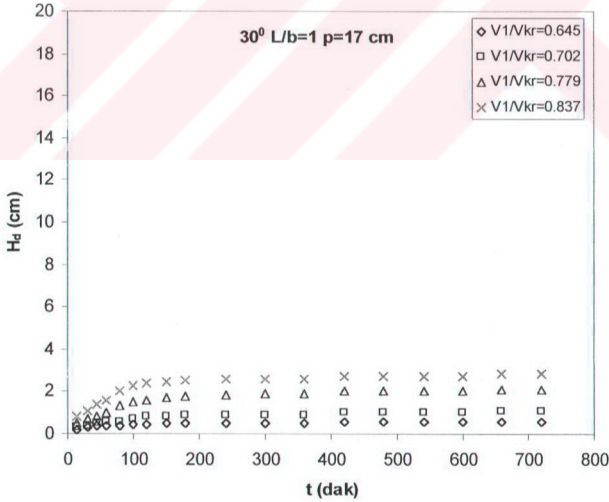


Şekil 7.27 b $V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görüntüsü

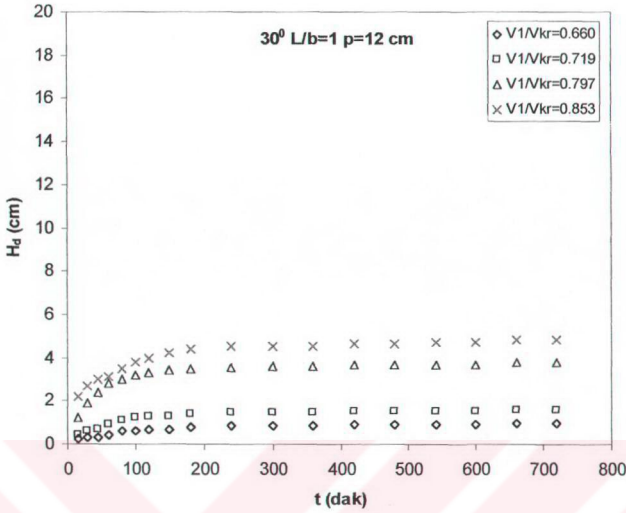
7.6 Kıvrımlı Kanalda Oyulma Derinliği H_d 'nin t (zaman) ile Değişimi

Bu bölümde $\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım açısında $L=40$ cm uzunluklu ve $p=7,12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklarda farklı akım şartlarında oyulma derinliği H_d 'nin zamanla değişimi temiz su oyulması için incelenmiş ve sırasıyla Şekil 7.28, Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da verilmiştir. Doğrusal kanalda olduğu gibi temiz su oyulması için ana kanaldaki hız, tabanda hareketin başlangıç hızı olan V_{kr} 'den küçük seçilmiştir. Deneyler $V_1/V_{kr}=0.5-1.0$ aralığında gerçekleştirilmiş ve 720 dakika süreyle yapılmıştır. Oyulma derinliği olarak doğrusal kanalda olduğu gibi, yan savağın mansabında ters akım bölgesindeki maksimum oyulma derinliği dikkate alınmıştır.

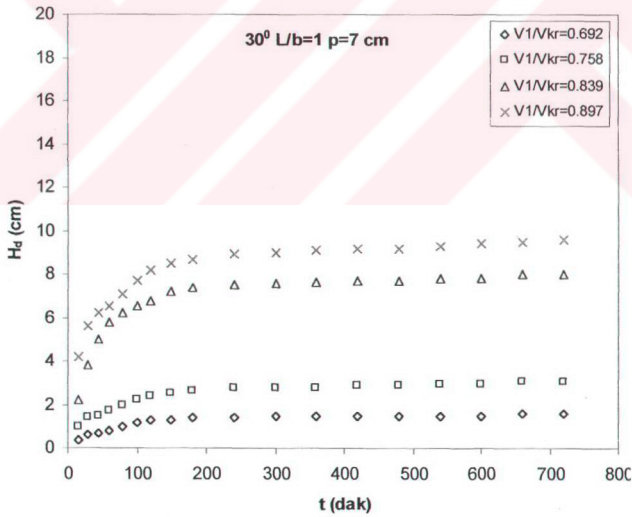
Şekil 7.28'de 17 cm kret yüksekliğine sahip yan savakta, küçük V_1/V_{kr} değerlerinde yaklaşık olarak 120 dakika sonunda denge oyulma derinliklerine ulaşılrken, büyük V_1/V_{kr} değerlerinde denge oyulma derinliğine 200 dakika sonunda ulaşılmıştır. Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da 12 cm ve 7 cm kret yüksekliğindeki yan savaklarda denge oyulma derinliklerine 150-300 dakika civarında ulaşılmıştır. Ayrıca her üç şekilde görüldüğü gibi temiz su oyulması halinde belli bir zamanda denge oyulma derinliğine ulaştıktan sonra eğri asimptot olarak devam etmektedir.



Şekil 7.28 30° 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=17$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi



Şekil 7.29 30°'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=12$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi

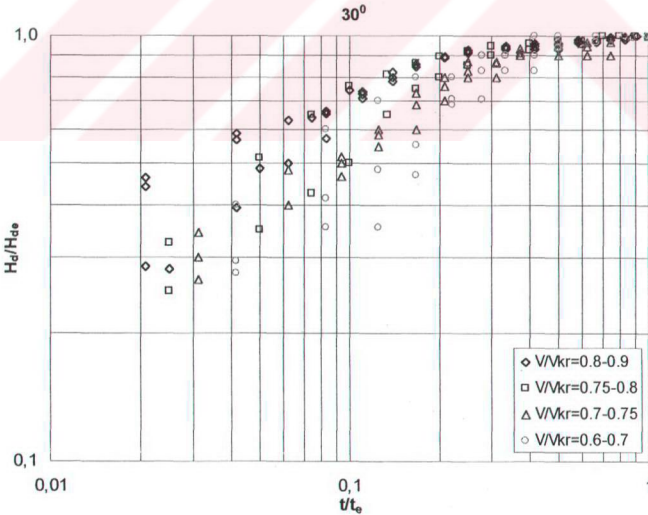


Şekil 7.30 30°'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=7$ cm'lik yan savakta temiz su oyulmasının zamanla değişimi

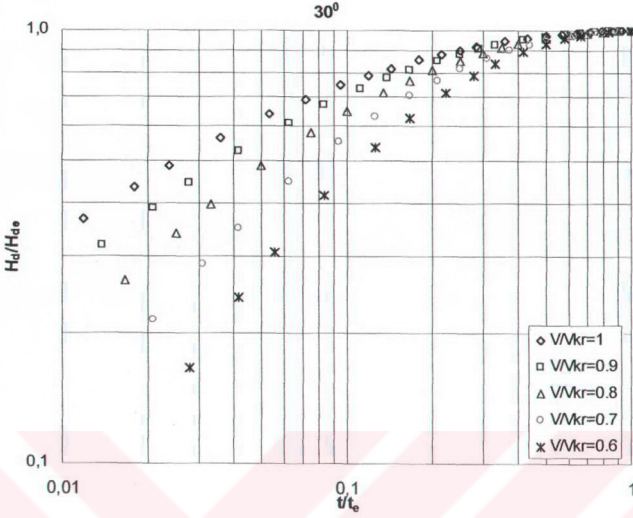
30°'lik kıvrım kesiminde $H_d/H_{de}-t/t_e$ değişimi $p=7, 12$ ve 17 cm kret yüksekliğinde ve $L=40$ cm uzunluğundaki yan savaklardaki veriler kullanılarak logaritmik formda elde edilmiş ve Şekil 7.31'de verilmiştir. Doğrusal kanalda (Şekil 7.7) ve köprü ayaklarında (Şekil 2.12) olduğu gibi bütün eğriler (1,1) noktasından geçmekte ve eğriler V/V_{kr} ve oyulma derinliklerinin artmasıyla (veya zamanın azalması) artmaktadır. Şekil 7.31'den temiz su oyulması için 7.2 bağıntısı elde edilmiş ve aşağıda verilmiştir.

$$\frac{H_d}{H_{de}} = \exp \left\{ -0.055 \left[\frac{V_{kr}}{V_1} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right]^{1.95} \right\} \quad (7.2)$$

7.2 bağıntısı kullanılarak çeşitli V_1/V_{kr} değerleri için $H_d/H_{de}-t/t_e$ değişimi çizilerek Şekil 7.32'de verilmiştir. Ayrıca 30°'lik kıvrım bölgesinde temiz su oyulması için yapılan deneylerde akım hızına bağlı olarak denge zamanının %10'luk kısmında oyulma derinliğinin %40-70'lik kısmına ulaşıldığı ve benzer şekilde denge zamanının %50'lik kısmında denge oyulma derinliğinin %90-95 civarında olduğu görülmektedir. Kıvrımlı kanalda doğrusal kanala göre daha kısa sürelerde denge oyulma derinliklerine ulaşılmıştır. Daha sonra kıvrımlı kanalda temiz su oyulmasındaki diğer deneyler savak kret yüksekliği ve V_1/V_{kr} 'e bağlı olarak 150-400 dakika civarında sürdürülmüştür.



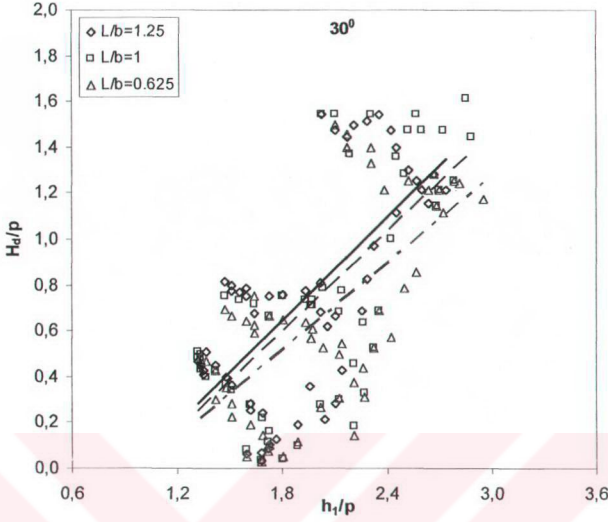
Şekil 7.31 30°'lik kıvrım bölgesinde temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin gelişimi



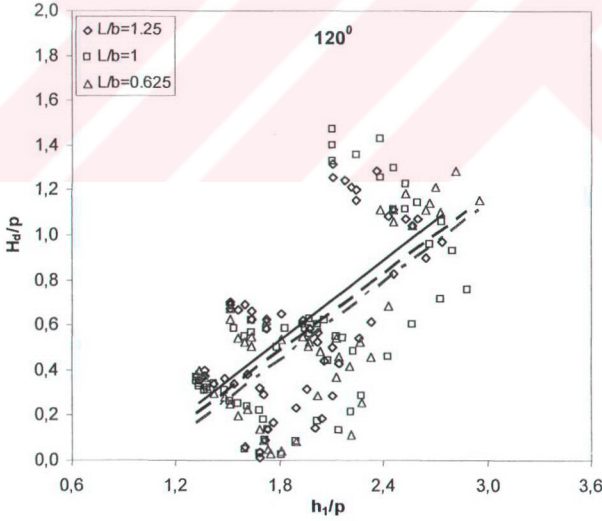
Şekil 7.32 (7.2) denklemine göre oyulma derinliğinin gelişimi

7.7 Kıvrımlı Kanalda Rölatif Denge Oyulma Derinliği H_d/p 'nin Rölatif Akım Derinliği h_1/p ile Değişimi

Bu bölümde, kıvrımlı kanalın $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ 'lik kısmında dikdörtgen enkesitli $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluğunda ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklarda farklı akım şartlarında $H_d/p-h_1/p$ değişimi incelenmiş ve üç farklı boyutsuz yan savak uzunluğu (L/b) için Şekil 7.33 ve Şekil 7.34'de verilmiştir. Doğrusal kanalda olduğu gibi temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması hali için yapılan deneylerde h_1/p arttıkça H_d/p 'nin büyüdüğü tespit edilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi büyük kret yükseklikli yan savaklarda cidar sürtünmesi fazla olduğundan dolayı Şekil 1.14'de görülen (III) nolu sekonder akımın şiddeti sürtünme ile azalmakta ve bunun sonucunda H_d/p değeri de küçülmektedir. Ayrıca boyutsuz yan savak uzunluğu (L/b) ve savaklanma oranı (Q_w/Q_1 , dolayısıyla h_1/p) arttıkça (Şekil 1.15) boyuna akımın kinetik enerjisi azalmakta ve yanal akımın yarattığı sekonder akımın gücü de artmaktadır. Bundan dolayı doğrusal kanalda olduğu gibi boyutsuz L/b yan savak uzunluğu değeri arttıkça rölatif denge oyulma derinliği H_d/p değeri de artmaktadır.

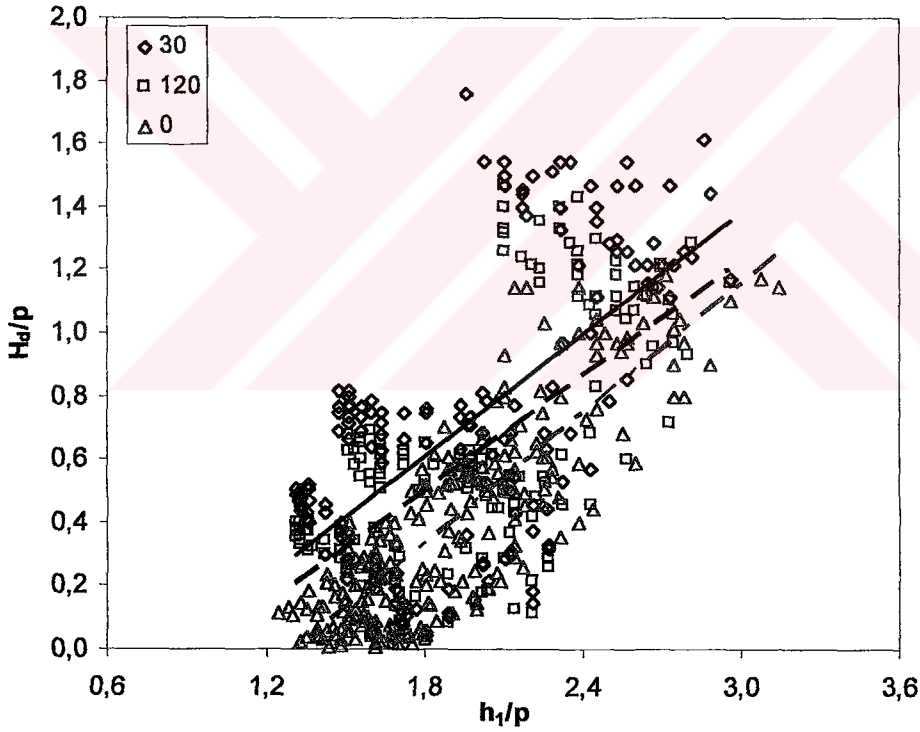


Şekil 7.33 $\theta=30^\circ$ 'de $L/b=0.625$, $L/b=1$ ve $L/b=1.25$ için $H_d/p-h_1/p$ değişimi



Şekil 7.34 $\theta=120^\circ$ 'de $L/b=0.625$, $L/b=1$ ve $L/b=1.25$ için $H_d/p-h_1/p$ değişimi

Şekil 7.35’de doğrusal kanalda ($\theta=0^\circ$) ve kıvrımlı kanalın $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ ’lik kısımlarında H_d/p ’nin h_1/p ile değişimi birarada verilmiştir. Tüm eğriler kullanılan tüm yan savak boyutlarını içermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi doğrusal kanallara göre kıvrımlı kanallarda h_1/p ’ye bağlı olarak H_d/p değeri daha büyük çıkmaktadır. Bunun nedeni de yanal akımın yarattığı sekonder akıma ilave olarak kıvrımlı kanallarda oluşan helikoidal akımın oyulma derinliğini artırmasıdır. Ayrıca kıvrımın $\theta=30^\circ$ ’lik kısımdaki H_d/p değeri $\theta=120^\circ$ ’lik kısımdaki H_d/p değerinden biraz daha büyük çıkmıştır. Ağaçoğlu (1995) tarafından kıvrım boyunca yapılan deneysel çalışmada $\theta=30^\circ$ - 60° civarında en büyük C_d yan savak debi katsayısı elde edilmiştir. Yan savak debi katsayısının artmasıyla savaklanma oranı Q_w/Q_1 artmakta, yanal akım şiddetlenmekte ve bu da oyulma derinliğini artırıcı bir etken olmaktadır. Ayrıca kıvrımlı kanallarda maksimum hız yörüngesi $\theta=30^\circ$ civarında dış kıyıya yönelmekte bu da yanal akımın (dolayısıyla sekonder akımın) daha da kuvvetlenmesine yol açmaktadır.

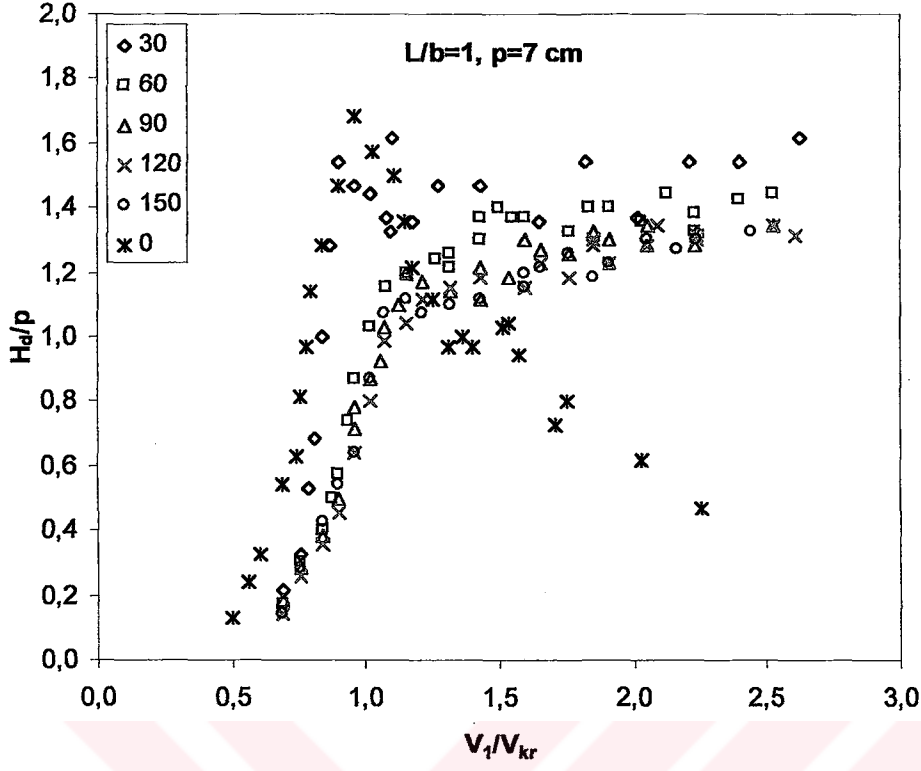


Şekil 7.35 Doğrusal kanal ($\theta=0^\circ$), $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ ’de H_d/p - h_1/p değişimi

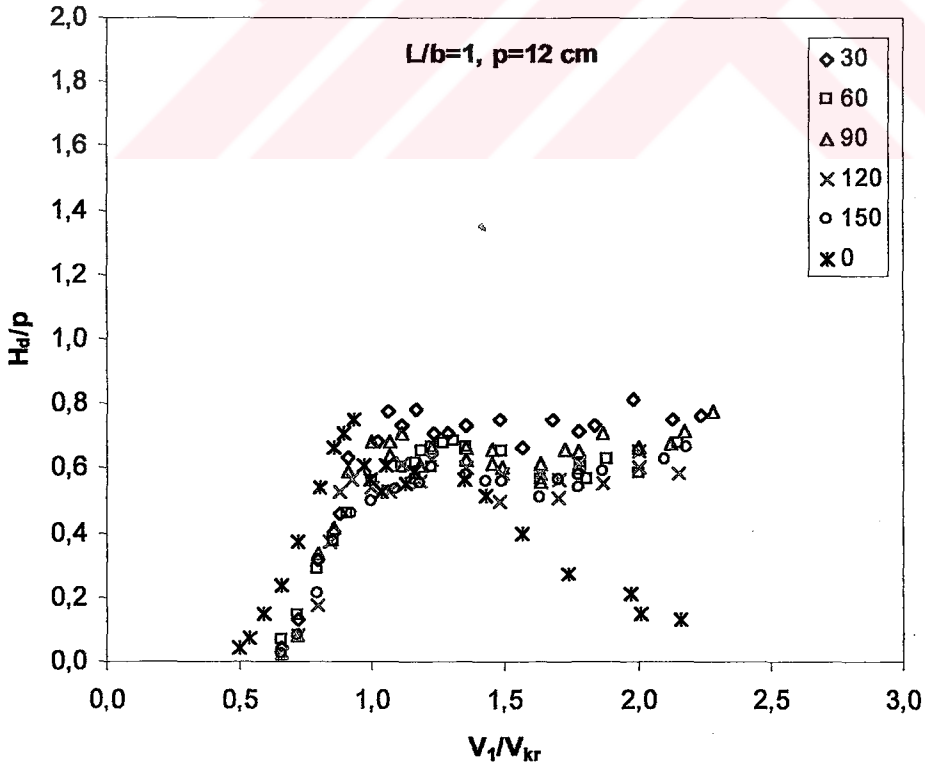
7.8 Kıvrımlı Kanal Boyunca $H_d/p-V_1/V_{kr}$ Değişimi

Bu bölümde önce, kıvrımlı kanalda ($\theta=30^0$, $\theta=60^0$, $\theta=90^0$, $\theta=120^0$ ve $\theta=150^0$) dikdörtgen kesitli $L=40$ cm uzunluğunda ve $p=7$ ve 12 cm kret yüksekliğindeki yan savaklarda farklı akım şartlarında H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile değişimi incelenmiş ve doğrusal kanalda aynı savaklar için elde edilen sonuçlarla birlikte Şekil 7.36 ve Şekil 7.37'de verilmişlerdir. Daha önce bahsedildiği gibi, doğrusal kanalda farklı kret yükseklikli ve farklı uzunluklu yan savaklar için yapılan deneylerde temiz su oyulması hali için H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile lineer bir artış gösterdiği ve $V_1/V_{kr}=0.95-1.0$ arasında maksimum denge oyulma derinliğine ulaştığı tespit edilmişti. Kıvrımlı kanalda ise doğrusal kanalda olduğu gibi temiz su oyulması hali için H_d/p 'nin V_1/V_{kr} ile hemen hemen lineer arttığı ve $V_1/V_{kr}=0.9-1.0$ civarında maksimum denge oyulma derinliğine ulaşıldığı Şekil 7.36 ve Şekil 7.37'de görülebilmektedir. Doğrusal kanalda temiz su oyulması hali için tabanda hareket $V_1/V_{kr}>0.45$ değerinden sonra başlarken kıvrımlı kanalda ise tabanda hareket $V_1/V_{kr}>0.50$ değerinden sonra başlamaktadır. Bölüm 6.9'da ifade edildiği gibi, h_1 su derinliği olarak yan savak başlangıcında kanal eksenindeki akım derinliği dikkate alınarak akım hızı ve Froude sayısı gibi parametreler belirlenmiştir. Doğrusal kanalda bu noktadaki hız o enkesitteki ortalama hıza daha yakındır. Halbuki kıvrımda maksimum hız yörüngesinin davranışı bunu değiştirmekte ve kanal eksenindeki su derinliğine göre bulunan V_1 hızı ortalama hızdan daha fazla sapmaktadır. Dolayısıyla temiz su oyulmasında, doğrusal kanala göre kıvrımlı kanalda elde edilen sonuçlar V_1/V_{kr} 'e göre ötelenmiş gözükmemektedir. Ayrıca kıvrımlı kanallarda kıvrım tarafından yaratılan sekonder akım, yanal akım tarafından yaratılan sekonder akımı ((III) nolu vorteks) ve ters akım yapısını bozarak daha etkin hale gelmektedir. Doğrusal kanallarda olduğu gibi kıvrımlı kanallarda da aynı akım şartları için kret yüksekliği arttıkça cidar sürtünmesi dolayısıyla oyulma derinliği azalmaktadır. Şekil 7.36 ve Şekil 7.37'de görüldüğü gibi büyük kret yükseklikli ($p=12$ cm) yan savakta daha küçük rölatif denge oyulma derinlikleri H_d/p elde edilmiştir.

Ağaçcioğlu (1995), maksimum hız yörüngesinin doğrusal yaklaşım kanalında ana kanal ekseninde, kıvrım girişinden itibaren $\theta=30^0$ 'de iç kıyıda, $\theta=30^0$ 'den sonra ise $\theta=60^0$ 'de dış kıyıya yerleştiğini ve $\theta=120^0$ 'ye kadar dış kıyıda kaldığını, $\theta=120^0$ 'den sonra ise tekrar kanal eksenine döndüğünü ifade etmiştir. Araştırmacı maksimum hız yörüngesinin doğrultusunun $\theta=30^0$ civarında, bu bölgede, yanal akım doğrultusuna yakın olduğunu ifade etmiştir. Bu durum, maksimum hız yörüngesini kıvrımın yarattığı sekonder akım ile birlikte daha etkin



Şekil 7.36 Kıvrımlı kanalda $L/b=1$ ve $p=7$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi



Şekil 7.37 Kıvrımlı kanalda $L/b=1$ ve $p=12$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi

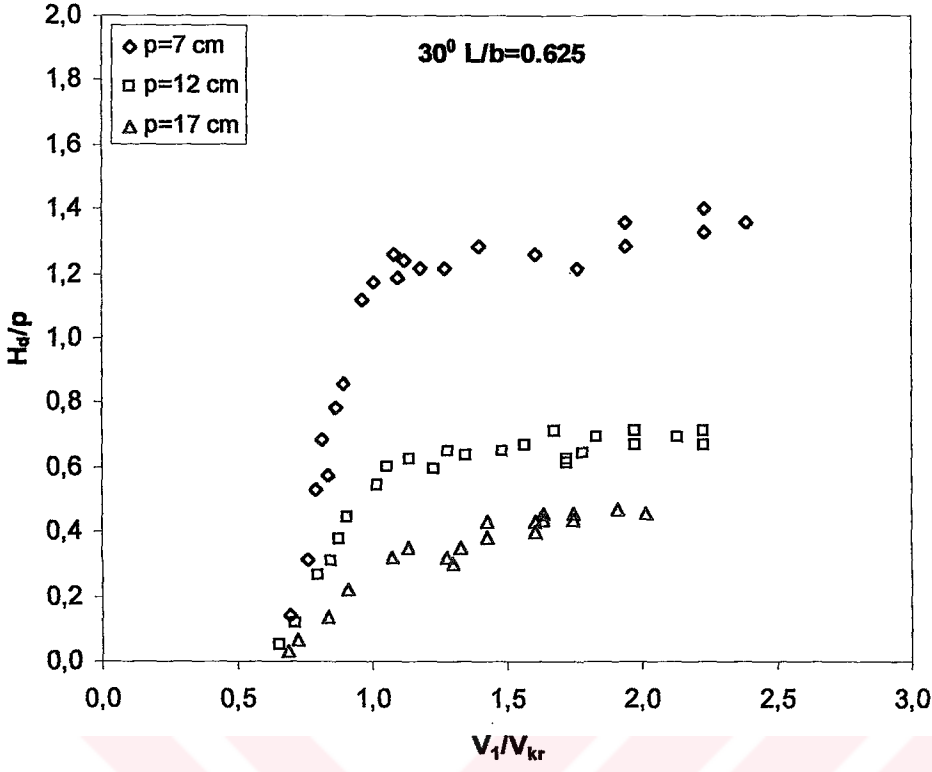
hale getirerek yan savak mansabında yanal akım tarafından yaratılan (III) nolu sekonder yapıyı bozmakta ve doğrusal kanala göre temiz su oyulması için daha küçük oyulma derinliği oluşturmaktadır.

Hareketli taban oyulması hali için kıvrımlı kanallarda, doğrusal kanallara göre tabanda hareket daha küçük V_{kr} hızlarında başladığı gözlenmiştir. Bunun sebebi biraz önce belirtildiği gibi, yan savak membasında kanal eksenindeki su derinliği olarak dikkate alınan h_1 derinliğinin maksimum hız yörüngesinin davranışı sebebiyle ortalama hızdan daha fazla sapmasıdır. Kıvrımlı kanalda $V_1/V_{kr} > 0.95-1.0$ değerinden sonra daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulması başlamaktadır. Doğrusal kanaldakinin aksine, daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulmasında, V_1/V_{kr} değeri arttıkça H_d/p değeri temiz su oyulmasındaki en büyük pik değeri etrafında salınım göstermektedir. Bunun nedeni de kıvrımlı kanallarda, yanal savaklanmadan dolayı meydana gelen sekonder akıma ilave olarak kıvrımın yarattığı sekonder akımın, akım hızındaki artışla şiddetlenmesidir. Kıvrım tarafından yaratılan helikoidal akımın hareketli taban halinde rölatif denge oyulma derinliğini artırıcı bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Şekil 7.36 ve şekil 7.37’de görüldüğü gibi rölatif denge oyulma derinliği temiz su oyulması halinde ($0.5 < V_1/V_{kr} < 0.95-1.0$) hemen hemen lineer artarken, hareketli taban oyulması halinde ($0.95-1.0 < V_1/V_{kr} < 2.5$) salınım göstermektedir. Ağaçoğlu (1995) $\theta=30^\circ$ ve $\theta=60^\circ$ ’ler arasında sekonder akımın etkisinin çok şiddetlendiğini ve $\theta=90^\circ$ ’ye kadar devam ettiğini ve $\theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$ ’lerden sonra bu etkinin azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca Çoşar (1999), 180° ’lik kıvrımlı bir kanalda farklı kret yüksekli ve farklı tepe açılarına sahip üçgen yan savaklarda yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda en büyük C_d yan savak debi katsayılarını kıvrımın $\theta=30^\circ$ ’lik kısmında elde etmiştir. Kıvrımlı kanallarda kıvrımdan dolayı meydana gelen sekonder akım, yanal akım sebebiyle ana kanalda meydana gelen sekonder akımın şiddetlenmesine ve daha fazla savaklanmaya sebep olmakta, yan savak debi katsayısının doğrusal kanallardakine göre daha büyük değerler almasına neden olmaktadır. Ağaçoğlu (1995) yaptığı deneylerde $\theta=30^\circ$ ve $\theta=60^\circ$ ’lerde yan savak debi katsayısının büyük değerler aldığını ve salınımlar gösterdiğini tespit etmiştir. 180° ’lik hareketli tabana sahip kıvrımlı bir kanalda $\theta=30^\circ-45^\circ$ civarında sekonder akımın etkisi en büyük şiddete sahiptir. Şekil 7.36 ve Şekil 7.37’de $\theta=30^\circ$ ’de en büyük oyulma derinliklerine ulaşılmıştır. $\theta=120^\circ$ ve $\theta=150^\circ$ ’lerde daha küçük oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Kıvrımlı kanalın ilk yarısındaki ($\theta=0^\circ-\theta=90^\circ$) sekonder akımın etkisi ikinci yarısındakinden ($\theta=90^\circ-\theta=180^\circ$) daha fazla olduğu için kıvrımın ilk yarısında daha büyük oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Doğrusal kanalda olduğu gibi kıvrımlı kanalda da oyulma çukurunun yan savağın mansabında

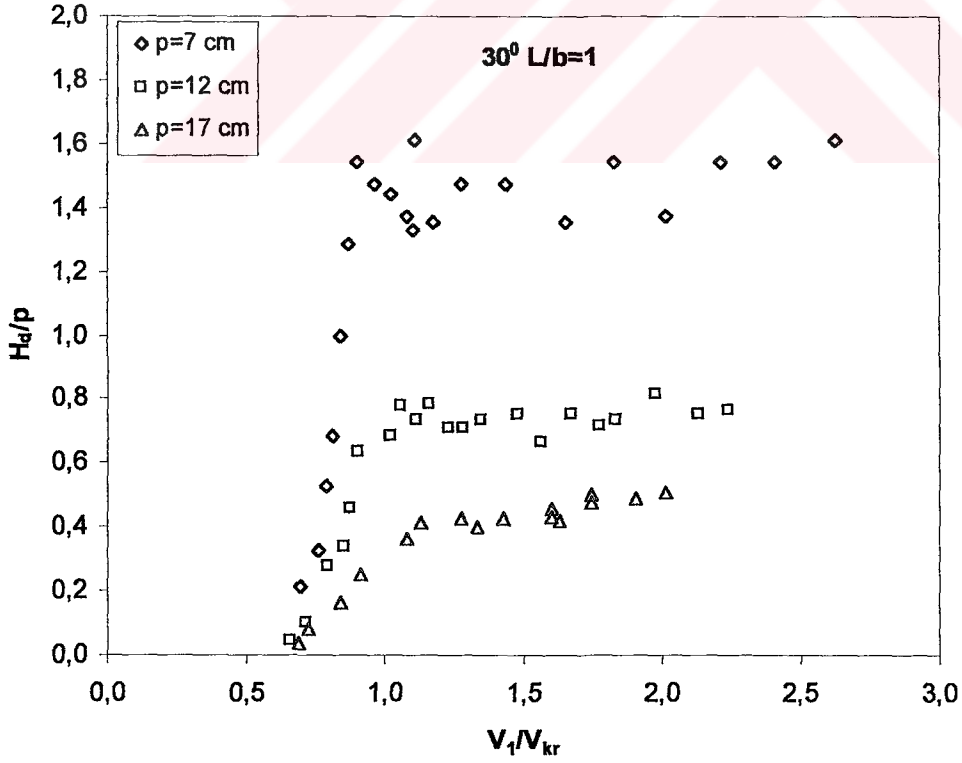
oluştugu gözlenmiştir. Ağaçcioğlu (1995), artan Froude sayısı ile, özellikle $Fr_1 > 0.4$ değerinden sonra, kıvrımın yarattığı sekonder akımın oldukça şiddetlendiğini (hızın karesi ile) belirtmiştir. Doğrusal kanaldakinin aksine, kıvrımlı kanalda hareketli taban oyulması halinde oyulma derinliğindeki artışın sebebi de budur.

Şekil 7.38, Şekil 7.39 ve Şekil 7.40'da sırasıyla $\theta=30^\circ$ için $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluğundaki yan savaklar için ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yüksekliğinde farklı akım şartlarında $H_d/p - V_1/V_{kr}$ değişimi incelenmiştir. Her üç şeklide de görüldüğü gibi $V_1/V_{kr} < 0.5$ değerlerinde oyulma yoktur. Doğrusal kanallarda olduğu gibi küçük kret yükseklikli yan savaklarda temiz su oyulması daha küçük V_1/V_{kr} değerlerinde başlamakta ve temiz su oyulması hali için $H_d/p - V_1/V_{kr}$ ile yaklaşık lineer bir artış göstermekte ve $V_1/V_{kr}=0.95-1.0$ civarında maksimum oyulma derinliğine ulaşmaktadır. Fakat kıvrımlı kanallarda temiz su oyulması hali için daha küçük H_d/p değerlerine ulaşılmıştır. Her üç şekilden de görüldüğü gibi $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluklu ve $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklar için $V_1/V_{kr} > 0.95-1.0$ değerlerinden sonra daimi sürüntü maddesi oyulması başlamaktadır. Daimi sürüntü maddesi oyulmasında, doğrusal kanallarda V_1/V_{kr} değeri arttıkça H_d/p değeri azalırken, kıvrımlı kanallarda ise yanal akımdan dolayı oluşan sekonder akıma ilaveten kıvrım tarafından yaratılan sekonder akım şiddetlenmekte ve bu da yan savağın mansabındaki oyulma çukurunun derinliğini artırmaktadır.

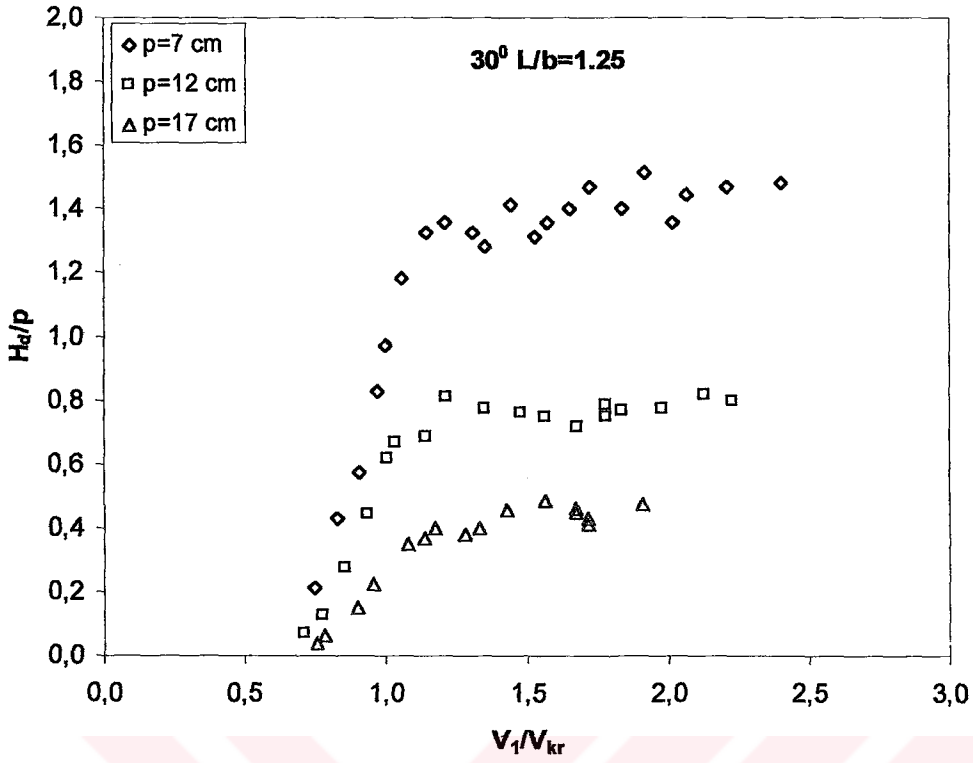
Şekil 7.41, Şekil 7.42 ve Şekil 7.43'de kıvrımlı kanalın $\theta=30^\circ$ 'lik kısmında sırasıyla $p=7, 12$ ve 17 cm kret yüksekliklerinde ve $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluğundaki yan savaklar için farklı akım şartlarında $H_d/p - V_1/V_{kr}$ değişimi L/b 'ye göre incelenmiştir. Daha önce büyük uzunluklu yan savaklarda aynı hız ve savak yükü için savaklanma oranı Q_r daha fazla olduğundan savak tarafından yaratılan sekonder akımın şiddetinin arttığı ve bundan dolayı büyük uzunluklu yan savaklarda ($L/b > 1$ 'den sonra) daha büyük oyulma derinliklerine ulaşıldığından bahsedilmiştir (Ağaçcioğlu, 1995). Şekil 7.41, Şekil 7.42 ve Şekil 7.43'de L/b 'ye bağlı olarak H_d/p 'nin artışı belirgin olarak görülememiştir. Bu, L/b 'ye göre aynı savak yüklerinde çalışılmamasından kaynaklanmıştır.



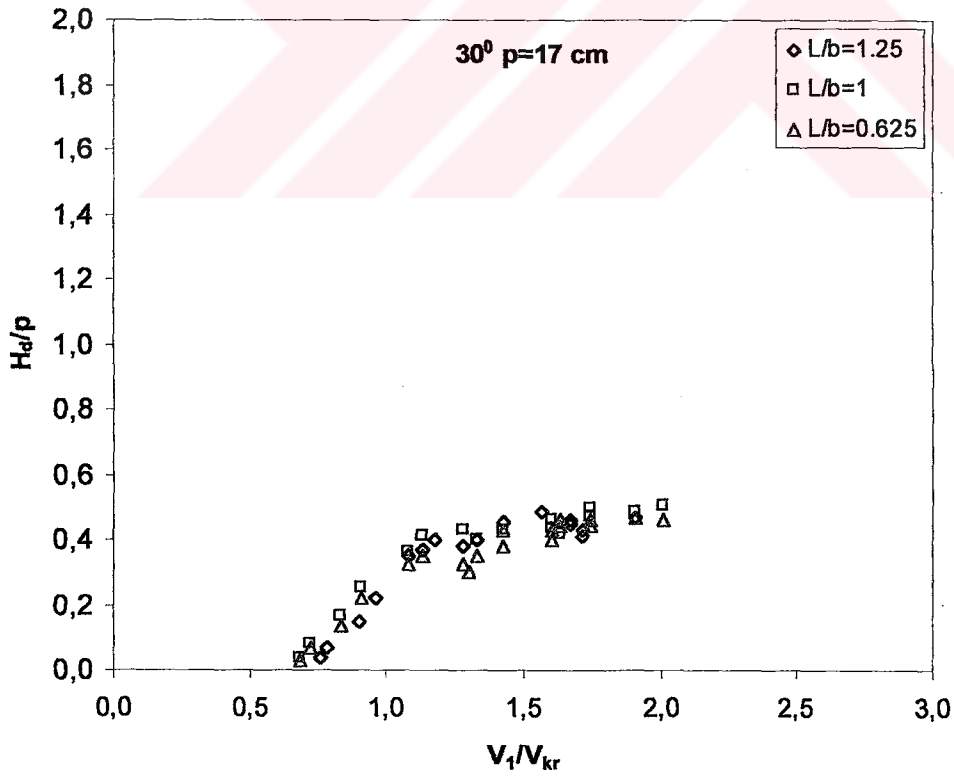
Şekil 7.38 $\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=0.625$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



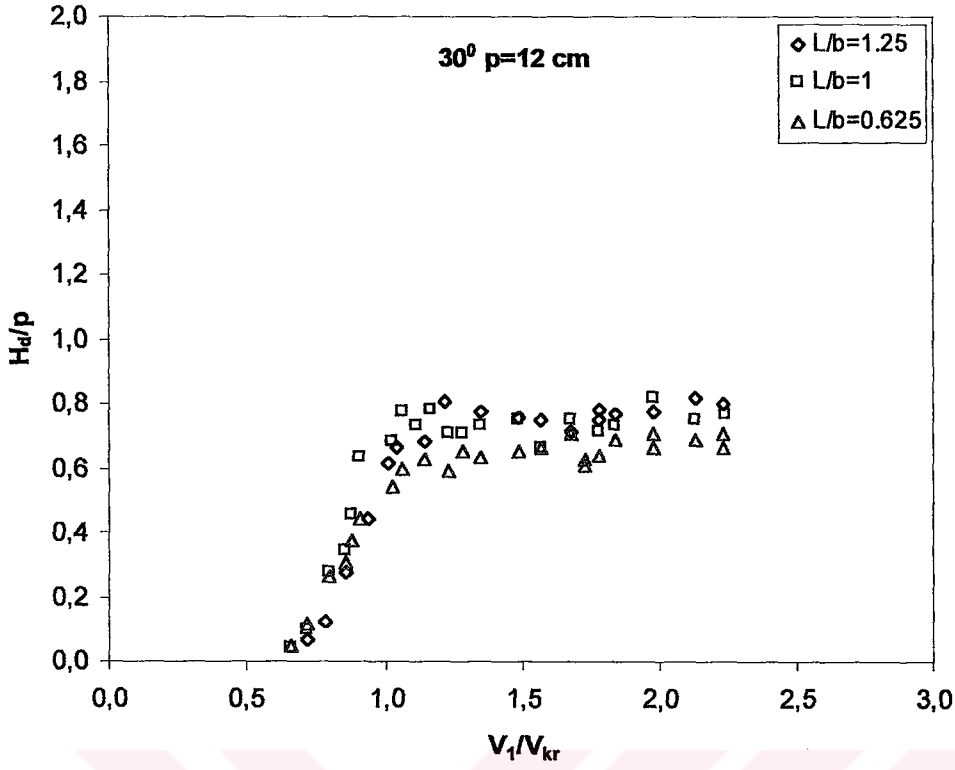
Şekil 7.39 $\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



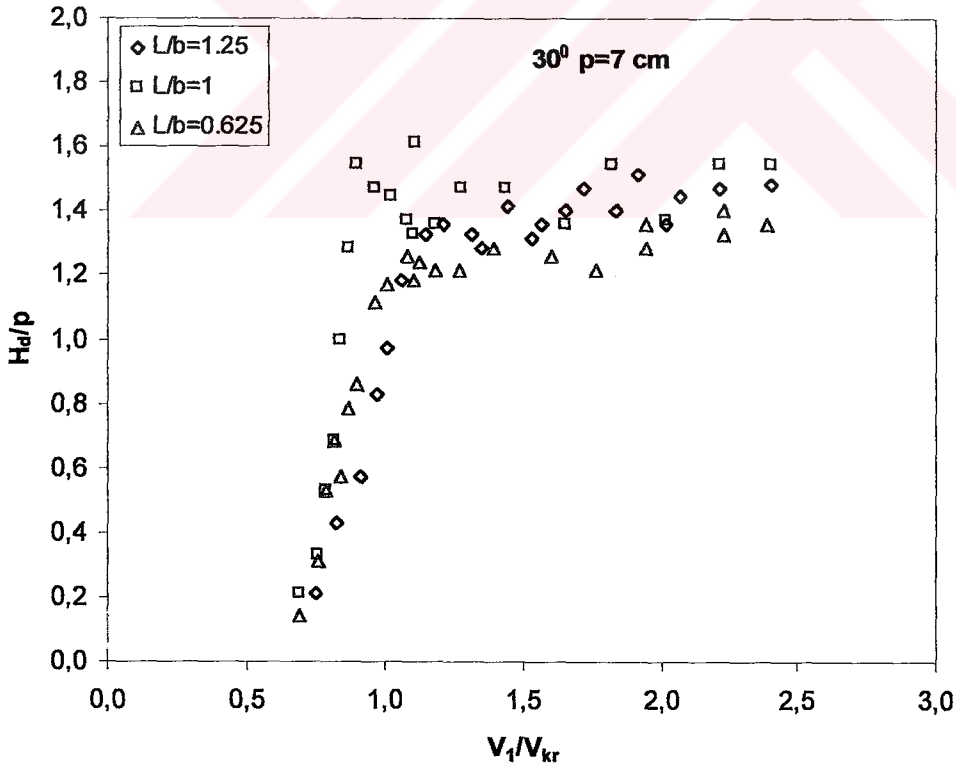
Şekil 7.40 $\theta=30^\circ$ 'lık kıvrım bölgesinde $L/b=1.25$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



Şekil 7.41 $\theta=30^\circ$ 'lık kıvrım bölgesinde $p=17$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



Şekil 7.42 $\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde p=12 cm ve L/b=0.625, L/b=1, L/b=1.25 için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi

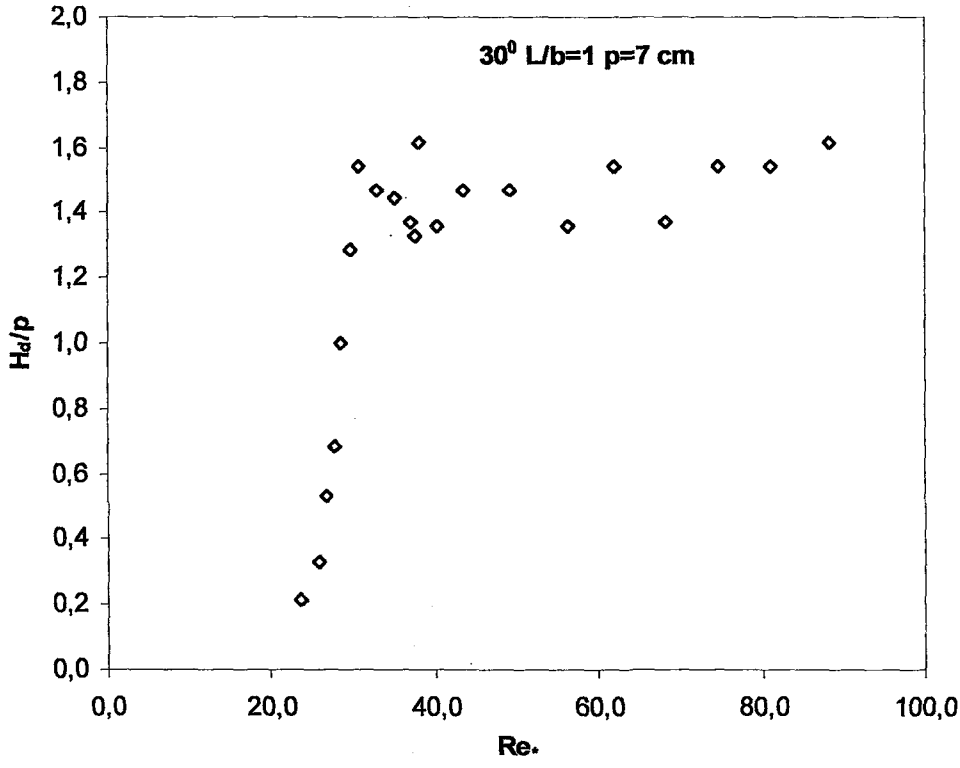


Şekil 7.43 $\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde p=7 cm ve L/b=0.625, L/b=1, L/b=1.25 için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi

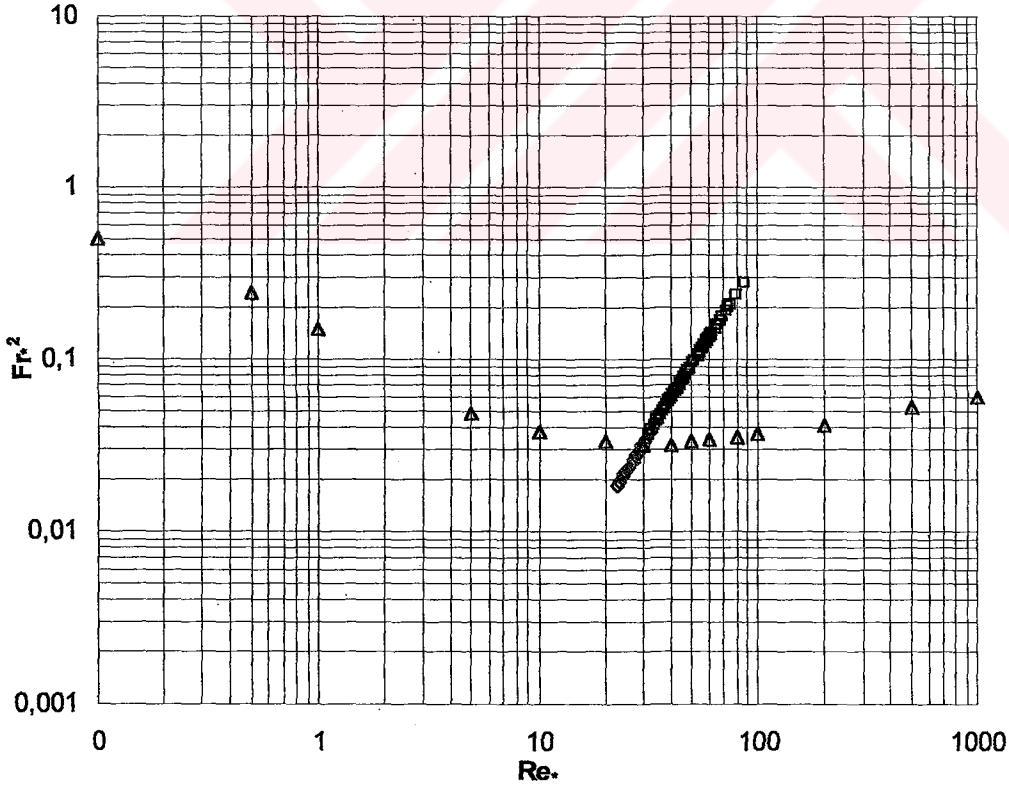
Şekil 7.44'de 30^0 'lik kıvrım bölgesinde temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması için rölatif denge oyulma derinliği H_d/p 'nin tane Reynolds sayısı $Re_* (u_*d/v)$ ile değişimi verilmiştir. Doğrusal kanalda olduğu gibi kıvrımlı kanalda da temiz su oyulması halinde H_d/p 'nin Re_* ile değişimi hemen hemen lineer olarak artmakta ve fazla saçılım görülmemektedir. Hareketli taban oyulması halinde ise temiz su oyulması pik değerinin etrafında salınım göstermekte ve daha fazla saçılım olmaktadır.

Şekil 7.45'de ise 30^0 'lik kıvrım bölgesinde temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması halinde dokuz farklı yan savakla yapılan deneysel veriler doğrusal kanalda olduğu gibi Shields diyagramında gösterilmiştir. Doğrusal kanalda olduğu gibi deneyler $Re_*=10-100$ aralığında yapılmış, ayrıca şekilden de görüleceği gibi temiz su oyulması için yapılan deney verileri eğrinin altında kalmakta ve hareketli taban oyulması için yapılan deneylerdeki veriler ise eğrinin üstünde kalmaktadır. Hem temiz su oyulmasında hem de hareketli taban oyulmasında lineer bir artış görülmektedir.

Şekil 7.46, Şekil 7.47 ve Şekil 7.48'de sırasıyla kıvrımın $\theta=120^0$ 'lik kısmında $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluğundaki yan savaklar için ve $p=7,12$ ve 17 cm kret yüksekliğinde farklı akım şartlarında $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi incelenmiştir. Kıvrımın $\theta=30^0$ 'lik kısmında olduğu gibi $V_1/V_{kr}<0.5$ değerlerinde oyulma görülmemiş, temiz su oyulması hali için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ ile yaklaşık lineer bir artış göstermiş ve hareketli taban oyulması halinde de temiz su oyulmasının pik değeri etrafında salınım göstermiştir. Fakat $\theta=120^0$ 'lik kıvrım bölgesinde $\theta=30^0$ 'lik kıvrım bölgesine göre hem temiz su oyulmasında ve hem de hareketli taban oyulması hallerinde daha küçük oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Ağaçcıoğlu (1995), kıvrımlı kanalın ilk yarısında ($\theta=0^0-90^0$) sekonder akımın etkisinin ikinci yarısından ($\theta=90^0-180^0$) daha fazla olduğunu ve maksimum hız yörüngesinin $\theta=30^0-45^0$ civarında yan al akım doğrultusuna yakın olduğunu belirtmiştir.



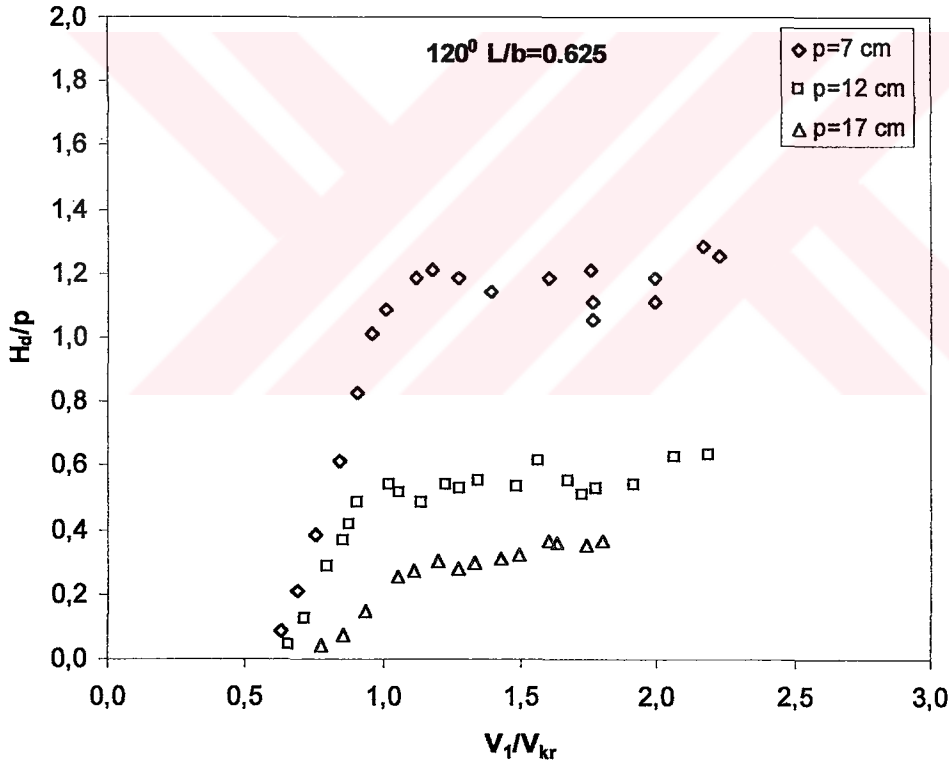
Şekil 7.44 30°'lik kıvrım bölgesinde p=7 cm ve L/b=1 için H_d/p -Re+ değişimi



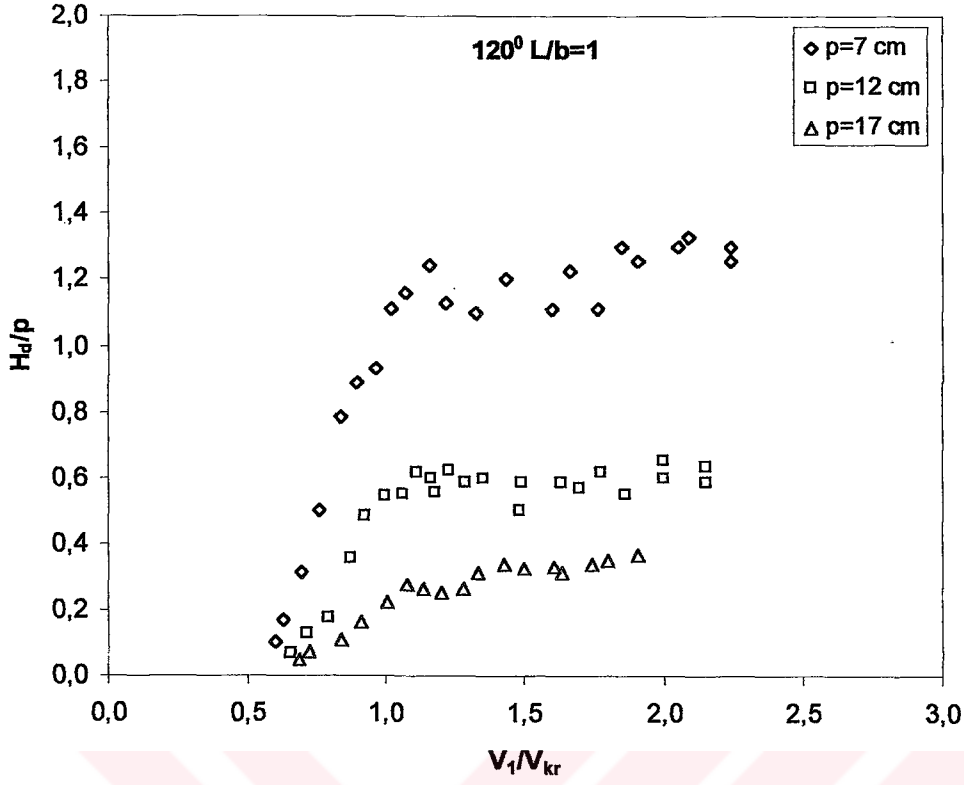
Şekil 7.45 30°'lik kıvrım bölgesinde temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması halindeki deneysel verilerin Shields diyagramında gösterilişi.

Şekil 7.49, Şekil 7.50 ve Şekil 7.51’de kıvrımlı kanalın $\theta=120^0$ ’lik kısmında sırasıyla $p=7$, 12 ve 17 cm kret yüksekliklerinde ve $L=25$, 40 ve 50 cm uzunluğundaki yan savaklar için farklı akım şartlarında $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi incelenmiştir. Daha önce büyük uzunluklu yan savaklarda savaklanmanın fazla olmasıyla yan al akımın şiddetinin arttığı ve bunun sonucunda oyulma derinliklerinin de arttığından bahsedilmişti. Şekil 7.49 ve Şekil 7.50’de L/b ’ye bağlı olarak H_d/p ’nin artışı belirgin olarak görülememiş fakat Şekil 7.51’de H_d/p ’nin artışı biraz daha belirgin olarak görülmektedir.

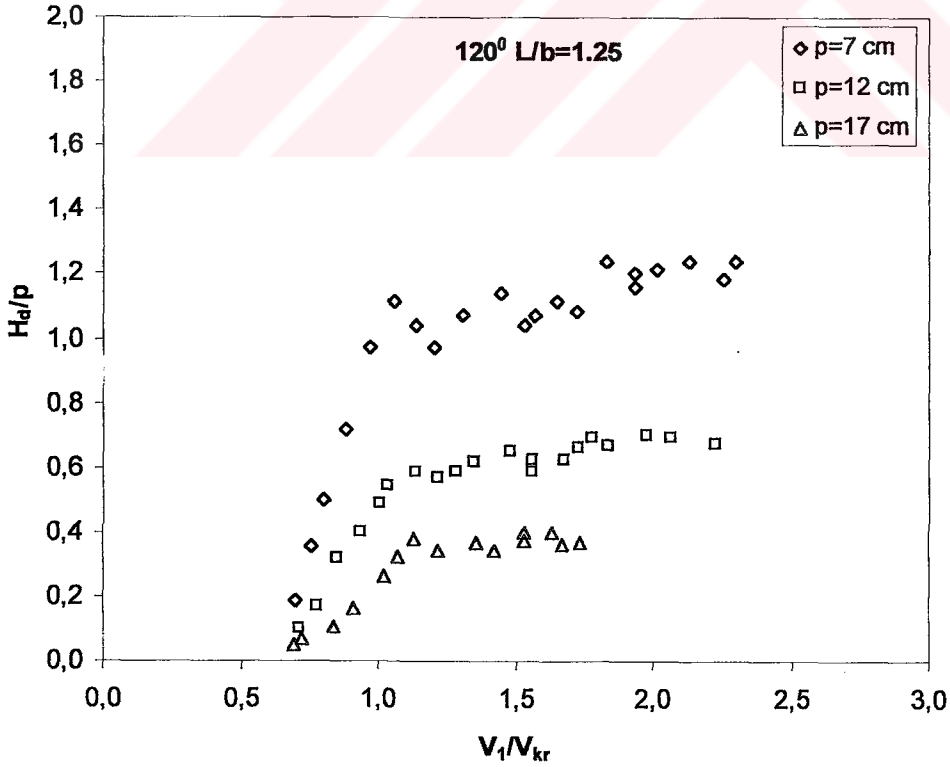
Şekil 7.52’de sırasıyla doğrusal kanal ($\theta=0^0$), $\theta=30^0$ ve $\theta=120^0$ ’lik kıvrım bölgelerinde dikdörtgen enkesitli $L=25,40$ ve 50 cm uzunluğunda ve $p=7,12$ ve 17 cm kret yüksekliğindeki yan savaklar için farklı akım şartlarında $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi bütün datalar birlikte sunulmuştur.



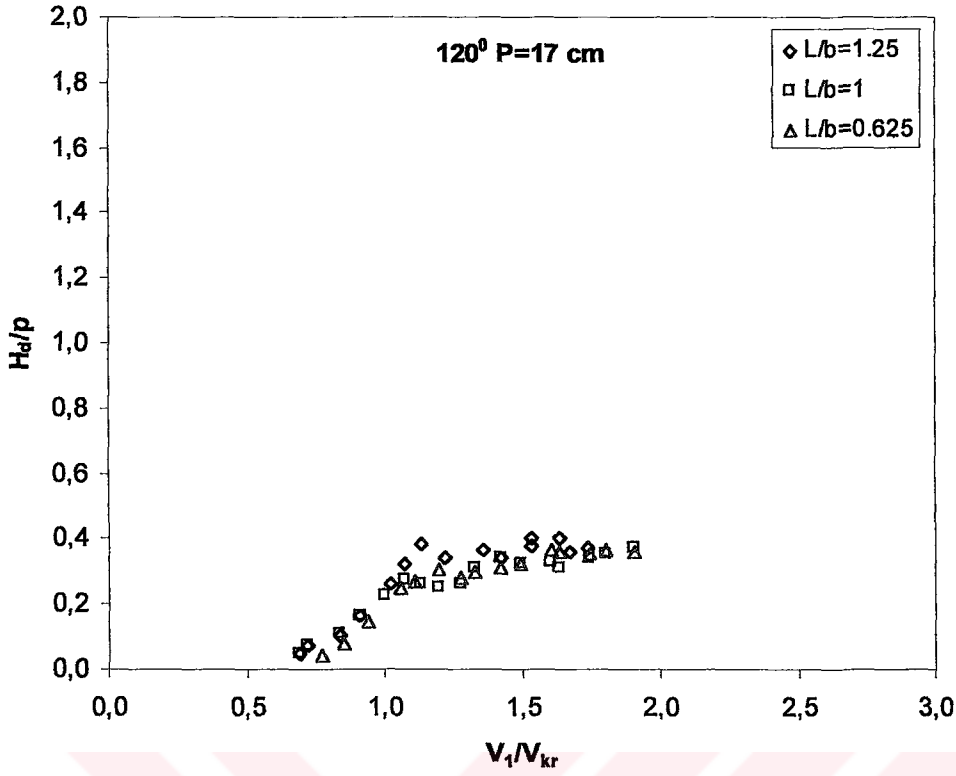
Şekil 7.46 $\theta=120^0$ ’lik kıvrım bölgesinde $L/b=0.625$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için $H_d/p-V_1/V_{kr}$ değişimi



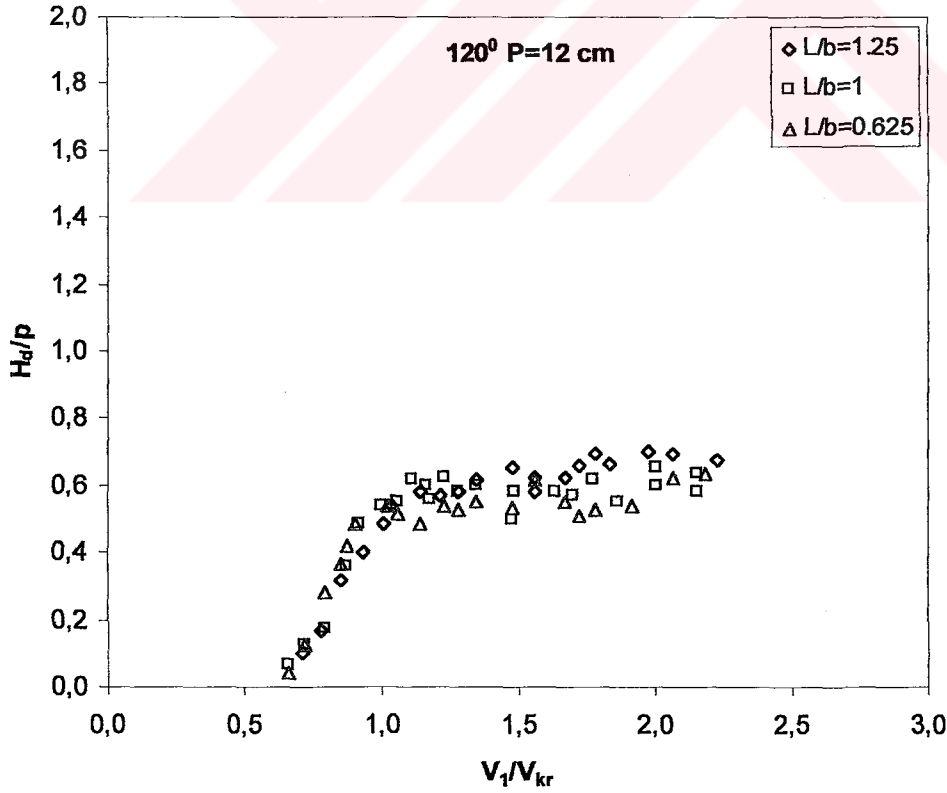
Şekil 7.47 $\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



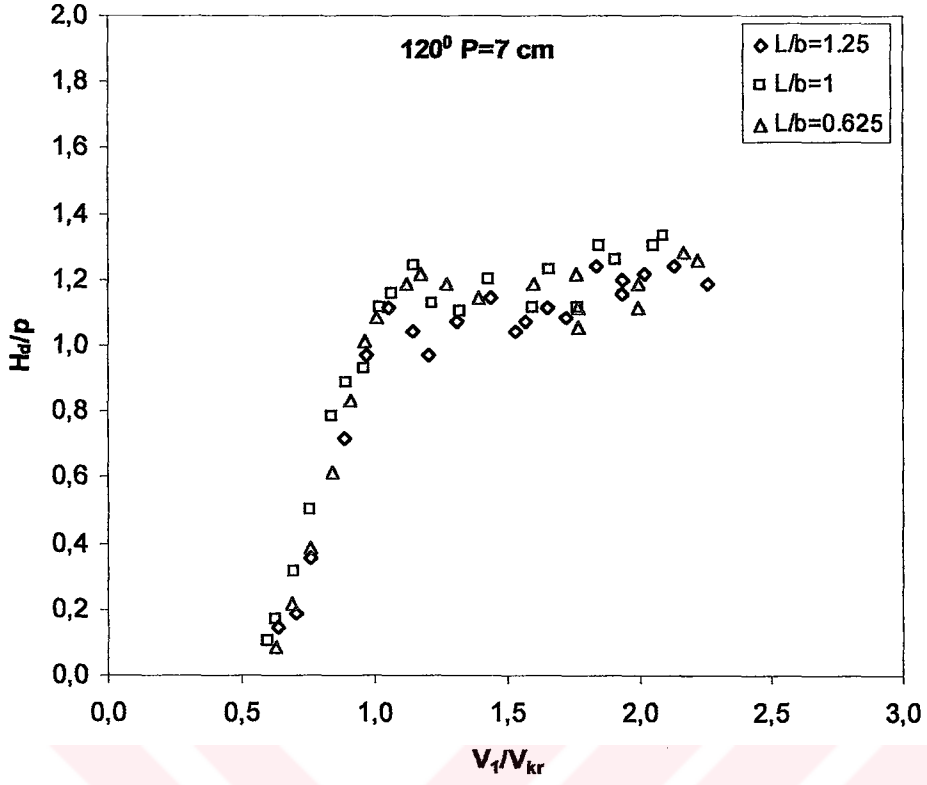
Şekil 7.48 $\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $L/b=1.25$ ve $p=7$ cm, $p=12$ cm, $p=17$ cm için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



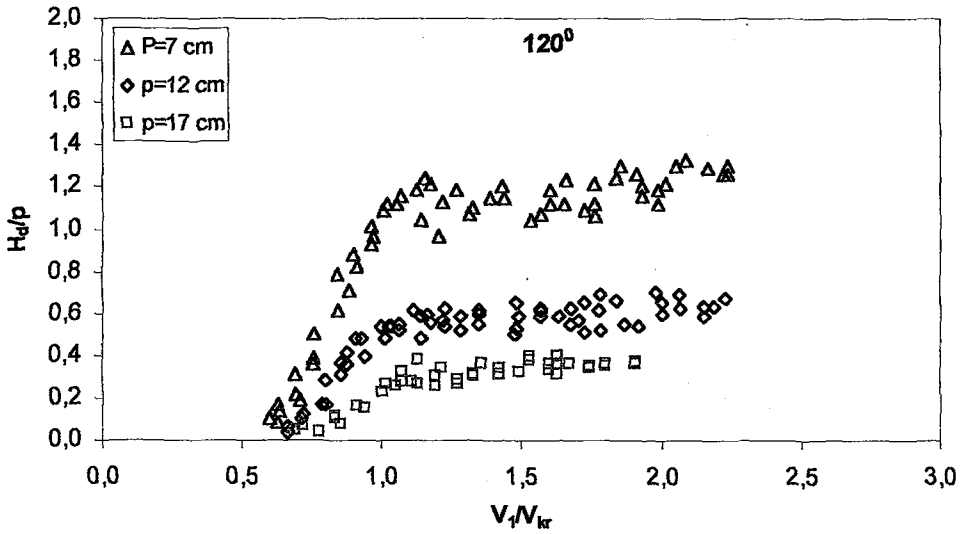
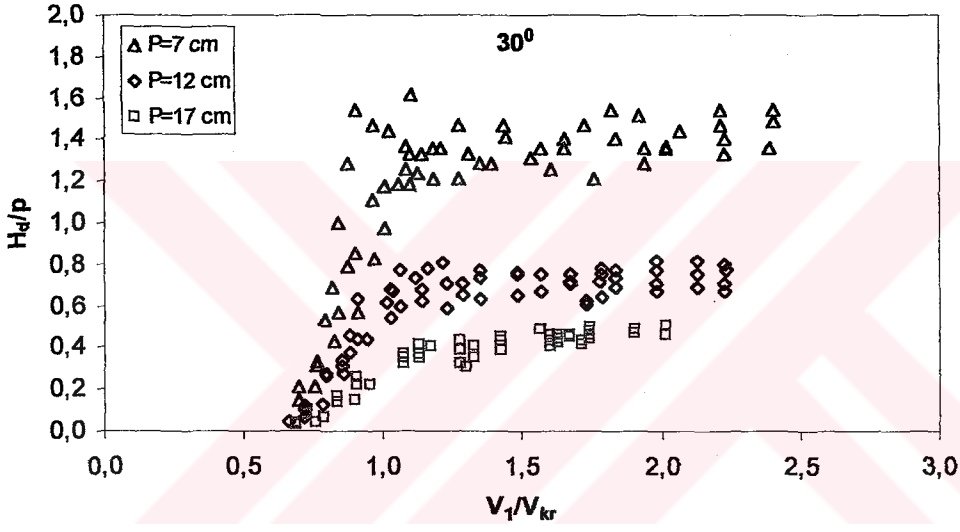
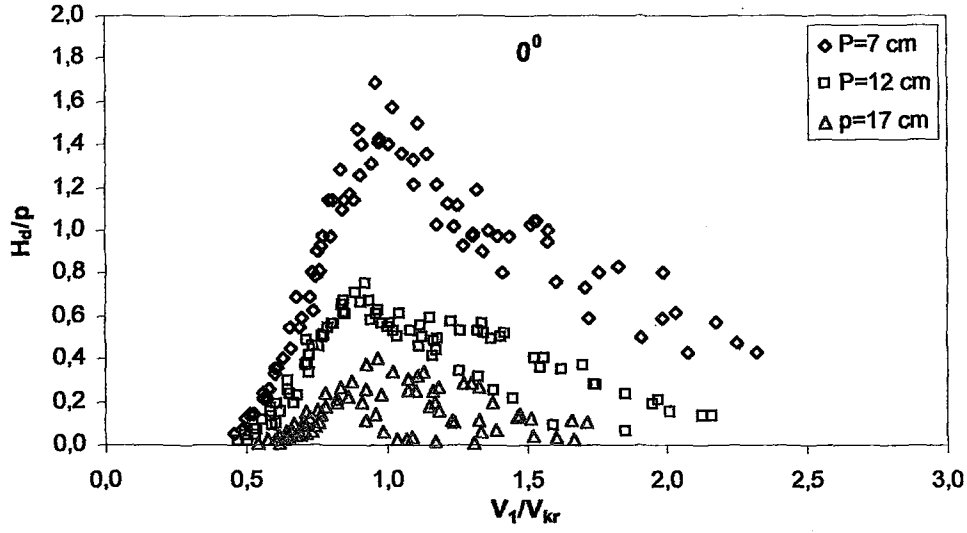
Şekil 7.49 $\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=17$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



Şekil 7.50 $\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=12$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



Şekil 7.51 $\theta=120^\circ$ lik kıvrım bölgesinde $p=7$ cm ve $L/b=0.625$, $L/b=1$, $L/b=1.25$ için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi



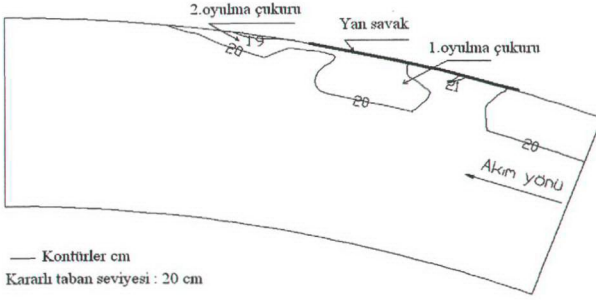
Şekil 7.52 Doğrusal kanalda ($\theta=0^\circ$), $\theta=30^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ 'lik kıvrım bölgesinde $p=7, 12$ ve 17 cm için H_d/p - V_1/V_{kr} değişimi

7.9 Hareketli Tabanlı Kıvrımlı Kanallarda Yanal Akımın Taban Profiline Etkisi

Bu bölümde, farklı akım şartlarında kum tabandan itibaren $p=7$ cm kret yüksekliğine sahip $L=40$ cm uzunluğundaki yan savak için $V_1/V_{kr}>0.5$ için kanal taban topoğrafyasında meydana gelen değişimler “temiz su oyulması” ve “hareketli taban oyulması” halleri için incelenmiştir. $V_1/V_{kr}<0.5$ için herhangi bir yerel oyulma gözlenmemiştir. Kıvrımlı kanaldaki taban topoğrafyaları için de doğrusal kanalda Çizelge 7.1’de özetlenmiş olan akım şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen taban topoğrafyaları sırasıyla Şekil 7.53, Şekil 7.55, Şekil 7.57, Şekil 7.59 ve Şekil 7.61’de verilmiştir. Ayrıca bu topoğrafyalarla ilgili memba ve mansaptan çekilen fotoğraflar sırasıyla Şekil 7.54, Şekil 7.56, Şekil 7.58, Şekil 7.60, Şekil 7.62 ve Şekil 7.63’de sunulmuştur. Deneyler, temiz su oyulması için 720 dakika, hareketli taban oyulması için 15-90 dakika sürdürülmüştür. Doğrusal kanalda olduğu gibi ilk iki deneyde “temiz su oyulması” ve sonraki üç deneyde ise “hareketli taban oyulması” görülmüştür.

İlk deneyde yan savağın memba ve mansabındaki ana kanaldaki ortalama hız taneleri harekete geçirecek kritik hızdan küçüktür ($V_1/V_{kr}<1$ ve $V_2/V_{kr}<1$). Doğrusal kanalda olduğu gibi yan savağın memba ve mansabında iki farklı oyulma çukurunun olduğu gözlenmiştir. Kıvrımlı kanaldaki oyulma derinlikleri (Şekil 7.53) doğrusal kanalda oluşan oyulma derinliklerinden daha düşük çıkmıştır. Daha önce maksimum hız yörüngesinden dolayı V_1 hızının ortalama hızdan daha fazla saptığı ve dolayısıyla temiz su oyulmasında, doğrusal kanala göre kıvrımlı kanalda elde edilen hızların ötelendiği belirtilmişti. Ayrıca kıvrımlı kanallarda yanal akım tarafından yaratılan sekonder akım kıvrım tarafından yaratılan sekonder akım tarafından bozulmakta ve kıvrımın mevcudiyeti de ek akım direncine neden olmaktadır. Oluşan barın dış kıyı ile yaptığı açılı doğrusal kanaldakine göre daha küçük çıkmıştır. Ayrıca ikinci oyulma çukurunun derinliği birinci oyulma çukurunun derinliğinden büyük çıkmıştır.

2 nolu deneyde 1 nolu deneyde olduğu gibi V_1/V_{kr} ve V_2/V_{kr} boyutsuz hız değerleri 1’den küçüktür. Şekil 7.55’de görüldüğü gibi, giriş etkisi sebebiyle yan savağın orta kısmı ile memba kısmı arasında bir eşğin olduğu gözlenmiştir. Doğrusal kanalda olduğu gibi akımın ataletinin artmasıyla giriş etkisinden dolayı oluşan vorteksin şiddetinin azalmasıyla 1.oyulma çukuru gelişmemiş ve bu kısımda bir eşik oluşmuştur. Doğrusal kanalda olduğu gibi kıvrımlı kanalda da oyulma çukuru yan savağın orta kısmı ile mansab kısmı arasında oluşmuştur. Kıvrımlı kanalda oluşan oyulma çukurunun derinliği ve genişliği doğrusal kanaldaki oyulma



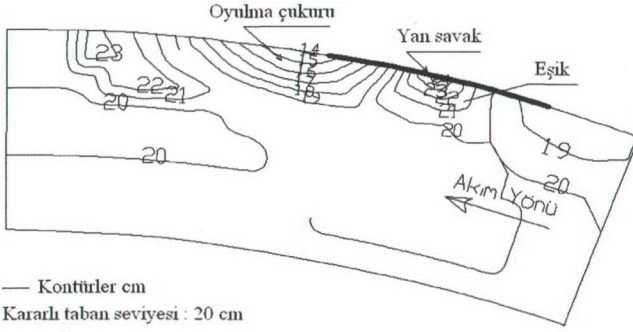
Şekil 7.53 Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler



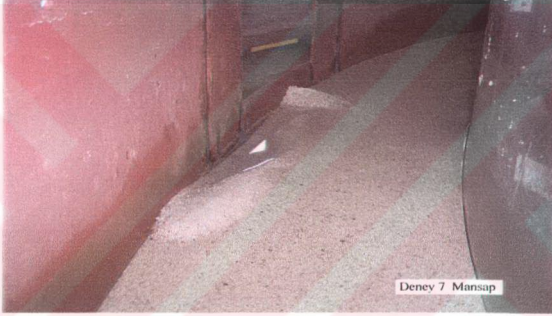
Şekil 7.54a Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü



Şekil 7.54b Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.31$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü



Şekil 7.55 Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler



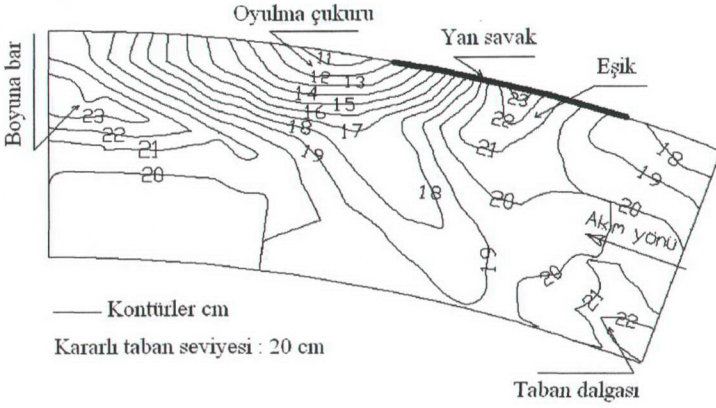
Şekil 7.56a Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görüntüsü



Şekil 7.56b Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.38$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görüntüsü

çukurundan daha küçüktür. Bunun da yanal akım tarafından yaratılan (III) nolu sekonder akımın, kıvrım tarafından yaratılan sekonder akım tarafından bozulmasıdır.

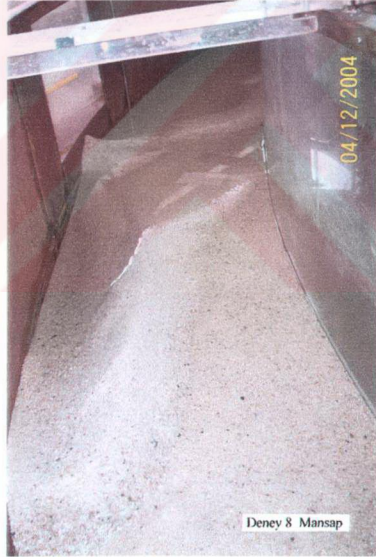
Şekil 7.58’de verilen 3 nolu deneye ait fotoğraflarda yan savak membasındaki akım hızı V_{kr} hızından büyük olduğu için tabanda hareketin başladığı görülmektedir. Yan savağın mansabında ise kanaldaki hız V_{kr} ’den küçük olduğu için taban dalgaları gözlenmemiştir ($V_1/V_{kr} > 1$ ve $V_2/V_{kr} < 1$). Şekil 7.55’de olduğu gibi giriş etkisinden dolayı yan savağın orta kısmı ile memba kısmı arasında bir eşik oluşmuş ve doğrusal kanalda oluşan eşik yüksekliğine yakın çıkmıştır. Doğrusal kanalda olduğu gibi membadan gelen taban dalgaları ve mansab oyulma çukurundan taşınan malzemenin bir kısmı oluşan eşğin üzerinden sağanak kanalına savaklanmıştır. Ayrıca yan savağın mansabına doğru hareket eden taban dalgası, ters akımdan dolayı yan savağın orta kısmını geçememiş ve yan savağın membasında yığılmıştır. Şekli 7.57’de yan savağın girişinden (eşikten) önceki enkesitte kıvrımın yarattığı sekonder akımdan dolayı dış kıyıda oyulma iç kıyıda ise yığılma görülmüş, ayrıca bu bölgede tabakalaşma meydana gelmiş ve dış kıyıda kaba malzeme iç kıyıda ise ince malzemenin biriktiği gözlenmiştir. Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa (1976), kıvrımlı kanallarda yaptıkları deneysel ve teorik çalışmalarda dış kıyıda kaba iç kıyıda ise ince malzemenin biriktiğini belirtmişlerdir (Şekil 3.16). Ayrıca Ikeda, Yamasaka ve Chiyoda (1987); Yen ve Lee (1996), yaptıkları deneysel çalışmalarda da aynı sonuçlara ulaşmışlardır. Şekil 7.22’de doğrusal kanalda hareketli taban oyulması halinde akımın ataletinin artmasıyla yanal akımın etkisinin azaldığı ve taban dalgalarının oyulma çukurunu bir miktar doldurduğu ve de böylece temiz su oyulmasındaki rölatif denge oyulma derinliğine göre daha küçük değerler aldığı belirtilmişti. Kıvrımlı kanalda ise yanal akıma ilaveten kıvrımın yarattığı sekonder akımın Froude sayısındaki artışla, doğrusal kanala göre daha büyük rölatif oyulma derinliği elde edilmiştir. Ağaçcioğlu (1995), $\theta=30^0-45^0$ civarında en büyük C_d yan savak debi katsayılarını elde etmiştir. Yan savak debi katsayısının artmasıyla savaklanma oranı Q_w/Q_1 artmakta, yanal akım şiddetlenmekte ve bu da oyulma derinliğini artırıcı bir etken olmaktadır. Ayrıca kıvrımlı kanallarda maksimum hız yörüngesi $\theta=30^0$ civarında dış kıyıya yönelmekte ve bu da yanal akımın daha da kuvvetlenmesine yol açmaktadır. Doğrusal kanalda olduğu gibi yan savağın mansabında dış kıyıya paralel boyuna bir bar oluşmuştur. Oluşan bu boyuna bar Fares (1995) tarafından Allen Water’da görülen ve Şekil 5.8 C-C kesitinde verilen taban profilinde de görülmektedir.



Şekil 7.57 Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler

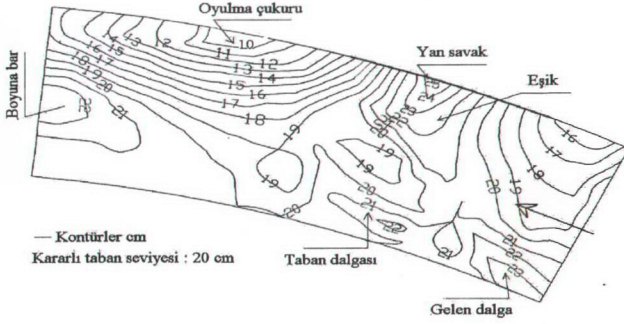


Şekil 7.58a Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü

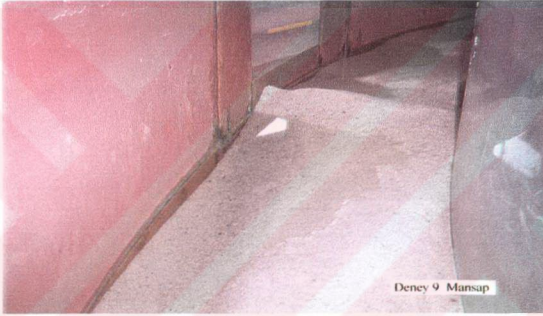


Şekil 7.58b Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.59$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü

Şekil 7.59 ve Şekil 7.61’de verilen 4 ve 5 nolu topoğrafyada ise, hem yan savak membasındaki ve hem de yan savağın mansabındaki hızlar V_{kr} ’ten büyük olduğu görülmektedir ($V_1/V_{kr} > 1$ ve $V_2/V_{kr} > 1$). Bundan dolayı, yan savağın hem memba ve hem de mansabında tabanda hareketin başladığı görülmektedir. Yan savağın membasında büyük bir eşik oluşmuştur. Kıvrımlı kanallardaki 4 ve 5 nolu topoğrafyalarda görüldüğü gibi yan savağın mansabındaki rölatif denge oyulma derinlikleri, kıvrımın yarattığı ilave sekonder akımdan dolayı doğrusal kanaldaki 4 ve 5 nolu topoğrafyalardaki oyulma derinliklerinden daha büyük çıkmıştır. Bu iki deneyde de yan savağın mansabında dış kıyıya paralel boyuna bir bar görülmüştür. 3 nolu deneyde olduğu gibi 4 ve 5 nolu deneylerde elde edilen topoğrafyalarda da yan savağın membasından önceki enkesitteki kısımda dış kıyıda oyulma iç kıyıda ise yığılma görülmektedir. Ayrıca 3 nolu deneyde olduğu gibi tabakalaşma da gözlenmiştir. 5 nolu deneyde yan savağın membasından önceki enkesitteki enine taban eğiminin 4 nolu deneydeki eğimden daha fazla olduğu görülmüştür. Kikkawa, Ikeda ve Kitagawa (1976), yaptıkları deneysel ve teorik çalışmalarda kıyı yakınları haricinde sekonder akımın düşey bileşeninin daha etkin olduğunu ve debinin artmasıyla enine hız değerinin (V_r) arttığını ve büyük debilerde (hızlarda) dış kıyıda daha büyük oyulmanın ve iç kıyıda da daha büyük yığılmaların oluştuğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.15). Şekil 7.63’de 5 nolu deney sonucunda yan savağın memba ve mansabında oluşan taban dalgaları görülmektedir. Kıvrımlı kanallarda hızın artmasıyla sekonder akımın şiddeti de artmakta ve bunun sonucunda Şekil 7.61’de görüldüğü gibi biraz daha büyük oyulma derinliği elde edilmiştir.



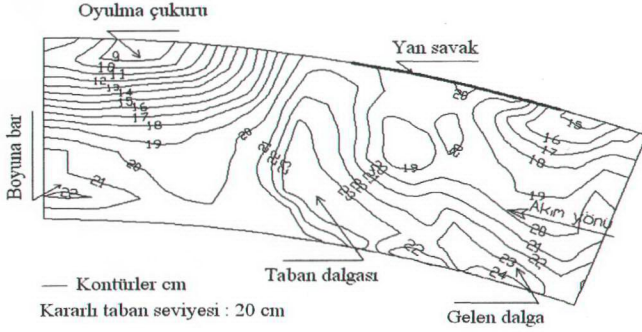
Şekil 7.59 Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasındaki değişimler



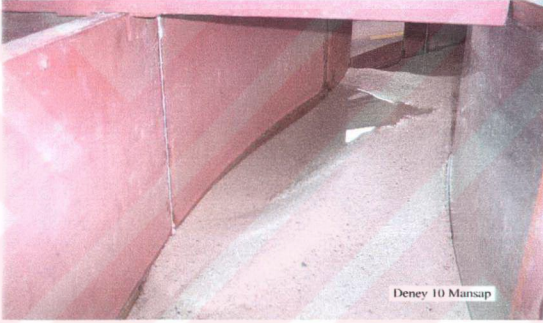
Şekil 7.60a Kıvrımlı Kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü



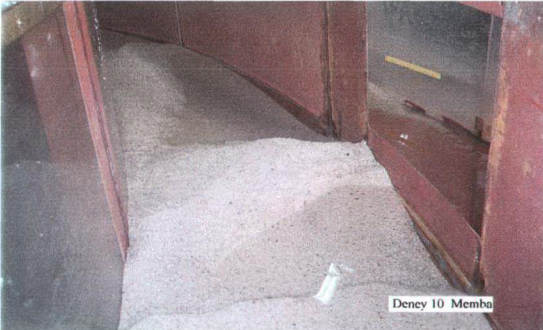
Şekil 7.60b Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.78$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü



Şekil 7.61 Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.99$ için taban topoğrafyasındaki değişimler



Şekil 7.62a Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının mansaptan görünüşü



Şekil 7.62b Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.99$ m/s için taban topoğrafyasının membadan görünüşü



Şekil 7.63a Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.99$ m/s için yan savağın membasında oluşan taban dalgalarının görünümü



Şekil 7.63b Kıvrımlı kanalda ($\theta=30^\circ$) $V_1=0.99$ m/s için yan savağın mansabında oluşan taban dalgalarının görünümü

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Hareketli tabanlı 180°'lik kıvrımlı bir kanal boyunca nehir rejimli akım şartlarında ve serbest savaklanma durumunda $L=25, 40$ ve 50 cm uzunluklu, kum tabandan itibaren $p=7, 12$ ve 17 cm kret yükseklikli yan savaklarda temiz su ve hareketli taban oyulması hallerinde yan savak civarında ana kanal tabanında meydana gelen topoğrafik değişimler ve rölatif denge oyulma derinliklerinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Dikdörtgen en kesitli ve hareketli tabanlı kıvrımlı bir kanalda dikdörtgen yan savak civarında oluşan rölatif denge oyulma derinliğine etki eden parametreler boyut analizi ile belirlenmiş ve rölatif denge oyulma derinliğinin

$$H_d/p = f(V_1/V_{kr}, h_1/p, L/b, \theta)$$

boyutsuzlarına bağımlı olduğu belirlenmiştir.

2. Rölatif (boyutsuz) akım hızı $V_1/V_{kr} < 0.45-0.50$ için hem doğrusal kanalda hem de kıvrımlı kanalda oyulma görülmemiştir.

3. Hem doğrusal kanalda hem de kıvrımlı kanalda, temiz su oyulması halinde oyulma derinliğinin dengeye ulaşma süresi, rölatif hız (V_1/V_{kr}) ve yan savak kret yüksekliğine bağlıdır. Dengeye ulaşma süresi rölatif hızdaki V_1/V_{kr} artış ve yan savak kret yüksekliğindeki azalma ile büyümektedir.

4. Hem doğrusal kanalda hem de kıvrımlı kanalda rölatif akım hızına bağlı (V_1/V_{kr}) olarak, oyulma derinliği H_d ; denge zamanının %10'unda denge oyulma derinliğinin %40-70'ine ve denge zamanının %50'sinde denge oyulma derinliğinin %90-95'ine ulaşmaktadır.

5. Rölatif denge oyulma derinliği H_d/p , boyutsuz savak kret yüksekliğindeki artışla h_1/p artmaktadır. Aynı boyutsuz savak kret yüksekliği için, boyutsuz yan savak uzunluğundaki (L/b) artışla rölatif denge oyulma derinliği H_d/p büyümektedir.

6. Aynı boyutsuz savak kret yüksekliği (h_1/p) ve boyutsuz yan savak uzunluğu (L/b) için maksimum denge oyulma derinliği $\theta=30^\circ$ 'lik kıvrım açısında ve minimum oyulma derinliği $\theta=120^\circ-150^\circ$ 'lik kıvrım açılarında elde edilmiştir.

7. Doğrusal kanalda rölatif denge oyulma derinliği H_d/p , temiz su oyulması halinde V_1/V_{kr} 'deki artışla lineer olarak artarak $V_1/V_{kr}=0.95-1.0$ civarında maksimum denge oyulma derinliğine ulaşmaktadır. $V_1/V_{kr} \geq 0.95-1.0$ değerlerinden sonra yan savak membassındaki hız V_{kr} hızından büyük olduğu için daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulması görülmüştür. Daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulmasında; membadan gelen taban dalgalarının oyulma çukurunu doldurması, yan savak mansabında boyuna akım doğrultusundaki kinetik enerjinin artması, yanal akım doğrultusundaki sekonder akımın şiddetinin azalması ve yan savak mansabındaki sekonder akım yapısının bozulmasıyla, V/V_{kr} değerinin artmasıyla H_d/p değerinin azaldığı belirlenmiştir.

8. Rölatif denge oyulma derinliğinin (H_d/p), rölatif akım hızına (V_1/V_{kr}) bağlı olarak rölatif yan savak uzunluğu (L/b)'ye göre değişimi incelenmiş, büyük uzunluklu yan savaklarda daha büyük oyulma derinliklerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Temiz su oyulmasına nazaran hareketli taban oyulmasında L/b 'ye bağlı olarak H_d/p 'deki artış daha belirgindir.

9. Hareketli taban oyulmasında, kanal tabanının dalgacık formundan eşik formuna geçişte taban pürüzlülüğünün değişmesi sonucunda rölatif hız $V_1/V_{kr}=1.1-1.3$ civarında oyulma derinliklerinde saçılımlar görülmüştür.

10. Ayrıca, hareketli taban oyulması halinde taban dalgası tepesi veya çukurunun geliş durumuna göre rölatif yan savak kret yüksekliği h_1/p 'nin değişmesi sonucunda daha fazla saçılım gözlenmiştir.

11. Kıvrımlı kanalda doğrusal kanalda olduğu gibi temiz su oyulması hali için rölatif denge oyulma derinliğinin (H_d/p), V_1/V_{kr} ile hemen hemen lineer arttığı ve $V_1/V_{kr}=0.95-1.0$ civarında maksimum denge oyulma derinliğine ulaştığı tespit edilmiştir.

12. Yanal savaklanmadan dolayı meydana gelen sekonder akıma ilave olarak kıvrımın yarattığı sekonder akımın, akım hızındaki artışla şiddetlenmesi sonucunda, kıvrımlı kanalda doğrusal kanaldakinin aksine, hareketli taban oyulması halinde rölatif denge oyulma derinliğinin (H_d/p), rölatif akım hızındaki V_1/V_{kr} artışla pik değer etrafında salınım gösterdiği tespit edilmiştir.

13. Kıvrımlı bir kanalda $\theta=30^0-45^0$ civarında maksimum hız yörüngesinin dış kıyıya yönelmesiyle yan savak mansabında ters akım alanının mansaba doğru sürüklenmesi sonucunda kıvrımlı kanalın $\theta=30^0$ lik kısmında maksimum rölatif denge oyulma derinlikleri elde edilmiştir.

14. Kıvrımlı kanalda farklı akım şartlarında $H_d/p - V_1/V_{kr}$ değişimi incelendiğinde, temiz su oyulması halinde doğrusal kanala göre daha küçük H_d/p değerlerine ulaşıldığı gözlenmiştir. Daimi sürüntü maddesi oyulmasında, doğrusal kanallarda V_1/V_{kr} değerinin artmasıyla H_d/p değerinin azaldığı, kıvrımlı kanallarda ise yanal akımdan dolayı oluşan sekonder akıma ilaveten kıvrım tarafından yaratılan sekonder akımın şiddetlenmesiyle yan savağın mansabındaki oyulma çukuru derinliğinin arttığı gözlenmiştir.

15. Temiz su oyulması halinde H_d/p 'nin tane Reynolds sayısındaki (Re_*) artışla hemen hemen lineer arttığı, hareketli taban oyulması halinde ise rölatif denge oyulma derinliğinin Re_* ile azaldığı görülmüştür. Kıvrımlı kanalda ise temiz su oyulması halinde H_d/p , Re_* ile lineer olarak artarken, hareketli taban oyulması halinde ise temiz su oyulmasındaki pik değer etrafında salınım yaptığı belirlenmiştir.

16. Gerek doğrusal kanalda ve gerekse kıvrımlı kanaldaki kanal taban topoğrafyası ve oyulma çukurunun yerinin; V_1/V_{kr} , V_2/V_{kr} ve savaklanma oranına (dolayısıyla h_1/p ve L/b 'ye) bağlı olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal kanalda, temiz su oyulması halinde ($V_1/V_{kr} < 1$ ve $V_2/V_{kr} < 1$) yan savağın membasında ilk olarak bir oyulma çukuru oluşmuş, daha sonra hızın artmasıyla bu oyulma çukuru kapanmış ve bu kısımda bir eşik oluşmuştur. Yan savağın mansabında ise ters akım bölgesinde bir oyulma çukurunun oluştuğu gözlenmiştir. Hareketli taban oyulmasında ($V_1/V_{kr} > 1$, $V_2/V_{kr} < 1$ ve $V_2/V_{kr} > 1$) ise daha büyük bir eşik oluşmuş ve taban dalgalarının oyulma çukurunu bir miktar doldurmasıyla derinlik azalmıştır. Kıvrımlı kanalda temiz su oyulması halinde ($V_1/V_{kr} < 1$ ve $V_2/V_{kr} < 1$) oyulma derinlikleri daha küçük çıkmışken, hareketli taban oyulmasında ise ($V_1/V_{kr} > 1$, $V_2/V_{kr} < 1$ ve $V_2/V_{kr} > 1$) helikoidal akımın etkisinin artmasıyla oyulma derinlikleri artmış ve doğrusal kanaldaki oyulma derinliklerinden daha büyük oyulma derinlikleri elde edilmiştir.

8.2 Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığı altında, hareketli tabanlı kıvrımlı kanallara yerleştirilen yan savaklarla ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalara yön vermesi bakımından aşağıdaki hususların göz önünde tutulması yararlı olabilir;

1. Aynı çalışma kararsız akım şartlarında da yapılabilir.
2. Çalışma farklı eğrilik yarıçaplarına sahip kıvrımlarda da incelenebilir.
3. Farklı yan savak kesit tipleri için de çalışılabilir.
4. Sel rejimli akım şartlarında da çalışma yapılabilir.
5. Çeşitli tane çaplarında çalışılarak tane büyüklüğünün etkisi ortaya konulabilir.
6. Taban dalgalarının yüksekliğinin taban pürüzlülüğüne ve sürütme gerilmelerine etkisi belirlenebilir.
7. Kanal tabanındaki deformasyonun hız dağılımına etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Ağaçcıoğlu, H., (1995), Yan Savaklardaki Akımın Kıvrımlı Bir Kanal Boyunca İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ağaçcıoğlu, H. ve Yüksel Y., (1998), "Side-Weir Flow in Curved Channels", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Proc., ASCE, 124(3):163-175.
- Ağaçcıoğlu, H., (1998), "Kıvrımlı Kanallarda Enine Su Yüzü Eğiminin Yan Savak Debi Katsayısına Etkisi", İ.M.O. Teknik Dergi, Yazı 126, 1741-1761.
- Aksu, H., (2001), Hareketli Tabanlı Kanallarda Yan Savak Akımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Allen, J. R. L., (1970). "A Quantitative Model of Grain Size and Sedimentary Structures in Lateral Deposits." Geological J., 7, 129-146.
- Apmann, R. P., (1972), "Flow Processes in Open Channel Bends", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 98(HY5):795-809.
- Apmann, R. P., (1972), "Estimating Discharge from Superelevation in Bends", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 99(HY1):65-79.
- Babbitt, H. E., (1953), Sewerage and Sewage Treatment, Wiley, New York.
- Baker, C. J., (1980), "Theoretical Approach to Prediction of Local Scour Around Bridge Piers", J. Hyd. Res., I.H.A.R., 18:1-12.
- Bayazıt, M., (1971), Hareketli Tabanlı Akımların hidroliği, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Bonnefille, R., (1963), Essais de Synthese des Lois de Debut d'Entrainement des Sediment Sous l'Action d'un Courant En Rejime Uniforme", Bull. du CREC, No. 5, Chatou.
- Borghi, S. M., Jalili, M. R., and Ghodsion, M. (1999), "Discharge Coefficient for Sharp-Crested Side Weirs in Subcritical Flow" J. Hydr. Eng., ASCE, 125(10), 1051-1056.
- Bridge, J. S., (1976). "Bed Topography and Grain Size in Open Channel Bends" Sedimentology, 23(3), 407-414.
- Chang, H. H., (1983), "Energy Expenditure in Curved open Channels", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 109:7.
- Chang, H. H., (1983), "Variation of Flow Resistance through Curved Channels", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 110(12):1772-1782.
- Chiew, Y. M., (1984), "Local Scour at Bridge Piers", Ph.D. Thesis, Univ. of Auckland, N.Z. School of Eng., Rep. No. 355.
- Collinge, V. K., (1957), "The Discharge Capacity of side Weirs", Proc. of the ICE, London, 6:288-304.

Cheong, H. F., (1991), "Discharge Coefficient of Lateral Diversion from Trapezoidal channel." J. Irrig. And Drain. Engrg., ASCE, 117(4), 461-475.

Choudhary, U.K. ve Narasimhan, S., (1977), "Flow in 180° Open Channel Rigid Boundary Bends", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Tec. Notes, 103(6):651-657.

Chow, V. T., (1959), Open Channel Hydraulic, Mc Graw Hill, 16:439-460.

Coleman, G. S. ve Smith, D., (1923), "The Discharging Capacity of Side Weirs", Selected Engineering Paper 6, Ins. Civ. Eng.

Çoşar, A., (1999), Üçgen Kesitli Yan Savakların Kıvrımlı Bir Kanal Boyunca İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Coşar ve Ağaçoğlu (2004), "Discharge Coefficient of a Triangular Side-Weir Located on a Curved channel", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 130(5), 410-423.

De Marchi, G., (1934), "Saggio di Teoria de Funzionamento Degli Stramazzi Laterali, L'Energia Elettrica, Milano, 11:849-860.

De Vriend, H. J., (1973), "Theory of Viscous Flow in Wide Curved Open Channels", Proceeding of the International Symposium on River Mechanics, International Association for Hydraulics Research, Bangkok, Thailand.

El-Khashab, A. M. M., (1975), Hydraulics of Flow Over Side-Weirs, Ph.D. Thesis, Presented to the University of Southampton, England.

Engels, H., (1920), "Mitteilungen aus der Dresdener Flussbaulaboratorium Weiten", 362-365; 387-390.

Engelund, F., (1974), "Flow and Bed Topography in Channel Bends", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 100, No. 11, pp. 1631-1648.

Falcon, M. A., and Kennedy, J. F., (1983). "Flow in alluvial-river curves." J. Fluid Mech., 133, 1-16.

Fares, Y. R. ve Herbertson, J. G., (1993), "Comportement de l'écoulement dans un canal courbe avec un deversoir lateral alimentant un canal evacuteur de crue", Journal of Hydraulics Research, 31(3):383-401.

Fares, Y. R., (1995), "Boundary Shear in Curved Channel With side Overflow", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(1):2-14.

Fares, Y. R., (2000), "Changes of Bed Topography in Meandering Rivers at a Neck Cutoff Intersection", Journal of Environmental Hydrology, Volume 8 Paper 13.

Forchhemier, P., (1930), Hydraulic, Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, Berlin, 3rd. Ed.

Francis, J. R. D. ve Asfari, A. F., (1971), "Les Repartition des Vitesses des Courant dans les Canaux a Surface Libre Incurves et de Grande Largeur", Journal of IAHR, 9:73.

Frazer, W., (1954), The Behaviour of Side Weirs in Prismatic Rectangular Channels, Ph.D. Thesis, Presented Glasgow University.

Georgiadou, A. D. ve Smith, A. K., (1986), "Flow in Curved Converging Channel", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112(6):476-496.

Goncharov, V. N., (1964), "Dynamics of Channel Flow", Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem.

Graf, W. H., and Suszka, L. (1985). "Unsteady Flow and Its Effect on Sediment Transport." Proc, 21st Congress, International Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands, 540-544.

Hancu, S., (1971), "Sur le Calcul des Affoilements Loaux Dans la Zone dec Piles du Pont", 14th. I.A.H.R. Congres, 3:299-305, Paris.

Ikeda, S., Yamasaka, M., and Chiyoda, M., (1987), "Bed Topography and Sorting in bends", J. Hydr. Engrg., ASCE, 113(2), 190-206.

Jalili, M. R., and Borghei, S. M. (1996). "Discussion of Discharge Coefficient of Rectangular Side Weirs." by R. Singh, D. Manivannan, and T. Satyanarayana." J. Irrig. And Drain. Engrg., ASCE, 122(2), 132.

Kikkawa, H., (1973), "Secondary Flow in a Bend of Turbulent Stream", Proceeding of the Japan Society of Civil Engineernig, No. 219.

Kikkawa, H., Ikeda, S., and Kitagawa, A., (1976), "Flow and Bed Topography in Curved Open Channels", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 102, No. 9, pp. 1327-1342.

Kumar, C. P. ve Pathak, S. K., (1987), "Triangular Side Weirs", Journal of the Irrigation and Draniage Engineering, ASCE, 113(1):98-105.

Laursen, E. M., (1963), "An Analysis of Relief Bridge Scour", Proc. ASCE, HY3, p. 3516.

Lee, K. T., (1991), "The Effect of Unsteady Flow Characteristics on Bed Topography and Sediment Gradation in River Bednds", PhD Thesis, National Taiwan University, Taiwan.

Liu, H. K., (1957), "Mechanics of Sediment- Ripple Formation", J. Hydr. Div, ASCE, Vol. 83, No. HY2, p.1197.

Melville, B. W., (1984), "Live-Bed Scour at Bridge Piers", J. Hydr. Engrg., ASCE, 114(10), 1210-1226.

Melville, B. W., ve Sutherland, A. J., (1988), "Design Method for Local Scour at Bridge Piers", J. Hydr. Engrg., ASCE, 114(10), 1210-1226.

Melville, B. W., ve Chiew, Y. M., (1999), "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers", Journal of Hydraulics Engineering", ASCE, 125(1):59-65

Müller, R., (1943), *Theoretische Grundlagen der fluss und Wildbachverbaungen (Theoretical Principles for Regulation of Rivers and Torrents)*, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wassebau und Erdbau, 4.

Muramoto, Y., (1967), "Secondary Flows in Curved Open Channels" *Proc., IAHR*, 3:315.

Muslu, Y., (2002), "Numerical Analysis for Lateral Weir Flow", *Journal of the Irrigation and Draniage Engineering, ASCE*, 127(4):246-253.

Nandesamoorthy, T., and Thomson, A., (1972), "Discussion of spatially varied flow over side-weir." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 98(12), 2234-2235.

Neary, V. S., ve Odgaard, A. J., (1994), "Three-Dimensional Flow Structure at Open-Channel Diversions", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 119(11):1223-1230.

Nicollet, G., (1971), "Déformation des Lits Alluvionnaires Affouillements Autour des Piles de Ponts Clindriques", L.N.H. Chautu, HC-043-689, Paris.

Nimmo, W. H. R., (1928), "Side Spillways for Regulating Diversion Canals", *Trans., ASCE*, 92:1561-1584.

Nouh, M., (1989). "Self Armoring Process Under Unsteady Flow Conditions." *Proc. 23rd Congress, International Association for Hdraulic Research, Delft, The Netherlands*, B49-56.

Odgaard, A. J. (1982). "Bed Characteristics in Alluvial Channel Bends." *J. Hydr. Div., ASCE*, 108(11), 1268-1281.

Ramamurthy, A. S., Tim, U. S., ve Carballada, L., (1986), "Lateral Weirs in Trapezoidal Channels", *Journal of the Irrigation and Draniage Engineering, ASCE*, 112(2):130-137.

Ranga Raju, K. G., Prasad, B., ve Gupta, S. K. (1979), "Side-Weir in Rectangular Channel." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 105(5), 547-554.

Raudkivi, A. J., (1986), "Functional Trends of Local Scour at Cylindrical Piers", *J. Hyrd. Eng. Div., ASCE*, 109(10), 1209-1213.

Rozovskii, I. L., (1957), *Flow of Water in Bends in Open Channels*, Published by the Academy of Sciences of the Ukranianian U.S.S.R., Kiev.

Rozovskii, I. L., (1961), "Flow over Water in Bends of open Channels", *Academy of Sciences of U.S.S.R., Kiev 1957*, Translated by Y. Prunshansky, The Isreal Program for Scientific Translations, 1961

Shen, H. W., Schneider, V.R., and Karaki, S. S., (1969), "Local Scour Around Bridge Piers", *J. Hydr. Division, Vol. 95, No. HY6*, 1919-1940.

Shield, A., (1936), "Adwendung der Aehnlichkeitsmechanich und Turbulenz Forshung Auf Die Geschiebewegung", Berlin.

Sing, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T. (1994). "Discharge coefficient of rectangular side weirs." *J. Irrig. And Drain. Engrg., ASCE*, 120(4), 814-819.

- Shukry, A., (1950), "Flow Around Bends in Open Flume", Journal of Hydraulics Eng., ASCE, 115:751-759.
- Subramanya, K. ve Awasthy, S. C., (1972), "Spatially Varied Flow over Side Weirs", Journal of Hydraulic Division, Proc., ASCE, 98(HY1):1-10.
- Tozlu, H., (1994), Yan Savak Akımının Hesabı için Nümerik Bir Yaklaşım, Doktora Tezi, İTÜ.
- Tsujimoto, T., and Mizukami, T., (1985), "Effect of Migration to Local Scour Around a Bridge Pier", Memoirs, Faculty of Tecnology, Kanazawa University, Vol. 19, No.1, pp.23-34
- Tyler, R. C., Carolla, J. A. ve Steyskal, N. A., (1929), "Discharge over Side Weirs with and Without Baffles", Journal Boston Soc. Civ. Eng., 16:118.
- Uyumaz, A., (1982), Yan Savaklardaki Akımın Teorik ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ.
- Üç, S., (1979), "Akarsu Kıvrımlarındaki Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Yerel Oyulmalar", Doçentlik Tezi, İ.D.M.M.A., İstanbul.
- Üç, S., (1988), Vorteks Yayılma Frekansının Oyulma Derinliğine Etkisi, Doktora Tezi, YTÜ, İstanbul.
- Vriend, D. ve Struik, (1983), Flow and Bend Deformation in River Bends, Delft Hydraulic Laboratory, 317, The Netherlands.
- Yılmaz, A. M., ve Altınbilek, H. D., (1991), "Study of Time-Dependent Local Scour Around Bridge Piers", Journal of Hydr. Engineering, ASCE, 117(10):1247-1267.
- Yen, B. C., (1965), Characteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel. Iowa Inst. of Hydr. Res., Iowa City, Iowa.
- Yen, C. L., (1967), "Bed Configuration and Characteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel." PhD thesis, University of Iowa, at Iowa City, Iowa.
- Yen, B. C., (1977), "Experimental Investigation of Flow over Side Weirs", Journal of Hydraulic Division, Discussion; Proc., ASCE, 103(HY5):580-581.
- Yen, L. C. ve Yen, B.C., (1971), "Water Surface Configuration in Channel Bends", Journal of Hydraulics Division, ASCE, 97(HY2):303-321.
- Yen, L. C. ve Lin, Y. L., (1990), "Bed Material and Bed Topography in Channel Bend." Proc. 7th Asian and Pacific Div. Congress, International Association for Hydraulics Research, Delft, The Netherlands.
- Yen, C. L., ve Lee, K. T., (1995), "Bed Topography and Sediment Sorting in Channel Bend with Unsteady Flow", Journal of hydraulics Engineering, ASCE, 121(8):591-599.
- Yu-Tech, L., (1972), "Discussion of Spatially Varied Flow over Side-Weirs." J. Hydr. Engrg. ASCE, 98(11), 2046-2048

Yüksel, Y., (2000), Teori ve Çözümlü Problemler ile Bilgisayar Uygulamalı Akışkanlar Mekanığı ve Hidrolik, Beta Basım A.Ş., İstanbul.

Zimmermann, C., ve Kennedy, J. F., (1978). "Transverse Bed Slopes in Curved Alluvial Streams." J. Hydr. Div., ASCE, 104(1), 33-48.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.06.1970	
Doğum Yeri	Mardin	
Lise	1985-1988	Ziya Gökalp Lisesi
Lisans	1991-1995	Doğu Akdeniz Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü (K.K.T.C)
Yüksek Lisans	1995-1998	Harran Üniversitesi İnşaat Fak. Anabilim Dalı, Hidrolik
Doktora	2000-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Hidrolik Programı

Çalıştığı kurumlar

1995-1999	Özel Sektör
1999-2000	Dicle Üniversitesi Müh.Mim.Fak. İnşaat Müh.Bölümü Araştırma Görevlisi
2000-2005	Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi