

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KASKATLARIN MANSABINDA MEYDANA  
GELEN OYULMALARIN İNCELENMESİ**

Muhammed Cihat TUNA

Tez Yöneticisi  
Doç Dr. M. Emin EMİROĞLU

DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2009

## TEŐEKKÜR

Bu alıŐma sűresince yaptıđı katkı ve önerilerden dolayı baŐta tez danıŐmanım Doç. Dr. M. Emin EMİROĐLU'na tez izleme komisyonu űyeleri Prof. Dr. Ayhan ŬNLŬ'ye ve Yrd. Doç. Dr. Mualla ŐZTŬRK', katkılarından Őtűrű babam Prof. Ahmet TUNA'ya teŐekkűrű bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLolar LİSTESİ.....	V
KISALTMALAR LİSTESİ.....	VI
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Çalışmanın Amacı.....	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı.....	1
<b>2. KASKATLARIN HİDROLİĞİ</b> .....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Basamaklı Dolusavaklarla İlgili Literatür Özeti.....	3
2.3. Akım Tipleri.....	7
2.4. Boşaltım Kanalında Hava Girişi.....	10
2.5. Enerji Sönümlenmesi.....	12
2.6. Akım Derinliği.....	13
2.7. Sürtünme Katsayısı.....	14
<b>3. OYULMA MEKANİZMASI</b> .....	15
3.1. Giriş.....	15
3.2. Oyulma Tipleri.....	16
3.3. Yersel oyulmalar İle İlgili Literatür Özeti.....	17
3.4. Yersel Oyulma Eşitlikleri.....	20
3.5 Genel Uygulamalarda Kullanılan Yarı Deneysel Formüller.....	25
3.6 Bir Enerji Kırıcı Havuz Mansabındaki Oyulmalar.....	32
3.7 Oyulma Çukuruna Etkiyen Kuvvetler.....	33
<b>4. DENEY DÜZENEĞİ</b> .....	34
4.1. Yürütülen Deney Düzeneği.....	35
4.2. Boşaltım Kanalı.....	37
4.3. Basamak Geometrileri.....	38
4.4. Düşü Havuzu Eşik Tipi.....	38
4.5. Malzeme Granülometrisi.....	38
4.6. Mansap Kanalı (Kuyruksuyu).....	39
4.7. DeneYlerin Yapılışı.....	40

4.8. Deneý Sınır Şartları .....	40
<b>5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b> .....	41
5.1 Düşüm Havuzu Tipinin Maksimum Oyulma Derinliğine Etkisi .....	41
5.2 Düşüm Havuzu Tipinin Oyulma Boyuna Etkisi .....	56
5.3 Havalanma Karakteristiklerinin İncelenmesi .....	68
5.4 Kayma Gerilmelerinin Maksimum Oyulma Derinliği ile İlişkisi .....	70
5.5 Mansap Su Seviyesinin Maksimum Oyulma Derinliği ile İlişkisi .....	72
5.6 Boşaltım Kanalı Taban Eğiminin Oyulma Boyuna Etkisi .....	74
5.7 Froude Sayısının Oyulmaya Etkisi .....	76
5.8 Sınır Şartı Olmadan Boşaltım Kanalı Eğiminin Yerel Oyulmayla İlişkisi .....	78
5.9 Oyulma Çukurunun Geometrisi .....	80
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	109
6.1 Sonuçlar .....	109
6.2 Öneriler .....	111
<b>KAYNAKLAR</b>	
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Basamaklı düşüler üzerindeki akım tipleri.....	9
Şekil 2.2. Havalanmayan bölge uzunluğu ve havalanmanın başlangıç noktası .....	10
Şekil 2.3. Ana parametreler ve havalanmanın başlangıç noktasının yeri.....	11
Şekil 3.1. Prototip oyulmaları .....	30
Şekil 3.2. Oyulma çukuru gelişimi.....	30
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin kesiti.....	36
Şekil 4.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	37
Şekil 4.3. Eşik tipleri.....	38
Şekil 4.4. İnce malzemenin granülometri eğrisi (M1).....	39
Şekil 4.5. Kalın malzemenin granülometri eğrisi (M2).....	39
Şekil 5.1. $H_d$ 'nin farklı düşüm havuzu tipleri için boy kesiti .....	42
Şekil 5.2. $\alpha=30^\circ$ , $h=5$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	43
Şekil 5.3. $\alpha=30^\circ$ , $h=10$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	44
Şekil 5.4. $\alpha=30^\circ$ , $h=15$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	45
Şekil 5.5. $\alpha=40^\circ$ , $h=5$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	48
Şekil 5.6. $\alpha=40^\circ$ , $h=10$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	49
Şekil 5.7. $\alpha=40^\circ$ , $h=15$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	50
Şekil 5.8. $H_d$ - Basamak yüksekliği boykesiti.....	52
Şekil 5.9. $\alpha=50^\circ$ , $h=5$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	53
Şekil 5.10. $\alpha=50^\circ$ , $h=10$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	54
Şekil 5.11. $\alpha=50^\circ$ , $h=15$ cm için $H_{dmax}/h'$ 'in birim debi ile değişimi .....	55
Şekil 5.12. $\alpha=30^\circ$ , $b=8.66$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	57
Şekil 5.13. $\alpha=30^\circ$ , $b=17.32$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	58
Şekil 5.14. $\alpha=30^\circ$ , $b=25.98$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	59
Şekil 5.15. $\alpha=40^\circ$ , $b=5.96$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	61
Şekil 5.16. $\alpha=40^\circ$ , $b=11.92$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	62
Şekil 5.17. $\alpha=40^\circ$ , $b=17.88$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	63
Şekil 5.18. $\alpha=50^\circ$ , $b=4.20$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	65
Şekil 5.19. $\alpha=50^\circ$ , $b=8.40$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	66
Şekil 5.20. $\alpha=50^\circ$ , $b=12.60$ cm için $L_o/b$ nin birim debi ile değişimi .....	67
Şekil 5.21. $h=5,10$ ve $15$ cm için $L_a/L$ değerlerinin birim debi ile değişimi .....	69
Şekil 5.22. $\tau/\tau_{kr}$ değerlerinin $H_{dmax}/H$ değerleri ile değişimi .....	71

Şekil 5.23. $H_d$ değerlerinin farklı akım kabartıcı yüksekliklerinde boykesiti .....	72
Şekil 5.24. $H_{dmax}/h$ değerlerinin birim debi ile değişimi.....	73
Şekil 5.25. Taban açısı ve oyulma boykesiti ilişkisi .....	74
Şekil 5.26. $L_o/b$ değerlerinin birim debi ile değişimi .....	75
Şekil 5.27. $L_o/ H_{dmax}$ değerlerinin Froude sayısı ile değişimi .....	77
Şekil 5.28. $H_{dmax}/h$ değerlerinin boşaltım kanalı taban açısı ile ilişkisi.....	79
Şekil 5.29. $L_o /b$ değerlerinin boşaltım kanalı taban açısı ile ilişkisi.....	79
Şekil 5.30. Kaskatlarda ölçülen ve hesaplanan değerlerin kıyaslanması .....	80
Şekil 5.31. $\alpha=30^\circ$ , $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu .....	82
Şekil 5.32. $\alpha=30^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M1 deney grubu .....	83
Şekil 5.33. $\alpha=30^\circ$ , $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu .....	84
Şekil 5.34. $\alpha=30^\circ$ , $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 2 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu .....	85
Şekil 5.35. $\alpha=30^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 2 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M1 deney grubu .....	86
Şekil 5.36. $\alpha=30^\circ$ , $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 2 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH3, M2 deney grubu .....	87
Şekil 5.37. $\alpha=30^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 3 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu .....	88
Şekil 5.38. $\alpha=30^\circ$ , $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 3 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH3, M2 deney grubu .....	89
Şekil 5.39. $\alpha=30^\circ$ , $q=5,872 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 3 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu .....	90
Şekil 5.40. $\alpha=40^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 4 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu .....	91
Şekil 5.41. $\alpha=40^\circ$ , $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 4 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu .....	92
Şekil 5.42. $\alpha=40^\circ$ , $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 4 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu .....	93
Şekil 5.43. $\alpha=40^\circ$ , $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 5 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu .....	94
Şekil 5.44. $\alpha=40^\circ$ , $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 5 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu.....	95
Şekil 5.45. $\alpha=40^\circ$ , $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 5 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu .....	96
Şekil 5.46. $\alpha=40^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 6 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH2, M1 deney grubu .....	97
Şekil 5.47. $\alpha=40^\circ$ , $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 6 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu .....	98
Şekil 5.48. $\alpha=40^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 6 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu .....	99
Şekil 5.49. $\alpha=50^\circ$ , $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 7 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu.....	100
Şekil 5.50. $\alpha=50^\circ$ , $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 7 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu.....	101
Şekil 5.51. $\alpha=50^\circ$ , $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 7 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu.....	102
Şekil 5.52. $\alpha=50^\circ$ , $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 8 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu.....	103
Şekil 5.53. $\alpha=50^\circ$ , $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 8 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu.....	104
Şekil 5.54. $\alpha=50^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 8 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M2 deney grubu.....	105
Şekil 5.55. $\alpha=50^\circ$ , $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 9 nolu Basamak, $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu.....	106
Şekil 5.56. $\alpha=50^\circ$ , $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 9 nolu Basamak, $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu.....	107
Şekil 5.57. $\alpha=50^\circ$ , $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 9 nolu Basamak, $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu.....	108

## TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1.</b> Prototipteki oyulma derinlikleri .....	30
<b>Tablo 4.1</b> Boşaltım kanalı basamak tipleri .....	38
<b>Tablo 4.2.</b> Oyulma deneylerinde kullanılan malzemenin özellikleri .....	39
<b>Tablo 4.3.</b> Deney sınır şartları .....	40

## SİMGELER

$a$	: Küpsel blokların kenar uzunluğu(m),
$a_{ort}$	: Ortalama hava-su spesifik alanı (1/m),
$b$	: Basamak uzunluğu (cm),
$B_0$	: Dikdörtgen en kesitli jetlerin mansap suyu seviyesindeki kalınlık,
$C$	: Hava konsantrasyonu,
$d$	: Dane çapı(mm),
$d_m$	: Taban malzemesinin ortalama dane çapı(mm),
$d_{50}$	: Malzemenin ağırlık olarak %50'sinin elekten geçtiği dane çapı(mm),
$d_{85}$	: Malzemenin ağırlık olarak %85'inin elekten geçtiği dane çapı(mm),
$d_{90}$	: Malzemenin ağırlık olarak %90'ının elekten geçtiği dane çapı(mm),
$DH$	: Düşüm havuzu,
$e$	: Mansap su seviyesinden ölçülen su yastığı derinliği(m),
$E_0$	: Jetin dalışındaki enerjisi,
$E$	: Jetin y mesafesindeki enerjisi,
$\varepsilon$	: Havalanma oranı,
$f$	: Sürtünme katsayısı,
$F_r$	: Froude Sayısı,
$F_r^*$	: Pürüzlü Froude Sayısı,
$F_d$	: Densimetric Froude Sayısı,
$g$	: Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ),
$h$	: Basamak yüksekliği (cm),
$H_{dmax}$	: Maksimum oyulma derinliği(cm),
$h_{kr}$	: Kritik akım derinliği (cm),
$h_B$	: Oyulma yastık derinliği (cm),
$h_{nap}$	: Nap yüksekliği (cm),
$h_u$	: Akarsu tabanından itibaren mansap su yüksekliği (cm),
$H$	: Memba ile mansap su seviyeleri farkı (cm),
$H_1$	: Dolusavak sonunda ölçülmüş hız yüksekliği (m),
$H_2$	: Akım derinliği (m),
$J$	: Eğim,
$K$	: Von Karman sabiti,
$k_S$	: Kavitasyon derinliği (m),



$L$	: Memba ile mansap arasındaki mesafe(m),
$L_a$	: Havalanmış bölge uzunluğu(m),
$L_{cav}$	: Kavite uzunluğu (m),
$L_{non}$	: Havalanmamış bölge uzunluğu(m),
$L_o$	: Oyulma boyu (cm),
$L_{yastık}$	: Oyulma yastık boyu (cm),
M1-2	: Malzeme tipleri,
$n$	: Porozite,
$N$	: Hız-güç denklemi üst indisi,
$P$	: Basınç (Pa),
$R$	: Hidrolik yarıçap(m),
$Re$	: Reynolds sayısı,
$R_{dyn}$	: Dinamik jet basıncını sonucunda yer alan kuvvet etkisi,
$q$	: Birim debi(m <sup>2</sup> /s),
$q_o$	: Kapak üstünden geçen akım miktarı(m <sup>2</sup> /s),
$q_u$	: Kapak altından geçen akım miktarı(m <sup>2</sup> /s),
$q_w$	: Dikdörgen kesitli kanalın birim genişliğinden geçen debi(m <sup>2</sup> /s),
$Q$	: Debi (m <sup>3</sup> /s),
$S$	: Akımın sürüklenme kuvveti,
$T$	: Kabarcık dağılım zamanı,
$T_u$	: Türbülans dağılımı ,
$T_u'$	: Karakteristik türbülans dağılımı,
$t, t'$	: Zaman(saat),
$t_k$	: Akarsu tabanından itibaren oyulma derinliği (cm)
$U_w$	: Temiz su akım hızı (m/s),
$V$	: Hız (m/s),
$V_{kr}$	: Kritik hız (m/s),
$V_o$	: Jetin mansap suyuna dalış hızı(m/s),
$W$	: Blokların su altındaki ağırlığı(N),
$y_e$	: Jetin ulaştığı mesafe(m),
$y_k$	: Jetin çekirdek uzunluğu(m),
$z$	: Mansap su seviyesi(cm),
$\rho$	: Suyun özgül kütlesi(kg/m <sup>3</sup> ),
$\tau$	: Kayma gerilmesi (kg/m <sup>2</sup> ),

$\tau_{kr}$	: Kritik kayma gerilmesi ( $\text{kg/m}^2$ ),
$\theta$	: Jetin dalış açısı,
$\gamma_s$	: Taban malzemesi özgül ağırlığı( $\text{N/m}^3$ ),
$\delta$	: Sınır tabakası kalınlığı(mm),
$\xi$	: Surf parametresi,
$\mu$	: Suyun dinamik viskozitesi( $\text{kg/m.s}$ ),
$\nu$	: Suyun kinematik viskozitesi( $\text{m}^2/\text{s}$ ),
$\alpha$	Kanal açısı,
$\Delta x$	Sonda sensörleri arası mesafe (m),
$\delta x$	Sensör boyutu (m),
$\sigma$	Hava ve su arasında yüzey gerilmesi (N/m),

#### **Alt indisler**

air	Hava akışı
kr	Kritik akım şartları;
w	Su akışı
cav	kavitasyon
dam	baraj
max	maksimum
min	minimum
ort	ortalama

## ÖZET

Doktora Tezi

# KASKATLARIN MANSABINDA MEYDANA GELEN OYULMALARIN İNCELENMESİ

**Muhammed Cihat TUNA**

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2009, Sayfa : 111

Kaskatlar ve basamaklı dolusavaklar, özellikle silindire sıkıştırılmış beton (SSB) barajların inşa tekniklerindeki ilerlemelerle birlikte son yıllarda oldukça sık tercih edilen hidrolik yapılardır. Bu hidrolik yapılar; baraj dolusavaklarında, isale hatlarında, suların havalandırılmasında, oksijen transferinde, sulama ve yağmur suyu sistemlerinde enerji sönmüleme amacıyla kullanılmaktadır. Kolay inşa edilebilmesi, kavitasyon riskini azaltması ve boşaltım kanalı boyunca enerjinin büyük bir kısmının sönmülenmesinden dolayı mansapdaki düşüm yatağının boyutlarını küçülmesi bu hidrolik yapıların avantajlarındandır.

Belirli bir yükseklikten düşen suyun kinetik enerjisi, su jetinin çarptığı bölgede dinamik basınca dönüşmektedir. Jetin taban üzerindeki dinamik basınç etkisi, oyulmanın ana nedenlerindedir. Düşen su, yatak üzerindeki malzemeyi kısa zamanda sürüklemekte ve arkasından da tabanı oymaya başlamaktadır. Bu esnada oyulmanın hidrolik yapıya mesafesi ve derinliği gövdenin ve diğer ek yapıların stabilitesini tehlikeye düşürebilmektedir.

Bu çalışmanın asıl amacı, kaskatların hidrolik karakteristiklerini incelemek, farklı akım koşulları ve yapı geometrilerinin oyulma çukuru geometrisine etkisini belirlemektir. Kaskatların mansabında oluşacak oyulma; Farklı boşaltım kanalı taban açısı, basamak geometrisi, düşü havuzu eşik tipi, mansap su seviyesi ve malzeme granülometri parametreleri dikkate alınarak incelenmiştir. Her deney sonunda oyulma çukuru geometrisini belirlemek amacıyla x, y ve z yönlerinde okumalar yapılmış ve bu verilerle bir paket yazılım kullanılarak üç boyutlu oyulma çukuru perspektifi, en kesiti ve kontür haritaları çizilmiştir. Olayı etkileyen parametrelerin oyulma geometrisi üzerindeki etkisi incelenerek tüm deney verileri tartışılmıştır. Maksimum oyulma çukurunun derinliği için eşitlikler elde edilmiştir.

Sonuç olarak; Basamak geometrisinin, boşaltım kanalı taban açısının, düşü havuzu eşik tipinin, maksimum oyulma derinliği ve oluşan oyulma çukuru geometrisi üzerinde oldukça önemli parametreler olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Maksimum oyulma derinliği, oyulma çukuru geometrisi, kaskat, yersel oyulma.

## ABSTRACT

PhD Thesis

# INVESTIGATION OF THE SCOUR OCCURED AT THE DOWNSTREAM OF CASCADES

Muhammed Cihat TUNA

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2009, Page : 111

Cascade and stepped spillways have regained popularity over the last decades with the evolution of the roller compacted concrete (RCC) dam construction technique. These hydraulic structures are used for energy dissipation at dam spillway, at conduction line, at aeration of water, at oxygen transfer, at systems of irrigation and stormwater. Advantage of hydraulic structure include ease of construction, reduction of cavitations risk potential, and reduction of the stilling basin dimensions at the downstream dam toe due to significant energy dissipation along the chute.

Kinetic energy of water falls down from a specific height transform to dynamic pressure at area to where water jet hits. The main reasons of the scouring are dynamic pressure effect over the base of jet. Falling water drifts material over the bed in a short time and then starts to carve the base. In this time, the distance of scouring to hydraulic structure and depth of scouring can be danger for body and other extra builds stability.

The real aim of this study is; investigate the hydraulic characteristics of cascades and determine the effect of different flow conditions and build geometries to scouring hole. Scouring at cascades downstream has been investigated considering different stepped chute base angle, step geometry, stilling basin sill type, downstream water levels and material granulometry parameters. All data of experiment have been discussed with investigating the effect of parameters, which affects the event, over the scouring geometry. At the end of each experiment to determine the scour geometry readings were taken in the directions of x, y, z and the three dimension scour perspective, cross section and contour maps, geometry was drawn using computer program by using these readings. The parameters affected the scour geometry was taken into account for obtaining maximum scour depth and all experimental data were analyzed. Equations for maximum scour depth have been presented.

As a result; step geometry, stepped chute base angle and sill type of the stilling basin are very important parameters over the maximum scour depth and scour hole geometry, has been obtained.

**Keywords:** Maximum scour depth, Scour hole geometry, Cascade, Local scour

## 1.GİRİŞ

Akarsu yatağına yerleştirilen herhangi bir yapı, akımda bazı değişikliklere yol açar. Bu değişimlerin önceden tahmin edilmesi gerekir. Zaman içinde önceden tahmin edilemeyen problemlerin ortaya çıkması yapının hasar görmesine ve görevini yerine getirememesine yol açar. Barajlarda dolusavak yapıları da bu tip yapılar olduğundan projelendirilirken önemli problemlerle karşılaşmaktadır. Taşkın debisi esas alınarak tasarlanan dolusavaklar, baraj rezervuarında depolanamayan fazla suyu mabdan mansaba, nehir yatağına düşürürler. Dolusavaktan veya dip savaktan çıkan yüksek enerjili akım akarsu tabanı ile bulunduğu noktada yersel oyulmalar meydana getirir. Bu olay, baraj gövdesi, sıçratma ucu topuğu, mansap şevleri ve çıkıştaki diğer hidrolik yapıların stabilitesinde tehlike arz eden sonuçlar doğurabilir. Ayrıca oyulan malzemenin yatağa birikmesi ile bölgesel olarak su seviyesinin yükselmesi ve santralin batık çalışması gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, oyulma gelişiminin kontrol altına alınması için suyun enerjisini güvenli biçimde sönmeyecek dolusavak ve enerji kırıcı yapıların tasarlanması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

### 1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada kaskatların ve basamaklı dolusavakların mansabında meydana gelebilecek yersel oyulmalar incelenirken, farklı basamak geometrileri, boşaltım kanalı eğimleri, mansap su seviyesi derinlikleri, değişik düşüm havuzu tipleri ve farklı sediment türleri gibi parametrelerin, oyulma profili ve maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisini deneysel yöntemler kullanarak tespit etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla, yapılan deneysel çalışmalar, Fırat Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

Oyulma üzerine şimdiye kadar yapılan çalışmalardan elde edilen ampirik ifadeler incelenmiştir. Her nehir yatağı ve meydana gelen yersel oyulma kendine has özellikler taşıdığından, verilen ampirik ifadeler sadece bir karşılaştırma imkanı sağlamakta, kesin sonuçlar vermeyip her yersel oyulmayı temsil edememektedir. Bu sebeple bu deneysel çalışmadan elde edilen veri sonuçlarına göre bir eşitlik belirlemek hedeflenmiştir. Dolayısıyla farklı akım şartlarında, basamaklı düşülerin mansap tarafında meydana gelen yersel oyulmaların geometrilerini ve değişimlerini belirlemek çalışmanın asıl amaçlarındandır.

Yapılan literatür incelemeleri neticesinde, basamaklı boşaltım kanalları mansabında meydana gelen oyulmalarla alakalı bir çalışmanın olmadığı gözlemlenmiştir. Bizi bu araştırma çalışmasına yönelten neden budur.

## **1.2 Çalışmanın Kapsamı**

Yersel oyulmaların profili ve maksimum oyulma derinliğinin belirlenmesine yönelik deneysel yöntemler kullanılan bu çalışmanın ikinci bölümünde basamaklı dolusavaklar ve bunların hidrolik tasarımlarından bahsedilerek, günümüze kadar yapılan çalışmalarla ilgili literatür verilmiştir. Oyulma olayını etkileyen parametreler ve bunlar arasındaki ilişkiler, Bölüm 3' te yersel oyulma başlığı altında verilerek bunlara ait literatür taraması yapılmıştır. Deneysel çalışmaların yöntemi, nitelik ve içeriği Bölüm 4 içinde verilmiştir. Bölüm 5'te deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve analizi yapılarak, Bölüm 6'da bu çalışmadan elde edilen sonuçlara ilişkin yorum ve öneriler sunulmuştur.

## 2. KASKATLARIN HİDROLİĞİ

### 2.1. Giriş

Kaskatlar ve basamaklı dolusavaklar önceleri gerçek mühendislik kurallarına uygun olmasa da yaklaşık 3500 yıldır kullanılmaktadır. İnsanoğlu bu yapıyı da doğadan esinlenerek yapmaya başlamıştır. Gold Creek ve New Croton barajlarının dolusavakları profesyonel manada ilk olarak inşa edildiği düşünülen basamaklı dolusavaklardır. 19. yüzyılın sonlarına doğru basamaklı dolusavakların akım enerjisinin önemli bir kısmının kırılmasına yardımcı olduğu tam olarak anlaşılmıştır. Akım enerjisinin sönmülmesi amacıyla inşa edilen dolusavaklar, akım enerjisinin dolusavak boyunca kırılmasını sağlamaktadırlar. Klasik dolusavaklar ile kıyaslandığında, kaskatlar da toplam enerjinin ortalama %70-80'i sönmülenebilmekte ve kalan enerjinin kırılması için mansapta daha küçük bir hidrolik yapıya ihtiyaç duyulmaktadır.[1]

Basamaklı dolusavaklar ağırlık barajlarının mansap yüzüne oldukça ekonomik ve pratik olarak yerleştirilebilir. Özellikle SSB barajlar için mükemmel bir dolusavak tipidir. SSB barajların dış tarafı klasik beton ile inşa edilmektedir. Memba ve mansap yüzü bu şekilde inşa edildiği için mansap yüzüne basamaklı dolusavak yapmak daha düşük maliyetli olmaktadır. Günümüzde basamaklı dolusavak denilince akla ilk önce SSB barajlar gelmektedir. Diğer yaygın uygulama kullanımı ise dolgu barajlarda ve acil durum dolusavaklarındadır. Her iki durumda da dikkatli bir yapısal ve hidrolik tasarımın yapılması gereklidir. Baraj yapısının hizmet ömrü boyunca güvenliğin sağlanması mühendislik hizmetlerinin birincil görevidir. Bu nedenle bunların tasarımında çok dikkatli olunması zorunludur. Deneysel olarak hidrolik laboratuvarlarında ve nümerik olarak bilgisayarlarda, basamaklı dolusavakların hidroliği araştırılmış ve projelendirilmesi ilgili kriterler literatürde verilmiştir. Konu ile ilgili çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

### 2.2 Basamaklı Dolusavaklarla İlgili Literatür Özeti

Boes ve Hager [1] Basamaklı dolusavakların hidrolik tasarımı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada farklı eğim ve basamak yüksekliklerinde basamaklı dolusavaklarda meydana gelen akım tiplerini ve koşullarını incelemişlerdir.

Chanson ve Toombes [2] Basamaklı bir dolusavakda sıçramalı ve geçiş akım şartlarında hava girişinin deneysel araştırmaları hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada nap, geçiş ve sıçramalı akımlar için büyük bir deney setinde hız, akım derinliği, hava kabarcık oranları, sürtünme katsayısı gibi parametrelerin değişim miktarlarını incelemişlerdir.

Chanson [3] Basamaklı dolusavak ve kanallar üzerindeki sıçramalı akımın hidroliği ie ilgili bir çalışma yapmıştır. Sıçramalı bir akım dikkate alınarak eğimi nispeten yüksek olan bir akımın enerji sönümlenme oranı ile daha düşük eğimli bir dolusavağınkiyle olan farklılıklar araştırılmıştır. Sıçramalı akım rejimi altında enerji sönümlenmesinin maksimum olması için  $h_c/H$  oranının minimum olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Basamaklı düşülerde hava girişi üzerine (2.1) eşitliğini vermiştir.

$$\frac{L_i}{k_s} = 13.6(\sin \alpha)^{0.0196} (F_*^{*})^{0.713} \quad (2.1)$$

Burada;  $L_i$ :Havalanmayan Bölge uzunluğu(m),  $F_*^{*}$ : Pürüzlü Froude sayısı,  $k_s$ :  $h \cdot \cos \alpha$  dır.

Rice ve Kadavy [4] SSB barajlardaki basamaklı dolusavaklarda model çalışmaları” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Fiziksel model çalışmaları göstermiştir ki SSB barajlarda tasarım kolaylığı ve hidrolik performans bakımından basamaklı dolusavaklar önerilebilirlik derecesi oldukça yüksek olan bir çözümdür.

Chanson [5] Basamaklı düşülerde nap ve sıçramalı akım koşullarında enerji sönümlenmesinin karşılaştırılması hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada farklı dolusavak boyutlarında ve akım şartlarında enerji sönümlenme karakteristikleri saptanmış ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Büyük savaklarda sıçramalı akımlarda ve küçük savaklarda nap akımı koşullarında kinetik enerji sönümlenmesinin maksimum olduğunu ifade etmiştir.

Tatewar ve Ingle [6] Basamaklı dolusavaklarda maksimum enerjinin sönümlenebilmesi için basamak yüksekliğinin seçimi ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada basamak geometrisi ile ilgili deneyler yapılarak maksimum enerji sönümlenmesi şartının gerçekleşebilmesi için basamak yüksekliğinin tayinini araştırmışlardır. Ayrıca nap akım rejiminde enerji sönümlenmesinin miktarı ve optimum basamak yüksekliğinin hesaplanması için (2.2)eşitliğini geliştirmişlerdir.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \left[ \frac{(1 - \alpha) \left[ 1 + (h_c/h) + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha) \right]}{N + 1.5(h_c/h)} \right], \quad \alpha = K + a \log(h_c/h) + b \log \theta + c \log(h/l) \quad (2.2)$$

Chanson [7] Basamaklı dolusavaklarda oluşan nap, geçiş veya sıçramalı akımın önceden tahmin edilmesiyle ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada sıçramalı akım hallerinde basit bir analitik metot elde edilmeye çalışılmıştır. Bu metot, basamak sonlarındaki akım jetinin çarpmalarındaki momentum yönlerinin değişimine dayandığını belirtmiştir.



Robinson, Rice ve Kadavy [8] SSB barajların basamaklı dolusavaklarında enerji sönümlenmesiyle ilgili yaptıkları çalışmalarında SSB barajlarda basamaklı düşüler çok uygun bir çözüm olduğundan Randleman Barajı'nın 1/40 ölçeğinde modeli teşkil edilerek iki boyutlu akım hali için optimum basamak yüksekliği ve enerji sönümlenmesi miktarı normal dolusavaklarla mukayese etmişlerdir.

Yasuda [9] Basamaklı düşülerde sıçramalı akım karakteristiklerinde basamak kaviteyon bölgesiyle ilgili olarak yaptıkları çalışmalarında, basamakların şekli ve büyüklüğünün akım koşullarında basamak aşınmalarına, enerji sönümlenmesine, basınç şiddeti ve dağılımına etkilerini araştırmışlardır.

Boes ve Hager [10] Basamaklı dolusavakların hidrolik tasarımını incelemişlerdir. Sıçramalı akımın, kritik derinliğin, şüt açısının ve basamak yüksekliğinin bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, şüt yan duvar yüksekliğini belirlemek için pürüzlü Froude sayısından yararlanmışlardır. Pürüzlü Froude sayısı, birim debi, şüt açısı ve basamak yüksekliğinin bir fonksiyonu şeklinde alınmıştır. Ayrıca bir tasarım örneği çalışmada sunulmuştur. Basamaklı dolusavakların hidroliği 0.50 m genişliğinde 5.70 m uzunluğunda 30, 40 ve 50°'lik şüt açılarında bir dizi deneyler yapılmıştır. Basamak yükseklikleri 23.1, 46.2 ve 92.4 mm alınmıştır. Yazarlar, nap akımından sıçramalı akıma geçiş, üniform iki fazlı akım, akım derinlikleri, sürtünme faktörü, yan duvar uzunluğu, havalandırmanın sürtünme faktörü üzerine etkisi, yan duvar uzunluğunun tasarımı ve enerji sönümlenme konularını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmayla enerji sönümlenmesi için aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$\frac{H_r}{H_{\max}} = \exp\left[-0.045\left(\frac{K}{D_H}\right)^{0.1} (\sin\alpha)^{-0.8}\right] \frac{H_d}{h_c} \quad (2.3)$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}, \quad \frac{H_r}{H_{\max}} = \frac{F}{\frac{H_d}{h_c} + F}, \quad \Delta H = H_{\max} - H_r \quad (2.4)$$

$$F = \left(8 \cdot \frac{f_b}{\sin\alpha}\right)^{1/3} \cos\alpha + \frac{\phi}{2} \left(\frac{f_b}{8\sin\alpha}\right)^{-2/3} \quad (2.5)$$

Burada;

$D_H$  : Hidrolik çap(m)                       $H_r$  : Enerji yüksekliği(m)                       $\Delta H$  : Enerji Kaybı (m)

$h_c$  : kritik akım derinliği(m)                       $f$  : Sürtünme katsayısı                       $q$  : Birim debi ( $m^3/s/m$ )

$\alpha$  : Düşü kanalı taban eğimi                       $K$ : pürüzlülük katsayısı

Boes [11] İki fazlı eşikli akımda fiziksel model çalışmaları hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada iki fazlı serbest yüzeyle akımların araştırılması için yeni bir deneysel

yaklaşım yapılmıştır. Çalışma sunucunda basamaklı dolusavakların pürüzsüz dolusavaklara nispeten daha çok enerji sönümlenme karakterine sahip oldukları anlaşılmıştır.

Boes [12] İki fazlı basamaklı dolusavak akımı modelinde ölçek tesirleri” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada Reynolds ve Weber sayılarının limit değerleri hava konsantrasyon ve karışım hızını etkilediklerinden bu etkilerin en az olduğu değerler tayin edilmiştir.

Yasuda ve Ohtsu [13] Basamaklı kanal düşülerinde dalış karakteristikleri hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir.

Boes ve Hager [14] Basamaklı dolusavaklarda iki fazlı akım karakteristikleri hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada basamaklı dolusavaklarda iki safhalı hava-su akımlarında minimum dolusavak boyutunun nasıl meydana gelebileceği araştırılmış bunun gerçekleşebilmesi için Weber ve Reynolds sayılarının asgari değerlerine indirgenmesinin gerekli olduğu belirlenmiştir.

Minor ve Hager [15] Basamaklı dolusavakların hidrolöği hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada özellikle sıçramalı akımlar için basamaklı dolusavakların tasarımı model çalışmaları için iki farklı düşü eğimi geliştirilmiştir.

Tatewar ve Ingle [16] Eğik basamaklı dolusavaklarda nap akımı hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada eğik basamaklı dolusavaklar üzerindeki nap akım rejiminin enerji sönümlenmesi için bir metot önerilmiştir. Yapılan analizde basamak eğiklik açısının etkileri araştırılmıştır.

James, Main ve Moon [17] Basamaklı düşülerde enerji sönümlenmesinin artırılması hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada alternatif akım kırıcılara göre dik basamaklı dolusavakların enerji sönümlenmesinde rolü ve geometrisi araştırılmıştır. V şekilli basamakların enerji sönümlenmesini artırabileceği ifade edilmiştir. Nap akımı için aşağıdaki eşitliği vermişlerdir.

$$\left(\frac{h_c}{h}\right) = 0,541\left(\frac{h}{l}\right)^{-1,07} \quad (2.6)$$

Pinheiro ve Relvas [18] Dolgu barajlar üzerinde geleneksel olmayan dolusavaklar hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada dolgu barajlar üzerinde yapılabilecek olan dolusavaklar ve bunların maliyet analizleri üzerine bir çalışma yapılmıştır.

Pinheiro ve Fael [19] Basamaklı dolusavaklarda nap akımı oluşumu ve enerji sönümlenmesi hakkında çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada farklı dolusavak eğimlerinde meydana gelecek olacak toplam enerji yükünün miktarı ve bunun basamaklı bir dolusavakla ne kadar bir kısmının sönümlenebileceğinin tespiti hakkında deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir.

Chamani ve Rajaratham [20] Basamaklı dolusavaklar üzerindeki sıçramalı akım karakteristikleri” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada büyük bir basamaklı dolusavak modelinde farklı iki eğimde ve değişik ( $h_c / h$ ) oranlarında dolusavakta gelişen sıçramalı akım karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir.

Baylar, Bağatur ve Emiroğlu [21] Basamaklı düşülerde nap, geçiş ve sıçramalı akım rejimlerinin içerdiği oksijen miktarının önceden belirlenmesi adı altında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada farklı eğimler ve basamak yükseklikleri altında nap, geçiş ve sıçramalı akım koşullarında basamaklı düşülerde oksijen transferi ve havalanma karakteristikleri araştırılmıştır.

Yasuda ve Takahashi [22] Basamaklı dolusavaklar üzerindeki sıçramalı akımın enerji sönümlenmesi hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada geniş aralıklı deneysel koşullar altında basamaklı dolusavaklarda meydana gelen sıçramalı akımlarda enerji sönümlenmesi çalışmaları yapılmış ve görülmüştür ki toplam enerji yükünün % 70 den büyük bir kısmı basamaklar tarafından sönümlendiğini ifade etmişlerdir.

Chamani ve Rajaratham [23] Basamaklı dolusavaklarda sıçramalı akım başlangıcı” hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada basamaklı dolusavakta meydana gelecek olan sıçramalı akımın önceden tahmini için bir eşitlik vermişlerdir.

Ferrando [24] Basamaklı dolusavaklarda havalandırılmalı akım başlangıcı adında yaptığı çalışmada, üniform pürüzlülük, şüt açısı ve verilen debinin değeri için dikdörtgen bir düşüde havalanma noktasının başlangıcının tayini konusunda bir takım deneysel çalışmalar yürütmüştür.

Matos, Frizell ve Pinheiro [25] Dolgu barajlar için beton basamakların akıma karşı korunması ve tasarımı hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada basamaklı dolusavaklarda hava girişi, enerji sönümlenmesi, akım mukavemeti ve ilave edilecek olan beton blokların şekli ve stabilitesi tartışılmış ve bir takım eşitlikler sunmuşlardır.

### **2.3 Akım Tipleri**

Basamaklı düşülerde, basamak geometrileri ve birim debiye göre üç farklı akım tipi meydana gelmektedir. Bunlar nap akımı, geçiş akımı ve sıçramalı akım şeklinde isimlendirilmektedir (Şekil 2.1).

Nap akım rejimi, debinin ve kanalın taban açısının düşük olduğu durumlarda oluşmaktadır. Nap akım rejimi iki şekilde tanımlanmaktadır[25]. Bunlar;

- a) Küçük debi ve akım derinliklerinde tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı

b) Kısmi gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımıdır.

Chanson [26] tarafından yapılan araştırmalar tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımının aşağıda verilen kritik formülden daha küçük debilerde oluşacağını göstermiştir.

$$\left(\frac{h_c}{h}\right)_{\text{char}} = 0,916\left(\frac{h}{l}\right)^{-1,276} \quad (2.7)$$

Burada,  $h_c$  kritik akım derinliğini,  $h$  basamak yüksekliğin,  $l$  basamak genişliğini, ve  $(h_c)/h$  ise akım koşulunu tanımlar. Tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akım koşulları  $h_c/h < (h_c/h)_{\text{char}}$  durumu için oluşmaktadır.

Şekil 2.1' de görüldüğü gibi nap akımı bir sonraki basamağa çarpan serbest düşümlü jetin ve bunu izleyen tam veya kısmi hidrolik sıçramaların birbiri ardı sıra oluşması şeklinde tanımlanır. Jetin havada kırılması veya basamak üzerinde bir hidrolik sıçrama oluşturarak karışması sonucunda enerji sönümlenmesi gerçekleşir. Nap akım rejiminde, küçük debilerde çok etkili bir enerji sönümlenmesi gerçekleşir.

Debi ve kanal tabanı açısı yükseldikçe akımın rejimi nap rejiminden geçiş akım rejimine geçer. Geçiş akım rejimi orta büyüklükteki debilerde, nap akım rejimi ve sıçramalı akım rejimi arasında meydana gelmektedir. Bu akım rejiminde basamak üst kenarlarında akış esnasında vorteksler oluşmakta ve aynı zamanda bu kısımlarda hava boşlukları da oluşmaktadır.

Debinin veya eğimin artmasıyla geçiş akımından, sıçramalı akıma geçiş koşulları gözlenmektedir. Sıçramalı akımın oluşması debinin, basamak yüksekliğinin ve basamak uzunluğunun bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar. Bu akım rejiminde, basamaklar arasında akımla aynı yönde çevrinti vorteksi oluşur ve bu vorteksin kararlı ve sürekli olması durumunda akım basamak uçlarının ve bu vortekslerin oluşturduğu izafi bir sınır tabakası üzerinden akar.

Bu durum tam gelişmiş sıçramalı akım koşul kriterini oluşturur ve Chanson [3]'nin ampirik bağıntısıyla tanımlanabilir.

$$\frac{h_c}{h} = 1,1 - 0,4 \frac{h}{l} \quad (2.8)$$

$h_c/h < 0,53$  ise nap akım rejimi,  $h_c/h > 0,97$  ise sıçramalı akım şartları,  $0,53 < h_c/h < 0,93$  arasında ise geçiş akım şartları meydana gelmektedir. Chanson [3] bu bağıntısının belirsizliğini  $\pm\% 30$  olarak tanımlamıştır.

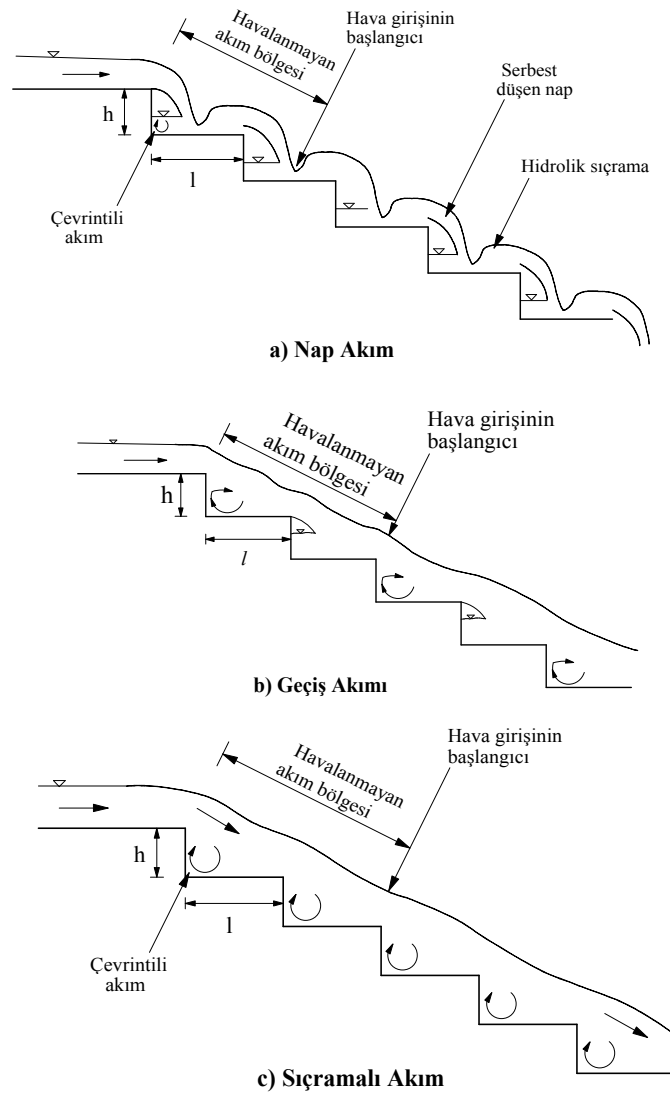
Sıçramalı akım koşullarında büyük sürtünme kayıpları ile birlikte akım içersine etkili bir şekilde hava girişimi karakterize olduğundan özellikle büyük barajlarda nap akım rejimine oranla daha fazla enerji sönümlenmesi sağlanmaktadır.

Baylar, Bağatur ve Emiroğlu yapmış oldukları deneysel çalışmada Nap akımı ve sıçramalı akım için aşağıdaki formülü bulmuşlardır.[21]

$$\left(\frac{h}{h_c}\right)_N = 0.57(\tan \alpha)^3 + 1.30 \quad 5.7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ \quad (2.9)$$

$$\left(\frac{h}{h_c}\right)_S = 1.16(\tan \alpha)^{0.165} \quad 5.7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ \quad (2.10)$$

Burada;  $h_c$  ( $h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$ ) kritik akım derinliği(m)  $g$ : yer çekimi ivmesi( $m/s^2$ ).



Şekil 2.1 (a-c) Basamaklı düşüler üzerindeki akım tipleri

## 2.4 Boşaltım Kanalında Hava Girişi

Basamaklı bir düşü boyunca oluşan akım koşulları, şiddetli türbülanslı ve büyük oranda hava karışımı akım olarak açıklanır. Türbülans ve hava girişi basamaklı düşü boyunca hava-su arasında gaz transferinin oluşmasında etkili olur. Nap akımında her bir basamaktaki hava-su gaz transferi, basamaklarda oluşan hidrolik sıçrama ve akıma dalan jet nedeniyle olmaktadır. Sıçramalı akım rejiminde ise türbülans ve sınır tabakasının akım derinliğine ulaştığı yerde doğal yüzeysel havalanma başlar.

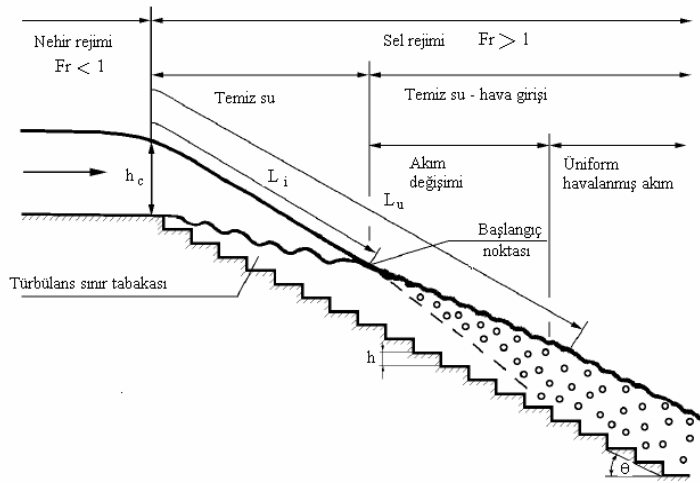
Serbest yüzeyin türbülans sınır tabakasına ulaştığı noktada, türbülansın derecesi yeteri kadar büyükse akımın içine hava girmeye başlar. Bu nokta havalanma noktasının başlangıcı olarak isimlendirilir. Havalanmayan bölge uzunluğunun ( $L_{na}$ ) tespiti için Boes[10] aşağıdaki eşitliği vermiştir. Şekil 2.2'de havalanmayan bölge ve havalanmanın başlangıç noktası görülmektedir.

$$Z_i = L_i \cdot \sin \alpha \quad , \quad \frac{Z_i}{h} = 4,93 \cdot Fr^{0,84} \quad 26^\circ < \alpha < 55^\circ \quad (2.11)$$

$$\text{Burada; } Fr = \frac{q}{(g \cdot \sin \alpha \cdot h^3)^{1/2}} \text{ olmak üzere pürüzlü Froude sayısını ifade etmektedir.} \quad (2.12)$$

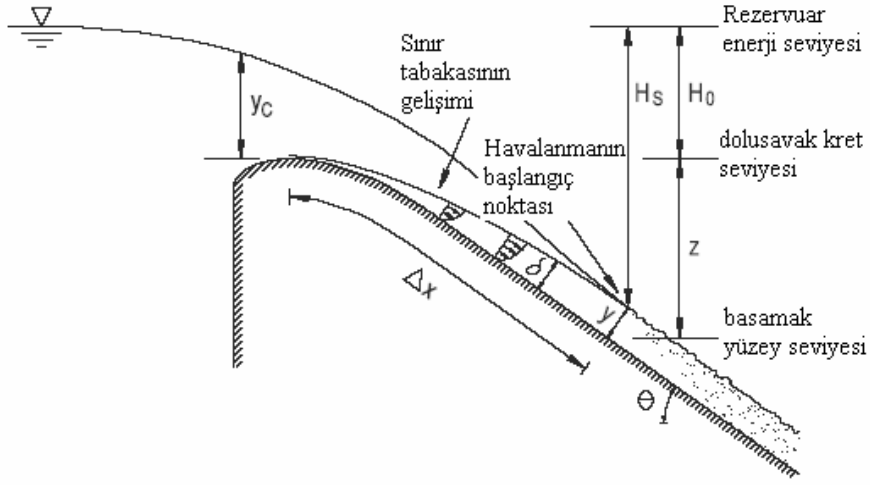
q: Birim debi ( $m^2/s$ ), h: Basamak yüksekliği (m),  $\alpha$ : Dolusavak eğimi, Havalanmayan bölgenin uzunluğu(m)

$$L_i = \frac{q^{0,84}}{g^{0,42} \cdot (\sin \alpha)^{1,42} \cdot h^{0,26}} \text{ eşitliği ile bulunabilmektedir.} \quad (2.13)$$



Şekil 2.2. Havalanmayan bölge uzunluğu ve havalanmanın başlangıç noktası

Ferrando[24] ya göre bir  $\Delta x$  konumu vasıtasıyla havalanmanın meydana gelmeye başladığı başlangıç noktası tayin edilebilir. Akım yüzeyine ve su gövdesinin içerisine havanın girmeye başladığı kanalın yüzü boyunca çeşitli inceleme ve ölçümler yapılmıştır. Bu bölge aynı zamanda kendiliğinden havalanmanın doğal olarak geliştiği başlangıç bölgesi olarak da isimlendirilir. Ferrando [24] kanal kesitindeki sınır tabakasının başlangıç ve gelişiminin direkt olarak tayin edilebildiğini göstermiştir. Ferrando [24] tarafından başlangıç noktasının tayini için bir metot önerilmiştir. Bu metot kayıp katsayısı, eğriler ve Reynolds sayısının da kullanıldığı bir yöntemdir.



Şekil 2.3. Ana parametreler ve havalanmanın başlangıç noktasının yeri (Ferrando [24])

$$\frac{\delta}{\Delta x} = 0.0212 \left( \frac{\Delta x}{H_s} \right)^{0.11} \left( \frac{\Delta x}{K_s} \right)^{-0.10}$$

$$H_s = H_0 + z - y \cdot \cos \theta \quad (2.14)$$

Burada;  $\delta$  : sınır tabakası kalınlığı

$H_s$  : enerji yükü

$K_s$  : üniform pürüzlülük katsayısı

$$\Delta x = \left( \frac{q}{0.05642 \cdot K_s^{0.056} (\sin \alpha)^{0.34}} \right)^F \quad (2.15)$$

Burada F üst indisi aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

$$F = \left( 1.46443 \cdot K_s^{0.0054} (\sin \theta)^{0.0027} \right)^{-1} \quad (2.16)$$

Baylar, Bağatur ve Emiroğlu [21] Havalanmayan Bölge uzunluğu ve Oksijen transferi verimi için;

$$\frac{L_i}{h} = \cos \alpha \left[ 1.88 F_*^{0.35} + 0.17 F_* \right]^{2.98} \quad (2.17)$$

$$E_{20} = 1 - \left[ 8.24 \times 10^{-4} F_*^{1.65} + 0.50 F_*^{1.34} \left[ \frac{L_a}{h} \right]^{-1.34} + 2.23 \times 10^{-2} \left[ \frac{L_a}{h} \right]^{-0.50} \right]^{0.28}$$

$$30^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ \quad (2.18)$$

eşitliklerini geliştirmişlerdir.

$E_{20}$  20°C deki oksijen transfer verimidir. Burada  $F_* = q/(g \sin \alpha h^3)^{1/2}$  pürüzlülük Froude sayısı,  $h$  (m) basamak yüksekliği,  $\alpha$  (derece) boşaltım kanalı açısı,  $L_a$  (m) havalanmış bölge uzunluğu dur.

## 2.5 Enerji Sönümlenmesi

Bir basamaklı dolusavakta enerji sönümlenmesi açısından en önemli parametreler birim debi, kritik akım derinliği, baraj yüksekliği, şüt kanalı açısı ve basamak geometrileri olarak sıralanabilir. Chanson [5] akımın üniform akım koşullarına ulaştığı şüt kanallarındaki enerji kaybını sürtünme faktörü, dolusavak eğimi kritik akım derinliği ve baraj yüksekliğine bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla vermiştir.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = 1 - \frac{\left( \frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left( \frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{H_{\text{dam}}}{h_c} + \frac{2}{3}} \quad \text{Kapaksız dolusavaklar.} \quad (2.19)$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = 1 - \frac{\left( \frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left( \frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{H_{\text{dam}} + H_p}{h_c}} \quad \text{Kapaklı dolusavaklar.} \quad (2.20)$$

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot d_0^2}{q_w^2} \cdot \frac{D_H}{4} \quad (2.21)$$

Burada;

$D_H$  : Hidrolik çap(m)       $H_{\text{dam}}$  : baraj yüksekliği(m)       $H_0$  : Enerji yüksekliği(m)  
 $\Delta H$  : Enerji Kaybı (m)       $H_p$  : Kret üstünde su yükü(m)       $h_c$  : kritik akım derinliği(m)  
 $f$  : Sürtünme katsayısı       $q_w$  : Birim debi (m<sup>3</sup>/s/m)       $d_0$  : üniform akım derinliği  
 $\alpha$  : Düşü kanalı taban açısını göstermektedir.



Tatewar, Poery ve Ingle [16] Yaptıkları deneyle, dolusavağın eğimini 0,421 den 0,842' ye ve  $h_c/H$  oranının 0,01 den 0,14 e kadar değiştirerek farklı boyutlarda enerji sönümlenmesi için çalışmışlardır. Bütün bu çalışmalar sonucunda basamak yüksekliği arttıkça enerji sönümlenmesinin de belirli maksimum bir değere kadar arttığı gözlenmiştir. Söz konusu araştırmacılar aşağıdaki eşitlikleri sunmuşlardır.

$(\Delta E/E)_{\max} = f(h_o/H, h_c/H, S)$ , Burada;

$h_o$  : uygun değer basamak yüksekliği S: dolusavak mansap eğimi

$(\Delta E/E)_{\max} = K+a((h_o/H)+b(h_c/H)+c.S)$

$$\frac{\Delta E}{E} = 1 - \frac{(1-\alpha)^N \left[ 1 + 1,5(h_c/h) + \sum_{i=1}^{N-1} (1-\alpha) \right]}{N + 1,5(h_c/h)} \quad (2.22)$$

$$\alpha = a-b \log(y_c/h)$$

$$a = 0,30-0,35(h/1)$$

$$b = 0,54+0,27(h/1)$$

## 2.6 Akım Derinliği

Basamak yüksekliği  $h$ , pürüzlü olarak Froude sayısı  $F_r^* = \frac{q}{(g \cdot \sin \alpha \cdot h^3)^{1/2}}$  ile

normalleştirilmişse ;

Burada;  $q$ : birim genişlik debisi ( $m^3/sn/m$ ),  $g$ : yer çekim ivmesi,  $\alpha$ : düşü açısı olmak üzere

$$\frac{h_w}{h} = 0,23.F_r^{0,65} \quad \text{elde edilir.}$$

$h_w$  : üniform su derinliği (m)

$$\text{Bu denklem } \frac{h_w}{h} = 0,215.F_r^{2/3} \text{ olarak düzeltilmiştir.} \quad (2.23)$$

$$\text{Veya } \frac{h_w}{h_c} = 0,215(\sin \alpha)^{-1/3} \text{ olur.} \quad (2.24)$$

Burada; üniform su derinliği  $h_w$  nin  $h_c$  kritik derinliğe oranının sut(düşü) açısı  $\alpha$  ile ilgili olduğu görülmektedir.

## 2.7 Sürtünme Katsayısı

Boes ve Hager [1] , Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı  $f_w$  değerini tayin etmek için

$$\sin \alpha = \frac{v^2}{2g} (f_w \cdot D), \text{ Hidrolik yarıçap } R = D/4 \text{ olduğundan}$$

$$D_H = 4R = \left( \frac{4 \cdot b \cdot h_w}{b + 2h_w} \right) \text{ Ve } U = \frac{q_w}{h_w} \text{ hız olduğundan}$$

$$f_w = \frac{8 \cdot g \cdot b \cdot h_w^3 \cdot \sin \alpha}{q_w^2 (b + 2h_w)} \text{ elde edilir.} \quad (2.25)$$

$h_w$  :su derinliği       $\alpha$ : Eğim : yer çekim ivmesi

$q_w$  :Birim Debi      b: kanal genişliği

Rice ve Kadavy [4], tarafından sürtünme katsayısı ile ilgili aşağıdaki ampirik formül önerilmiştir.

$$f = \frac{2 \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot D_H}{U^2} \quad (2.26)$$

### 3. OYULMA MEKANİZMASI

#### 3.1 Giriş

Baraj rezervuarların da depolanması mümkün olmayan taşkın suları, boşaltım kanalları yardımıyla barajın mansap tarafına aktarılır. Dolusavakların bir kısmı çoğunlukla suyu serbest jet halinde, bir kısmı ise bir düşü kanalı ile ve sonundaki bir deflektör yardımı ile sıçratarak meyilli bir jet halinde akarsu yatağı üzerine düşürürler. Düşen su yatağa ulaştığı anda önemli bir enerjiye sahiptir [30].

Belirli bir yükseklikten düşen suyun kinetik enerjisi, jetin çarptığı bölgede dinamik basınca dönüşmektedir. Ana kaya üzerindeki çatlaklar arasına etkiyen basınç, bir hidrolik kama gibi blokları birbirinden ayırabilmektedir. Özellikle suyun yüksek türbülansı, bağlayıcı malzemenin yorulmasına neden olmaktadır. Jetin taban üzerindeki dinamik basınç etkisi oyulmanın ana nedeni olarak düşünülebilir [31].

Yüksek düşü ve büyük debilerin söz konusu olması halinde suyun enerjisinin, enerji kırma havuzu veya benzeri bir yapı ile kırılması hem hidrolik hem de yapı tekniği yönünden güç problemler ortaya çıkarmaktadır[31].

Düşen su, yatak üzerindeki alüvyal malzemeyi kısa zamanda sürükler ve arkasından kaya tabanı oymaya başlar. Oyulmanın gelişmesi ile birlikte doğal bir enerji kırma havuzu oluşur ve suyun enerjisi oyulma hacmi ile orantılı olarak kırılır. Bu sırada oyulmanın baraj gövdesine mesafesi ve derinliği gövdenin ve diğer ek yapıların stabilitesini tehlikeye düşürebilir [30].

Dolusavaktan veya dipsavaktan çıkan yüksek enerjili akım akarsu tabanı ile ilk bulunduğu noktayı şiddetle tahrip eder. Bu olaya yersel oyulma ismi verilmektedir. İkinci tip oyulma nehir tabanının büyük bir kesimde alçalmasıdır. Bu olaya ise genel oyulma ismi verilmektedir. Taban alçalmasının tersi taban yükselmesidir [32].

Nehir yatağında oyulan malzeme cinsi kaya olabileceği gibi kohezyonlu veya kohezyonsuz malzemede olabilir. Su jetinin etkisi altında kaya tabanlı nehir yatağının oyulma mekanizması oldukça karmaşıktır. Sonuç olarak meydana gelen oyulma hidrolik, hidrolojik ve morfolojik faktörlere ve bu faktörlerin birbirleriyle ilişkisine bağlıdır. Bunlardan morfolojik faktörler oyulmanın oluştuğu morfolojik faktörleri tanımlar. Su jetinin çarptığı kayalık yatak çatlaklı bir yapıda ise jetin meydana getireceği dinamik basınç sonucunda çatlaklarda oldukça büyük kuvvetler oluşur ve kayaç matrisi bozulur. Oyulmanın dinamik bir süreç olması dolayısıyla savaklanan debinin miktarının ve savaklama süresinin de dikkate alınması gerekir [31].

Nehir yatağında oyulma çukuru oluşumunda ilk olarak yatak malzemesi özelliğini kaybederek parçalanır daha sonra erozyona uğrayan malzeme oyulma çukurundan taşınır. Oyulma çukurundan taşınan malzeme akım tarafından sürüntü malzemesi olarak taşınır veya oyulma çukuru mansabına yığılır. Bu yığılma oyulma derinliği ile ilgilidir. Bunun yanı sıra kuyruksuyu seviyesinin dip savak ve santral işletmesini etkileyecek yüksekliğe kadar artırabilir. Eğer oluşan yığılma bölgesi, oyulma derinliğini sınırlar ise oyulmanın dinamik limite olduğu kabul edilir. Ancak bu yığılmanın taşınması halinde oyulma maksimum derinliğe kadar devam eder. Bu sınırdan en büyük statik limit olarak kabul edilir [32].

Yukarıda bahsedilen oyulma mekanizmasından dolayı hidrolik bir yapı boyutlandırılmadan önce detaylı bir inceleme ve araştırma yapılması şarttır. Oyulma çukurunun boyutları çok sayıda faktörlere bağlı olduğundan, projeciye bir formül verebilmek için bu faktörleri kapsayan laboratuvar ve uygulamada geniş ölçüde teorik ve deneysel incelemelerin yapılması gerekir.

### **3.2 Oyulma Tipleri**

Oyulma üç farklı grup içinde sınıflandırılabilir. Bunlar; 1) Genel oyulma, 2) Daralma Oyulması, 3) Yersel Oyulma dır.

Genel oyulma; Akarsu yataklarında akarsudaki akım rejimine, malzeme cinsine, akarsu kesit özelliklerine, akarsu güzergahına ve akarsu kullanımına bağlı olarak tabanda meydana gelen oyulmalara genel taban oyulması denmektedir. Akarsu profili boyunca oluşan genel taban oyulması kısa veya uzun dönemli olabilir. Kısa dönemdeki taban oyulması tek veya ardışık olarak meydana gelen taşkınlardan kaynaklanır. Uzun dönemdeki taban oyulması ise akarsuyun morfolojik rejimine bağlı olarak sürekli taban oyulması ve şev erozyonu şeklinde oluşur. Sürekli taban alçalması başlıca hidrometeorolojik, jeomorfolojik ve insan kaynaklı olabilir. İnsan kaynaklı sürekli taban alçalması akarsu üzerine yapılan ve etkilerinin değerlendirilmesi sağlıklı yapılmamış yapılar, akarsu taban malzemesinin büyük miktarda çekilmesi, akarsudan büyük miktarda su çekilmesi, vb. gibi nedenlerden kaynaklanır.

Uzun dönemdeki taban alçalması yıllar mertebesinde oluşur. Ayrıca değişen akım koşullarına göre aynı bölgede bazen oyulma bazen birikme olabilmektedir. Bu nedenle, net değişim oyulma yönünde olsa bile çok uzun bir zaman diliminde gerçekleşecektir.

Daralma oyulması; su yapısı elemanları bazen akım alanını fazlasıyla daraltarak yersel hızın artmasına neden olurlar. Tabanı gevsek ve taşınmaya müsait malzemedan oluşan bir

akarsuda artan akım hızı ve kayma gerilmesi nedeniyle önemli oyulmalar oluşur. Bu oyulmaya daralma oyulması denir.

Yersel oyulma ise su yapılarının mansap kısmındaki yersel oyulmalar önemli ve çözülmesi gereken bir problemdir. Bugüne dek yapılan çalışmalarda nehir yatağında oluşan oyulma çukurunun, baraj mansabındaki hidrolik şartlara, nehir yatağının direncine, dolusavak akımının havalanma derecesine, su jetinin oyma enerjisine, su jeti profiline ve dolusavağın çalışma süresine bağlı olarak değişim gösterdiği gözlenmiştir [30]. Bu oyulma çukuru, su jetinin düştüğü bölgede meydana gelen büyük dinamik kuvvetlerin nehir yatağındaki alüviyal malzemeyi sürüklemesiyle oluşmaya başlar. Taşınan bu malzeme ilk anda oyulma çukurunun memba ve mansap tarafına yığılır. Oyulma çukurunun büyümesiyle memba taraftaki malzeme tekrar oyulma çukuru içine yuvarlanır ve su jeti tarafından mansaba doğru sürüklenir. Taşınan malzemenin bir kısmı çukurun hemen mansabında birikir. Bu oyulma, alüviyal malzemenin tamamen taşınarak kaya zemine ulaşılmasından sonra da devam eder. Kaya zeminler, genelde bünyelerindeki çatlaklar nedeniyle tabakalı bir yapıya sahiptirler. Bu tabakalar arasında çoğu kez değişik boşluklar bulunur. Kaya zemine ulaşıldığında tabakalar arasındaki çatlaklara ve boşluklara büyük dinamik basınçlar etki eder. Bu dinamik basınç, kaya yüzeylerinde hidrolik pres gibi davranarak parçalanmalarına neden olur. Taban kayası yapısal özelliklerini ve kohezyonunu kaybettiği ölçüde, oyulmaya karşı direnci de kırılır. Oyulma su jetinin oyma gücünün, zemin direncine eşit olacağı derinliklere kadar devam eder.

Oyulma çukuru geometrisinin bir yersel oyulmadan diğerine değişmesi beklenir. Bununla beraber yersel oyulma çalışmalarının müşahede edilen bir özelliği de oyulma çukuru şev eğiminin malzemenin şev açısına çok yakın olmasıdır [57].

Yapılan deneyler sonucunda, oyulma çukurunun % 64'üne ilk 20 saniyede, oyulma derinliğinin yaklaşık %97'sine ise 2 saat içinde ulaşıldığını bulunmuştur [56].

### 3.3 Yersel Oyulmalar İle İlgili Literatür Özeti

Yersel oyulma problemleri üzerine çok sayıda teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Geometrik parametreler ile sediment taşınımı parametreleri arasındaki fonksiyonel bağıntı bir oyulmadan diğerine değiştiğinden ve bu parametreler arasındaki ilişkilerin oldukça karmaşık olmasından dolayı, gerek matematiksel gerekse fiziksel modelleme tam olarak sağlanamamaktadır [58].

Oyulma derinliğine tesir eden başlıca faktörler ise;

- Mansap su yüksekliği (z),
- Düşü yüksekliği veya memba ile mansap su seviyeleri arasındaki fark (H),

- Birim debi (q),
- Taban malzemesinin ortalama dane çapı ( $d_m$ ) ve yerçekimi ivmesidir (g).

Aşağıda düşüm yataklarının sonundaki oyulmalar hakkında yapılmış olan çalışmalar özetle sunulmuştur.

Aksoy [30] “Yüksek düşülü barajların dolusavağı mansabında kaya tabandaki yersel oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada jetin hidrolik karakteristiklerine, mansap suyuna ve kaya blokların özelliklerine bağlı olarak bir oyulma derinliği bağıntısı geliştirilmiştir.

Yıldız [31] “Barajların mansabındaki oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulmanın şiddetinin gelen debinin büyüklüğüne ve yapının şekline bağlı olduğu görülmüştür.

Şentürk [32] “Barajların projelendirilmesinde hidrolik esaslar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulma olayının iki şekilde gerçekleştiğini ifade ederek yersel oyulmalar hakkında bilgi vermiştir.

Tuna [33] “Geçirimli zeminlerde hareketli bağlama inşaatı ve Türkiye’deki hareketli bağlamalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulma denklemlerine yer vererek oyulma uzunlukları ve maksimum oyulma derinliği hakkında bilgiler sunulmuştur.

Schoklitsch [34] “Oyulma” hakkında ilk deneysel çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmalarda mansap su yüksekliğini dikkate almaksızın sabit bağlama için oyulma derinliğini elde etmiştir.

Eggenberger [35] “Oyulma uzunlukları” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulma uzunluklarının iki kısımdan meydana geldiğini esas alarak oyulma uzunlukları için eşitlikler vermiştir.

Veronese [36] “Oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, oyulma derinliği hesabı için dikkate alınan birçok parametre arasından en önemlilerini birim debi ve toplam su yükü olarak tespit etmiştir.

Hartung ve Husler [37] “Jet enerjisinin sönümüne bağlı olarak oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, yapmış oldukları deneylere dayanarak dairesel enkesitli jetlerin difüzyon olayını kapsayan teorisinin  $y \approx 20D_0$  derinliğine kadar geçerli olduğunu saptamışlardır.

Cola [38] “Jet enerjisinin sönümüne bağlı olarak oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, yapmış olduğu laboratuvar çalışmalarına göre dikdörtgen enkesitli jet halinde difüzyon olayının teorik olarak incelenebileceği bölge için  $y \approx 40 B_0$  olarak kabul edilmiştir.

Martins [39] “Serbest düşen bir jetin küpsel bloklardan oluşan tabandaki oyma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada jetin düştüğü andaki yatayla yaptığı açı  $\alpha = 40^\circ-70^\circ$  arasında değişmiş ve bunun sonuca pratik etkisi görülmemiştir

Gunko, Burkov, Isachenko, Rubinstein, Soloviova, Yuditsky [40] “Savak sırtından sıçrayan bir jetin nehir tabanında oyma derinliği” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada laboratuvar incelemelerine dayanılarak yüksek düşülü barajların mansabındaki hidrolik rejim ve kaya zeminlerdeki yersel oyulmalar incelenmiş, su yapılarının boyutlandırılması amacıyla hız katsayısı, dolusavak akımının havalanma derecesi, sıçrayan jetin düşme mesafesi ve çatlaklı kaya zeminler için oyulma çukurunun boyutlarını saptamak için bağıntular verilmiştir.

Yıldız ve Üzücek [41] “Dolusavak sıçratma eşiğinden çıkan jetlerin oluşturduğu oyulma derinliğinin hesaplanması” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada şütlü ve sıçratma eşikli dolusavaklardan mansaba bırakılan akımın oluşturacağı oyulma derinliği basit bir eşitlik ile ifade edilmiştir.

Gijs, Hoffmans ve Pilarczyk [42], “ Hidrolik yapıların mansabında yersel oyulma” adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu deneysel çalışmada oyulmanın gelişimi ve taşınma mekanizmasını incelemişler ve maksimum oyulma derinliği için bir takım amprik formüller vermişlerdir.

Shalash [43] “Batık veya serbest yüzeyli hidrolik sıçramanın oyulmaya etkisi” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada eşiksiz bir platforma doğru çıkan bir kapak altı akımının platform sonunda oluşturacağı oyulma derinliği için çeşitli eşitlikler saptamıştır

Rubinstein [44] “Yüksek düşülü barajların kanal yataklarındaki yersel oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada prototip gözlemlerine dayanarak kaya tabanlı nehir yataklarındaki oyulmalar için eşitlikler elde etmiştir.

Hay ve White [45] “Hava girişinin düşü havuzunun performansına etkisi” hakkında çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda, akıma hacim olarak %15,20 oranında karışan havanın, eşikli bir düşü havuzu mansabındaki oyulmaları %5 ile %10 arasında azalttığı sonucu elde edilmiştir.

Çataklı, Özal ve Tandoğan [46] “Düşü havuzu sonundaki oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, hem eşikli hem de eşiksiz düşü havuzlar için eşitlik verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada oyulmalara karşı düşü havuzu enkesitine havuz tabanından yukarıya doğru yerleştirilen kırışlerin etkisi de araştırılmıştır

Studenichikov [47] “Oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada özellikle jetin yanal açılımından dolayı oyulma derinliğindeki azalmayı dikkate almaktadır.

Mirtsskhulava [48] “Kohezyonsuz zeminlerdeki ve kaya zeminlerdeki bölgesel ve genel oyulmaların yöntem ve hesapları” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, oyulma derinliği ve jet giriş genişliğini veren eşitlikler elde etmiştir.

Taraimovich [49] “Kaya temeller üzerindeki yüksek düşülü dolusavakların altında bulunan kanalların deformasyonları” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, dolusavağın işletmesinden sonra maksimum oyulma derinliğinin, maksimum debinin geçtiği 2-7 mevsim arasında oluşacağını iddia etmiştir. Bunun yanı sıra bir mevsim boyunca oluşan maksimum oyulma derinliğinin, toplam oyulma derinliğinin %27 si ile %67 si arasında değiştiğini ileri sürmüştür.

Gunko ve Soloviova [50] “Yüksek düşülü barajların dolusavakları altındaki nehir yataklarındaki yersel oyulmalar ve hidrolik rejim” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, sıçratma ucundan çıkan ve yörüngesi boyunca planda yayılan bir jetin oluşturduğu oyulma derinliğindeki azalma oranı için bir formül belirlemişlerdir

Chian [51] “Barajların mansabındaki oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, prototipteki 6 adet oyulmayı inceleyerek basit bir eşitliğe ulaşmıştır. Nehir yatağı malzemesi ile mansap suyu seviyesi ve dalma açısı gibi diğer bazı parametrelerin oyulma üzerine etkisini ihmal etmiştir.

Martins [52] “Serbest düşülü jetlerin kaya zeminlerde oluşturduğu oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, deneyler özellikleri zaman göre değişmeyen ve hava karışimsız kompakt bir jet ile dikdörtgen enkesitli bir kanal içinde yapılmış ve tabana bloklar yerleştirilmiştir.

Mason ve Arumugan [53] “Barajlarda serbest jetlerle oyulma” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, 47 model çalışması ve 26 prototip ölçümden elde ettikleri veriler ile prototip için bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Cömert [54] “Keban Barajı dolusavak iyileştirilmesi” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada Keban Barajı dolusavak düşüm yatağında meydana gelen oyulmalar ve dolusavak düşüm yatağının oyulmalara karşı korunması için yapılan yapılar hakkında bilgi verilmiştir.

Husler [55] “Kariba Barajı mansabında meydana gelen oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada yapılan kaba hesaplar ve tahminler herhangi bir tedbir öngörülmezse oyulma çukurunun derinliğinin 80 m’yi bulacağını göstermiştir.

### **3.4. Yersel oyulma Eşitlikleri**

Aşağıda bazı araştırmacıların oyulma derinlikleri ve geometrileri hakkında yaptıkları önemli bazı çalışmalar kısaca özetlenecektir.



### (a) Schoklitsch Oyulma Denklemleri

Oyulma hakkında ilk deneysel çalışmayı yapan Schoklitsch [34] mansap su yüksekliğini dikkate almaksızın,

$$T_o = 4,75 \frac{H^{0,2} \cdot q^{0,57}}{d_m^{0,32}} \quad (3.1)$$

eşitliğini elde etmiştir. Burada;

$T_o$ = Oyulma derinliği (m)

$q$ = Birim debi ( $m^3/sn/m$ )

$H$ = Memba ile mansap su seviyeleri farkı (m)

$d_m$ = Mansap tabanındaki ortalama dane çapı (mm)

### (b) Veronese Göre Oyulma Denklemleri

Veronese'ye [36] göre oyulma derinliği

$$T_o = 3,68 \frac{H^{0,225} \cdot q^{0,54}}{d_m^{0,42}} \quad (3.2)$$

eşitliği ile tayin edilir.

Eşitlikteki büyüklüklerin birimleri Schoklitsch [5] eşitliği ile aynıdır.

### (c) Jaeger'e Göre Oyulma Denklemleri

Jaeger[31] başlangıçta oyulmayı,

$$T_o = K_o \cdot H^{0,25} \cdot q^{0,50} \left( \frac{h_u}{d_m} \right) \quad (3.3)$$

eşitliği ile vermiştir. Daha sonraki araştırmalar neticesinde oyulma denklemi aşağıdaki şekilde düzeltilmiştir [31].

$$t_k = K_o \frac{H^{0,25} \cdot q^{0,72}}{d_m^{0,33}} \left( \frac{h_o}{q^{2/3}} \right)^{0,33} \quad (3.4)$$

$t_k$  = Akarsu tabanından itibaren oyulma derinliği,

$K_o$  = 6 olarak verilen bir katsayı.

### (d) Eggenberger'in Oyulma Denklemleri

Eggenberger [35], oyulma denklemini,

$$t_k + h_u = 22,88 \frac{H^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \quad (3.5)$$

eşitliği ile verir [7]. Burada;

$d_{90}$  = Taban malzemesinin ağırlık olarak %90'ının elekten geçtiği dane çapı.

Hareketli bağlamalarda kapak altından ve aynı zamanda kapak üstünden akım mevcut olduğu durumlarda 22,88 sabit katsayısı yerine aşağıdaki  $K_o$  katsayısı kullanılır.

$$K_o = 22,88 \frac{-1}{e^{0,11} \cdot X^3 - 0,15X^2 + 0,7X + 0,9} \quad (3.6)$$

Burada

$$X = q_o/q_u$$

$q_o$  = Kapak üstünden geçen akım miktarı,

$q_u$  = Kapak altından geçen akım miktarı

Yukarıda eşitlik  $q_o/q_u \geq 1,38$  değerine kadar geçerlidir.  $q_o/q_u$  değerinin 1,38 den daha küçük olduğu durumlarda Eggenberger eşitliği kullanılamaz. Sadece kapak altında akım mevcut olan hareketli bağlamalar için  $K_o = 10,55$  olarak verilmektedir.

#### (e) Müller'in Oyulma Denklemi

Müller model deneyleri neticesinde aşağıdaki eşitliğini elde etmiştir [31].

$$t_k + h_u = K_o \frac{H^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \quad (3.7)$$

Bu denklemde ,

$K_o = 8,8$  düşüm yatağı olan,  $K_o = 13,10$  düşüm yatağı olmayan bağlamalar için geçerlidir.

#### (f) Hartung'a Göre Oyulma Denklemi

$$t_k + h_u = 12,4 \frac{H^{0,36} \cdot q^{0,64}}{d_m^{0,32}} \quad (3.8)$$

ifadesi ile verilir[37].  $h_u$  değeri  $h_{ukr} = 1,8 \cdot q^{2/3}$  değerinden daha büyükse yukarıdaki eşitlikte  $h_u$  yerine  $h'_u = 0,2h_u + 0,8 h_{ukr}$  değerinin kullanılması gerekir.

#### (g) Maniak Oyulma Denklemi

Eşik şekillerine, boyutlarına, enerji kırıcıların aralık ve boyutlarına göre yaptığı araştırma neticesinde Maniak ,

$$\frac{h_u + t_k}{q^{2/3}} = \frac{1}{g^{1/3}} \left( \frac{h_u + t_k / h_{kr}}{h_{kr}} \right) \quad (3.9)$$

eşitliğini vermektedir [31]. Bu denklem dişli eşik yüksekliği  $S' = 0,4h_{kr}$  ve dişli eşik aralığı  $1,75h_{kr}$  olduğu için geçerlidir.

### (h) Kotulas Formülü

$$t + h_2 = 0,78 \cdot \frac{h^{0,35} \cdot q^{0,7}}{d_{90}^{0,4}} \quad (3.10)$$

Kotulas'ın geliştirdiği bu deneysel eşitlikte  $d_{90}$ 'ın birimi m cinsinden alınmıştır. Bu eşitlik serbest düşülü su jetinin kohezyonsuz malzemenin bulunduğu nehir yatağında oluşturacağı oyulma derinliği hesabı için geliştirilmiştir. Nihai durumdaki oyulma çukurunun nihai uzunluğu ise aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmiştir.[31]

$$l_{sc} = 2,7 \cdot \frac{h^{0,45} \cdot q^{0,9}}{g^{0,45} \cdot d_{95}^{0,8}}$$

Oyulma derinliğinin maksimum olduğu nokta ile serbest düşülü su jeti çıkış noktası arasındaki uzaklık

$$x_1 = 3,9 \cdot \frac{h^{0,27} \cdot q^{0,54}}{g^{0,27} \cdot d_{95}^{0,08}} \quad (3.11)$$

formülü ile verilmiştir. ( $d_{95} \approx 1,40 \cdot d_{90}$ )

### (j) Studenichikov Formülü

Oyulma derinliği ile ilgili olarak Studenichikov tarafından ise aşağıda verilen eşitlik elde edilmiştir.[49]

$$t + h_2 = \left( 1,5 + k \cdot \frac{h_c^2 \cdot n}{h_0^2} \right) \left( \frac{0,8942 \cdot (\xi \cdot q_0)^{0,8}}{q^{0,40} \cdot d_m^{0,200}} \right) \quad (3.12)$$

Burada

$h_c$  = Su jetinin kritik derinliği

$q$  = Çarpma kesitindeki birim debi

$q_0$  = Jetin çıkıştaki birim debisi

$d_m$  = Yatak malzemesi ortalama dane çapı

$h_0$  = Akım derinliği

$n$  = Jetin yayılmasını ve hava girişini karakterize eden katsayı  $n > 0,7$  olmalıdır.

Eğer jet oldukça birleşik ve yoğun ise  $n = 1$  alınır.

$$\xi = \frac{q}{q_0}$$

Bu formül aşağıdaki sınırlar içinde geçerlidir.

$$t + h_2 < 10^4 \cdot d_m \quad \text{ve} \quad \left( \frac{h_c}{h_0} \right)^2 > 5 \quad (3.13)$$

Studenichikov formülü özellikle jetin yanal açılımından dolayı oyulma derinliğindeki azalmayı dikkate almaktadır. Ancak Martins [39], Studenichikov'un deneysel çalışmalarında kullandığı en büyük ortalama dane çapının ( $d_m$ ) yaklaşık 16 mm olduğuna, bazı çalışmalarının ise  $d_m = 0,2mm$  'lik ortalama dane çapları ile gerçekleştirdiğine dikkati çekmiştir.

### (k) Martins A Formülü

Martins, model benzeşimi kaya küplerle yapılan yataktaki oyulmalar için aşağıdaki eşitliği elde etmiştir[39]. Burada a küp malzemenin kenar uzunluğudur.

$$t = 0,14.N + 0,7.h_2 - \frac{0,73.h_2^2}{N} \quad (3.14)$$

$$N = \sqrt[3]{\frac{Q^3.h^2}{a^2}}$$

$t$  = Oyulma derinliği (m)

$h_2$  = Mansap su derinliği (m)

$h$  = Mamba ve mansap su seviyeleri arasındaki düşey mesafe (m)

(3.14) nolu denklemin diferansiyeli,  $h_2 = 0,48.N$  kuyruksuyu derinliği değerinde oyulmanın maksimuma ulaşacağı sonucunu vermektedir.

### (l) Machado Formülü

Su jetinin kaya tabanda oluşturduğu oyulmalar ile ilgili olarak Machado tarafından elde edilen iki eşitlik aşağıda verilmiştir.[31]

$$t + h_2 = 1,35 \cdot \frac{C_v^{0,5} \cdot q^{0,5} \cdot h^{0,3145}}{d_{90}^{0,0645}}$$

(3.15)

Burada;

$d_{90}$  = Yatak malzemesi dane çapı (m)

$C_v$  = Jetin yörüngesi boyunca havalanması ile ilgili bir katsayı

$t + h_2$  = Kuyruksuyu seviyesinden itibaren oyulma derinliği (m)

Aşağıda eşitlik (3.15) nolu eşitliğin nihai oyulma derinliğini veren şeklidir.

$$t + h_2 = 2,98 \cdot C_v^{0,5} \cdot q^{0,5} \cdot h^{0,25}$$

(3.16)

### (m) Veronese Formülü

Veronese yaptığı çalışmalar sonunda nihai oyulma derinliği hesabı için dikkate alınan birçok parametre arasından en önemlilerini birim debi ve toplam su yükü olarak tespit etmiştir.[36]

Bunun yanı sıra oyulmanın rezervuar seviyesi ile kuyuksuyu seviyesi arasındaki farktan daha çok birim debiye bağlı olduğunu ileri sürmüştür.

Veronese formülü, serbest düşülü düşey doğrultudaki bir jetin mansap su yastığına daldığı koşullar için geliştirilmiş olup nihai oyulma derinliğinin pratik olarak hesabında en çok kullanılan formüllerden birisidir.

$$t + h_2 = 1,9 \cdot h_t^{0,225} \cdot q^{0,54} \quad (3.17)$$

Burada;

$t + h_2$  = Kuyuksuyu seviyesinden itibaren maksimum oyulma derinliği (m).

$h_t$  = Serbest düşülü dolusavaklarda kuyuksuyu seviyesi ile rezervuar seviyesi arasındaki kot farkı. Sıçratma uçlu dolusavaklar için rezervuar ve sıçratma ucu arasındaki yük kaybı, seviye olarak bu farktan çıkarılmalıdır.

Veronese yaptığı model çalışmalarında giderek daha küçük dane çaplı malzeme kullanmış ve dane çapının küçülmesinin nihai oyulma derinliğini etkilemediğini tespit etmiştir. Veronese, prototipteki büyük kaya blokların, zamanla parçalanarak jet tarafından harekete geçirilebileceğini tespit etmiştir. Bu nedenle Veronese formülü zaman ve malzeme çapı parametrelerini içermemektedir.

Bu formül serbest düşen jetler için elde edilmiştir. Sıçratma ucundan çıkan jetler mansap suyuna genellikle yatay  $20 - 40^\circ$  'lik bir açı yaparak dalar. Model çalışmaları sonucunda bu tip jetlerin yarattığı düşey oyulma derinliğinin Veronese formülü ile hesaplanan değerden daha küçük olduğu belirlenmiştir.

Hesaplanan değerlerin modelde elde edilenden daha büyük olması jetin daldıktan sonra da eğrisel hareketini devam ettirdiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra jet çıkış açısının genellikle sıçratma ucu çıkış açısından küçük olması, maksimum oyulmanın olduğu uzaklığın daha kısa ve oyulma derinliğinin daha az olması sonucunu doğurmaktadır.

### 3.5 Genel Uygulamalarda Kullanılan Yarı Deneysel Formüller

Bu bölümde verilen eşitlikler akımın oyulma çukuru içerisindeki davranışının yarı deneysel analizine dayanmaktadır. Burada yapılan en önemli kabul, akımın malzemeyi oyulma

çukurunun mansap ucundaki yığılma bölgesinin daha ötesine taşıyamadığı durumda,, oyulma gelişiminin sona ereceğidir. Bu durum, oyulma çukuru içerisindeki yatay hız bileşenine bağlı olarak jetin dalma açısını önemli bir parametre haline getirmektedir.

**(a) Mirtskhulava Formülü**

Y ve z eksenleri doğrultusundaki akım hızlarını da göz önüne alan Mirtskhulava [48] kohezyonsuz malzemedeki oyulma derinliği hesabı için aşağıdaki eşitliği geliştirmiştir.

$$t + h_2 = \left( \frac{3 \cdot \eta \cdot V_u \cdot (2 \cdot B_u)}{w} - 7,5(2 \cdot B_0) \right) \cdot \frac{\sin \theta'}{1 - 0,175 - \cot \theta'} + 0,25 \cdot h_2 \quad (3.18)$$

3.18 eşitliğindeki  $\eta$  ortalama hıza göre anlık maksimum hız katsayısı değeri prototip için  $\eta = 2$ , modeller için  $\eta = 1,5$  alınmaktadır.  $w$  ise bir danenin çökme hızıdır.

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot g(\gamma_s - \gamma) d_{90}}{1,75 \cdot \gamma}} \quad (3.19)$$

$\gamma_s$  = Malzemenin özgül ağırlığı  
 $\gamma$  = Hava/su karışımının özgül ağırlığı  
 Mirtskhulava jet giriş genişliğini

$$2 \cdot B_u = \frac{0,8 \cdot q}{V_u} \quad (3.20)$$

olarak vermiştir.

$$V_u = \theta \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.21)$$

Burada  $\theta$  genellikle 1'e eşit alınır.  $\gamma$ 'nın hesabı için akıma hava karışımı etkisi dikkate alınarak aşağıdaki formül verilmiştir.[48]

$$\gamma = \left( 1 - 0,18 \cdot V_0^{\frac{2}{5}} \right) \cdot \gamma_{su} \quad (3.22)$$

Mirskhulava tarafından verilen (3.18) nolu eşitlik  $5m/s < V_u < 25m/s$  aralığında ve  $d_{90} > 2mm$  olduğu durumda geçerlidir. Daha küçük dane çapları için eşitliğin parantez içindeki bölümü deneysel olarak hesaplanan  $\eta_1$  düzeltme faktörü ile çarpılmalıdır. Dane çaplarına karşılık gelen  $\eta_1$  değerleri aşağıda verilen formülle de hesaplanabilir.[48]

$$\eta_1 = 0,42 \sqrt{d_{90}}$$

Mirskhulava kaya zeminler ve kohezyonlu zeminler için de bazı oyulma eşitlikleri elde edilmiştir.

### (b) Mikhalev Formülü

Mikhalev de yüksek düşülü barajların mansabındaki taban oyulmalarını ele almış ve aşağıda verilen eşitliği elde etmek için Mirtskhulava'nın yaklaşımına benzer bir yaklaşım kullanmıştır[31].

$$t + h_2 = \left[ \frac{5,65 \cdot q}{\sqrt{g \cdot d_0} \cdot \left( \frac{h_2}{d_{90}} \right)^{1/6}} - 9 \cdot (2 \cdot B_u) \right] \cdot \frac{\sin \theta'}{1 - 0,215 \cdot \cot \theta'} \quad (3.23)$$

Burada  $d_{90}$  metre cinsinden malzeme çapı,  $\theta$  ise jetin mansap kuyruk suyuna dalma açısıdır.

### (c) Aksoy Formülü

Aksoy yüksek düşülü barajların mansabında kaya tabanlı nehir yataklarındaki yersel oyulmaları incelemiştir [30]. TÜBİTAK tarafından desteklenen bu araştırmanın laboratuvar çalışmaları DSİ Araştırma ve Geliştirme Dairesi Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda düzenli kaya bloklarından oluşmayan ve bloklar arasında bağlantı bulunmayan bir yatağın oyulması incelenmiş ve oyulma derinliği için:

$$\frac{t}{B_0} = \frac{3}{2} \left( \frac{h_2}{B_0} - 10,9 \right) + 12 \log X \quad (3.24)$$

eşitliği elde edilmiştir. Burada:

$$X = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{V_0^2}{q \cdot B_0} \cdot \frac{B_0}{D} \right)$$

$\rho$  = Suyun yoğunluğu

$\rho_0$  = Kaya malzemenin yoğunluğu

$D$  = Küp blok boyutu

$t$  = Tabandan itibaren oyulma derinliği

$B_0$  = Jetin genişliği (dikdörtgen jet)

$V_0$  = Jetin mansap suyuna dalış hızı

$h_2$  = Mansap su derinliği

$X$  = Oyma etkisi parametresi

Bu çalışmalarda oyulma oluşumunun başlangıcı için

$$\frac{h_2}{B_0} = 36 \log X - 21,8 \quad (3.25)$$

eşitliği elde edilmiştir.

Yukarıda verilen eşitlikler  $\theta \leq \frac{h_2}{B_0} \leq 12$  sınırları için geçerlidir. Bu çalışmalar sonunda

yayınlanan raporda elde edilen oyulma eşitliklerinin aşağıdaki temel kabullere göre geçerli olduğu belirtilmiştir.

1. Tabanı oluşturan kaya kütlesi düzenli bir bloklanma sistemine sahip değildir.
2. Bloklar birbirine bağlı değildir.

Eşitliğin kullanılması öncesinde kaya tabanın bloklanma yapısının ve blok boyutunun belirlenmesi gereklidir. Eşitlikteki jet dalış hızı olan  $V_0$  değerini hesaplamak zor olduğundan bu hesap için yaklaşık sonuçlar veren yöntemler kullanılmaktadır.

#### (d) Taraimovich Formülü

Taraimovich dolu savağın işletmesinden sonra maksimum oyulma derinliğinin maksimum debinin geçtiği 2-7 mevsim, arasında oluşacağını iddia etmiştir[49]. Bunun yanı sıra bir mevsim boyunca oluşan maksimum oyulma derinliğinin toplam oyulma derinliğinin %27 si ile %65 i arasında değiştiğini ileri sürmüştür.  $I_{sc}$  oyulma çukuru uzunluğu ise Taraimovich tarafından

$$I_{sc} = (11 - 12).h_c \quad (3.26)$$

olarak verilmiştir. Burada  $h_c$  =kritik akım derinliğidir.

Taraimovich bu çalışmaları sonunda sıçratma ucu yapısının stabilitesi için bazı proje kriterleri vermiştir. Buna göre stabilite için sıçratma eşiğinin oyulma çukuru başlangıcına olan uzaklığında

$$X_0 > (5,5 - 6,0).h_c \quad (3.27)$$

şartının sağlanması gereklidir. Orijinal yatak seviyesinin altındaki maksimum oyulma derinliği ise;

$$t = (5,5 - 6,0).h_c \cdot \tan \phi_u \quad (3.28)$$

formülü ile verilmiştir. Burada  $\phi_u$  oyulma çukurunun memba yüzünün açısıdır. Toplam oyulma derinliği  $(t + h_2)$  hesabı için ise aşağıdaki eşitlik verilmiştir.

$$t + h_2 = h_c \cdot \sqrt[4]{h} \cdot \left( \frac{\theta}{\phi_0} \right) \cdot \phi \cdot \left( \frac{\eta'}{k_r} \cdot w \right) \quad (3.29)$$

Burada,

$h$  = Mansap kuyruk suyu ile rezervuar su yüzü arasındaki fark

$k_r$  = Kayanın gerilme (strength) katsayısı

$\theta$  = Jetin sıçratma ucundan çıkış açısı

$\phi_u$  = Oyulma çukurunun memba yüzü açısı



$\eta_1$  = Ortalama ve maksimum taban hızlarından sıçratma eşiği üzerindeki hızlara geçiş katsayısı

$\phi$  = Oyulma çukuru malzemesinin içsel sürtünme açısı

$h_2$  = Mansap kuyruk suyu seviyesidir.

Taraimovich tarafından verilen bazı örneklerde

$$0,9 < \eta' / k_T \cdot w < 1,08$$

olarak alınmıştır. Bu nedenle bu değer yaklaşık 1 olarak alınabilir.

#### (e) Martins B Formülü

Martins serbest düşen jetler altında, kaya yataklarda oluşan 18 adet oyulmayı inceleyerek aşağıda verilen eşitliği elde etmiştir[52].

$$t + h_2 = 1,5 \cdot q^{0,6} \cdot Z_2^{0,1} \quad (3.30)$$

#### (f) Chian Formülü

Chian sıçratma eşikli dolu savakların mansabında meydana gelen oyulmalarla ilgili olarak aşağıdaki eşitliği elde etmiştir[51].

$$t + h_2 = 1,18 \cdot h^{0,235} \cdot q^{0,51} \quad (3.31)$$

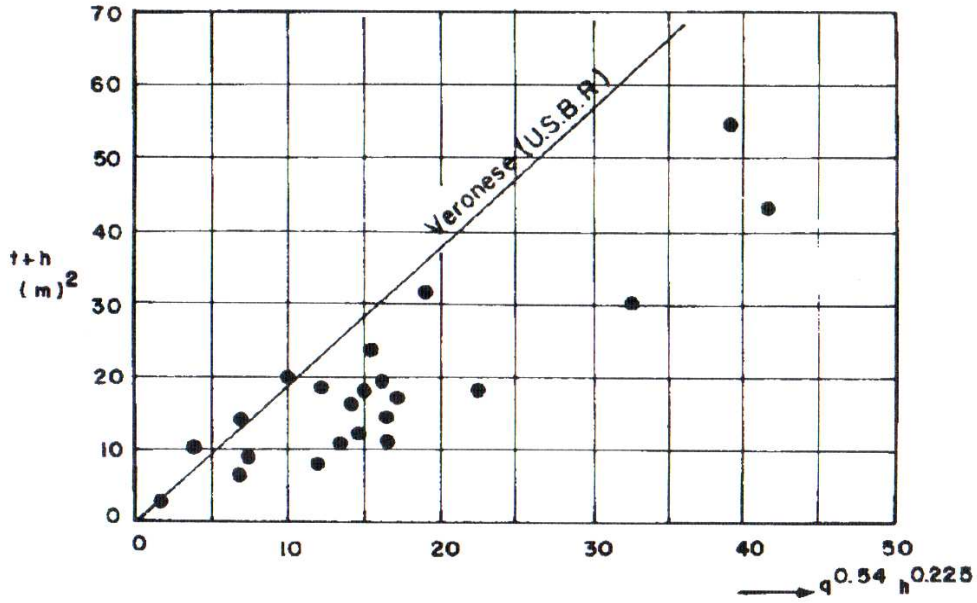
Chian prototipteki 6 adet oyulmayı inceleyerek bu basit eşitliğe ulaşmıştır. Nehir yatağı malzemesi ile mansap suyu seviyesi ve jet açısı gibi diğer bazı parametrelerin oyulma üzerine etkisi Chian tarafından da ihmal edilmiştir. Bu eşitlik 1,18 katsayısı hariç Veronese'nin modelde ince daneli malzemeler ile elde ettiği limit oyulma derinliği eşitliğine çok benzer bir eşitliktir. Bu eşitlikte de dane çapının nihai oyulma derinliği üzerindeki etkisi göz ardı edilmiştir. Chian  $Z_2$  yerine h seviyesi kullanmasına rağmen eşitlik Martins'in verdiği eşitliğe de çok benzemektedir.

Kullanılan bu iki değişik parametreden gelen fark denklemdeki üslerin çok küçük olması nedeniyle sonucu çok küçük oranda etkilemektedir.  $Z_2$  ve h arasındaki farktan meydana gelebilecek hataların çok küçük olduğu kabul edilerek ölçülen bazı prototip oyulma değerleri, Martin'in ve Veronese'nin denklemleri kullanılarak tekrar hesap edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Tablo 3.1'te verilmiş olan bu sonuçlar Şekil 3.1 üzerine noktalandığında dikkate değer bir uyum elde edilmiştir.

Martins'in Tablo 3.1'te verilen verileri, Veronese'in yaklaşımı ile karşılaştırılmak üzere Şekil 3.1 üzerinde noktalanmıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Veronese eşitliği özellikle prototipten elde edilen küçük oyulma değerleri ile oldukça iyi bir uyum sağlamıştır.

**Tablo 3.1** Prototipteki oyulma derinlikleri.

$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$Z_2, h$ (m)	$t + h_2$	$q^{0,6} \cdot Z_2^{0,1}$	$q^{0,54} \cdot Z_2^{0,225}$
113,6	180	43,2	28,76	41,432
40,0	34	19,7	13,00	16,21
25,0	31	18,9	9,73	12,32
95,2	97	30,1	24,33	32,77
32,0	26,1	17,5	11,09	16,628
31,4	27,0	15,0	10,998	16,496



**Şekil 3.1** Prototip oyulmaları.

(3.30) ve (3.31) nolu eşitliklerin ikisi de yatak malzemesi özelliklerinin oyulma üzerine olan etkisini dikkate almamaktadır. Bu konuda Akhmedov [31] çatlaklı kaya özelliğindeki yatak malzemesinin kendi içinde ayrıştığını ileri sürmüştür. Bu durumdaki oyulma işlemi daha önce de değinildiği gibi belirli ebatlardaki kohezyonsuz malzemedeki içinde oluşan oyulma özelliği göstermektedir.

### (h) Mpiri Formülü

Aşağıda verilen (3.31) bağıntısı ise bir sıçratma eşiğinden çıkan jetin oluşturacağı oyulma derinliği hesabı için Mpiri tarafından önerilmiştir [31].

$$\frac{(t + h_2)}{Z_3 + h_2} = \frac{0,355 \cdot (q \cdot Z_2)^{0,5}}{\left(g \cdot d_{50}^2 \cdot (Z_3 + h_2)^3\right)^{0,25}} \quad (3.32)$$

Burada;

$Z_3$  = Sıçratma ucu çıkış ağız ile jetin çarptığı mansap su seviyesi arasındaki kot farkı (m)

$h_2$  = Mansap su derinliği (m) dir

### (i) Mason ve Arumugan Formülü

Mason ve Arumugan 47 model çalışması ve 26 prototip ölçümden elde ettikleri veriler ile prototip için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir. İncelenen koşullardaki jetin mansap su yastığı çarpma açısı 20° ile 85° arasında değişmiştir[53].

$$t + h_0 = \left(6,42 - 3,1 \cdot h_0^{0,1}\right) \left(q^{(0,6 - 0,0033 \cdot H)} \cdot H^{(0,15 - 0,005 \cdot H)} \cdot h_0^{0,15} / g^{0,3} \cdot d_0^{0,1}\right) \quad (3.33)$$

Burada;

$d_m$  = Yatak malzemesi boyutu olup prototipte 0,25m olarak kabul edilmiştir.

H = Memba ve mansap su seviyeleri arasındaki fark (m)

$h_0$  = Mansap su derinliği (m)

t = Nehir yatağından itibaren oyulma derinliği (m)

q = Birim debi

g = Yerçekimi ivmesi

### (i) Wang Shixia Formülü

Wang Shixia ise 50 barajdan elde edilen verileri değerlendirerek aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.[31]

$$t = 2,44 \cdot K \cdot h_c^{0,89} \cdot H^{0,11} \quad (3.34)$$

H = Memba ve mansap su seviyeleri arasındaki fark

t = Nehir yatağından itibaren oyulma derinliği

K = Kayanın yapısı ile ilgili katsayı

K=0,7-1,1 (sağlam ve yekpare kaya)

K=1,1-1,4 (orta derece ve sağlam kaya)

K=1,4-1,8 (yumuşak ve çatlaklı kaya)

### (j) Mason Formülü

Bazı araştırmacılar serbest düşümlü jetler altında oluşan oyulma derinliğinin aşağıda verilen değişkenlerin bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüştür.

q= Birim debi, H= Kuyruksuyu ile rezervuar seviyesi arasındaki fark, d= Yatak malzemesi boyutu,  $h_2$ = Mansap su seviyesi

Bu değişkenler Mason tarafından ele alınmış ve bu çalışma sonrasında Mason aşağıda verilen genel eşitlik formunu elde etmiştir.[31]

$$t + h_2 = k \cdot \frac{q^x \cdot H^y \cdot h^w}{g^v \cdot d^z} \quad (3.35)$$

$t + h_2$  = Kuyruksuyu seviyesinden itibaren oyulma derinliğidir.

Mason bu genel eşitlik formu üzerinde yaptığı çalışmada prototipten elde edilen 26 değer ile model çalışmalarından elde edilen 47 değeri kullanılmıştır.

Mason model çalışmalarındaki oyulma derinliği 0,071m ile 1,175m, düşü yüksekliği 0,325 m ile 2,150 m arasında, çarpma açısı ise 25°-85° arasında değişmiştir. Prototipteki oyulma derinliği ise 6,70m ile 90m, düşü yüksekliği 15,82m ile 109m arasında değişmiştir. İncelenen prototip verilerinin çarpma açısı değerleri ise 20° ile 72° arasında farklılık göstermiştir. Genel eşitlikteki k'nın ve üslerin modelde elde edilen en uygun değerleri aşağıda verilmiştir.

$$t + h_2 = 3,27 \cdot \frac{q^{0,6} \cdot H^{0,05} \cdot h^{0,15}}{g^{0,3} \cdot d^{0,10}} \quad (3.36)$$

Bu formül ile hesaplanan oyulma derinliği ile ölçülen bazı oyulma derinlikleri arasındaki varyasyon katsayısı %25,4 olarak elde edilmiştir. Bu formül, model sonuçları açısından oldukça tatminkâr olmasına rağmen prototipteki oyulma derinlikleri için tatminkâr sonuçlar vermemiştir.

#### (k) Gijs, Hoffmans ve Pilarczyk Formülü [42]

$$Y_m = Y_{m-e} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right)^y \cdot \ln\left(1 - \frac{h_0}{y_{m,e}}\right) \right] \quad (3.37)$$

Burada  $Y_m$  maksimum oyulma derinliği, t zaman,  $t_1$  ise maksimum oyulmanın meydana geldiği  $h_0$  akım derinliğindeki zamanı ifade etmektedir.

### 3.6. Bir Enerji Kırıcı Havuz Mansabındaki Oyulmalar

Bu bölümde düşü havuzu içerisinde oluşan bir hidrolik sıçramadan sonraki oyulmalar incelenmiştir. Bu durum için akımın bir dolusavak deşarj kanalından geldiği veya serbest düşen bir su jeti olduğu kabul edilmiştir.

Schoklitsch [34], Veronese [36], Jaeger[31] ve Smoljaninov [31] gibi araştırmacıların deneysel çalışmalar ile elde ettikleri sonuçların ortalamasına göre düşü havuzları, jet oyulmalarını %50 oranında, Eggenberger'in elde ettiği sonuçlara göre de %12 oranında

azaltmaktadır. Novak [31] daha sonra yayınladığı makalede enerji kırıcı düşü havuzlarının mansabındaki oyulmayı da[31]

$$t + h_2 = k \cdot \left[ 6 \cdot h^{0,25} \cdot q^{0,5} \cdot \left( \frac{h}{d_m} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (3.38)$$

eşitliği ile ifade etmiştir. Burada;

Sıçramanın batıklık değeri:1 ise  $k = 0,65$ .

Sıçramanın batıklık değeri:1,6 ise  $k = 0,45$  olmaktadır.

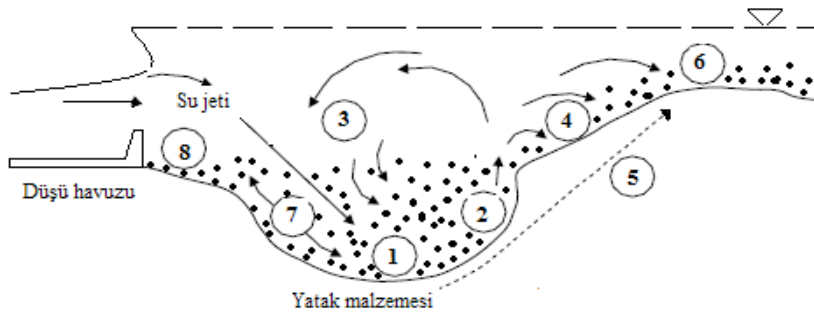
Çataklı, Özal ve Tandoğan [46] ise düşü havuzu sonundaki oyulmalar için aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.

$$t + h_2 = k \cdot \frac{q^{0,6} \cdot (h + h_2)^{0,2}}{d_{90}^{0,1}} \quad (3.39)$$

Buradaki  $k$  katsayısı eşiksiz havuzlar için 1,62; eşikli havuzlar için eşik formuna bağlı olarak 1,42 - 1,53 arasında değerler almaktadır.

### 3.7 Oyulma Çukuru Etkiyen Kuvvetler

- (1) Oyulma çukuru tabanından malzemeyi kazıyıp sürükleyen su jeti. (2) Yatağa çarpıp sönmülenen su jetinin oluşturduğu döngü kuvveti (oyulma çukuru etrafında dönen).
- (3) Yatak malzemesini tekrar memba tarafa taşıyan kuvvet. (4) Aşınan yatak malzemesini oyulma çukuru şevinden mansap tarafa taşıyan kuvvet. (5) Malzemeyi oyulma yastığı olarak biriktiren kuvvet. (6) Akımın kendi sürüklemeye kuvvetidir. Artık bir dinamik denge durumu vardır. (7) Yatak malzemesine yukarı-aşağı salınımlar yaptıran kuvvet. (8) Yatak malzemesi hareketsizdir.



Şekil 3.2 Oyulma çukuru gelişimi

#### 4. DENEY DÜZENEĞİ

Hidrolik mühendisliği ile ilgili problemler; teorik, ampirik ve yarı ampirik metotlar, matematik ve fiziksel modeller yardımıyla çözümlenmektedir.

Sadece teorik yaklaşım, laminer 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.

Basamak tipi dolusavak boşaltım kanallarında deneysel çalışmalar yapmak için Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında Şekil 4.1'de kesiti ve Şekil 4.2'de şematik planı verilen bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneği laboratuvar tabanından 2,75 m yüksekte, genişliği sabit ( $b=0,29$  m) olan dikdörtgen kesitli bir kanal olup basamaklı boşaltım kanalı açısı  $\alpha=30, 40$  ve  $50^0$  olacak şekilde farklı basamak boyutları değişikliklerinin kolayca yapılabilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

İhtiyaç duyulan su, bodrum katta bulunan  $100\text{ m}^3$  kapasiteli depodan pompalar vasıtasıyla  $50\text{ m}^3$  kapasiteli ana depoya basılmış, ana depodaki fazla su ise dolusavaktan savaklanarak bir by-pass hattı ile tekrar büyük depoya geri döndürülmüştür. Bu devridaim sırasında ana depodaki su yüksekliği sabit tutulmuş ve buradan üzerinde bir vana bulunan boru vasıtasıyla istenilen miktarda ki debi deney kanalını besleyen dinlendirme havuzuna alınmıştır.

Deney düzeneğinde, basamaklı boşaltım kanalının ve mansap kanalı yan duvarı akım koşulları ve oyulma mekanizmasını görebilmek amacı ile cam malzemeden teşkil edilmiştir. Sistemde debi, krohne marka bir elektromanyetik debimetre kullanılarak belirlenmektedir. Vana yardımı ile ayarlanan farklı debi miktarlarında; kritik akım derinliği  $h_c$ , düşüm havuzunun sonundaki hız ve mansap kanalındaki akım derinlikleri ölçülmektedir.

#### 4.1 Yürütülen Deney Düzenegi

Basamaklı boşaltım kanalı mansabın da, genişliği 0,29 m uzunluğu 2.35 m olan nehir yatağını temsil edecek bir malzeme havuzu inşa edilmiştir. Üç farklı boşaltım kanalı eğiminde (30,40 ve 50<sup>0</sup>), her bir eğim için hazırlanmış üç farklı geometrili basamak tipinde, üç farklı boşaltım kanalı uzunluğunda, üç farklı düşü şütu için, üç farklı mansap (kuyruksuyu) derinliğinde ve iki farklı granümetriye sahip malzeme ile, her bir alternatif için dört ayrı debide deneyler yapılmıştır. Her debide oyulma profili incelenmiş, oyulmayı etkileyen parametrelere ait değerler belirlenmiştir. Her deney sonrasında, oyulma çukuru geometrisini belirlemek için x, y, ve z yönlerinde mesafe ölçümleri yapılmış ve elde edilen verilerle Surfer isimli bir yazılımda üç boyutlu oyulma perspektifleri ve kontür haritaları çizdirilmiş, maksimum oyulma derinliğinin meydana geldiği noktalardaki enkesit, boykesit ve grafikler hazırlanmıştır.

Deney düzenegi amaca uygun ölçümlerin yapılabilmesi için ölçüm aletleri ile teçhiz edilmiştir. Bu ölçümler ve kullanılan aletler aşağıda açıklanmıştır.

a) Su seviyesi ölçümleri

Su seviyesi ölçümleri (kanal tabanına dik akım derinlikleri) nokta uçlu elektronik limnimetre ve dolusavak boşaltım kanalı yan duvarı üzerine yerleştirilen çelik şerit metreler yardımıyla yapılmıştır.

b) Debi ölçümleri

Krohne marka bir elektromagnetik debimetre yardımı ile yapılmıştır.

c) Hız ölçümleri

Düşüm havuzu sonuna yerleştirilen Schilt marka mikromuline vasıtasıyla okunmuştur.

d) Oyulma ölçümleri

Mansap Kanalı üzerine yerleştirilen raylar vasıtasıyla yatay ve düşey ekseninde okuma imkânı veren arabaya yerleştirilmiş bir elektronik limnimetre ( ± 0,01 mm hassasiyetli) yardımıyla yapılmaktadır.

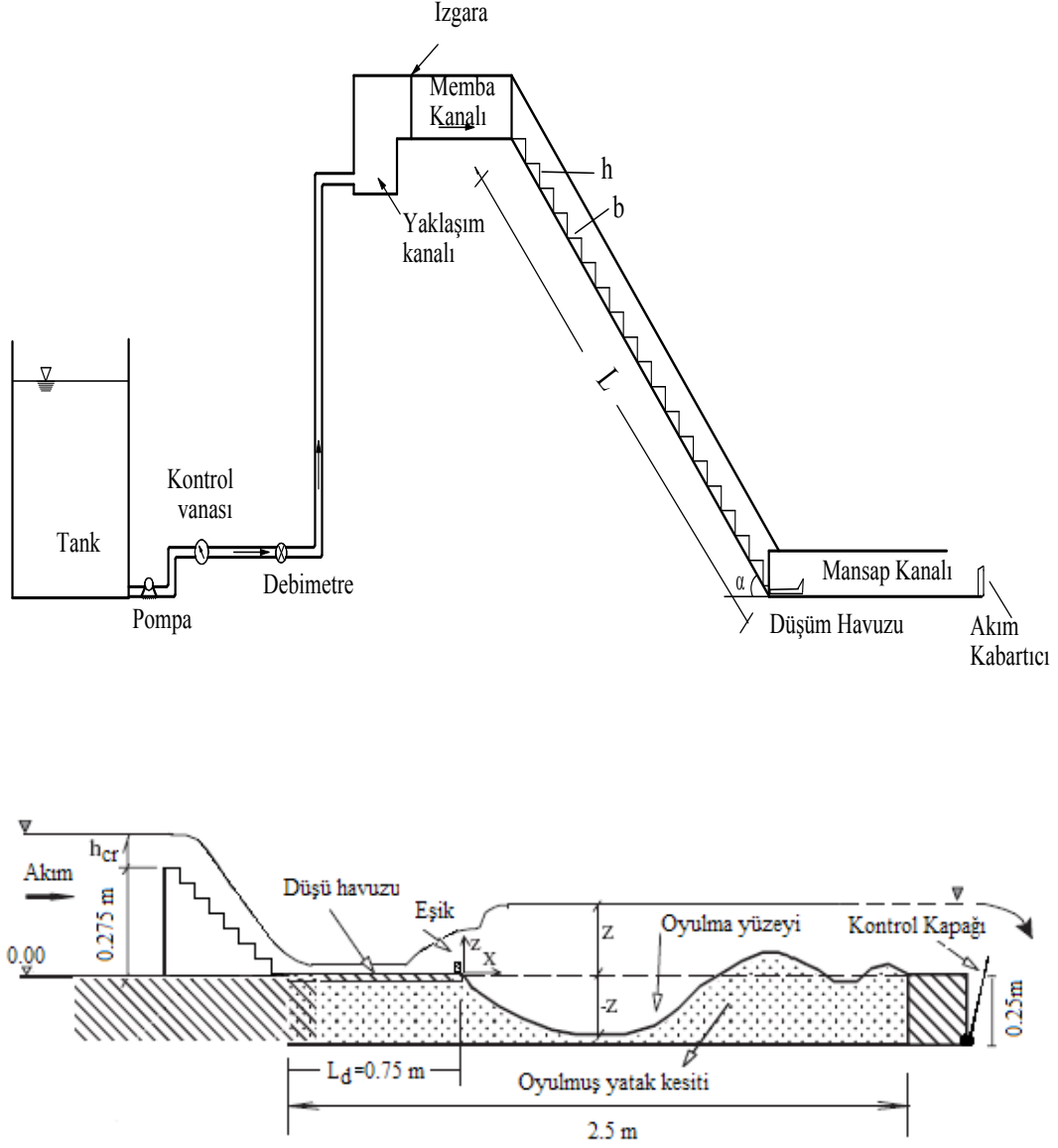
Bu çalışmada, iki değişik çapta yatak malzemesi kullanılarak, malzeme granümetrisinin oyulma çukuru geometrisi üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

Üç farklı boşaltım kanalı eğiminde toplam dokuz farklı geometrili basamak kullanılarak boşaltım kanalı eğiminin ve basamak geometrisinin oyulmaya tesiri araştırılmıştır. Bu basamakların geometrik karakteristikleri Tablo.1'de verilmiştir.

Kesitleri Şekil 4.3'te verilen, uzunluğu 75 cm ve ucundaki eşik yükseklikleri farklı üç düşü havuzu eşik tipi (eşiksiz, 2 cm eşikli ve 4 cm eşikli) kullanılarak eşik tiplerinin oyulma parametrelerine olan etkisi araştırılmıştır.

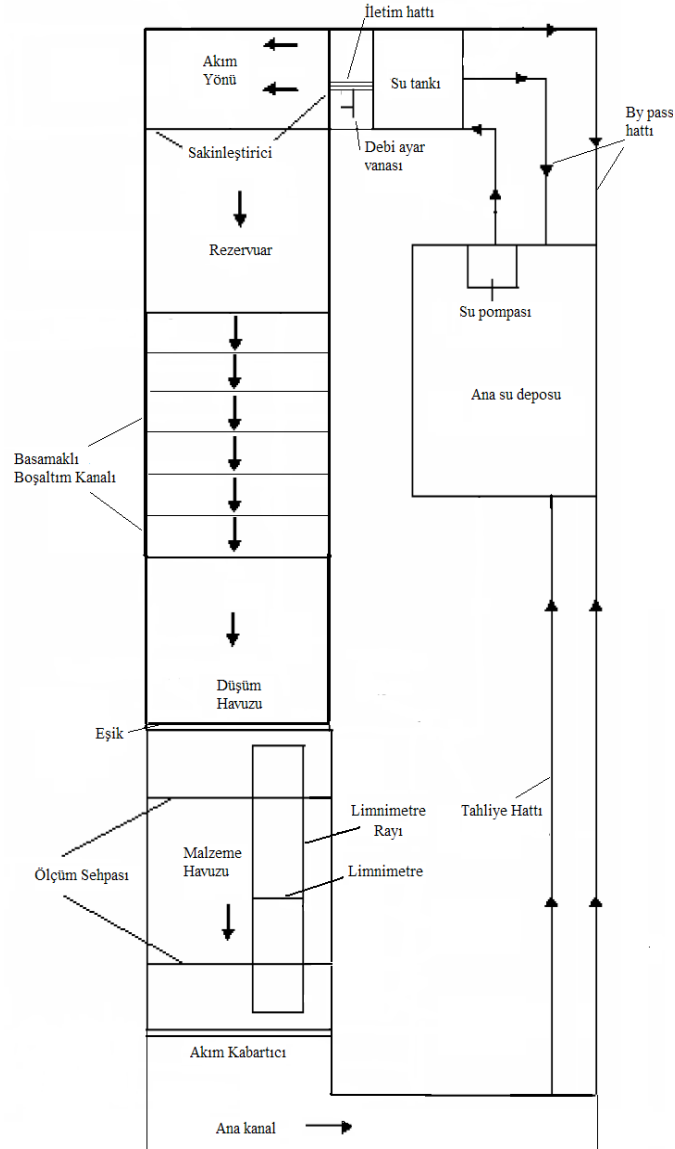
Üç farklı yükseklikteki(25, 30 ve 35 cm) akım kabartıcılar yardımıyla elde edilen farklı kuyruksuyu derinliklerinde oyulma parametrelerinin değişimi araştırılmıştır.

Boşaltım kanalında meydana gelen akımın, nap, geçiş veya sıçramalı akım şartlarından hangisini sağladıkları gözlemlenerek kaydedilmiştir. Ayrıca dolusavakta havalanmayan bölgenin uzunluğu da tespit edilerek, tablolarındaki yerlerine yazılmıştır.



Şekil 4.1 Deney düzeneğinin kesiti





Şekil 4.2 Denei düzeneğinin şematik görünümü

## 4.2 Boşaltım Kanalı

Deneilerde boşaltım kanalı eğimleri ve bu eğimlere karşılık gelen boşaltım kanalı uzunlukları;

$$\alpha = 30^0 \text{ için } L = 6,83 \text{ m, } \alpha = 40^0 \text{ için } L = 5,48 \text{ m, } \alpha = 50^0 \text{ için } L = 4,59 \text{ m}$$

## 4.3 Basamak Geometrileri

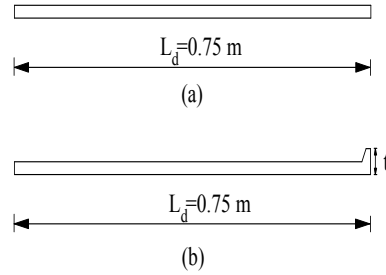
Farklı boşaltım kanalı eğimleri için kullanılan basamak geometrileri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Boşaltım kanalı basamak tipleri

Boşaltım Kanalı Taban Açısı	Basamak No	b (cm)	h (cm)
$\alpha = 30^0$	1	8,66	5
	2	17,32	10
	3	25,98	15
$\alpha = 40^0$	4	5,96	5
	5	11,92	10
	6	17,88	15
$\alpha = 50^0$	7	4,20	5
	8	8,40	10
	9	12,60	15

#### 4.4 Düşü Havuzu Eşik Tipi

Boşaltım kanalından gelen akımın enerjisini sönmlemek amacıyla mansap kanalı içerisine kesiti aşağıda verilen 75 cm uzunluğunda ve sonundaki eşik yükseklikleri(t) farklı olan (eşiksiz, 2 cm ve 4 cm) şütler yerleştirilmiştir.

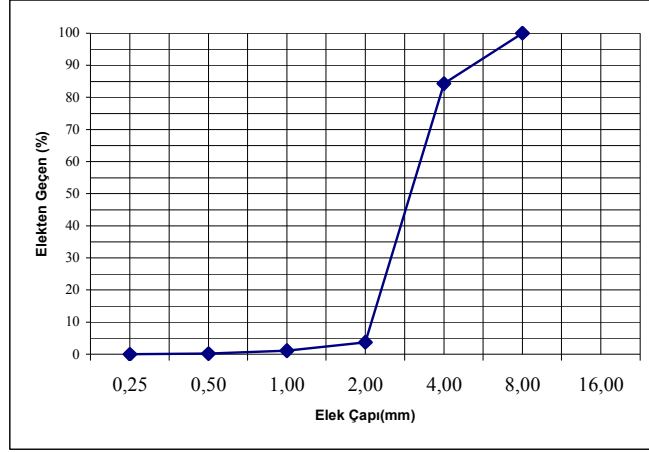
**Şekil 4.3** Eşik tipleri

#### 4.5 Malzeme Granülometrisi

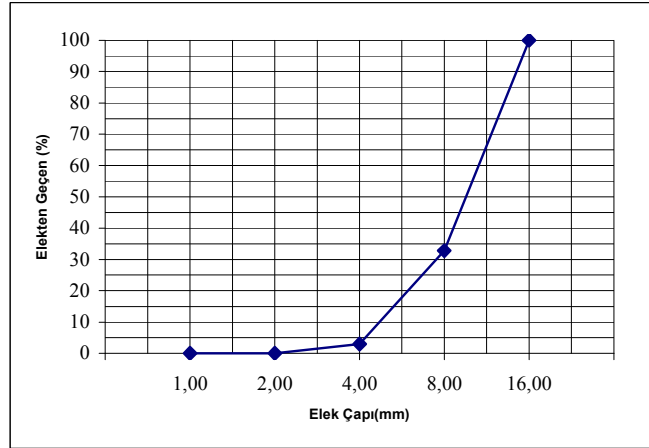
Deneylerde, mansap kanalı tabanına 25 cm kalınlığında farklı granümetriye sahip 2 çeşit yatak malzemesi serilmiştir. Malzeme laboratuvarında yapılan elek analizinden elde edilen taban malzemesinin granülometri eğrileri Şekil 4.4 ve 4.5 verilmiştir. Deneylerde kullanılan yatak malzemesinin özellikleri, Şekil 4.4 ve 4.5'ten  $d_{50}=3.17$  mm ve  $d_{50}=9.94$  mm olarak okunmuştur.

**Tablo 4.2** Oyulma deneylerinde kullanılan malzemelerin özellikleri

M1	M2
$d_{50} = 3.17 \text{ mm}$	$d_{50} = 9.94 \text{ mm}$
$d_{85} = 4.05 \text{ mm}$	$d_{85} = 14.18 \text{ mm}$
$d_{90} = 5.38 \text{ mm}$	$d_{90} = 14.66 \text{ mm}$
$\rho = 2.65 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 2.65 \text{ kg/m}^3$



**Şekil 4.4** İnce malzemenin granülometri eğrisi (M1)



**Şekil 4.5** Kalın malzemenin granülometri eğrisi (M2)

#### 4.6 Mansap Kanalı (Kuyruk Suyu)

Mansap kanalı sonuna mansaptaki su seviyesini istenilen şekilde ayarlamak amacıyla yükseklikleri 25, 30 ve 35 cm olan kare kesitli kabartıcılar yerleştirilmiştir. Mansap kanalı içerisinde nehir yatağını temsil eden malzemenin kalınlığı 25 cm dir. Bu çalışmada kuyruksuyu derinlikleri ise 2,6 ile 17 cm arasında değişmiştir.

#### 4.7 Deneylerin Yapılışı

Şekil 4.1’de verilen deney düzeneği üzerinde yapılan çalışmalarda, oyulma çukuru geometrisini belirlemek amacıyla olayla ilgili parametrelerin ölçümü yapılmıştır. Geri besleme sistemi ile çalışan deney düzeneğinde, su ana su deposundan pompa vasıtasıyla su tankına basılarak iletim borularına iletilmektedir. Buradan dolusavak kanalına gelen akım, kanal mansabında yerleştirilen boşaltım kanalından sonra mansap (kuyruksuyu) kanalına düşürülür. Mansaba doğru ilerleyen akım, havuz mansabından tahliye hattı yoluyla yeniden ana su deposuna dönmektedir. Sisteme verilen akımın debisi, debi ayar vanası yardımı ile düzenlenmiştir. Rezervuar ve mansap kanalı üzerinde belli noktalara yerleştirilmiş limnimetreler bulunmaktadır. Rezervuar üzerindeki limnimetreden kanal üzerindeki su seviyesi, kum havuzu üzerindeki limnimetreden ise kuyruksuyu seviyesi (h) ölçülmektedir. Birim debi (q), toplam debi (Q) ve kanal genişliği (B) kullanılarak bulunmuştur. Mansap kanalının yan duvarları üzerine ölçüm sehpa sabitlenmiştir. Bu sehpa üzerine yerleştirilen hareketli bir ray üzerinde bulunan limnimetre ile x,y ve z yönlerinde okumalar yapılmaktadır. Ölçüm sehpasının iki ayağı üzerinde bulunan cetveller yardımı ile x yönünde, limnimetre rayı üzerindeki cetvel ile y yönünde ve limnimetre ile z yönünde ölçümler gerçekleştirilmektedir. Ölçümlerde kullanılan limnimetrelerle cm’nin 1/10’i hassasiyetinde okumalar yapılmıştır. Dolusavak düşü havuzu ucunun ekseni x (B) ve y (L) yönlerinin başlangıç (sıfır) noktası kabul edilmiştir. Nehir tabanı ise z yönünde sıfır noktası olarak alınmıştır.

#### 4.8 Deney Sınır Şartları

Basamaklı boşaltım kanalı mansabında yerel oyulmaların tespiti için toplam 1000’e yakın deney yapılmış olup, yapılan deneylerin çalışma sınırları Tablo 4.3’te özetlenmiştir. Tüm deney dizileri hem  $d_{50}= 3.17$  mm ve hem de  $d_{50}= 9.94$  mm için yapılmıştır.

**Tablo 4.3** Deney Sınır Şartları

$\alpha$	$q \times 10^{-3}$ ( $m^2/s$ )	h/b (-)	$Z_{mansap}$ (cm)	Düşü havuzu eşik yüksekliği (cm)	$d_{50}$ (mm)	v (m/s)
30°	1.724-6.896	0.577	25, 30 ve 35	0 (eşiksiz), 2 ve 4	3.17-9.94	0.04-1.98
40°	1.724-6.896	0.834	25, 30 ve 35	0 (eşiksiz), 2 ve 4	3.17-9.94	0.07-2.16
50°	1.724-6.896	1.190	25, 30 ve 35	0 (eşiksiz), 2 ve 4	3.17-9.94	0.19-2.56

## 5. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.1 Düşüm Havuzu Tipinin Maksimum Oyulma Derinliğine Etkisi

Bu kısımda farklı düşüm havuzu tiplerinin  $H_{dmax}/h$  değerlerinin,  $q$ (birim debi) ile değişimi Şekil 5.1-5.2(a)-5.10(f) gösterilmiştir.

Şekil 5.1 de  $H_d$ 'nin farklı düşüm havuzu tipleri için boy kesiti çizilmiştir.

Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te boşaltım kanalı taban açısı  $\alpha=30^\circ$ , boşaltım kanalı basamak yükseklikleri  $h=5, 10$  ve  $15$  cm, mansap su derinlikleri  $z=25, 30$  ve  $35$  cm ve üç farklı düşüm havuzu tipinde DH1, DH2, DH3 ve iki farklı yatak malzemesi durumunda M1, M2 olmak üzere  $H_{dmax}/h$ 'ın farklı birim debi( $q$ ) değerlerinde değişimi görülmektedir.

$H_{dmax}/h$  değerleri test edilen tüm deney dizilerinde birim debi ile doğru orantılı bir değişim göstermiştir. Özellikle DH1'in artış eğiliminin DH2 ve DH3'ten daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni DH1'in eşiksiz olması dolayısıyla su jetinin direkt olarak yatağa çarpmasıdır. Genellikle  $H_{dmax}/h$ 'ın değerleri DH1'de en büyük DH3'te ise daha küçük olmuştur. Buradan düşüm havuzu sonuna eşik yapılması yataktaki oyulma miktarlarını azalttığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.3 (d) ve Şekil 5.4 (b) deney dizisindeki tüm düşüm havuzu tiplerinde  $H_{dmax}/h$  değerlerinin birim debi ile artış eğilimlerinin bittiği gözlemlenmektedir. Bu noktadan sonra artık birim debi artsa da oyulma miktarları sabit kalmaktadır. Test edilen deney dizilerinde DH1 düşüm havuzu tipinin  $H_{dmax}/h$  değerlerinin doğrusala yakın bir şekilde arttığı görülmüştür.

Söz konusu deney dizilerinde M2 için elde edilen  $H_{dmax}/h$  değerleri M1 için elde edilenlerden biraz daha küçük olmaktadır. Bunun nedeni M1 yatak malzemesinin  $d_{50}$  değerinin M2 malzemesininkinden daha küçük olmasıdır.

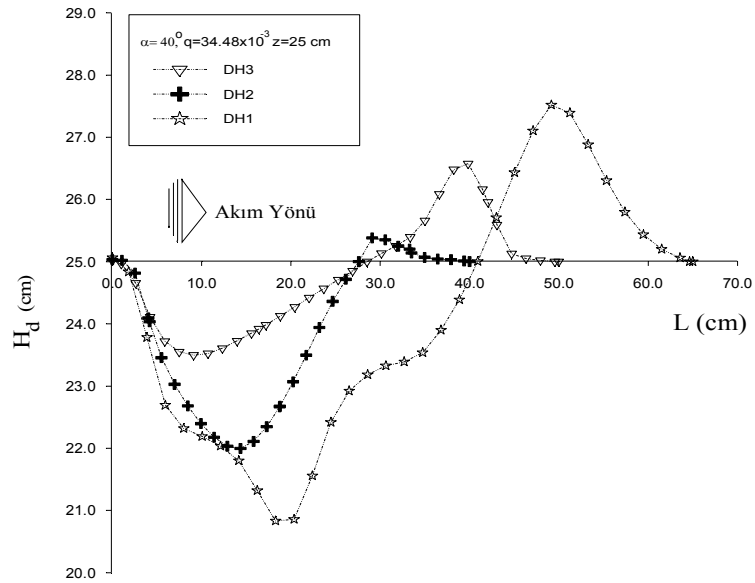
$H_{dmax}/h$  değerleri mansap su derinliği arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni ise oyulmayı meydana getiren su jetinin, mansap su seviyesinin artmasıyla oluşan su yastığına dalarak sahip olduğu enerjiyi kaybetmesi olarak izah edilebilir. Boşaltım kanalı basamak yüksekliği arttıkça  $H_{dmax}/h$  değerleri azalmaktadır. Çünkü basamak yüksekliği arttıkça sönmülenen enerji miktarları da artmaktadır.

Mansap su derinliğinin  $35$  cm olduğu deney dizilerinde  $H_{dmax}/h$  değerlerinin artış oranları ve büyüklüklerinin birbirine çok yakın olduğu, buna karşın  $z=25$  cm olduğu durumlarda  $H_{dmax}/h$  değerlerinin artış oranları ve büyüklüklerinin birbirinden oldukça farklı olduğu söylenebilir. Basamak yüksekliğinin  $h=15$  cm olduğu deney dizilerinde  $z=25$  cm, M1 durumu dışında,  $17,1 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s debide oyulma gerçekleşmemiştir. Genellikle mansap su seviyesinin  $25$  cm olduğu deney dizilerinde bütün debilerde oyulma olayı gerçekleşmiştir.

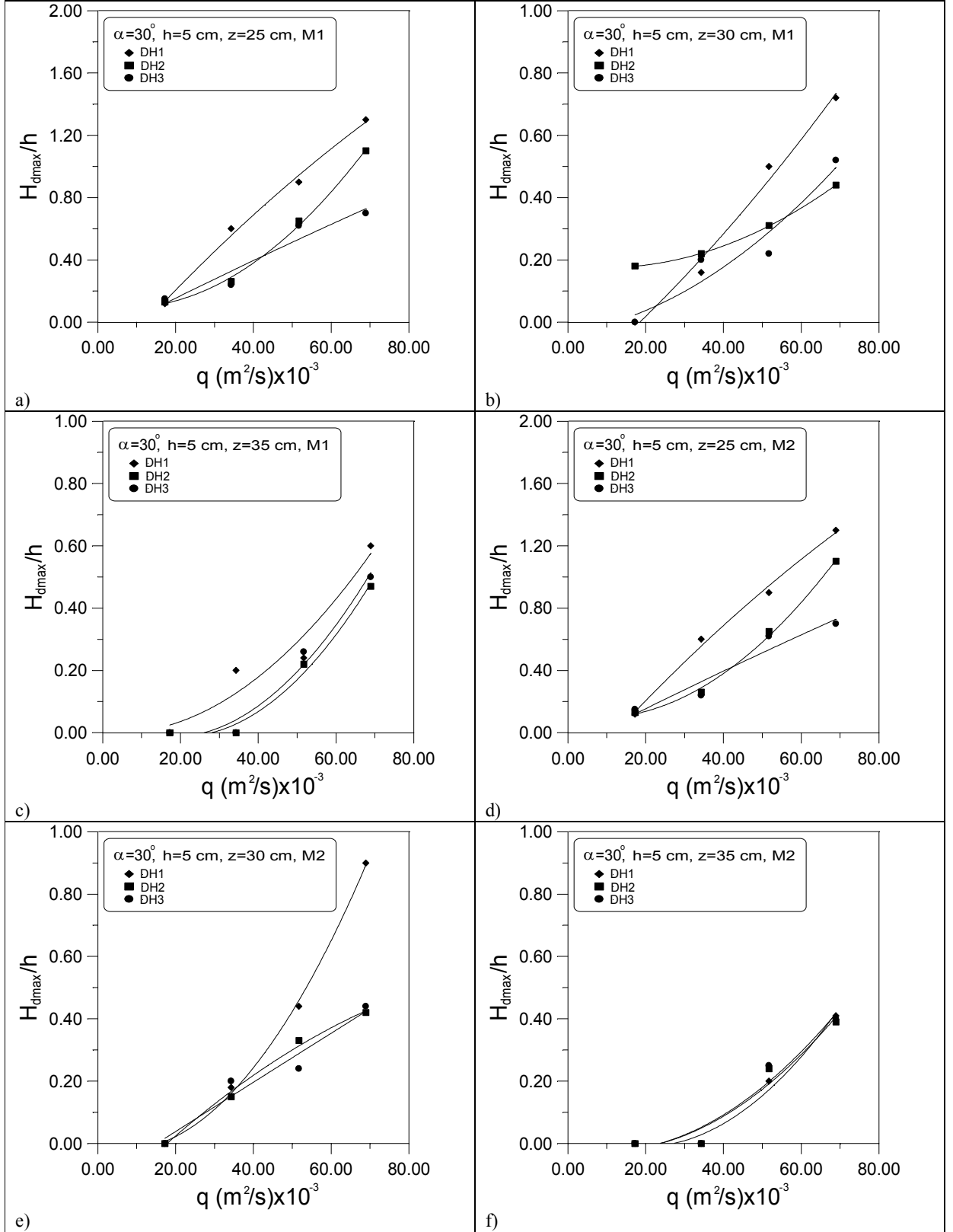
Şekil 5.4 (f) deney dizisindeki  $H_{dmax}/h$  değerlerinin, basamaklı boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=30^\circ$  olduğu tüm deney dizilerinde en küçük olduğu görülmektedir. Buna karşın  $\alpha=30^\circ$  için  $H_{dmax}/h$  değerlerinin maksimum olduğu deney dizisi Şekil 5.2 (a)'da görülmektedir.

Genellikle DH1 yani eşiksiz düşüm havuzu tipinde, minimum debi için oyulma olmadığı buna karşın DH2 ve DH3 yani eşikli düşüm havuzu tiplerinde azda olsa oyulmanın gerçekleştiği görülmektedir. Bunun nedeni su jetinin hızının çok yavaş olmasına karşın eşik üzerinden düşen suyun, yatağa çarpma etkisinin oyulmaya yol açması olarak açıklanabilir. Mansap su seviyesinin yükseltildiği deney dizilerinde oyulmanın azalması ile birlikte düşüm havuzu eşik tesirlerinin de  $H_{dmax}/h$  değerlerine olan etkisi önemli miktarda azalmıştır.

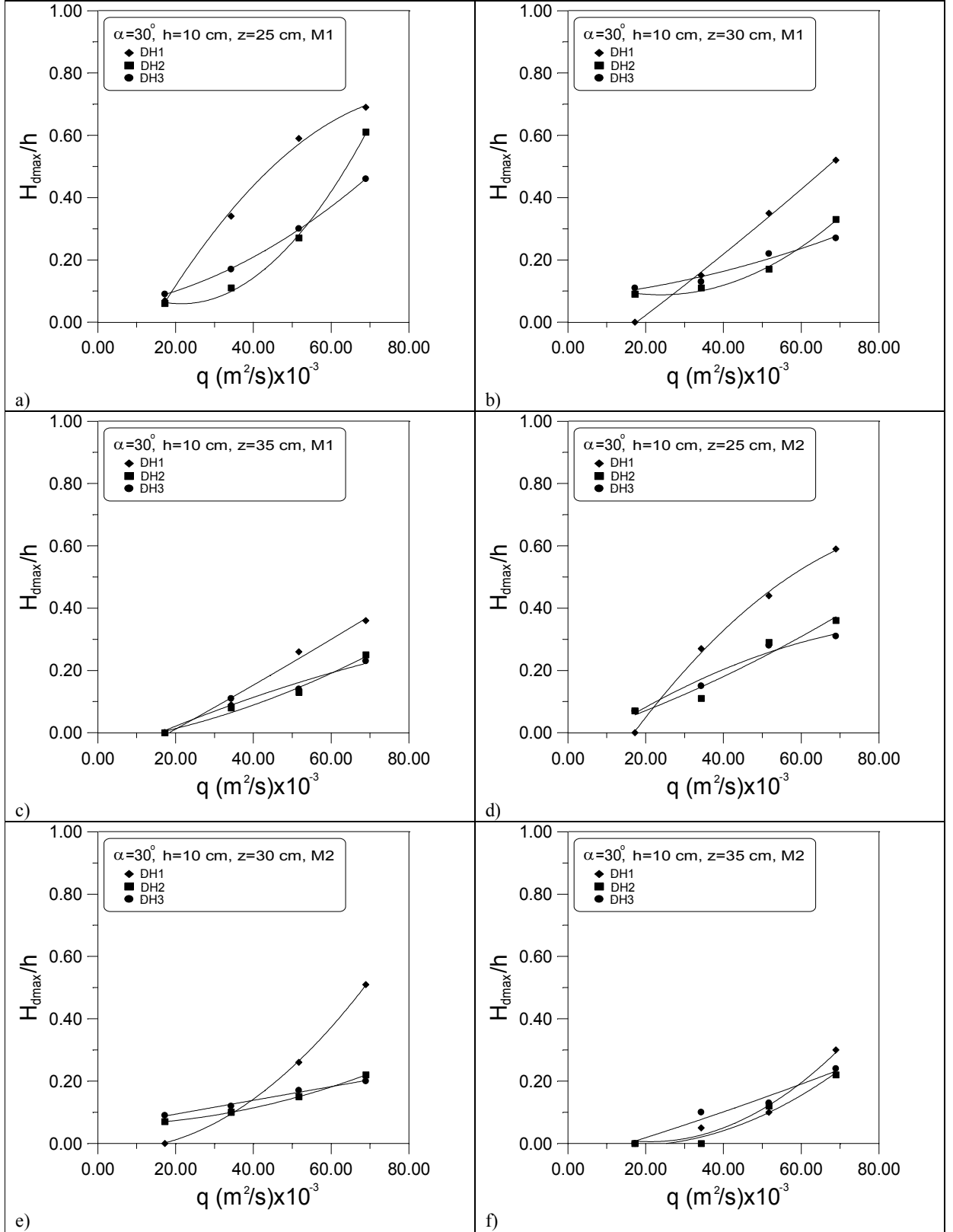
Şekil 5.2 (f) ve 5.4 (e) deney dizilerinde bütün debilerde oyulma miktarlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu durum basamak yüksekliği ile mansap su seviyesi arasındaki uygunluğu ifade etmektedir. Mansap su seviyesinin  $z=25$  cm olduğu durumlarda gerek M1 gerekse M2 yatak malzemesi şartlarında  $H_{dmax}/h$  değerlerinde büyük bir farklılık olmamakla beraber oldukça büyük değerler almışlardır. Zira akımın sürüklenme gerilmesi her iki malzemeyi de sürükleyecek mertebededir. Mansap su seviyesinin  $z=30$  cm olduğu, basamak yüksekliğinin 5 ve 10 cm olduğu deney dizilerinde  $H_{dmax}/h$  değerleri, eşiksiz düşüm havuzlarında eşiklilere kıyasla oldukça büyük farklar göstermiş olmasına karşın, basamak yüksekliğinin 15 cm olduğu durumlarda aralarındaki fark oldukça az olmuştur. Bütün deney sonuçlarından da anlaşılmaktadır ki boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=30^\circ$  olduğu durumlarda uygun bir mansap derinliği ve düşüm havuzu tipi seçilirse oyulmalar önemli miktarda azaltılmış olacaktır.



Şekil 5.1  $H_d$ 'nin farklı düşüm havuzu tipleri için boy kesiti

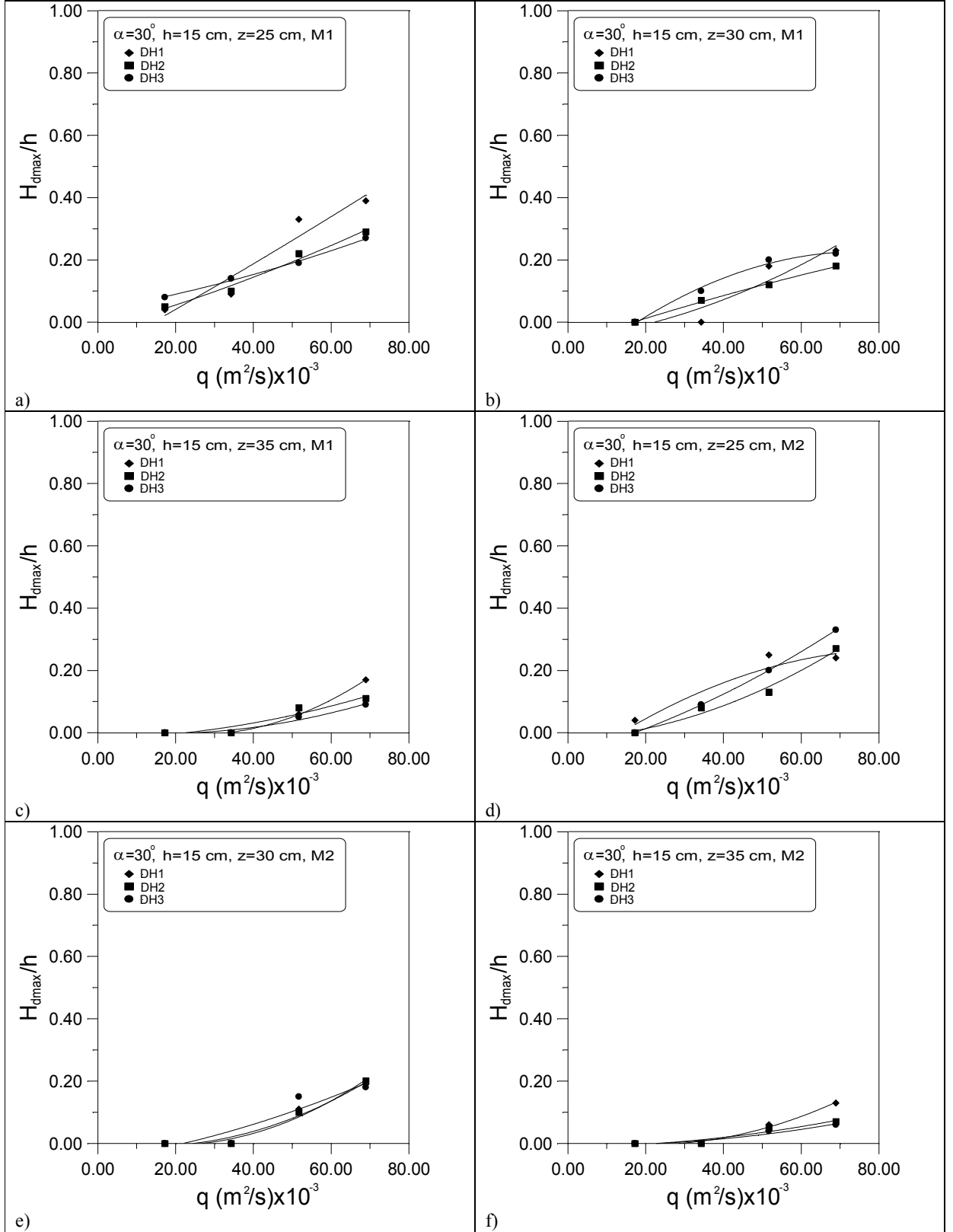


Şekil 5.2  $\alpha = 30^\circ$ ,  $h = 5$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'm birim debi ile değişimi



Şekil 5.3  $\alpha=30^\circ$ ,  $h=10$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'nin birim debi ile değişimi





Şekil 5.4  $\alpha=30^\circ$ ,  $h=15$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'in birim debi ile değişimi

Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’te boşaltım kanalı taban açısı  $\alpha=40^\circ$ , boşaltım kanalı basamak yükseklikleri  $h=5, 10$  ve  $15$  cm, mansap su derinlikleri  $z=25, 30$  ve  $35$  cm ve üç farklı düşüm havuzu tipinde DH1, DH2, DH3 ve iki farklı yatak malzemesi durumunda M1, M2 olmak üzere  $H_{dmax}/h$ ’ın farklı birim debi miktarlarında değişimi görülmektedir.

Test edilen tüm deney dizilerinde birim debinin artması ile  $H_{dmax}/h$  değerleri de artış göstermiştir. Boşaltım kanalı taban eğiminin  $\alpha=40^\circ$  olduğu deney dizilerindeki farklı düşüm havuzu tiplerine göre  $H_{dmax}/h$  değerleri birbirine yakın bir artış eğilimi göstermiştir. Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=40^\circ$  olduğu deney dizilerindeki  $H_{dmax}/h$  değerleri, açının  $\alpha=30^\circ$  olduğu deney dizilerindekilerle kıyasla daha büyüktür. Bunun nedeni boşaltım kanalının yüksekliğinin eşit olmasına karşın, uzunluğunun daha kısa olması nedeniyle kanal boyunca sönmölen enerji daha az olmasıdır. Akımın sahip olduğu bu enerji fazlası oyulma miktarlarını da artırmaktadır.

Genellikle, deney dizilerinde  $H_{dmax}/h$  değerleri birim debi ile artış eğilimlerinin korumaktadırlar yani bu deney dizisinde birim debi daha da artırılrsa maksimum oyulma derinliğinin çok daha büyük değerlere ulaşacağı gözlemlenmektedir. Bu deney dizilerinde de M2 için elde edilen  $H_{dmax}/h$  değerleri M1 için elde edilenlerden biraz daha küçük olmaktadır.

Bir çok deney dizisinde maksimum debilerde meydana gelen  $H_{dmax}/h$  değerleri düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin farklı olmasına rağmen hemen hemen aynı değerleri almıştır. Bunun nedeni yüksek debilerde, düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin tesirsiz kalmasıdır. Oysa boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=30^\circ$  olduğu deney dizilerindeki  $H_{dmax}/h$  değerleri, düşüm havuzu eşik yüksekliğinin artmasıyla birlikte azalma eğilimi göstermiştir. Bundan dolayı boşaltım kanalı taban açısının büyük olduğu durumlarda düşüm havuzu eşik yüksekliğinin de büyük seçilmesi uygun olacaktır.

$H_{dmax}/h$  değerleri mansap su derinliği arttıkça azalmaktadır. Ayrıca boşaltım kanalı basamak yüksekliği arttıkça  $H_{dmax}/h$  değerleri azalmaktadır. Çünkü basamak yüksekliği arttıkça sönmölen enerji miktarları da artmaktadır.

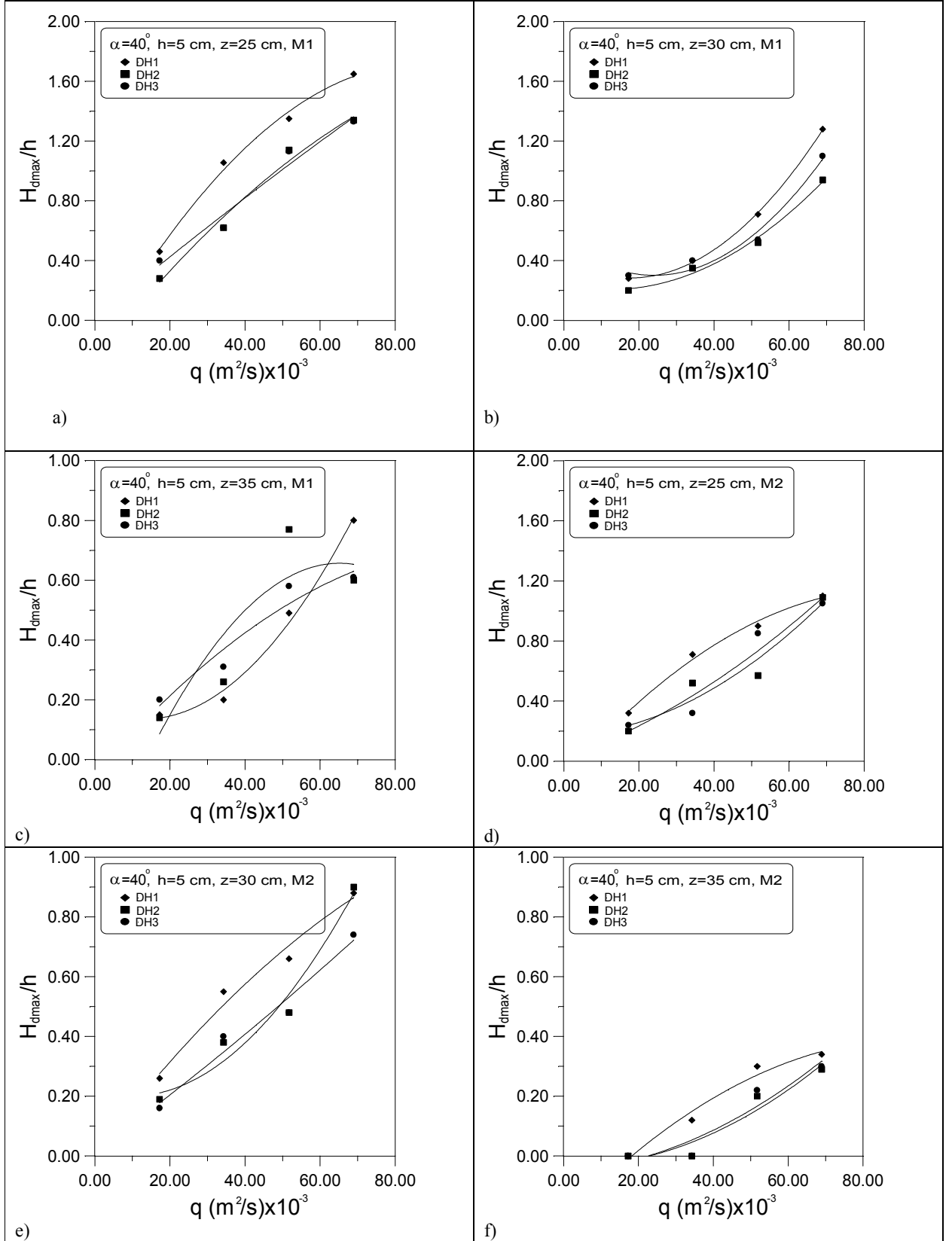
Deney dizilerindeki  $H_{dmax}/h$  değerlerinin, basamaklı boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=40^\circ$  olduğu tüm deney dizilerinde en küçük olduğu Şekil 5.7(f)’de görülmektedir. Buna karşın  $\alpha=40^\circ$  için  $H_{dmax}/h$  değerlerinin maksimum olduğu deney dizisi Şekil 5.5(a)’da görülmektedir. Bütün deney dizilerinde ve tüm debi miktarlarında oyulma olayının gerçekleştiği görülmektedir. Sadece Şekil 5.5(f) deney dizisinde  $17.1 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s debide oyulmanın gerçekleşmediği görülmüştür.

Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=40^\circ$  olduğu deney dizilerinde DH2 düşüm havuzu tipinin  $H_{dmax}/h$  değerlerinin doğrusala yakın bir şekilde arttığı görülmüştür. Şekil 5.6 (b), 5.6 (f), 5.7 (b), 5.7 (f) deney dizilerinde bütün debilerde oyulma miktarlarının hemen hemen aynı

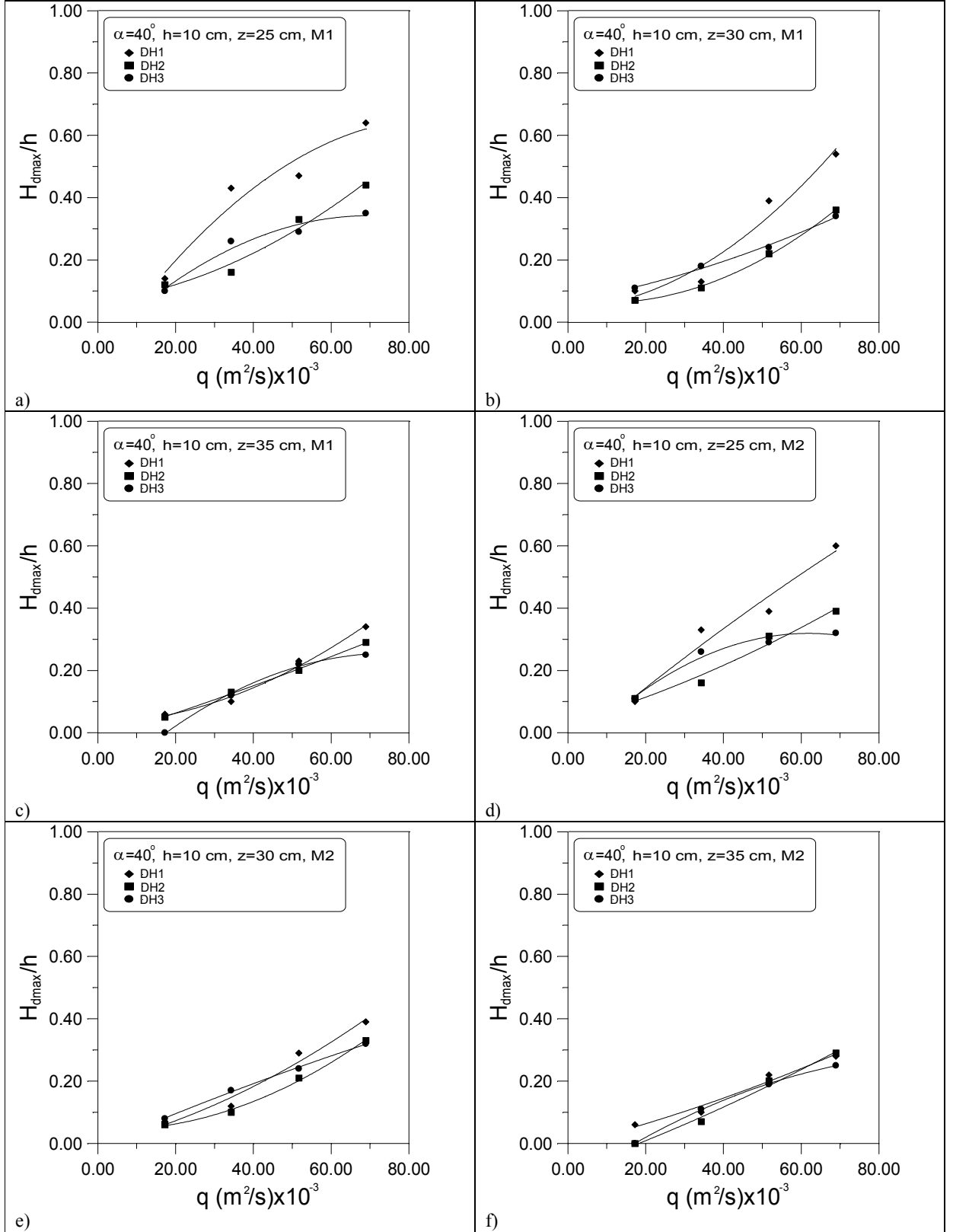
olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu deney dizilerinde oyulma miktarlarının da minimum olduğu görülmektedir. Bu durum basamak yüksekliği ile mansap su seviyesi arasındaki uygunluğu ifade etmektedir.

Mansap su seviyesinin 25 ve 30 cm olduğu durumlarda  $H_{dmax}/h$  değerlerinin, debi ile artış eğiliminin devam etmesine karşın  $z=35$  cm olduğu deney dizilerinde bu eğilim sonlanmıştır. Tüm deney dizilerinde  $z=35$  cm için meydana gelen  $H_{dmax}/h$  değerleri birbirine çok yakın olmuştur.

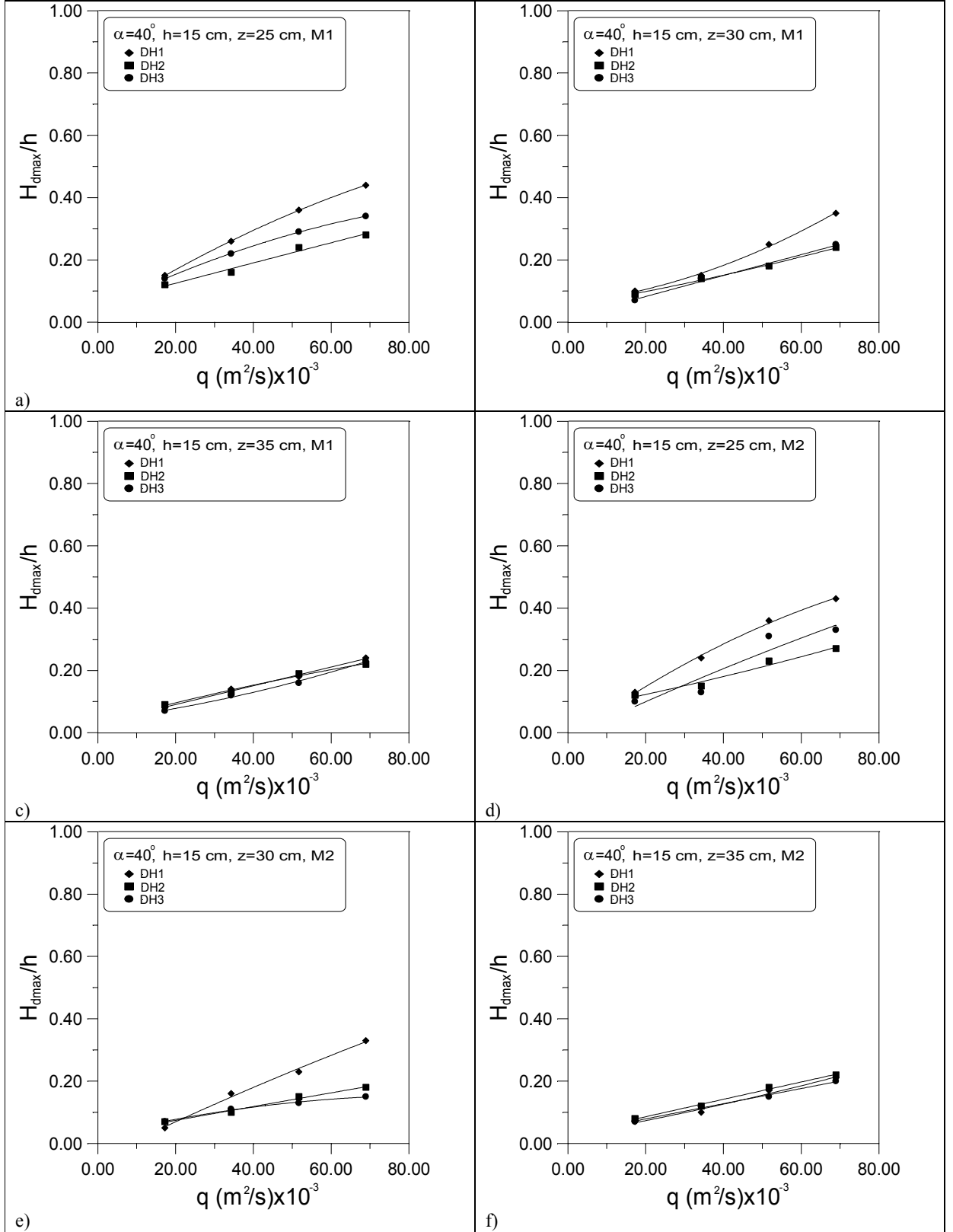
Deney sonuçlarından da anlaşılmaktadır ki boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=40^\circ$  olduğu deney şartlarında  $H_{dmax}/h$  değerleri önemli miktarda artış göstermiştir. Mansap su seviyesinin artmasıyla oyulmaların azalmasına karşın düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin artışı yüksek mansap su seviyelerinde, oyulma miktarları üzerinde etkisiz kalmaktadır.



Şekil 5.5  $\alpha=40^\circ, h=5$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'in birim debi ile değişimi



Şekil 5.6  $\alpha=40^\circ$ ,  $h=10$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'in birim debi ile değişimi



Şekil 5.7  $\alpha=40^\circ$ ,  $h=15$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'in birim debi ile değişimi

Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’da boşaltım kanalı taban açısı  $\alpha=50^\circ$ , boşaltım kanalı basamak yükseklikleri  $h=5, 10$  ve  $15$  cm, mansap su derinlikleri  $z=25, 30$  ve  $35$  cm ve üç farklı düşüm havuzu tipinde DH1, DH2, DH3 ve iki farklı yatak malzemesi durumunda M1, M2 olmak üzere  $H_{dmax}/h$ ’ın farklı birim debi miktarlarında değişimi görülmektedir.

Test edilen tüm deney dizilerinde birim debinin artması ile  $H_{dmax}/h$  değerleri de artış göstermiştir. Basamak yüksekliği  $h=5$  ve  $10$  cm olan deney dizilerinde özellikle DH1’in  $H_{dmax}/h$  değerlerindeki artış eğiliminin DH2 ve DH3’den daha fazla olduğu görülmektedir. Deney dizilerinde Şekil 5.11(f) durumu dışında oyulmanın olmadığı bir durum olmamıştır. Mansap su seviyesinin  $35$  cm olduğu deney dizilerinde  $H_{dmax}/h$  değerleri genellikle birbirine yakın değerler almıştır.

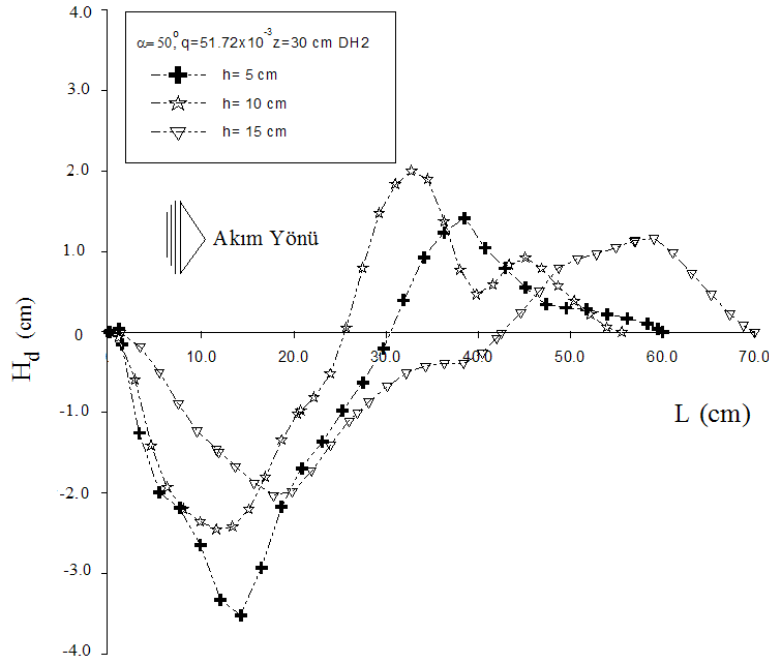
Deney dizilerindeki  $H_{dmax}/h$  değerlerinin, basamaklı boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu tüm deney dizilerinde en küçük olduğu Şekil 5.11(f)’de görülmektedir. Buna karşın  $\alpha=50^\circ$  için  $H_{dmax}/h$  değerlerinin maksimum olduğu deney dizisi Şekil 5.8(a)’da görülmektedir. Bir çok deney dizisinde maksimum debilerde meydana gelen  $H_{dmax}/h$  değerleri düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin farklı olmasına rağmen birbirine yakın değerler almıştır. Bunun nedeni yüksek debilerde, düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin tesirsiz kalmasıdır. Fakat boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=30^\circ$  olduğu deney dizilerindeki  $H_{dmax}/h$  değerleri, düşüm havuzu eşik yüksekliğinin artmasıyla birlikte azalma eğilimi göstermişti. Bu nedenle boşaltım kanalı taban açısının büyük olduğu durumlarda düşüm havuzu eşik yüksekliğinin de büyük seçilmesi uygun olacaktır.

Şekil 5.10 (f), 5.11 (e), 5.11 (f) deney dizilerinde bütün debilerde oyulma miktarlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu deney dizilerinde oyulma miktarlarının da minimum olduğu görülmektedir. Bu durum basamak yüksekliği ile mansap su seviyesi arasındaki uygunluğu ifade etmektedir. Mansap su seviyesinin  $25$  cm olduğu deney dizilerinde birim debi ile  $H_{dmax}/h$  değerlerinin artış eğiliminin devam etmesine karşın seviyenin  $30$  cm olduğu deney gruplarında oyulma eğiliminin sonlanmış olduğu görülmektedir. Boşaltım kanalı basamak yüksekliği arttıkça  $H_{dmax}/h$  değerleri azalmaktadır. Çünkü basamak yüksekliği arttıkça sönmülenen enerji miktarları da artmaktadır. En fazla enerji kırılımı boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu deney dizilerinde meydana gelmiştir.

Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu deney dizilerindeki  $H_{dmax}/h$  değerleri, açının  $\alpha=30^\circ$  ve  $40^\circ$  olduğu deney dizilerindekilere kıyasla daha büyüktür. Bunun nedeni boşaltım kanalının yüksekliklerinin eşit olmasına rağmen, uzunluğunun daha kısa olması nedeniyle kanal boyunca sönmülenen enerjinin daha az olmasıdır. Akımın sahip olduğu bu enerji fazlası oyulma miktarlarını da artırmaktadır. Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu deney dizilerinde M2 için elde edilen  $H_{dmax}/h$  değerleri M1 için elde edilenlerden biraz daha

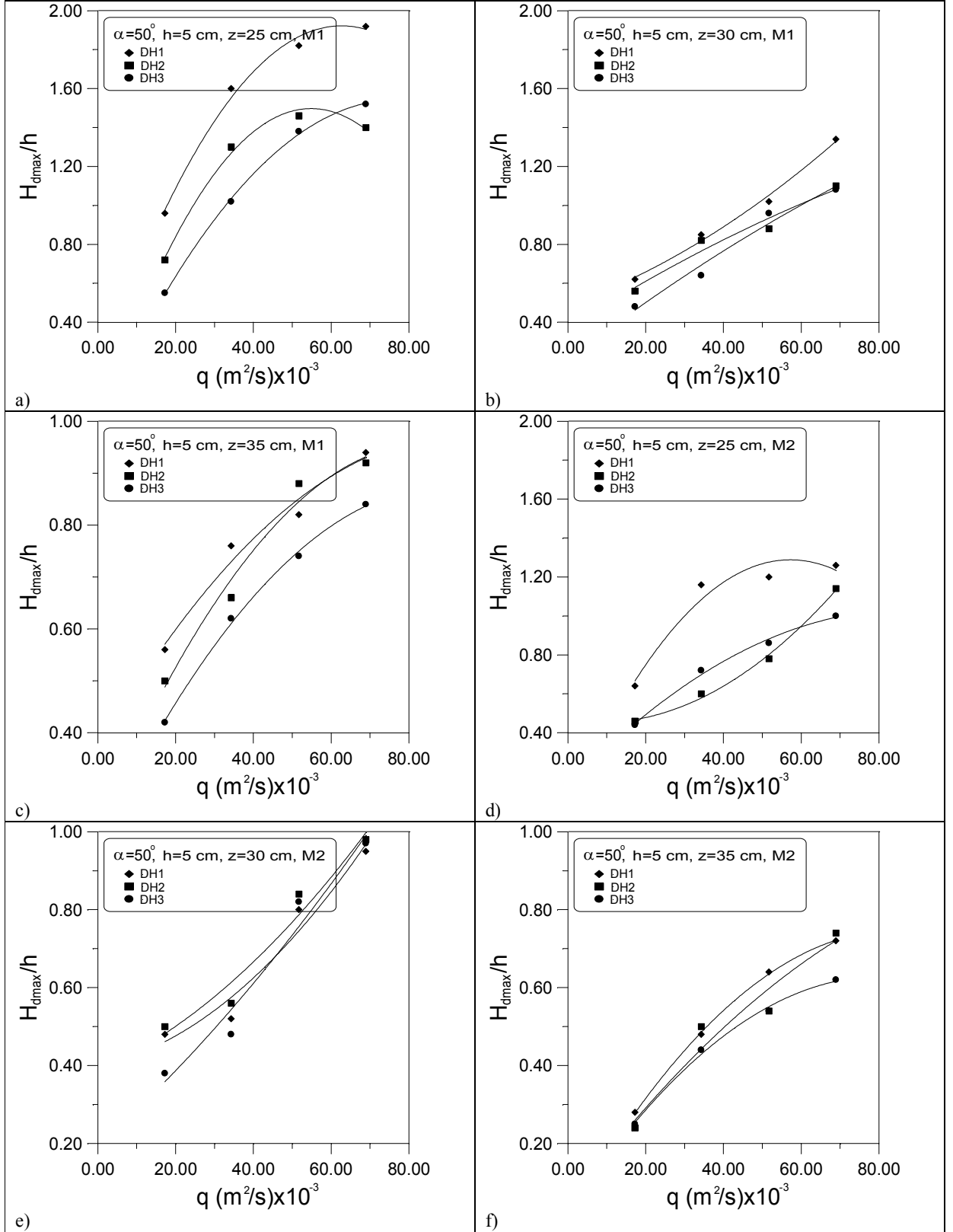
küçük olmaktadır. Bunun nedeni M1 yatak malzemesinin  $d_{50}$  değerinin M2 malzemesininkinden daha küçük olmasıdır.

Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu deney şartlarında  $H_{dmax}/h$  değerleri önemli miktarda artış göstermiştir. Buradan anlaşılmaktadır ki boşaltım kanalı taban açısındaki artış yapının mansap kısmında meydana gelen yersel oyulma miktarlarını ciddi şekilde artırmaktadır. Bu nedenle bu tür yapılar pratikte boyutlandırılırken mümkün oldukça boşaltım kanalı taban eğimini düşük yapmak yapının güvenliği açısından önemli olacaktır. Test edilen deney dizilerinde mansap su seviyesinin artmasıyla oyulmaların azalmasına karşın, boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=40^\circ$  ve  $50^\circ$  olduğu deney şartlarında düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin artışı oyulma miktarları üzerinde etkisiz kalmaktadır bundan dolayıdır ki eşik yükseklikleri biraz daha artırılarak oyulma miktarları biraz daha azaltılabilir.

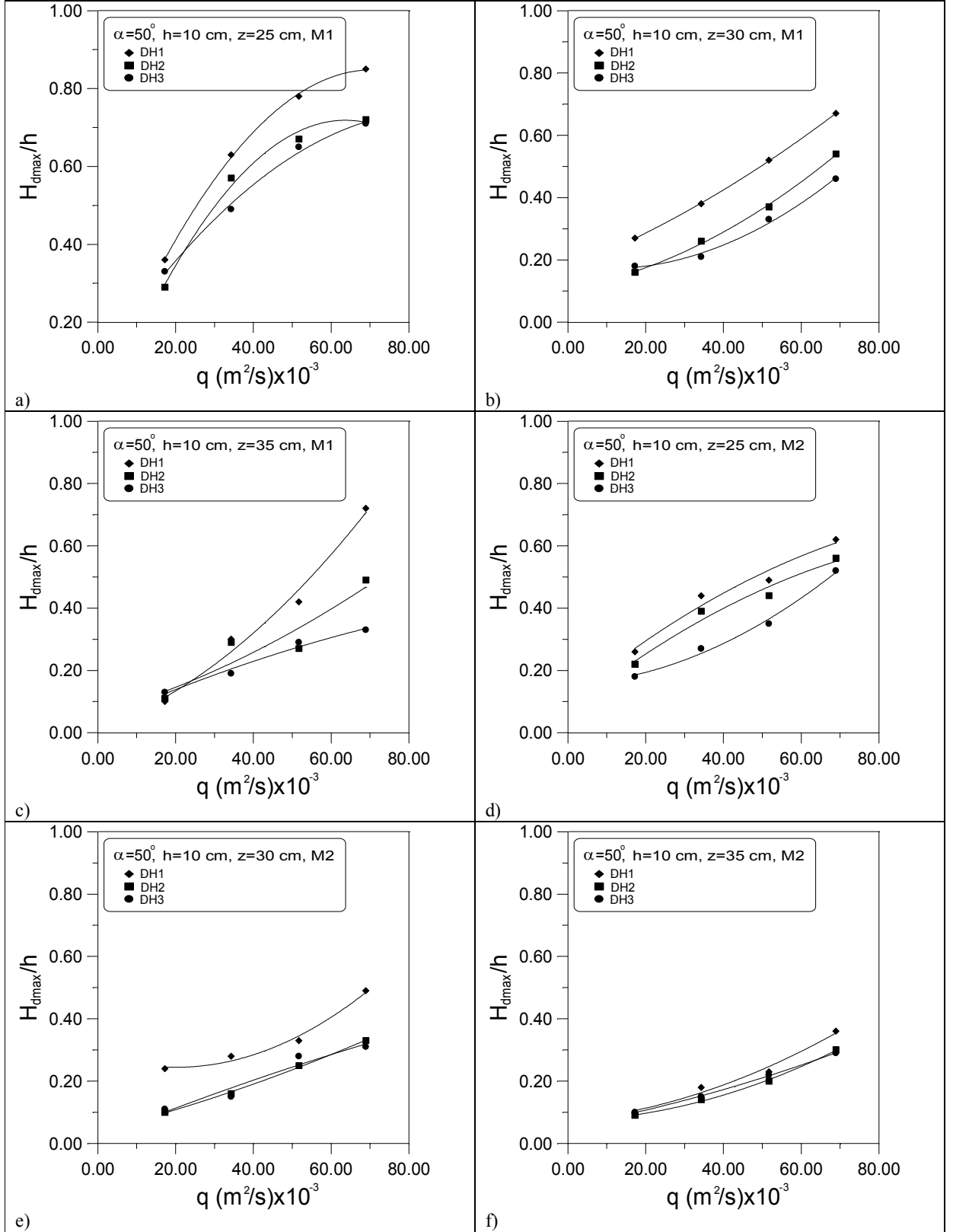


Şekil 5.8  $H_d$ 'ye basamak yüksekliğinin etkisi

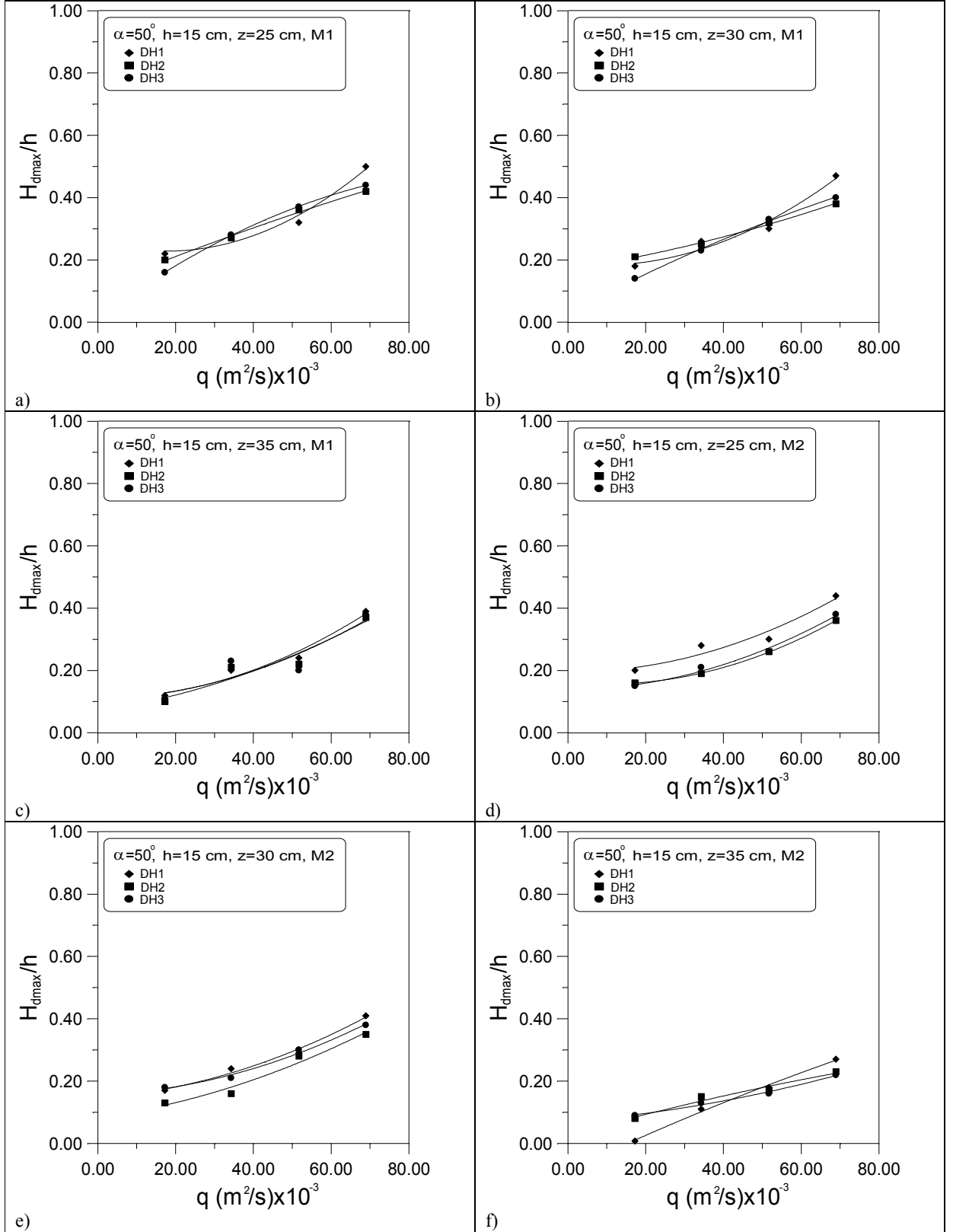




Şekil 5.9  $\alpha=50^\circ, h=5$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'ın birim debi ile değişimi



Şekil 5.10  $\alpha=50^\circ$ ,  $h=10$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'm birim debi ile değişimi



Şekil 5.11  $\alpha=50^\circ$ ,  $h=15$  cm için  $H_{dmax}/h$ 'm birim debi ile değişimi

## 5.2 Düşüm Havuzu Tipinin Oyulma Boyuna Etkisi

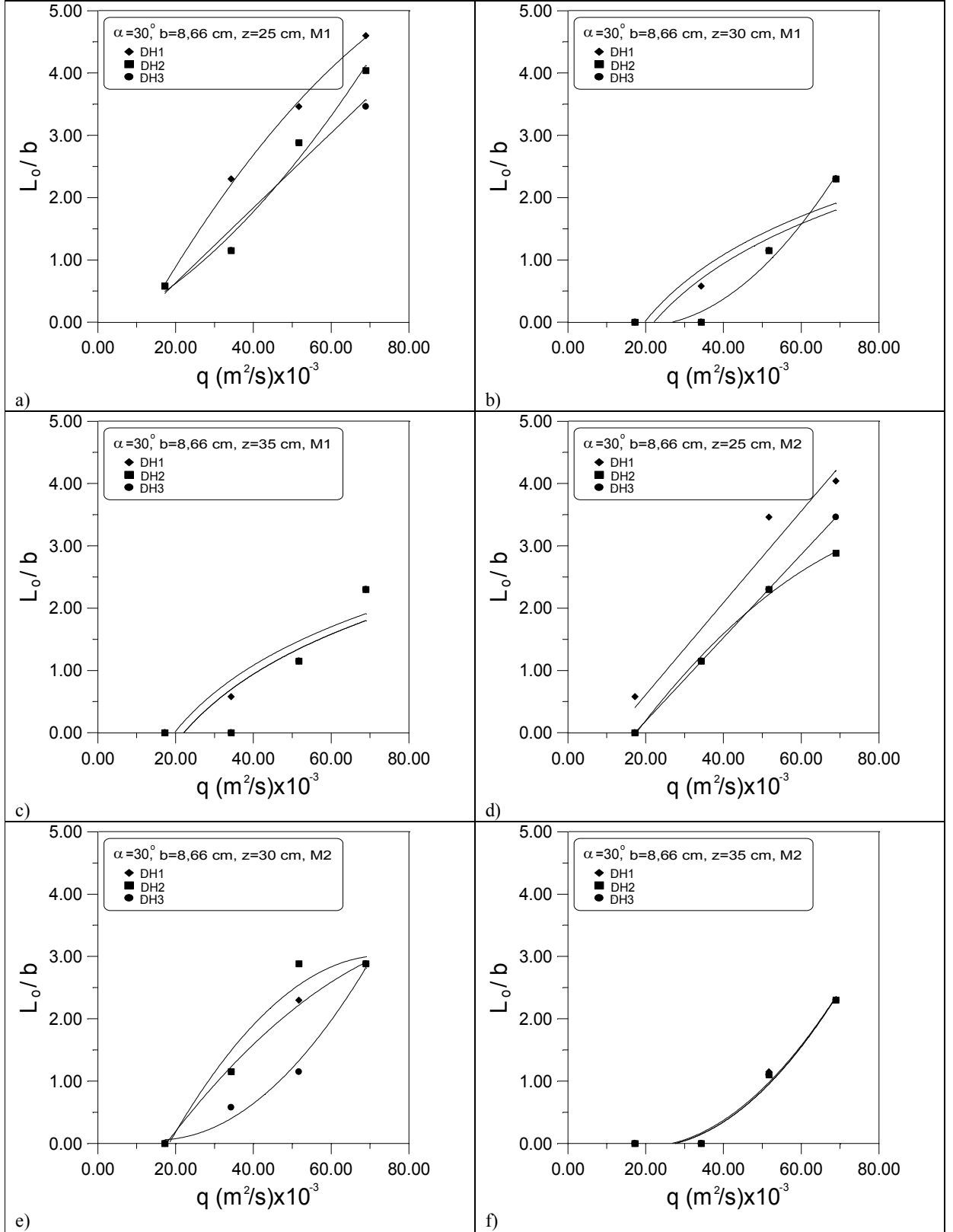
Bu kısımda farklı düşüm havuzu tiplerinin  $L_o/b$  değerlerinin,  $q$ (birim debi) ile değişimi, Şekil 5.12 (a)-5.20 (f) arasında grafikler halinde gösterilmiş ve bu grafiklerden yola çıkılarak bir takım yorumlarda bulunulmuştur.

Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 'de boşaltım kanalı taban açısı  $\alpha=30^\circ$ , her açığa ait farklı boşaltım kanalı basamak uzunluğu  $b$  cm, mansap su derinlikleri  $z=25, 30$  ve  $35$  cm ve üç farklı düşüm havuzu tipinde DH1, DH2, DH3 ve iki farklı yatak malzemesi durumunda M1, M2 olmak üzere  $L_o/b$  nin farklı birim debi( $q$ ) miktarlarında değişimi görülmektedir.

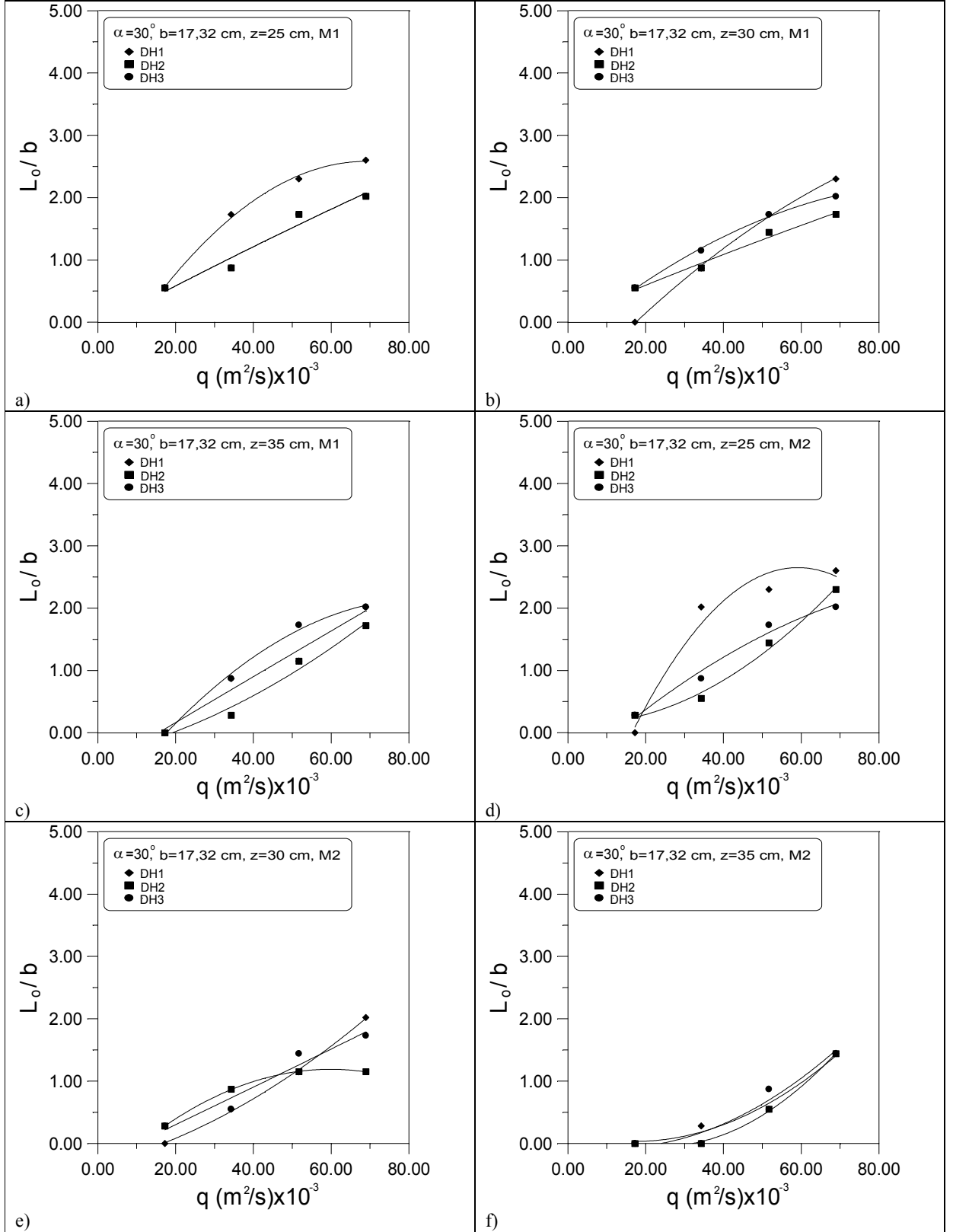
$L_o/b$  değerleri test edilen tüm deney dizilerinde birim debi ile doğru orantılı bir değişim göstermiştir. Özellikle DH1'in artış eğiliminin DH2 ve DH3'den daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni DH1'in eşiksiz olması dolayısıyla su jetinin direkt olarak yatağa çarpması dolayısıyla oyulma uzunluklarının artması şeklinde açıklanabilir. Söz konusu deney dizilerinde M2 için elde edilen  $L_o/b$  değerleri M1 için elde edilenlerden biraz daha küçük olmaktadır. Bunun nedeni M1 yatak malzemesinin  $d_{50}$  değerinin M2 malzemesininkinden daha küçük olmasıdır. Genellikle  $L_o/b$  değerleri DH1'de en büyük DH3'de ise daha küçük olmuştur. Buradan da anlaşılmaktadır ki düşüm havuzu sonuna eşik yapılması yataktaki oyulma uzunluklarını azda olsa kısaltmaktadır. Deney dizilerinde  $L_o/b$  değerleri mansap su derinliği arttıkça azalmaktadır.

Basamaklı boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=30^\circ$  olduğu deney şartlarında,  $L_o/b$  değerleri ile birim debi arasındaki artış eğiliminin sonlandığı ve maksimuma yakın değerler aldığı görülmektedir. Test edilen aynı mansap su seviyelerine sahip deney dizilerinde genellikle maksimum birim debilerde oyulma uzunlukları aynı çıkmaktadır. Mansap su derinliğinin  $25$  cm olduğu durumlar oyulma uzunlukları hem büyük olmuşlar hem de birbirlerinden oldukça farklı değerler almışlardır. Mansap su derinliğinin  $35$  cm olduğu deney şartlarında oyulma uzunluğu en az olmuş ve aynı debi değerlerinde birbirine neredeyse eşit olmuştur. Boşaltım kanalı basamak uzunluğu arttıkça  $L_o/b$  değerleri azalmaktadır. Çünkü basamak uzunluğu arttıkça sönmülenen enerji miktarları da artmaktadır.

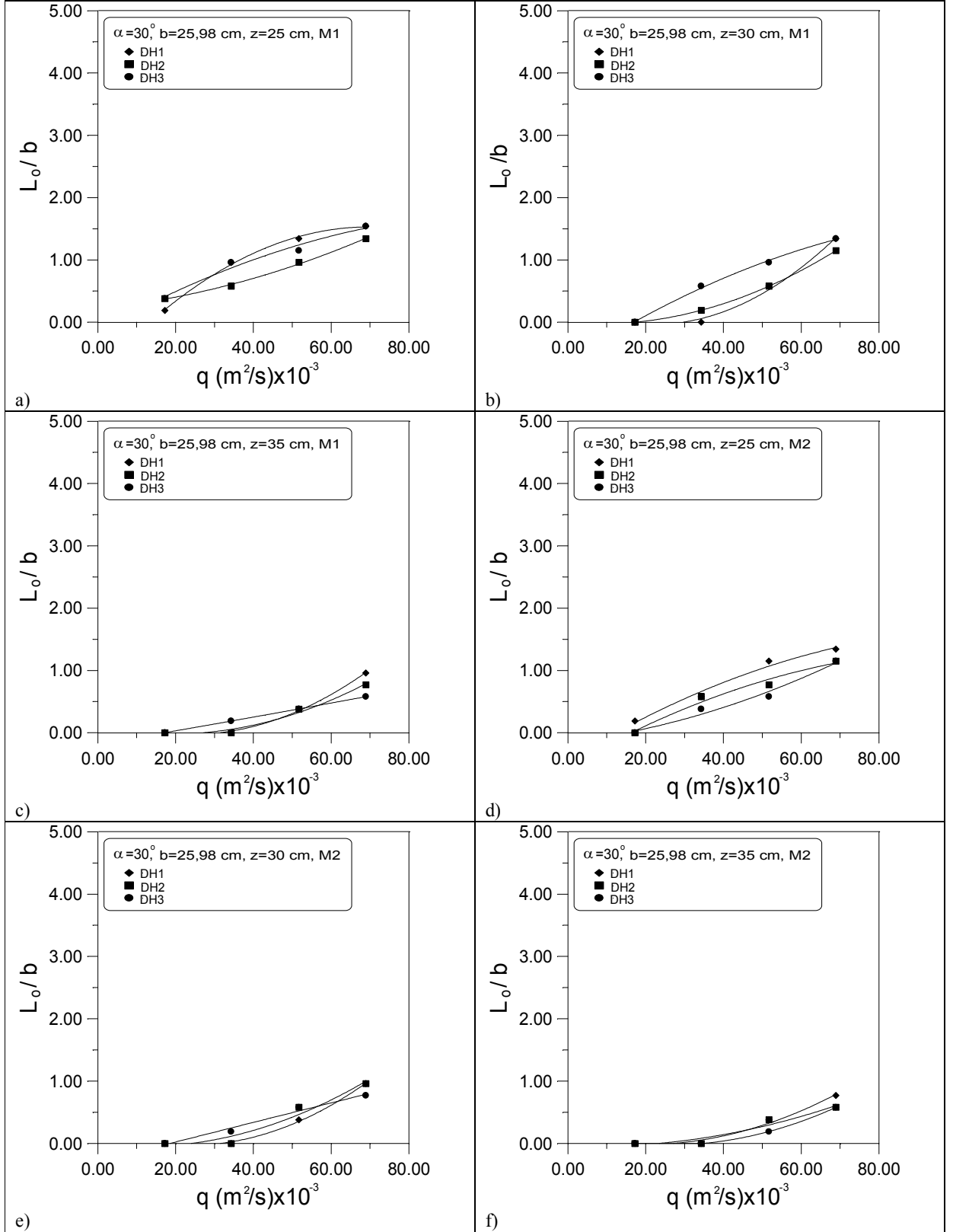
Genellikle, test edilen deney dizilerinde büyük debi miktarların da düşüm havuzu sonuna yerleştirilen eşiklerin oyulma uzunluklarına çok fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.12  $\alpha=30^\circ$ ,  $b=8.66$  cm için  $L_o/b$  nin birim debi ile değişimi



Şekil 5.13  $\alpha=30^\circ, b=17.32 \text{ cm}$  için  $L_o/b$  nin birim debi ile değişimi



Şekil 5.14  $\alpha=30^\circ$ ,  $b=25.98$  cm için  $L_o/b$  nin birim debi ile değişimi

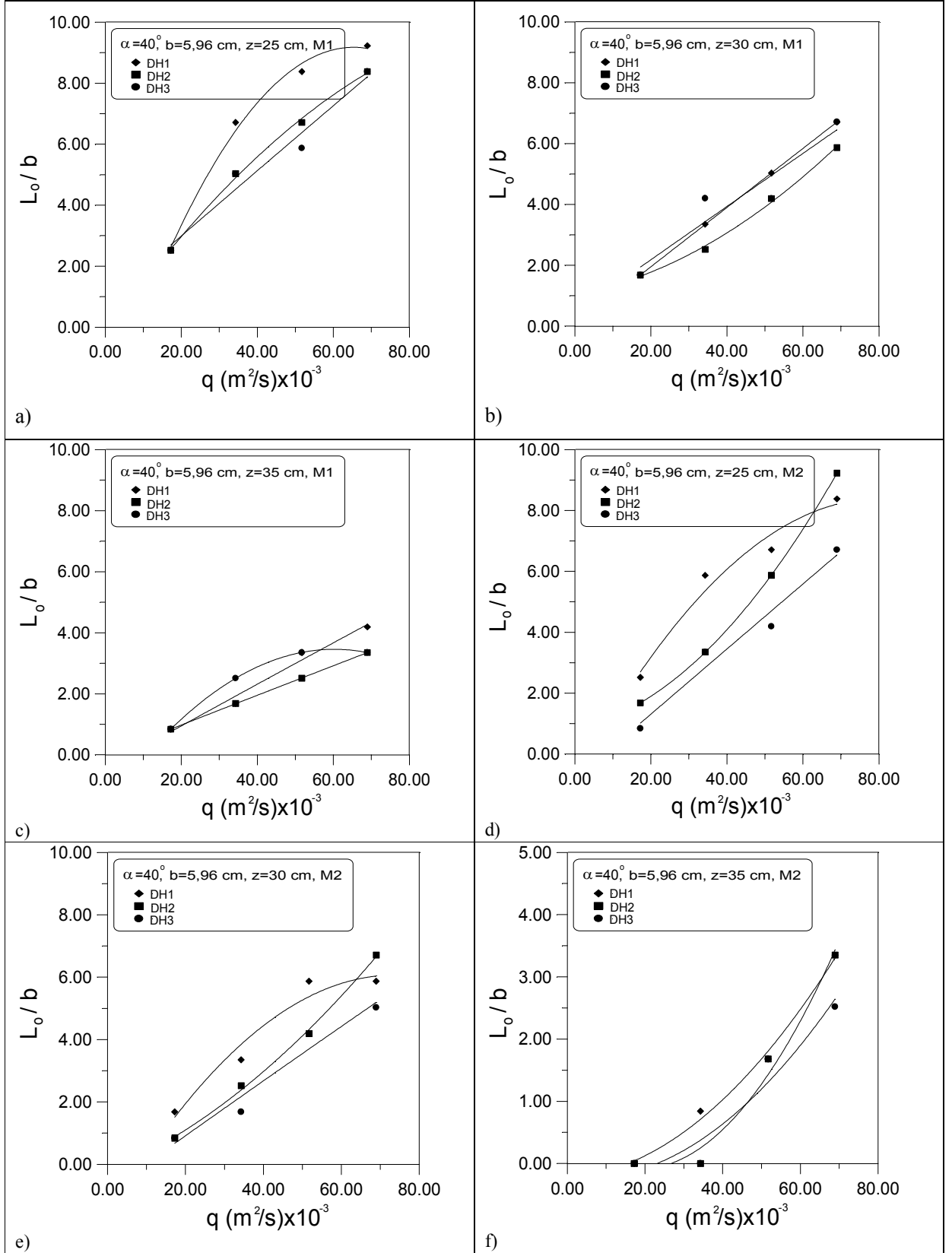
Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de boşaltım kanalı taban açısı  $\alpha=40^\circ$ , her açuya ait farklı boşaltım kanalı basamak uzunlukları  $b$  cm, mansap su derinlikleri  $z=25, 30$  ve  $35$  cm ve üç farklı düşüm havuzu tipinde DH1, DH2, DH3 ve iki farklı yatak malzemesi durumunda M1, M2 olmak üzere  $L_o/b$  ’nin farklı birim debi( $q$ ) miktarlarında değişimi görülmektedir.

Test edilen tüm deney dizilerinde birim debinin artması ile  $L_o/b$  değerleri de artış göstermiştir. Boşaltım kanalı taban eğiminin  $\alpha=40^\circ$  olduğu deney dizilerindeki farklı düşüm havuzu tiplerine göre  $L_o/b$  değerleri yakın bir artış eğilimi göstermiştir. Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=40^\circ$  olduğu deney dizilerindeki  $L_o/b$  değerleri, açının  $\alpha=30^\circ$  olduğu deney dizilerindekilere kıyasla daha büyüktür. Bunun nedeni boşaltım kanalının yüksekliğinin eşit olmasına karşın, uzunluğunun daha az olması sebebiyle kanal boyunca sönmölenen enerjinin daha az olmasıdır. Akımın sahip olduğu bu enerji fazlası oyulma boylarını da artırmaktadır.

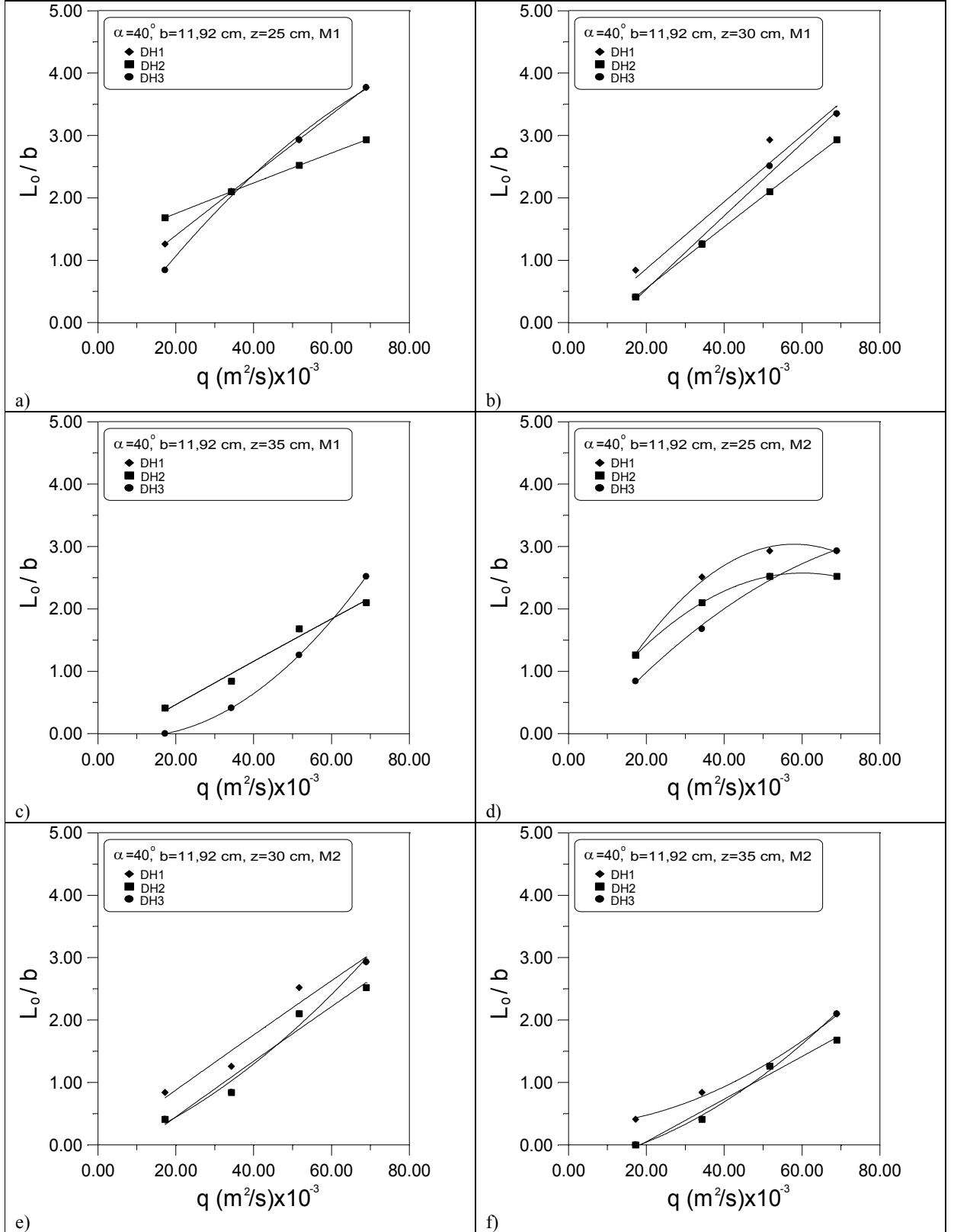
Bu deney dizilerinde de M2 için elde edilen  $L_o/b$  değerleri M1 için elde edilenlerden biraz daha küçük olmaktadır.

Bir çok deney dizisinde maksimum debilerde meydana gelen  $L_o/b$  değerleri düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin farklı olmasına rağmen yakın değerler almışlardır. Ayrıca  $L_o/b$  değerleri mansap su derinliği arttıkça azalmaktadır. Boşaltım kanalı basamak uzunluğu arttıkça  $L_o/b$  değerleri azalmaktadır. Test edilen deney dizilerinde mansap su seviyesinin  $35$  cm olduğu Şekil 5.15(f) ve Şekil 5.16(f) alternatifleri dışında oyulma gerçekleşmiştir. En uzun oyulma boyları  $25$  cm yükseklikteki mansap su seviyesinin olduğu deney dizilerinde gerçekleşmiştir.

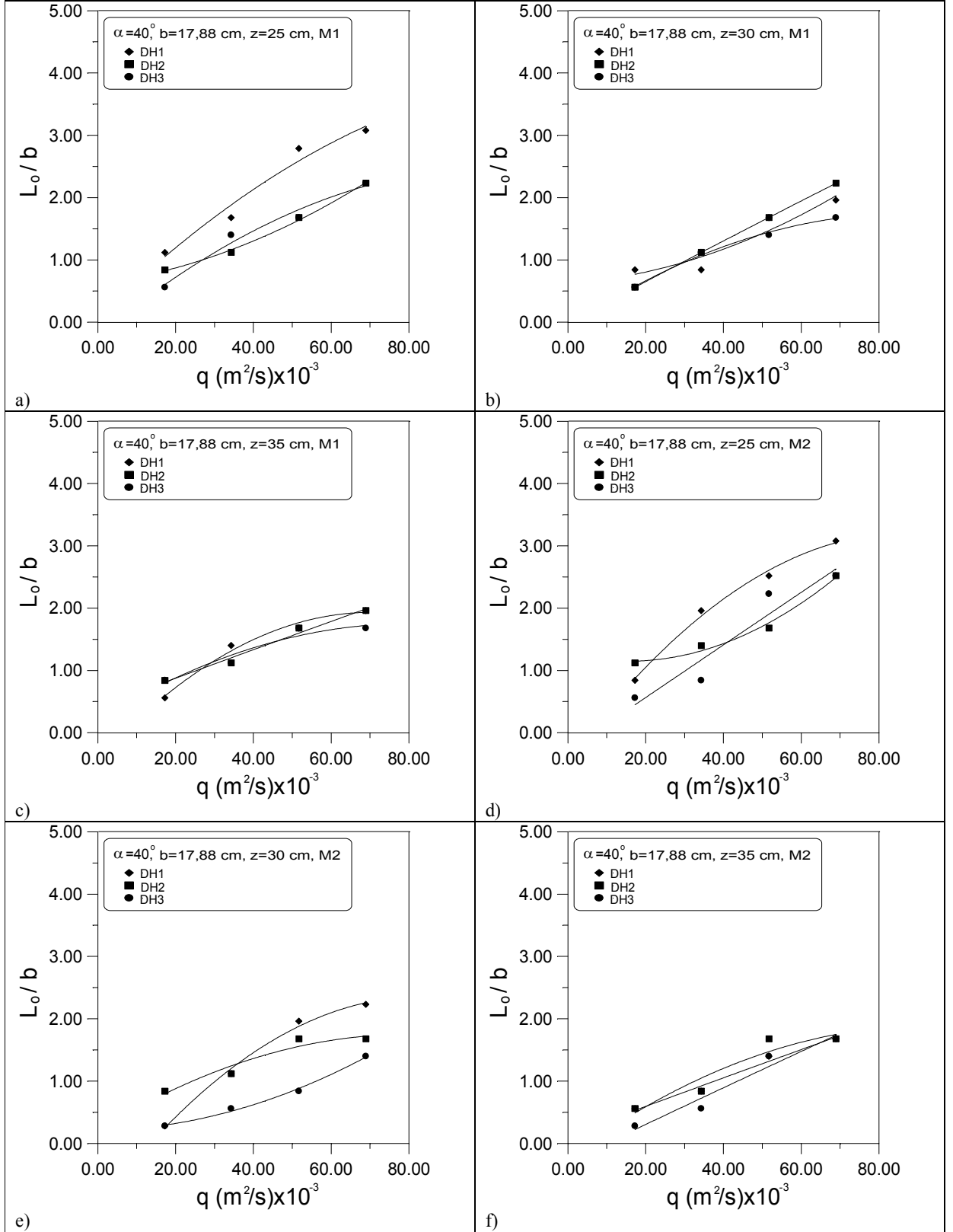




Şekil 5.15  $\alpha=40^\circ, b=5.96 \text{ cm}$  için  $L_0/b$  nin birim debi ile değişimi



Şekil 5.16  $\alpha=40^\circ$ ,  $b=11,92$  cm için  $L_o/b$  nin birim debi ile değişimi



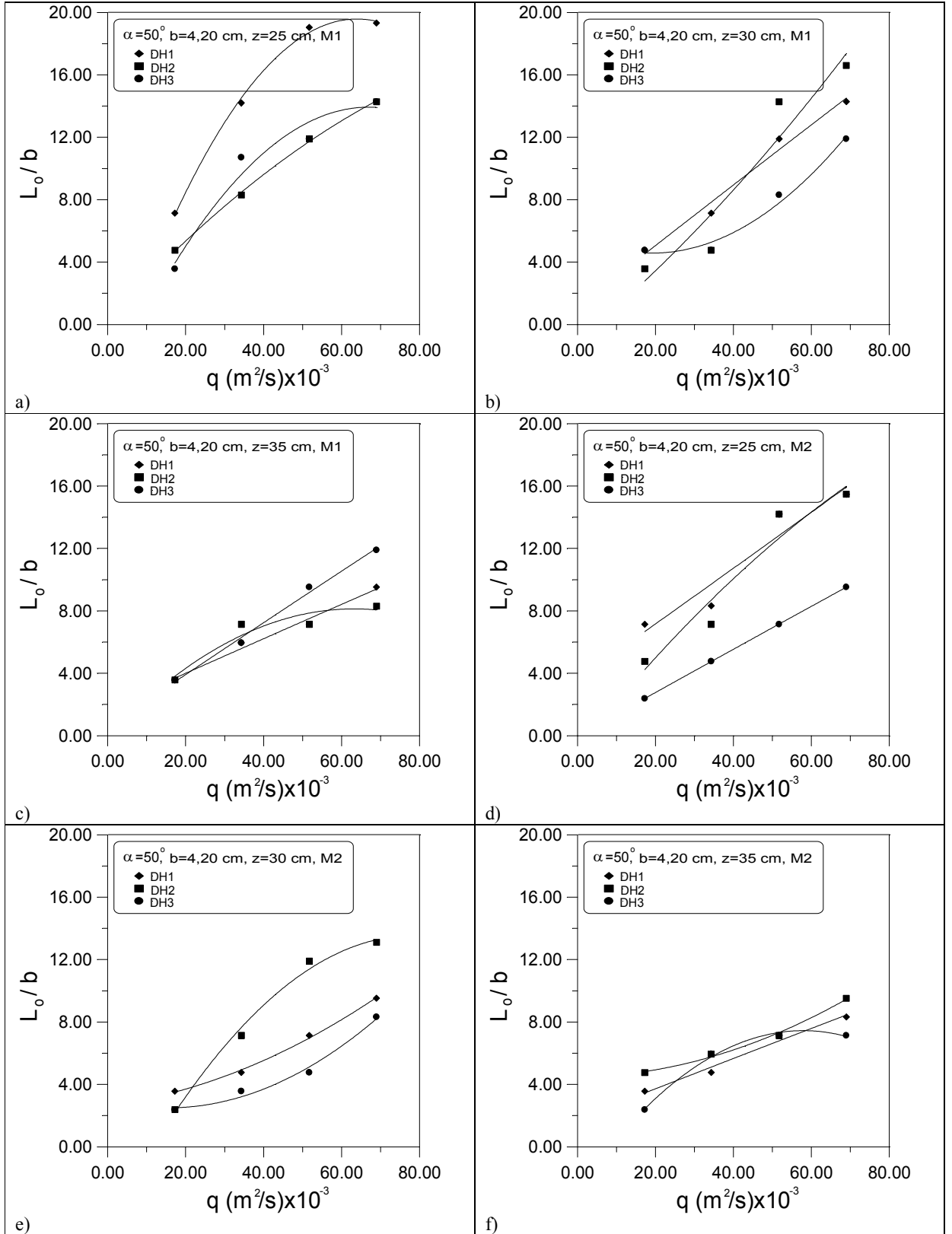
Şekil 5.17  $\alpha=40^\circ$ ,  $b=17.88$  cm için  $L_o/b$  nin birim debi ile değişimi

Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de boşaltım kanalı taban açısı  $\alpha=50^\circ$ , her açığa ait farklı boşaltım kanalı basamak uzunlukları  $b$  cm, mansap su derinlikleri  $z=25, 30$  ve  $35$  cm ve üç farklı düşüm havuzu tipinde DH1, DH2, DH3 ve iki farklı yatak malzemesi durumunda M1, M2 olmak üzere  $L_o/b$  ’nin farklı birim debi( $q$ ) miktarlarında değişimi görülmektedir.

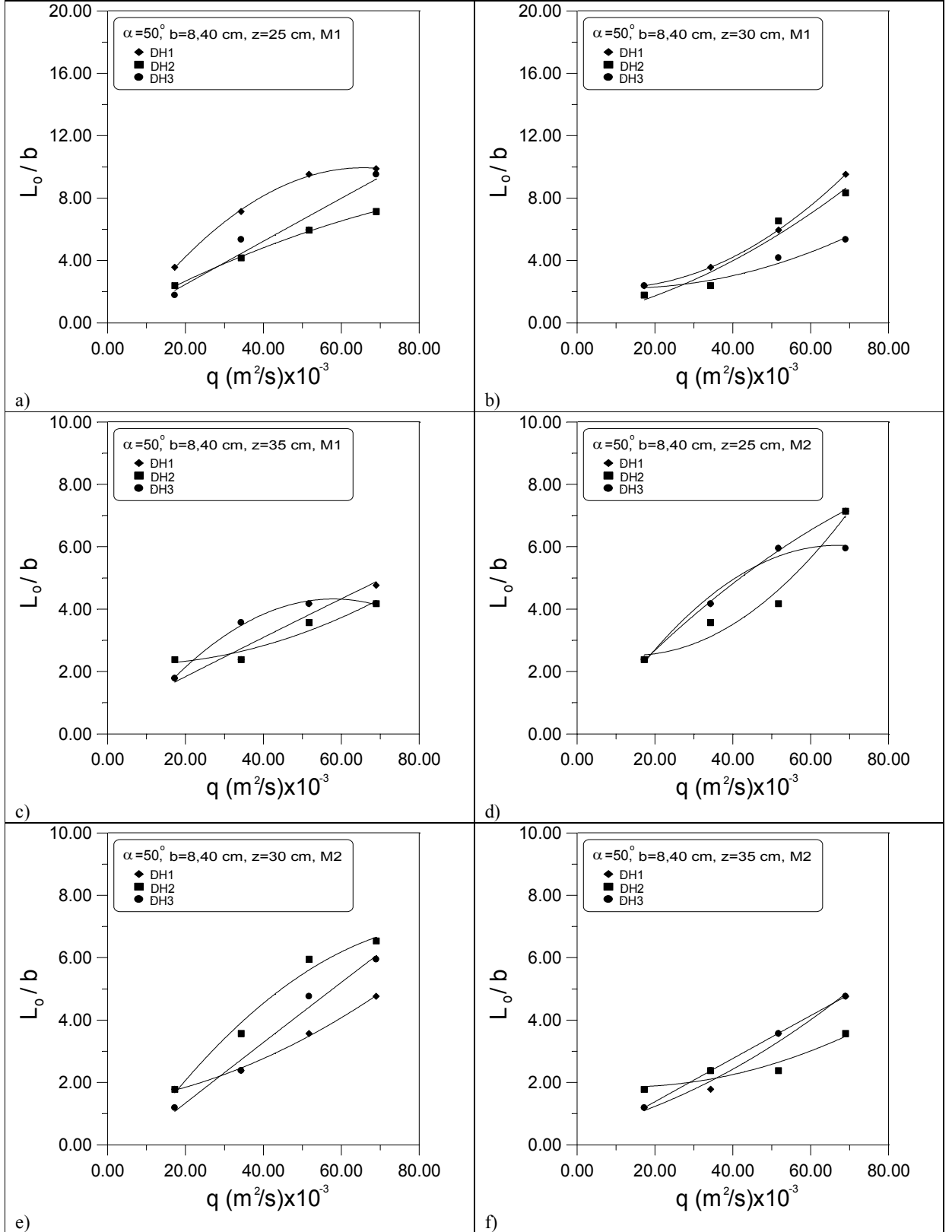
Test edilen tüm deney dizilerinde birim debinin artması ile  $L_o/b$  değerleri de artış göstermiştir. Basamak uzunlukları  $b=4,20$  ve  $8,40$  cm olan deney dizilerinde özellikle DH1’in  $L_o/b$  değerlerindeki artış eğiliminin DH2 ve DH3’den daha fazla olduğu görülmektedir. Bir çok deney dizisinde maksimum debilerde meydana gelen  $L_o/b$  değerleri düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin farklı olmasına rağmen birbirine yakın değerler almıştır. Bunun nedeni yüksek debilerde, düşüm havuzu eşik yüksekliklerinin oyulma boyları üzerinde tesirsiz kalmasıdır

Mansap su seviyesinin  $35$  cm olduğu deney dizilerinde  $L_o/b$  değerleri genellikle birbirine yakın değerler almıştır. Şekil 5.16 (f), 5.18 (f) deney dizilerinde bütün debilerde oyulma boylarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu deney dizilerinde oyulma uzunluklarının da minimum olduğu görülmektedir. Mansap su seviyesinin  $25$  cm olduğu deney dizilerinde birim debi ile  $L_o/b$  değerlerinin artış eğiliminin devam etmesine karşın seviyenin  $30$  ve  $35$  cm olduğu deney gruplarında artış eğilimi bitmiştir.

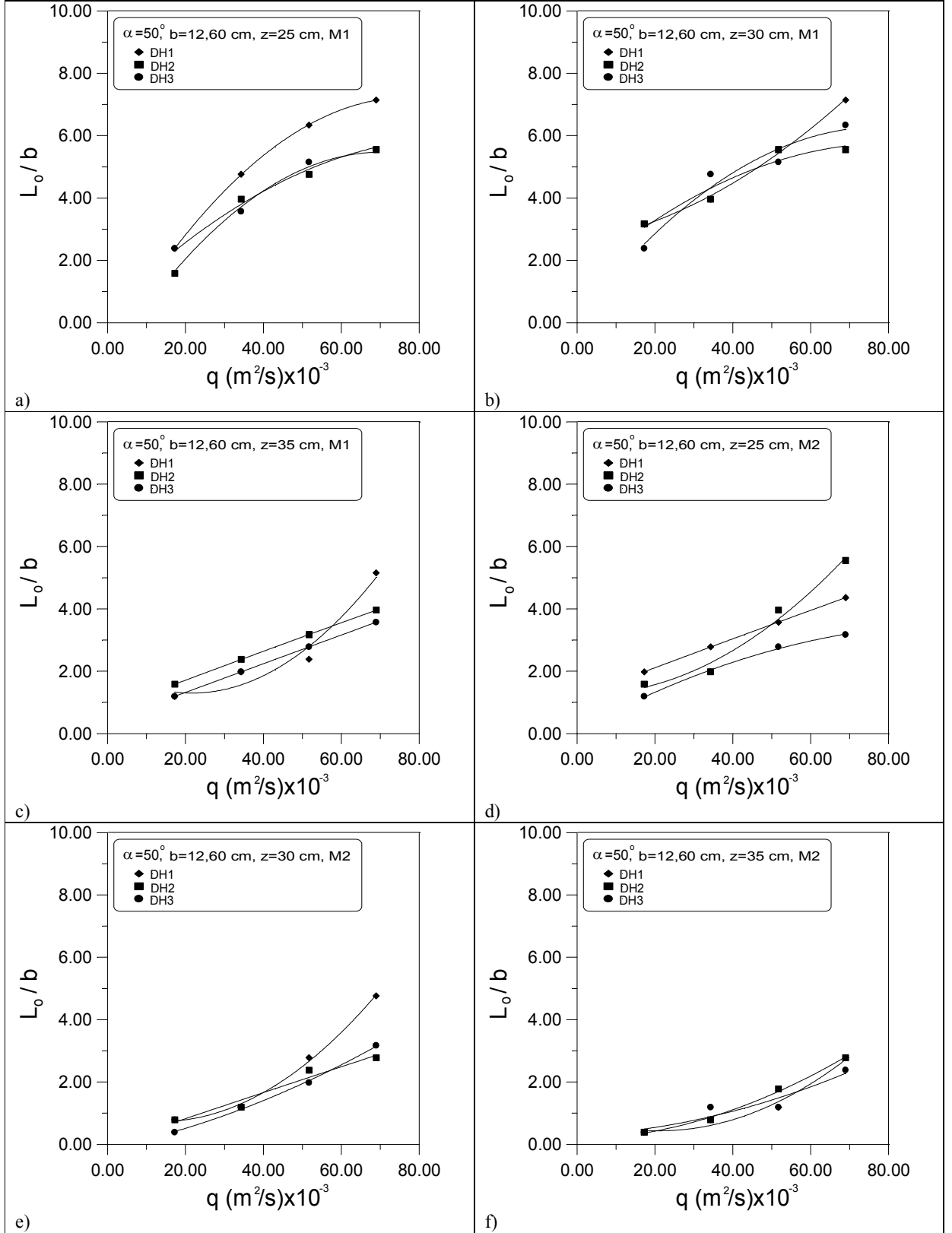
Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu deney dizilerindeki  $L_o/b$  değerleri, açının  $\alpha=30^\circ$  ve  $40^\circ$  olduğu deney dizilerindekilere kıyasla daha büyüktür. Bunun nedeni boşaltım kanalının yüksekliklerinin eşit olmasına rağmen, uzunluğunun daha kısa olması nedeniyle kanal boyunca sönmülenen enerjinin daha az olmasıdır. Akımın sahip olduğu bu enerji fazlası oyulma miktarlarını da artırmaktadır. Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu deney dizilerinde M2 için elde edilen  $L_o/b$  değerleri M1 için elde edilenlerden biraz daha küçük olmaktadır. Bunun nedeni M1 yatak malzemesinin  $d_{50}$  değerinin M2 malzemesininkinden daha küçük olmasıdır. Boşaltım kanalı taban açısının  $\alpha=50^\circ$  olduğu deney şartlarında  $L_o/b$  değerleri önemli miktarda artış göstermiştir. Buradan da anlaşılmaktadır ki boşaltım kanalı taban açısındaki artış yapının mansap kısmında meydana gelen yersel oyulma oylarını büyük ölçüde artırmaktadır.



Şekil 5.18  $\alpha = 50^\circ$ ,  $b = 4.20$  cm için  $L_0/b$  nin birim debi ile değişimi



Şekil 5.19  $\alpha=50^\circ$ ,  $b=8.40$  cm için  $L_o/b$  nin birim debi ile değişimi



Şekil 5.20  $\alpha=50^\circ$ ,  $b=12.60$  cm için  $L_0/b$  nin birim debi ile değişimi

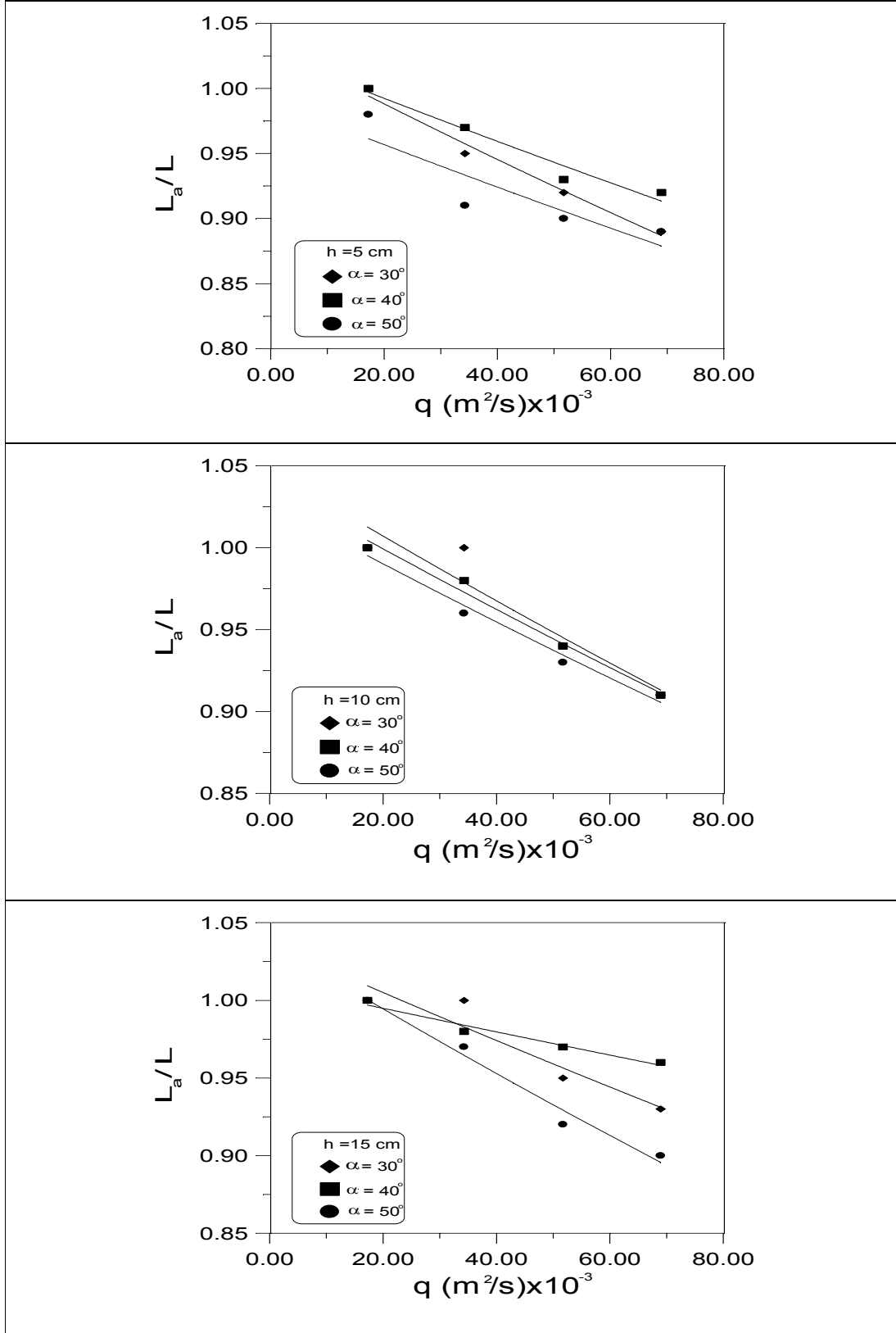
### 5.3 Havalanma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Bu kısımda farklı boşaltım kanalı eğimi ve basamak yüksekliklerinde  $L_a/L$  değerlerinin,  $q$ (birim debi) ile değişimi, Şekil 5.21’da grafikler halinde gösterilmiş ve bu grafiklerden faydalanılarak bazı yorumlarda bulunulmuştur.

Test edilen tüm deney dizilerinde birim debinin artmasıyla, havalanmış bölge uzunluğunun tüm boşaltım kanalı uzunluğuna oranı  $L_a/L$  azalmaktadır. Sonuç olarak birim debinin artışı havalanmayan bölge uzunluğunu da artırmaktadır. Test edilen deney dizilerinde farklı boşaltım kanalı açıları için  $L_a/L$  oranı basamak yüksekliği olan  $h$ ’ın artmasıyla azalmıştır. Boşaltım tabanı kanal açısının artırılmasıyla havalanmayan bölgenin uzunlukları genellikle azalmıştır. Basamak yüksekliğinin artmasıyla nap akım şartlarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Basamak yüksekliğinin  $h=15$  cm olduğu deney şartlarında küçük debilerde  $L_a/L$  oranı hemen hemen aynı olmaktadır. Basamak yüksekliğinin  $h=10$  cm olduğu durumda  $L_a/L$  oranları arasında bir yakınlık olmasına karşın diğer basamak yüksekliklerinde  $L_a/L$  oranları arasında oldukça farklı değerler gözlemlenmiştir. Basamak yüksekliğinin  $h=10$  cm olduğu durumda maksimum birim debide  $L_a/L$  oranı bütün boşaltım kanalı taban açıları için neredeyse aynı değeri almıştır.

Burada  $L_a$  havalanan bölge uzunluğu olup, deneyler sırasında ölçümü yapılan kara bölge yani havalanmayan bölge uzunluğunun bütün boşaltım kanalı uzunluğu olan  $L$ ’den çıkartılmasıyla elde edilmiştir.





Şekil 5.21  $h=5,10$  ve  $15$  cm için  $L_a/L$  değerlerinin birim debi ile değişimi

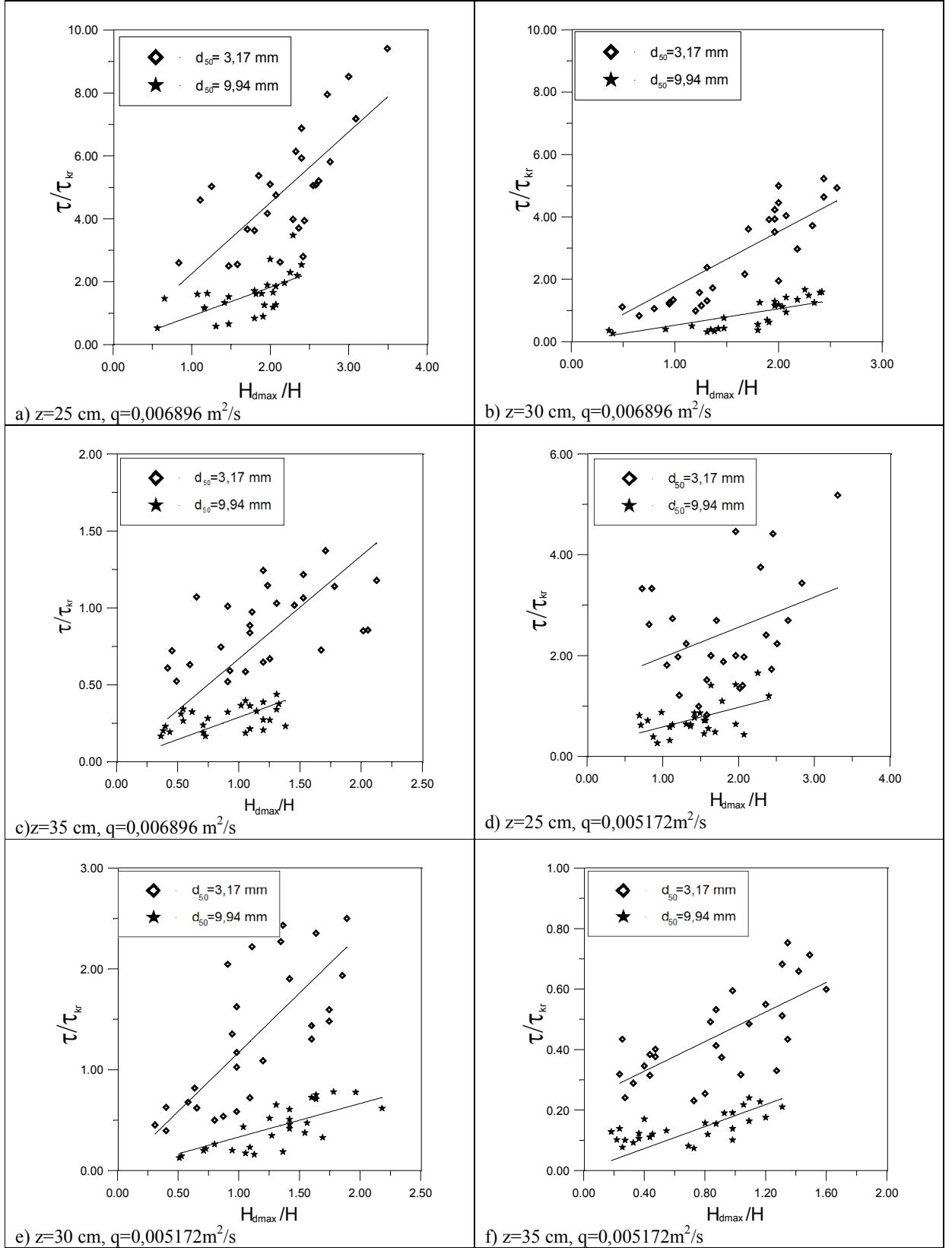
## 5.4 Kayma Gerilmelerinin Maksimum Oyulma Derinliği İle İlişkisi

Bu kısımda deneylerde kullanılan iki farklı granümetriye sahip malzemenin, değişik mansap su derinlikleri ve farklı birim debilerde  $\tau/\tau_{kr}$  değerlerinin,  $H_{dmax}/H$  değerleri ile değişimi, Şekil 5.22 (a)-(f) arasında grafikler halinde gösterilmiş ve bu grafiklerden yola çıkılarak bir takım yorumlarda bulunulmuştur.

Test edilen bütün deney dizilerinde mansap su yüksekliğinin artmasıyla birlikte oyulma miktarları oldukça azalmaktadır. Debiyle paralel olarak hidrolik yarıçap değerlerinin de artmasıyla  $\tau/\tau_{kr}$  değerleri de artış göstermektedir. Test edilen tüm deney dizilerinde çapı  $d_{50}=9,94$  mm olan yatak malzemesinin  $\tau/\tau_{kr}$  değerleri, çapı  $d_{50}=3,17$  mm olan yatak malzemesinin  $\tau/\tau_{kr}$  değerlerinden küçük çıkmıştır. Mansap su derinliğinin  $z=25$  cm olduğu deney şartlarında  $\tau/\tau_{kr}$  değerleri birbirinden oldukça farklılıklar göstermiştir. Seviyenin  $z=30$  ve  $35$  cm olduğu durumlarda ise birbirine daha yakın değerler almıştır. Test edilen deney dizilerinde genellikle kayma gerilmelerinin artmasıyla birlikte ince malzemeden teşkil edilen yataktaki oyulmaların doğru orantılı olarak artmasına karşın iri malzemede oyulma miktarları kayma gerilmelerinin artmasıyla daha fazla bir artış göstermiştir. Deney şartlarında ince malzemenin  $H_{dmax}/H$  değerlerinin artış eğiliminin devam etmesine karşın kalın malzemede artış eğiliminin azaldığı gözlemlenmiştir. Test edilen deney dizilerinde çapı  $d_{50}=9,94$  mm yatak malzemesinin  $H_{dmax}/H$  değerlerinin, çapı  $d_{50}=3,17$  mm olan yatak malzemesine oranla daha küçük olduğu görülmüştür. Buradan, malzeme dane çapının küçülmesi beklendiği şekilde daha büyük  $\tau/\tau_{kr}$  değerlerinin elde edilmesine sebep olmuştur.  $\tau$  ve  $\tau_{kr}$  aşağıdaki eşitliklerden faydalanılarak bulunmuştur.

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J \quad \tau_{kr} = 0.06(\gamma_s - \gamma) d_{50}$$

Burada;  $\tau$ =Kayma gerilmesi( $kg/m^2$ ),  $\tau_{kr}$ =Kritik kayma gerilmesi( $kg/m^2$ ), R: Hidrolik yarıçap(m), J:Eğim,  $\gamma_s$ =dane birim hacim ağırlığı( $kg/m^3$ ),  $\gamma$ =Suyun birim hacim ağırlığı( $kg/m^3$ )  
 $d_{50}$ =Malzemenin ağırlık olarak %50'sinin elekten geçtiği dane çapı(mm),  
Ayrıca R ve J değerleri mansap ta ölçülen hız ve derinlik yardımıyla manning formülünden elde edilmiştir.

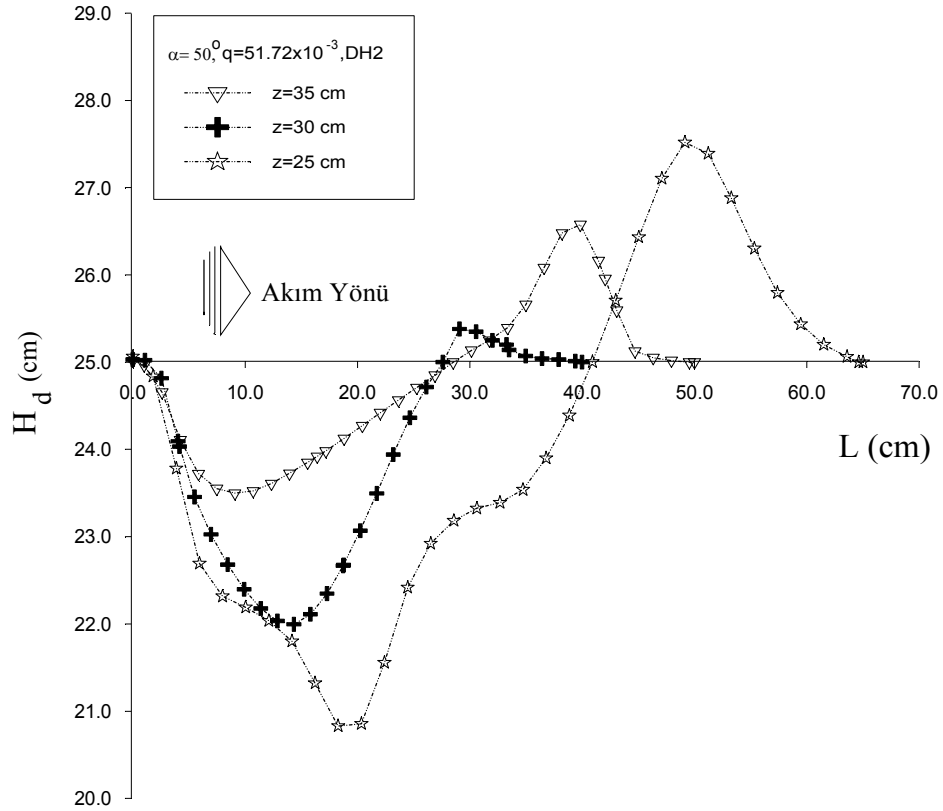


Şekil 5.22  $\tau/\tau_{kr}$  değerlerinin  $H_{dmax}/H$  değerleri ile değişimi

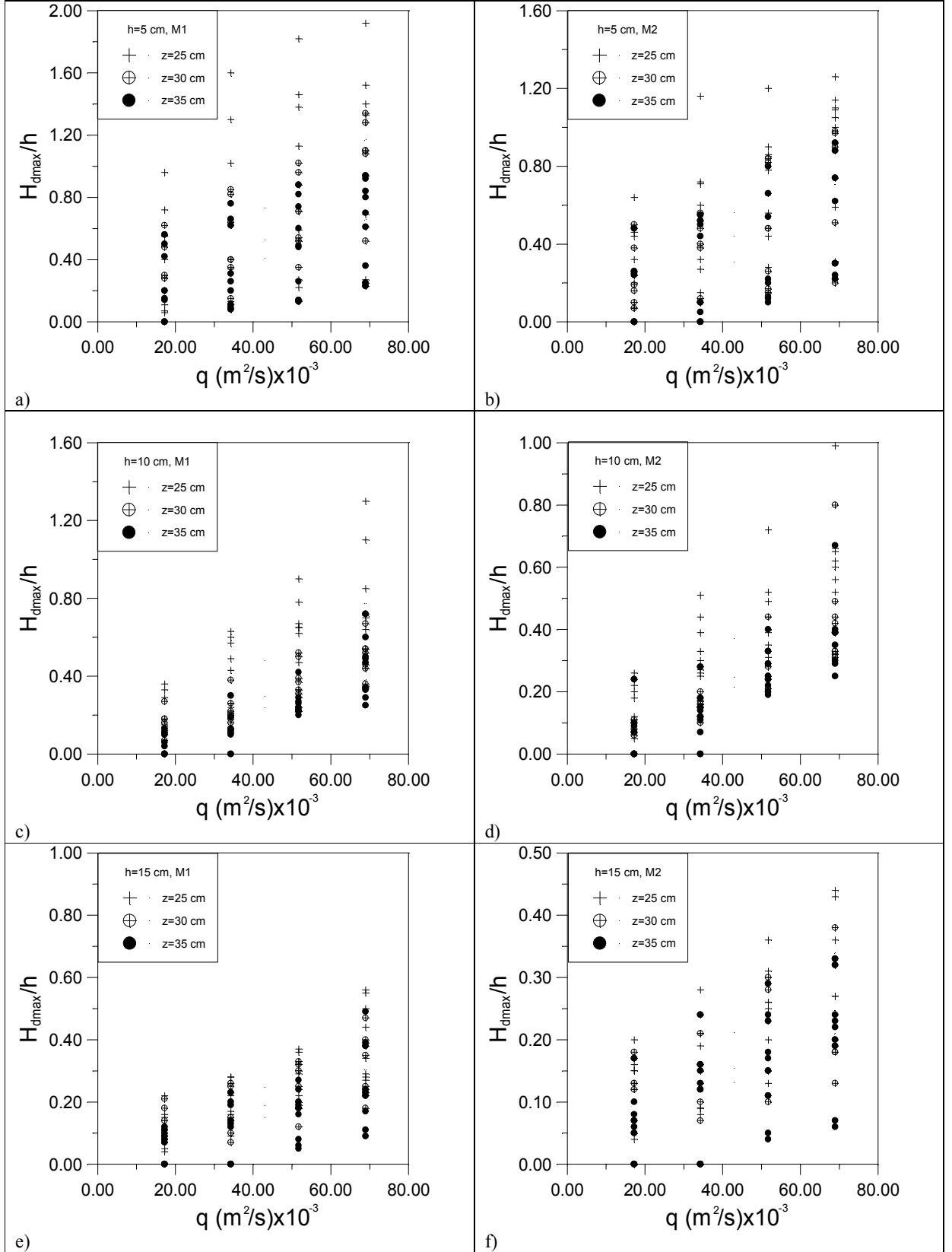
## 5.5 Mansap su seviyesinin Maksimum Oyulma derinliği İle İlişkisi

Şekil 5.24'(a)-(f) de mansap su seviyesinin farklı basamak yüksekliği, birim debi ve malzeme granülometrilerinde,  $H_{dmax}/h$  değerlerinin nasıl etkilediği grafikler halinde gösterilmiştir.

Birim debinin artmasıyla tüm deney dizilerinde  $H_{dmax}/h$  değerlerinin arttığı görülmektedir. Akım kabartıcının  $z=25$  cm olduğu deney gurubunda bu açıkça görülmektedir. Bunun sebebi mansap kanalına gelen serbest su jetinin yatağa direkt teması sonucu meydana getirdiği oyulmalar olarak izah edilebilir. Ayrıca  $h$  basamak yüksekliği değerlerinin artmasıyla  $H_{dmax}/h$  değerleri azalma göstermektedir.  $H_{dmax}/h$  değeri en yüksek değerini Şekil 5.24(a)'da görüldüğü gibi basamak yüksekliğinin  $h=5$  cm olduğu durumda almaktadır. Genellikle M1 malzeme çapında yapılan deneylerde  $H_{dmax}/h$  değerlerinin M2 malzemesine kıyasla biraz daha büyük değerler aldığı gözlenmiştir. Basamak yüksekliğinin  $h=15$  cm olduğu deney dizilerinde  $H_{dmax}/h$  değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı Şekil 5.24(e)'de görülmektedir.



Şekil 5.23  $H_d$  değerlerinin farklı akım kabartıcı yüksekliklerinde boykesiti



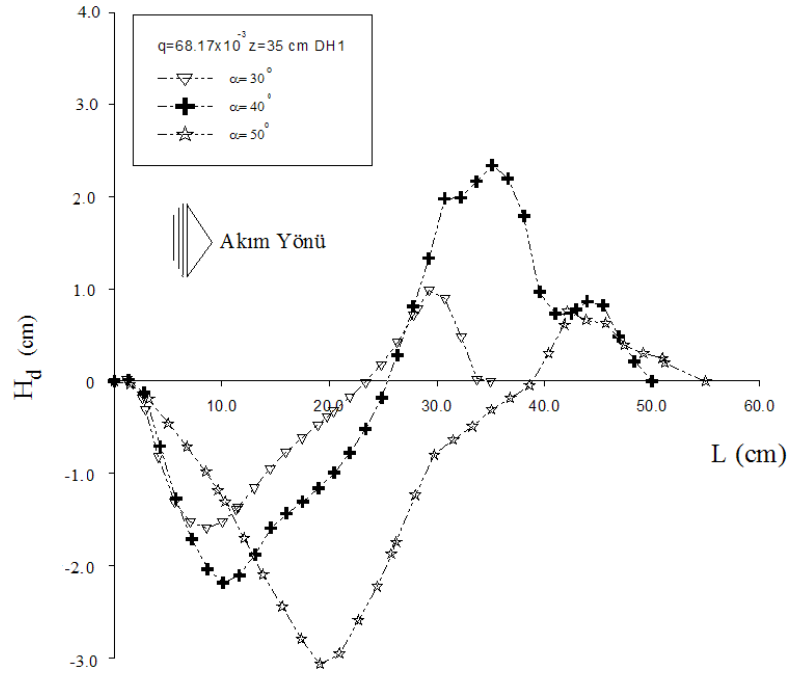
Şekil 5.24  $H_{dmax}/h$  değerlerinin farklı akım kabartıcı yüksekliklerinde birim debi ile değişimi

## 5.6 Boşaltım Kanalı Taban Açısının Oyulma Parametrelerine Etkisi

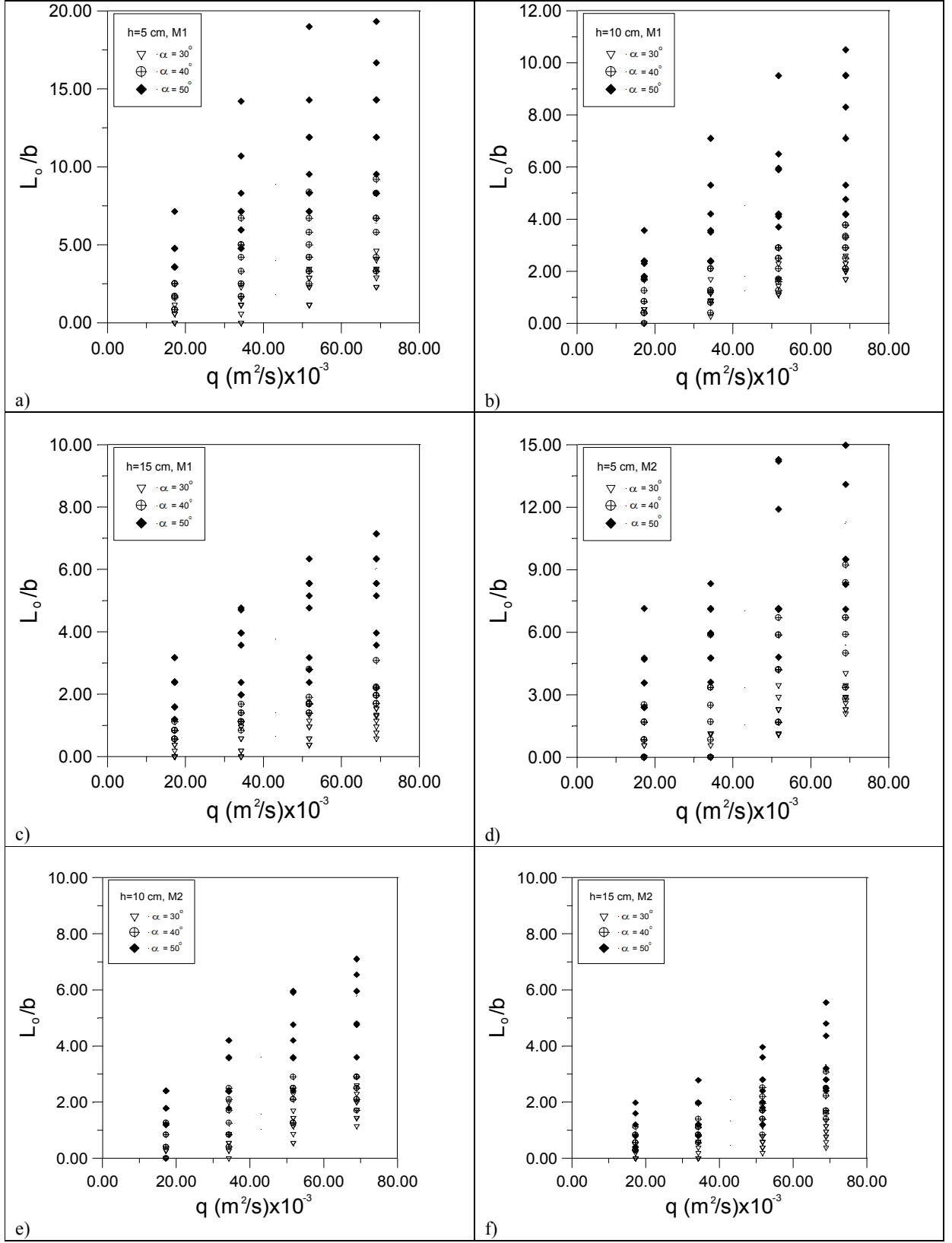
Şekil 5.25 de farklı boşaltım kanalı taban açılarındaki oyulma çukurunun boy kesiti görülmektedir.

Şekil 5.26 (a)-(f) de boşaltım kanalı taban açısının farklı basamak yüksekliği, birim debi ve malzeme granümetrilerinde,  $L_o/b$  değerlerini nasıl etkilediği grafikler halinde gösterilmiştir.

Birim debinin artmasıyla tüm deney dizilerinde  $L_o/b$  değerlerinin arttığı görülmektedir. Mansap kanalı açısının en büyük yani  $50^\circ$  olduğu deney gurubunda bu açıkça görülmektedir. Ayrıca  $h$  basamak yüksekliği değerlerinin artmasıyla  $L_o/b$  değerleri azalma göstermektedir.  $L_o/b$  değeri en yüksek değerini Şekil 5.26 (a) da görüldüğü gibi basamak yüksekliğinin  $h=5$  cm olduğu durumda almaktadır. Genellikle M1 malzeme çapında yapılan deneylerde  $L_o/b$  değerlerinin M2 malzemesine kıyasla biraz daha büyük değerler aldığı gözlenmiştir. Basamak yüksekliğinin  $h=10$  cm olduğu deney dizilerinde  $L_o/b$  değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı Şekil 5.26 (b) ve (e) de görülmektedir.



Şekil 5.25 Taban açısı ve oyulma derinliği boykesiti



Şekil 5.26  $L_0/b$  değerlerinin birim debi ile değişimi

## 5.7 Froude Sayısının Oyulmaya Etkisi

Şekil 5.27' te Densimetrik Froude sayısı ile  $L_o/H_{dmax}$  değerlerinin farklı malzeme granümetrileri, birim debi ve değişik mansap su seviyelerinde değişimi grafikler haline gösterilmiştir. Burada üç boyutlu akım yani hava, su ve sediment karışımı olduğundan densimetrik Froude sayısı kullanılmıştır. Mansap kanalında, düşü havuzu eşiği üzerinde ölçülen hızda dikkate alınarak

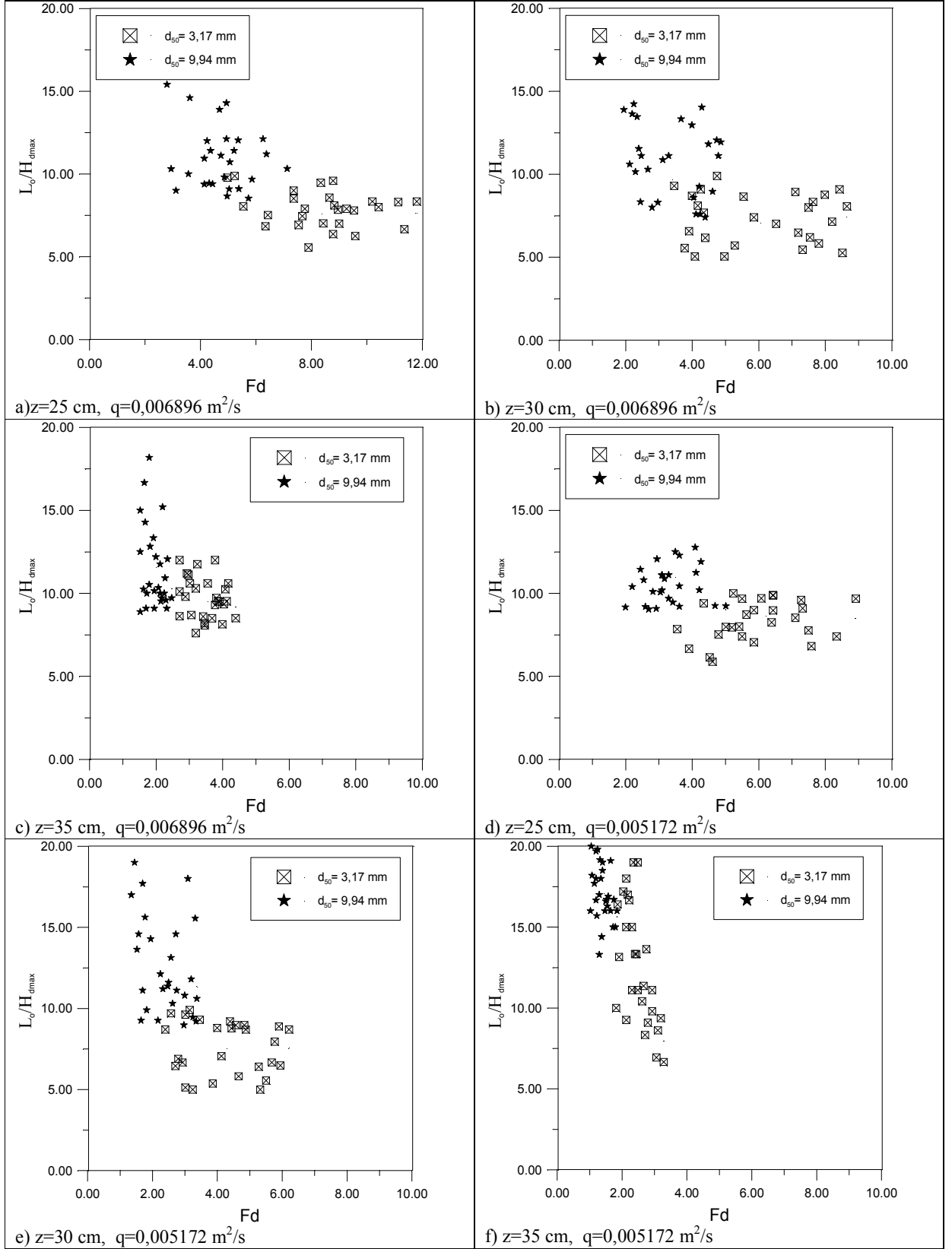
$$F_d = v_o / \sqrt{g \cdot d_{50} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}}$$

formülünden hesaplanmıştır.  $\Delta\rho = \rho_s - \rho$ ,  $\rho$  = sıvının özgül ağırlığı,  $\rho_s$  = malzemenin özgül ağırlığı,  $H_{dmax}$  =maksimum oyulma derinliğini (m),  $L_o$  oyulma uzunluğu(m),  $v_o$  = jet hızı (m/s),  $d_{50}$ =ortalama dane çapı,  $g$  ise yer çekim ivmesini ( $m/s^2$ ) göstermektedir.

Bu şekiller incelendiğinde dane boyutunun  $d_{50}=3,17$  mm olduğu deney gruplarında daha küçük  $L_o/H_{dmax}$  değerleri elde edilmiştir. Mansap su seviyesinin  $z=35$  cm olduğu deney dizilerinde  $L_o/H_{dmax}$  değerlerinin de maksimuma ulaşmasına karşın mansap su seviyesinin  $z=25$  cm olduğu durumlarda ise  $L_o/H_{dmax}$  değerlerinin minimum olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Şekil 5.27 (c) de  $L_o/H_{dmax}$  değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekillerden de anlaşıldığı üzere, kalın malzemede oyulma boyunun artma eğilimi, oyulma derinliğinin artma eğilimine nazaran daha azdır. Çünkü akımın sahip olduğu enerji kalın malzemeyi sürüklemekten daha fazla kazımaya çalışmaktadır. Buda kalın malzemede oyulma çukuru mansap şevlerinin daha dik olmasını sağlamaktadır. İnce malzemede ise hem oyulma derinliği hemde oyulma uzunluğu artma eğilimi taşımaktadır. Oyulma çukuru mansap şevleri oldukça yataydır.

Mansap su seviyesinin az olduğu deney gruplarında hızlar yüksek olduğundan özellikle ince malzeme için densimetrik Froude sayıları oldukça büyük çıkmıştır. Akım kabartıcıların 30 ve 35 cm olduğu durumlarda akım tamamen batık durumda olduğundan su jetinin hızı azalmış ve her iki malzemede de densimetrik Froude sayısı yakın değerler almıştır.





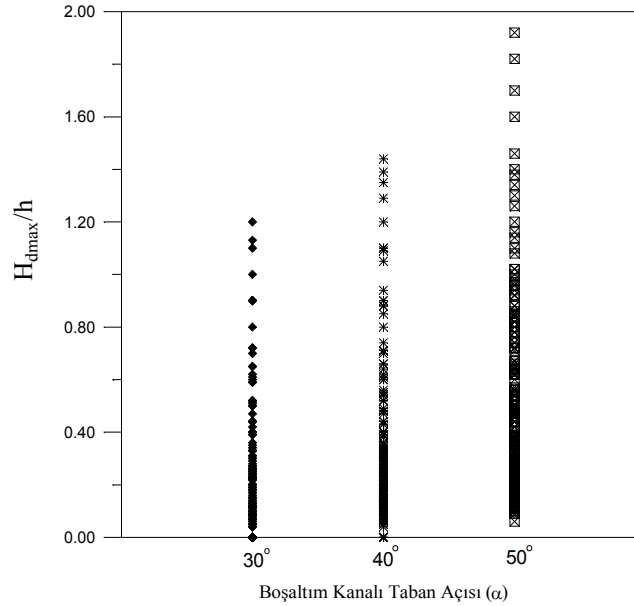
Şekil 5.27  $L_o/H_{dmax}$  değerlerinin Froude sayısı ile değişimi

## 5.8 Sınır Şartı Olmadan Boşaltım Kanalı Taban açısının Yerel Oyulmayla İlişkisi

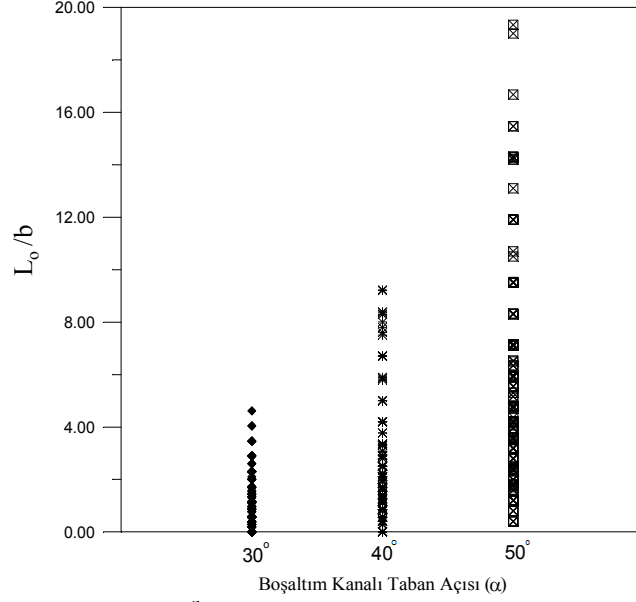
Bu çalışmada herhangi bir deney dizisi koşulu olmaksızın, sadece boşaltım kanalı taban açısı dikkate alınarak yapılan deney çalışmalarında elde edilen bütün veriler kullanılarak Şekil 5.28 ve Şekil 5.29 teki grafikler hazırlanmıştır.

Şekil 5.28'te  $H_{dmax}/h$  değerlerinin boşaltım kanalı taban açısı ile değişimi görülmektedir. Her açıda aynı birim debi vb. koşullarda yapılmıştır.  $\alpha = 30^\circ$   $H_{dmax}/h$  değerleri 0-1.22 arasında  $\alpha = 40^\circ$  de 0-1,47 arasında ve  $\alpha = 50^\circ$   $H_{dmax}/h$  değerleri 0.10-1.92 arasında olmuştur. Buradan da anlaşılacağı gibi  $\alpha = 50^\circ$  nin değerleri daha yüksektir. Basamaklı boşaltım kanalı taban açısının artmasıyla,  $H_{dmax}/h$  değerlerinin artış eğilimi hemen hemen lineer bir değişim göstermekle beraber doğrunun eğimi yaklaşık 1/3 şeklinde olmuştur.

Şekil 5.28'te  $L_o / b$  değerlerinin boşaltım kanalı taban açısı ile değişimi görülmektedir. Taban açısının artmasıyla  $L_o / b$  değerlerinde de artış gözlenmiştir.  $\alpha = 30^\circ$   $L_o / b$  değerleri 0-4.4 arasında  $\alpha = 40^\circ$  de 0-9,50 arasında ve  $\alpha = 50^\circ$   $L_o / b$  değerleri 0.10-19.10 arasında olmuştur.  $\alpha = 30^\circ$  ile  $\alpha = 40^\circ$  arasındaki artış eğiliminin,  $\alpha = 40^\circ$  ve  $\alpha = 50^\circ$  arasındaki artış eğilimine oranla daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca hem Şekil 5.28 hem de Şekil 5.29 dede görüldüğü üzere açının  $\alpha = 30^\circ$  ve  $\alpha = 40^\circ$  bazı deney dizilerinde yerel oyulmanın gerçekleşmemesine rağmen açının  $\alpha = 50^\circ$  tüm deney dizilerinde yerel oyulma olmaktadır.



Şekil 5.28  $H_{dmax}/h$  değerlerinin boşaltım kanalı taban açısı ile ilişkisi



Şekil 5.29 L<sub>o</sub> /b değerlerinin boşaltım kanalı taban açısı ile ilişkisi

Basamaklı düşülerde yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, eşiksiz ve eşikli düşüm yatağı tipleri için maksimum oyulma derinliğini veren bir eşitlik geliştirilmiştir. Bu eşitlikler bir istatistik yazılım programı kullanılarak non-lineer bir analiz yapılarak elde edilmiştir. Geliştirilen eşitlikler;

a) Eşiksiz düşüm yatağı için;

$$\frac{H_{d \max}}{h} = 0.11 \exp \left[ 1.05 \frac{b}{h} + F_d^{0.48} \left( \frac{z}{h} \right)^{0.03} \cos(\alpha)^{h/z} \right] - 0.30 \quad (5.1)$$

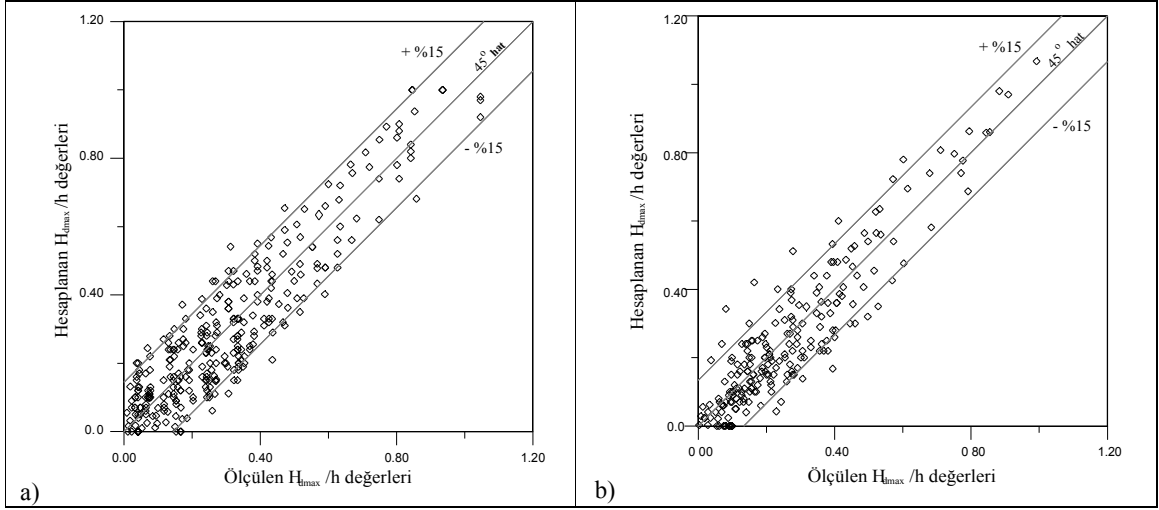
b) Eşikli düşüm yatağı için;

$$\frac{H_{d \max}}{h} = 0.32 \exp \left[ 0.24 \left( \frac{b}{h} \right) \left( \frac{z}{t} \right)^{0.10} + F_d^{0.17} \cos(\alpha - 0.75) \right] - 0.99 \left( \frac{t}{z} \right)^{0.97} \quad (5.2)$$

şeklindedir. Burada;  $F_d = v_o / \sqrt{g \cdot d_{50} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}}$  olmak üzere densimetrik Froude sayısını (-),

$\Delta \rho = \rho_s - \rho$  yatak malzemesi ile suyun özgül ağırlık farkı,  $\rho$  = suyun özgül ağırlığı,  $\rho_s$  = malzemenin özgül ağırlığı,  $H_{d \max}$  = maksimum oyulma derinliğini (m),  $q$  = birim debiyi ( $m^3/m \cdot s$ ),  $v_o$  = jet hızı (m/s),  $d_{50}$  = ortalama dane çapı,  $h$  = basamak yüksekliğini (m),  $b$  = basamak genişliğini (m),  $\alpha$  = boşaltım kanalı taban açısını (derece)  $z$  = mansap su yüksekliğini (m),  $t$  = düşüm yatağı eşik yüksekliğini (m) ve  $g$  ise yerçekim ivmesini ( $m/s^2$ ) göstermektedir.

Eşitlik (5.1) ve Eşitlik (5.2)'nin korelasyon katsayısı 0.85 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca deneyler yapılarak elde edilen değerler ile Eşitlik (5.1 ve 5.2) kullanılarak hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Şekil 5.26 elde edilen eşitliğin güvenilirliğini göstermektedir. Her iki eşitlik için de bant genişliği %15 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.30'dan da görüldüğü gibi Eşitlik (5.1-5.2), kaskatlar ve basamaklı şütlerin mansabında oluşacak maksimum oyulma derinliğinin belirlenmesi için kullanılabilir düzeyde oldukları söylenebilir.



Şekil 5.30 (a) Eşiksiz ve (b) Eşikli düşüm yataklarında hesaplanan ve ölçülen değerlerin kıyaslanması

## 5.9 Oyulma Çukuru Geometrisi

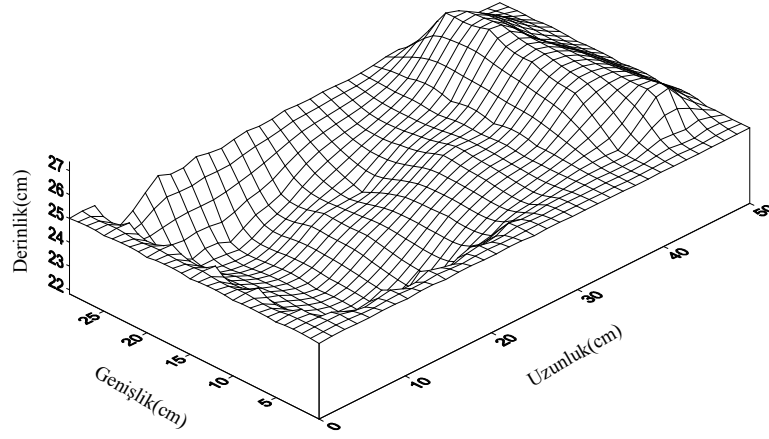
Oyulma çukurunun geometrisini belirlemek amacıyla x, y ve z yönlerinde limnometre ile okumalar yapılarak, maksimum oyulma derinliklerinde oyulma profilinin en ve boy kesitleri grafik ile, oyulma çukurunun perspektifi ve taban topografyasının kontur haritaları ile Surfer yazılım programı'nda yapılan üç boyutlu çizimler ile gösterilmiştir.

Yapılan deneylerde debi, mansap su seviyesi, boşaltım kanalı taban açısı, eşik tipi, malzeme geometrisi ve basamak geometrisi değiştikçe oyulma çukurunda meydana gelen değişiklikler, Şekil 5.31 (a) ile 5.57 (c) arasında üç boyutlu ve plandan görüntülerinin üzerinde izlenebilmektedir. Şekillerde eksenleri gösteren derinlik, genişlik ve uzunluk boyutları santimetre birimi ile ifade edilmektedir. görülmektedir. Deney dizilerinden elde edilen yaklaşık bin deney verisinin bu kısımda verilmesi maalesef mümkün olmadığından sadece dikkati çeken bazı deney sonuçları verilebilmiştir.

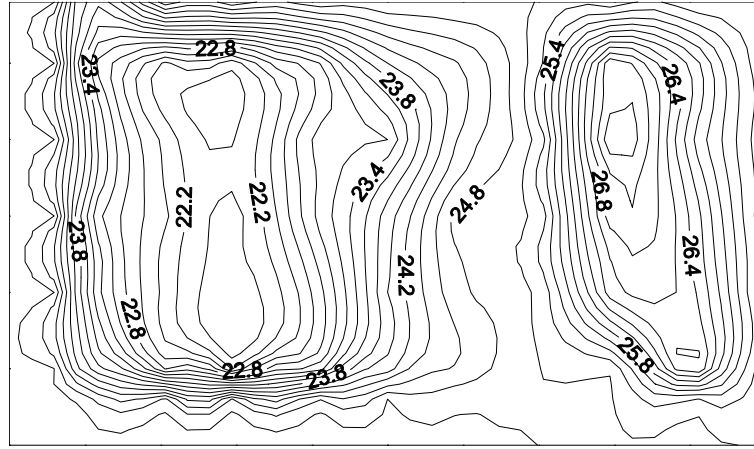
Kalın malzemede meydana gelen oyulma çukuru boyutları, ince malzeme kullanılarak yapılan deneylere göre küçülmüştür. Oyulma çukurunun boyutlarındaki küçülmeye paralel olarak özellikle küçük debilerde maksimum oyulma derinliğinin değeri de ince malzeme

kullanılan deneylerde elde edilen sonuçlara nazaran daha düşük olmuştur. Ancak akım debisindeki artışla birlikte kalın malzeme kullanıldığında oluşan maksimum oyulma derinlikleri ince malzemede meydana gelen değerlere yaklaşmıştır. Maksimum debilerde bu fark % 5-10 düzeyinde olmuştur. Oyulma çukuru genişliği, malzeme çapı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Diğer bir deyişle kalın malzemede, ince malzemeye nazaran oyulma çukuru daralmıştır. Kalın malzemede yerel oyulmanın düşey yöndeki artma eğilimi, yatay yöndeki genişlemeye oranla daha fazladır. Böylece oyulma çukurunun en kesitteki şev açısı da oldukça dik olmaktadır. Kalın malzemede, maksimum oyulma derinliğinin debi ile değişimi incelendiği takdirde en az oyulma derinliğinin bu malzemede elde edildiği görülmektedir. İnce ve kalın malzeme kullanılan deneylerde meydana gelen maksimum oyulma derinliklerinin debi ile değişimi birbirine benzer davranış sergilemelerine karşın küçük debilerde kalın malzemede farklı sonuçlar elde edilmiştir. Maksimum oyulma derinliği değerleri arasındaki fark debi arttıkça azalmıştır. Malzeme özelliğinin oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi büyük debilerde daha az hissedilmektedir. Oyulma çukuru uzunluğu ise debi büyüdükçe artmaktadır.

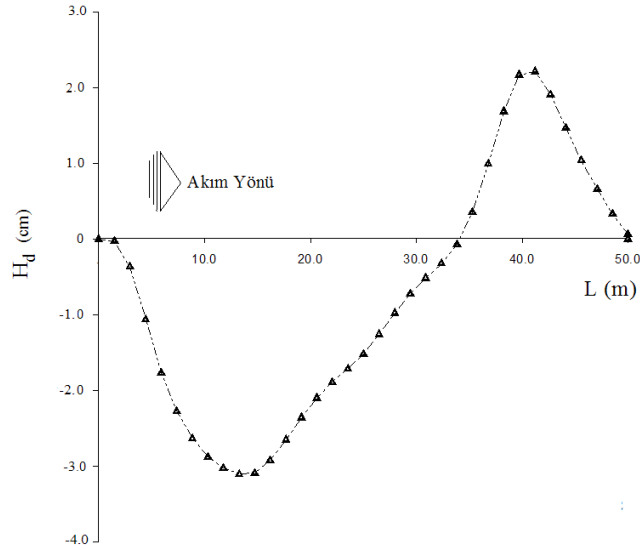
Özellikle mansap su seviyesinde ve boşaltım kanalı taban açısındaki değişimler oyulma çukurunun geometrisini belirgin bir şekilde etkilemektedir. Mansap su seviyesindeki artış mansap kanalında bir su yastığı meydana getirerek, akımın oluşturduğu su jetinin bu yastığa çarpması sonucunda oyulmaları ciddi şekilde azaltmış buna karşın boşaltım kanalı taban açısının artması da oyulma miktarlarını aynı oranda artırmıştır. Aynı şekilde düşü havuzu eşik tipi özellikle düşük mansap su seviyeleri ve orta büyüklüklerdeki debilerde oyulma geometrisi üzerinde oldukça etkili olmuştur. Küçük ve büyük debilerde ise düşü havuzu eşik tipinin etkisi daha azalmıştır.



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

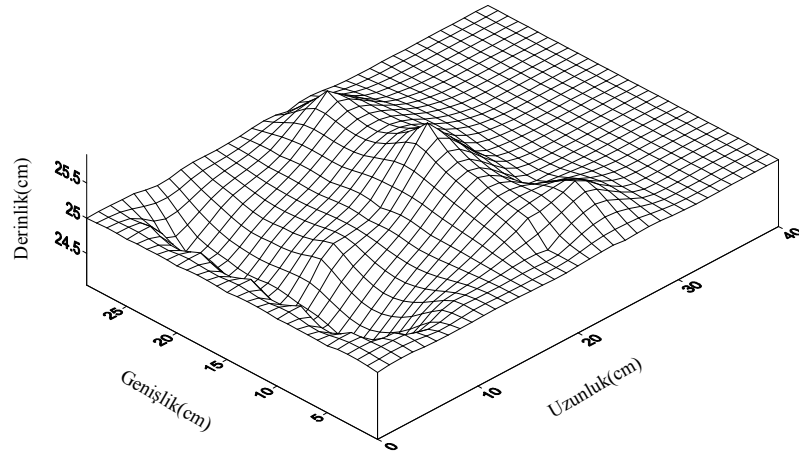


b) Taban topografyası kontür haritası

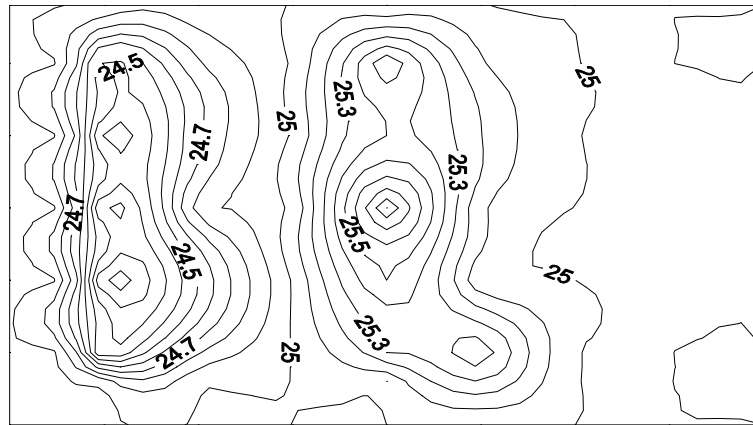


c) Taban topografyasının boykesiti

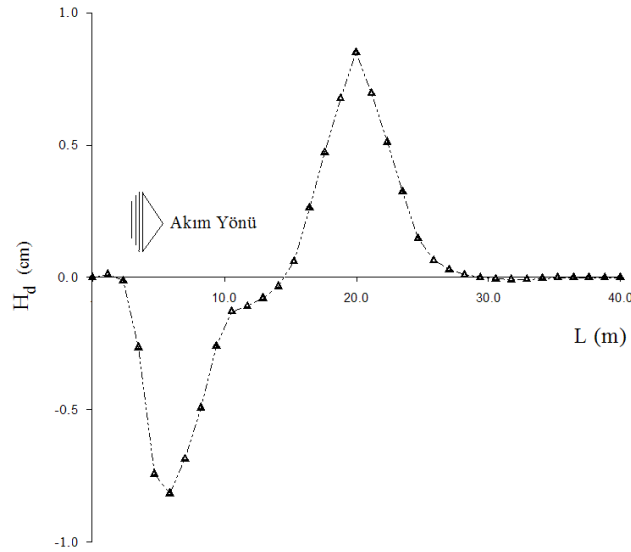
Şekil 5.31  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

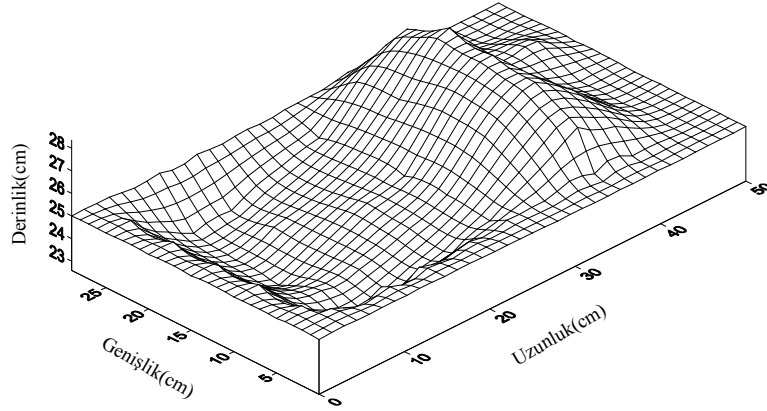


b) Taban topografyası kontür haritası

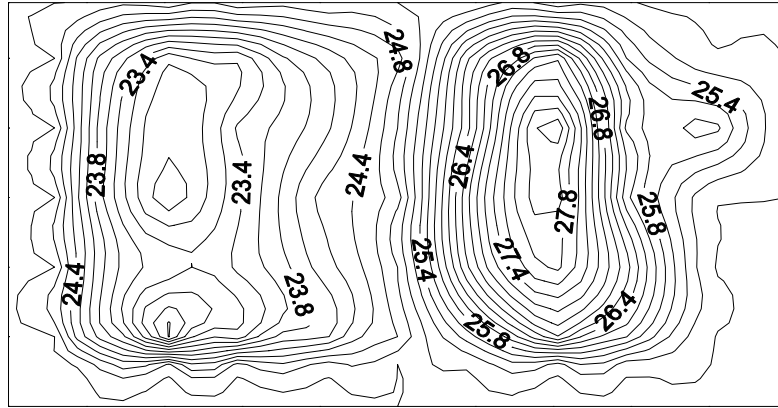


c) Taban topografyasının boykesiti

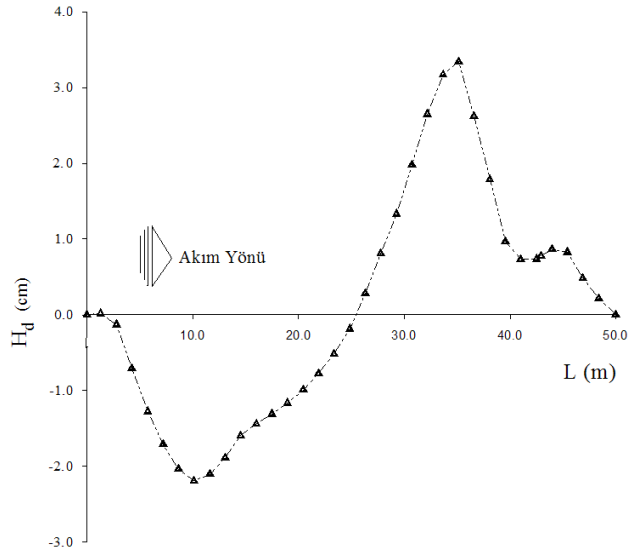
Şekil 5.32  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü



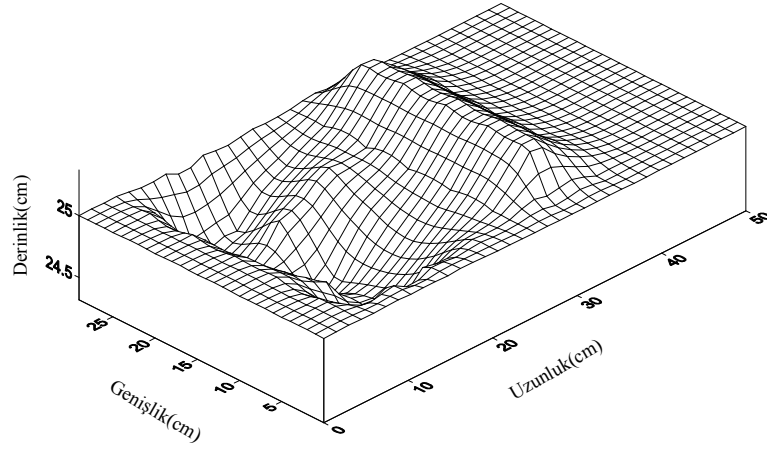
b) Taban topografyası kontür haritası



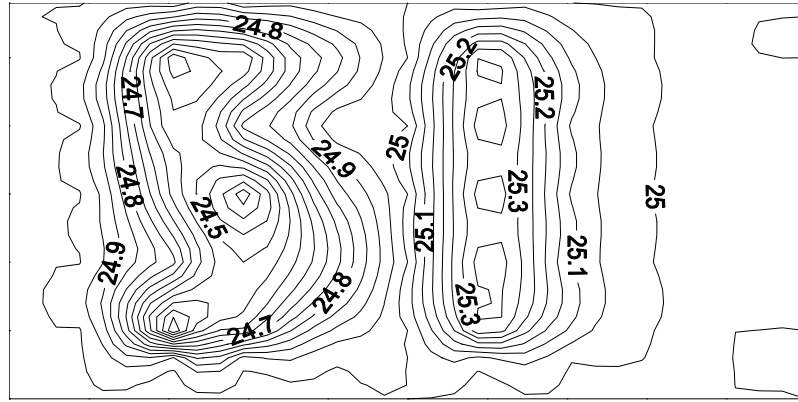
c) Taban topografyasının boykesiti

Şekil 5.33  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 1 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu

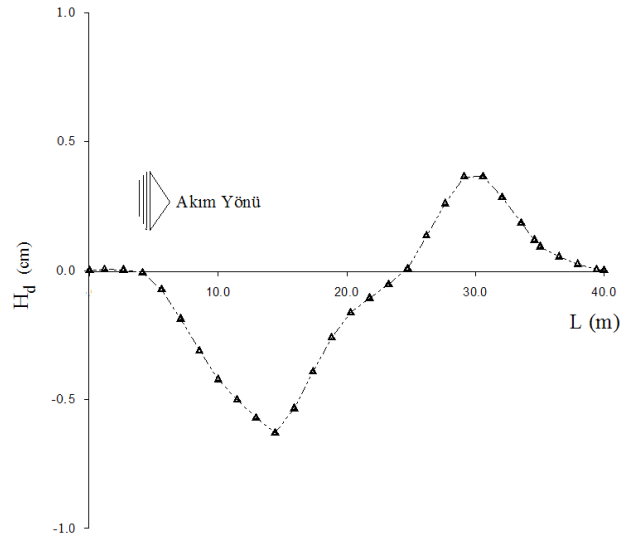




a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

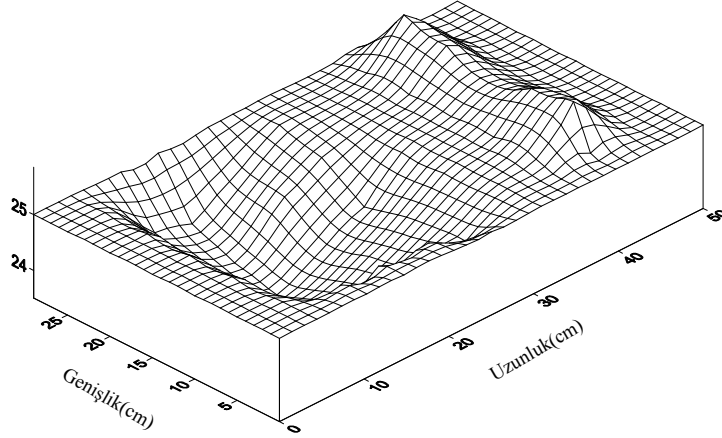


b) Taban topografyası kontür haritası

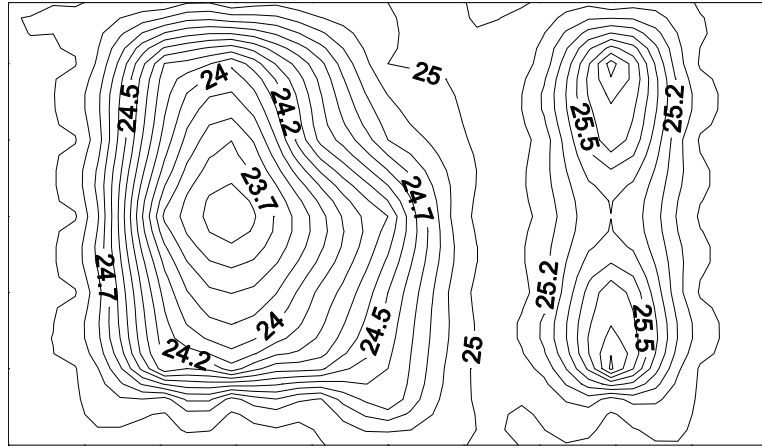


c) Taban topografyasının boykesiti

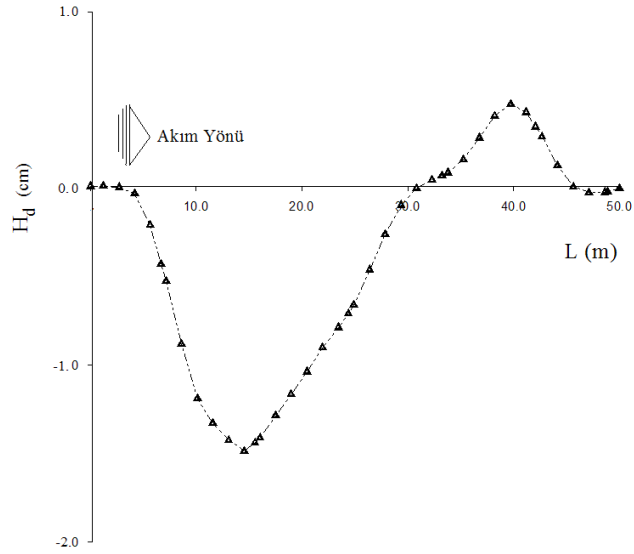
Şekil 5.34  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 2 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

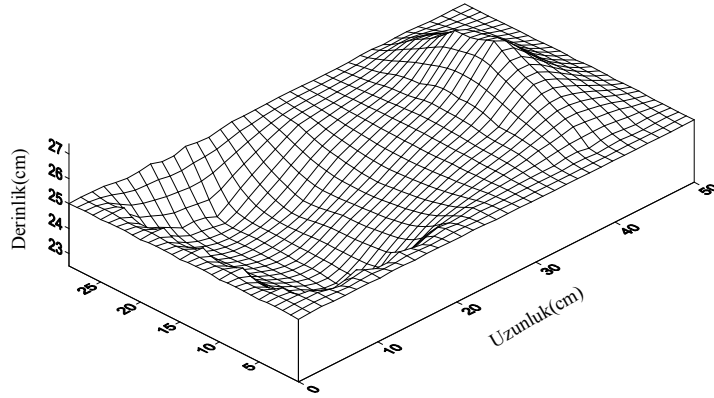


b) Taban topografyası kontür haritası

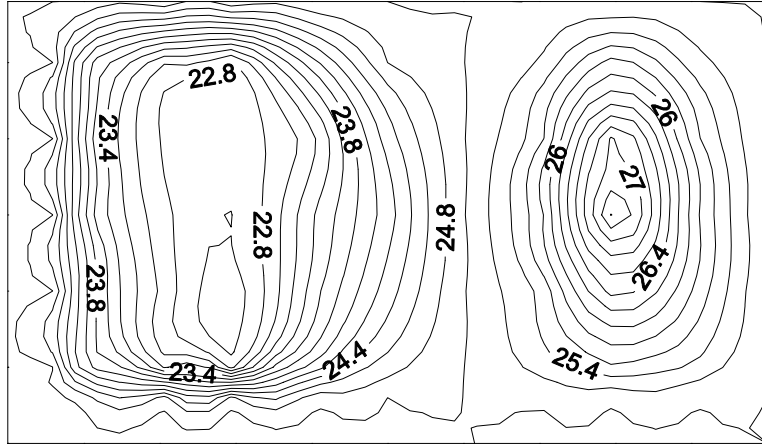


c) Taban topografyasının boykesiti

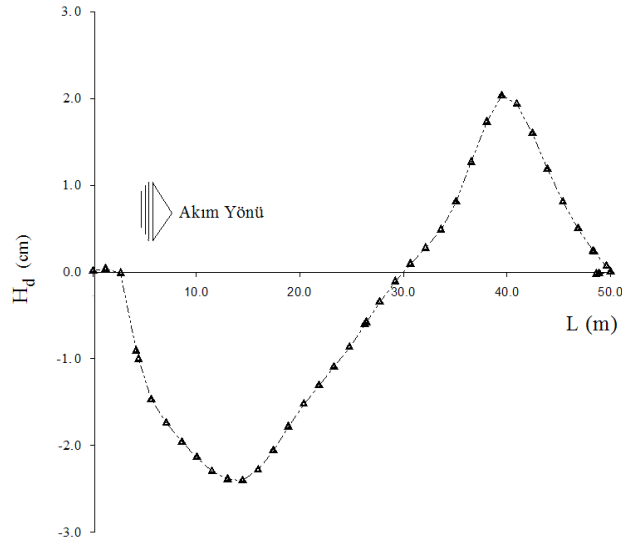
Şekil 5.35  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 2 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

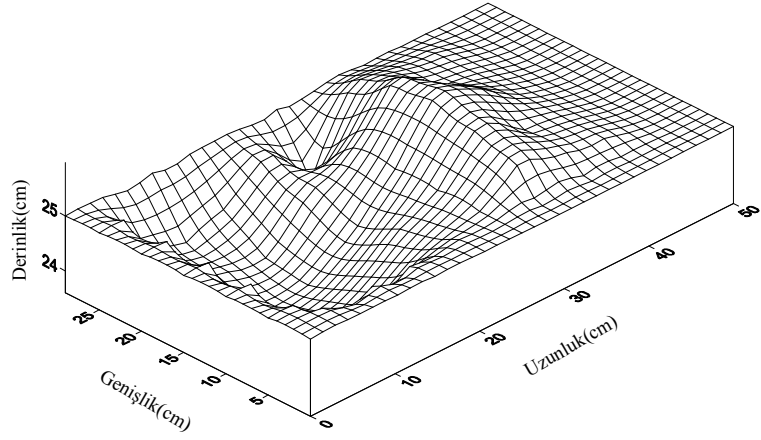


b) Taban topografyası kontür haritası

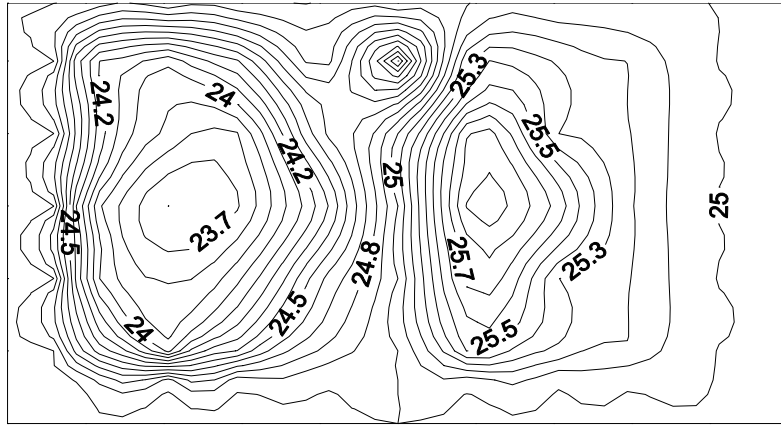


c) Taban topografyasının boykesiti

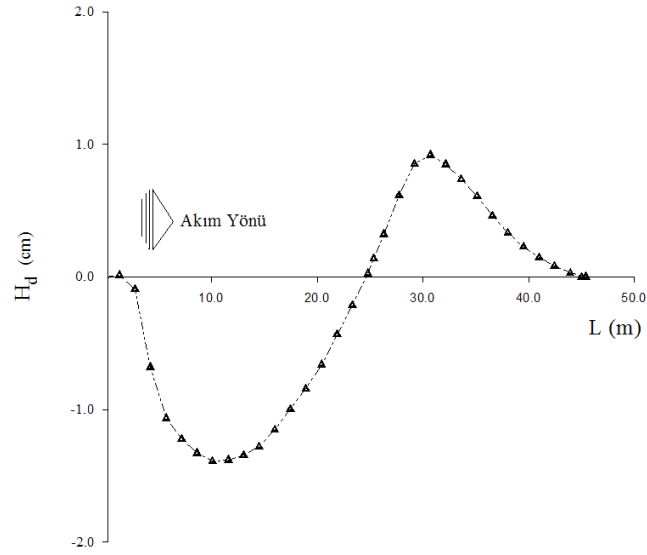
Şekil 5.36  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 2 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH3, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

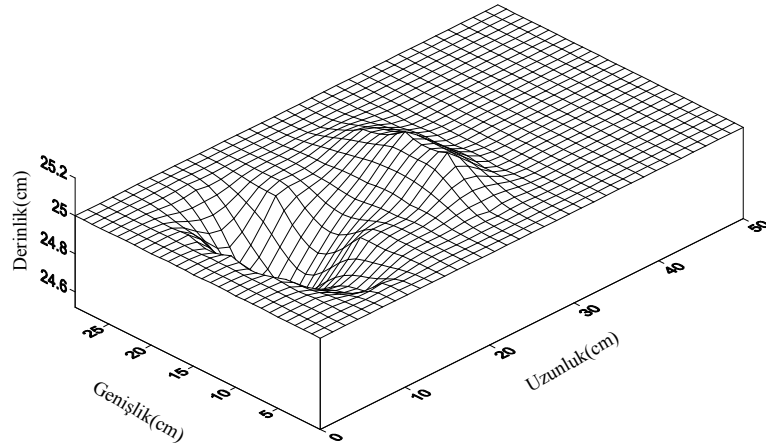


b) Taban topografyası kontür haritası

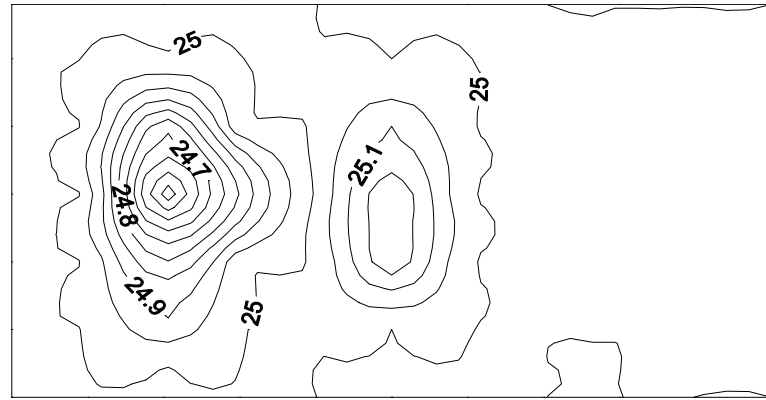


c) Taban topografyasının boykesiti

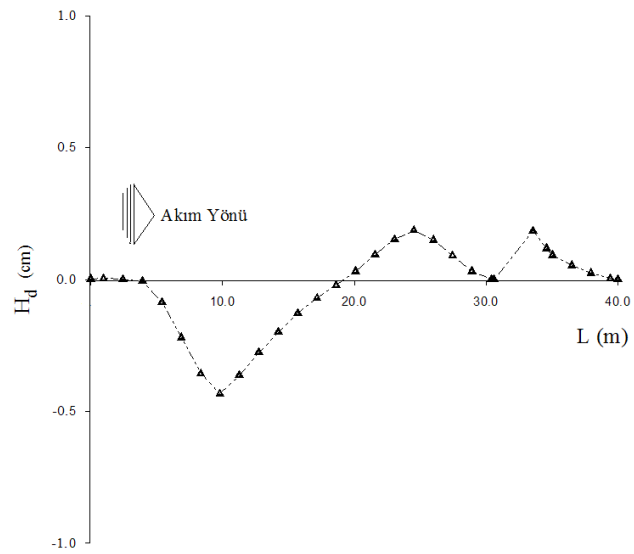
Şekil 5.37  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 3 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

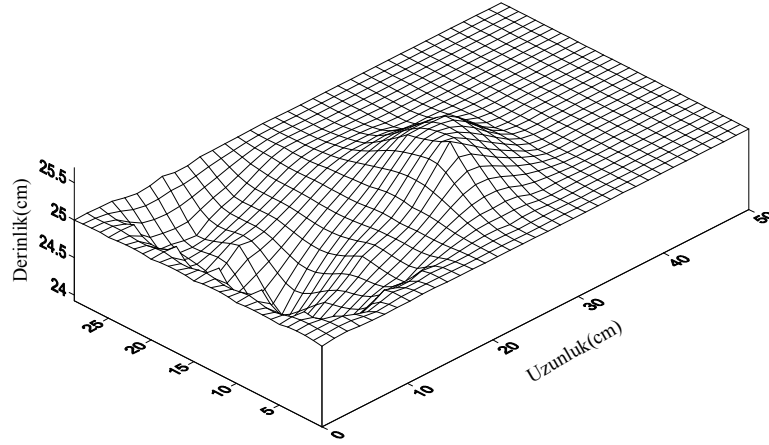


b) Taban topografyası kontür haritası

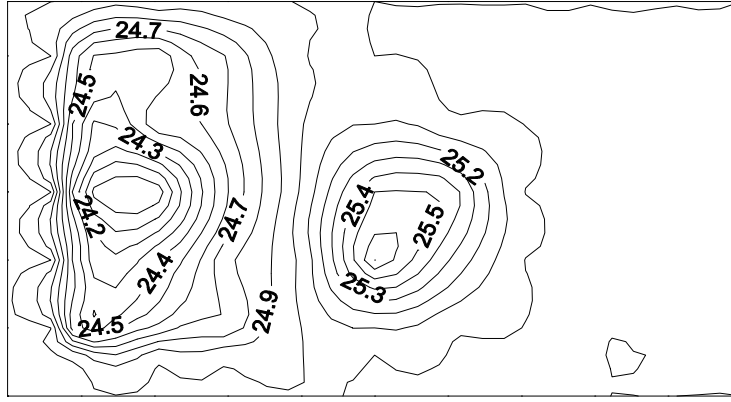


c) Taban topografyasının boykesiti

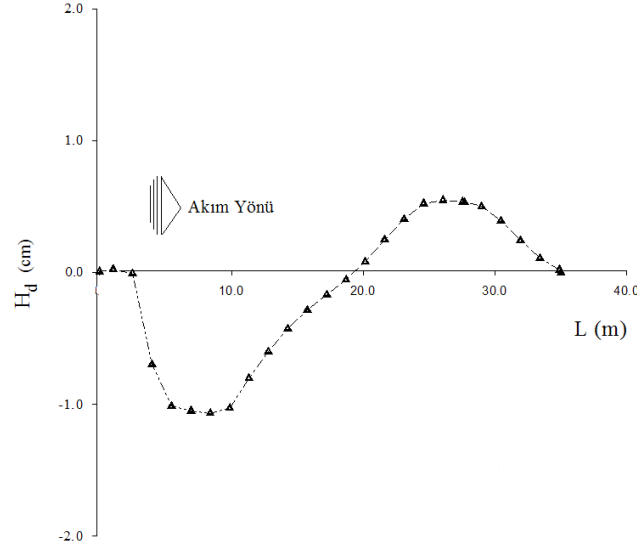
Şekil 5.38  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 3 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH3, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

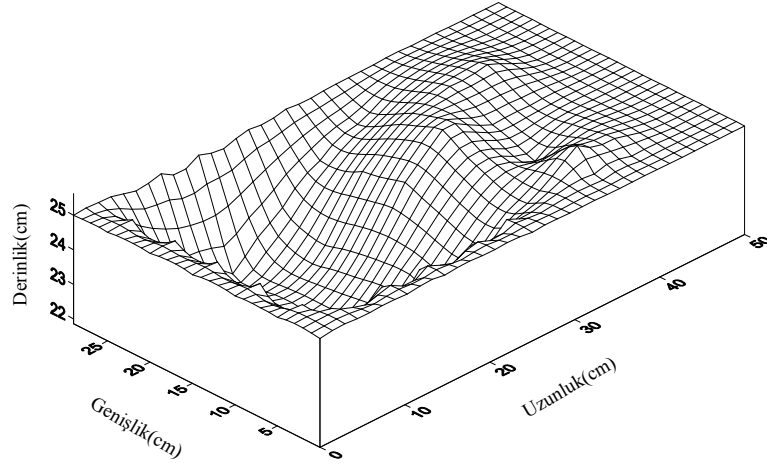


b) Taban topografyası kontür haritası

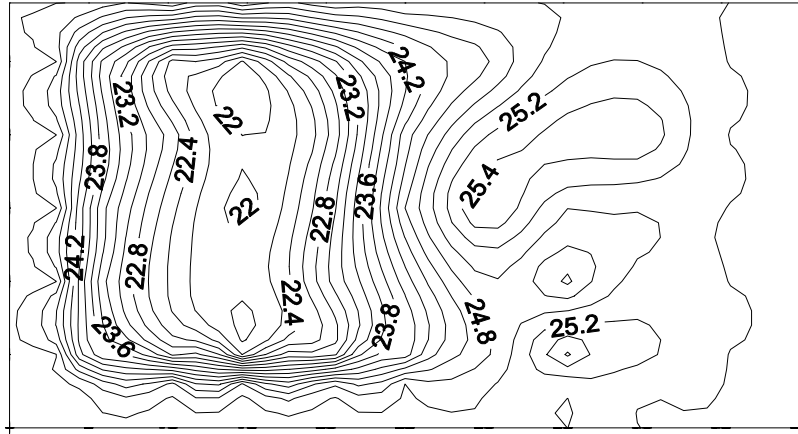


c) Taban topografyasının boykesiti

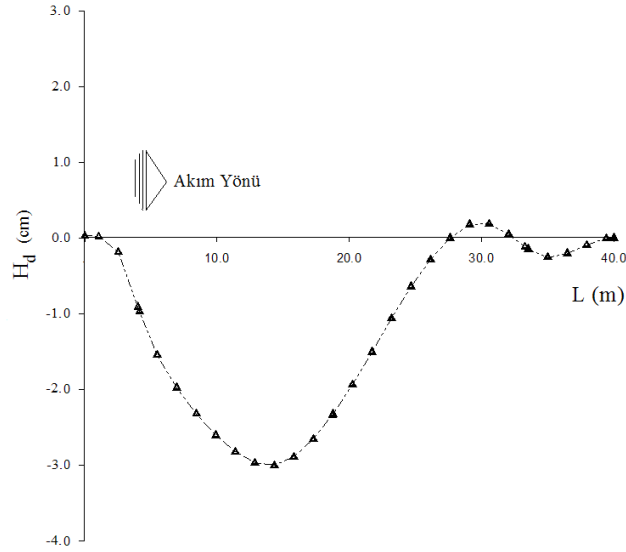
Şekil 5.39  $\alpha=30^\circ$ ,  $q=5,872 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 3 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

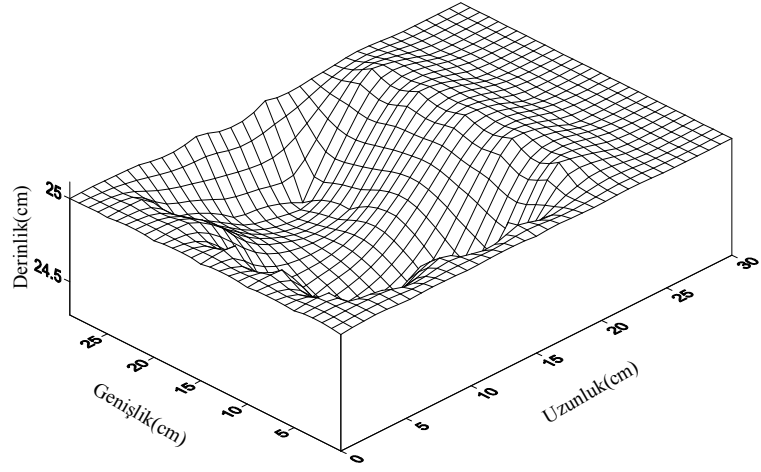


b) Taban topografyası kontür haritası

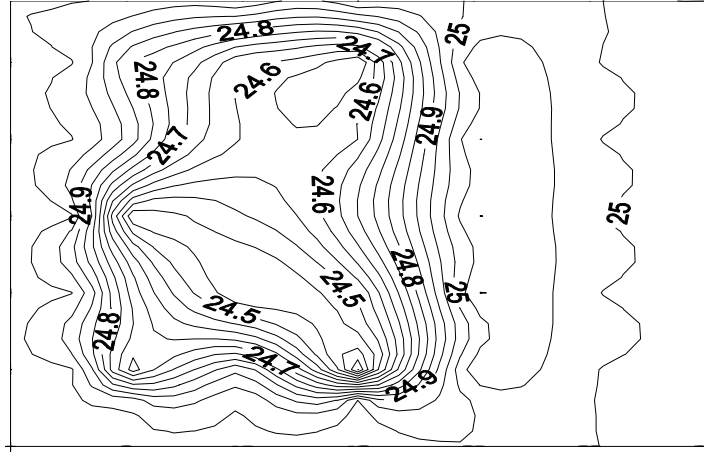


c) Taban topografyasının boykesiti

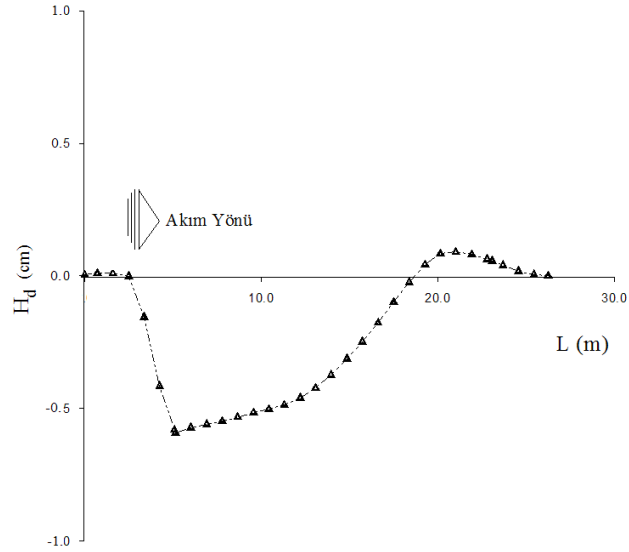
Şekil 5.40  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 4 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü



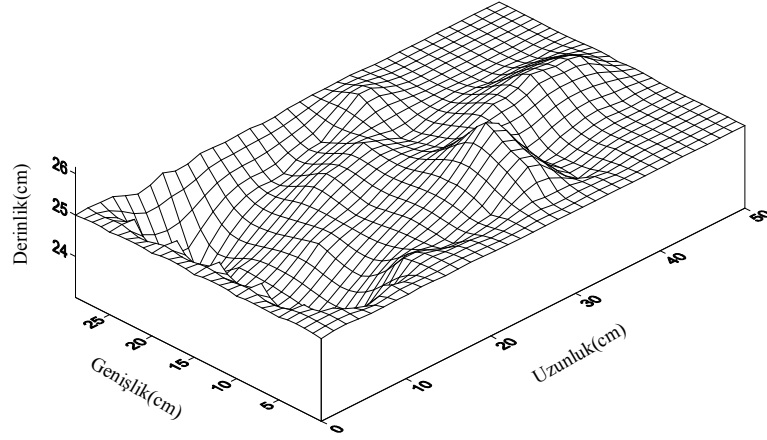
b) Taban topografyası kontür haritası



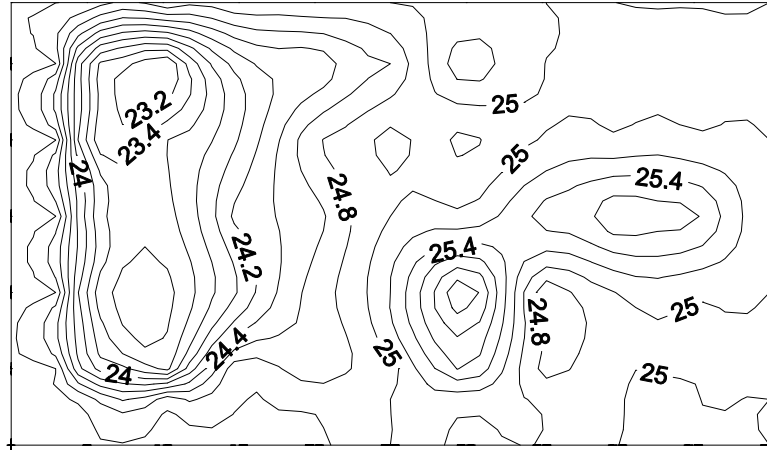
c) Taban topografyasının boykesiti

Şekil 5.41  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 4 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu

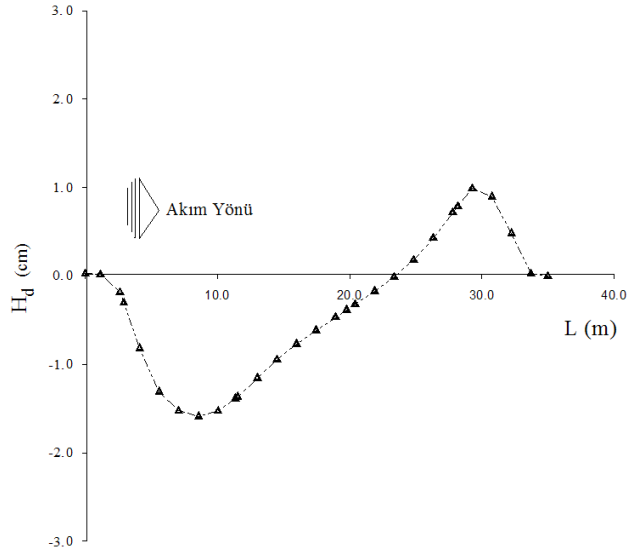




a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

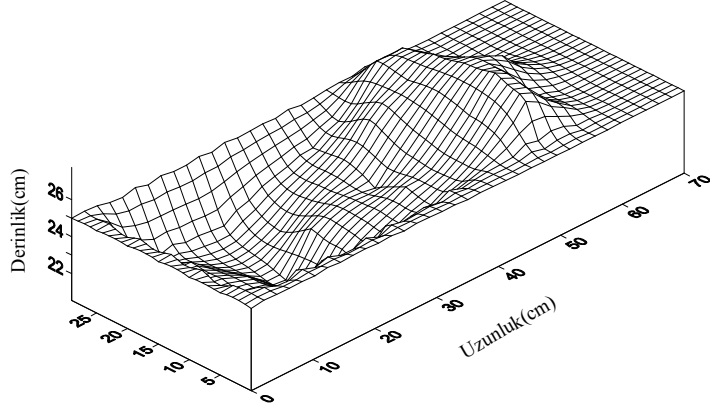


b) Taban topografyası kontür haritası

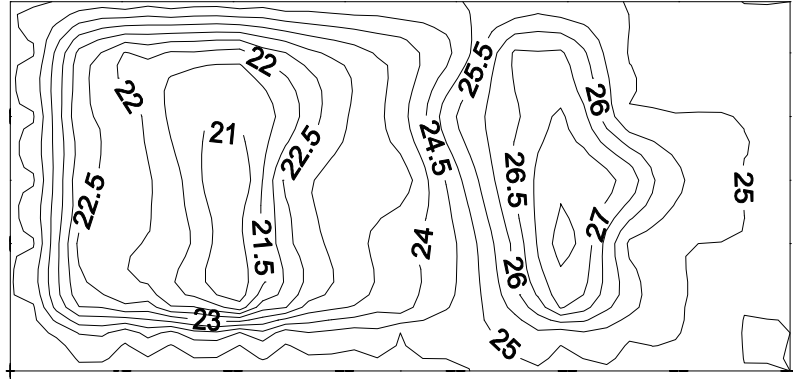


c) Taban topografyasının boykesiti

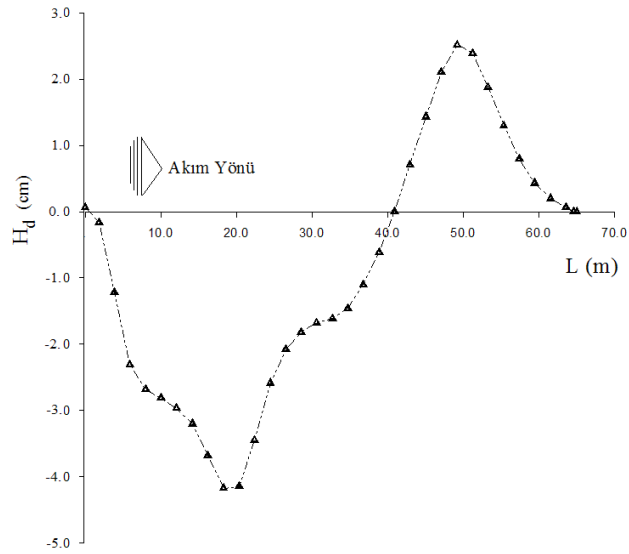
Şekil 5.42  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 4 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

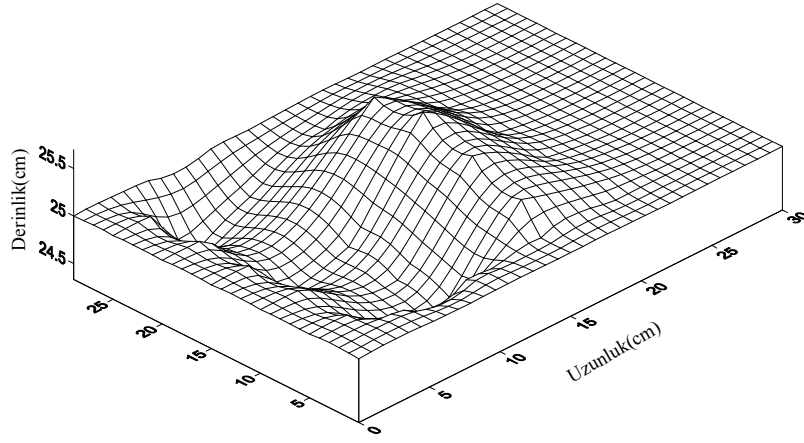


b) Taban topografyası kontür haritası

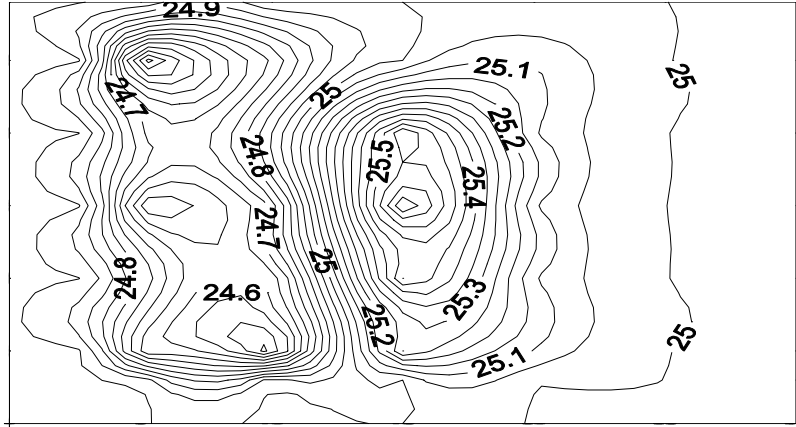


c) Taban topografyasının boykesiti

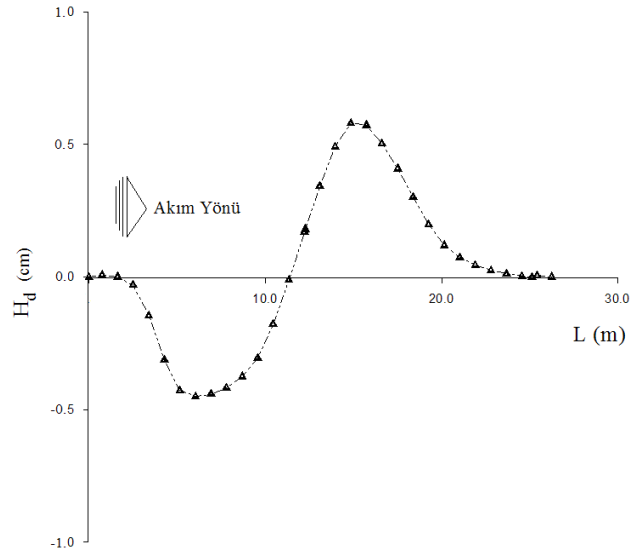
Şekil 5.43  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 5 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

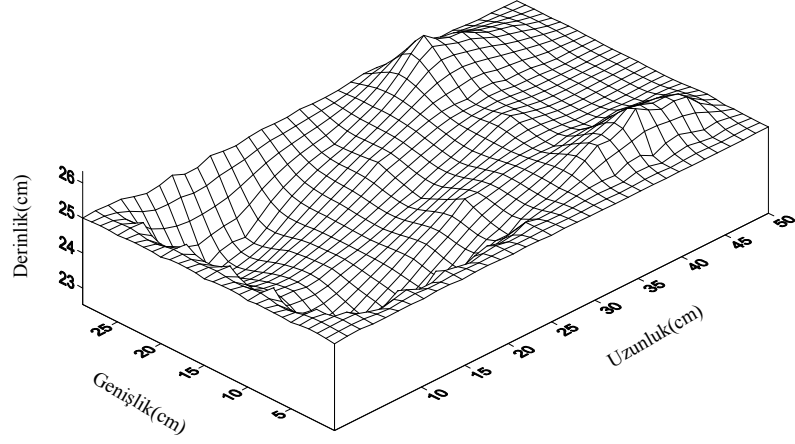


b) Taban topografyası kontür haritası

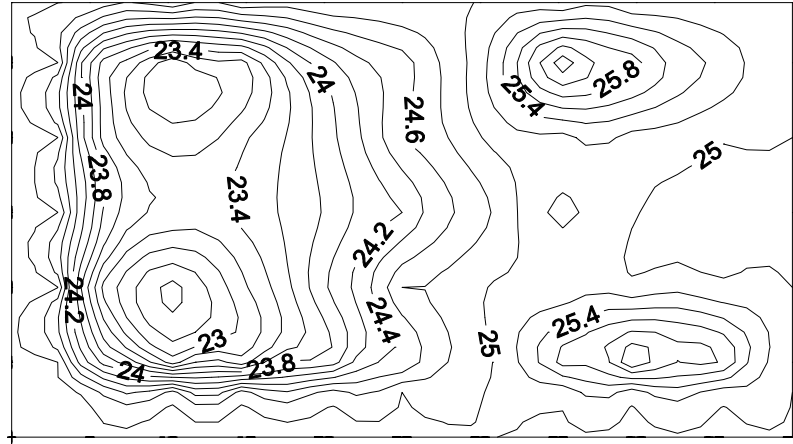


c) Taban topografyasının boykesiti

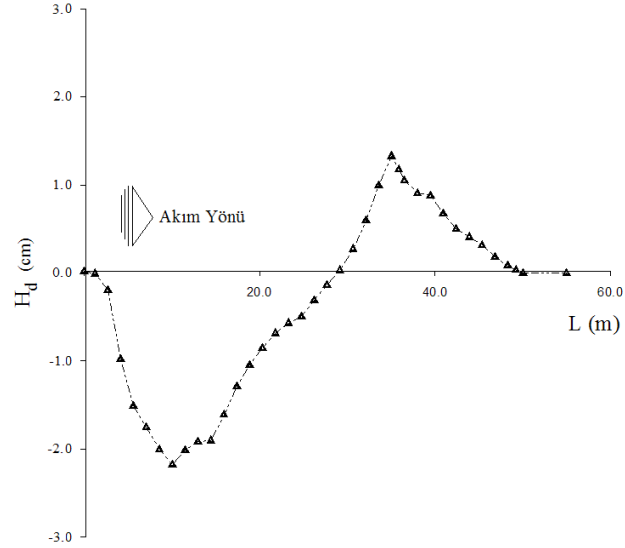
Şekil 5.44  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 5 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

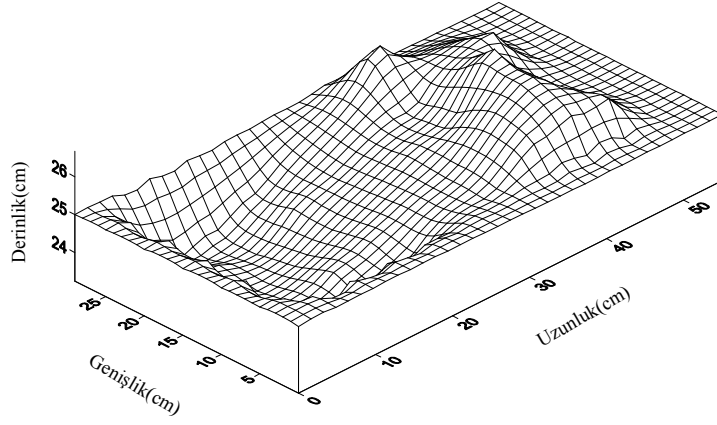


b) Taban topografyası kontür haritası

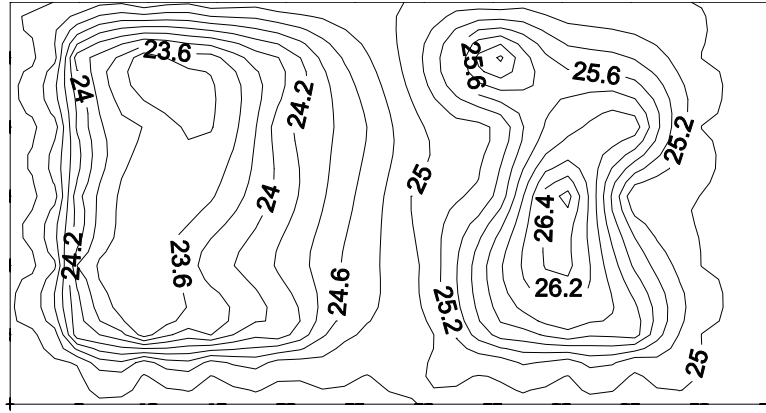


c) Taban topografyasının boykesiti

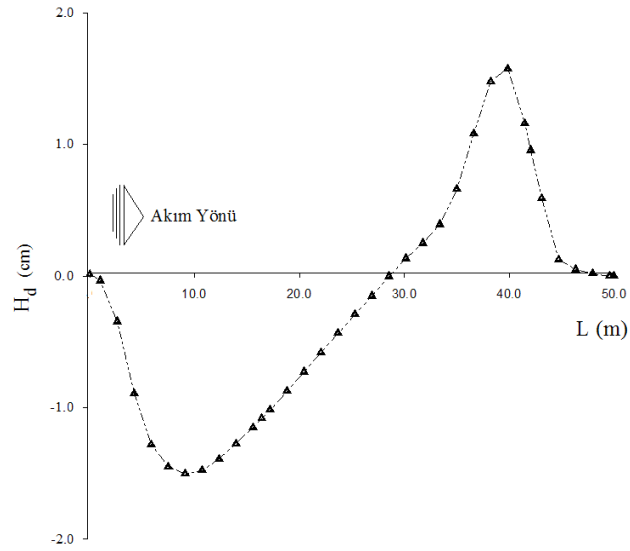
Şekil 5.45  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 5 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

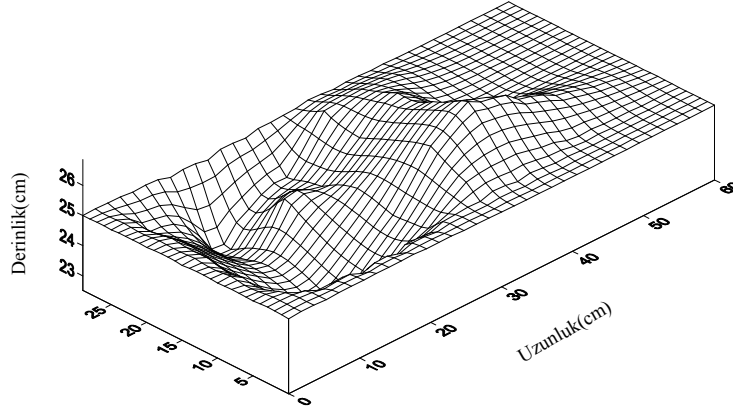


b) Taban topografyası kontür haritası

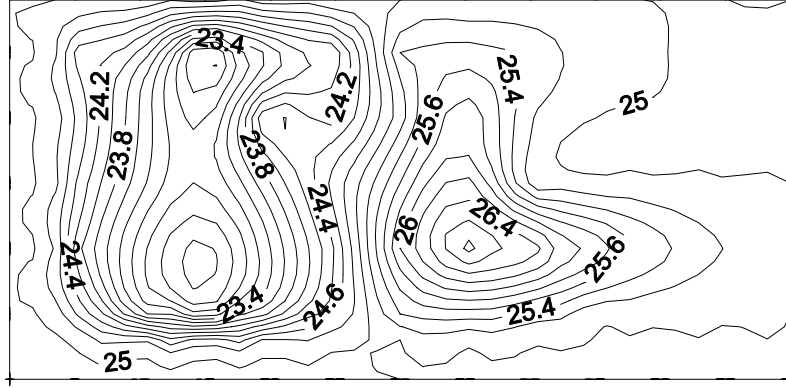


c) Taban topografyasının boykesiti

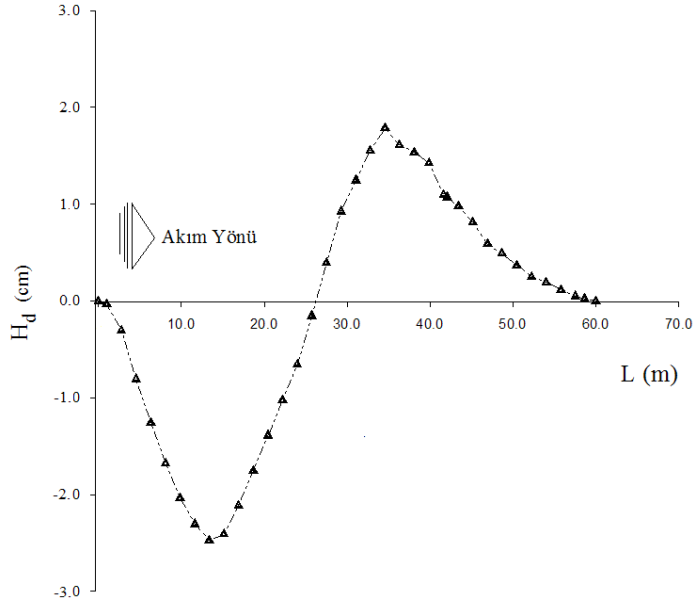
Şekil 5.46  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 6 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH2, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

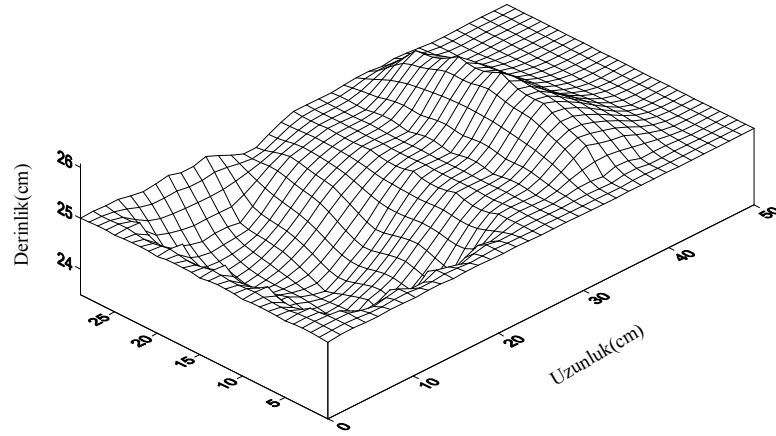


b) Taban topografyası kontür haritası

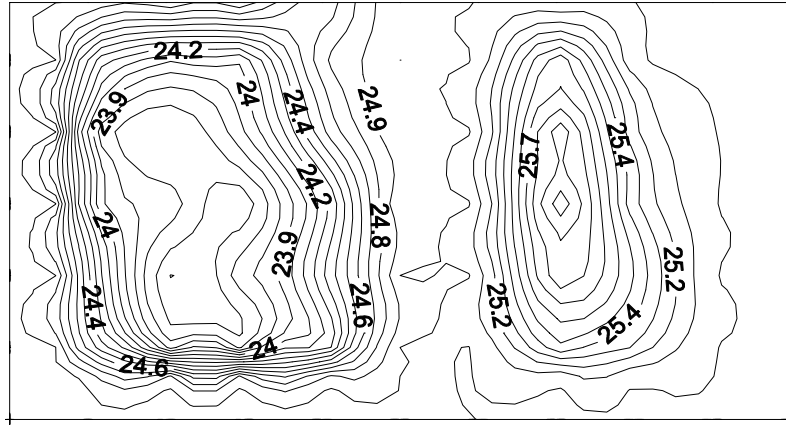


c) Taban topografyasının boykesiti

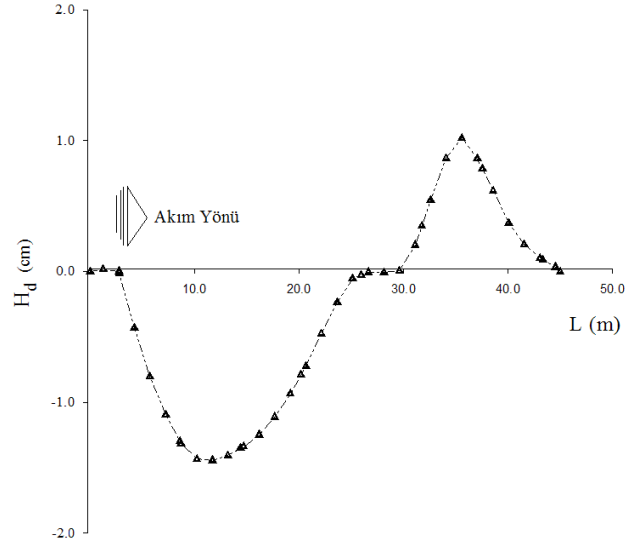
Şekil 5.47  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 6 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

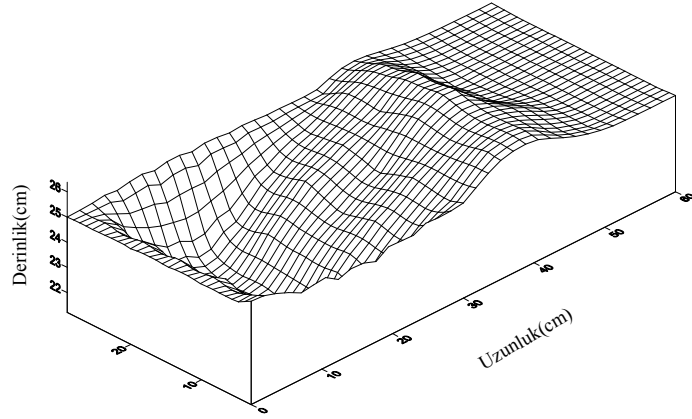


b) Taban topografyası kontür haritası

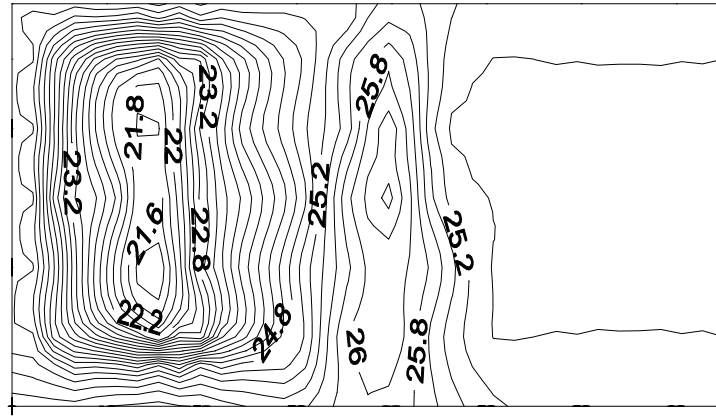


c) Taban topografyasının boykesiti

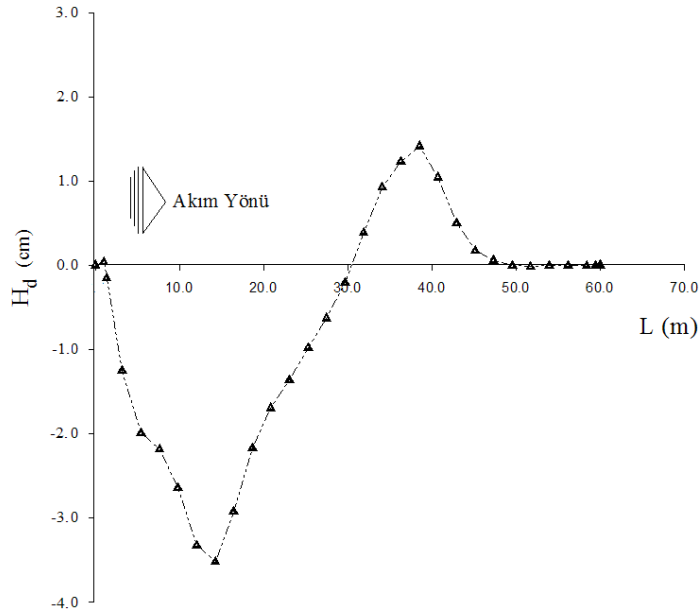
Şekil 5.48  $\alpha=40^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 6 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü



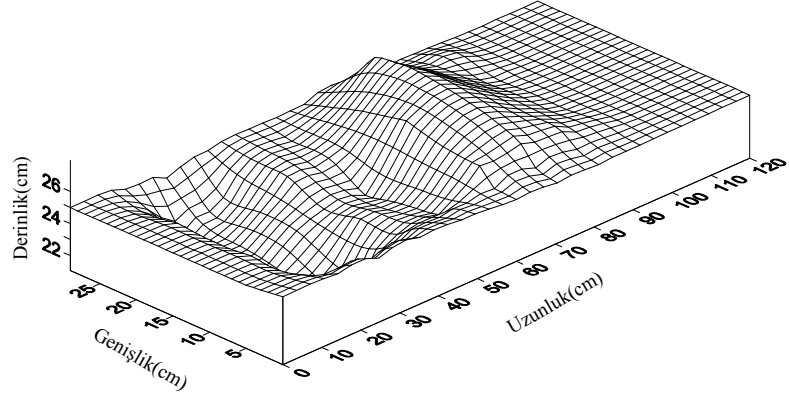
b) Taban topografyası kontür haritası



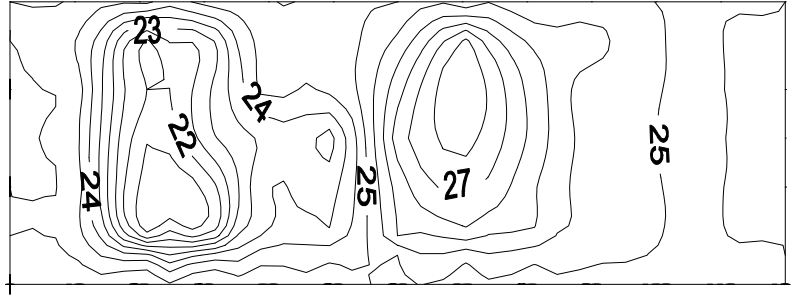
c) Taban topografyasının boykesiti

Şekil 5.49  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=1,724 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 7 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu

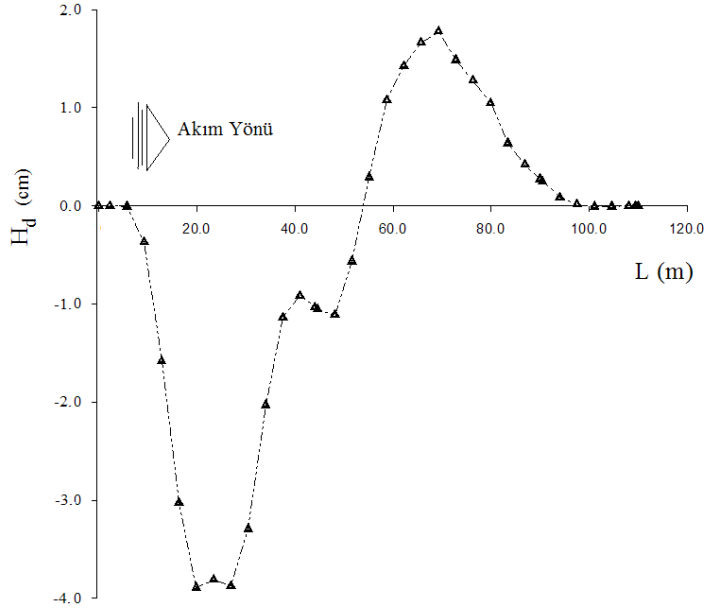




a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

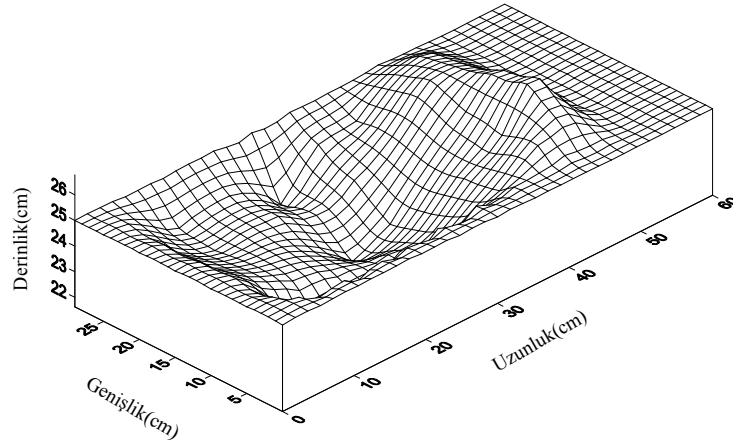


b) Taban topografyası kontür haritası

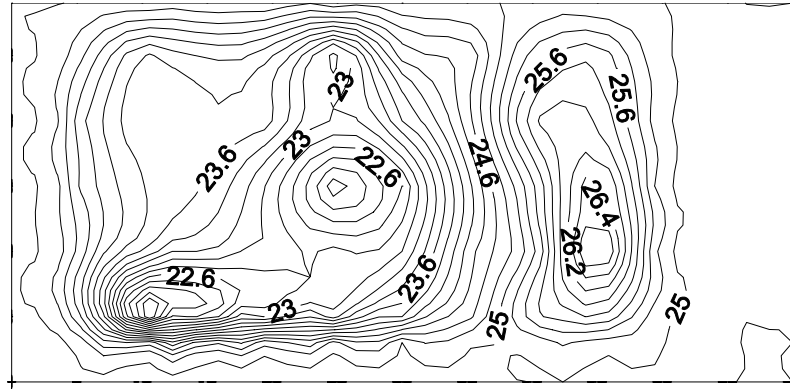


c) Taban topografyasının boykesiti

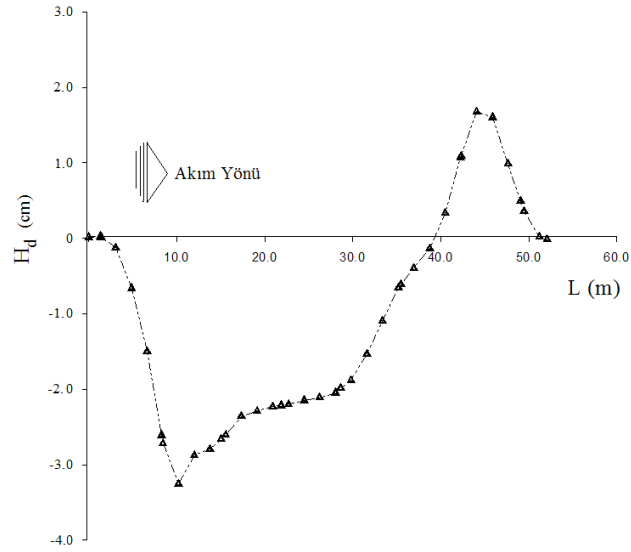
Şekil 5.50  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 7 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

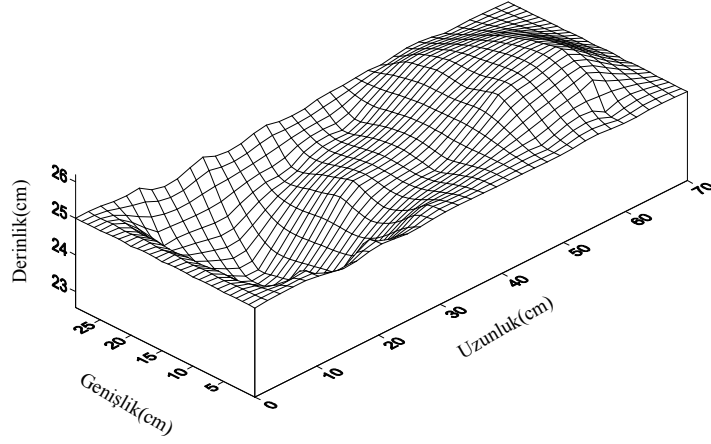


b) Taban topografyası kontür haritası

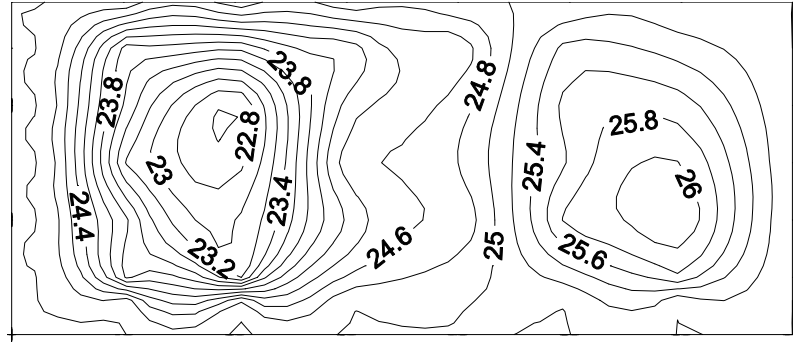


c) Taban topografyasının boykesiti

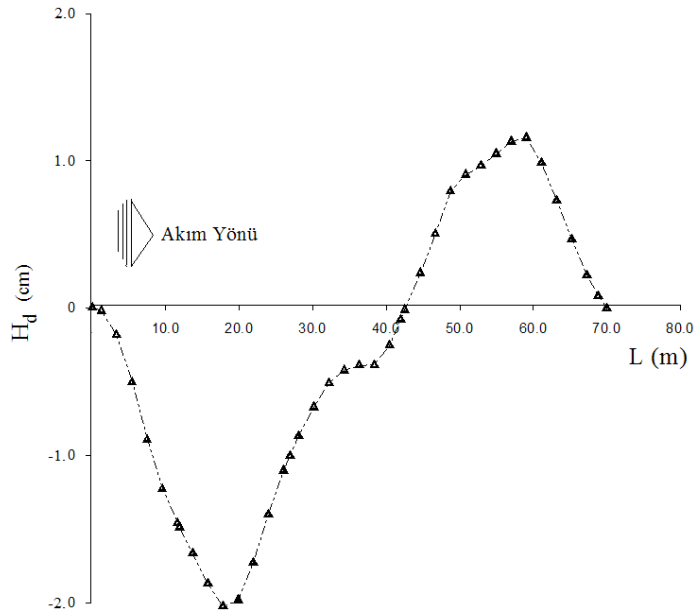
Şekil 5.51  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 7 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

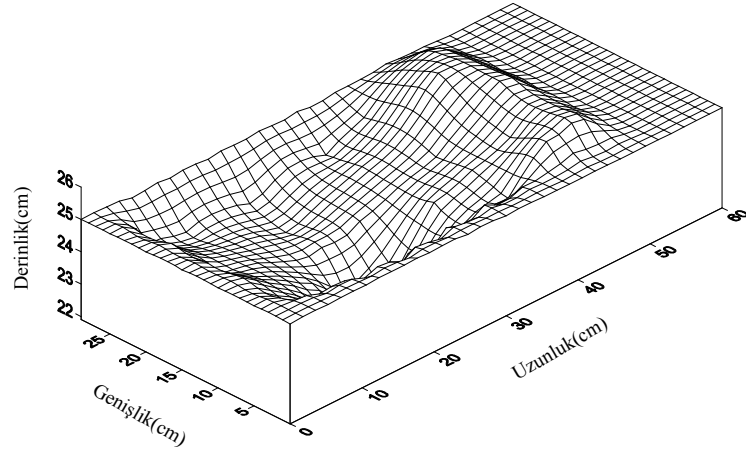


b) Taban topografyası kontür haritası

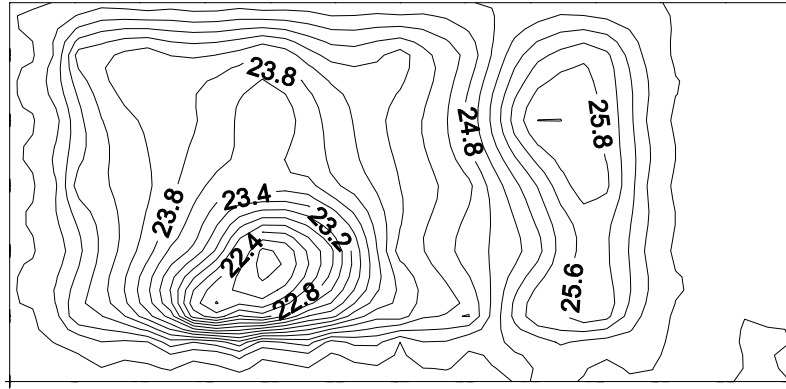


c) Taban topografyasının boykesiti

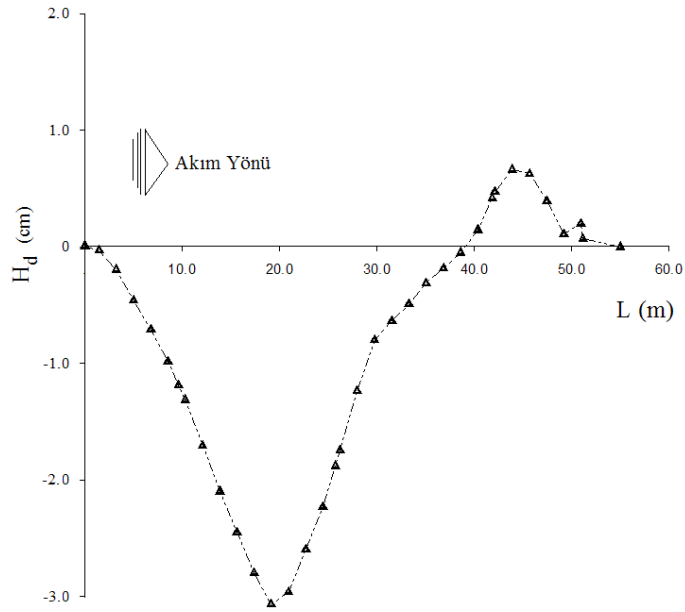
Şekil 5.52  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 8 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

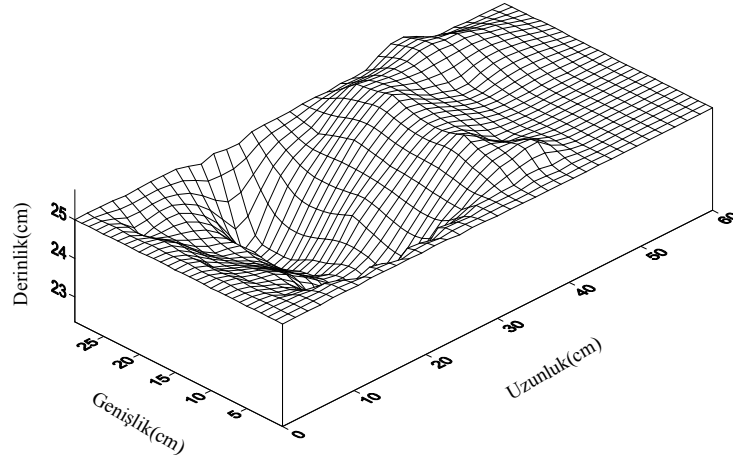


b) Taban topografyası kontür haritası

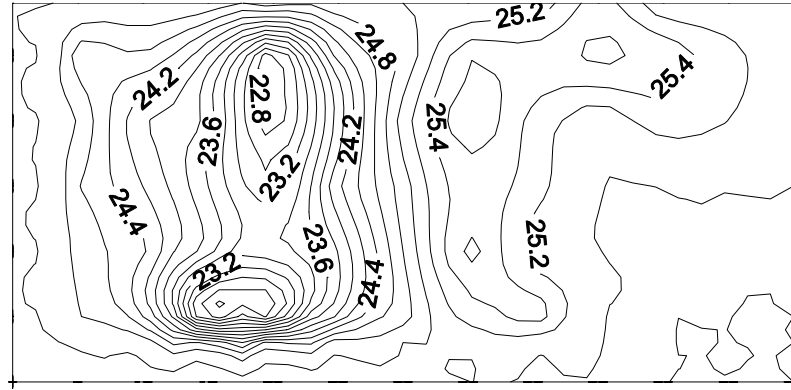


c) Taban topografyasının boykesiti

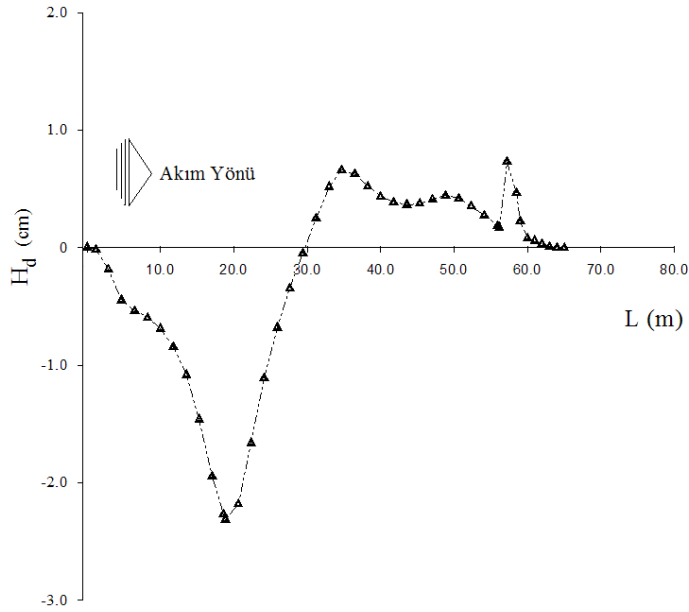
Şekil 5.53  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=6,896 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 8 nolu Basamak,  $z=35 \text{ cm}$ , DH1, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

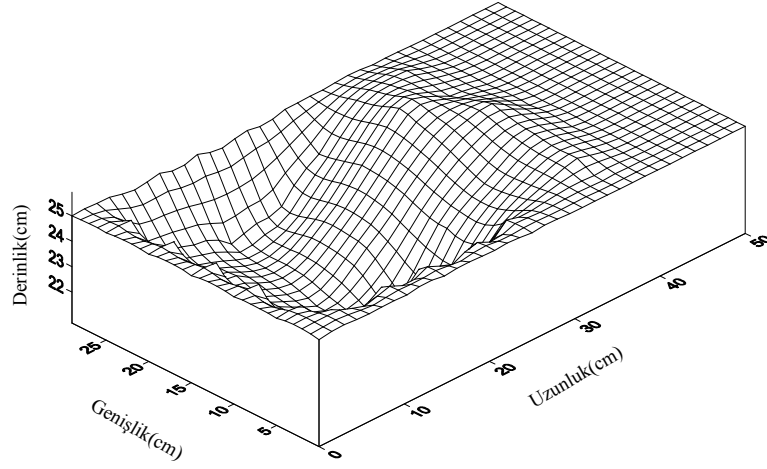


b) Taban topografyası kontür haritası

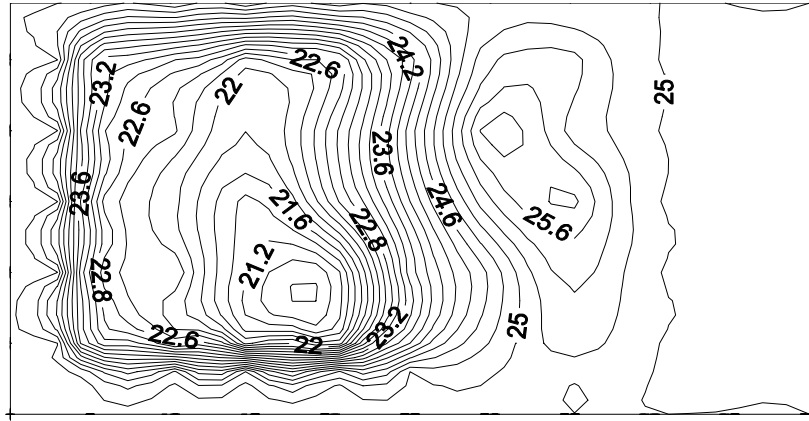


c) Taban topografyasının boykesiti

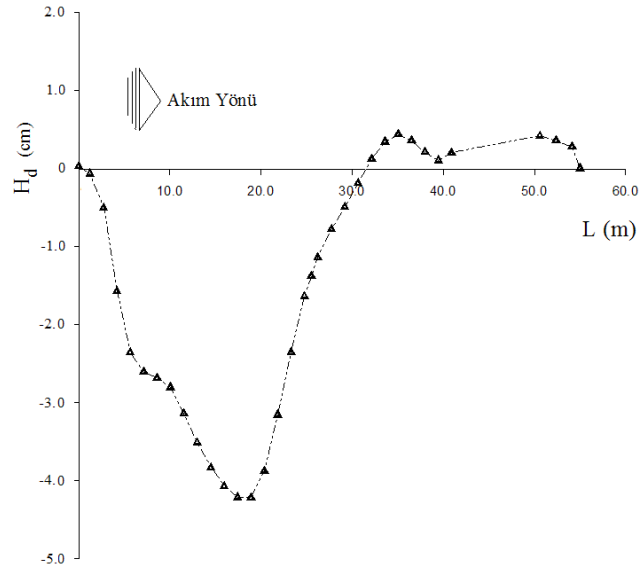
Şekil 5.54  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 8 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M2 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü

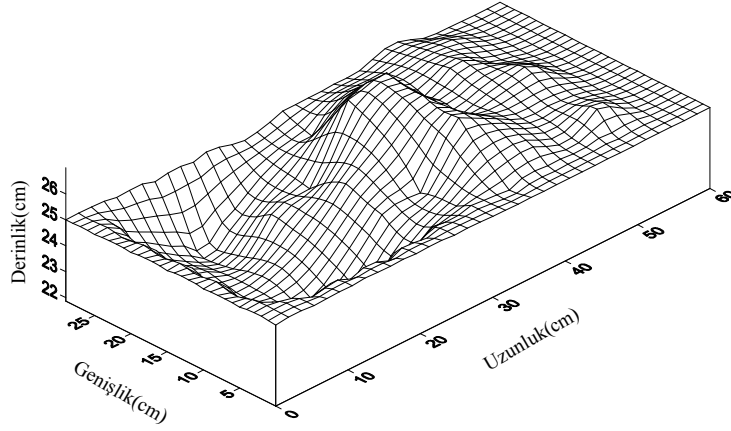


b) Taban topografyası kontür haritası

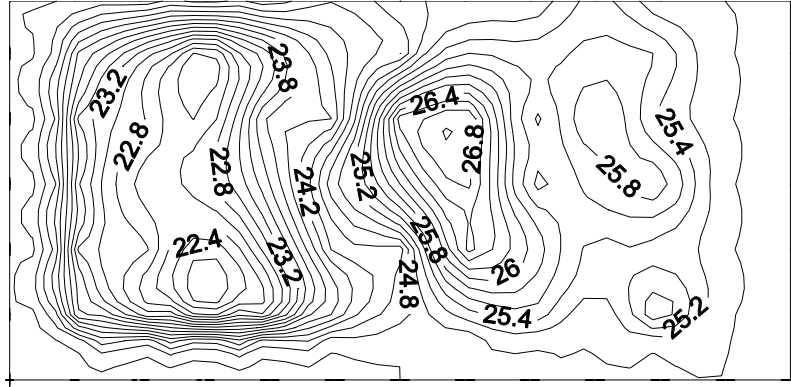


c) Taban topografyasının boykesiti

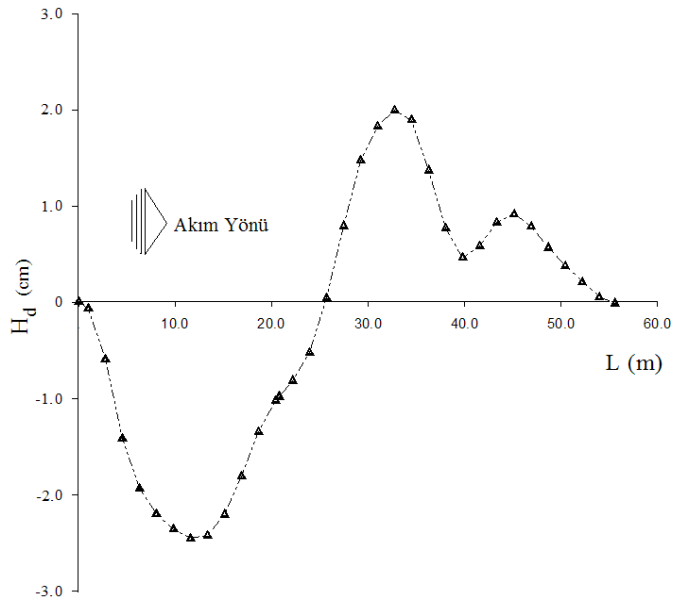
Şekil 5.55  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=3,448 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 9 nolu Basamak,  $z=25 \text{ cm}$ , DH3, M1 deney grubu



a) Taban topografyasının üç boyutlu görünümü



b) Taban topografyası kontür haritası



c) Taban topografyasının boykesiti

Şekil 5.56  $\alpha=50^\circ$ ,  $q=5,172 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 9 nolu Basamak,  $z=30 \text{ cm}$ , DH2, M2 deney grubu





## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yürütülen bu çalışmada kullanılan üç farklı boşaltım kanalı açısı, dokuz farklı basamak geometrisi, iki farklı çapta yatak malzemesi, üç farklı düşü havuzu eşik tipi ve üç farklı mansap su derinliği ile 5 ayrı debide meydana gelen yersel oyulmaların geometrisi ve basamaklar boyunca oluşan akım hidroliği incelenmiştir. Bölüm 4'te deneylerin yapıldığı deney düzeneği şematize edilmiş ve ölçüm yöntemleri anlatılmıştır. Bölüm 2 ve 3'te literatür çalışması verilmiş ve deney sonuçları ile yapılan değerlendirme Bölüm 5 içinde aktarılmıştır. Bölüm 5'te, analiz edilen deney serilerinin ilgili çizimler, grafikler ve yorumlar verilmiştir.

Bu çalışmada kaskatların mansabında meydana gelen yersel oyulmaları tespit etmek için bir dizi deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kaskatlar üzerinde nap, geçiş ve sıçramalı akım tipleri gözlenmiştir. Özellikle küçük debilerde nap akımı, büyük debilerde ise sıçramalı akım gözlenmiştir. Nap akım rejiminde, geçiş ve sıçramalı akım rejimine oranla daha az oyulmanın olduğu görülmüştür. Bunun nedeni düşük debilerde nap akımında  $\Delta H/H_{\max}$  enerji sönümleme oranının daha fazla olmasıdır.
- $H_{\text{dmax}}/h$  değerleri test edilen tüm deney dizilerinde birim debi ile doğru orantılı bir değişim göstermiştir. Özellikle DH1'in artış eğiliminin DH2 ve DH3'den daha fazla olduğu görülmektedir. Genellikle  $H_{\text{dmax}}/h$ 'ın değerleri DH1'de en büyük DH3'de ise daha küçük olmuştur.
- Boşaltım kanalı taban açısının artmasıyla birlikte oyulma miktarlarının arttığı gözlenmiştir.  $\alpha = 30^\circ$ ,  $H_{\text{dmax}}/h$  değerleri 0-1.22 arasında  $\alpha = 40^\circ$ 'de 0-1,47 arasında ve  $\alpha = 50^\circ$   $H_{\text{dmax}}/h$  değerleri 0.10-1.92 arasında olmuştur. Taban açısının artmasıyla  $L_o/b$  değerlerinde de artış gözlenmiştir.  $\alpha = 30^\circ$ ,  $L_o /b$  değerleri 0-4.4 arasında  $\alpha = 40^\circ$ 'de 0-9,50 arasında ve  $\alpha = 50^\circ$ ,  $L_o /b$  değerleri 0.10-19.10 arasında olmuştur.  $\alpha = 30^\circ$  ile  $\alpha = 40^\circ$  arasındaki artış eğiliminin,  $\alpha = 40^\circ$  ve  $\alpha = 50^\circ$  arasındaki artış eğilimine oranla daha az olduğu görülmüştür.
- Boşaltım kanalı taban açısının artmasıyla orantılı olarak düşü havuzu sonunda ölçülen hızlar da artmıştır. Akım hızlarının artmasıyla oyulma miktarları da artmıştır.  $0 < V < 10$  m/s arasında hiçbir deney gurubunda oyulma gerçekleşmemiştir. Hızın  $v > 2.00$  m/s olduğu deney gruplarında en büyük oyulma çukurları meydana gelmiştir.

- $H_{dmax}/h$  değerleri mansap su derinliği arttıķa azalmıştır. Bunun nedeni ise oyulmayı meydana getiren su jetinin, mansap su seviyesinin artmasıyla oluşan su yastığına dalarak sahip olduğu enerjiyi kaybetmesidir. Boşaltım kanalı basamak yuķseklięi arttıķa  $H_{dmax}/h$  değerleri azalmaktadır. Ćunku basamak yuķseklięi arttıķa sönümlenen enerji miktarları da artmıştır.
- Elde edilen verilere bakılarak ince ve kalın malzemede debi, oyulma derinliği değişimindeki eğilimlerinin birbirine benzediği söylenbilir. Debi arttıķa oyulma derinliği de artmaktadır. Her yersel oyulma farklı karakter taşımaktadır.
- Kalın malzemede meydana gelen oyulma Ćukuru boyutları, ince malzeme kullanılarak yapılan deneylere göre küĉülmüřtür. Oyulma Ćukurunun boyutlarındaki küĉülmeye paralel olarak özellikle küĉük debilerde maksimum oyulma derinlięinin deęeri de ince malzeme kullanılan deneylerde elde edilen sonuçlara nazaran daha düřük olmuřtur. Ancak akım debisindeki artıřla birlikte kalın malzeme kullanıldıęında oluřan maksimum oyulma derinlikleri ince malzemede meydana gelen deęerlere yaklařmıřtır. Maksimum debilerde bu fark % 5-10 düzeyinde olmuřtur. Oyulma Ćukuru geniřlięi, malzeme Ćapı ile ters orantılı olarak deęiřmektedir. Dięer bir deyiřle kalın malzemede, ince malzemeye nazaran oyulma Ćukuru daralmıřtır. Kalın malzemede yerel oyulmanın düřey yöndeki artma eęilimi, yatay yöndeki geniřlemeye oranla daha fazladır. Böylece oyulma Ćukurunun en kesitteki řev açısı da oldukĉa dik olmaktadır.
- Test edilen aynı mansap su seviyelerine sahip deney dizilerinde genellikle maksimum birim debilerde oyulma uzunlukları aynı çıkmaktadır. Mansap su derinliğinin 25 cm olduğu durumlarda oyulma uzunlukları hem büyük olmuşlar hem de birbirlerinden oldukĉa farklı değerler almışlardır. Mansap su derinliğinin 35 cm olduğu deney şartlarında oyulma uzunluğu en az olmuş ve aynı debi değerlerinde birbirine neredeyse eşit olmuştur. Boşaltım kanalı basamak uzunluğu arttıķa  $L_o/b$  değerleri azalmaktadır.
- Özellikle mansap su seviyesinin artmasıyla oyulmalarda önemli miktarlarda azalmalar meydana gelmiştir. Mansap su seviyesinin 35 cm olduğu çoğu deney gruplarında su seviyesinin 25 cm olduğu gruplara oranla büyük farklar meydana gelmiştir.
- Debiyle paralel olarak hidrolik yarıĉap deęerlerinin de artmasıyla  $\tau/\tau_{kr}$  deęerleri de artıř göstermektedir. Test edilen tüm deney dizilerinde Ćapı  $d_{50}=9,94$  mm olan yatak malzemesinin  $\tau/\tau_{kr}$  deęerleri, Ćapı  $d_{50}=3,17$  mm olan yatak malzemesinin  $\tau/\tau_{kr}$  deęerlerinden küĉük çıkmıřtır.
- Densimetrik Froude sayısı  $0.71 < F_d < 7,88$  aralığında değişmiştir.

- Basamak geometrisinin, birim debinin, boşaltım kanalı taban açısının, düşü havuzu eşik tipinin ve kuyuksuyu seviyesinin maksimum oyulma derinliği ve oluşan oyulma çukuru geometrisi üzerinde oldukça önemli parametreler olduğu belirlenmiştir.
- Kaskatların; baraj dolusavaklarında, sulama projelerinde, suların havalandırılması ve oksijen transferi işlemlerinin yapılmasını gerektiren çevre tesislerinde ve hidroelektrik tesislerin kuyruk suyu kanallarında ve yükleme havuzu dolusavağından artan suların yamaçtan tekrar akarsu yatağına verilmesinde enerji sönümlenmesi amacıyla kullanımında bu çalışma sonuçları yararlı olacaktır.
- Yapılan bu deneysel çalışmada problemin genel olarak çözümlendiği söylemek yanlış olur. Uygulamada karşılaşılan problemin sınır şartları çoğu zaman daha karmaşıktır. Sınır şartlarında yapılan bazı kabul ve basitleştirmelerle laboratuvar deneylerine dayanan sonuçlara varılmıştır. Sonuçların genelleştirilebilmesi için özellikle doğada ve su yapılarında gözlemlerin yapılması zorunludur.

## **6.2 Öneriler**

Bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığı altında bundan sonra yapılacak çalışmalarda; Zaman faktörü, farklı düşü havuzu geometrileri ve kaskatlar sonuna yerleştirilecek eşikler gibi parametrelerin de incelenmesi yapılabilecek çalışmalara yön vermesi bakımından göz önünde tutulabilecek önerilerdendir.

## KAYNAKLAR

- [1] Boes, R. M. and Hager, W. H., 2001, Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*: under review.
- [2] Chanson, H. and Toombes, L., 2001. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute application to embankment overflow stepped spillways. RESEARCH REPORT No. CE 158, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.
- [3] Chanson, H., 1994. Hydraulics of Skimming Flows over Stepped Channels and Spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 32, 3, 445-460.
- [4] Charles, E., Rice, C. E., and Kem C. K., 1996, Model study of a roller compacted concrete stepped spillway, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 122, 6, 292-297.
- [5] Chanson, H., 1994, Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes, *Journal of Hydraulic Research*, 32, 2, 213-218.
- [6] Tatewar, S.P., Porey, P.D. and Ingle, R.N., 1999, Selection of Step Height for maximum Energy Dissipation on Stepped Spillway. Proc. National Conference on Hydraulics – HYDRO-99, 306-311.
- [7] Chanson, H., 1996. Prediction of the Transition Nappe/Skimming Flow on a Stepped Channel, *Journal of Hydraulic Research*, 34, 3, 421-429.
- [8] Robinson K, Rice C., Kadavy K., and Talbot R., (1998) Energy Losses on a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway”ASCE Conference, *Water Resources Engineering*, 2, 1434-1439.
- [9] Yasuda Y., 2003, Effect of step cavity area on flow characteristics of skimming flows on stepped chutes, *Journal of Hydraulic Research*, 32, 5, 385-390.
- [10] Boes, R.M., Hager, W.H., 2000, Two-phase flow and energy dissipation on stepped spillways. Proc. ASDSO Annual Conference on Dam Safety, Providence, RI, USA: CD-ROM.
- [11] Boes, R.M., 1999, Physical model study on two-phase cascade flow. Proc. John F. Kennedy Student Paper Competition, 28th IAHR Congress, Graz, Austria, CD-ROM, 1.1.
- [12] Boes, R.M., 2000, Scale effects in modelling two-phase stepped spillway flow. Proc. Intl. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, VAW, ETH Zürich, Balkema: Rotterdam, The Netherlands: 53-60.
- [13] Yasuda, Y., and Ohtsu, I., 2000, Characteristics of Plunging Flows in Stepped Channel Chutes, Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Zürich, Switzerland, Balkema Publications, 147-152.
- [14] Boes, R.M. and Hager, W.H., 2003, Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*: under review. 129, 9, 661-670.
- [15] Minor, H.E., and Hager, W.H., 2000, Hydraulics of stepped spillways, Proceedings of the international workshop on hydraulics of stepped spillways, Zürich, Switzerland, 90, 216.
- [16] Ingle, R.N., and Tatewar, S.P., 1999, Nappe Flow on inclined stepped spillways, *Journal of Engineers*, 79, 175-179.
- [17] James, C.S., Main, A.G., and Moon, J., 1998, Enhanced energy dissipation in stepped chutes, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, *Water and Maritime Engineering*. 148,4,277-280.

- [18] Pinheiro, A., and Relvas, A., 2000, Non-conventional spillways over earth dams. An economical alternative to conventional chute spillways, *Dam Engineering*, 10, 4, 195-201.
- [19] Pinheiro, A., and Fael, C., 2000, Energy dissipation in stepped spillways with nappe flow, *International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, Zurich, 125, 11, 455-476.
- [20] Rajaratnam, N., and Chamani R., 1990, Skimming Flow in Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116, 4, 587-591.
- [21] Baylar, A., Bağatur, T., and Emiroğlu M.E., 2007, Prediction of Oxygen Content of Nappe, Transition and Skimming Flow Regimes in Stepped-Channel Chutes, *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6 (2), 201-208.
- [22] Yasuda Y. and Takahashi, M., 2000, Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. Discussion, *Journal of Hydraulic Engineering*. 126, 11, 869-871.
- [23] Chamani, M. R., and Rajaratnam, N., 1999, Onset of skimming flow on stepped spillways, *Journal Hydraulic Engineering*, ASCE, 125, 9, 969-971.
- [24] Ferrando M., 2002, On the incipient aerated flow in chutes and spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 40, 1, 94-98.
- [25] Peyras, L., Royet, P., and Degoutte, G., 1992, "Flow and energy dissipation over stepped" *Journal Hydraulic Engineering*, ASCE, 118, 5.
- [26] Chanson. H., 1995, Air Bubble Entrainment in Free-surface Turbulent Flows. *Experimental Investigations*, Report CH46/95, Department. of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, 368-390.
- [27] Matos. J., and Frizell. K.H., 2001, On the role of stepped overlays to increase spillway capacity of embankment dams". *ICOLD European Symposium*, Geiranger, Noruega, 1-10.
- [28] Frizell. K., Matos. J., and Pinheiro. A., 2000, Design of Concrete Stepped Overlay Protection for Embankment Dams, *International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, Zurich, Suíça, Março.
- [29] Kaş, İ., 1998, Basamaklı dolusavaklarda akım ve enerjisinin sönmülmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97 s.
- [30] Aksoy, Ş., 1975, Yüksek düşümlü barajların dolusavağı mansabında kaya tabandaki yersel oyulmalar. *DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları Hİ-584* Ankara .
- [31] Yıldız, D., 2001, Barajların mansabındaki oyulmalar. *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı Yayın No: KK-951*, Ankara.
- [32] Şentürk, F., 1988, Barajların projelendirilmesinde hidrolik esaslar, *DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları 1.Baskı*, Ankara.
- [33] Tuna, A., 1975 Geçirimli zeminlerde hareketli bağlama inşaatı ve Türkiye'deki hareketli bağlamalar, *Elazığ Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi. İnşaat Bölümü Yayınları*.
- [34] Schoklitsch, A., 1935 *Stauaumverlandung und kolkabwehr*. Verlag von Julius Springer.
- [35] Eggenberger, W., 1944, Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Kolkproblem, *Mitteil., Versuchsanstalt f. Wasserbau, N0 5*, Zurich, CH.
- [36] Veronese, A., 1937, "Erosioni de Fondo a Valle di uno Scarico." *Annali dei Lavori Publicci*, Vol. 75, No. 9, pp. 717-726, Italy.
- [37] Hartung, F., Husler, E., 1973, Scours Stilling Basins and Downstream Protection "Under Free Overfall Jets at Dams", *Proc.11 Congress, Q41-R.3 ICOLD, Q41-R.3*

- [38] Cola, R., 1965, Energy Dissipation of a High-Velocity Vertical Jet Entering A Basin, Proc. IAHR 11. Congress, Paper Nr.1.52
- [39] Martins, R., 1939, Contribution to the Knowledge on the Scour Action of Free Jets on Rocky River Beds, Proc. of 11. Congress ICOLD, Q.41-R.44
- [40] Gunko, F.G., Burkov, A.F., Isachenko, N.B., Rubinstein, G.L., Soloviova, A., Yuditsky, G.A. 1965, Research on the Hydraulic Regime and Local Scour of Rivers Bed Below Spillways of High-Head Dams. 1<sup>st</sup> Congress of the I.A.H.R., Leningrad.
- [41] Yildiz, D., Üzücek, E., 1994, Prediction of Scour Depth From Free Falling Flip Bucket Jets, Intl. Water Power and Dam Construction, November.
- [42] Gijs, J., Hoffmans, M., Pilarczyk, W. 1995, Local scour downstream of hydraulic structures, Journal of Hydraulic Research, 121, 4,326-339.
- [43] Shalash, S., 1986, Effect of longterm capacity reservoir of large alluvial river, with special reference to Aswan High Dam of Egypt. International Symposium on the Impact of Large Water Projects on the Environment, Cairo.
- [44] Rubinstein, G.L. (1963). Laboratory investigation of local erosion on channel beds below high overflowdams, Transactions of Coordination Conferences on Hydraulic Engineering. Iss. VII, Conference on Hydraulics of High Head Water Discharge Structures. Gosenergoizdat M.L.
- [45] Hay, N., White, 1975, Effects of water entrainment on the performance of stilling basins. 16<sup>th</sup> Congress of the I.A.H.R., Sao Paulo.
- [46] Çatakli, O., Özal, K., Tandoğan, A.R., 1973, A study of scours at the end of stilling basins and use of horizontal beams as energy dissipators. 11<sup>th</sup> Congress of Large Dams, Madrid.
- [47] Studenichikov, B.I., 1962, Calcul des dronions locales et quelques moyens dallager des evacuateurs, Trudy Gidravlichesko laboratorit No:8, France.
- [48] Mirtskhulava, T.E., 1967, Mechanism and computation of local and general scour in non cohesive, cohesive soils and rock beds, Proceedings of the 12th IAHR Congress, Vol. 3, Fort Collins, pp. 169–176.
- [49] Taraimovich, I., 1979, Deformations of Channels Below High Head Spillways on Rock Foundations, Plenum Publishing Corporation, (Traduzido para inglês de Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, No.8, Setembro, 1978, pp. 38-42).
- [50] Gunko, F.G., Soloviova, A.G. 1965, Research on the Hydraulic Regime and Local Scour of River Bed below Spillways of High-head Dams, Proceedings of the 11th IAHR Congress, Leningrad, 1(50), 1–14.
- [51] Chain, M.W., 1973, Scour at Downstream End Dam in Taiwan., Proc. IAHR Symp. On River Mechanics, Bangkok, paper A13
- [52] Martins, R. 1973, Contribution to the knowledge on the scour action of free jets on rocky river beds, Proceedings of the 11th Congress on Large Dams, Madrid, pp. 799–814.
- [53] Mason, P.J. and Arumugam, K., 1985, Free Jet Scour below Dams and Flip Buckets,” Journals of Hydraulics Engrg., 111(2), 220–235.
- [54] Cömert, M., 1991. Keban Barajı dolusavak iyileştirilmesi işine ait bilgiler ve uygulanan imalat yöntemleri. DSİ 9. Bölge Müdürlüğü. Elazığ.
- [55] Husler, E., Der Kolk unterhalb der Karibastaumauer, Tiefbau Strassenbau, Oktober 1972-Heft10.

- [56] Breusers, H. N. C., and Raudkivi, A. J., 1991., Scouring Hydraulic Structures Design Manual Series, No 2, Taylor & Francis, pp. 116-121.
- [57] Altınbilek D., 1967, Su yapılarında yerel oyulmalar, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [58] Demiröz, E., 1987, Karakaya barajı dolusavak deşarjının nehir yatağında Meydana getireceği oyulmalar, Devlet Su İşleri, Ankara.

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladıktan sonra 1998 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2002 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2002-2004 yılında İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını tamamladı. 2005 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.