

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOŞALTIM KANALLARI MANSABINDA
MEYDANA GELEN OYULMALARIN İNCELENMESİ



MEHMET KAN AKGÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AĞUSTOS - 2017

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOŞALTIM KANALLARI MANSABINDA
MEYDANA GELEN OYULMALARIN İNCELENMESİ



MEHMET KAN AKGÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AĞUSTOS – 2017

Tezin Başlığı: Boşaltım Kanalları Mansabında Meydana Gelen Oyulmaların İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: Mehmet Kaan AKGÜN

Sınav Tarihi: 10/08/2017 Perşembe

Yukarıda adı geçen tez, jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ö. Faruk DURSUN

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. M. Emin EMİROĞLU

Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Mahmut FIRAT

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Boşaltım Kanalları Mansabında Meydana Gelen Oyulmaların İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mehmet Kaan AKGÜN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BOŞALTIM KANALLARI MANSABINDA MEYDANA GELEN OYULMALARIN İNCELENMESİ

Mehmet Kaan AKGÜN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Sayfa: ix + 95

2017

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ö. Faruk DURSUN

Barajların dolusavakları üzerinde oluşan yüksek hızlı akımlar, boşaltım kanalı boyunca kavitasyon riskine neden olmaktadır. Birçok barajda kavitasyon sorununun çözmek için ilave yapılar yapılması zorunlu hale gelmiştir. Boşaltım kanalının mansabındaki akımın enerjisi, enerji kırıcı havuzlar tarafından sönmülmektedir. Eğer enerji kırıcı havuz çıkışında akımın enerjisi yeterince sönmülmemiş ise akarsu yatağında yerel oyulmalar oluşabilir. Bu oyulmalar baraj ve ilave yapıları için büyük tehlike arz eder. Dolusavaklar ve enerji kırıcı yapılar maliyeti yüksek yapılardır. Dolayısıyla bu yapıların akımın yüksek enerjisi nedeniyle zarar görmesini önlemek oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında; boşaltım kanalının mansabında meydana gelen oyulma derinliklerine dolusavak havalandırıcılarının etkisini belirlemek için bir dizi deney yapılmıştır. Tüm deneyler boşaltım kanalının üç farklı şüt eğimi için gerçekleştirilmiştir. Boşaltım kanalına, kavitasyonu önlemek için literatürde verilen iki farklı tip havalandırıcı yerleştirilmiştir. Havalandırıcılar, tek, ikili ve üçlü olmak üzere üç farklı konfigürasyonda kullanılmıştır. Deneyler 30°, 40° ve 50° şüt açıları için yapılmıştır. Her bir deney sonunda mansapta bulunan kum havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası çıkarılmış ve maksimum oyulma derinliğinin yeri ve değeri belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar kendi içinde kıyaslanmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Dolusavak, Boşaltım kanalı, Kavitasyon, Taban oyulması, Enerji kırıcı havuz, Havalandırıcı.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF LOCAL SCOUR OCCURED AT DOWNSTREAM OF THE CHUTE CHANNELS OF SPILLWAYS

Mehmet Kaan AKGÜN

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Page: ix + 95

2017

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ö. Faruk DURSUN

High-speed flows occurring over spillways of dams cause the risk of cavitation along the chute. In many dams, it is necessary to create an additional structure to solve the cavitation problem. The energy at the downstream of the chute dissipates by using stilling basins or flip buckets. If the residual energy at downstream of the chute is excessive, the local scour may occur at the stream bed. These local scours have a great danger for dams and their additional structures. Cost of spillway and stilling basin structures are quite high. Therefore, it is very important to prevent these structures from being damaged.

In this thesis study, a series of experiments were conducted to estimate the effects of spillway aerators to the scour depth occurred downstream of the chute. At all experiments, three different chute slopes were used. In the experiments, two different types of aerators were taken into consideration. The aerators were used in three different configurations as single, double, and triple. The experiments were made for 30°, 40°, and 50° chute slopes. In experiments the scouring topographies at the end of the chute and the locations and values of the maximum scour depth were obtained. The findings were discussed and interpreted in detail.

Keywords: Spillway, Chute channel, Cavitation, Bed scour, Energy dissipator pool, Aerator.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*Boşaltım Kanalları Mansabında Meydana Gelen Oyulmaların İncelenmesi*” başlıklı bu çalışmada danışmanım olan sevgili hocam Yrd. Doç. Dr. Ö. Faruk DURSUN’a gösterdiği yoğun ilgi ve katkıdan dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca İnşaat Mühendisliği Bölümünü Araştırma Görevlisi Enes GÜL’e ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümünü Öğretim Üyesi Doç. Dr. M. Fatih TALU’ya yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını 2016-27 kod numarasıyla destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Mehmet Kaan AKGÜN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
2.1. Dolusavaklar	2
2.1.1. Dolusavaklarda Kaviteasyon Hasarı	2
2.2. Dolusavak Havalandırıcıları	4
2.2.1. Dolusavak Şüt Kanallarında Havalandırma	4
2.2.2. Gerekli Hava Konsantrasyonu	7
2.2.3. Havalandırıcı Tasarımı	7
2.2.4. Havalandırıcı Geometrisi ve Tipleri	8
2.2.5. Hava Giriş Oranı	12
2.2.6. Hava Çıkışı	23
2.2.7. Jet Uzunluğu	24
2.2.8. Boşluk Alt Basınçları	25
2.2.9. Havalandırıcıların Yeri ve Aralığı	27
2.2.10. Batık Havalandırıcılar	29
2.3. Dolusavakların Mansabındaki Oyulmalar	32
2.3.1. Giriş	32
2.3.2. Oyulma Tipleri	33
2.3.3. Yersel Oyulmalar İle İlgili Literatür Özeti	34
2.3.4. Yersel Oyulma Eşitlikleri	41
2.3.5. Bir Enerji Kırıcı Havuz Mansabındaki Oyulmalar	46
2.3.6. Oyulma Çukuruna Etkiyen Kuvvetler	47
3. MATERYAL VE YÖNTEM	48
3.1. Deney Düzenneği	49
3.1. Deneylerin Yapılışı ve Yöntem	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	54
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	89
6. KAYNAKLAR	91
7. ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Kavitasyona neden olan bazı düzensizlikler.....	3
Şekil 2.2	Havalandırma mekanizmasının tanımlanan bölümleri.....	5
Şekil 2.3	Temel havalandırıcı tipleri.....	9
Şekil 2.4	Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısı	9
Şekil 2.5	Calacucia Barajı dolusavak havalandırıcısı	10
Şekil 2.6	Foz do Areia Barajı dolusavak havalandırıcısı.....	10
Şekil 2.7	Mantaro Barajı dolusavak havalandırıcısı.....	10
Şekil 2.8	Ait Chouarit Barajı dolusavak havalandırıcısı.....	10
Şekil 2.9	Klasik bir havalandırıcının görüşleri; a) 3 Boyutlu; b) Boykesit... 11	
Şekil 2.10	Chanson'a göre Fr sayısı ile hava giriş oranının değişimi.....	18
Şekil 2.11	Bir havalandırıcı üzerindeki hava girişleri.....	20
Şekil 2.12	Havalandırma bölgesindeki akıma dik hava konsantrasyonu dağılımı.....	22
Şekil 2.13	Bir havalandırıcı jetin altındaki basınçlar.....	26
Şekil 2.14	Oyulma çukuru gelişimi.....	47
Şekil 3.1	Deney düzeneği yandan görünüş.....	49
Şekil 3.2	A ve B tipi havalandırıcılar.....	49
Şekil 3.3	Takılıp çıkarılabilir deney taban aparatları.....	50
Şekil 3.4	Granülometri eğrisi.....	51
Şekil 3.5	Pompa.....	51
Şekil 3.6	Debimetre.....	52
Şekil 3.7	Limnimetre.....	52
Şekil 3.8	Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	53
Şekil 4.1	Oyulma topoğrafyası (Havalandırıcısız, 30°, 0.05 m ³ /s/m).....	55
Şekil 4.2	Oyulma topoğrafyası (1A havalandırıcılı, 30°, 0.05 m ³ /s/m).....	56
Şekil 4.3	Oyulma topoğrafyası (2A havalandırıcılı, 30°, 0.05 m ³ /s/m).....	57
Şekil 4.4	Oyulma topoğrafyası (3A havalandırıcılı, 30°, 0.05 m ³ /s/m).....	58
Şekil 4.5	Oyulma topoğrafyası (1B havalandırıcılı, 30°, 0.05 m ³ /s/m).....	59
Şekil 4.6	Oyulma topoğrafyası (2B havalandırıcılı, 30°, 0.05 m ³ /s/m).....	60
Şekil 4.7	Oyulma topoğrafyası (3B havalandırıcılı, 30°, 0.05 m ³ /s/m).....	61
Şekil 4.8	Oyulma topoğrafyası (Havalandırıcısız, 40°, 0.05 m ³ /s/m).....	62
Şekil 4.9	Oyulma topoğrafyası (1A havalandırıcılı, 40°, 0.05 m ³ /s/m).....	63
Şekil 4.10	Oyulma topoğrafyası (2A havalandırıcılı, 40°, 0.05 m ³ /s/m).....	64
Şekil 4.11	Oyulma topoğrafyası (3A havalandırıcılı, 40°, 0.05 m ³ /s/m).....	65
Şekil 4.12	Oyulma topoğrafyası (1B havalandırıcılı, 40°, 0.05 m ³ /s/m).....	66
Şekil 4.13	Oyulma topoğrafyası (2B havalandırıcılı, 40°, 0.05 m ³ /s/m).....	67
Şekil 4.14	Oyulma topoğrafyası (3B havalandırıcılı, 40°, 0.05 m ³ /s/m).....	68
Şekil 4.15	Oyulma topoğrafyası (Havalandırıcısız, 50°, 0.05 m ³ /s/m).....	69
Şekil 4.16	Oyulma topoğrafyası (1A havalandırıcılı, 50°, 0.05 m ³ /s/m).....	70
Şekil 4.17	Oyulma topoğrafyası (2A havalandırıcılı, 50°, 0.05 m ³ /s/m).....	71
Şekil 4.18	Oyulma topoğrafyası (3A havalandırıcılı, 50°, 0.05 m ³ /s/m).....	72
Şekil 4.19	Oyulma topoğrafyası (1B havalandırıcılı, 50°, 0.05 m ³ /s/m).....	73
Şekil 4.20	Oyulma topoğrafyası (2B havalandırıcılı, 50°, 0.05 m ³ /s/m).....	74
Şekil 4.21	Oyulma topoğrafyası (3B havalandırıcılı, 50°, 0.05 m ³ /s/m).....	75
Şekil 4.22	$H_d - L$ grafikleri (30° kanal açısı için).....	76
Şekil 4.23	$\tau/\tau_{kr} - H_{dmax}/H$ grafiği (30° kanal açısı için).....	76
Şekil 4.24	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=30^\circ$; $q=0.0125$ m ³ /s/m).....	78
Şekil 4.25	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=30^\circ$; $q=0.025$ m ³ /s/m).....	78
Şekil 4.26	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=30^\circ$; $q=0.0375$ m ³ /s/m).....	79

Şekil 4.27	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=30^\circ$; $q=0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	79
Şekil 4.28	$H_d - L$ grafikleri (40° kanal açısı için).....	80
Şekil 4.29	$\tau/\tau_{kr} - H_{dmax}/H$ grafiği (40° kanal açısı için).....	80
Şekil 4.30	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=40^\circ$; $q=0.0125 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	81
Şekil 4.31	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=40^\circ$; $q=0.025 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	82
Şekil 4.32	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=40^\circ$; $q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	82
Şekil 4.33	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=40^\circ$; $q=0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	83
Şekil 4.34	$H_d - L$ grafikleri (50° kanal açısı için).....	83
Şekil 4.35	$\tau/\tau_{kr} - H_{dmax}/H$ grafiği (50° kanal açısı için).....	84
Şekil 4.36	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.0125 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	85
Şekil 4.37	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.025 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	85
Şekil 4.38	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	86
Şekil 4.39	$H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$).....	86
Şekil 4.40	$F_d - H_{dmax}/H$ grafiği (30° kanal açısı için).....	87
Şekil 4.41	$F_d - H_{dmax}/H$ grafiği (40° kanal açısı için).....	88
Şekil 4.42	$F_d - H_{dmax}/H$ grafiği (50° kanal açısı için).....	88

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1	Denklem (2,7)'deki katsayılar.....	15
Tablo 3.1	Elekt analizi dataları.....	50
Tablo 3.2	Oyulma deneylerinde kullanılan malzemenin özellikleri.....	51



SİMGELER VE KISALTMALAR

C_a	Hava konsantrasyonu,
P	Altbasınç farkı [N/m^2],
ρ_w	Suyun yoğunluğu [kg/m^3],
g	Yerçekimi ivmesi [m/s^2],
h	Su derinliği [m],
B	Boyutsuz hava giriş oranı [-],
L_j	Su jetinin uzunluğu [m],
h	Eşikteki akım derinliği [m],
β	Hava giriş oranı [-],
Q_a	Giren hava debisi [m^3/s],
Q_w	Suyun debisi [m^3/s],
Fr	Froude sayısı [-],
F_d	Densimetrik Froude sayısı [-],
E	Euler sayısı [-],
P_N	Boşluk altbasınç sayısı [-],
We	Weber sayısı [-],
Re	Reynolds sayısı [-],
q_a	Birim hava debisi [$m^3/s/m$],
c	Deneyisel bir katsayı [-],
ΔP	Atmosfer basıncı ile nap altı basınçların farkı [N/m^2],
A	Hava bacasının kontrol alanı [m],
ρ_a	Havanın yoğunluğu [kg/m^3],
B	Kanal genişliği [m],
K	Deneyisel sabit [-],
h	Akım derinliği [m],
α	Dolusavak şüt kanalı eğim açısı [$^\circ$],
t_r	Rampa yüksekliği [m],
t_s	Eşik yüksekliği [m],
λ_j	Boyutsuz (rölatif) jet uzunluğu,
F_c	Kritik Froude sayısı [-],
x	Havalandırıcı üzerindeki jetin başlangıcından çarpma bölgesine olan yatay mesafe [m],
f	Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı [-],
U	Ortalama su hızı [m/s],
ξ_{tot}	Hava sağlama sistemindeki yük kaybı katsayısı [-],
A_a	Hava giriş alanı [m^2],
B	Şüt kanalı genişliği [m],
$(\beta_{alt})_e$	Deneyisel alt nap hava giriş oranı [-],
A_a	Hava giriş enkesit alanı [m^2],
A_w	Havalandırıcı membasındaki akımın enkesit alanı [m^2],
θ	Rampa ile şüt arasındaki eğim açısı [$^\circ$],
$\bar{\theta}$	Sıçratma açısı [$^\circ$],
d	Karakteristik derinlik [m],
ε, c	Katsayılar [-],
c_a	Orantılılık katsayısı [-],
Q_{TA}	Toplam hava debisi [m^3/s],
A_{SD}	Baca giriş alanı [m^2],

ξ_{tot} : Kenar bacalar boyunca yük kaybı katsayısı [-],
 $Q_a(x)$: x eksenine göre hava basıncının hava ihtiyaç debisi [m^3/s],
 ΔP_c : Kenar bacalar boyunca basınç kaybı [N/m^2],
 $\Delta P(x)$: x eksenine göre altbasınçlar [N/m^2],
 A_D : Havalandırıcı oluşunun enkesit alanı [m^2],
 V_D : Su jeti altındaki boşlukta akıma dik ilerleyen hava hızı [m/s],
 Φ' : Deneysel katsayılar (Φ''),
 φ' : Regresyon katsayıları (φ''),
 D_a : Havalandırıcı aralığı [m],
 U : Ortalama akım hızı [m/s],
 T_0 : Oyulma derinliği [m],
 q : Birim debi (m^2/s),
 H : Memba ile mansap su seviyeleri farkı [m],
 d_m : Mansap tabanındaki ortalama dane çapı [mm],
 $t + h_2$: Kuyruksuyu seviyesinden itibaren maksimum oyulma derinliğini [m],
 h_t : Kuyruksuyu seviyesi ile rezervuar seviyesi arasındaki kot farkı [m],
 t_k : Akarsu tabanından itibaren oyulma derinliği [m],
 K_0 : Katsayı [-],
 h_c : Su jetinin kritik derinliği [m],
 q : Çarpma kesitindeki birim debi [m^2/s],
 q_0 : Jetin çıkıştaki birim debisi [m^2/s],
 n : Jetin yayılmasını ve hava girişini karakterize eden katsayı [-],
 W_T : Elekten geçirilecek kumun ağırlığı [gr],
 d : Dane çapı [mm],
 d_m : Taban malzemesinin ortalama dane çapı [mm],
 d_{10} : Malzemenin ağırlık olarak %10'unun elekten geçtiği dane çapı [mm],
 d_{50} : Malzemenin ağırlık olarak %50'sinin elekten geçtiği dane çapı [mm],
 d_{60} : Malzemenin ağırlık olarak %60'ının 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 [-].

1. GİRİŞ

Barajlarda taşkın debilerini mansaba emniyetle geçirmek amacıyla inşa edilen yapılara dolusavak denir. Birbirinden farklı tipte inşa edilen dolusavaklarda meydana gelen kavitasyon ve oyulma problemleri yapının ve barajın emniyetini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada dolusavak boşaltım kanalı boyunca meydana gelen kavitasyon sorunu ve dolusavak boşaltım kanalı mansabında meydana gelen oyulma problemi incelenmiştir. Bu konularda yapılan çalışmalar ve günümüze kadar geliştirilmiş olan denklemler sunulmuştur.

Yüksek hızlı akımlarda akımın kısmi bölgelerindeki basınçlar, cidar düzensizlikleri gibi nedenlerle çok fazla düşerek sıvının buhar basıncı altına inebilir. Bu durumda akışkan sıvı halden buhar haline geçer. Bu olaya buharlaşma kavitasyonu denmektedir. Oluşan buhar ve gaz parçacıkları, hızlı akan suyun içinde gözle görülebilir boşluklar oluşturabilir. Yüksek hızlı akımlar altındaki hidrolik yapılarda basınç düşmesi, genelde yüzey düzensizliklerinin sebep olduğu lokal hızlardaki değişimlerle ilgilidir. Lokal hızın ortalamasıyla orantılı olarak basınç azalır ve kritik değere ulaşabilir. Bu değerlerde buhar ve/veya gaz parçacıkları kararsız olur. Pratik amaçlar için, kavitasyon başlangıcı olarak akışkanın buhar basıncı alınabilir.

Buhar kabarcıkları düşük basınç bölgesinden, daha yüksek basınç içine girerken çarpışırlar. Kabarcıkların ani çarpışması, yoğun basınç dalgalanmaları oluşturur. Bu durum yüksek bir gürültüyle beraber kavitasyona neden olmaktadır. Akımın içine dalan buhar kabarcıkları, oluşan büyük buhar boşluğunun mansabındaki durma noktası civarında daha yüksek basınç bölgesiyle karşılaşır ve yoğunlaşarak tekrar sıvı hale geçiş yapar. Hasar, bu bölgede daha fazla olur. Dolusavak şüt kanalları üzerinde meydana gelebilecek muhtemel kavitasyon hasarını önlemenin en etkin çözümü havalandırıcıların kullanımı ile sağlanmıştır.

Bu tez çalışması ile dolusavak boşaltım kanalı boyunca meydana gelen kavitasyon sorununa çözüm sağlamak için kullanılan Dolusavak havalandırıcılarının, dolusavak boşaltım kanalı mansabında meydana gelen oyulma çukurunun yeri ve derinliğine olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, farklı tip havalandırıcılar ve farklı şüt açlarına sahip boşaltım kanalları için gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. DOLUSAVAKLAR

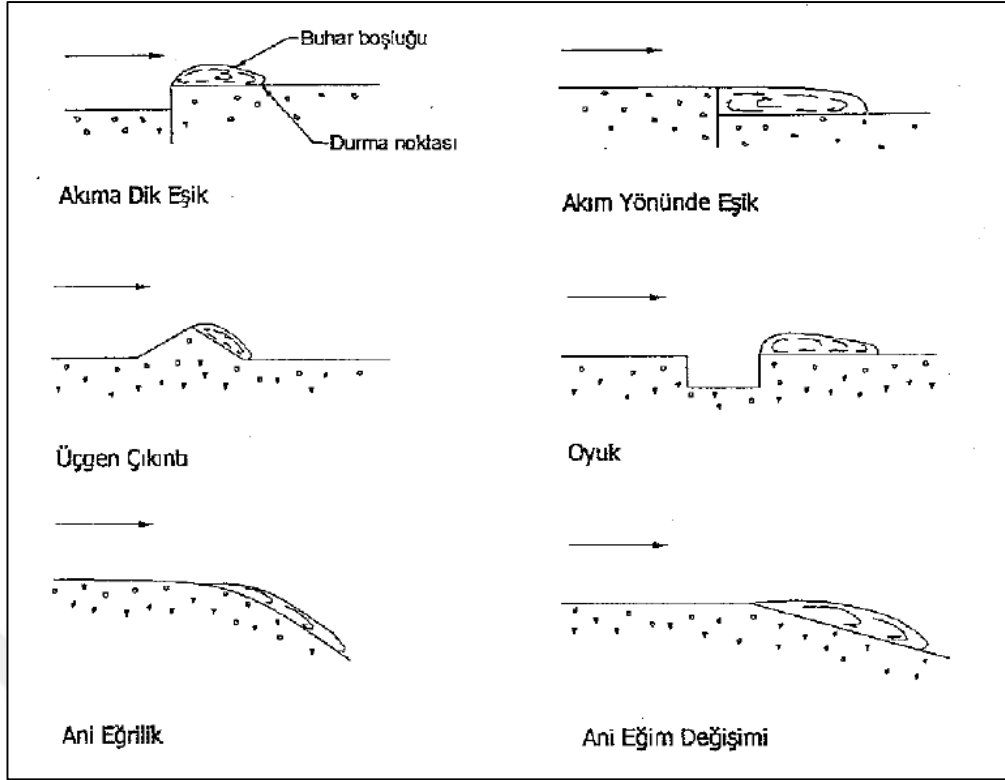
2.1.1. Dolusavaklarda Kaviteasyon Hasarı

Cola tarafından sürdürülen araştırma ve incelemelerden sonra kaviteasyon hasarıyla ilgili aşağıdaki sonuçlar verilmiştir [1]:

- İşletim politikaları ve inşaat teknikleri farklı olduğundan aynı tasarım şartlarında hiçbir yapının hasarı aynı olmayacaktır.
- Model çalışmalarındaki ölçek etkileri ve prototip ölçümlerindeki hatalar fark edilmemekte ve tasarımda göz önüne alınamamaktadır.
- Kaviteasyon ve kaviteasyon hasarına neden olan düzensizliklerin geometrisi ve yerini tahmin etmek zordur.
- Kaviteasyon hasarı birçok faktöre bağlıdır, bunlar; akımın kaviteasyon indeksi, akım hızı, yüzey malzemesinin direnci, işletim süresi gibi faktörlerdir.
- Kaviteasyon başlangıç indeksini bulmak için daların çoğu laboratuvar deneylerinden elde edilir, bununla birlikte bazı tecrübe ve prototip gözlemlerden de elde edilebilir.
- Bir dolusavak üzerindeki hasar, boşluk kabarcıkları çarpışması ve parçacık taşınımı, hız erozyonu, yıkıntı aşınması ve donma etkisinin bir kombinezonudur.

Dolusavaklar üzerinde kaviteasyona sebep olan faktörler şöyle sıralanabilir [2]:

- Beton yüzeyler üzerindeki farklı düzensizliklerin varlığı,
- Akım yönünde ve karşısında kanal tabanındaki ani süreksizlikler veya eşikler,
- Ani eğim değişiklikleri,
- Akımın alt napına uydurulmamış keskin eğriler ve tam teğet olmayan eğri yüzeyler,
- Yüksek hidrolik hızlar,
- İnşaat hatalarından meydana gelen yüzeydeki diğer kusurlar.



Şekil 2.1 Kavitasyona neden olan bazı düzensizlikler [3]

Şüt kanalları üzerinde kavitasyona neden olan düzensizliklerden bazıları **Şekil 2.1**'de verilmiştir [3].

2.2. DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARI

2.2.1. Dolusavak Şüt Kanallarında Havalandırma

Bir dolusavak üzerindeki akım, büyüyen bir sınır tabakasıyla birlikte net bir su çekirdek bölgesi oluşturur. Dolusavak tabanı üzerinde gelişen sınır tabakası, serbest yüzeye ulaştığı zaman sınır tabakası üzerindeki türbülans doğal bir hava girişi başlatabilir. Eğer serbest yüzeyden giren hava dolusavak tabanına ulaşmaz ise kavitasyon hasarı meydana gelebilir [4]. Bu durumda havalandırıcılar kullanmak gerekebilir.

Dolusavak şüt kanalları üzerinde meydana gelebilecek muhtemel kavitasyon hasarını önlemenin en verimli şekli hızlandırıcıların kullanımı olmuştur. Havalandırıcılar, dolusavak şüt kanalları üzerindeki yüksek hızlı su jeti altında yapay olarak oluşturulan boşluk içinde meydana gelen atmosfer altı basınçlar sayesinde, dışarıdan hava emmek suretiyle çalışırlar. Bu amaçla genel olarak bir havalandırıcıda, yüksek hızlı su jetini kanal tabanından yükseltecek bir eleman (rampa veya saptırıcı ve/veya basamak) ve su jetinin altındaki alt basınç bölgesini besleyecek baca vb. elemanların olması gerekir. En iyi spreyl etkisini sağlamak için genelde eşik ve rampa birlikte kullanılır. Kanal enkesiti boyunca rampa ve/veya eşiğin hemen mansabına bir oluk yerleştirilerek kanal genişliğince daha iyi hava girişi sağlanabilir. Ancak yalnız başına bir oluk kesinlikle kullanılmamalıdır. Çünkü bu durumda yeterli bir alt basınç bölgesi oluşmayacak ve hava içeriye doğru emilmeyecektir. Hava girişinin bir rampa veya saptırıcı ile en etkili olduğu belirtilmektedir [5]. Bir rampa, serbest su jetini yüksek dereceli türbülansa maruz bırakır. Oskolkov ve Semenkov [6], rampa üzerinden geçen akımın sınır tabakasındaki büyümenin havalandırma yoğunluğunu arttıracaklarını ileri sürmüşlerdir. Bununla birlikte Volkart ve Rutschmann [7], rampaların hızlı akımlarla yüksek şok dalgalarına sebep olabileceğini ve durumun bazı dezavantajlarından bahsetmişlerdir.

Russell ve Sheenan (1974), giren akım kavitasyon üzerinde aşağıdaki etkilerin olabileceğini belirtmiştir [8]:

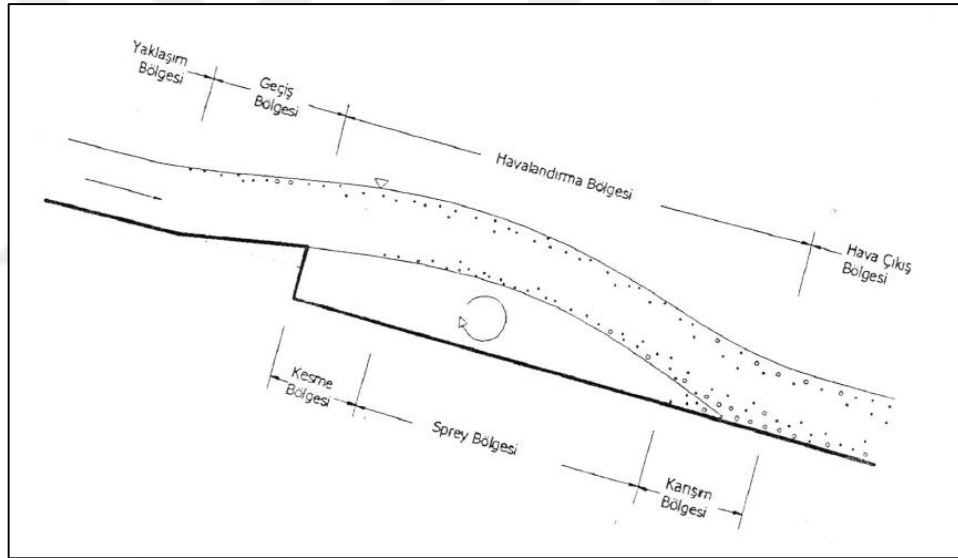
- Kavitasyon nedeniyle oluşan buhar boşluklarına giren hava, yüksek basınç bölgesinde meydana gelebilecek çarpışmalara yastık görevi yaparak su darbesini azaltacaktır.
- Su içindeki hava kabarcıklarının varlığı şok dalgalarının hızlanmasına engel olacak ve böylece yüzey malzemesi üzerindeki şok dalgalarının etkilerini azaltacaktır.

Falvey ve Ervine [9], Bruschin [10], Pinto [11], Chanson [12], Volkart ve Rutschmann [7] gibi araştırmacılar tarafından bir havalandırıcının havalandırma mekanizması tanımlanmıştır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, bir havalandırıcı çevresi dört bölgeye ayrılmıştır [5, 12, 13]. Bunları;

- Yaklaşan akım bölgesi,
- Geçiş bölgesi,
- Havalandırma bölgesi,
- Hava çıkış bölgesi olarak saymak mümkündür.

Ayrıca, havalandırma bölgesi;

- Kesme bölgesi,
- Sprey bölgesi,
- Karışım bölgesi şeklinde üç bölgeden oluşmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Havalandırma mekanizmasının tanımlanan bölümleri [5, 12, 13]

Yaklaşım bölgesi havalandırıcının hemen mansabında yer alır. Bu bölgede savağın aşağılarına doğru akım hızlanabilir. Yüzey havalandırması olabilir veya olmayabilir. Akımın rampa veya saptırıcı üzerinde kalan kısmı geçiş bölgesini oluşturur. Rampanın mansabındaki taban basınçları atmosfere çok yakın olmasına rağmen akımdaki lokal basınçlar geçiş bölgesinde hidrostatik basıncın üzerine yükselir. Bir havalandırıcı çevresindeki basınç ölçümleri Pinto [11] tarafından sunulmuştur. Geçiş bölgesindeki basınç alanı değişimi akım türbülansında yükselişe sebep olur ve bu da havalandırma performansını artırır [5].

Havalandırma bölgesi Şekil 2.2'deki gibi üç bölgeden oluşmaktadır. Kesme bölgesinde yüksek hızlı jet, nap altındaki hava ile temastadır. Fakat nap yüzeyindeki yüzey gerilmelerinin üstesinden gelebilecek yeterli türbülans olmadığından hiçbir su damlası jetten ayrılamaz ve hava kabarcıkları da jetin içine giremez. Sonunda, hava-su ara yüzeyindeki denge bozulur ve sprej meydana gelir. Sprej bölgesinde oluşan sprejin, difüzyon işlevi görmesi nedeniyle giren hava üzerinde yüksek derecede etkisi vardır. Gerçekten de bu hava girişi üzerinde birinci dereceden etkilidir. Sprej bölgesindeki mansabında jet, şüt tabanı üzerine çarpar ve jet boyunca yeni bir basınç dağılımı oluşur. Karışım bölgesi “çarpma bölgesi” diye de adlandırılabilir. Taban basınçları çarpma bölgesinde maksimum değerlere ulaşır. Bu bölge yüksek türbülanslıdır ve yüksek enerji kayıpları meydana gelir. Çarpma bölgesinde akım, nap üzerindeki negatif bir basınç dağılımından maksimum bir basınç dağılımına ani bir basınç değişimine zorlanır. Yalnızca düşük Froude sayılarında bu bölgenin akımı iyi anlaşılabilir. Bu bölgedeki hava çıkışı Chanson [14] tarafından çalışılmıştır. Yerçekimi ve akım türbülansının etkileşiminin bir sonucu olarak hava kabarcıkları su ile karışır [11]. Bu bölgenin bitiminden sonra hava çıkışı başlar.

Hava çıkış bölgesinde, şüt tabanı civarındaki hava konsantrasyonu hava kabarcıklarının yukarıya yükselmesiyle azalır. Akıma giren havanın bir difüzyon işlemi başlatacağı Bruschin tarafından belirtilmiştir [10]. Oluşacak difüzyon, kabarcık boyutu dağılımı ve lokal hava konsantrasyonu tarafından kontrol edilecektir. Difüzyon işlemi akımın tabanında başlar ve sonunda akımın mansabına doğru üst serbest yüzeydeki havalandırma işlemi ile etkileşime girer. Sonunda yukarı ve aşağıya doğru hava hareketi arasında bir denge oluşur [5].

Bir havalandırıcı üzerindeki yüzey havalandırmasının başlaması veya artması yerçekimi kuvvetleriyle alakalı olduğu belirtilir [5]. Bir havalandırıcı üzerindeki serbest jetin yerçekiminden etkilenmemesi ve dolayısıyla da jet içindeki hava kabarcıklarının hafifliğinin etkisinin ortadan kalkması, hava kabarcıklarının jet içinde kalmasını sağlayacak ve havalandırıcının verimini oldukça arttıracaktır [5].

Serbest yüzeyden önemli miktarda hava akıma karışmasına rağmen, deneysel çalışmalarda havalandırıcının performansı genelde alt naptan giren hava miktarıyla belirlenir.

2.2.2. Gerekli Hava Konsantrasyonu

Kavitasyon hasarından kaçınmak için gerekli hava konsantrasyonu ile ilgili çalışmaların çoğunda, hava konsantrasyonunun %6-8 arasında olması gerektiği belirtilmiştir [5]. Russell ve Sheehan [8] malzeme testleri üzerine yaptığı çalışmada kavitasyon hasarını önlemek için %5 hava girişi sağlamanın yeterli olacağını savunmuşlardır. Saha ve model çalışmalarından Oskolkov ve Semenkov [6], kavitasyon hasarını önlemek için serbest hava değerinin %7-8 arasında olmasının uygun olacağını belirtmişlerdir. Rutschmann ve Volkart [15] tarafından, tasarım için hava konsantrasyonunun tabanda %7 alınabileceği önerilmiştir. 35 m/s'yi aşan akım hızları için hava konsantrasyonunun yukarıda önerilenlerden daha yüksek olması gerektiği bildirilmiştir [5]. Diğer bazı araştırmacılara göre, maksimum hızların 44 m/s olması durumunda şüt kanalı yüzeyine yakın hava konsantrasyonunun %4-8 olması hasarı önlemede yeterli olacağı belirtilmiştir [13]. Abbasoğlu ve Okay [2]'a göre ise hava giriş oranının %8-12 arasında olması kavitasyonu önlemeye yeterli olacaktır.

Eğer serbest yüzey havalandırması, alt tabana yakın yeterli hava konsantrasyonu sağlıyorsa ($C_a > \%7$) akımın serbest yüzeyinden giren hava dolusavak şüt kanalı yüzeyini kavitasyon hasarından koruyabilir. Ancak yeterli yüzey havalandırması yoksa veya düzensizlik toleransı kavitasyondan kaçınamayacak kadar ciddiye ($U > 30$ m/s) şüt kanalları üzerine yerleştirilen havalandırıcılar kullanılarak akım yapay olarak havalandırılmalıdır [4, 12, 16].

Yalnız kavitasyon bölgesindeki hava etkili olacağından ve gerçek hava gereksinimleri tam olarak bilinmediğinden, kavitasyona maruz dolusavak ve dipsavak elemanları mümkün olduğu kadar pürüzsüz yapılmalı ve tasarım maksimum hava girişi sağlayacak şekilde olmalıdır. Bununla birlikte, havalandırılmış suyun içindeki serbest hava konsantrasyonunun %45'i aşması durumunda, yükselen hava kabarcıklarının akımın atomize olmasına yol açabileceği uyarısı yapılmıştır [5, 6].

2.2.3. Havalandırıcı Tasarımı

Dolusavak şüt kanalları üzerindeki havalandırıcıların tasarımı için yöntemler hala gelişmelere açıktır. Mevcut tasarımlar model deneylerinden ve prototip ölçüm ve gözlemlerinden elde edilen bilgilerden yola çıkılarak pratiğe dökülür. Analitik tekniklerin kullanımı, birinci derecede sonlu elemanlar yöntemine dayanır [5].

Pinto [17], Cassidy ve Elder [18] dolusavak havalandırıcı tasarımında göz önünde bulundurulması gereken belirleyici faktörleri şöyle sıralamışlardır:

- Kavitasyonu önlemek için havalandırıcıların gerekli olup olmayacağı,
- İlk havalandırıcının yeri,
- Hava giriş oranı,
- Havalandırıcılar arasındaki mesafe.

Dikkate alınması gereken ek faktörler:

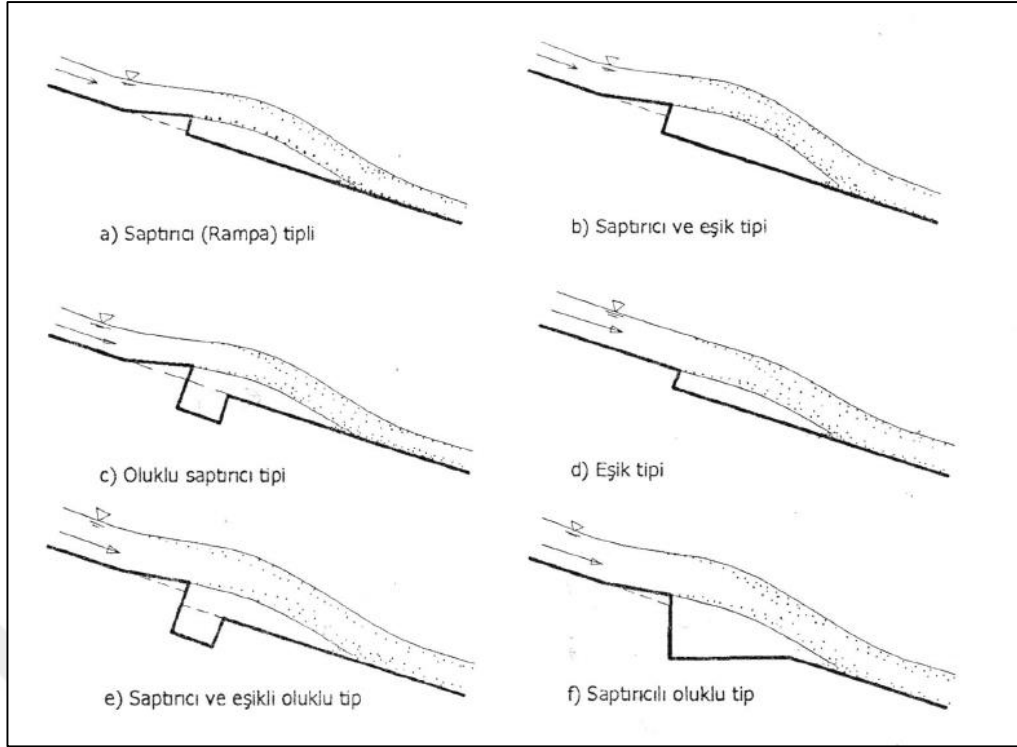
- Akımda istenen hava konsantrasyonu,
- Havalandırıcı elemanlarının geometrisi, boyutları ve yeri,
- Diğer unsurlar.

Bu kriterlere ek olarak şüt kanalının genişliği boyunca hava karışım oranı ve basınç dağılımlarının değişimine de dikkat edilmelidir. Sonuç olarak, iyi tasarlanmış bir havalandırıcı, dolusavak profili boyunca uygun yerde, yüksek hızlı jetin altına yeterli miktarda ve üniform bir hava karışımı sağlamalıdır.

2.2.4. Havalandırıcı Geometrisi ve Tipleri

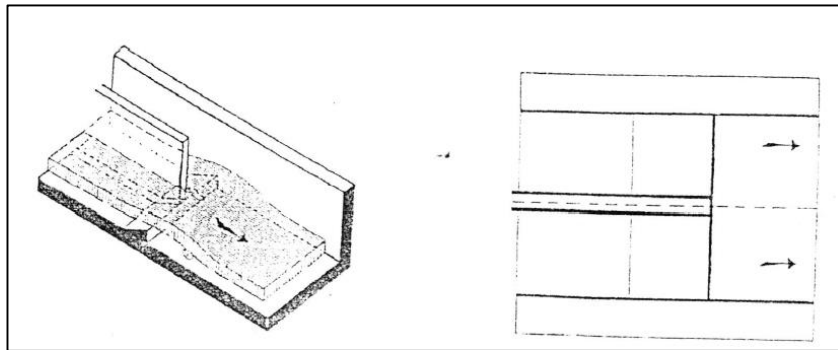
Klasik bir havalandırıcı genelde, kanal yüzeyine yerleştirilmiş genişlik boyunca bir oluk, akımı tabandan ayırmak için bir rampa ve/veya eşik ve su jeti altındaki oluğu atmosfere açan hava besleme bacalarından oluşur. Farklı tiplerde olmasına karşın genelde hepsinin çalışma prensibi aynıdır. Farklı tipteki havalandırıcıların özellikleri incelenmiş ve genelde bir rampa (saptırıcı), bir eşik (basamak) ve bir oluktan oluşan tasarımın en iyi tasarım olduğunu belirtmiştir [4]. Çok sayıda havalandırıcı tipinin davranışları Volkart ve Chervet [19] tarafından fiziksel modeller üzerinde incelenmiştir.

Şüt kanalı yüzeyine yerleştirilen saptırıcı (rampa) ve eşikler katı cidar yakınındaki su akımının tabi havalandırılmasını sağlamakta kullanılan en basit ve pratik yapıdır. Tabandaki beslemenin aniden kesilmesi, yüksek su hızının havayı yoğun bir karışım içine sürüklediği yer boyunca hava-su ara yüzeyi oluşturur (Şekil 2.3, a, b, d). Tabana yerleştirilen bir oluk jet altındaki boşluğa hava girişi sağlamak için herhangi bir şekilde yerleştirilebilir (Şekil 2.3, c, e, f).

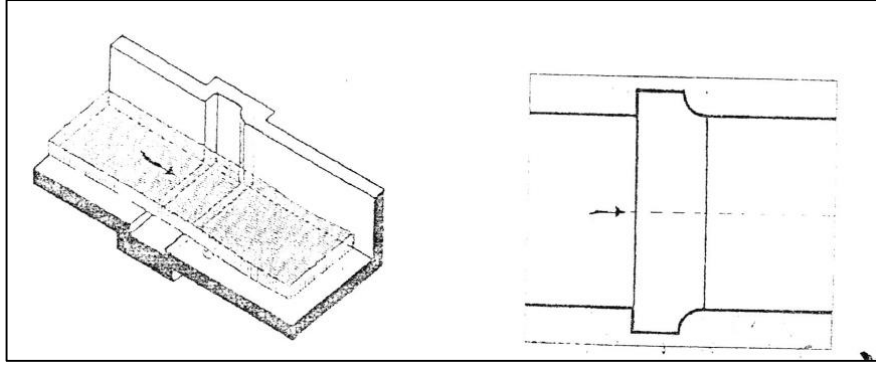


Şekil 2.3 Temel havalandırıcı tipleri [5, 18]

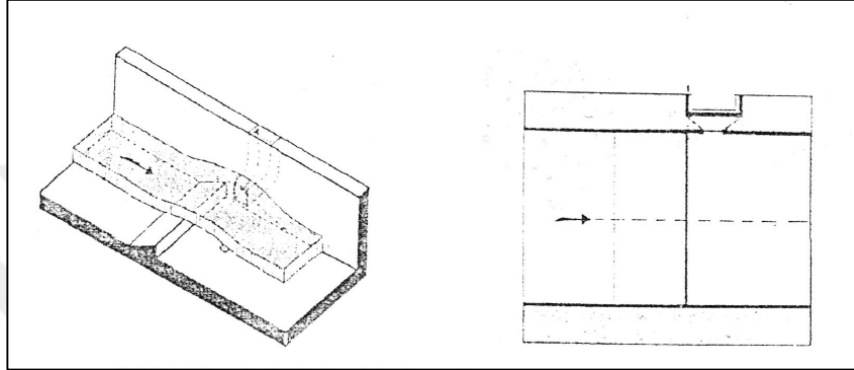
Özel bacalar, duvar yarıkları, oluklar veya kanallar, basamak veya saptırıcının mansabındaki boşluk hava girişini sağlamak için kullanılır. Farklı hava giriş şekillerine sahip bazı havalandırıcı tipleri Şekil 2.4 - 2.8’de gösterilmiştir. Yeni Zelanda’daki Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısında hava girişi, Şekil 2.4’de görüleceği gibi sonlandırılmış bir orta duvarın yardığı akım boşluğundan sağlanır. Calacucia Barajı (Fransa) havalandırıcısında, kenar duvarlara ve tabana gömülmüş oluklardan hava girişi sağlanmıştır (Şekil 2.5). Foz do Areia Barajı (Brezilya) havalandırıcısında, jet altındaki boşluğa, kenar duvarlara yerleştirilmiş bacalar vasıtasıyla hava girişi sağlanır (Şekil 2.6). Montaro (Peru) ve Ait Chouarit (Fas) Barajları havalandırıcılarında, kenar duvarlardaki eşik sayesinde akıma hava girişi sağlanır (Şekil 2.7 ve 2.8) [20].



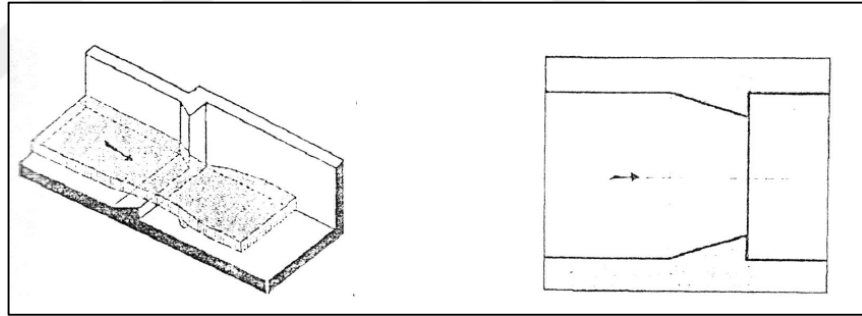
Şekil 2.4 Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısı, Yeni Zelanda [20]



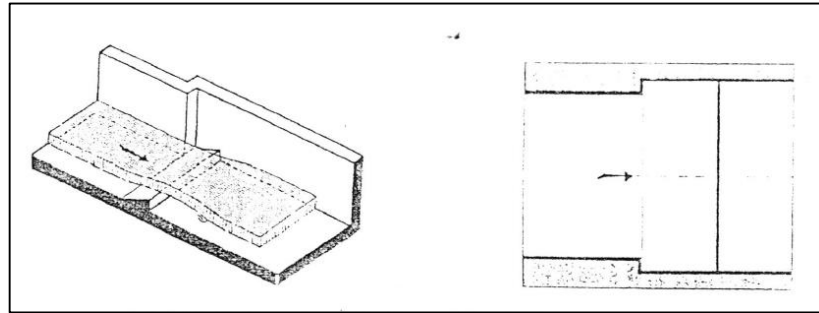
Şekil 2.5 Calacucia Barajı dolusavak havalandırıcısı, Fransa [20]



Şekil 2.6 Foz do Areia Barajı dolusavak havalandırıcısı, Brezilya [20]



Şekil 2.7 Mantaro Barajı dolusavak havalandırıcısı, Peru [20]



Şekil 2.8 Ait Chouarit Barajı dolusavak havalandırıcısı, Fas [20]

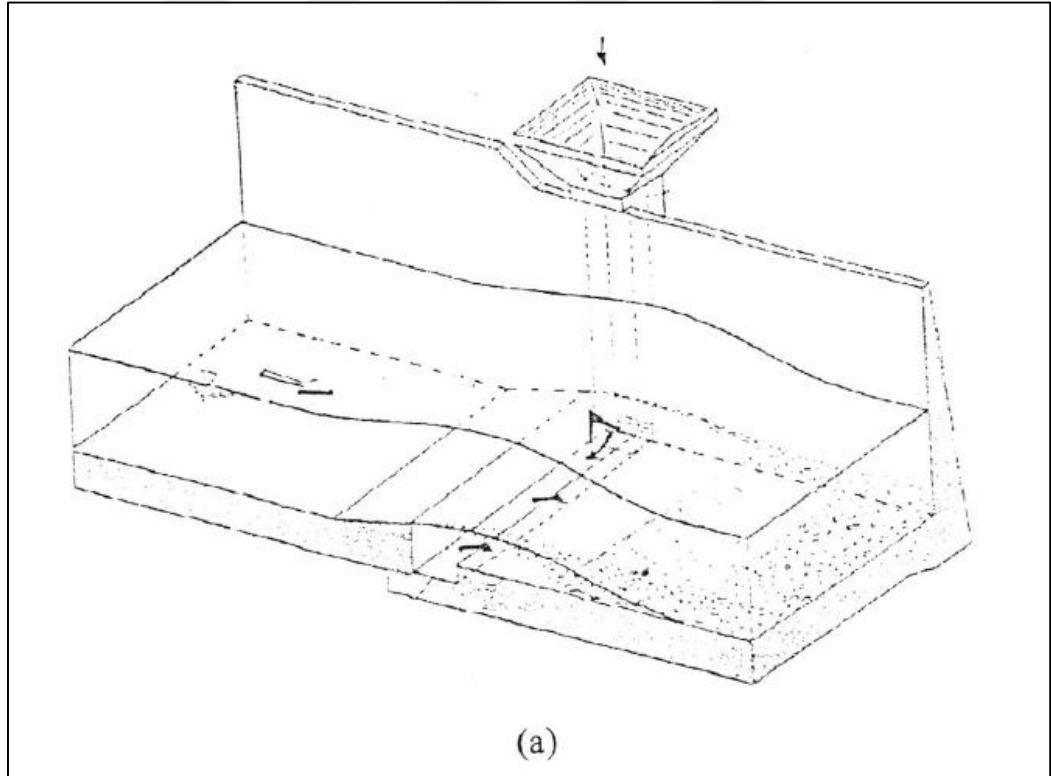
Tasarım açısından temel havalandırıcı şekilleri aşağıdaki şartları sağlamalıdır [20]:

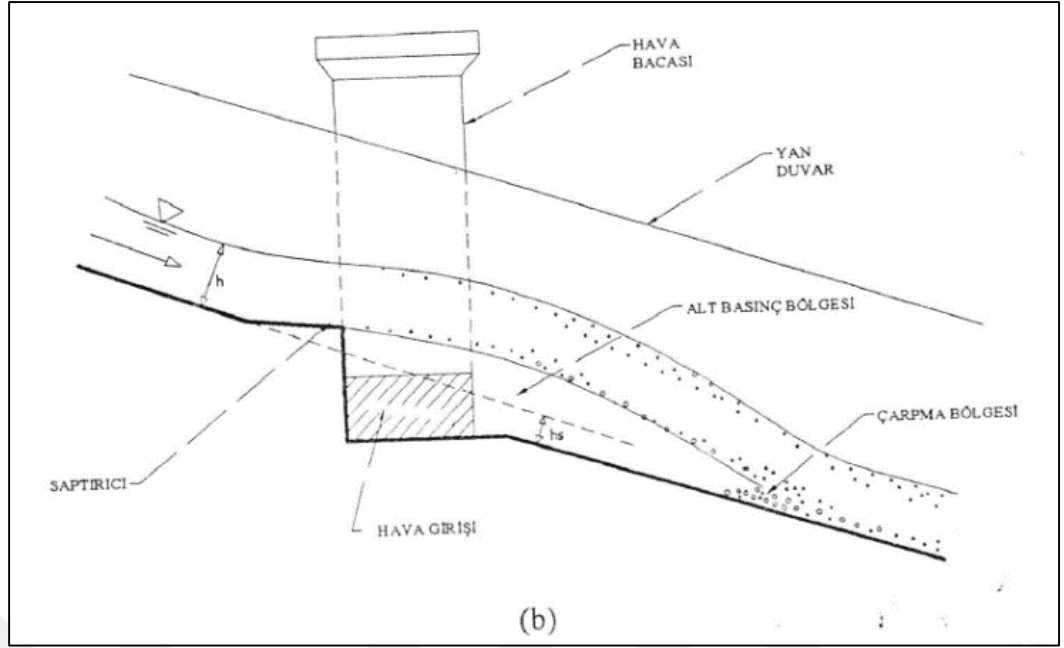
- Şüt kanalı uzunluğu boyunca tabandaki minimum hava gereksinimi sağlamalı;

- Basınç sayısının yükselmesiyle, hava giriş oranının düşüşü kabul edilebilir derecede az olmalı,
- Ana havalandırma bacalarının kesitleri yeterli olmalı,
- Kavitasyon hasarını kendi kendine önleyecek, yeterince ekonomik ve basit tasarım gerektiren aygıtlar kullanılmalıdır.

Rutschmann, hava giriş performansı bakımından havalandırıcı model datalarını analiz etmiş ve bu analiz sonucuna dayanarak, verilen akım durumları ve hava sağlayıcı sistem için optimum havalandırıcı geometrisinin belirlenebileceği sonucuna varmıştır. Genel olarak Rutschmann (1988)'in bulguları aşağıdaki maddeleri içerir [21]:

- Boşluk altbasınçlarının geniş bir aralığında, dik bir rampa iyi bir performans sağlar.
- Nispeten düz bir rampa yüksek basınçlar için biraz daha iyi performans sağlar.
- Bir eşik, yalnızca düşük altbasınçlar için havalandırıcı performansını iyileştirir ve altbasınçların yükselmesiyle performans aniden düşer.





Şekil 2.9 Klasik bir havalandırıcının görünüşleri; a) 3 boyutlu, b) Boykesit [5, 17]

DeneySEL bir kural olarak, yeterli hava girişı için jet uzunluğunun, rampa veya eşikteki akım derinliğine oranının (L_j/h) 3-5 aralığında olması gerektiğı aktarılmıştır [5]. Bu kriter Guri Barajı dolusavak şüt kanalı havalandırmasında kullanılmıştır. Bununla birlikte, Pinto'ya göre de $L_j/h=3-5$ aralığında olmalı, fakat havalandırmanın memnun edici düzeyde olması için L_j/h değerin 5 den fazla olması gerekir. $L_j/h=3-5$ aralığında seçilmesi hidrolik modeller için iyi bir kural olarak benimsenebilir [5, 17]. Havalandırıcı rampa veya saptırıcı yüksekliğinin genelde 0.1-0.8 m, basamak veya eşik yüksekliklerinin de genelde 0.3-1.0 m aralığında alınması tavsiye edilmektedir [6].

2.2.5. Hava Giriş Oranı

Dolusavak havalandırıcıların havalandırma performansının belirlenmesinde kullanılan boyutsuz *hava giriş oranı (katsayısı)* birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Bu parametre denklem (2,1)'deki gibi giren hava debisinin su debisine oranı olarak tanımlanır.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (2,1)$$

burada; β : Hava giriş oranı (veya katsayısı), Q_a : Giren hava debisi (m^3/s), Q_w : Suyun debisi (m^3/s)'dir.

Bir havalandırıcı tarafından sağlanan hava miktarının hesabı için birçok denklem önerilmiştir. Bu denklemlerin hepsi görünüşte tamamen farklıdır fakat genelde akım

(su hızı, Froude sayısı gibi) ve havalandırıcı (jet uzunluğu, boşluk alt basınçları gibi) karakteristiklerini içerir. Hava giriş oranını tanımlamak için araştırmacılar genel olarak iki yaklaşım sunar. Birincisi, Froude sayısı (Fr), Euler sayısı (E veya P_N boşluk altbasınç sayısı) ve şüt ve havalandırıcı geometrisi gibi parametrelerin havalandırıcı performansı üzerindeki etkilerinin dikkate alındığı direkt yaklaşımdır. İkincisi ise, Pinto ve diğ. [17] tarafından sunulan ve β 'nın, dolaylı olarak diğer parametrelerin çoğunu temsil eden jet uzunluğuna (L_j) bağlı değişimini öngören endirekt yaklaşımdır. Bu iki yaklaşımda da yüzey gerilimi kuvvetlerini temsil eden Weber sayısının (We), viskoz kuvvetleri temsil eden Reynolds sayısının (Re) ve türbülansın etkileri ihmal edilir. Bu durumda deneysel çalışmalarda ölçek etkilerine dikkat edilmesi gerekir.

2.2.5.1. Birinci Yaklaşım (Direkt Yaklaşım)

Bu yaklaşımda, hava girişi üzerinde etkili tüm parametreler dikkate alınır. Bir havalandırıcının hava ihtiyacı, alt basınçları ifade eden basınç sayısı veya Euler sayısı, Froude sayısı ve havalandırıcı ve şüt geometrisine bağlı olarak incelenir.

Bir havalandırıcının sağlayacağı hava miktarı, havalandırıcı boşluk alt basıncının (ΔP) karekökü ile doğru orantılı olduğu bir orifise benzetilebilir. Model ölçeğinin Reynolds ve Weber etkilerinin üstesinden gelecek kadar büyük seçilmesi durumunda, havalandırıcı performansının (2,2) denklemiyle belirlenebileceği ifade edilmiştir [3]:

$$q_a = c\sqrt{\Delta P} \quad (2,2)$$

burada; q_a : Birim hava debisi ($m^3/s/m$), c : Deneysel bir katsayı, ΔP : Atmosfer basıncı ile nap altı basınçların farkı (rölatatif basınçlar dikkate alınır; boşluk alt basıncı diye adlandırılabilir) (N/m^2). Bu bağıntı hava sağlama sisteminin boyutlarına bağlı olacaktır.

Bir havalandırıcıdan sağlanan havalandırma debisi boşluk alt basınçlarına bağlı olarak (2,3) denklemiyle ifade edilmiştir [22, 23]:

$$Q_a = C_D A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_a}} \quad (2,3)$$

burada; C_D : Hava sağlama bacasının debi katsayısı, A : Hava bacasının kontrol alanı (m), ρ_a : Havanın yoğunluğu (kg/m^3), B : Kanal genişliğidir (m). Birim şüt kanalı genişliğindeki efektif baca alanı ile ifade edilir. Böylelikle havalandırıcının sağlayacağı hava giriş oranı, aşağıdaki boyutsuz değişkenlere göre yazılabilir [24]:

$$\beta = f\left(\text{Fr}, \frac{D_a}{h}, \alpha, \theta, \frac{t_r}{h}, \frac{t_s}{h}\right) \quad (2,4)$$

Buna bağılı olarak Pinto (1992) aşağıdaki fonksiyonu düzenlemiştir [24]:

$$\beta = \alpha(\text{Fr} - K)^b \left[\frac{(t_r - t_s)}{h} \right]^c \left(\frac{D_a}{h} \right)^d \quad (2,5)$$

burada; a, b, c, d ve K : Deneysel sabitler, h : Akım derinliği (m), α : Dolusavak şüt kanalı eğim açısı, θ : Rampa eğim açısı, t_r : Rampa yüksekliği (m), t_s : Eşik yüksekliği (m), Fr : Froude sayısıdır. Buradaki a, b, c ve d deneysel katsayıları en küçük kareler yöntemiyle Pinto tarafından %99 korelasyon ile elde edilmiş ve (2,6) denklemi düzenlenmiştir [22]:

$$\beta = 0.47(\text{Fr} - 4.5)^{0.59} \left(\frac{D_a}{h} \right)^{0.6} \quad (2,6)$$

$(t_r + t_s)/h$ parametresinin üssü 0.05'den küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Yani bu parametrenin hava girişi üzerine etkisi azdır ve D_a/h parametresinin etkisi önemlidir. Burada D_a/h parametresinin, dolaylı olarak boyutsuz jet uzunluğu ($\lambda_j = L_j/h$) yerine kullanıldığı ayrıca belirtilmiştir [24].

Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısı için hava giriş oranının Froude ve basınç sayısına göre değişimi, Volkart ve Rutschmann [20] tarafından denklem (2,7) ile ifade edilmiştir.

$$\beta = K_1(\text{Fr} - K_2) - K_3 \left(\frac{\Delta P}{\rho gh} \right)^n \quad (2,7)$$

burada; β : Hava giriş oranı (katsayısı), ΔP : Atmosfer basıncı ile su jet altındaki boşluk basıncı farkı (N/m^2), K_1, K_2, K_3 : Havalandırıcı ve şüt geometrisine bağılı deneysel katsayılar, n : Deneysel bir üstür. Eşik yüksekliği sıfır olması halinde n birim olarak alınabilir [5]. Katsayılar Foz do Areia, Guri ve Amaluza Barajlarının dolusavaklarından alınan datalardan elde edilmiştir. Bu katsayılar Tablo 2.1 'de verilmiştir [15]. Tabloda belirtilen barajlar için katsayılar hesaplandığından bu denklem sadece belirli geometrideki havalandırıcılar için uygulanabilir.

Verilen bir havalandırıcının hava giriş oranı aşağıdaki denklemle tanımlanabilir [25]:

$$\beta = c_1 \Delta F^{1.5} (1 - c_2 P_N) \quad (2,8)$$

burada; c_1 ve c_2 : Havalandırıcı ve şüt geometrisine bağılı katsayılar, $\Delta F = \text{Fr} - F_c$ (F_c kritik Froude sayısı), $P_N = \Delta P / \rho_w gh$ (Boyutsuz basınç sayısı).

Tablo 2.1 Denklem (2,7)'deki katsayılar [15]

Baraj Adı	Şüt Eğimi (%)	Rampa Yüks.(m)	Rampa Eğimi	K_1	K_2	K_3
Foz do Areia	25.84	0.2; 0.15	7.1	0.1713	4.9400	1.0000
Guri	58	0.1	2.0	0.0298	3.1007	0.0035
Amaluza	240	0.06	5.7	0.2151	5.9131	0.5744

Havalandırıcılar tarafından sağlanan hava debisi, atmosfer alt basınçlarının ve verilen havalandırıcı geometrisi için akım durumlarının bir fonksiyonu olarak Clyde Barajı üzerinde çalışılmıştır [12, 14, 16].

2.2.5.2. İkinci Yaklaşım (Endirekt Yaklaşım)

Bu yaklaşımda, jet uzunluğunun rölatif hava debisi üzerinde öncelikli etkisinin olduğu kabul edilir. Bu şekilde havalandırıcı geometrisi, boşluk altbasınçlar gibi değişkenler jet uzunluğuyla ifade edilmiş olur. Jet altındaki atmosfer altı basınçlar ihmal edilerek, hava ihtiyacı için (2,9) denklemi elde edilmiştir [9].

$$q_a = \frac{(gx^2 \tan \alpha)(f/8)^{0.5}}{U \cos^2 \alpha} + Ux \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \quad (2,9)$$

burada; q_a : Birim hava debisi ($m^3/s/m$), x : Havalandırıcı üzerindeki jetin başlangıcından çarpma bölgesine olan yatay mesafe (m), f : Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı, U : Ortalama su hızı (m/s), α : Şüt kanalı taban eğimi, g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2) 'dir. Küçük eğimler için denklem (2,9) aşağıdaki şekilde kısaltılabilir:

$$q_a = \left(\frac{f}{8}\right)^{0.8} UL_j \quad (2,10)$$

burada; L_j : Su jetinin uzunluğu (m)'dir. Jet uzunluğu, su jetinin başladığı yerden havalandırıcının mansabında şüt kanalı üzerindeki maksimum basınç noktasına olan uzaklık olarak alınabilir. Falvey ve Ervine [9], (2,9) ve (2,10) denklemlerinin yalnızca L_j/h oranının 50'den küçük olması durumunda kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. denklem (2,10) birçok araştırmacı tarafından aşağıdaki şekilde kabul görmüştür.

$$q_a = KUL_j \quad (2,11)$$

buradaki K boyutsuz bir katsayıdır. Denklem (2,11) hava giriş oranının, debinin değil akım hızının açık bir fonksiyonu olduğunu işaret eder ve hava giriş oranı üzerinde jet uzunluğunun doğrusal bir etkisi olduğunu ortaya koyar. Denklem (2,11); $q_w = Uh$ ile bölünürse, hava giriş oranı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\beta = q_a/q_w = K(L_j/h) \quad (2,12)$$

Birkaç özel havalandırıcı tipi için bazı araştırmacılar tarafından denklem (2,12) önerilmiştir [20]. Pinto ve Neidert [26], denklem (2,11)'in kullanımı ile ilgili kapsamlı araştırmalar yapmışlar ve bu denklemin bir havalandırıcının hava giriş kapasitesini iyi bir şekilde açıkladığını ve K katsayısının havalandırıcı geometrisi ve boyutsuz akım karakteristiklerinin (Froude ve Euler sayıları gibi) bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışmalarında K katsayılarını 0.01-0.08 aralığında tanımlamışlardır [26]. Hamilton (1984), K değerleri için 0.01-0.05 aralığını önermiştir. Pinto [17], Foz do Areia Barajı dolusavağının üç havalandırıcısı için K değerini simetrik havalandırma halinde 0.033, asimetrik havalandırma halinde 0.023 olarak elde etmişlerdir. Guri Barajı dolusavağı için K 'nın 0.01-0.035 aralığı aktarılmıştır [5]. Emborcacao Barajı dolusavağının orta havalandırıcısının K değeri 450-2800 m³/s debiler için 0.033 olarak verilmiştir. Denklem (2,12) için bu katsayılar benzer bazı havalandırıcılara uygulanabilir ancak genel olarak uygulanabilir değildir.

Rutschmann [21], hava giriş oranı için aşağıdaki iki denklemi sunmuştur. Bu denklemler model çalışmalarından tanımlanmış ve Foz do Areia, Amaluza, Emborcacao ve Colbun Barajlarındaki prototip ölçümleriyle iyi bir uyum sağlanmıştır.

$$\beta = 0.0372(L_j/h) - 0.2660 \quad (2,13)$$

$$\beta = 0.0372(L_j/h) - 0.0061Fr^2 - 0.0859 \quad (2,14)$$

Bu denklemlerin oldukça geniş bir geometri ve akım şartlarına uygulanabilirliği görülmesine rağmen, Rutschmann bu iki denklem için uygulama sınırları vermiştir. Rutschmann bu iki denklemin, (2,7) denkleminden daha iyi sonuç verdiğini vurgulamıştır. Ancak Rutschman'ın bu denklemleri bazı geometrilere uygulanmış ve uygun olmayan değerler alınmıştır. Hatta bu denklemlerden negatif değerler bile alınabilmektedir. Dolayısıyla bu denklemler genel olarak uygulanabilir değildir. Sıfır boşluk alt basıncındaki boyutsuz jet uzunluğuna bağlı olarak hava giriş oranı Rutschmann ve Hager [25, 27] tarafından (2,15) denklemiyle tanımlanmıştır:

$$\beta = \frac{0.03(\lambda_{max} - 5)}{1 + 0.0085 \frac{Fr}{\phi} \lambda_{max}} \quad (2,15)$$

$$\phi = \frac{A_a}{Bh} \left(0.43(1 + 2\xi_{tot}) \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \quad (2,16)$$

Denklem (2,15) ve (2,16)'daki; ξ_{tot} : Hava sağlama sistemindeki yük kaybı katsayısı ($\xi_{tot}=0.55$ alınabilir), A_a : Hava giriş alanı (m^2), B : Şüt kanalı genişliği (m), λ_{max} : Maksimum rölatif jet uzunluğudur ($\lambda_j = L_j/h$). λ_j teriminin yer aldığı denklemleri kullanabilmek için jet uzunluklarının hesaplanması gerekir. Denklem (2,15)'deki maksimum rölatif jet uzunluğu, sıfır alt basınçlar için olup, “*Jet Uzunluğu*” başlığı altında denklem (2,45) ile verilmiştir.

Kökpınar ve Göğüş, rampa ve eşiğin birlikte kullanıldığı bir havalandırıcının alt ve üst naptan giren hava miktarını jet uzunluğuna bağlı olarak belirlemek için fiziksel model deneyleri yürütmüşlerdir [29]. Bu model deneyi Demiröz [28] tarafından yapılarına benzetilmektedir. Demiröz sadece bir rampa kullanmıştır. Alt nap için eşik üzerine yerleştirilen hava giriş borusundan hava hızları ve dolayısıyla debileri ölçülmüştür. Kanal boyunca statik basınçlar ölçülmüş ve en büyük basınç noktası jetin çarpma noktası kabul edilerek jet uzunlukları hesaplanmıştır. Alt nap boyunca giren hava oranı için aşağıdaki denklem önerilmiştir:

$$(\beta_{alt})_e = 0.0189 \left(\frac{L_j}{h} \right)^{0.83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w} \right) (1 + \tan \alpha) \right]^{0.24} \quad (2,17)$$

Bu denklem bazı limitlerle sınırlandırılmıştır: $0^\circ \leq \theta \leq 9.45^\circ$; $0 \leq \tan \alpha \leq 1.25$; $5.56 \leq Fr \leq 10.00$; $0 \leq t_r/t_s \leq 0.8$; $0 \leq t_r/h \leq 0.4$; $0.02 \leq A_a/A_w \leq 1$ ve $109 \leq We \leq 182$. Burada; $(\beta_{alt})_e$: Deneysel alt nap hava giriş oranı, t_r : Rampa yüksekliği (m), t_s : Eşik yüksekliği (m), A_a : Hava giriş enkesit alanı (m^2), A_w : Havalandırıcı membasındaki akımın enkesit alanı (m^2), θ : Rampa ile şüt arasındaki eğim açısı, α : Şüt kanalı eğim açısıdır. Bu denklemin beklenen ölçek etkilerini gidermek için Pinto [22] tarafından yayınlanan Brezilya'daki Foz do Areia ve Emborcacao Barajı ve Türkiye'deki Keban Barajı havalandırıcılarından elde edilen prototip dataları kullanılmış ve aşağıdaki denklemler sunulmuştur [29]:

Simetrik havalandırıcılar için;

$$[(\beta_{alt})_p]_c = \xi' (\beta_{alt})_e^{\varepsilon'} \quad (2,18)$$

Asimetrik havalandırıcılar için;

$$[(\beta_{alt})_p]_c = \xi'' (\beta_{alt})_e^{\varepsilon'} \quad (2,19)$$

buradaki, c indisi hesap değerini, p indisi prototipi, e ise deneysel değerleri temsil eder. Eklemdaki katsayılar $\xi'=5.194$, $\xi''=4.186$, $\varepsilon'=1.150$, $\varepsilon''=1.388$ olarak elde edilmiştir [29].

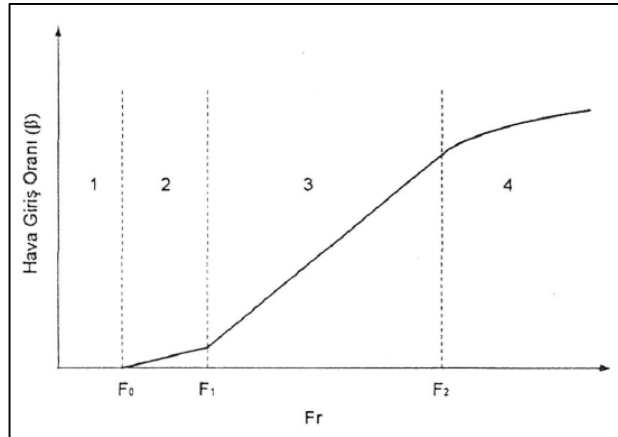
2.2.5.3. Froude Sayısının Hava Girişine Etkisi

Chanson [16], verilen bir su derinliği ve havalandırıcı geometrisi için ve sabit basınçlar akında $\beta = f(\text{Fr})$ bağıntısını incelemiş ve bu fonksiyonun değişimini, dört farklı bölgeye ayırmıştır (Şekil 2.9): Birinci bölgede, kritik bir hızın ($U_c=0.80\text{m/s}$) altında hava girişi olmadığı kabul edilir. Kritik hıza karşılık gelen karakteristik bir Froude sayısı tanımlanmıştır ($F_0 = U_c/\sqrt{gh}$). Dolayısıyla bu bölgede $\text{Fr}<F_0$ için hava girişi olmayacağı savunulur. İkinci bölgede $F_0<\text{Fr}<F_1$ aralığındadır ve hava girişi karışım bölgesinde gerçekleşir. Bu bölgede alt ve üst nap hava girişi olmaz. Üçüncü bölgede rölatif hava debisi Froude sayısı ile doğrusal olarak artar ve bu bölgede hava, serbest yüzeye yakın yüksek türbülans girdaplarıyla girer ($F_1<\text{Fr}<F_2$). Üçüncü bölgedeki hava girişi aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$\beta = K_1(\text{Fr} - F_1) \quad (2,20)$$

Buradaki F_1 sayısı nap hava girişinin başladığı Froude sayısı olarak kabul edilir. Denklem (2,20)'deki F_1 ve K_1 sayıları istatistiksel çalışmalar sonucu elde edilmiştir [16]: $F_1 = f_1 + E_1\sqrt{P_N}$, buradaki E_1 ve f_1 aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$E_1 = 23.51(d/t_s)^{-3/2}$, $f_1 = -8.17 + 5.77(d/t_s) - 0.605(d/t_s)^2$, $K_1=0.2$ (Rampa açışı 5.7°), $K_1=0.06$ (Rampa yok). Bu denklemlerdeki; d : Denklem (2,31)'de tanımlanacak karakteristik derinlik (m), t_s : Eşik yüksekliği (m), P_N : Basınç sayısıdır ($P_N = \Delta P/(\rho_w g d)$). Denklem (2,20), Clyde Barajı dolusavak modeli üzerindeki deneysel datalarla iyi bir uyum sağlamasına rağmen, farklı dolusavak eğimleri veya farklı geometrideki havalandırıcılar için genel olarak uygulanabilir değildir [16].



Şekil 2.10 Chanson'a göre Fr sayısı ile hava giriş oranının değişimi [16]

Dördüncü bölge ($\text{Fr}>F_1$) yüksek Froude sayıları için tanımlanmıştır. Bu bölgede hava girişi, alt ve üst nap girişleriyle olur ve akımın hava taşıma kapasitesiyle sınırlıdır. Bu bölgedeki hava giriş oranı aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$\beta = K_2\sqrt{\text{Fr} - F_2} \quad (2,21)$$

Burada, K_2 katsayısı ve F_2 Froude sayısı farklı geometriler için deneylerden elde edilebilir [16].

Başka araştırmacılar tarafından da, sadece Froude sayısının hava giriş oranı üzerindeki etkilerini gözlemlemek için sıfır altbasınçlarda (atmosfer basıncına eşit altbasınçlar), β 'nın Froude sayısı ile değişimi incelenmiştir. Buna göre verilen bir geometri için Froude sayısının yaklaşık 6,2 değerinden daha büyük değerleri için β 'nın Froude sayısı ile doğrusal arttığı gözlenmiştir [20].

2.2.5.4. Diğer Yaklaşımlar

Bir havalandırıcı tarafından sağlanan hava giriş oranının bağlı olduğu büyüklüklerle değişimi deneysel ve analitik olarak Rutschmann ve Hager [25, 27] tarafından incelemiş ve aşağıdaki sonuç ve bağıntılar bulunmuştur:

I. β 'nın Euler sayısı ile değişimi:

$$\frac{\beta}{\beta_{max}} = \left[\frac{2}{\pi} \arctan(3 \cdot 10^{-3} \Delta E) \right]^\xi \quad (2,22)$$

burada, $\Delta E = E - E_{min}$, $E = pU^2/\Delta P$ (Euler sayısı), β_{max} : Sıfır boşluk altbasınçları için hava giriş oranıdır. Deneysel olarak $\xi=0.70\sim0.80$ aralığında elde edilmiştir. E_{min} , $\beta=0$ için Euler sayısıdır.

$$10^{-3}E_{min} = \frac{1}{2.3} (\tan\theta)^{1.15} \exp[1.15(\tan\alpha)^2] + \frac{1}{3} \left(\frac{t_s}{h} \right)^2 \quad (2,23)$$

burada; θ : Rampa eğim açısı, α : Şüt kanalı eğim açısı, t_s : Eşik yüksekliği (m), h : Havalandırıcıdan önceki akıma dik su derinliğidir (m).

II. Deney düzeneğinde boşluk alt basınçlarını gidermek için bir hava üfleyicisi kullanılmış ve böylece Euler sayısı etkisi elenerek Froude sayısının etkisi incelenmiştir. $\Delta P=0$ olduğunda, β_{max} elde edilecektir.

$$\beta_{max} = 0.45c(Fr - 5.4)^\varepsilon \quad (2,24)$$

buradaki ε ve c katsayıları havalandırıcı ve şüt kanalı geometrilerine bağlı olarak elde edilir. Bu denklem $Fr>6$ için geçerlidir.

III. Havalandırıcı rampası eğrisinin (θ) etkisi:

$$\beta_{max} = c_a(\tan\theta)^{1.15}(Fr - 5.4)^\varepsilon \quad (2,25)$$

burada; c_a önemli ölçüde dolusavak şüt eğimine bağlı orantılık katsayısıdır.

IV. Dolusavak eğiminin (α) etkisi:

$c = \exp[(1.15 \tan\alpha)^2]$ olarak elde edilmiş ve bu durumda denklem (2,25) yeniden yazılmıştır:

$$\beta_{max} = (\tan\theta)^{1.15} \exp[1.15(\tan\alpha)^2](Fr - 5.4)^\varepsilon \quad (2,26)$$

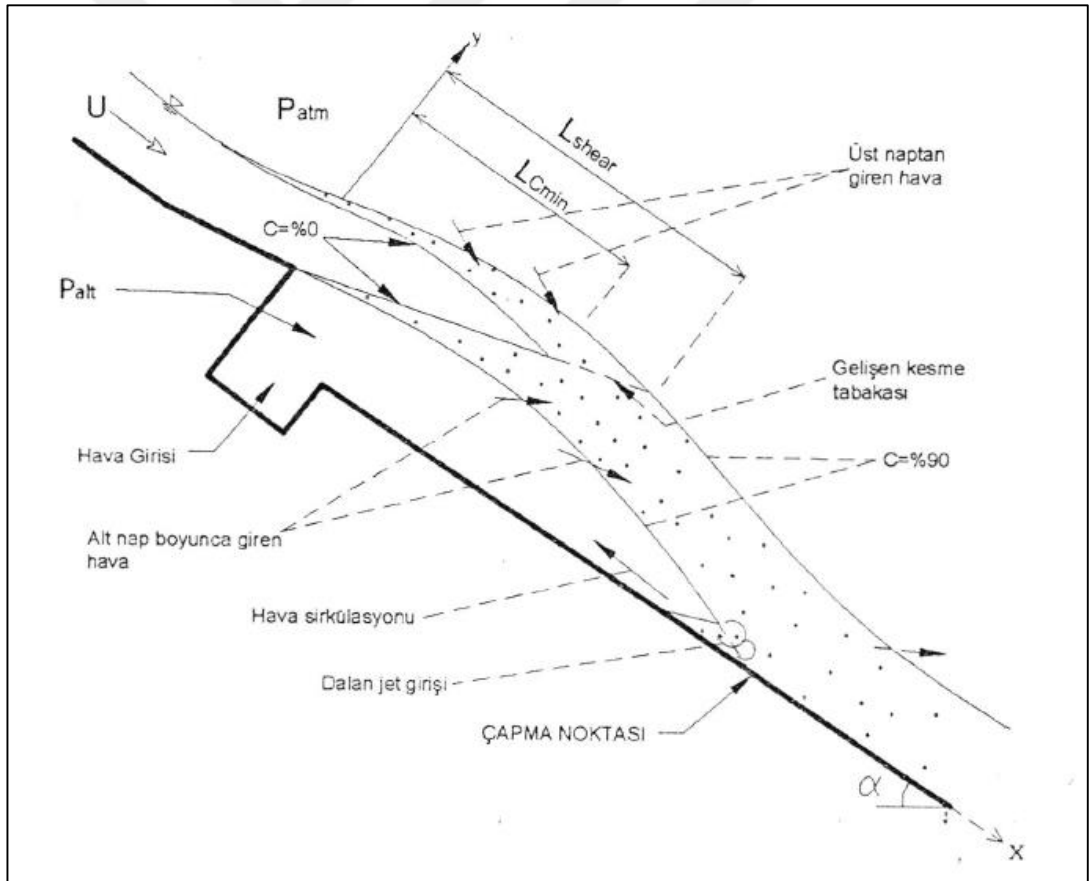
V. Boyutsuz jet uzunluğunun ($\lambda_j = L_j/h$) bir fonksiyonu olarak (2,27) denklemi elde edilmiştir.

$$\beta_{max} = 0.030(\lambda_j - 5) \quad (2,27)$$

Bu denklem $12 > Fr > 6$ için verilmiştir. Buradaki λ_j değeri “*Jet uzunluğu*” başlığı altında incelenmiştir.

2.2.5.5. Nap Hava Girişleri

Chanson [14] klasik bir havalandırıcı üzerindeki hava girişlerini Şekil 2.11’deki gibi göstermiştir. Şekilde görüleceği gibi, L_{Cmin} uzunluğunda hava karışimsız net bir su bölgesi mevcuttur. Saptırıcı sonundan itibaren kesme tabakasının serbest yüzeyi kestiği uzunluk ise L_{shear} olarak adlandırılmıştır. Alt ve üst serbest yüzeylerde ara yüzey olarak hava konsantrasyonunun %90 olduğu yüzey alınmıştır. Şekilde alt nap ve üst nap boyunca hava girişleri gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Bir havalandırıcı üzerindeki hava girişleri [14]

Alt ve üst nap boyunca giren hava, nap girişi diye adlandırılır. Eğer su jeti yeterince uzunsa jetin merkez çekirdeği havalandırılmış olur ve jetin alt ve üst kısım arasındaki hava transferi gerçekleşir. Bu bölgeye *tam havalandırılmış bölge* denir.

Böylece savak tabanına üst naptan da hava ulaşabileceği gibi havalandırıcıdan alt nap boyunca giren hava da dışarı çıkabilir.

Chanson [12, 13], havalandırma bölgesindeki farklı hava girişlerini tanımlamış ve süreklilik denklemini kullanarak aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir:

$$Q_a^{max} = Q_a^{üst} + Q_a^{alt} + (Q_a)_0 \quad (2,28)$$

burada; Q_a^{max} : Jetin sonundaki girmiş hava debisi, $Q_a^{üst}$: Jetin üst napından giren hava debisi, Q_a^{alt} : Jetin alt napından giren hava debisi (havalandırıcı tarafından sağlanan hava), $(Q_a)_0$: Saptırıcının (rampa) sonundaki başlangıç serbest yüzey havalandırmasıdır. Chanson [12], havalandırıcı üzerindeki su jetinin alt ve üst nap arasında kalan toplam hava girişini, hava konsantrasyonuna bağlı olarak (2,29) denklemiyle ifade etmiştir.

$$q_a^T = \int_{Y_{90}^L}^{Y_{90}^U} C \cdot U_a \cdot dy \quad (2,29)$$

burada, q_a^T : Alt ve üst nap arasında kalan birim hava debisini ($m^3/s/m$), Y_{90}^U , Y_{90}^L : Sırasıyla üst ve alt naplara yakın %90 hava konsantrasyonu için tanımlanmış karakteristik derinlikleri (m), C : Hava konsantrasyonunu, U_a : Ortalama hava hızını(m/s), y : Akıma dik değişen derinliği gösterir (m). Boyutsuz hava giriş oranı aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$\beta^T = \frac{q_a^T}{q_w} = \frac{Y_{90}^U - Y_{90}^L}{d} - 1 \quad (2,30)$$

buradaki d karakteristik derinlik olup (2,31) denklemiyle hesaplanır [4, 12]:

$$d = \int_0^{Y_{90}} (1 - C_0) dy \quad (2,31)$$

Akan bir akışkan için ortalama hava konsantrasyonundaki ortalama bir derinlik, (2,32) denklemiyle tanımlanabilir [4]:

$$d = (1 - C_0)Y_{90} \quad (2,32)$$

Burada; C_0 ortalama hava konsantrasyonudur.

2.2.5.6. Üst Nap Hava Girişi

Kavitasyon hasarını önlemek için yapılan hava ölçümlerinin çoğu alt nap üzerinde olmuştur. Bununla birlikte, su jeti boyunca artan türbülans ve atalet etkileri yüzünden üst serbest yüzeyden giren hava miktarı alt naptan giren hava miktarıyla aynı veya daha fazla olabilir. Bu yüzden üst nap hava girişi, dolusavak tasarımının önemli

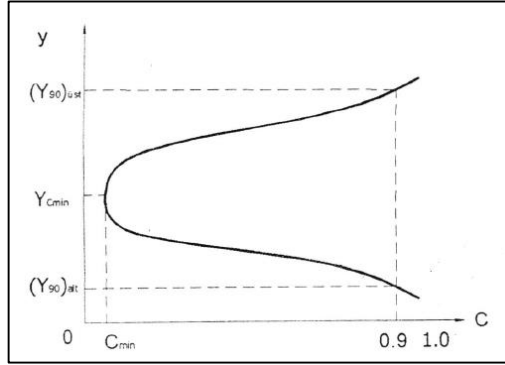
bir etkeni haline gelebilir [3]. Dolusavak şüt profili üzerinde gelişen sınır tabakasının serbest yüzeyle birleştiği yerin mansabından itibaren serbest yüzey havalandırmasının başladığı kabul edilir [30]. Sınır tabakasının serbest yüzeye ulaşması için gerekli şüt uzunluğu $L_\delta = 100 * h$ olarak alınabilir. Bu uzunluk $\delta = L_\delta \cdot 0.08(L/k_s)^{-0.233}$ denkleminde de bulunabilir. Buradaki, L_δ : Sınır tabakasının yüzeye ulaşması için akım yönünde gerekli mesafe, h : akıma dik su derinliği, δ : sınır tabakası kalınlığı, k : kum çakıl çapına eşit yüzey pürüzlülüğüdür [2].

Havalandırma bölgesinde üst naptan giren hava miktarı teorik olarak Chanson [12] tarafından sunulan aşağıdaki denklemlerle belirlenmiştir:

$$q_a^U = \int_{Y_{Cmin}^L}^{Y_{90}^U} C \cdot U \cdot dy \quad (2,33)$$

$$\beta^U = \frac{q_a^U}{q_w} = \frac{Y_{90}^U - Y_{Cmin}}{d} - \frac{\int_{Y_{Cmin}^L}^{Y_{90}^U} (1 - C) dy}{d} \quad (2,34)$$

denklem (2,33) ve (2,34)'deki, Y_{Cmin} : Jetin iç merkezinde belirlenen hava konsantrasyonunun minimum olduğu ($C = C_{min}$) akıma dik derinlik (Şekil 2.12), q_a^U :Üst naptan giren havanın birim debisi, β^U : Üst nap hava giriş oranı (katsayısı)dır. Bu denklemlerde, hava giriş miktarı yalnızca hava konsantrasyonunun bir fonksiyonudur [12].



Şekil 2.12 Havalandırma bölgesindeki akıma dik hava konsantrasyonu dağılımı [12, 14]

Chanson [14], serbest yüzeydeki hava kabarcıklarının yayılım denklemini analiz etmiş ve üst nap hava girişinin teorik bir çözümünü vermiştir.

$$\frac{Q_a^U}{Q_w} = K_0 \left[\frac{L_x}{h_0} \tan \psi^U - 2 \frac{(Q_a)_0}{Q_w} \ln \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tan \psi^U}{(Q_a)_0 / Q_w} \frac{L_x}{h_0} \right) \right] - 0.90 \frac{L_x}{h_0} \frac{u_r}{(U_w)_0} \cos \alpha \quad (2,35)$$

burada; Q_a^U : Üst naptan giren havanın debisi (m^3/s), Q_w : Su debisi (m^3/s), L_x : Saptırıcı sonundan itibaren yatay uzunluk (m), u_r : Negatif alt basınç dağılımına maruz hava kabarcıklarının yükselme hızı (m/s), U_w : Su hızı (m/s), h_0 : Saptırıcı sonundaki su derinliği (m), $(U_w)_0$: Saptırıcı sonundaki ortalama su hızı (m/s), ψ^U : Jetin yayılma açısı olup 0.75° alınabilir [14]. $K_0=0.1755$ olarak verilmiştir.

Chanson [12], havalandırma bölgesinde su jetinin üst naptan giren havanın ölçülmesinin mümkün olmadığını öne sürmüştür. Oysa üst naptan giren hava miktarı deneysel olarak Kökpınar ve Göğüş [29] tarafından ölçülmüştür. Model deneyleri sonucunda, üst nap hava girişi için aşağıdaki ampirik denklem önerilmiştir.

$$(\beta_{üst})_e = 0.0278(Fr)^{0.60} \left(1 + \frac{t_r}{h}\right)^{2.13} (1 + \tan\alpha)^{0.48} \quad (2,36)$$

buradaki e indisi deneysel sonuçları ifade eder. Bu denklem bazı limitler için verilmiştir: $0^\circ \leq \theta \leq 5.71$; $0 \leq \tan \alpha \leq 0.57$; $3.40 \leq Fr \leq 12.36$; $0 \leq t_r/h \leq 0.4$. Toplam hava giriş oranı $\beta = \beta_{alt} + \beta_{üst}$ şeklinde hesaplanabilir [29].

2.2.6. Hava Çıkışı

Deneysel sonuçlar çarpma bölgesinde kuvvetli bir hava çıkışı olduğunu göstermiştir. Fakat bu bölgedeki hava çıkışını ölçmek için yeni ölçüm aletleri geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Chanson [14] tarafından, hava çıkış işleminin öncelikle kanal tabanı ve jetin çarpma açısına bağlı olduğu bulunmuştur:

$$\frac{Q_a^{deaeration}}{Q_a^{max}} = 0.0762(\theta_i - \alpha) \quad (2,37)$$

burada; θ_i : Su jetinin tabana çarpma açısı (derece), α : Kanal eğimi (derece), Q_a^{max} : Jetin sonundaki akıma karışmış hava miktarı, $Q_a^{deaeration}$: Akımdan çıkan hava miktarıdır. Çarpma açısı jet yörünge denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Çarpma bölgesinin sonundaki akım havalandırması ise, $Q_a^{max} - Q_a^{deaeration}$ ile hesaplanabilir. Buna göre çarpma bölgesinin sonundaki ortalama hava konsantrasyonu (2,38) denklemiyle ifade edilmiştir:

$$C = \frac{Q_a^{max} - Q_a^{deaeration}}{Q_w + Q_a^{max} - Q_a^{deaeration}} \quad (2,38)$$

Deneysel sonuçlar göstermiştir ki, jet boyunca akım havalandırmasının maksimum %80'i çarpma bölgesinde kaybedilebilir. Hava çıkış miktarı denklem (2,37)'de anlaşılacağı gibi çarpma ve kanal tabanı açısına bağlı olarak artacağından,

sadece eşikli veya daha düz rampalı havalandırıcılar tasarlanarak çarpma açısının azaltılması tavsiye edilir. Saptırıcının sonundan $1.5L_j$ uzaklıkta mansap bölgesi akımının başladığı kabul edilir. Mansap bölgesindeki akım kendi kendine havalanan akım tanımlamasına uyar.

2.2.7. Jet Uzunluğu

Havalandırıcı tarafından oluşturulan su jetinin yörüngesi, hava giriş kapasitesi ve boşluk iç basıncı gibi havalandırıcının kapasitesini doğrudan ilgilendiren karakteristiklerin belirlenmesinde önemli rol oynar. Jet uzunluğu iki boyutlu çevrintisiz akım teorisinden hesaplanabileceği gibi deneysel ve sayısal yöntemlerle de hesaplanabilir. Tan [31], jet uzunluğu üzerinde basınç sayısının etkisini dikkate alan bir yaklaşım sunmuştur.

$$P_N = \frac{\Delta P}{\rho_w g h} \quad (2,39)$$

burada; P_N : Boyutsuz basınç sayısı, ΔP : Atmosfer basıncı ile boşluk alt basıncı arasındaki fark (N/m^2), ρ_w : Suyun yoğunluğu (kg/m^3), h : Yaklaşan akım derinliği (m)'dir. Tan [31] tarafından önerilen metotta P_N sayısı ölçülebilen veya hesaplanabilen bir niceliktir. Bu metotta jetin alt nap yörüngesi katı bir parçacık tarafından şekillendiği farz edilir. Jetin uçuş zamanı rampa ve eşik kombinezonlu havalandırıcı için tanımlanmıştır:

$$t = \frac{U \sin \theta}{g(\cos \alpha + P_N)} \left[1 + \sqrt{1 + 2(t_r + t_s) \frac{g(\cos \alpha + P_N)}{(U \sin \theta)^2}} \right] \quad (2,40)$$

Sadece eşikli havalandırıcılar için ise denklem (2,41) önerilmiştir.

$$t = \sqrt{\frac{2t_s}{g(\cos \alpha + P_N)}} \quad (2,41)$$

burada; U : Ortalama akım hızı (m/s), α : Şüt kanalı eğim açısı, θ : Rampa eğim açısı, t_r : Rampa yüksekliği (m), t_s : Eşik yüksekliği (m)'dir. Uçuş zamanı denklemi kullanılarak yörünge denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$L_j \frac{g \sin \alpha}{2} t^2 + U(\cos \alpha) t = 0 \quad (2,42)$$

Boyutsuz jet uzunluğu $\lambda_j = L_j/h$ olarak tanımlanır ki burada; L_j : Jet uzunluğu (m), h : Yaklaşan akımın derinliğidir (m). Boyutsuz jet uzunluğu teorik olarak sıfır boşluk altbasıncı için bulunmuştur [25].

$$\lambda_j = Fr^2 \bar{\theta} (1 + \bar{\theta} \tan \alpha) \cos^{-1} \alpha \left[\left(1 + 2T \frac{\cos \alpha}{(\bar{\theta} Fr)^2} \right)^{1/2} + 1 \right] + T \tan \alpha \quad (2,43)$$

Sadece eşik bulunması durumunda;

$$\lambda_j = (2T \cos^{-1} \alpha) Fr + T \tan \alpha, \bar{\theta} = 0 \quad (2,44)$$

denklemi kullanılır. Yukarıdaki parametre tanımlamalarına ek olarak burada; $T = (t_r + t_s)/h$ ve $\bar{\theta}$: sıçratma açısı olup $\bar{\theta} = \theta \sqrt{\tanh(t_r/(h\theta))}$ ile hesaplanır. Atmosferik nap altı basınçlar için maksimum jet uzunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir [25, 27]:

$$\lambda_{max} = \frac{Fr^2 \bar{\theta}}{\cos \alpha} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2T \cos \alpha}{(\bar{\theta} Fr)^2}} \right] \quad (2,45)$$

Kökçınar ve Göğüş [29] tarafından yürütülen model deneylerinden elde edilen 231 data ile regresyon analizinden boşluk jet uzunluğu için aşağıdaki ampirik bağıntı %88 korelasyonla elde edilmiştir:

$$\left(\frac{L_j}{h} \right)_e = 0.28 (Fr)^{1.75} (1 + \theta)^{0.22} \left(\frac{t_r + t_s}{h} \right)^{0.44} \left[(1 + \tan \alpha) \frac{A_a}{A_w} \right]^{-0.087} \quad (2,46)$$

burada; A_a : Hava giriş ağzının kesit alanı (m^2), $A_w = B * h$ olmak üzere yaklaşan akımın enkesit alanıdır (m^2). Bu denklem için bazı limitler verilmiştir: $5.56 \leq Fr \leq 10.00$; $0.198 \leq (t_r + t_s)/h \leq 1.985$; $0^\circ \leq \theta \leq 9.45^\circ$; $0 \leq \tan \alpha \leq 1.25$ ve $0.00684 \leq A_a/A_w \leq 1$. Bu denklem Tan'ın [31], hesap değerleriyle karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gözlenmiştir [29]. Pratik uygulamalarda jet uzunluğunun belirlenmesi için (2,46) denklemi önerilebilir.

2.2.8. Boşluk Alt Basınçları

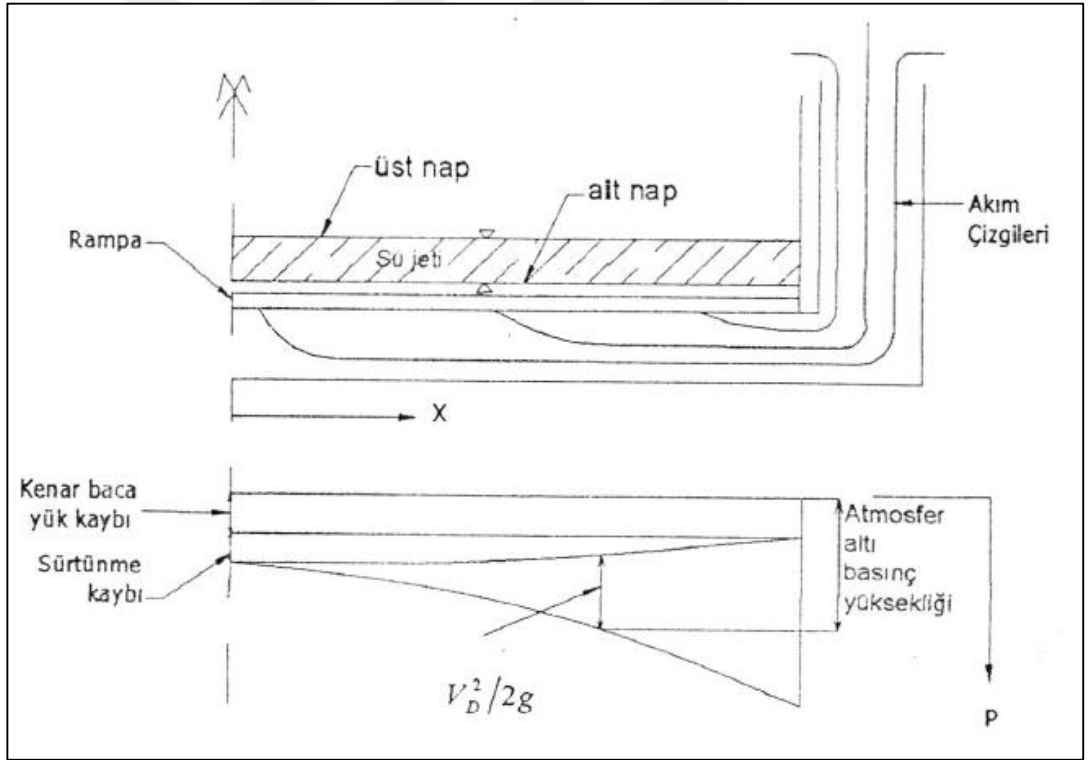
Rutschmann ve Volkart [15, 21] şüt kanalı genişliği boyunca boşluk alt basınçlarının değişimini incelemişlerdir. Euler sayısının 50'nin üzerine çıktığı zaman havalandırıcı üzerindeki su jeti geometrisinin boşluk alt basınçlarından etkileneceği belirtilmiştir. Verilen bir Froude sayısı için, hava debisinin azalması nap alt basınçlarının artmasına neden olur [14, 16].

Yan havalandırma bacasının jet altını beslediği ağzındaki basınç, yan bacalar boyunca enerji kayıpları ve havanın hız yüksekliğinin toplamı kadar atmosfer altı olacaktır. Kanal genişliği boyunca havalandırma oluğunun merkez çizgisindeki basınç farkları, baca ve oluktaki yük kayıplarına eşittir (Şekil 2.13). Kenar bacalar boyunca basınç farkı denklem (2,47)'de ifade edilebilir [20].

$$\Delta P_c = \xi_{tot} \frac{1}{2} \rho_a \left[\frac{Q_{TA}}{2A_{SD}} \right]^2 \quad (2,47)$$

burada, ρ_a : Havanın yoğunluğu, Q_{TA} : Toplam hava debisi, A_{SD} : Baca giriş alanı, ξ_{tot} : Kenar bacalar boyunca yük kaybı katsayısıdır. ξ_{tot} değeri farklı hava giriş bacaları için verilmiştir: 90° yuvarlatılmış dirsek ve çan ağız için 0.5, 90° yuvarlatılmış dirsekli ve dik köşeli ağızlar için 1.0, yuvarlatılmamış dirsekli ve dik köşeli ağızlar için 2.0 olarak alınabilir [20].

Jet altındaki boşluk veya oluklar boyunca sürtünme kayıpları genelde ihmal edilebilir, ancak boşluk boyunca hız yüksekliğinden kaynaklanan basınç değişimleri önemlidir. Bununla birlikte, çok geniş açıklıklı dolusavaklar için bu durum ters çevrilebilir. Yani kanal genişliği boyunca boşluk veya oluktaki sürtünme kayıpları önemli olabilir. Bu durumda genişlik boyunca boşluk alt basınçlarındaki değişim eğrisi ters çevrilir. Şekil 2.13’de herhangi bir x noktasında Bernoulli denklemi yazılırsa denklem (2,48) elde edilir [20]:



Şekil 2.13 Bir havalandırıcı jetin altındaki basınçlar [20]

$$Q_a(x) = A_D \left[\frac{2(\Delta P(x) - \Delta P_c)}{\rho_a} \right]^{0.5} \quad (2,48)$$

burada; $Q_a(x)$: x eksenine göre hava bacasının hava ihtiyaç debisi (m^3/s), ΔP_c : Kenar bacalar boyunca basınç kaybı (N/m^2), $\Delta P(x)$: x eksenine göre altbasınçlar (N/m^2), A_D : Havalandırıcı oluğunun enkesit alanı (m^2), ρ_a : Havanın yoğunluğu (kg/m^3), V_D : Su jeti

altındaki boşlukta akıma dik ilerleyen hava hızı (m/s). Bu denklemden, herhangi bir x mesafesindeki basınç farkını hava debisine göre bulmak için $\Delta P(x)$ çekilebilir.

Bir basamak veya rampa sayesinde su jetinin altında lokal alt basınca sahip bir hava boşluk bölgesinin oluşumuna yol açar. Bu alt basınç bölgesi havalandırıcı performansında önemli rol oynar. Demiröz'ün [28] datalarıyla Kökpınar ve Göğüş [29] tarafından yürütülen regresyon analizi sonucu basınç sayısını veren Denklem (2,49) elde edilmiştir:

$$(P_N)_e^{1/4} = \Phi' \ln \left[\left(\frac{L_j}{h} \right)^2 (1 + \tan \alpha)^{3.5} \left(\frac{A_a}{A_w} \right)^{-0.9} \right] + \Phi'' \quad (2,49)$$

burada; Φ' ve Φ'' : Deneysel katsayılardır. $\Phi'=0.0733$ ve $\Phi''=-0.1033$ değerleri 0.91 korelasyon katsayısıyla elde edilmiştir. Bu denklem için de bazı limitler verilmiştir: $1.095 \leq L_j/h \leq 30.06$, $0.3 \leq \tan \alpha \leq 1.25$, $0.00684 \leq A_a/A_w \leq 0.447$ ve $4.31 \leq Fr \leq 8.73$ [29]. Bu denklemdeki L_j/h önemli bir boyutsuz parametredir. Bu parametre, temsil ettiği tüm bağımsız değişkenleri içermiş olur. Boyutsuz jet uzunluğu (L_j/h) arttıkça P_N sayısı da artar. Bununla birlikte P_N , boşluk alt basınç sayısı, $\tan \alpha$ ile doğru, A_a/A_w ile ters orantılıdır. Denklem (2,49) bazı prototip ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve ölçek etkilerinin giderilmesi için aşağıdaki düzeltme yapılmıştır [29].

$$(P_N)_p = \varphi' (P_N)_e + \varphi'' \quad (2,50)$$

buradaki e indisi deneysel, p indisi ise prototip ölçümlerini ifade eder. φ' ve φ'' regresyon analizinden belirlenen katsayılardır. Guri Barajının prototip dataları kullanılarak $\varphi'=10.402$ ve $\varphi''=-0.087$ değerleri 0.99 korelasyon katsayısıyla elde edilmiştir [29].

Yüksek rakımlarda yer alan havalandırıcıların performansları düşük atmosfer basınçlarından etkilenir. Atmosfer basıncının azalması giren hava debisini artırır [16].

2.2.9. Havalandırıcıların Yeri ve Aralığı

Potansiyel kavitasyonun meydana gelebileceği yerlerdeki havalandırma ihtiyacına uygun olarak dolusavak şüt kanalı boyunca havalandırıcılar yerleştirilmelidir. Prensipde ilk havalandırıcı, muhtemel kavitasyon hasarının olabileceği ilk yerin mansabına yerleştirilir. Birçok bakımdan ilk havalandırıcının yeri çok kritiktir.

Bazı araştırmacıların yüzey havalandırmasının önemli olduğunu vurgulamalarına rağmen, yalnızca yüzeyden doğal havalandırma olması durumunda

yeterli hava konsantrasyonunun şüt tabanına asla ulaşmayacağı belirtilmiştir [5]. Akım tabanına yakın bölgelerde yeterli hava konsantrasyonunu sağlayacak şekilde havalandırıcılar yerleştirilmelidir. Dolusavak yüzeyine yakın hava konsantrasyonu minimum miktarın ($C_{min}=\%5\sim10$) altına düştüğü zaman dolusavak yüzeyi kavitasyon hasarından korunamayacaktır. Bu oran ortalama hava konsantrasyonunun $C_0=\%30$ 'un altı anlamına gelir. Chanson'a [4] göre, nispeten dik dolusavaklarda ($\alpha>20^\circ$) eğim azaltılmadıkça ek havalandırıcılara gerek duyulmaz. Ancak şüt kanalının eğimi 20° 'den küçükse, ortalama hava konsantrasyonun $\%30$ 'un altına düştüğü yerlerde ek havalandırıcılar kullanılarak akım tekrar havalandırılmalıdır [4]. Abbasoğlu ve Okay'a [2] göre, rölatif hava giriş oranının (β) $\%2$ 'nin altına düştüğü yerde tekrar havalandırmaya ihtiyaç duyulur. Uygun bir hava konsantrasyonu sağlansın diye denge hava konsantrasyonu yeterli derecede yüksek tutulmalıdır.

Oskolkov ve Semenkov'a [6] göre, bir havalandırıcının mansabındaki hava konsantrasyonu akım yönünde her metrede yaklaşık $\%0.2\sim0.4$ oranında azalır. Bratsk Barajı üzerindeki bir çalışmada, yaklaşık olarak birim metrede $\%1$ azalmanın olduğu gösterilmiştir [5]. Diğer bir çalışmada, ortalama hava konsantrasyonunun şüt kanalı boyunca birim metrede $\%0.5$ oranında azaldığı, tabana 1.0 cm yakın bölgede bu oranın 1.5~2 kez daha fazla olacağı belirtilmiştir [17].

Fikir vermesi bakımından havalandırıcı aralıklarıyla ilgili işletmedeki bazı dolusavak havalandırıcılarından örnekler verilebilir: 400 m uzunluğundaki Foz do Areia Barajı dolusavağı üzerindeki havalandırıcı aralığını 72 ve 90 m; 330 m uzunluğunda, $\%18$ eğimli Emborcacao Barajında havalandırıcı aralığı 103 m, Venezüella'daki Guri Barajı üzerinde havalandırıcı aralıkları ise 50~150 m arasında verilmiştir. 100 m uzunluğundaki Bratsk dolusavağında yalnızca bir havalandırıcı kullanılmıştır. İyi tasarlanmış bir havalandırıcının 50~100 m aralıklarla yerleştirilmesi gerektiği belirtilir. Böylece şüt kanalı boyunca beton taban kavitasyon hasarından korunabilir [17]. Nurek Barajı dolusavağında her 20 m de bir olmak üzere toplam 7 havalandırıcı bırakılmış ancak havalandırıcı sayısının çok olduğu düşüncesiyle bazıları kaldırılmıştır. Keban Barajı dolusavağı üzerindeki kuzey ve orta şüt kanallarındaki birinci ve ikinci havalandırıcı arasındaki mesafe 81.3 m, diğer havalandırıcılar arasındaki mesafe ise 90 m olarak tasarlanmıştır.

Vischer ve diğerleri [32] tarafından yürütülen model deneyleri sonucu havalandırıcı aralığı ile ilgili aşağıdaki bağıntı verilmiştir:

$$D_a = 1.1U \quad (2,51)$$

burada; D_a : havalandırıcı aralığı (m), U : Ortalama akım hızıdır (m/s).

Farklı araştırmacıların sonuçlarından çıkartılacak bir kural olarak; gerekli havalandırıcı aralığı ortalama akım hızının yaklaşık iki katı alınabilir. Bu değer en azından tasarımda ilk yaklaşım olarak kullanılabilir.

2.2.10. Batık Havalandırıcılar

Su jeti altındaki atmosfer altı basınçların aşırı düşmesi sonucu, bir havalandırıcı üzerindeki su jetinin alt napı şüt tabanına yapışır. Bu durum batık havalandırıcı olarak tanımlanır ve havalandırıcının havalandırma performansını oldukça düşürür. Batık havalandırıcılar kaçınılması gereken bir durumdur. Genelde hava girişleri tarafından alt nap bölgesine yeterli hava sağlanamaması durumunda batık havalandırıcı olayı gerçekleşir.

Klasik bir havalandırıcıda, bir eşik veya rampa ile kanal tabanından saptırılan su jeti altındaki boşlukta atmosfer altı basınçlar meydana gelir. Nap altındaki alt basınç bölgesini atmosfere bağlayan bacalardan, basınç farkından dolayı hava emilerek akıma karışır. Doğal bir havalandırma mekanizmasına sahip bu tür havalandırıcılar oldukça etkin çalışırlar. Ancak, Froude sayısının, boyutsuz saptırıcı ve rampa yüksekliklerinin belirli limitler altında olması, hava sağlayıcı bacaların kesitinin yetersiz kalması veya şüt kanalı genişliğinin çok fazla olması gibi nedenlerden dolayı su jeti altındaki boşluk altbasınçları çok fazla düşebilir ve havalandırıcı batık hale gelebilir. Yapılan analizlerde, özellikle geniş açıklıklı dolusavak şüt kanallarındaki havalandırıcıların, kanal genişliği boyunca üniform bir hava karışımı sağlamadığı ve yeterli hava sağlanamadığı takdirde kanalın özellikle orta bölgelerinde basıncın çok fazla düşerek batık hale gelebildiği görülmüştür.

Düşük Froude sayıları veya düşük kanal eğimleri için havalandırıcı tarafından sağlanan hava debisi sıfır olduğu zaman havalandırıcı batık hale gelmiş demektir. Yüksek Froude sayıları ve yüksek eğimlerde havalandırıcı girişleri kapalı olsa bile havalandırıcı batık olmayabilir. Bu durumda boşluk geometrisi, alt basınçlar ve Froude sayıları ile karakterize edilebilir. Chanson [16], hava girişlerinin sıfır olduğu durum için ($Q_{air}=0$), yüksek Froude sayılarında basınç sayılarının Froude sayısı ile değişimini incelemiş ve batık havalandırıcı durumunu belirleyecek bir kritik Froude sayısı (Fr^{sub}) ve minimum basınç sayısı (P_N^{min}) tanımlamıştır. Chanson'a [16] göre,

boşluk alt basınçları çok fazla düşerse havalandırıcı batık hale gelir ve havalandırma işlevini gerçekleştiremez.

Batık bir havalandırıcı durumu Pinto ve diğ. [17], tarafından da tanımlanmıştır. Sıfır altbasınç ($\Delta P=0$) için rölatif jet uzunluğunun yaklaşık, $L/h < 5$ olması durumunda havalandırıcının batık olacağı belirtilmiş ve bu durumdan bir şekilde kaçınılması gerektiği vurgulanmıştır. Rutschmann [21], sadece az eğimli bir rampanın kullanıldığı bir havalandırıcının büyük alt basınçlarda daha etkili olabileceğini fakat havalandırıcının batık çalışabileceğini belirtmiştir. Rampasız, sadece bir eşik kullanılarak tasarlanan bir havalandırıcıda rölatif basamak yüksekliği ($T_s = t_s/h$) dikkate alındığında ise; $T_s < 0.6$ olması durumunda havalandırıcının batık çalışacağı belirtilmiştir. Rutschmann, Froude sayısının $Fr < 6$ olması durumunda havalandırıcının batık hale geldiğini ifade etmiştir [25]. Eğer havalandırıcı tarafından oluşturulan hava ihtiyacı hava sağlama sisteminin kapasitesinin çok üstüne çıkarsa atmosfer altı basınçların azalmasıyla su jeti kanal tabanına yapışır ve havalandırıcı suyla dolar. Bu bölgede kavitasyon meydana gelebilir. Batık bir havalandırıcının performansı düşüktür ve üniform bir hava karışımı sağlamaz. Mümkün olduğu kadar üniform bir hava dağılımı ve en büyük hava debisi sağlamak için havalandırıcı boşluk alt basınç farklarının minimize edilmesi gerekir. Batık bir havalandırıcının düşük bir Froude sayısında bile kavitasyon riski oluşturabilir, bu nedenle bir havalandırıcı tasarlandığı zaman boşluk altbasınçlarına özel ilgi gösterilmesi gerekir [5, 15, 16]. Yeterince geniş bir hava sağlama bacasıyla boşluk alt basınçları minimize edilebilir. Ancak çok geniş dolusavaklar için yine de şüt kanalı tabanına yakın hava karışımının üniform dağılımı sağlayamayabilir.

Bu açıklamalar doğrultusunda anlaşılabileceği gibi, daha önceki araştırmalarda batık havalandırıcı durumu tanımlanmış ancak bunun üzerine yeterince çalışma yapılmamıştır. Sadece bu durumdan kaçınılması gerektiği belirtilmiştir. Havalandırıcı tamamen batık hale gelmese bile özellikle geniş dolusavak kanallarında klasik tip havalandırıcılar üniform bir hava karışımı sağlamayabilir. Bacalardan giren hava, bacaların giriş ağzına yakın yerlerde daha fazla karışır ve kanalın ortalarına doğru yeterli hava karışımı sağlanamayabilir. Bundan dolayı, ortadaki altbasınçların oldukça düşmesi sonucu orta kesimler tamamen batık hale gelebilir. Bu durumda kavitasyon hasarı oluşabilir.

İyi bir havalandırıcı tasarımı, batık olmamalı ve tüm dolusavak genişliği boyunca üniform bir hava karışımını sağlamalıdır [20]. İlk olarak bu tezde önerilecek

Altın Alışlı Havalandırıcılarla batık çalışma riski klasik havalandırıcılara göre azaltılabilir.



2.3. DOLUSAVAKLARIN MANSABINDAKİ OYULMALAR

2.3.1. 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 ve sonundaki bir deflektör yardımıyla sıçratarak meyilli bir jet halinde akarsu yatağı üzerine düşürürler. Düşen su yatağa ulaştığı anda önemli bir enerjiye sahiptir [33].

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 [34].

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 [34].

Düşen su, yatak üzerindeki alüvyal malzemeyi kısa zamanda sürükler ve arkasından kaya tabanı oymaya baslar. 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 [33].

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 [35].

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 olduğu 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 [34].

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 limitte olduğu kabul edilir. Ancak bu yığılmanın taşınması halinde oyulma maksimum derinliğe kadar devam eder. Bu sınırdan en büyük statik limit olarak kabul edilir [35].

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.

2.3.2. Oyulma Tipleri

Oyulma üç farklı grup içinde sınıflandırılabilir. Bunlar; Genel Oyulma, Daralma Oyulması ve 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 sev 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 gevşek ve taşınmaya müsait malzemeden 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 [33]. 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 müşahade edilen bir özelliği de oyulma çukuru şev eğiminin malzemenin sev açısına çok yakın olmasıdır [36]. Yapılan deneyler sonucunda, oyulma çukurunun % 64'üne ilk 20 saniyede, oyulma derinliğinin yaklaşık %97'sine ise 2 saat içinde ulaşıldığını bulunmuştur [37].

2.3.3. 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 [1].

Aşağıda düşün yataklarının sonundaki oyulmalar hakkında yapılmış olan önemli çalışmalar özetle sunulmuştur.

Aksoy [33], “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 [34], “Barajların mansabındaki oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulmanın şiddetinin gelen debinin büyüklüğüne ve yapının sekline bağlı olduğu görülmüştür.

Şentürk [35], “Barajların projelendirilmesinde hidrolik esaslar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulma olayının iki şekilde gerçekleştiğini ifade ederek yersel oyulmalar hakkında bilgi vermiştir.

Tuna [23], “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 [27], “Oyulma” hakkında ilk deneysel çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmalarda mansap su yüksekliğini dikkate almaksızın sabit bağlama için oyulma derinliğini elde etmiştir.

Eggenberger [39], “Oyulma uzunlukları” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulma uzunluklarının iki kısımdan meydana geldiğini esas alarak oyulma uzunlukları için eşitlikler vermiştir.

Veronese [37], “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 [36], “Jet enerjisinin sönümüne bağlı olarak oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, yapmış oldukları deneylere dayanarak dairesel enkesitli jetlerin difüzyon olayını kapsayan teorinin $y \approx 20D_0$ derinliğine kadar geçerli olduğunu saptamışlardır.

Cola [1], “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 $y \approx 40B_0$ olarak kabul edilmiştir.

Martins [40], “Serbest düşen bir jetin küpsel bloklardan oluşan tabandaki oyma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada jetin düştüğü andaki yatayla yaptığı açı (α), 40° - 70° arasında değişmiş ve bunun sonuca pratik etkisi görülmemiştir.

Gunko vd. [41], “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 bağıntılar verilmiştir.

Yıldız ve Üzücek [42], “Dolusavak sıçratma esiğinden 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 [43], “ 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 [44], “Batık veya serbest yüzeyle 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 [45], “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 [46], “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 [47], “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 kirişlerin etkisi de araştırılmıştır.

Studenichikov [48], “Oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada özellikle jetin yanal açılımından dolayı oyulma derinliğindeki azalmayı dikkate almaktadır.

Mirtsskhulava [49], “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 [50], “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 [51], “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 [52], “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 [53], “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 [54], “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 [55], “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 [56], “Kariba Barajı mansabında meydana gelen oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada yapılan kaba hesaplar ve tahminler herhangi bir tedbir öngörülmezse oyulma çukurunun derinliğinin 80m’yi bulacağını göstermiştir.

Emiroğlu ve Tuna, 2010 yılında “Kaskatların Mansabındaki Oyulma Profilleri” adlı bir makale yayınlamışlardır. Bu makalede; kaskatların mansabındaki boyut düşüklüğünü değerlendirmek, prosedürleri daraltmak ve basitleştirmek için çalışmalar yaptıklarını belirtmişlerdir. Basamaklı kanallarda ve kaskatlarda oksijen transferi, havalandırma ve enerji dağılımı hakkında birçok çalışmaları bulunduğundan bahsetmişlerdir. Basamaklı kanalların mansap oyulmaları ve onların mansap oyulma deliklerinin geometrisine az ilgi gösterilmiştir. Oyulmanın denge durumundaki delik profili, oyulmanın maksimum derinliğinin değeri, oyulma holünün yeri ve uzunluğu ile alakalı ölçümler yapmışlardır. Basamak şekli, basamak kanal açısı, mansap su seviyesi, dinlendirme havuzunun toprak tipi, oyulma derinliğinin belirlenmesindeki önemli parametreler olduğunu belirtmişlerdir [57].

Emiroğlu ve Tuna, 2009 yılında “Basamaklı Kanalların Mansap Oyulmalarının Kuyruksuyu Derinliğinin Etkileri” adlı bir makale yayınlamışlardır. Bu makalede; kademeli kanalların mansabındaki yerel oyulmaların kuyruksuyu derinliğinin etkisinin deneysel çalışmalarını yaptıklarını belirtmişlerdir. Farklı kuyruksuyu derinlikleriyle oyulma karakteristikleri arasında kıyaslama yapılmaktadır. Maksimum oyulma derinliğini tahmin eden ampirik formüller geliştirmişlerdir. Bundan dolayı, maksimum oyulma derinliği için kesin denklemler sunulmaktadır [58].

Chanson, 2007 yılında “Alt Çıkıştaki Serbest Yüzey Havalandırması ve Momentum Değişimi” adlı bir makale yayınlamıştır. Daha düşük nap akımında, hız dağıtımının başarılı bir şekilde modellendiğinden ve hız alanının iki yönlü dalga akımındaki benzerliğinin bulunduğundan bahsetmiştir. Deney sonuçlarının iki farklı akış bölgesinin altını çizdiğini ve kenara yakın olan akım momentum transferi tarafından baskılandığını söylemektedir. Hava kabarcıkları difüzyonu ve momentum değişimi arasında güçlü bir yarış yaşandığını belirtmiştir [38].

Kökpınar ve Göğüş’ün 2002 yılında yazdıkları “Su Havalandırıcısı Üzerindeki Yüksek Hızlı Jet Akış” adlı makalede; su havalandırıcısı üzerindeki yüksek hızlı jet akışının özelliklerini deneysel veriler kullanılarak incelemişlerdir. Üç farklı rampa tasarımını, yatak eğimi sırasıyla 0, 0.17 ve 0.57 olarak ayarlanan bir kanal için test etmişlerdir. Araştırmanın ana odağı, havalandırıcının etkisi ve su jeti içindeki hava sürüklenmesi işlemi sırasındaki akış durumu olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışma için,

başka bir araştırmacının topladığı verileri de kullanarak kapsamlı bir veri analizi yapmışlardır. Jet uzunluğunun boyutsuz parametreleri, havalandırıcı kavitesi alt basıncı değeri ve su jetinin alt ve üst kısmındaki havalanma oranı ile alakalı deneysel ilişkiler elde edilmişlerdir. Havalandırmanın alt tarafındaki ölçek etkisini ve havalandırıcı kavitesi alt basınç değerini kabul etmişler ve Emborcação, Foz do Areia ve Keban Barajlarının havalandırıcı prototip ölçümleriyle iyi bir korelasyon belirlediklerini vurgulamışlardır. Etki bölgesindeki yeterli hava sürtünmesiyle, aşırı basınç dalgalanmaları olabileceğinden bahsetmişlerdir [29].

Kökpinar ve Çelik, 2002 yılında “Deriner Barajı Tüneli Dolusavak Havalandırıcıları Büyük Ölçekli Hidrolojik Model Çalışmaları” adlı bir makale yayınlamışlardır. Bu makalede; Deriner Barajı tüneli dolusavaklarının hidroliği ve havalandırıcıların performansları, 1/20 ölçekli model çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak incelenmiştir. Model üzerinde deneyler yürütülmüştür. Bu deneyler sırasında, akım içerisinde ölçülen hava konsantrasyon değerlerini kullanarak, havalandırıcıların optimum faydayı sağlamasına yönelik dolusavak üzerinde yer belirleme çalışmaları da yapılmıştır. Tasarlanmış havalandırıcının etkin bir şekilde çalışmadığı görülmüştür. Bu nedenle orijinal projenin, havalandırıcının yeri ve geometrisi bakımından değiştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Hava konsantrasyon değişimlerini veren grafikler incelendiğinde, yeni yerleştirilen havalandırıcının daha etkin bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Yapılan ön çalışmalarda, ayrıca, ikinci bir havalandırıcının daha membaya yerleştirilmesinin daha iyi sonuçlar vereceği gözlemlenmiştir [59].

Yıldız ve Üzücek, 1996 yılında (İMO Teknik Dergi’ye) “Dolusavak Sıçratma Eşiğinden Çıkan Jetlerin Oluşturduğu Oyulma Derinliklerinin Hesaplanması” adlı bir makale vermişlerdir. Bu makalede; şütlü ve sıçratma eşikli dolusavaklardan mansaba bırakılan akımın oluşturacağı oyulma derinliği bir denklem ile ifade edilmiştir. Önerilen denklem Veronese formülü temel alınarak bulunmuş olup jetin çarpma açısı ve prototipten elde edilen oyulma derinliklerinden de yararlanılmıştır. Bazı araştırmacılar jetin mansap suyuna çarpma açısının oyulma derinliğinin hesabında önemli bir parametre olduğunu ve bu parametrenin önerilen eşitliklerde yer alması gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Bu yaklaşım göz önüne alınarak Veronese tarafından önerilen eşitlik şütlü ve sıçratma eşikli dolusavaklardan çıkan jetlerle oluşan oyulmaların daha sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmesi amacıyla jetin çarpma açısını da içerecek şekilde yeniden düzenlemişlerdir [60].

Chanson, 1995 yılında, “Dolusavak Havalandırıcılarının Arkasındaki Boşluk Dolum Tahmini” adlı bir makale yayınlamıştır. Bu makalede; su yüzeylerindeki kavitasyon zararı havalandırma aygıtlarının kullanımıyla önlenebileceğinden bahsetmektedir. Bunların, kavitasyon erozyonunu azaltmak için, kanal dibine yakın yüzeylerin içine hava pompalamaya devam edeceğini söylemektedir. Bazı koşullar altında havalandırıcı, dolusavak yüzeyini korumayı durduracak bir *kavitasyon jeneratorü* görevi görür. Bu makalenin, dolum şartlarını analiz ettiğinden söz etmektedir [61].

Chanson, 1993 yılında “Dolusavaktaki Alt Havalandırma Aletlerindeki Havalandırma ve Hava Boşaltımı” adlı bir makale yayınlamıştır. Bu makalede; havalandırma ve çarpma bölgelerinde meydana gelen havalandırma ve hava boşaltımı olaylarından bahsetmiştir. Modeller üzerinden sağlanan hava yoğunluğu verisinin tekrar analiz edilmesinin, çarpma bölgesinin sonundaki akım çeşitlilikleri üzerinde bilgi sağladığından söz etmiştir. Bu sonuçlar; Chanson tarafından geliştirilen metodu kullanan mansap akım hesaplarının bulunmasını sağlar [62].

Aydın, 2005 yılında “Alttan Alışlı Dolusavak Havalandırıcıların CFD Analizi” başlıklı bir doktora tezi yapmıştır. Tezinde; orta ve yüksek düşülü barajların dolusavakları yüksek hızlı akımlara ve bununla birlikte kavitasyon olayının yıkıcı etkisine maruz kalabileceğini vurgulamıştır. Yüksek hızlı akımlarda kavitasyonel aşınmayı önlemek için alışlagelmiş yöntem havalandırıcı aygıtlar kullanılmaktadır. Dolusavak havalandırıcıların gelişmesine büyük ölçüde fiziksel model deneyleri öncülük ettiğini belirtmiştir. Fakat son zamanlardaki hesaplamalı yöntemlerdeki gelişmelerle birlikte ileri sayısal modeller fiziksel modellere karşı önem kazandığını söylemiştir. Batık havalandırıcı durumunu engellemek, daha uniform bir hava karşımı sağlamak için, “Alttan Alışlı Havalandırıcı” diye adlandırılan bir havalandırıcı kullanılmış ve bu havalandırıcının performansını belirlemek için Fluent yazılımıyla, üç boyutlu CFD modelleri kullanılarak data analizi yürütüldüğünü ve yüksek korelasyonlarla bazı faydalı bağıntılar elde edildiğini vurgulamıştır. [63]

Yılmaz, 2014 yılında “Eğimli Yüzeyli Köprü Yan Ayaklarında Oyulmayı Önleyici Yatay Plaka Uygulaması” başlıklı bir yüksek lisans tezi yapmıştır. Temiz su oyulması koşulları altında 70 deney yapmıştır. Deneylerde, düz dikdörtgen bir kanalın karşılıklı iki yanına yerleştirilen köprü yan ayakları etrafında farklı derinliklerde yerleştirilmiş olan farklı genişliklerdeki yatay plakalarla oyulma miktarındaki azalmayı incelemiştir. Ayrıca farklı uzunluklardaki köprü yan ayakları kullanılarak

farklı daralma oranlarında oluşan koşulları da incelemiştir. Bu şekilde oyulmayı azaltacak olan optimum yatay plaka konfigürasyonu ve ayak üzerindeki yeri farklı daralma oranları için belirlenmiştir. Plaka uygulamasının oyulmayı azaltmada ve köprü yan ayağını oyulmaya karşı korumada etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır [64].

Koçak, 2013 yılında yaptığı YL çalışmasında; “Su Jetinden Dolayı Oluşan Oyulma Derinliği Üzerinde Zemin Malzeme Tabakası Kalınlığının Etkisi” başlıklı bir tez yapmıştır. Kanal akımı tabanını oluşturan kohezyonsuz zemin malzemesi tabakasında (kum yastığında) su jetinin oluşturduğu oyulmanın derinliği üzerinde söz konusu zemin tabakası kalınlığının etkisi araştırmıştır. Jetin oluşturduğu oyulmayı etkileyen boyutsuz büyüklükler boyut analizi yöntemiyle bulunmuş ve aralarındaki bağıntıyı bulmak için deneyler yapılmıştır. Deney neticeleri göstermiştir ki zemin malzeme tabakası kalınlığı arttıkça su jetinin bu tabakada oluşturduğu oyulmanın en büyük derinliği artmakta olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, tabaka kalınlığı artınca jet akımının zemin malzeme tabakası (kum yastığı) içerisine girdirdiği hava kabarcıklarının tabakanın alt derinliklerine doğru ilerlemesi ve yüzdürme (kaldırma) kuvvetleri nedeniyle yukarı doğru yaptıkları yükselme hareketleri sırasında kum tanelerine uyguladıkları atalet kuvvetleri ve dinamik etkiler nedeniyle kum tanelerini yerlerinden kolayca oynatıp sökerek askıya geçirmeleridir. Eğer kum tabakasının (sediment yastığının) kalınlığı belirli bir sınır değerinden büyük olursa oyulma derinliği değişmeyip sabit kalmaktadır. Su jeti tarafından oluşturulan oyulmanın en büyük derinliği üzerinde kum yastığı kalınlığının bir miktar etkisi var olmakla birlikte söz konusu etkinin aşırı büyük olmadığı görülmüştür [65].

2.3.4. Yersel Oyulma Eşitlikleri

Bugüne kadar birçok araştırmacı bağlama mansabında meydana gelen oyulma problemleri ile yakından ilgilenmiş ve oyulma denklemlerini tatbik etmişlerdir. Elde edilen neticeler genellikle birbirinden farklıdır. Oyulma derinliğine tesir eden başlıca faktörler ise;

- Mansap su yüksekliği (h_u),
- Düşü yüksekliği veya memba ile mansap su seviyeleri arasındaki fark (H),
- Birim debi (q),
- Taban malzemesinin ortalama dane çapı (d_m),
- Yerçekimi ivmesidir (g).

Aşağıda bazı araştırmacıların oyulma hakkında yaptıkları önemli incelemeler kısaca özetlenmektedir:

a) Schoklitsch'e Göre Oyulma Denklemi:

Oyulma hakkında ilk deneysel çalışmayı yapan Schoklitsch [27] mansap su yüksekliğini dikkate almaksızın sabit bağlama için,

$$T_o = 4.75 \frac{H^{0.2} \cdot q^{0.57}}{d_m^{0.32}} \quad (2,52)$$

eşitliğini elde etmiştir. Burada;

T_o : Oyulma derinliği (m),

q : Birim debi (m^2/s),

H : Memba ile mansap su seviyeleri farkı (m),

d_m : Mansap tabanındaki ortalama dane çapı (mm).

b) Veronese'in 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. [15]

Bunun yanı sıra oyulmanın rezervuar seviyesi ile kuyruksuyu 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.

$$t + h_2 = 1.9 \cdot h_t^{0.225} \cdot q^{0.54} \quad (2,53)$$

burada; $t + h_2$: Kuyruksuyu seviyesinden itibaren maksimum oyulma derinliğini (m),

h_t : Serbest düşülü dolusavaklarda kuyruksuyu seviyesi ile rezervuar seviyesi arasındaki kot farkını vermektedir. 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° '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 sonrada 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.

c) Jaeger'e Göre Oyulma Denklemi:

Jaeger başlangıçta oyulmayı;

$$T_o = K \cdot H^{0.25} \cdot q^{0.50} \left(\frac{h_u}{d_m} \right) \quad (2,54)$$

eşitliği ile vermiştir. Daha sonraki araştırmalar neticesinde oyulma denklemi aşağıdaki şekilde düzeltilmiştir [13].

$$t_k = K_o \frac{H^{0.25} \cdot q^{0.72}}{d_m^{0.33}} \left(\frac{h_o}{q^{2/3}} \right)^{0.33} \quad (2,55)$$

t_k : Akarsu tabanından itibaren oyulma derinliği (m),

K_o : 6 olarak verilen bir katsayı.

d) Eggenberger'in Oyulma Denklemi:

Eggenberger sabit bağlamalar için oyulma denklemini,

$$t_k + h_u = 22.88 \frac{H^{0.5} q^{0.6}}{d_{90}^{0.4}} \quad (2,56)$$

eşitliği ile verir [13]. Burada;

d_{90} : Taban malzemesinin ağırlık yüzdesi %90'ının elekten geçtiği dane çapıdır.

Hareketli bağlamalarda kapak altından ve aynı zamanda kapak üstünden akım mevcut olduğu durumlarda 22.88 sabit katsayısı yerine aşağıdaki K_o katsayısı kullanılır.

$$K_o = 22.88 \frac{-1}{e^{0.11} \cdot X^3 - 0.15X^2 + 0.7X + 0.9} \quad (2,57)$$

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'e Göre Oyulma Denklemi:

Hareketli bağlamalar için Müller model deneyleri neticesinde aşağıdaki eşitliğini elde etmiştir [13].

$$t_K + h_u = K_o \frac{H^{0.5} q^{0.6}}{d_{90}^{0.4}} \quad (2,58)$$

bu denklemde, $K_o=8.8$ düşüm yatağı olan, $K_o=13.10$ düşüm yatağı olmayan bağlamalar için geçerlidir.

f) Hartung'un Oyulma Denklemi:

$$t_K + h_u = 12.4 \frac{H^{0.36} q^{0.64}}{d_m^{0.32}} \quad (2,59)$$

ifadesi ile verilir. h_u değeri $h_{ukr} = 1.8q^{2/3}$ değerinden daha büyükse yukarıdaki eşitlikte h_u yerine $h'_u = 0.2h_u + 0.8h_{ukr}$ değerinin kullanılması gerekir.

g) Maniak'a Göre Oyulma Denklemi:

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

$$\frac{h_u + t_k}{q^{2/3}} = \frac{1}{g^{1/3}} \left(\frac{h_u + t_k/h_{kr}}{h_{kr}} \right) \quad (2,60)$$

eşitliğini vermektedir [13]. Bu denklem dişli eşik yüksekliği $S' = 0.4h_{kr}$ ve dişli eşik aralığı $1.75h_{kr}$ olduğu için geçerlidir.

h) Kotulas'ın Oyulma Denklemi:

$$t + h_2 = 0.78 \frac{h^{0.35} \cdot q^{0.7}}{d_{90}^{0.4}} \quad (2,61)$$

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. [34]

$$l_{sc} = 2.7 \frac{h^{0.45} \cdot q^{0.9}}{g^{0.45} \cdot d_{95}^{0.8}}$$

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

$$x_1 = 3.9 \frac{h^{0.27} \cdot q^{0.54}}{g^{0.27} \cdot d_{95}^{0.08}} \quad (2,62)$$

formülü ile verilmiştir. ($d_{95} \approx 1.40 d_{90}$)

j) Studenichikov'un Formülü:

$$t + h_2 = \left(1.5 + k \frac{h_c^2 \cdot n}{h_0^2} \right) \left(\frac{0.8942 (\xi q_0)^{0.8}}{q^{0.40} \cdot d_m^{0.200}} \right) \quad (2,63)$$

burada;

h_c = Su jetinin kritik derinliği (m),

q = Çarpma kesitindeki birim debi (m^2/s),

q_0 = Jetin çıkıştaki birim debisi (m^2/s),

d_m = Yatak malzemesi ortalama dane çapı (m),

h_0 = Akım derinliği (m),

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.

$$t + h_2 < 10^4 d_m \text{ ve } \left(\frac{h_c}{h_0} \right)^2 > 5 \quad (2,64)$$

Studenichikov formülü özellikle jetin yanal açılımından dolayı oyulma derinliğindeki azalmayı dikkate almaktadır. Ancak Martins [40], 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'in Formülü:

Martins, model benzeşimi kaya küplerle yapılan yataktaki oyulmalar için aşağıdaki eşitliği elde etmiştir [40]. Burada a küp malzemenin kenar uzunluğudur.

$$t = 0.14 N + 0.7 h_2 - \frac{0.73 h_2^2}{N} \quad (2,65)$$

$$N = \sqrt[7]{\frac{Q^3 \cdot h^{3/2}}{a^2}}$$

t = Oyulma derinliği (m),

h_2 = Mansap su derinliği (m),

h = Memba ve mansap su seviyeleri arasındaki düşey mesafe (m).

(2,65) denkleminin diferansiyeli, $h_2 = 0.48N$ kuyruksuyu derinliği değerinde oyulmanın maksimuma ulaşacağı sonucunu vermektedir.

l) Machado'nun Formülü

Su jetinin kaya tabanda oluşturduğu oyulmalar ile ilgili olarak Machado tarafından elde edilen iki eşitlik aşağıda verilmiştir. [34]

$$t + h_2 = 1.35 \frac{C_V^{0.5} \cdot q^{0.5} \cdot h^{0.3145}}{d_{90}^{0.0645}} \quad (2,66)$$

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 (2,66) nolu eşitliğin nihai oyulma derinliğini veren şeklidir.

$$t + h_2 = 2.98 C_V^{0.5} \cdot q^{0.5} \cdot h^{0.25} \quad (2,67)$$

2.3.5 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 [27], Veronese [37], Jaeger [34] ve Smoljaninov [34] 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 [34] daha sonra yayınladığı makalede enerji kırıcı düşü havuzlarının mansabındaki oyulmayı da [34];

$$t + h_2 = k \left[6 h^{0.25} \cdot q^{0.5} \cdot \left(\frac{h}{d_m} \right)^{1/3} \right] \quad (2,68)$$

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 [41] ise düşü havuzu sonundaki oyulmalar için aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.

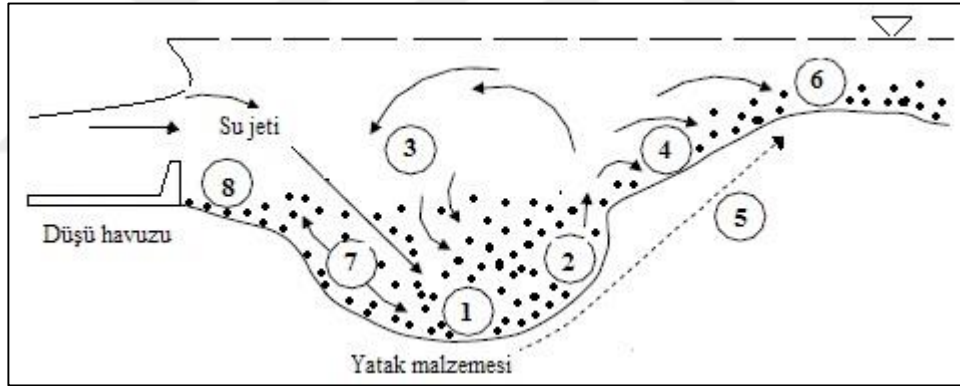
$$t + h_2 = k \cdot \frac{q^{0.6} \cdot (h + h_2)}{d_{90}^{0.1}} \quad (2,69)$$

Buradaki k katsayısı eşiksiz havuzlar için 1.62; eşikli havuzlar için eşik formuna bağlı olarak 1.42 – 1.53 arasında değerler almaktadır.

2.3.6 Oyulma Çukuruna Etkiyen Kuvvetler

Oyulma çukuruna etki eden kuvvetler şunlardır:

- (1) Oyulma çukuru tabanından malzemeyi kazıyıp sürükleyen su jeti,
- (2) Yatağa çarpıp sönmüş 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 sürüklenme kuvveti (Artık bir dinamik denge durumu vardır),
- (7) Yatak malzemesine yukarı-aşağı salınımlar yaptıran kuvvet,
- (8) Yatak malzemesi hareketsizdir.



Şekil 2.14 Oyulma çukuru gelişimi [66]

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen deneyler İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı set, istenen ölçülere göre sanayide yaptırılmış ve laboratuvar ortamında montajı sağlanmıştır. Hidrolik laboratuvarının alt yapısının müsaade ettiği en fazla debi değerleri ile çalışma yapılacak şekilde boyutlandırmalar yapılmıştır. Şekil 3.1’de deney düzeneğinin kesiti ve Şekil 3.8’de de şematik planı verilmiştir.

Sular; boşaltım kanalı içerisinde kum bulunan kum kanalına deşarj olmakta, buradan da laboratuvarın mansap havuzuna verilmektedir. Mansap havuzundan pompa vasıtasıyla çekilen suyun debisi bir vana yardımıyla ayarlanmakta ve istenen debi miktarının doğruluğu, Arkon marka elektromanyetik debimetre kullanılarak kontrol edilmektedir. Debisi ayarlanan su, boşaltım kanalı memba haznesine verilmek suretiyle deneyin sürekliliği sağlanmaktadır.

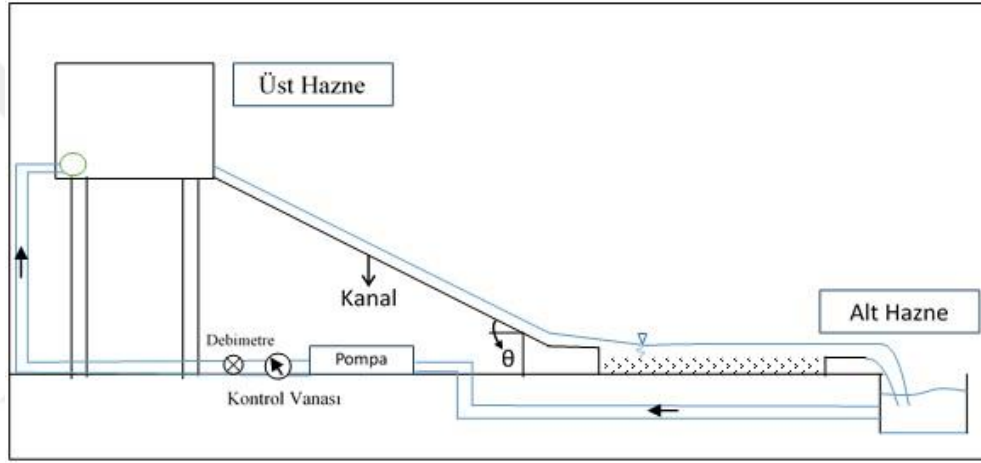
Dolusavak boşaltım kanalını ve mansabında nehir tabanını temsil eden içerisi kum ile dolu olan bir malzeme havuzu inşa edilmiştir. Boşaltım kanalı taban eğimleri 30°, 40° ve 50° olarak seçilmiştir. Boşaltım kanalı içerisine kesiti ve boyutları Şekil 3.2’de verilen havalandırıcılar yerleştirilmiştir. Bu havalandırıcılar A ve B tipi olmak üzere isimlendirilmiştir. Boşaltım kanalı boyunca havalandırıcı olmaması, boşaltım kanalı üzerinde belirlenen kısımlara bir, iki ve üç havalandırıcının A ve B tipi havalandırıcılar için ayrı ayrı konulması ile yedi farklı alternatif çalışılmıştır. Yedi farklı havalandırıcı durumu, üç farklı boşaltım kanal eğimleri ve dört farklı debi değerleri için deneyler yapılmıştır.

Deneylerde, mansap kum havuzunda meydana gelen oyulma değerleri denge haline ulaştıktan sonra, oluşan oyulmalara ait topoğrafik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerle boşaltım kanalı mansabında oluşan oyulmalara ait yüzey şekilleri çizilmiş ve maksimum oyulmanın değerleri ve meydana geldiği yerler belirlenmiştir. Boşaltım kanalı çıkışında akım derinlikleri ve hızları ölçülmüştür. Ölçülen hız ve derinlik değerlerine göre Froude sayıları ve mansap havuzu için kayma ve kritik kayma gerilmeleri hesaplanmıştır.

Deney düzeneğinde, mansap kanalının yan duvarı akım koşulları ve oyulma mekanizmasını görebilmek amacı ile cam malzemedan teşkil edilmiştir. Deneylerde kullanılan yatak malzemesine ait elek analizi yapılmıştır. Buna göre, d_{10} , d_{50} , d_{60} , d_{85} ve d_{90} değerleri sonraki slayttaki granülometri eğrisinden hesaplanmıştır.

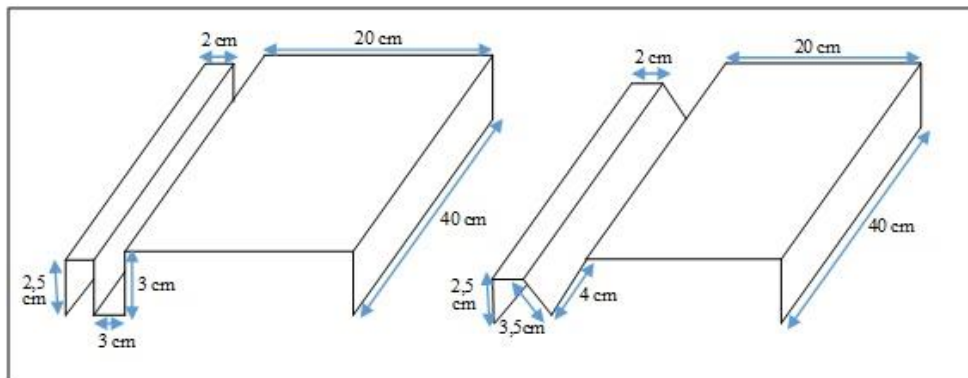
Deneylerde su akışı, Hidrolik laboratuvarında bulunan alt hazne ile deney setine ait olan üst hazne arasında oluşturulan ve şematik olarak Şekil 3.1 de gösterilen sistem yardımıyla sağlanmıştır. Alt haznedeki su, pompa yardımıyla deney setinin üst haznesine pompalanırken vana yardımıyla debisi ayarlanmakta ve elektromanyetik debimetre ile de kontrol edilmektedir. 0.0125, 0.025, 0.0375 ve 0.05 m³/s/m’lik birim debilerle deneyler yapılmıştır. Deneylerde mansap kum havuzunda denge oyulması oluşana kadar sabit debide akış sağlanmış ve daha sonra akış sonlandırılarak gerekli topoğrafik ölçümler yapılmıştır.

3.1. Deney Düzenegi



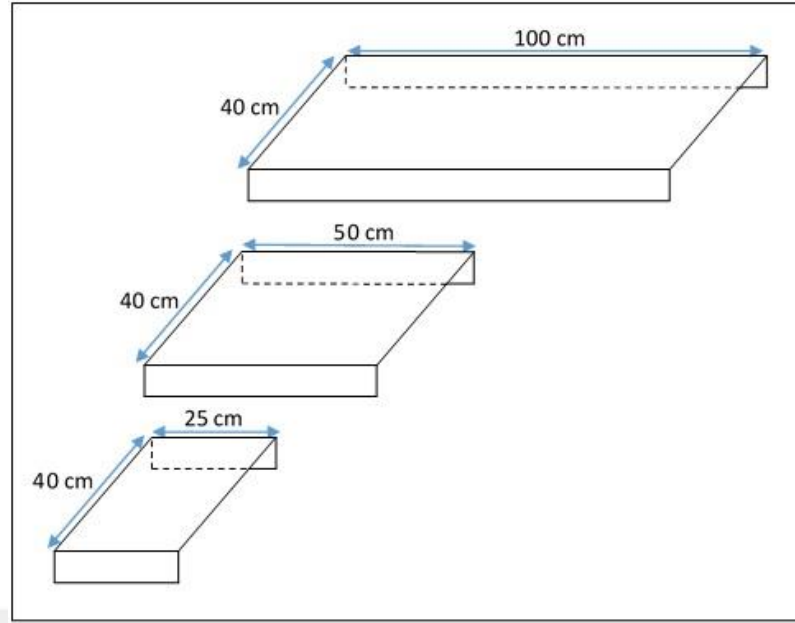
Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik görünümü

Şekil 3.1’de; deneylerde kullanılan kanal seti ile debi ayarı ve ölçümünde kullanılan aletler şematize edilmiştir.



Şekil 3.2 A ve B tipi havalandırıcılar (25x40cm)

Şekil 3.2’de; kullanılan A tipi ve B tipi havalandırıcıların boyutları gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Takılıp çıkarılabilir deney taban aparatları

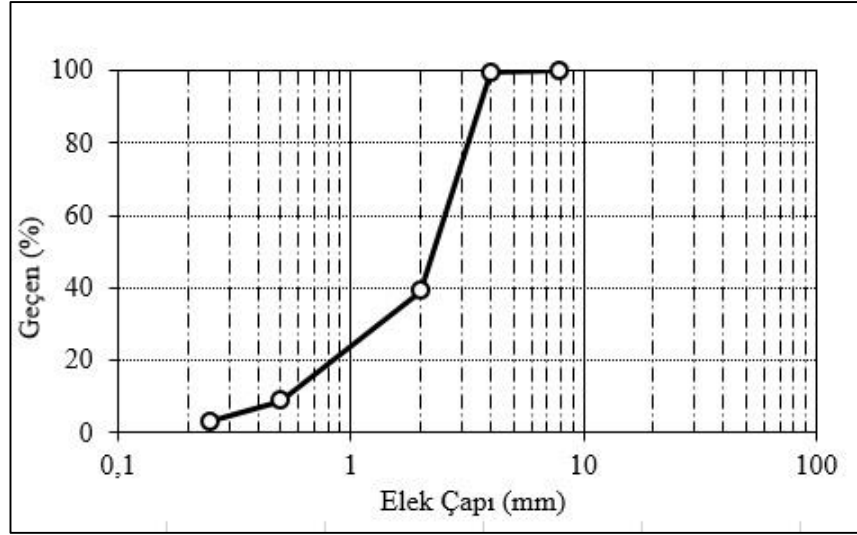
3.2. Deneylerin Yapılışı ve Yöntem

Deneylerde mansap havuzunda oluşan oyulma çukuru derinliklerinin belirlenmesinde dijital limnimetre kullanılmıştır. Kullanılan sedimentin elek analizi deneyi yapılarak bazı karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan pompa, debimetre, ayar vanası ve limnimetre aletlerine ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.1 Deneyisel çalışmada kullanılan sedimentin elek analizi sonuçları ($W_T = 2005.8$ gr)

ASTM Elek No	Elek Çapı (mm)	Elek Dara (gr)	Dara + Kalan Zemin (gr)	Kalan Ağırlık (gr)	Toplam Geçen Ağırlık (gr)	Geçen Yüzde (%)
8	8.000	0.00	0.00	0.00	2005.80	100.00
4	4.000	0.00	11.40	11.40	1994.40	99.43
2	2.000	0.00	1210.00	1210.00	784.40	39.11
1	1.000	0.00	0.00	0.00	784.40	39.11
0.5	0.500	0.00	610.00	610.00	174.40	8.69
0.25	0.250	0.00	115.40	115.40	59.00	2.94
Toplama Kabı		0.00	59.00	59.00	0.00	

Bir miktar malzeme eleklerden geçirilerek terazide tartılmış ve ölçülen değerler kaydedilerek Tablo 3.1 oluşturulmuştur. Kullanılan malzemenin özgül ağırlığı da hesaplanmıştır. ($\gamma_s = 21.12$ N/m³)



Şekil 3.4 Kullanılan Sedimentin Granülometri Eğrisi

Şekil 3.4'te; Tablo 3.1'den elek analizi dataları alınarak granülometri eğrisi çizilmiştir.

Tablo 3.2 Oyulma deneylerinde kullanılan malzemenin özellikleri

$d_{10} = 0.55 \text{ mm}$
$d_{50} = 2.36 \text{ mm}$
$d_{60} = 2.58 \text{ mm}$
$d_{85} = 3.37 \text{ mm}$
$d_{90} = 3.65 \text{ mm}$

d_{10} , d_{50} , d_{60} , d_{85} ve d_{90} değerleri Şekil 3.4'teki granülometri eğrisinden hesaplanmış ve Tablo 3.2'de gösterilmiştir.



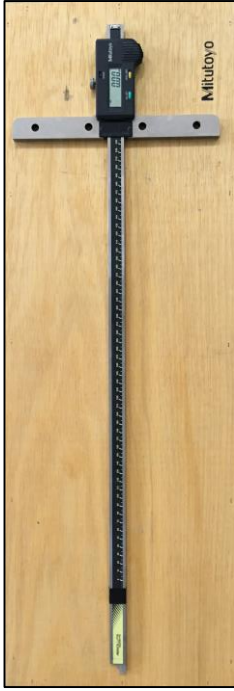
Şekil 3.5 Pompa

Şekil 3.5'te deneylerde kullanılan MAS DAF markalı 7.5 kW gücünde santrifüj pompa görülmektedir.



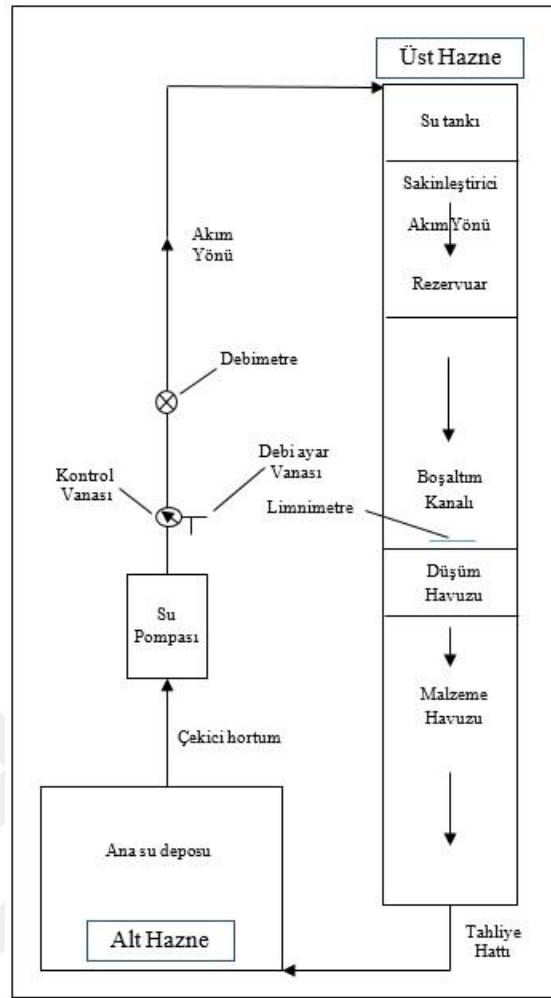
Şekil 3.6 Debimetre

Şekil 3.6’da, Arkon markalı ± 0.002 oranında yüksek hassasiyetli elektromanyetik debimetre görüntülenmektedir.



Şekil 3.7’de derinlik ölçümlerinde kullanılan ± 0.1 mm hassasiyete sahip Mitutoyo marka dijital limnimetre görülmektedir.

Şekil 3.7 Limnimetre



Şekil 3.8 Deney düzeneğinin plan görünümü

Şekil 3.8’de deney düzeneğine ait şematik plan görünmektedir. Yapılan deneyler sonucunda malzeme havuzunda oluşan oyulma çukurlarına ait topoğrafik şekiller ve maksimum oyulma çukuruna ait koordinatlar belirlenmiştir.

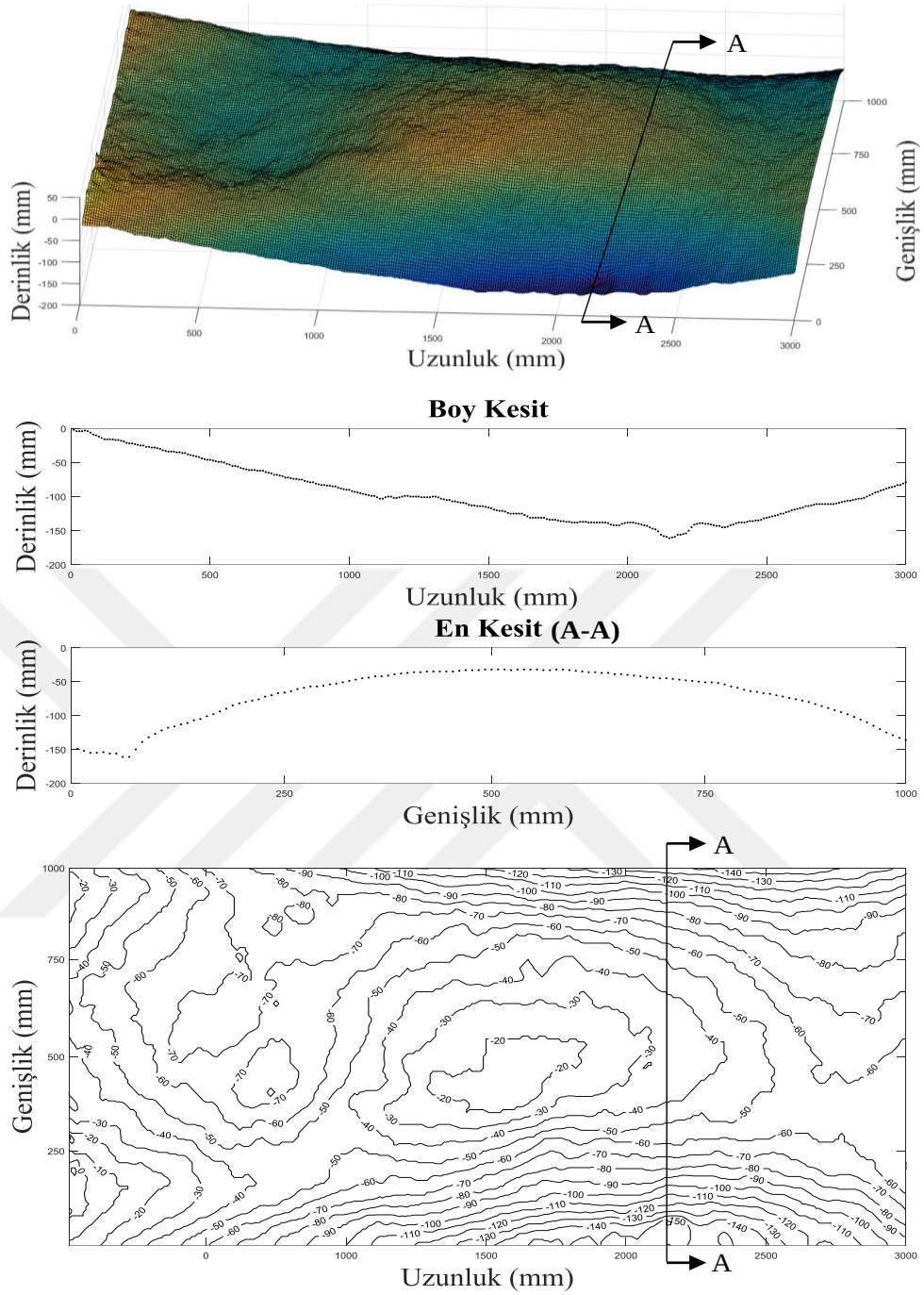
Oyulma çukurunun geometrisini belirlemek amacıyla x, y ve z yönlerinde limnometre ile okumalar yapılarak, maksimum oyulma derinliklerinde oyulma profilinin en ve boy kesitleri grafik ile oyulma çukurunun perspektifi ve taban topografyasının kontur haritaları ile Matlab yazılım programında yapılan üç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

Yapılan deneylerde debi, mansap su seviyesi, boşaltım kanalı taban açısı, havalandırıcı tipi, malzeme geometrisi ve basamak geometrisi değişikçe oyulma çukurunda meydana gelen değişiklikler, 4 üncü bölümde üç boyutlu ve iki boyutlu şekillerle anlatılmaktadır.

4. ARAşTIRMA BULGULARI

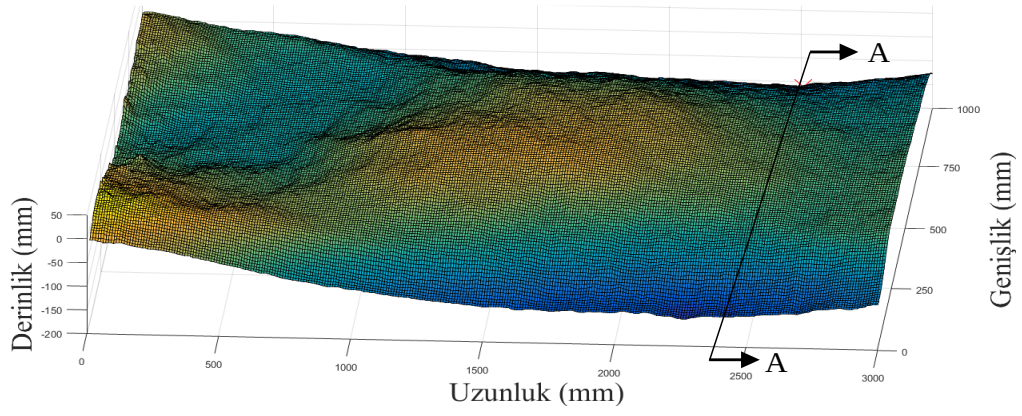
Bu tez için; İnönü Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda; 30, 40 ve 50° olmak üzere 3 farklı boşaltım kanalı açısı; 0.0125, 0.025, 0.0375 ve 0.05 m³/s/m olarak dört farklı birim debi; 1 adet havalandırıcısız, 3 adet A tipi ve 3 adet B tipi olmak üzere 7 adet havalandırıcı tipi kullanılarak, her biri en az 3 saat süren toplam 84 adet deney yapılmıştır. Yapılan bütün deneylerin verisinin bu kısımda verilmesi maalesef mümkün olmadığından sadece 0.05 m³/s/m'lik birim debi için yürütölen deneylerin sonuçları aşağıda verilmiştir.



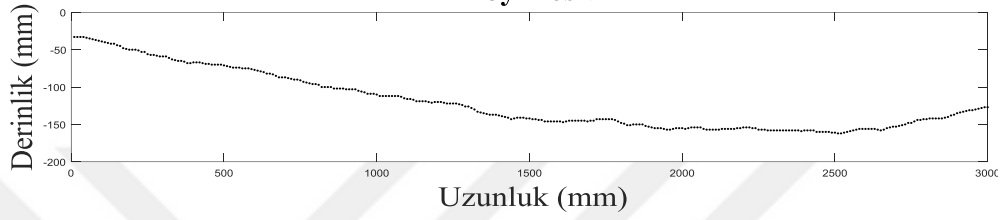


Şekil 4.1 Havalandırıcısız, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m’lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

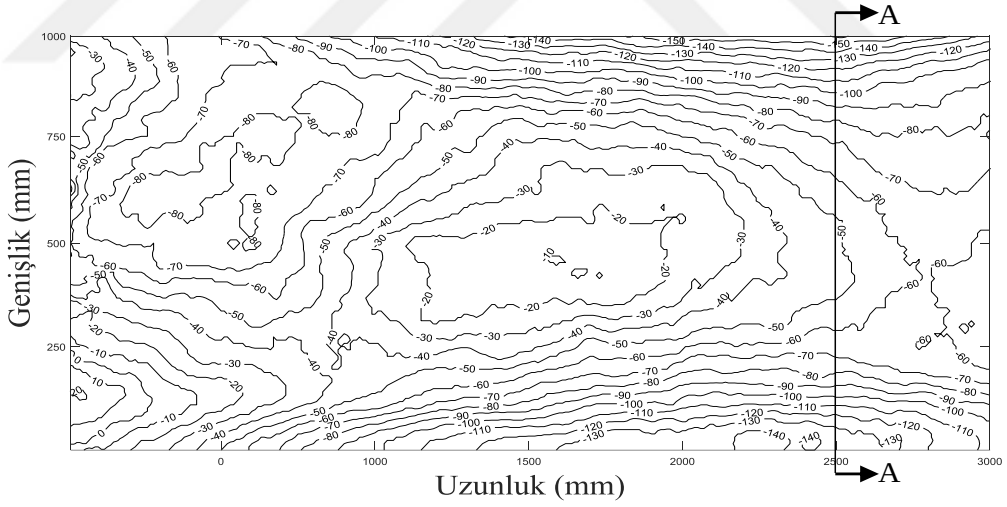
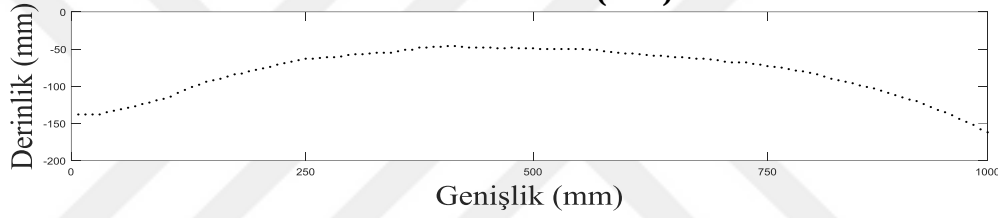
Şekil 4.1’de havalandırıcısı olmayan boşaltım kanalı için, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m’lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Bu şekilde oyulma topoğrafyasının üç boyutlu yüzey görüntüsü, maksimum oyulmanın meydana geldiği noktadan alınmış olan enkesit ve maksimum oyulma noktasından geçen boykesit verilmiştir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 215 cm sonra ve 15 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

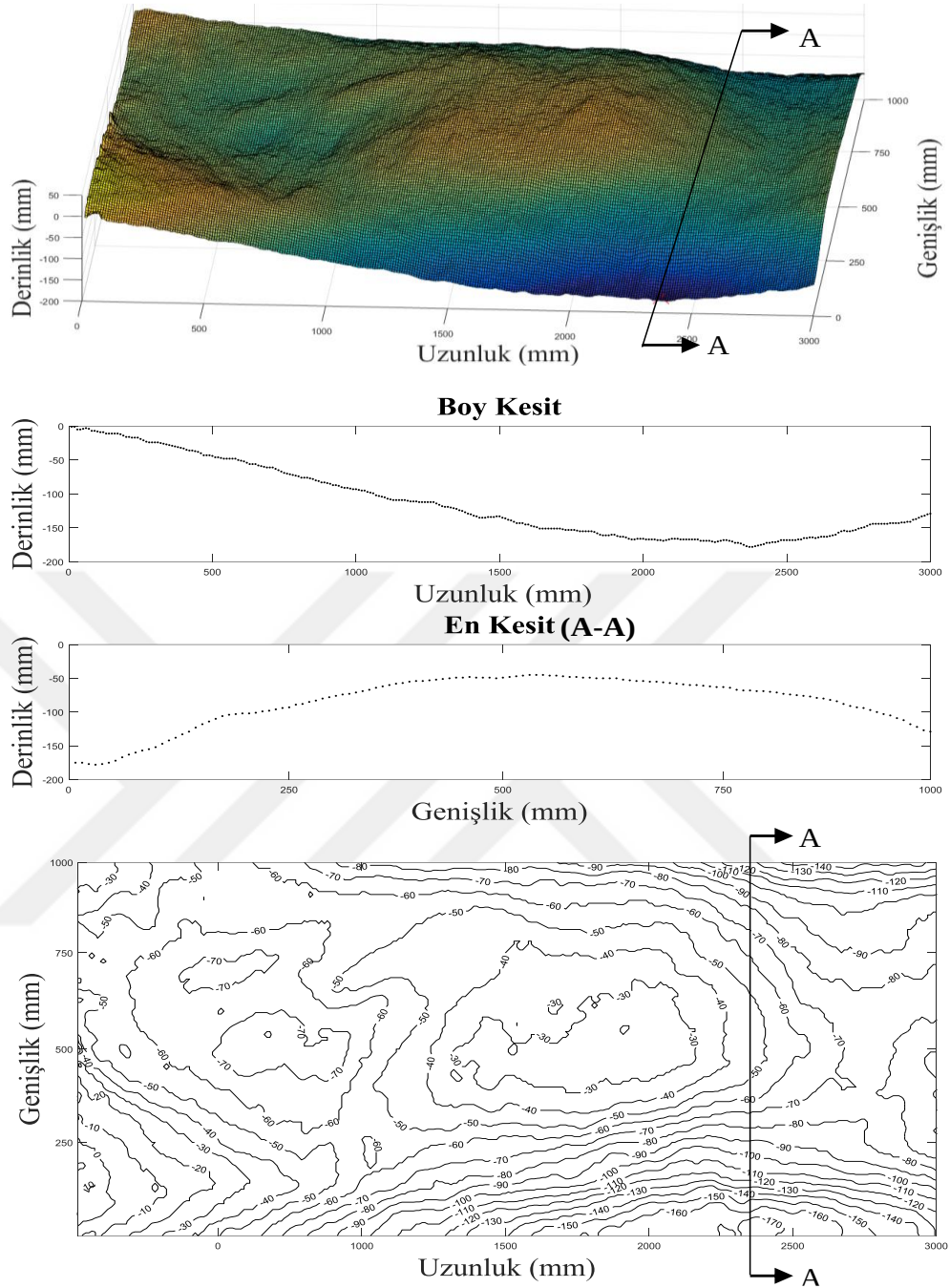


En Kesit (A-A)



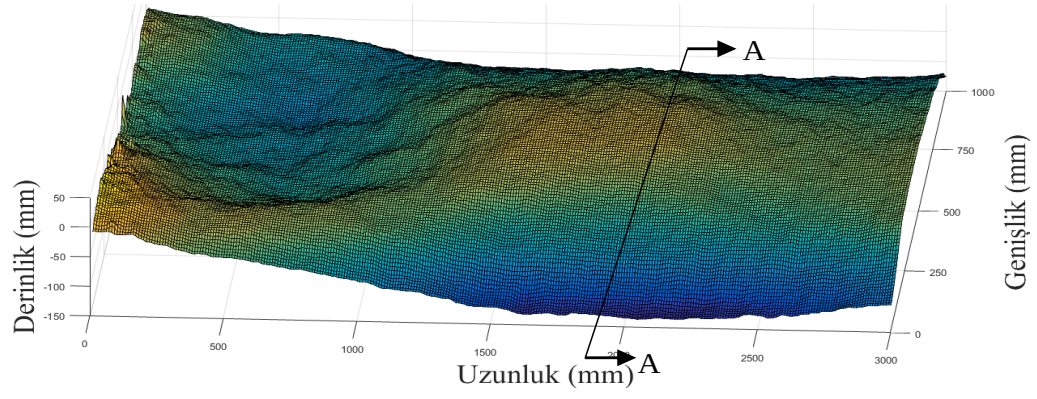
Şekil 4.2 1A havalandırıcısı, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

Şekil 4.2'de 1 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 250 cm sonra ve 16 cm derinliğinde meydana gelmiştir.

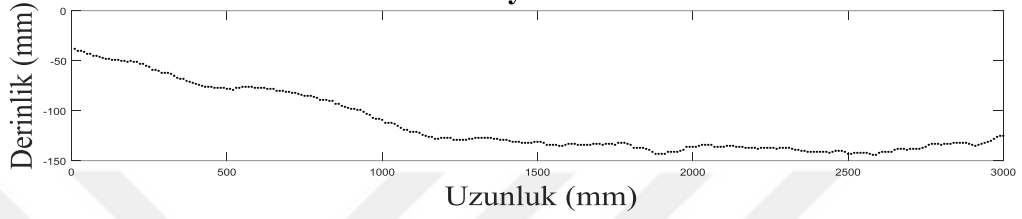


Şekil 4.3 2A havalandırıcısı, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m’lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

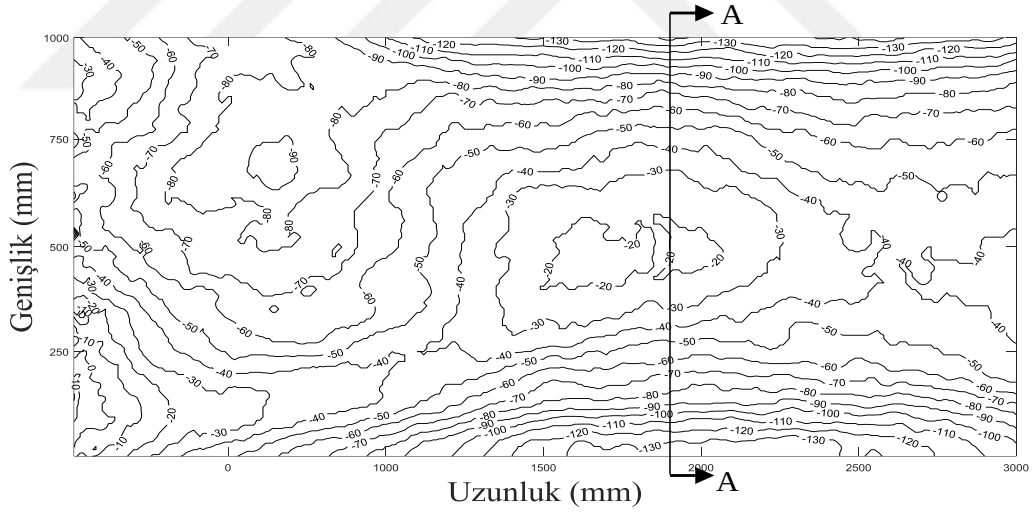
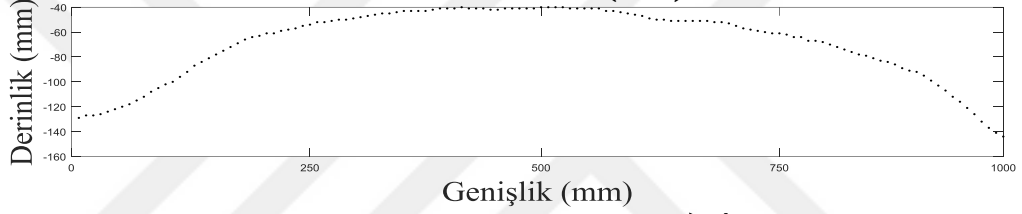
Şekil 4.3’te 2 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m’lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 240 cm sonra ve 17 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

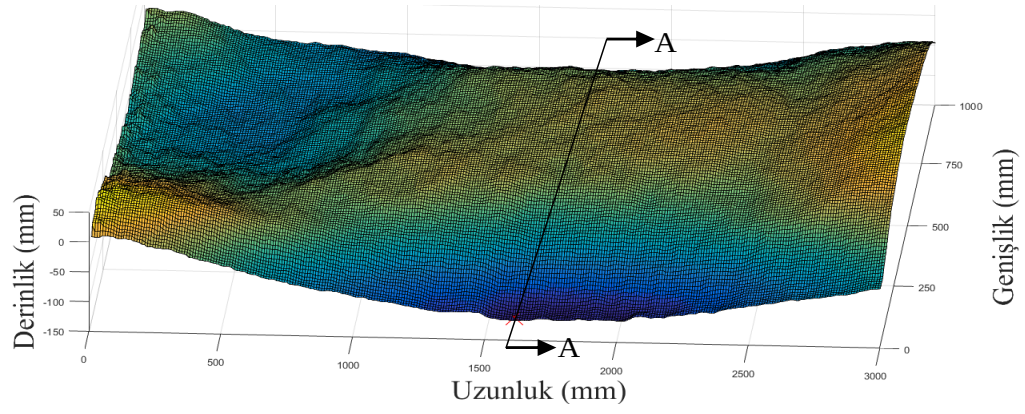


En Kesit (A-A)

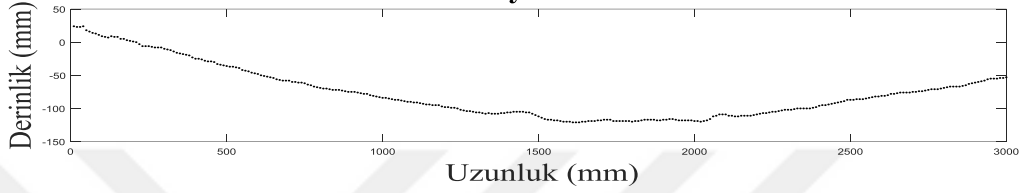


Şekil 4.4 3A havalandırıcısı, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

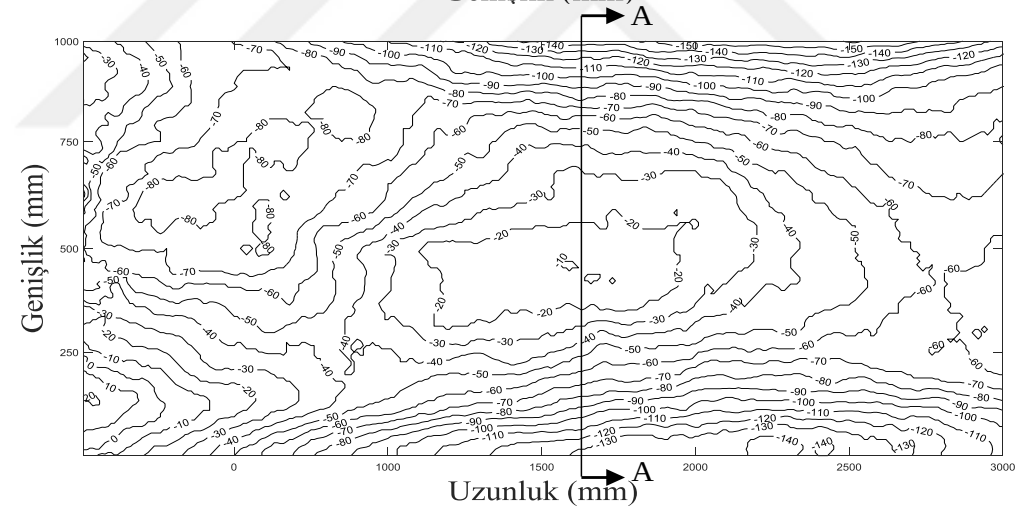
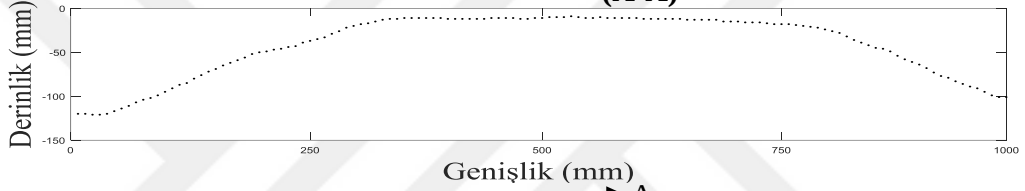
Şekil 4.4'te 3 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 190 cm sonra ve 14.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

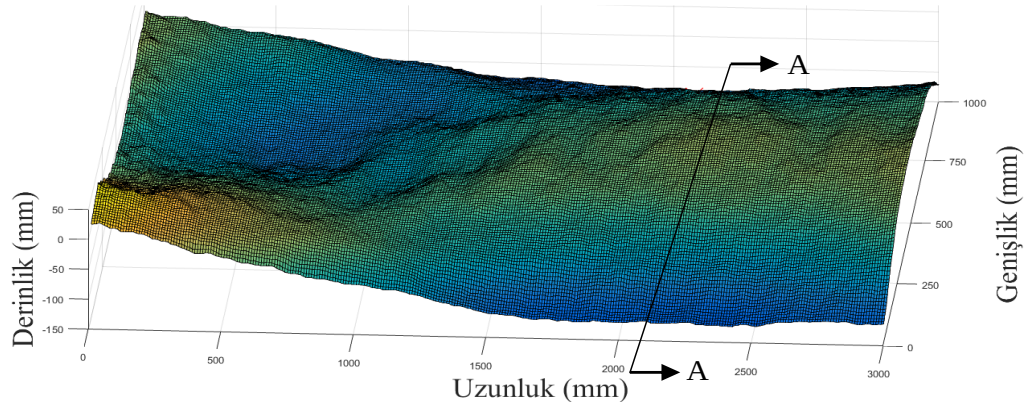


En Kesit (A-A)

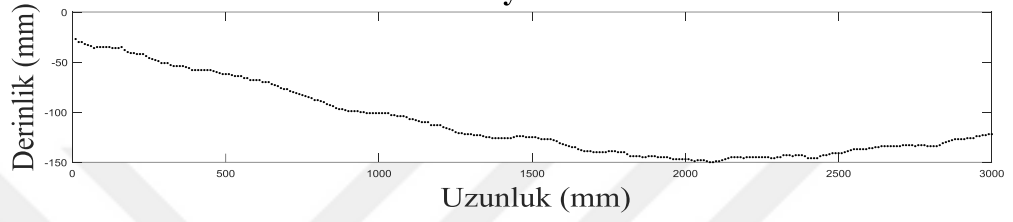


Şekil 4.5 1B havalandırıcısı, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

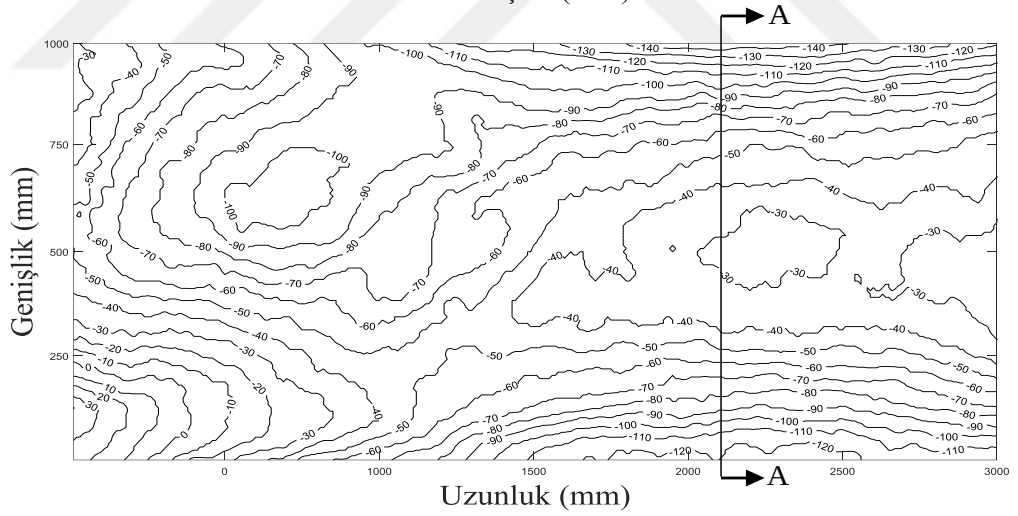
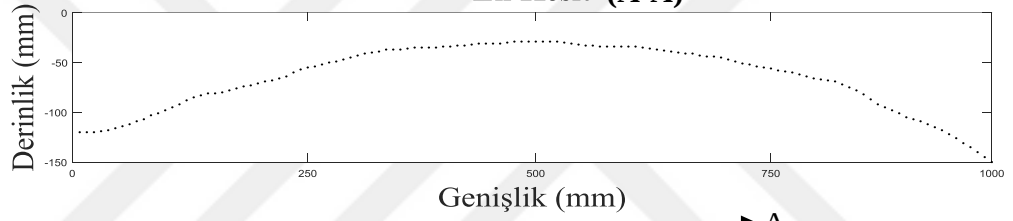
Şekil 4.5'te 1 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 165 cm sonra ve 12 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

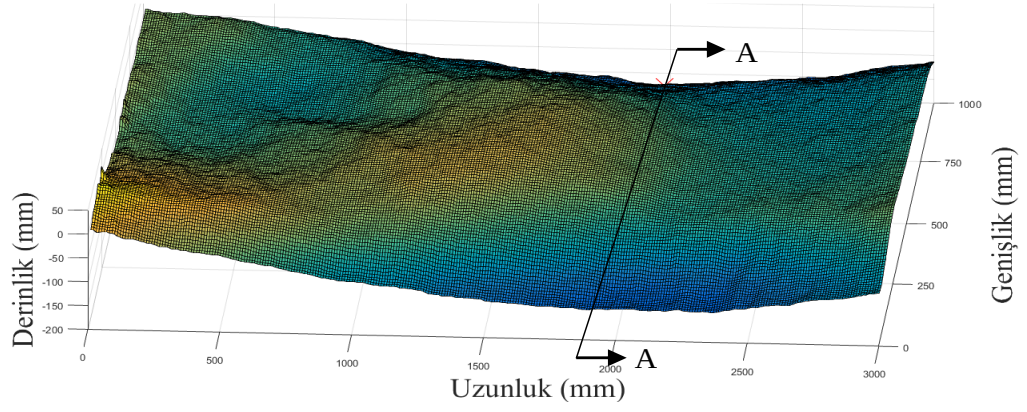


En Kesit (A-A)

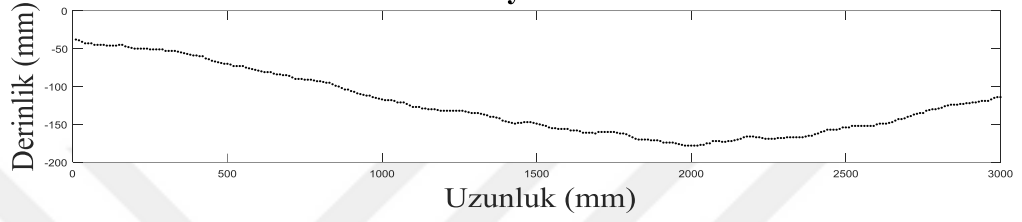


şekil 4.6 2B havalandırıcısı, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

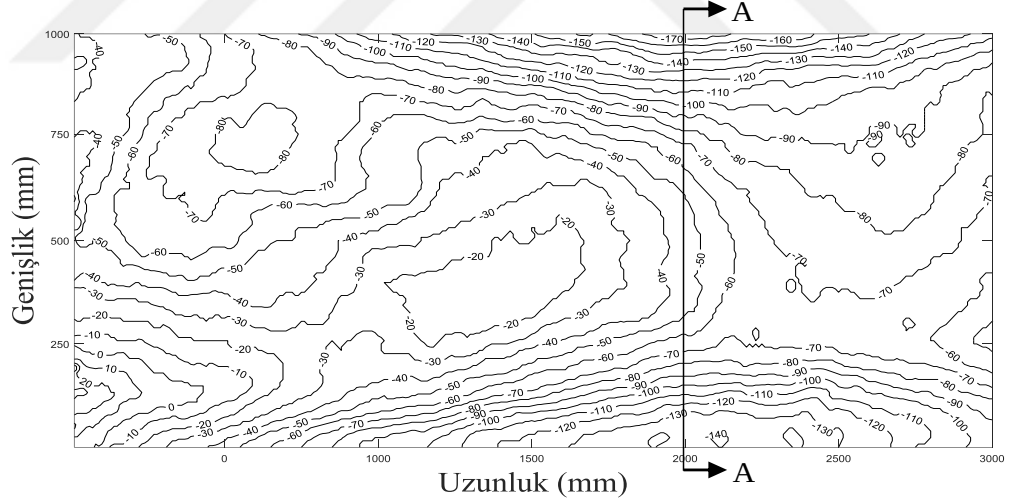
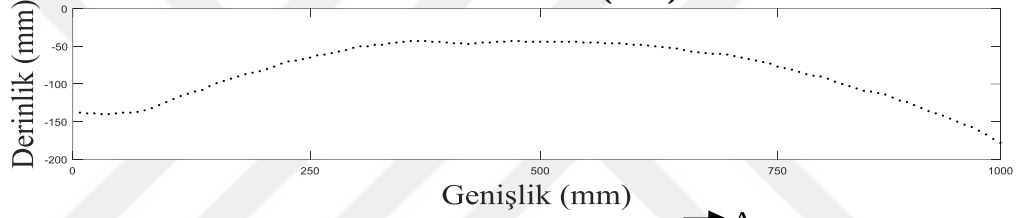
şekil 4.6'da 2 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görölmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 210 cm sonra ve 15 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

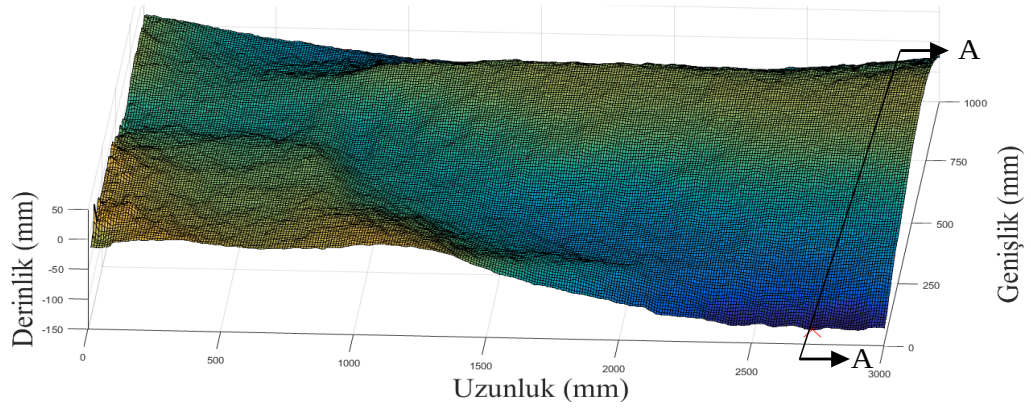


En Kesit (A-A)

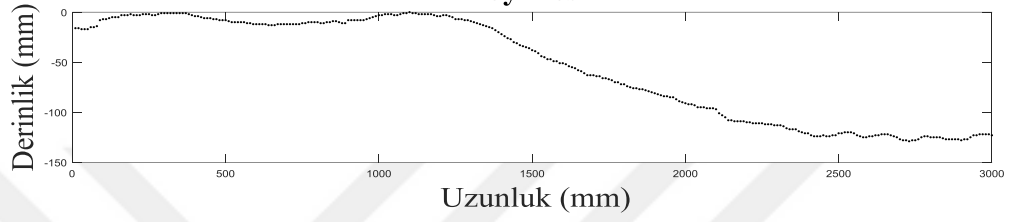


Şekil 4.7 3B havalandırıcısı, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

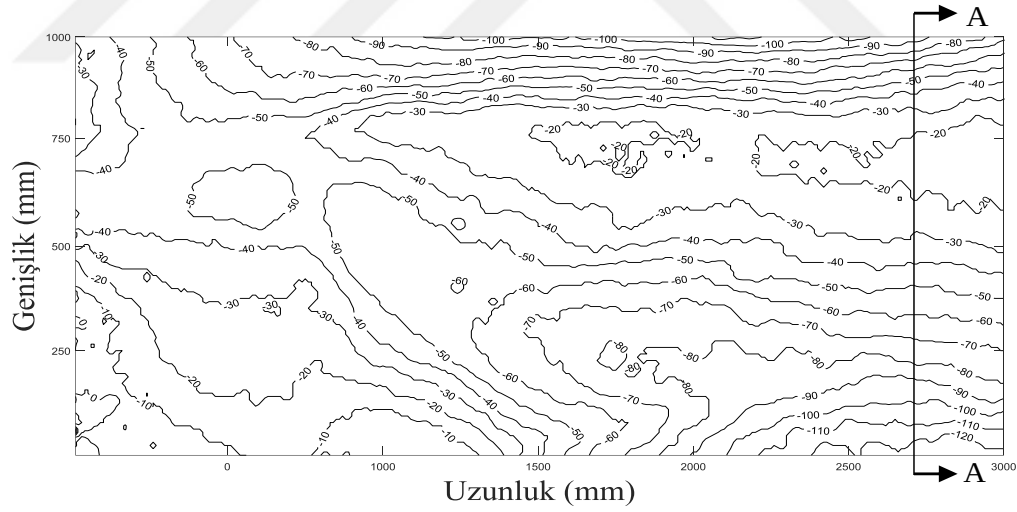
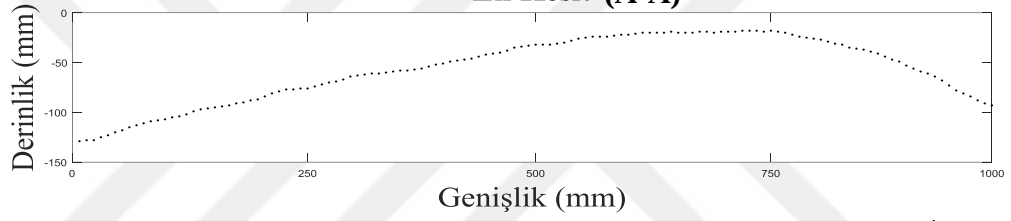
Şekil 4.7'de 3 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 30° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 200 cm sonra ve 17.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

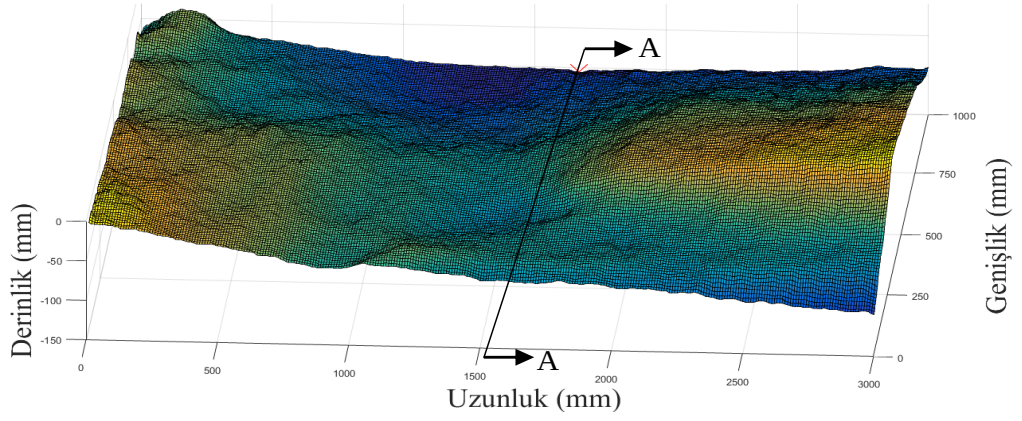


En Kesit (A-A)

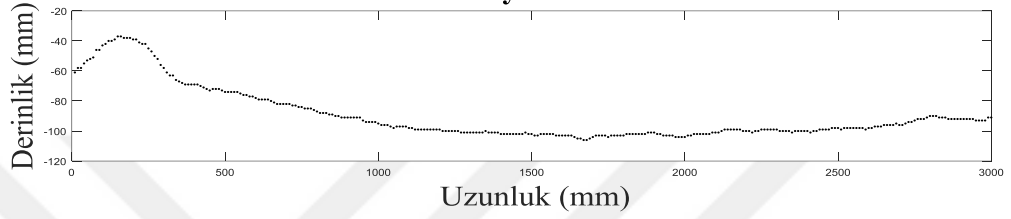


Şekil 4.8 Havalandırıcısız, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m’lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

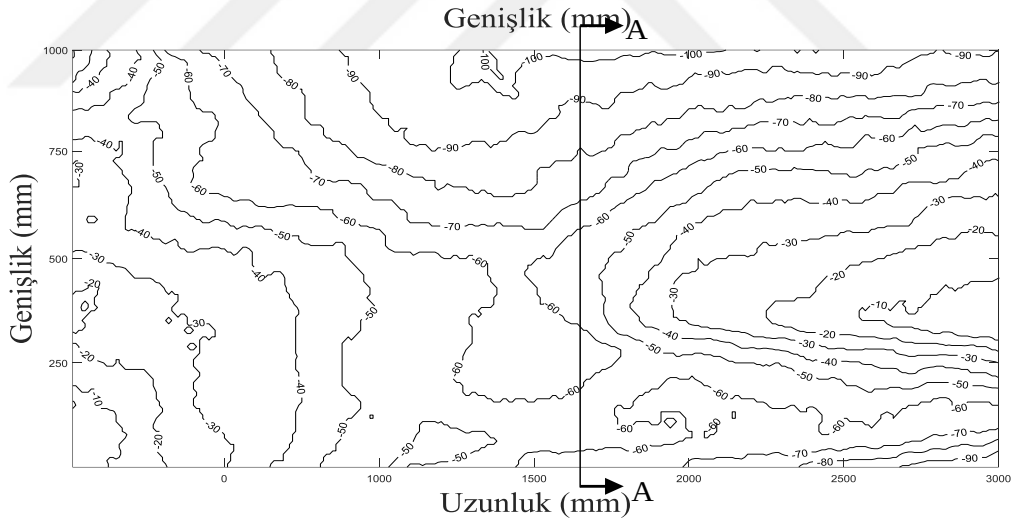
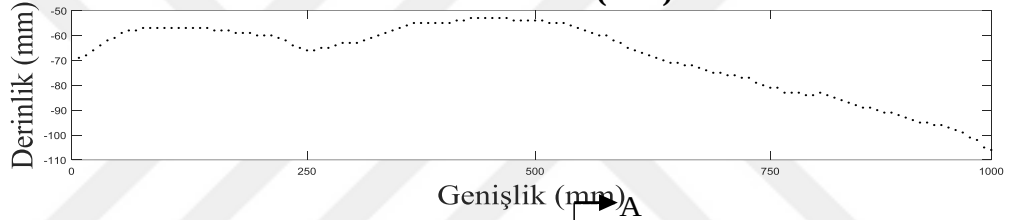
Şekil 4.8’de havalandırıcısı olmayan boşaltım kanalı için, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m’lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 273 cm sonra ve 12.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

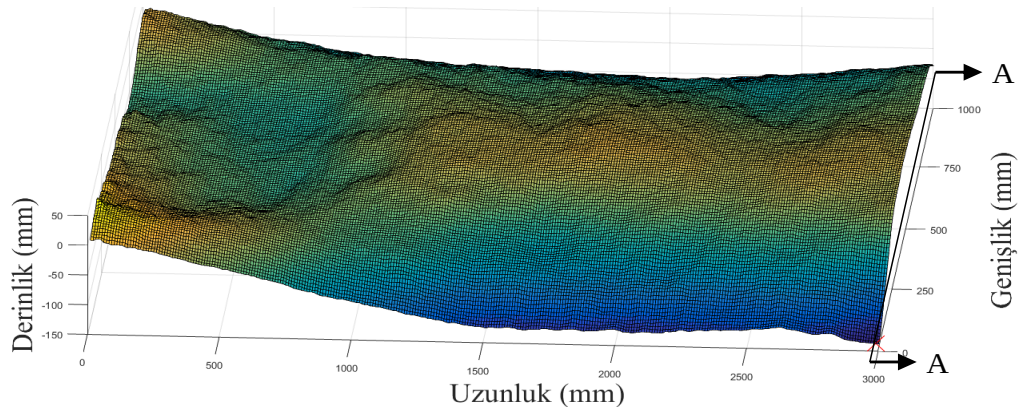


En Kesit (A-A)

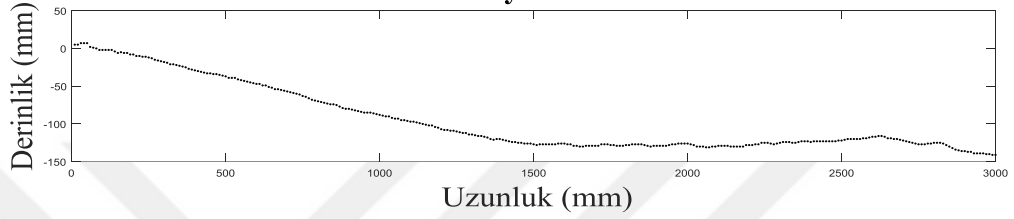


Şekil 4.9 1A havalandırıcısı, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

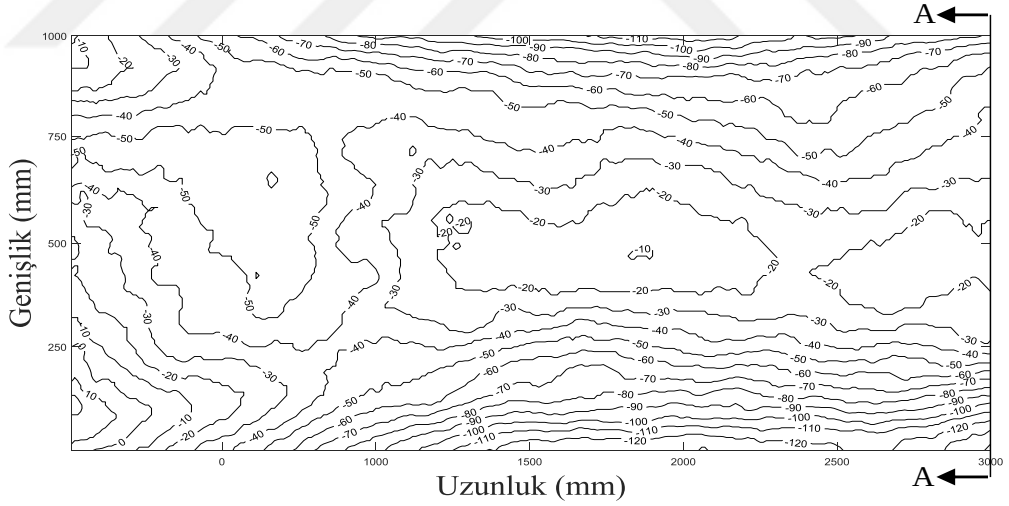
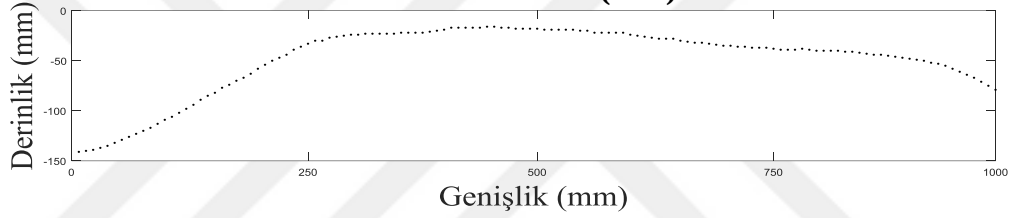
Şekil 4.9'da 1 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 40° şüt açısı ve 20 l/s'lik debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 165 cm sonra ve 10.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

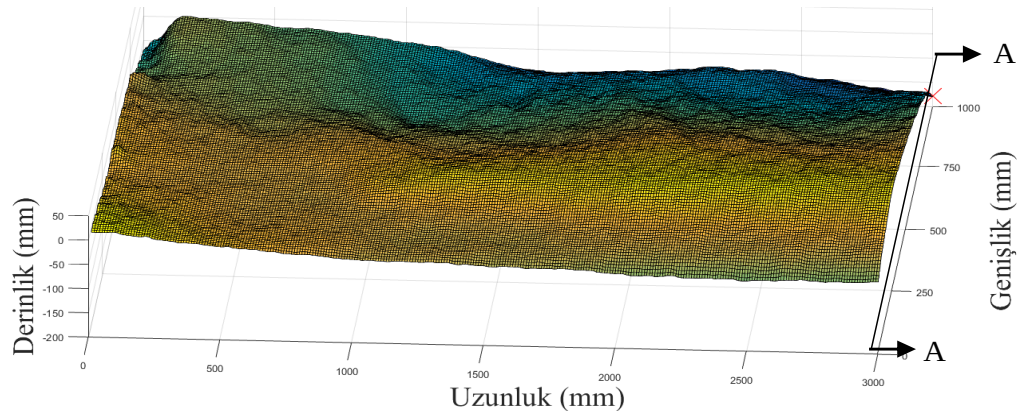


En Kesit (A-A)

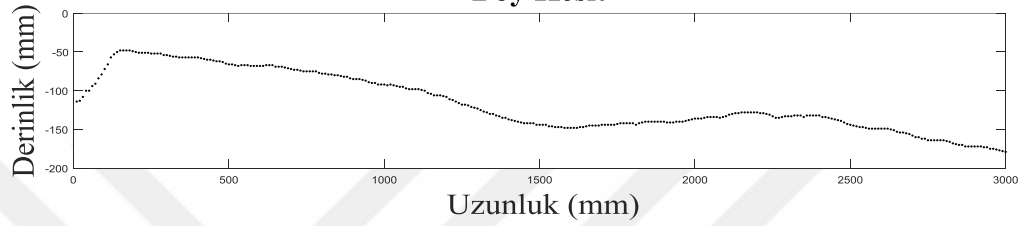


Şekil 4.10 2A havalandırıcısı, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

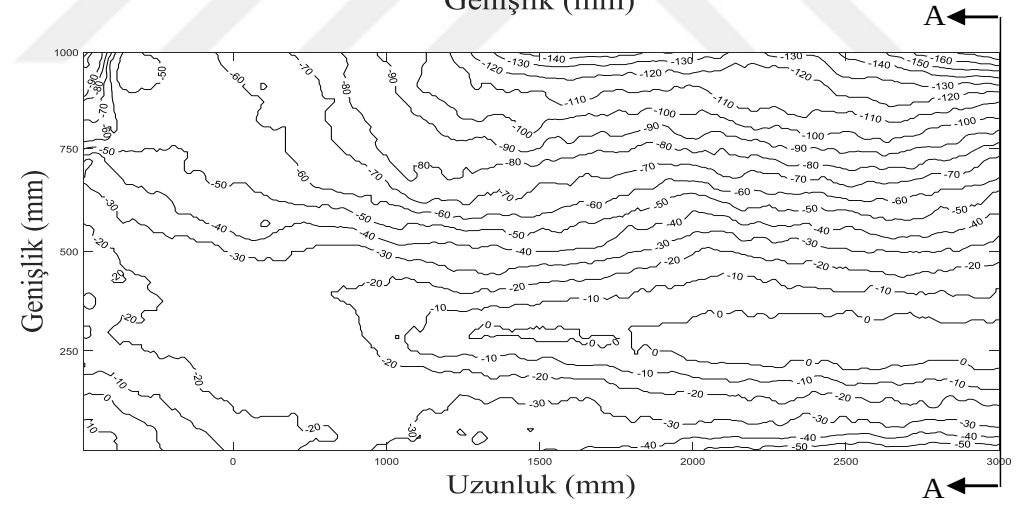
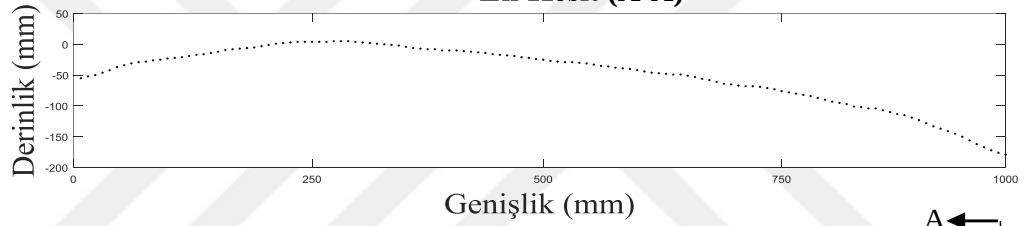
Şekil 4.10'da 2 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 300 cm sonra ve 14 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

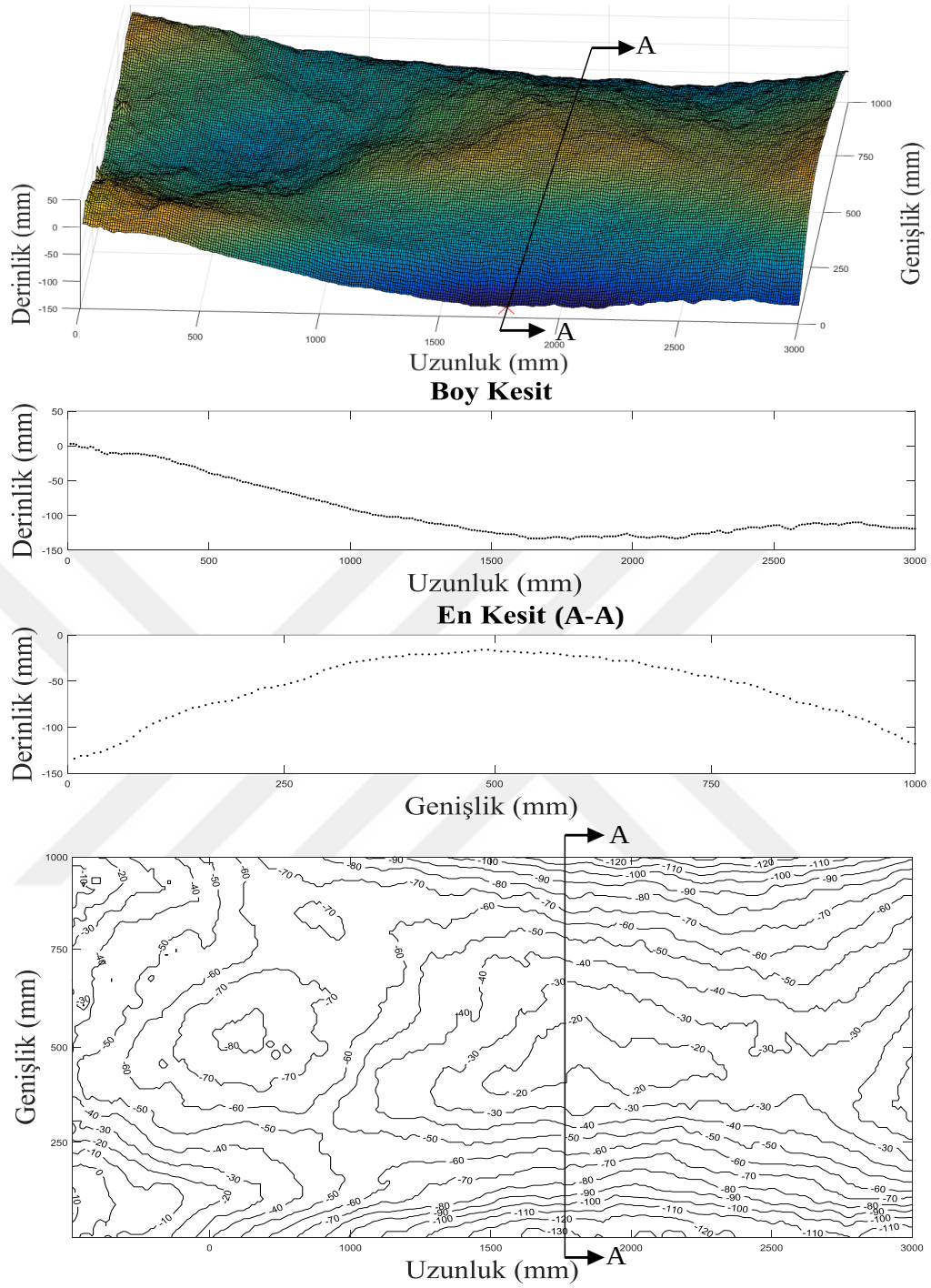


En Kesit (A-A)



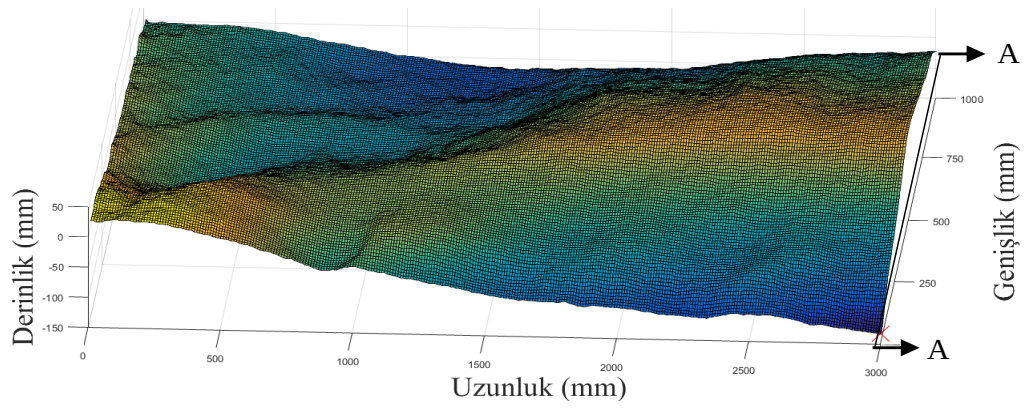
Şekil 4.11 3A havalandırıcısı, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

Şekil 4.11'de 3 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 300 cm sonra ve 17.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.

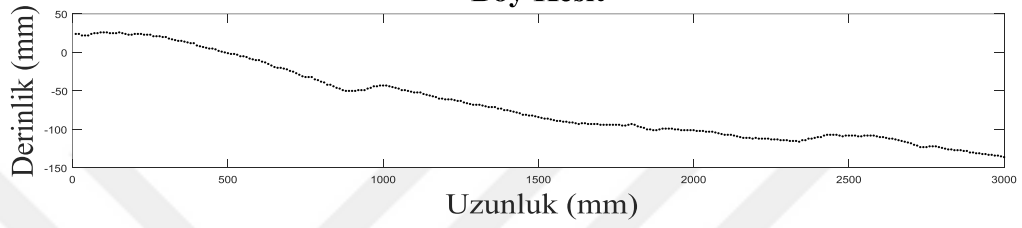


şekil 4.12 1B havalandırıcısı, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

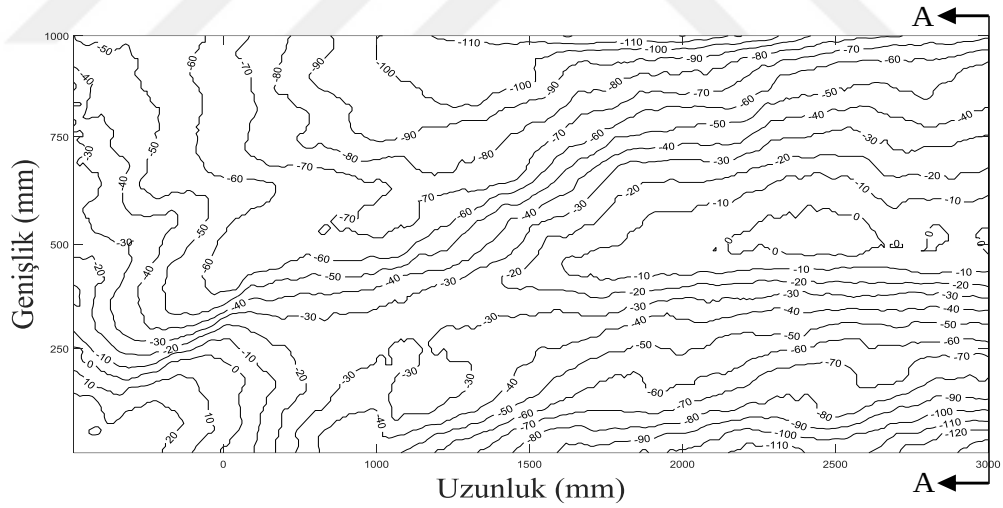
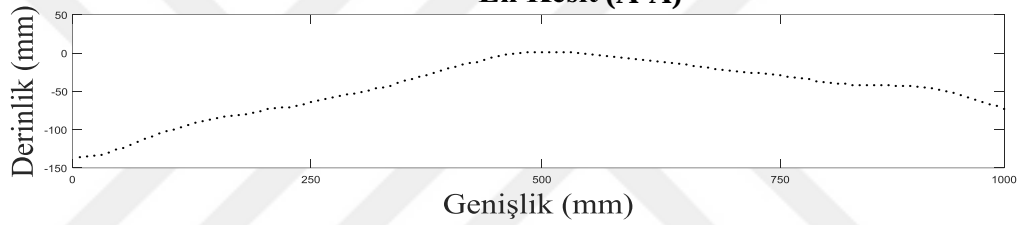
şekil 4.12'de 1 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görölmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 177 cm sonra ve 14 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

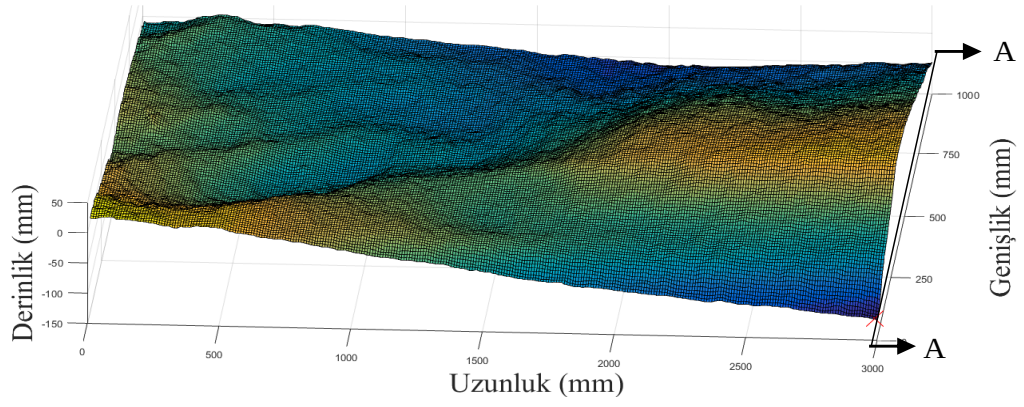


En Kesit (A-A)

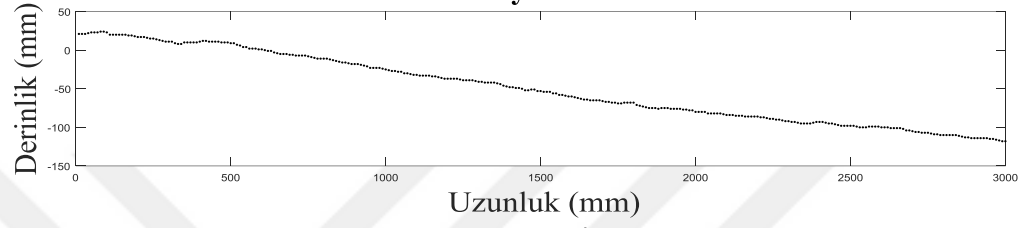


Şekil 4.13 2B havalandırıcısı, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

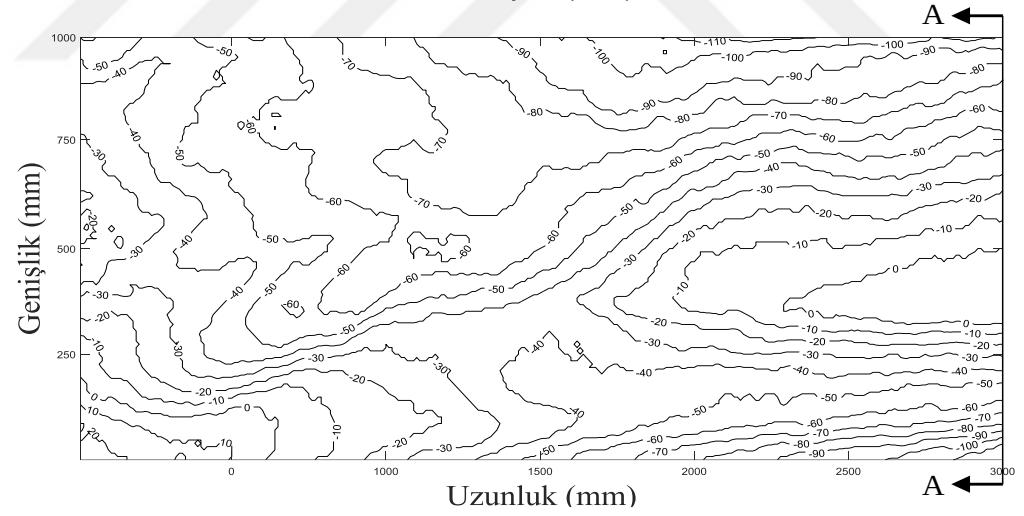
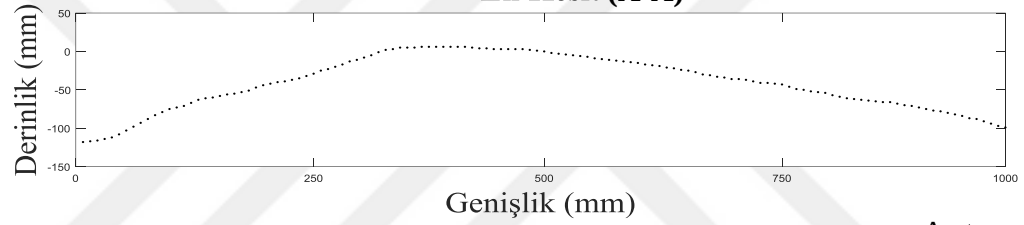
Şekil 4.13'te 2 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 300 cm sonra ve 13 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

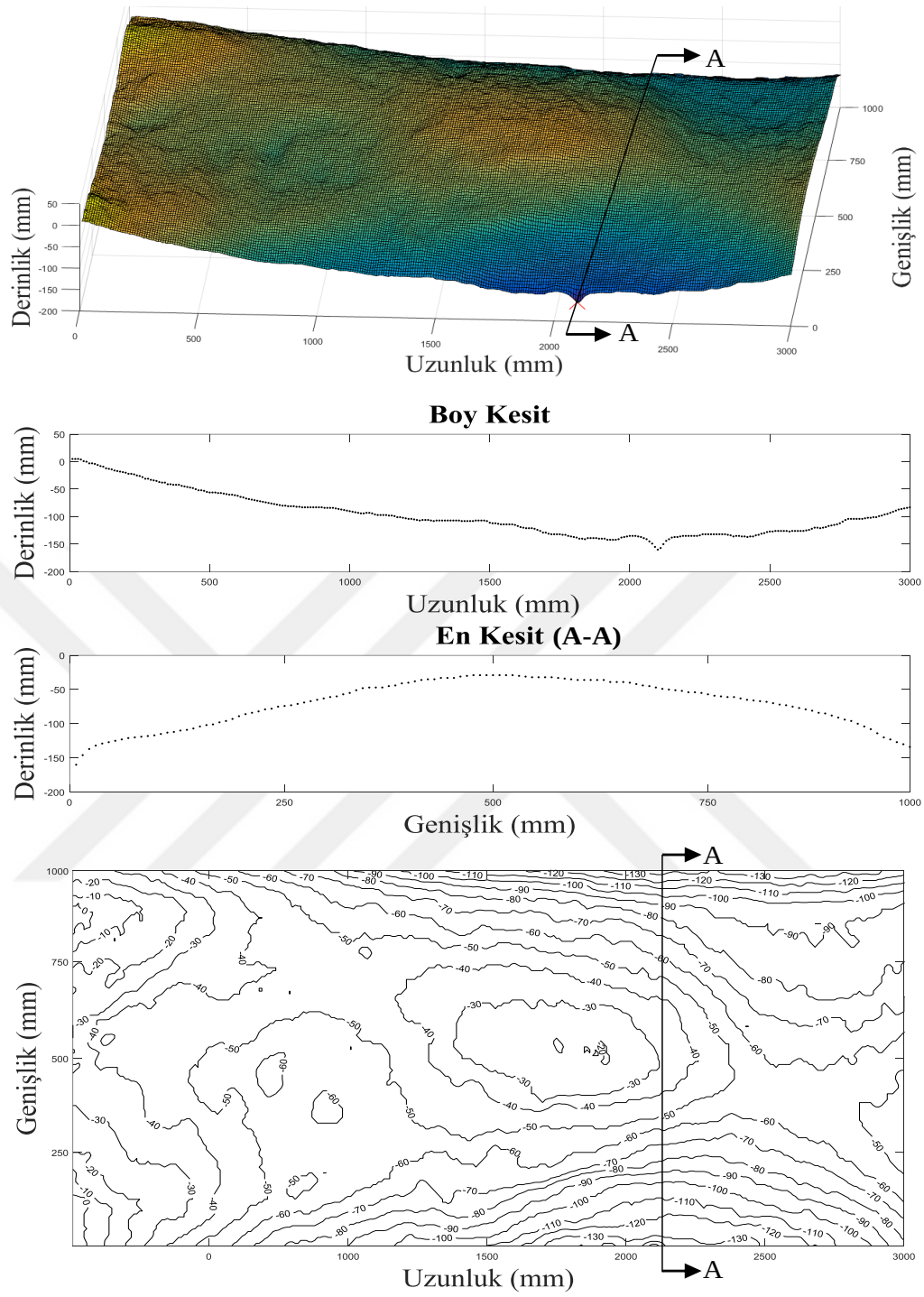


En Kesit (A-A)



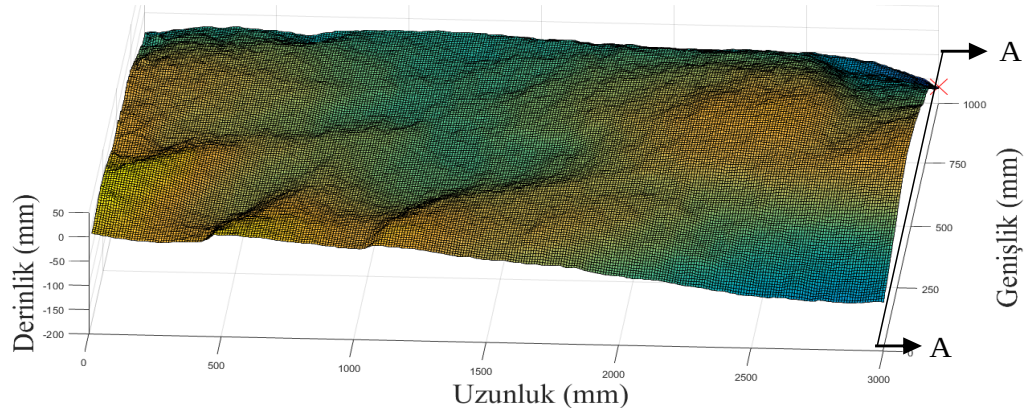
Şekil 4.14 3B havalandırıcısı, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

Şekil 4.14'te 3 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 40° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 300 cm sonra ve 12 cm derinliğinde meydana gelmiştir.

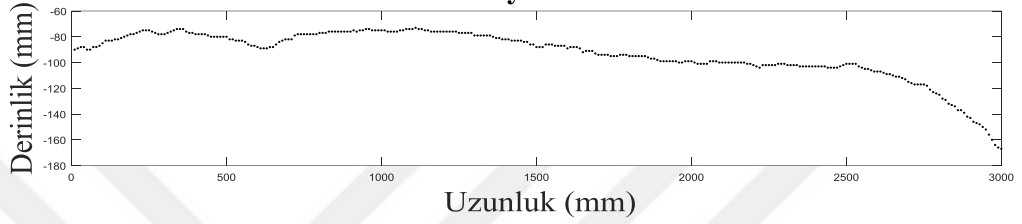


Şekil 4.15 Havalandırıcısız, 50° şüt açısı ve $0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

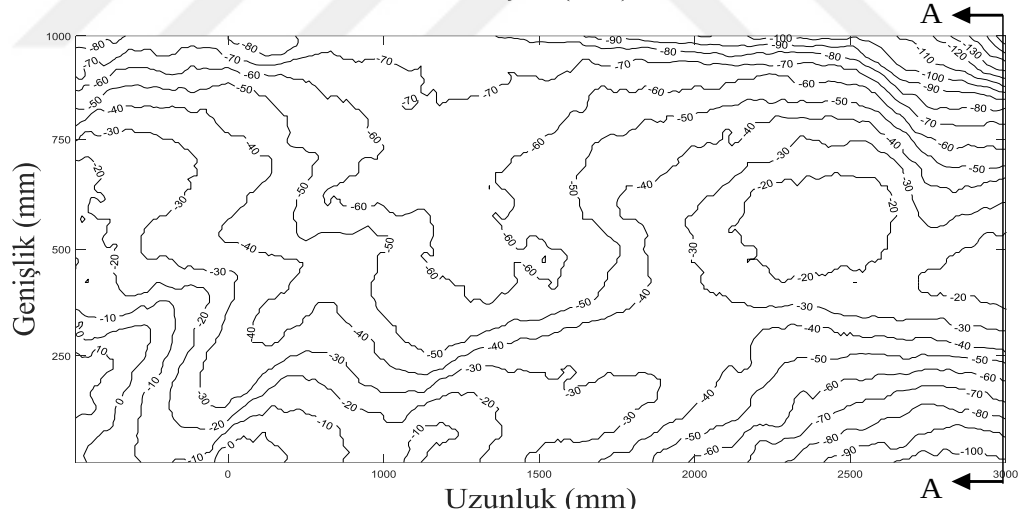
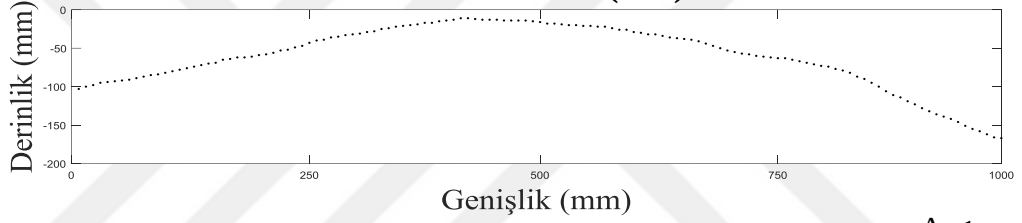
Şekil 4.15'te havalandırıcısı olmayan boşaltım kanalı için, 50° şüt açısı ve $0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 210 cm sonra ve 15 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

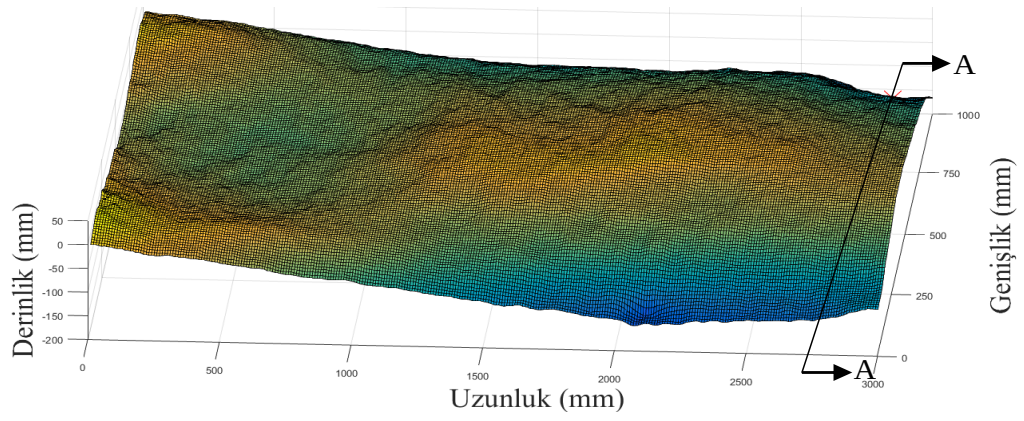


En Kesit (A-A)

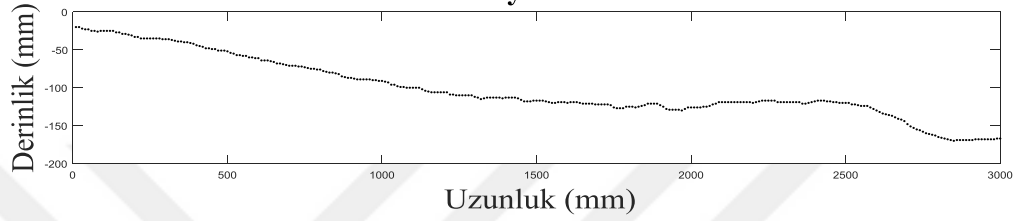


Şekil 4.16 1A havalandırıcısı, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

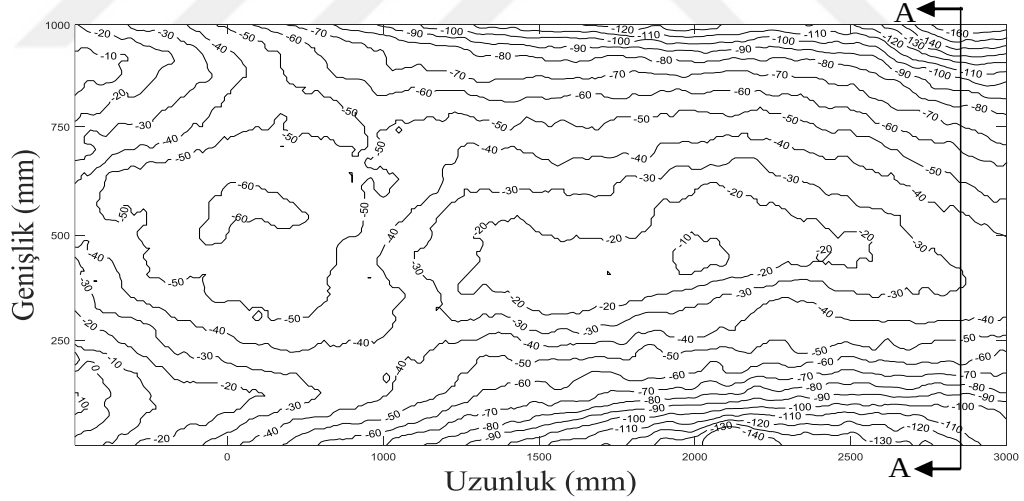
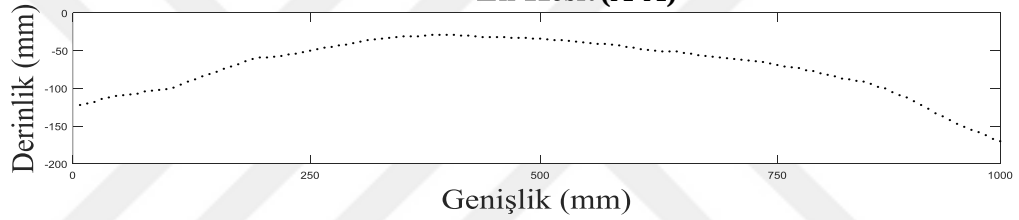
Şekil 4.16'da 1 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 300 cm sonra ve 16.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

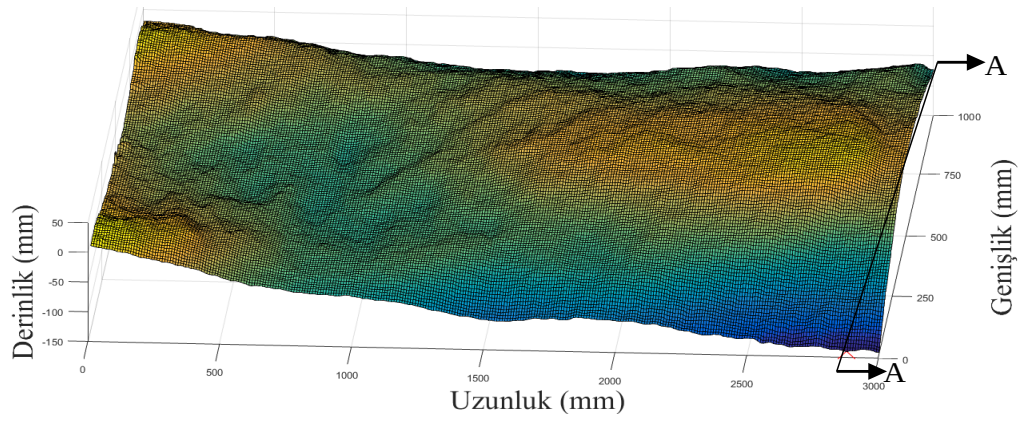


En Kesit (A-A)

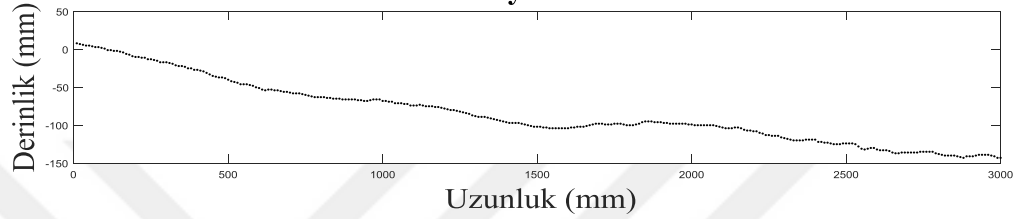


Şekil 4.17 2A havalandırıcısı, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

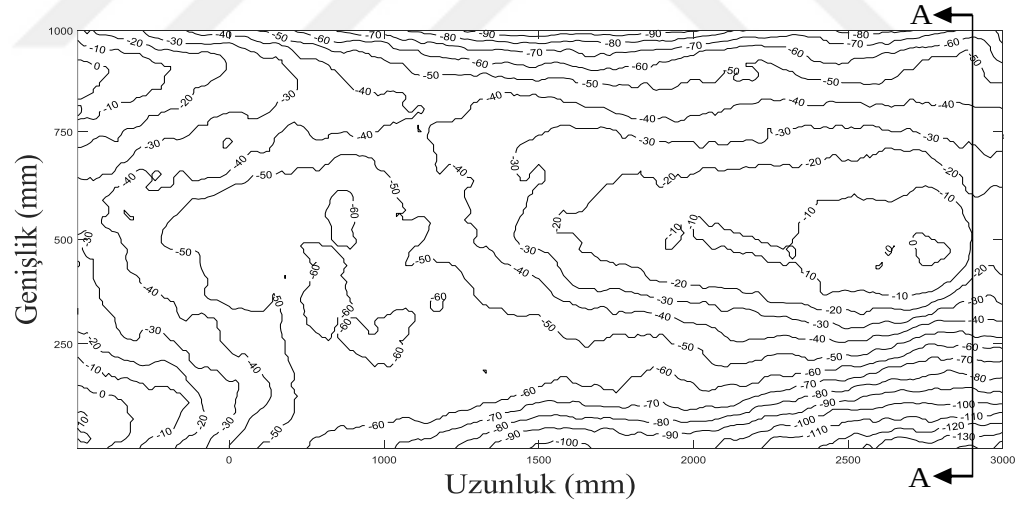
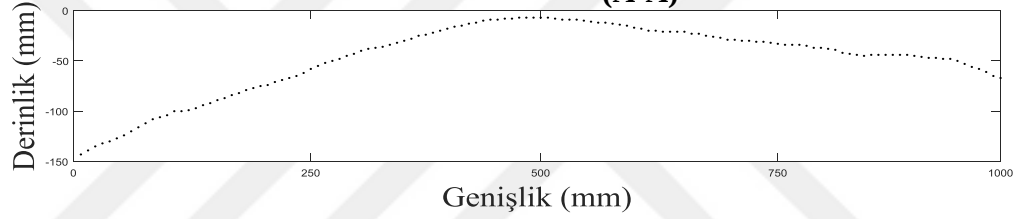
Şekil 4.17'de 2 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 285 cm sonra ve 16.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

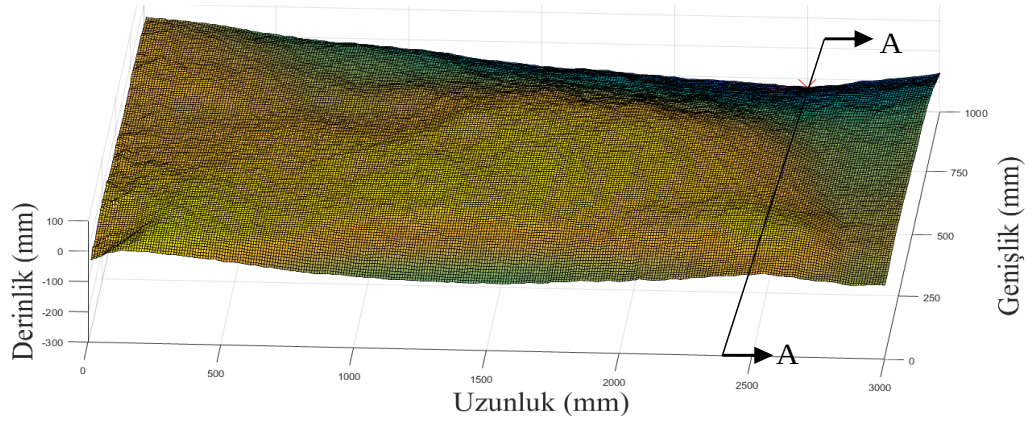


En Kesit (A-A)

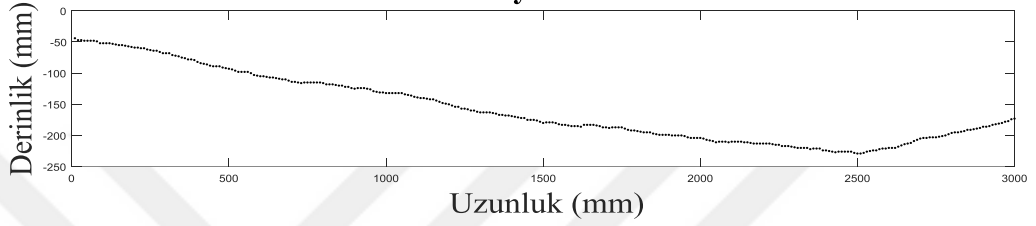


Şekil 4.18 3A havalandırıcısı, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

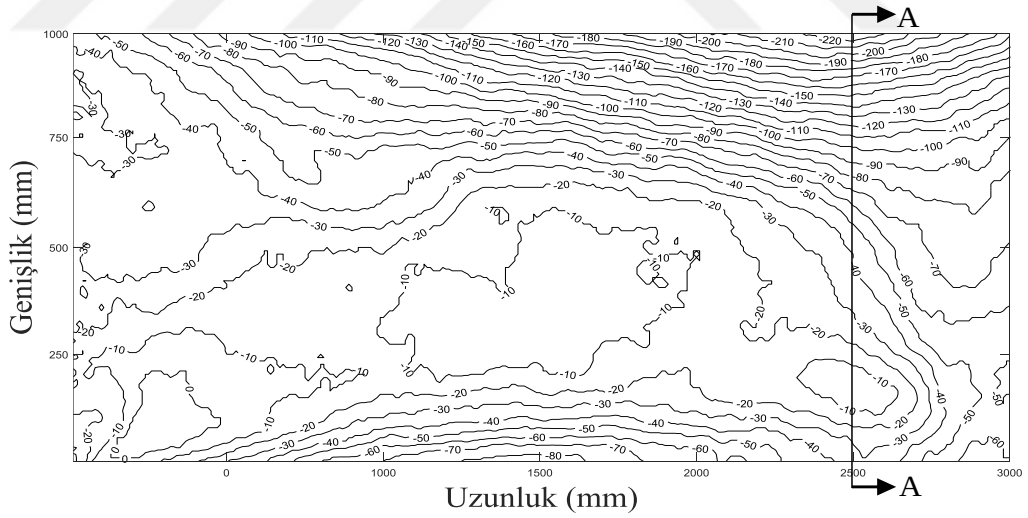
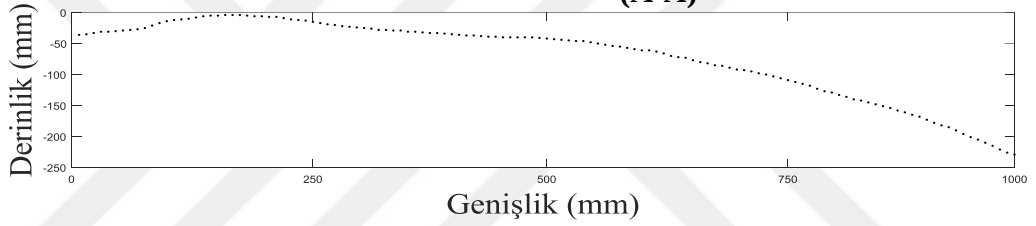
Şekil 4.18'de 3 adet A tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 290 cm sonra ve 14.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

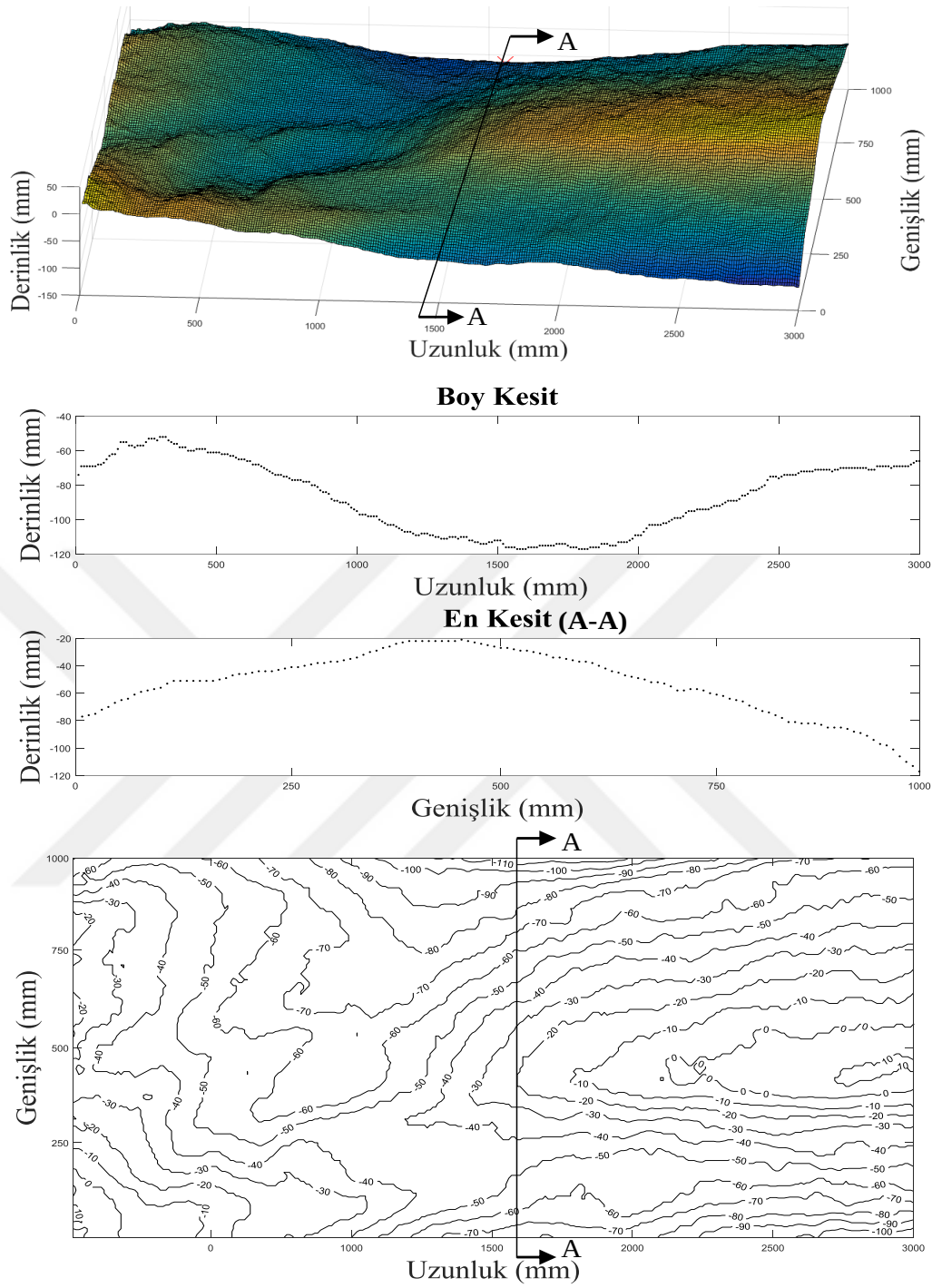


En Kesit (A-A)



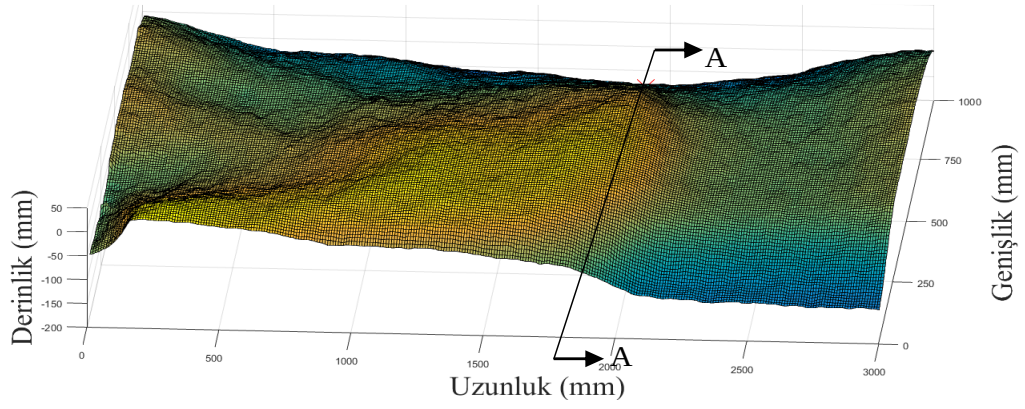
Şekil 4.19 1B havalandırıcısı, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

Şekil 4.19'da 1 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 250 cm sonra ve 22.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.

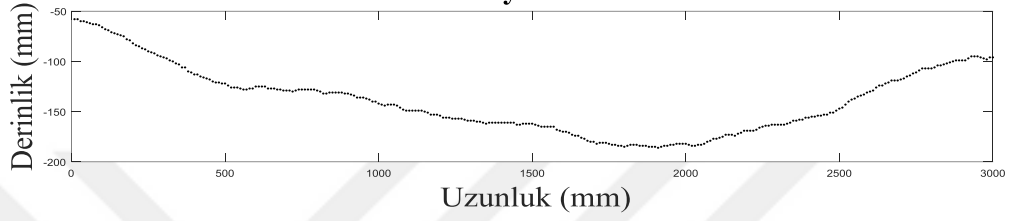


Şekil 4.20 2B havalandırıcısı, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

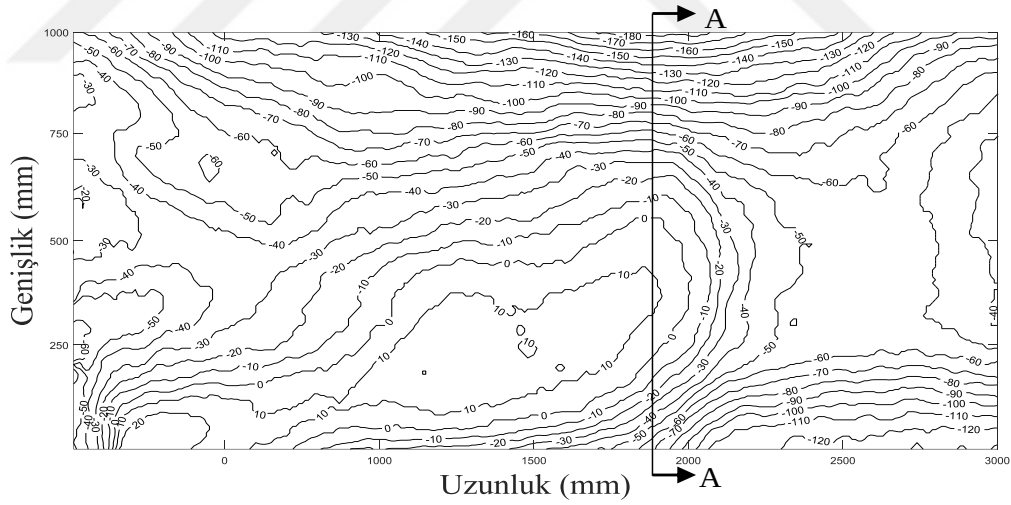
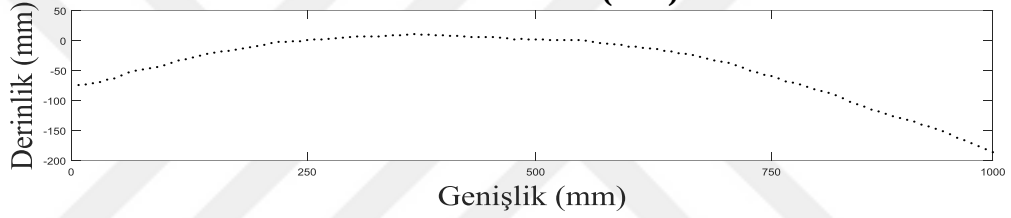
Şekil 4.20'de 2 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 160 cm sonra ve 14.5 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Boy Kesit

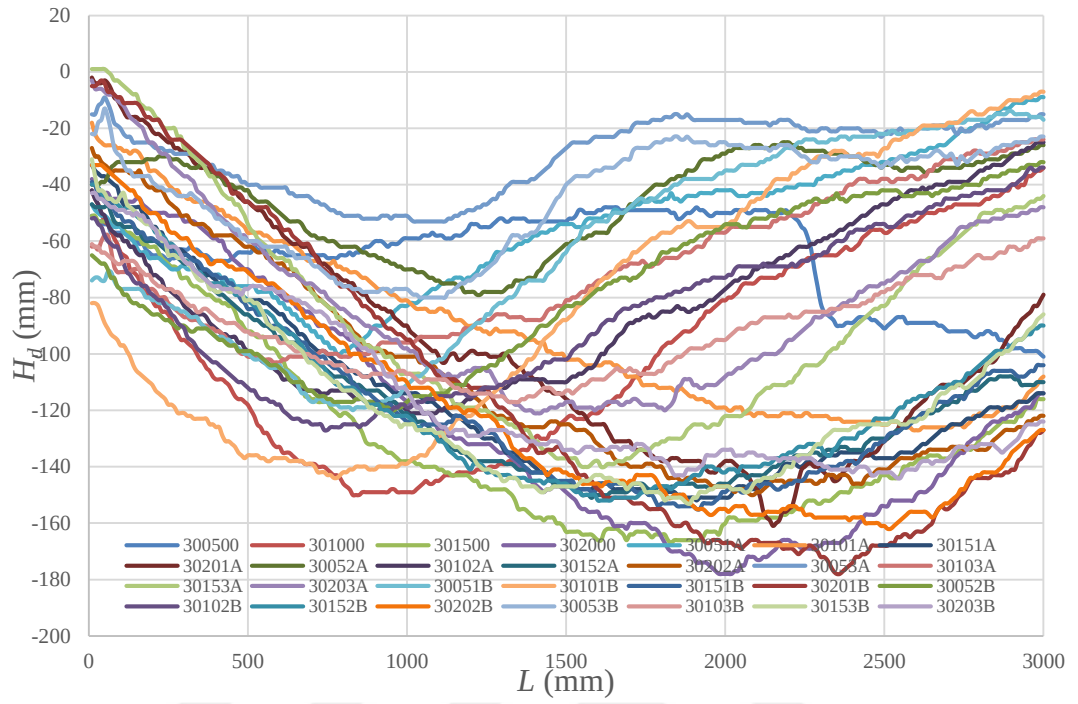


En Kesit (A-A)

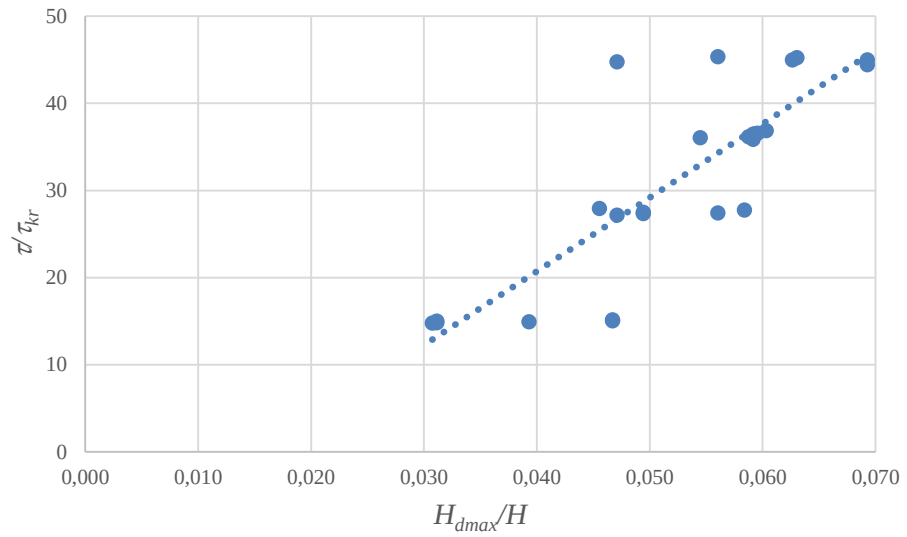


Şekil 4.21 3B havalandırıcısı, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi ile oluşan oyulma topoğrafyası

Şekil 4.21'de 3 adet B tipi havalandırıcısı olan boşaltım kanalı için, 50° şüt açısı ve 0.05 m³/s/m'lik birim debi kullanılarak yapılan deneyin sonucunda mansap havuzunda oluşan oyulma topoğrafyası görülmektedir. Maksimum oyulma derinliği, mansap havuzunun başlangıcından 190 cm sonra ve 18 cm derinliğinde meydana gelmiştir.



Şekil 4.22 $H_d - L$ grafikleri ($\alpha=30^\circ$)



Şekil 4.23 $\tau/\tau_{cr} - H_{dmax}/H$ grafiği ($\alpha=30^\circ$)

Bu kısımda deneylerde kullanılan malzemenin, farklı şüt açıları ve farklı birim debilerde τ/τ_{kr} değerlerinin, H_{dmax}/H değerleri ile değişimi, Şekil 4.23, 4.29 ve 4.35'te grafikler halinde gösterilmiş ve bu grafiklerden yola çıkılarak bir takım yorumlarda bulunulmuştur.

Test edilen bütün deney dizilerinde havalandırıcı kullanımı ile birlikte oyulma miktarları azalmaktadır. Debiyle paralel olarak hidrolik yarıçap değerleri de artmıştır. Sonuçta hidrolik yarıçap değerlerinin artışı τ/τ_{kr} değerlerini de arttırmıştır. τ ve τ_{kr} değerleri denklem (4,1) ve (4,2)'de verilmiştir.

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J \quad (4,1)$$

$$\tau_{kr} = 0.06(\gamma_s - \gamma) d_{50} \quad (4,2)$$

burada;

τ : Kayma gerilmesi (N/m²),

τ_{kr} : Kritik kayma gerilmesi (N/m²),

R : Hidrolik yarıçap (m),

J : Eğim,

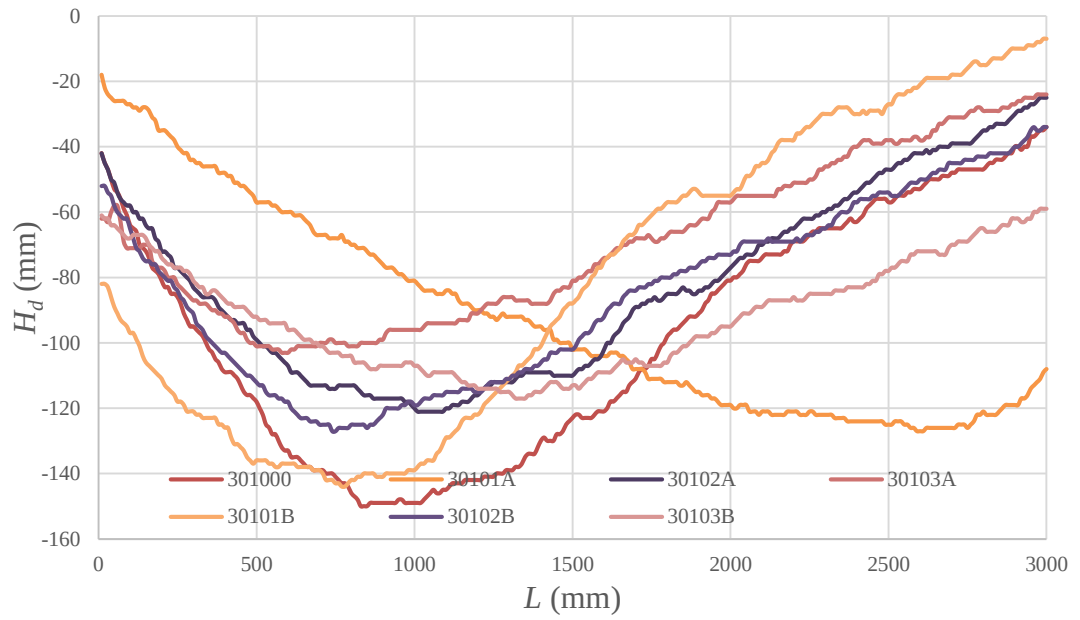
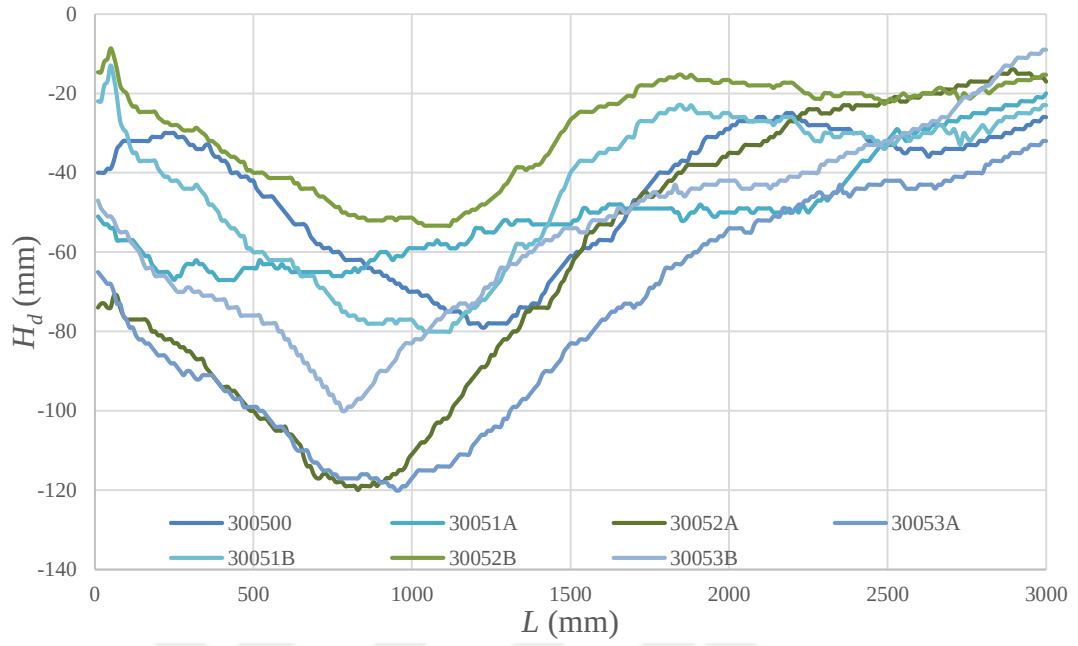
γ_s : Dane birim hacim ağırlığı (N/m³),

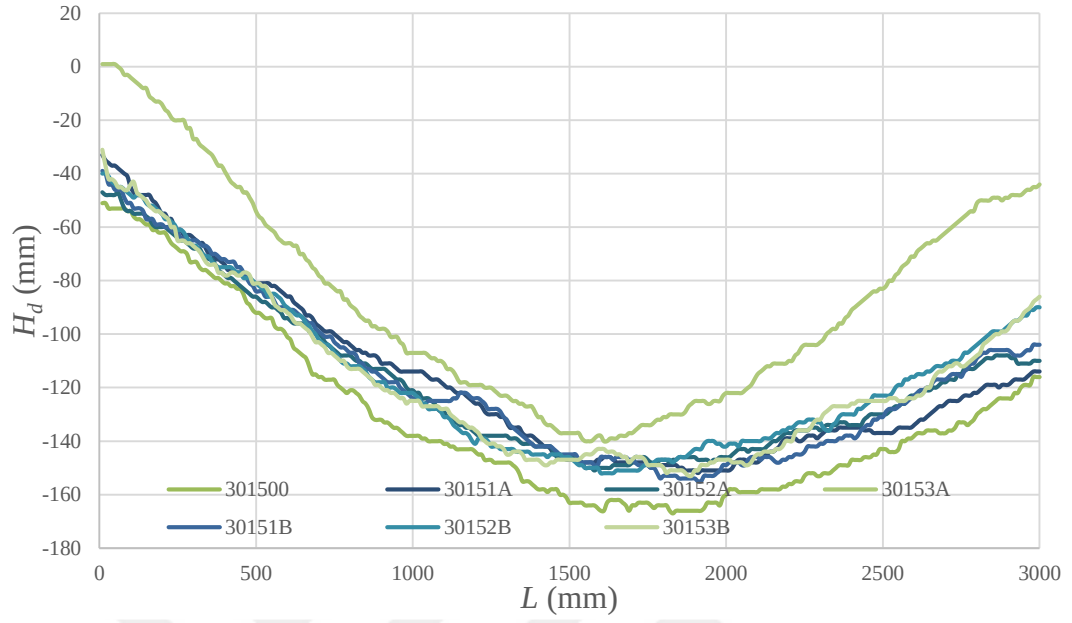
γ : Suyun birim hacim ağırlığı (N/m³),

d_{50} : Malzemenin ağırlık olarak %50'sinin elekten geçtiği dane çapı (m).

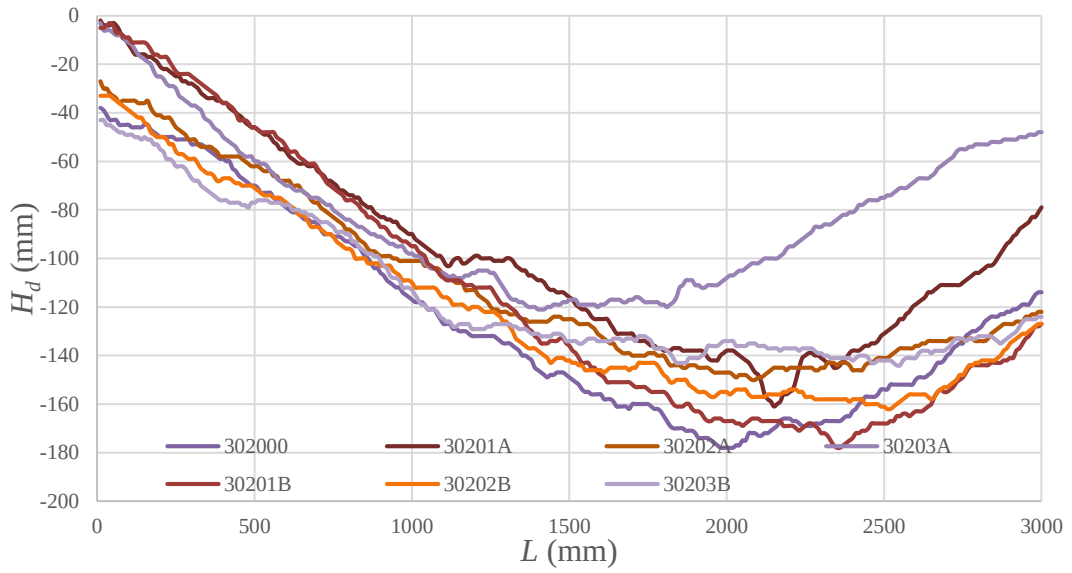
Ayrıca R ve J değerleri mansapta ölçülen hız ve derinlik yardımıyla manning formülünden elde edilmiştir.

Şekil 4.24 - 4.27 grafikleri, 30° şüt açılı kanalda farklı debiler için yapılan deney sonuçlarına aittir. Sırasıyla 0.0125, 0.025, 0.0375 ve 0.05 m³/s/m'lik birim debiler için yapılan deney sonuçlarına göre; birim debiler arttıkça maksimum oyulma derinlikleri ve maksimum oyulma noktasının düşüm yatağı başlangıcına olan mesafesi de artmıştır. Bu şüt açısı için oyulma çukurlarının memba şev açıları 3.2° - 7.1° arasında değişmiştir. Birim debi değerleri artarken memba şev eğimi önce artış eğilimi göstermiş ama maksimum oyulma çukuru yerinin mansaba doğru kaymasıyla memba şev eğimi tekrar azalmıştır. Maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri artan birim debi sıralamasına göre; 5-12 cm, 10-15 cm, 14-15 cm ve 12-18 cm aralıklarında oluşmuştur. Maksimum oyulma çukurunun düşüm yatağı başlangıcına olan mesafeleri ise artan birim debi sıralamasına göre; 80-120 cm, 80-140 cm, 160-180 cm ve 200-230 cm aralıklarında olmuştur.

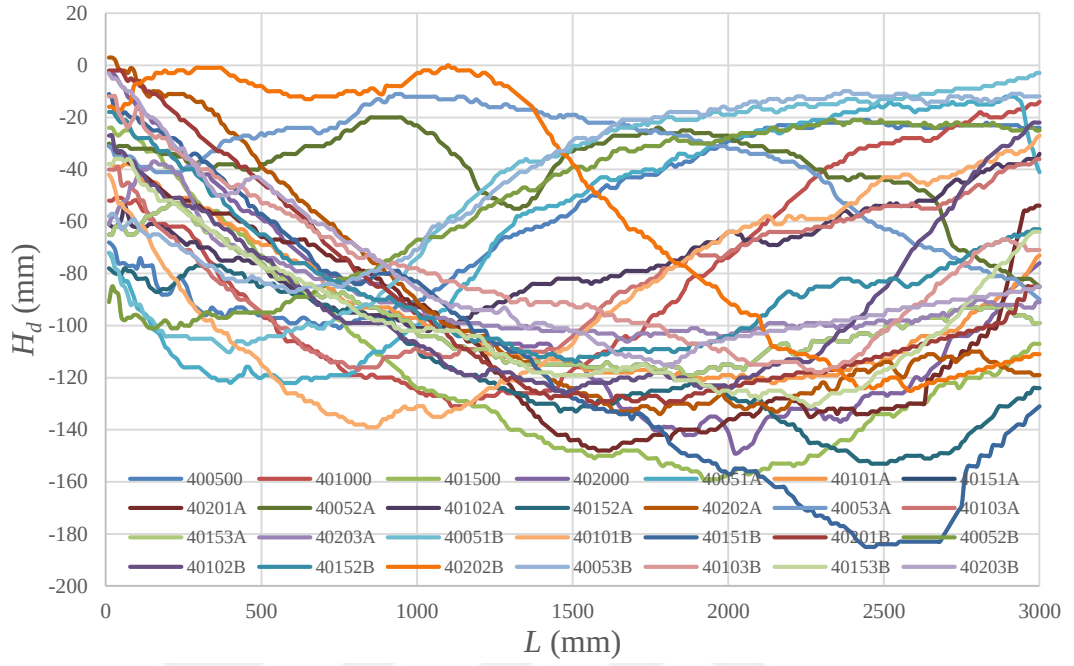




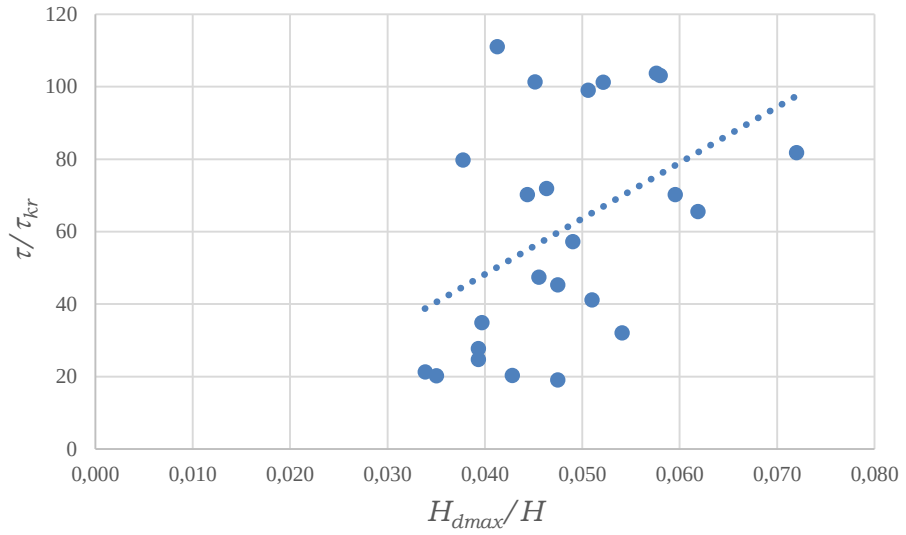
Şekil 4.26 H_d - L grafikleri ($\alpha=30^\circ$; $q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s/m}$)



Şekil 4.27 H_d - L grafikleri ($\alpha=30^\circ$; $q=0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

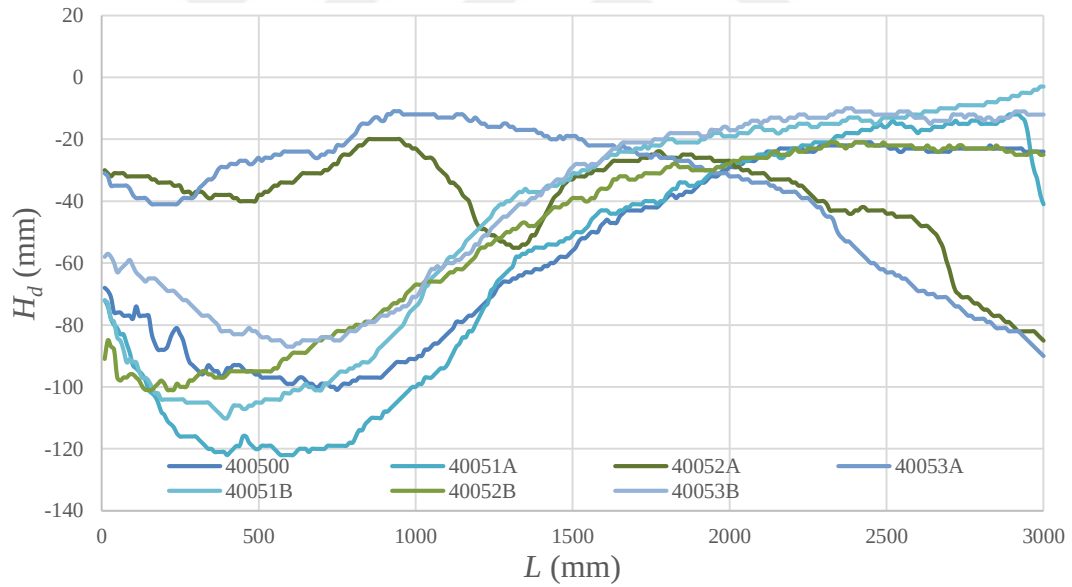


Şekil 4.28 $H_d - L$ grafikleri ($\alpha=40^\circ$)

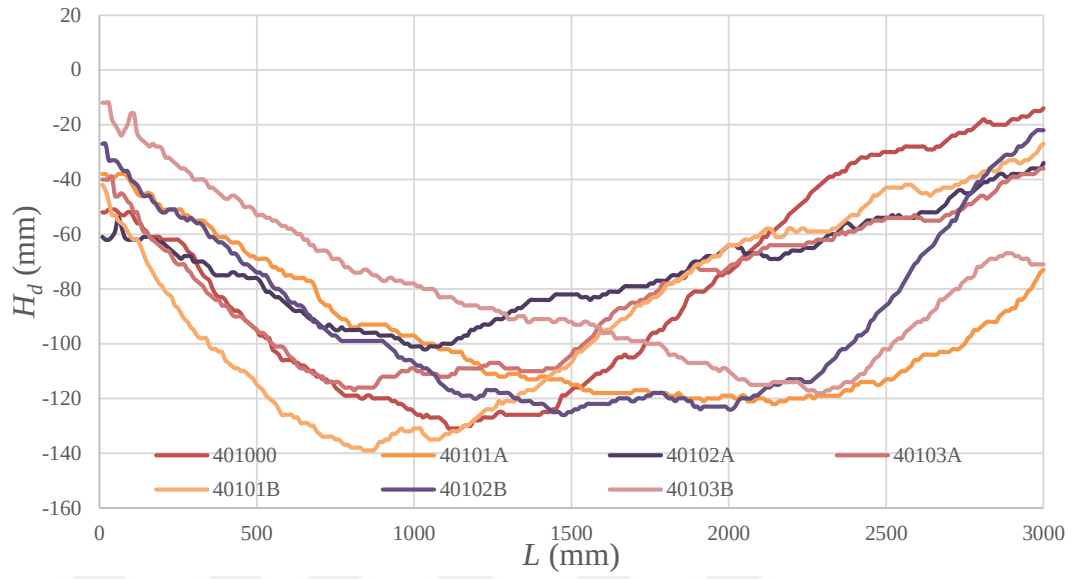


Şekil 4.29 $\tau/\tau_{kr} - H_{dmax}/H$ grafiği ($\alpha=40^\circ$)

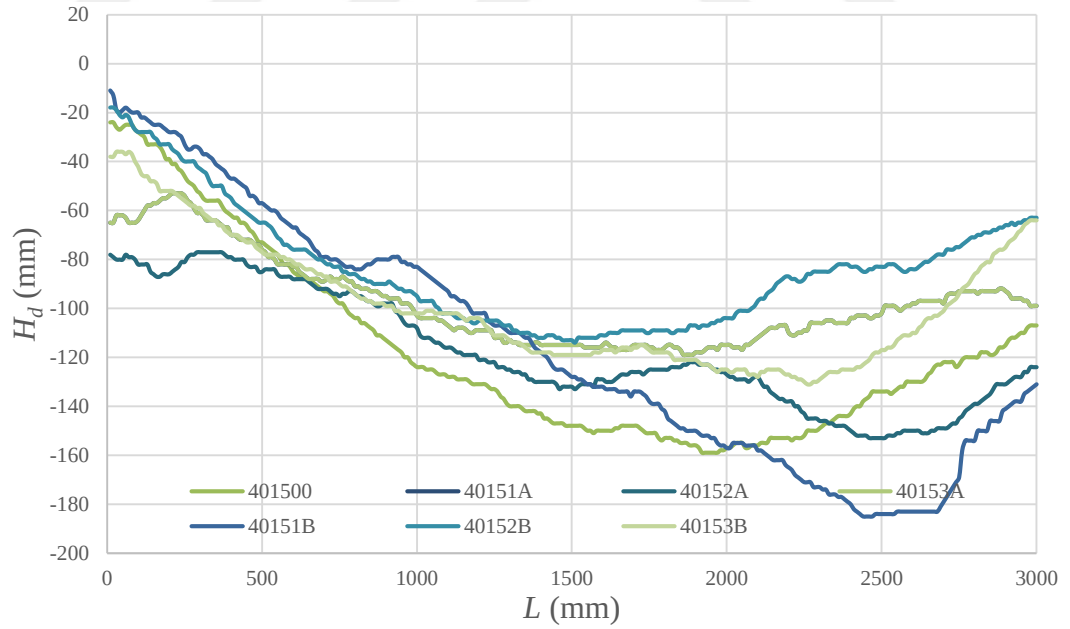
Şekil 4.30 - 4.33 grafikleri, 40° şüt açılı kanalda farklı debiler için yapılan deney sonuçlarına aittir. Sırasıyla 0.0125, 0.025, 0.0375 ve 0.05 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 'lik birim debiler için yapılan deney sonuçlarına göre; birim debiler arttıkça maksimum oyulma derinlikleri ve maksimum oyulma noktasının düşüm yatağı başlangıcına olan mesafesi de artmıştır. Bu şüt açısı için oyulma çukurlarının memba şev açıları $2.9^\circ - 7.1^\circ$ arasında değişmiştir. Birim debi değerlerinin değişimi memba şev eğimi değerlerini pek etkilememiştir. Maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri artan birim debi sıralamasına göre; 4-12 cm, 10-14 cm, 12-15 cm ve 12-16 cm aralıklarında oluşmuştur. Maksimum oyulma çukurunun düşüm yatağı başlangıcına olan mesafeleri ise artan birim debi sıralamasına göre; 40-60 cm, 85-140 cm, 120-180 cm ve 150-250 cm aralıklarında olmuştur.



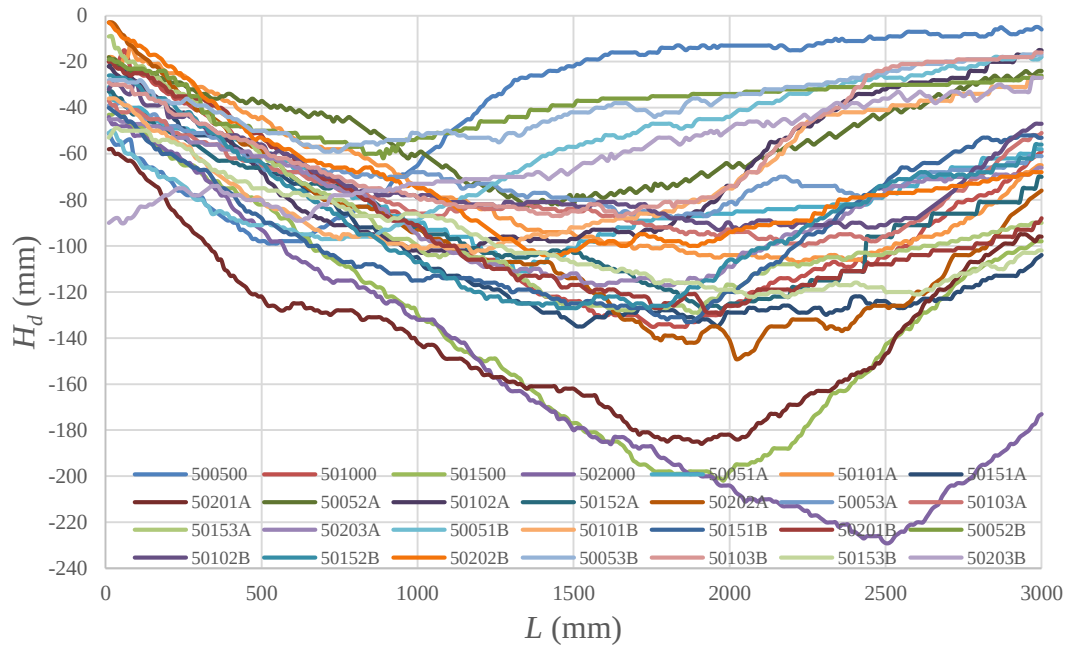
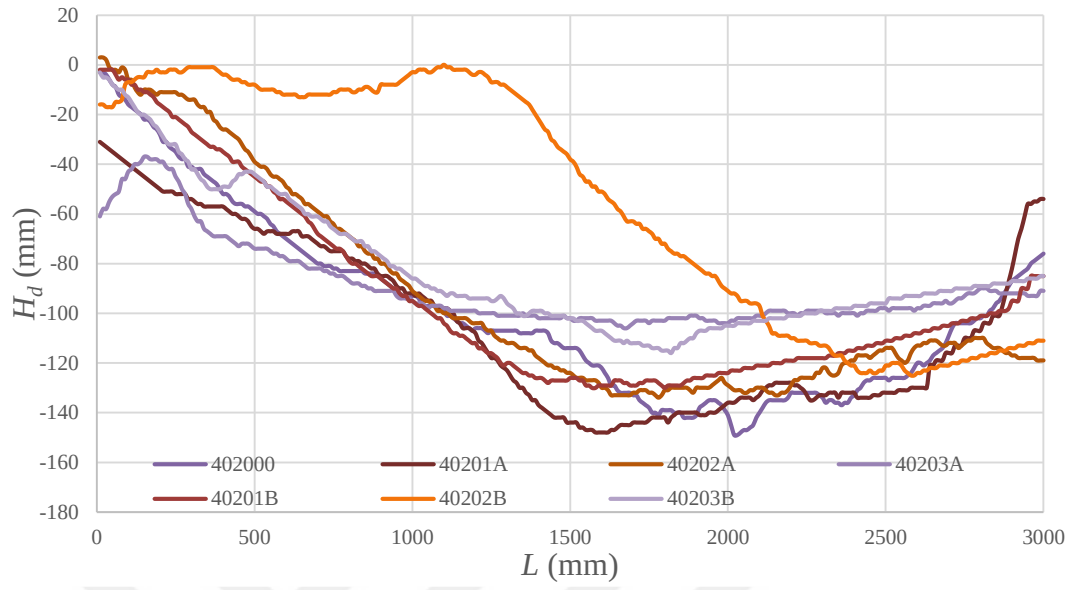
Şekil 4.30 $H_d - L$ grafikleri ($\alpha=40^\circ$; $q=0.0125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)

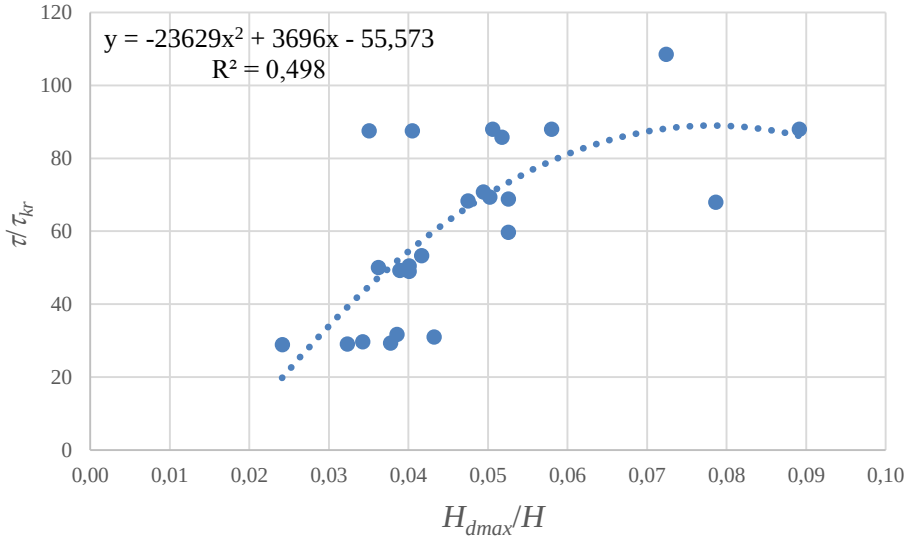


Şekil 4.31 H_d - L grafikleri ($\alpha=40^\circ$; $q=0.025 \text{ m}^3/\text{s/m}$)



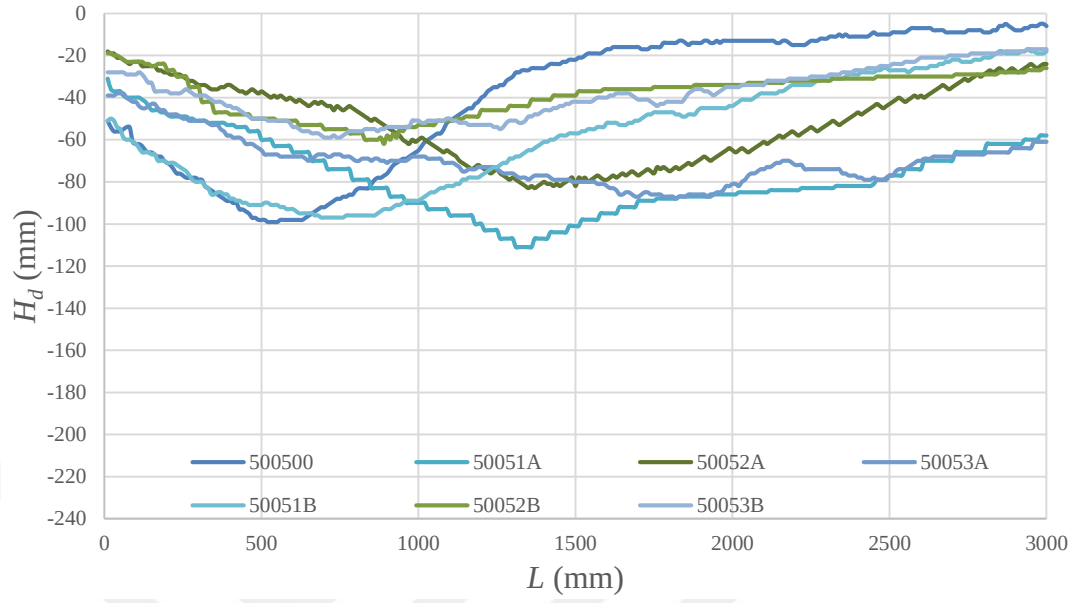
Şekil 4.32 H_d - L grafikleri ($\alpha=40^\circ$; $q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s/m}$)



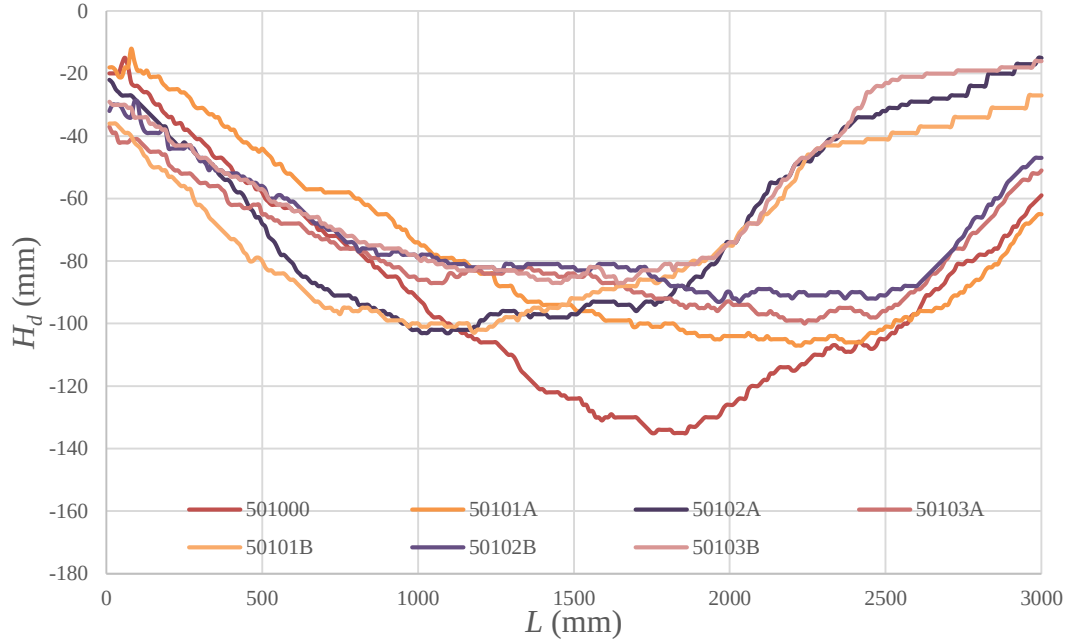


Şekil 4.35 $\tau/\tau_{kr} - H_{dmax}/H$ grafiği ($\alpha=50^\circ$)

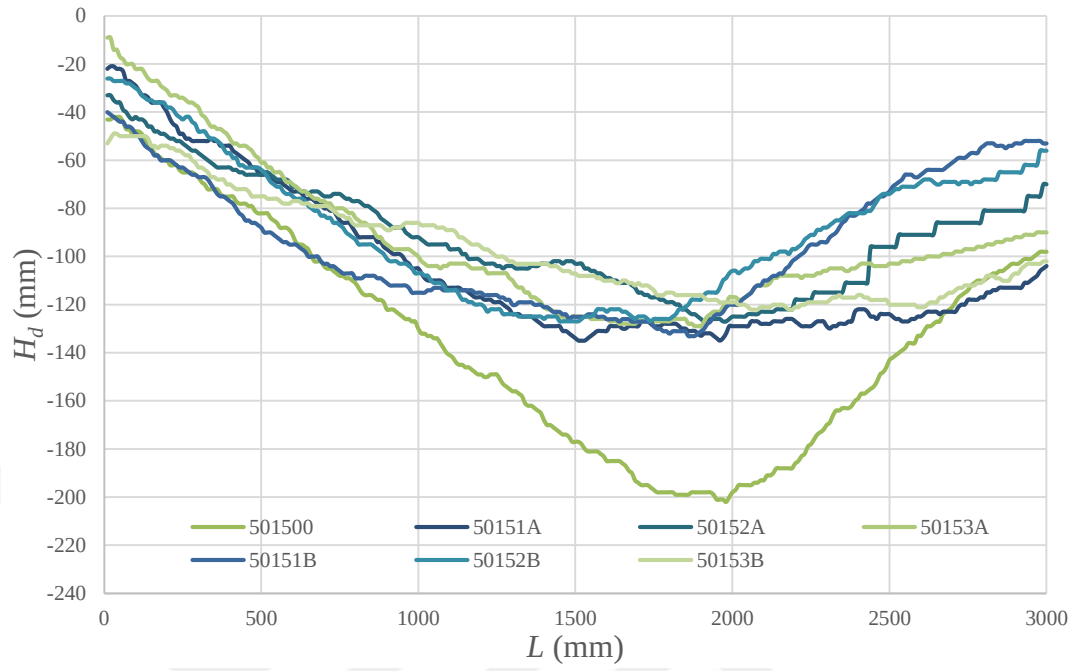
Şekil 4.36 - 4.39 grafikleri, 50° şüt açılı kanalda farklı debiler için yapılan deney sonuçlarına aittir. Sırasıyla 0.0125, 0.025, 0.0375 ve 0.05 $m^3/s/m$ 'lik birim debiler için yapılan deney sonuçlarına göre; birim debiler arttıkça maksimum oyulma derinlikleri ve maksimum oyulma noktasının düşüm yatağı başlangıcına olan mesafesi de artmıştır. Bu şüt açısı için oyulma çukurlarının memba şev açıları $2.9^\circ - 5.3^\circ$ arasında değişmiştir. Birim debi değerlerinin değişimi memba şev eğimi değerlerini önemli ölçüde etkilememiştir. Maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri artan birim debi sıralamasına göre; 5-13 cm, 9-14 cm, 12-20 cm ve 12-22 cm aralıklarında oluşmuştur. Maksimum oyulma çukurunun düşüm yatağı başlangıcına olan mesafeleri ise artan birim debi sıralamasına göre; 60-130 cm, 110-180 cm, 180-200 cm ve 130-220 cm aralıklarında olmuştur.



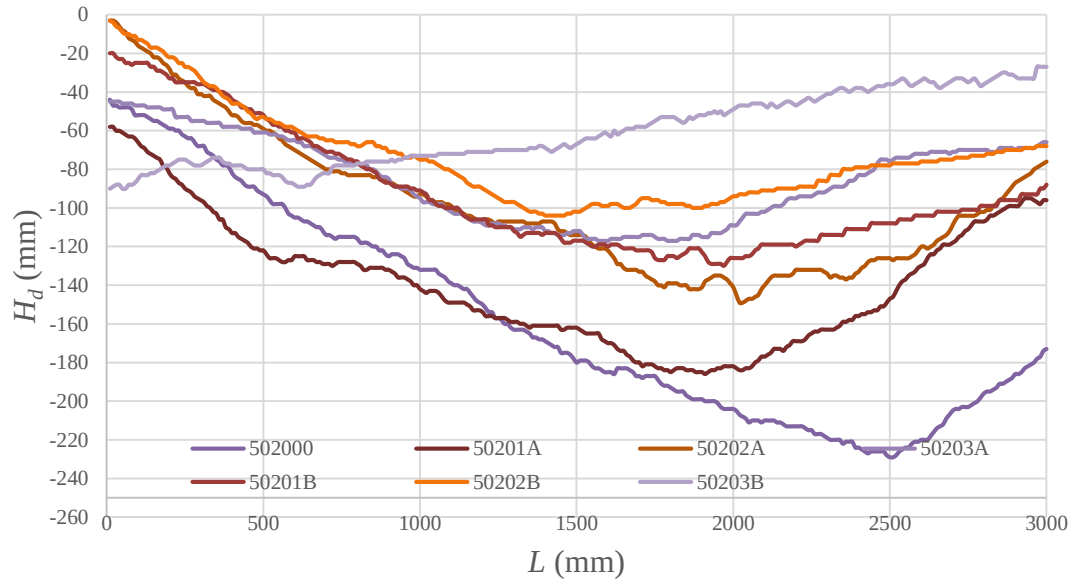
Şekil 4.36 $H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.0125 \text{ m}^3/\text{s/m}$)



Şekil 4.37 $H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.025 \text{ m}^3/\text{s/m}$)



Şekil 4.38 $H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s/m}$)



Şekil 4.39 $H_d - L$ grafikleri ($\alpha=50^\circ$; $q=0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

Taban oyulması problemlerinde üç fazlı akım yani; su, hava ve sediment karışımından oluşan akım meydana gelmektedir. Bu tür çalışmalarda kullanılan Densimetrik Forude sayısı ile oyulma arasındaki ilişki Şekil 4.40 - 4.42’de üç farklı şüt açıları için verilmiştir. Densimetrik Froude sayısı aşağıda verilen denklem (4,3) ile hesaplanmıştır;

$$F_d = \frac{V_0}{g \cdot d_{50} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)} \quad (4,3)$$

burada;

$\Delta\rho$: Malzemenin su içindeki özgül ağırlığını ($\Delta\rho = \rho_s - \rho$),

ρ_s : Malzemenin özgül ağırlığını,

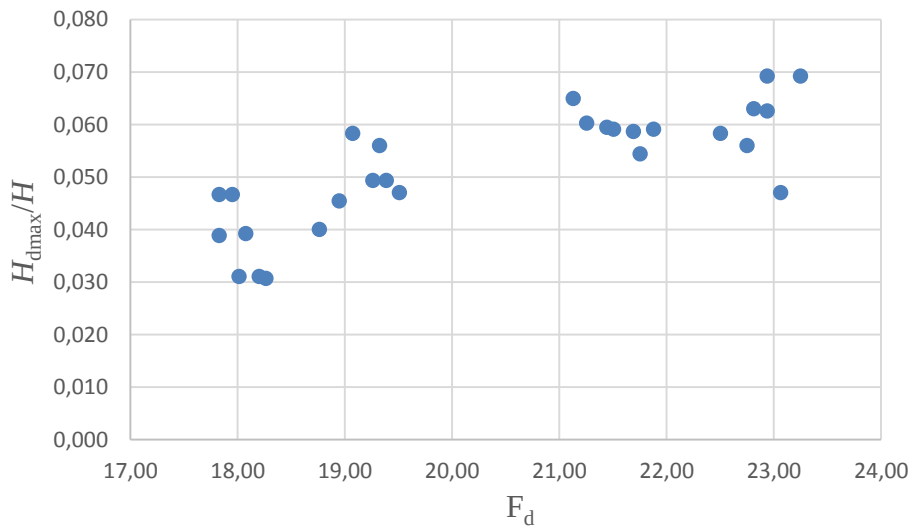
ρ : Suyun özgül ağırlığını,

V_0 : Şüt kanalı mansabında ölçülen hızı,

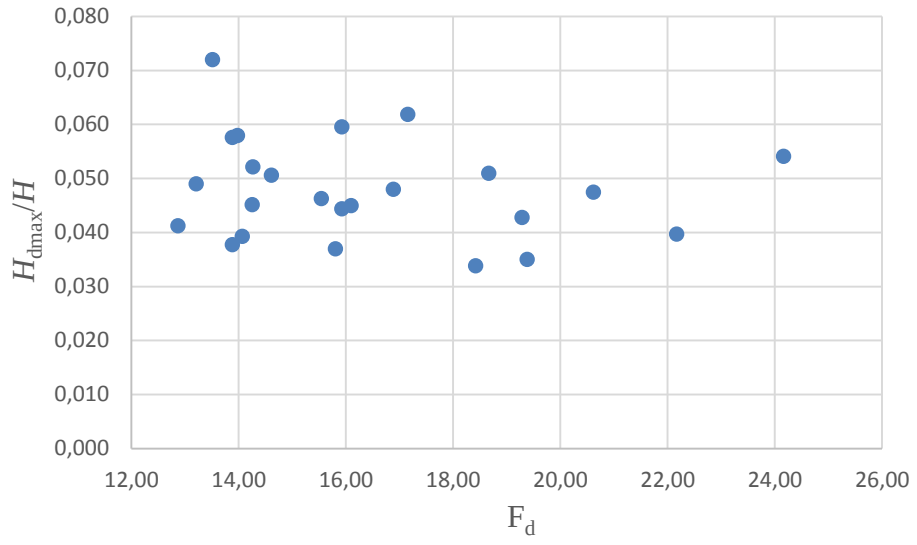
g : Yer çekim ivmesini,

d_{50} : Ortalama dane çapını ifade etmektedir.

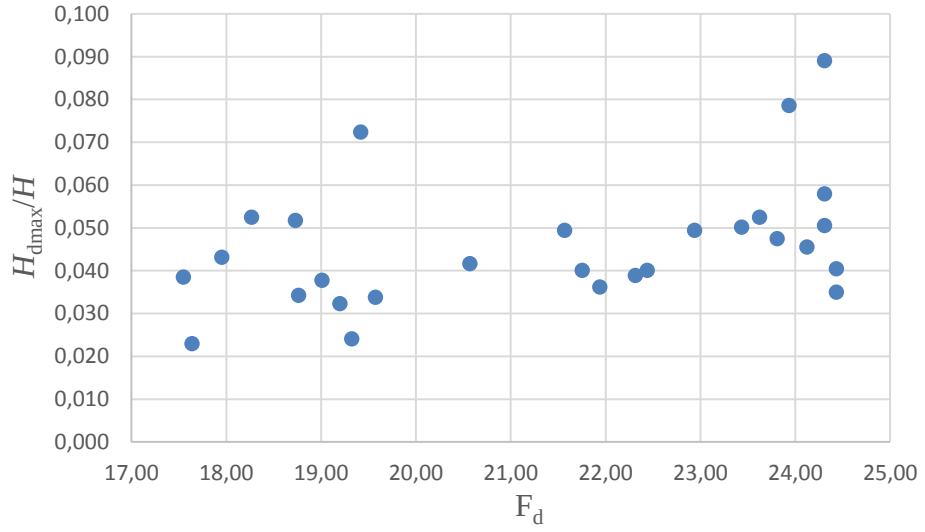
Şekil 4.40 - 4.42’den anlaşılabacağı üzere F_d değerlerinin artışına paralel olarak boyutsuz oyulma derinliği değerleri de artmaktadır. Benzer olarak şüt açısı arttıkça da boyutsuz oyulma derinliği değerleri artış göstermektedir.



Şekil 4.40 $F_d - H_{dmax}/H$ grafiği ($\alpha=30^\circ$)



Şekil 4.41 F_d - H_{dmax}/H grafiği ($\alpha=40^\circ$)



Şekil 4.42 F_d - H_{dmax}/H grafiği ($\alpha=50^\circ$)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Barajların dolusavaklarında meydana gelen kavitasyon ve mansab kısmındaki oyulma problemleri hidrolik tasarımcılar tarafından yıllar boyunca araştırılmıştır.

Birim debi (veya akım hızı) arttıkça havalandırıcıların daha etkin bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Düşük debi değerlerinde havalandırıcıların etkileri arasındaki farklar da azalmaktadır.

50° şüt açısı için B tipi havalandırıcılara ait sonuçların daha iyi olduğu görülmektedir. B tipi havalandırıcıların 3 adet kullanılması halinde mansap havuzunda görülen oyulma derinliği değerleri en az olmuştur. En uygun sonuçlar B tipi havalandırıcılardan sonra A tipi havalandırıcılar için elde edilmiştir. Yine havalandırıcı sayısı arttıkça dolusavak boşaltım kanalında havalanma oranı artmakta ve oyulma değerleri azalmaktadır.

Densimetrik Froude (F_d) değerlerinin artışına paralel olarak boyutsuz oyulma derinliği değerleri de artmıştır.

Oyulma çukurlarına ait maksimum oyulma derinliği değerleri 30° ve 40° şüt açıları için birbirlerine yakın değerlerde olurken, 50° şüt açılı kanala ait değerler daha yüksek olmuştur. Oyulma çukurlarına ait maksimum oyulma derinliğinin düşüm yatağı başlangıcına olan mesafeleri ise genel olarak açi değerleri arttıkça azalmıştır.

30° şüt açılı boşaltım kanalında A tipi havalandırıcılar daha verimli çalıştığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da maksimum oyulma derinlikleri azalmaktadır. A tipi havalandırıcılardan sonra en etkili havalandırıcılar sırayla 3B, 2B ve 1B tipi havalandırıcılar olmuştur. 30° şüt açılı boşaltım kanalında, 50° şüt açılı kanalda olduğu gibi havalandırıcısız boşaltım kanalı mansabında oluşan oyulma çukurları en fazla değerlerde olmuştur.

40° şüt açılı boşaltım kanalı için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, A ve B tipi havalandırıcıların yaklaşık olarak birbirine denk bir performansla çalıştığını göstermektedir. Havalandırıcı bulunmayan deneylere ait oyulma çukurları değerleri genellikle en yüksek olmuştur.

Sonuç olarak; dolusavak şüt kanallarında havalandırıcı kullanmak, hem kavitasyon riskini azaltmakta, hem de mansap kanalında oyulma problemi riskini azaltmaktadır. Bunun nedeni, akımın içerisindeki hava konsantrasyonunun artması ve yoğun bir iki fazlı akım oluşmasıdır. Tasarım yapan Hidrolik mühendislerinin

dolusavak boşaltım kanalı veya diğer kanallar boyunca kavitasyon ve mansap oyulması riskini azaltmak amacıyla havalandırıcıları kullanmaları yarar sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- [1] Cola, R., (1965). Energy dissipation of a high-velocity vertical jet entering a basin (pp. 1.52). *Proc. IAHR 11th Congress*, Leningrad
- [2] Abbasoğlu, C. and Okay, G., (1992). The remedial structures on the spillway of Keban dam. *Water Power and Dam Construction*, Vol. 44, No 12, 22-27
- [3] Pinto, N. L. De S. (1988). (pp: 620-634). In: Jansen, R. B. (Ed.), *Cavitation and aeration, in Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation*, Kluver Academic Publisher,
- [4] Chanson, H., (1989). Flow downstream of aerator-aerator spacing, *Journal of Hydraulic Research*, 27, No.4, 519-536.
- [5] Kells, J. A. and Smit, C. D. (1991). Reduction of cavitation on spillways by induced airentained, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18, No.3, 358-377.
- [6] Ossolkov, A. G. and Semenov, V. M. (1979). Experience in designing and maintenance of spillway structures on large rivers in USSR (pp: Q.50, R.46, 789-802). *13th International Congress on Large Dams*, New Delhi, India.
- [7] Volkart, P. and Rutschmann, P. (1984). Rapid flow in spillways chutes with and without deflectors a model – prototype comparison (pp: 4.5-1 to 4.5-8). *Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Research*, Sep.3-6, Esslingen, Germany.
- [8] Russell, S. O. and Sheenan, G. J. (1974). Effect of entrained air on cavitation damage, *Canadian Journal of Civil Engineering*, No.1, 97-107.
- [9] Falvey, H. and Ervine, D. A. (1988). Aeration in jets and high velocity flow (pp: 25-55). *Proceedings of the International Symposium on Model-Prototype Correlation of Hydraulic Structures*, American Society of Civil Engineers/International Association for Hydraulic Research, Aug. 9-11, Colorado Springs, CO.
- [10] Bruschin, J. (1987). Forced aeration of high velocity flows. *Journal of Hydraulic Research*. 25, No.1, 8-9.
- [11] Pinto, N. L. De S. (1986). Basic hydraulics of shooting flows over aerators (pp: 1007-1017). *Proceedings of the Specialty Conference on Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics and Hydraulics*, American Society of Civil Engineers, Jun. 3-6, Minneapolis, MN.
- [12] Chanson, H. (1989). Study of air entrainment and aeration devices. *Journal of Hydraulic Research*. 27, No.3, 301-319.
- [13] Chanson, H. (1994). Aeration and deaeration at bottom aeration devices on spillways. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 21, No.3, 404-409.
- [14] Chanson, H. (1991). Aeration of a free jet above a spillway. *Journal of Hydraulic Research*. 29, No.5, 665-667.
- [15] Rutschmann, P. and Volkart, P. (1988). Spillway chute aeration. *Water Power and Dam Construction*. 40, No.1, 10-15.
- [16] Chanson, H. (1990). Study of air demand on spillway aerator. *Journal of Hydraulic Research*. 112, No.3, 343-350.

- [17] Pinto, N. L. De S., Neidert, S. H. and Ota, J. J. (1982). Aeration at high velocity flows. *Water Power and Dam Construction*. 34, No.2, 34-38, No.3, 42-44.
- [18] Cassidy, J. and Elder, R. (1984). Spillway of high dams (pp: 153-173). In: Novak, P. (Ed.), in *Developments in Hydraulic Engineering 2*, Applied Science Publishers Ltd., Essex, U.K.
- [19] Volkart, P. and Chervet, A. (1983), Air slots for flow aeration - determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, No.66, Zürich, Switzerland.
- [20] Volkart, P. and Rutschmann, P. (1991). Aerators on spillways (pp: 85-114). In: Wood (Ed.), in *Air Entrainment in Free Surface Flows*. A. A. Balkema Publications, Rotterdam.
- [21] Rutschmann, P. (1988). Calculation and optimum shape of spillway chute aerators (pp: 118-128). *Proceedings of the International Symposium on Model-prototype Correlation of Hydraulic Structures, American Society of Civil Engineers / International Association for Hydraulic Research*, Aug.9-11, Colorado Springs, CO.
- [22] Pinto, N. L. De S. (1991). Prototype aerator measurements, (pp: 115-130). In: Wood, I. R. (Ed.), in *Air Entrainment in Free Surface Flows*. A. A. Balkema Publication, Rotterdam.
- [23] Tuna, A. (1975). *Geçirimli zeminlerde hareketli bağlama inşaatı ve Türkiye'deki hareketli bağlamalar*. Elazığ Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi, İnşaat Bölümü Yayınları, Elazığ.
- [24] Pinto, N. L. De S., Neidert, S. H. and Ota, J. J. (1992). Air entrainment by spillway aerator (Discussion). *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE 118, No.1, 114-116.
- [25] Rutschmann, P. and Hager, W. H. (1990). Air entrainment by spillway aerators. *Journal of Hydraulic Research*. ASCE, 116, No.6, 765-782.
- [26] Pinto, N. L. De S. and Neidert, S. H. (1983). Evaluation entrained airflow through aerators. *Water Power and Dam Construction*. 35, No.8, 40-42.
- [27] Schoklitsch, A. (1935). *Stauaum verlandung und kolkabwehr*. Verlag von Julius Springer.
- [28] Demiröz, E. (1985). *Yüksek hızlı akımlar için dolusavak hızlandırıcılarının proje kriterleri*. Mühendislik Araştırma Grubu, Proje 606, Tübitak, Ankara.
- [29] Kökpınar, M. A. and Göğüş, M. (2002). High-speed jet flows over spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering*. No.6, 885-898.
- [30] Chadwick, A. J. and Morfett, J. C. (1986). Spillways. in *Hydraulic in Civil Engineering*. 390-403.
- [31] Tan, T. P. (1984). *Model studies of aeration on spillways*. Research Report 84-6, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand
- [32] Vischer, D., Volkart, P. and Sigenthaler, A. (1982). Hydraulic modeling of air slots in open chute spillways (pp: 239-252). In: Stephens, H. S. and C. A. Stapleton, C. A. (Ed.), in *Papers Presented at the International Conference on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures*, Coventry, U.K., Sep. 22-24, BHRA, Fluid Engineering Crafeld, U.K.

- [33] Aksoy, Ş. (1975). *Yüksek düşüklü barajların dolusavağı mansabında kaya tabandaki yersel oyulmalar*. Hİ-584, DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- [34] Yıldız, D. (2001). *Barajların mansabındaki oyulmalar*. Yayın No: KK-951, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı, Ankara
- [35] Sentürk, F. (1988). *Barajların projelendirilmesinde hidrolik esaslar*, DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları 1.Baskı, Ankara.
- [36] Hartung, F. and Husler, E. (1973). Scours Stilling Basins and Downstream Protection, Under Free Overfall Jets at Dams (pp: Q41-R.3 ICOLD, Q41-R.3). *Proc.11th Congress*.
- [37] Veronese, A. (1937). Erosioni de Fondo a Valle di uno Scarico (pp: 717-726). *Annali dei Lavori Pubblici*, Vol.75, No.9, Italy.
- [38] Toombes, L. and Chanson, H. (2007). Free-surface aeration and momentum exchange at a bottom outlet. *Journal of Hydraulic Research*. 100-110.
- [39] Eggenberger, W. (1944). Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Kolkproblem, *Mitteil. Versuchsanstalt f. Wasserbau*, No.5, Zurich, CH.
- [40] Martins, R. (1939). Contribution to the Knowledge on the Scour Action of Free Jets on Rocky River Beds (pp: Q.41-R.44). *Proc. of 11th Congress ICOLD*.
- [41] Gunko, F. G., Burkov, A. F., Isachenko, N. B., Rubinstein, G. L., Soloviova, A. and Yuditsky, G. A. (1965). Research on the Hydraulic Regime and Local Scour of Rivers Bed Below Spillways of High-Had Dams (pp: 1). *1th Congress of the I.A.H.R.*, Leningrad.
- [42] Yıldız, D. and Üzücek, E. (1994). Prediction of Scour Depth from Free Falling Flip Bucket Jets. *Intl. Water Power and Dam Construction*, November.
- [43] Gijs, J., Hoffmans, M. and Pilarczyk, W. (1995). Local scour downstream of hydraulic structures, *Journal of Hydraulic Research*, 121, 4, 326-339.
- [44] 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.
- [45] Rubinstein, G. L. (1963). Laboratory investigation of local erosion on channel beds below high overflow dams, *Transactions of Coordination Conferences on Hydraulic Engineer Engineering, Iss. VII, Conference on Hydraulics of High Head Water Discharge Structures*, Gosenergoizdat, ML.
- [46] Hay, N. W. (1975). Effects of sair water entrainment on the performance of stiling basins, *16th Congress of the I.A.H.R.*, Sao Paulo.
- [47] Çataklı, O., Özal, K. and Tandoğan, A.R. (1973). A study of scours at the end of stiling basin sand use of horizontal beams as energy dissipators. *11th Congress of Large Dams*, Madrid.
- [48] Studenichikov, B.I. (1962). *Calcul des dronions locales et qeelques moyens dallager desevacuateurs*. No:8, Trudy Gidravlichesko laboratorit, France.
- [49] Mirtskhulava, T. E. (1967). Mechanism and computation of local and general scour in noncohesive, cohesive soils and rock beds (pp: 169-176). *Proc. 12th IAHR Congress*, Vol. 3, Fort Collins.

- [50] Taraimovich, I. (1979). Deformations of Channels Below High Head Spillways on Rock Foundations (pp: 38-42). *Plenum Publishing Corporation, Traduzido para inglês de Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, No.8, Setembro, 1978.*
- [51] Gunko, F. G. and Soloviova, A. G. (1965). Research on the Hydraulic Regime and Local Scour of River Bed below Spillways of High-head Dams (pp: 1(50), 1-14). *Proc. 11th IAHR Congress, Leningrad.*
- [52] Chain, M. W. (1973). Scour at Downstream End Dam in Taiwan (pp: A13). *Proc. IAHR Symp. On River Mechanics, Bangkok.*
- [53] Martins., R. (1973). Contribution to the knowledge on the scour action of free jets on rocky river beds (pp: 799-814). *Proc. 11th Congress on Large Dams, Madrid.*
- [54] Mason, P .J. and Arumugam, K. (1985), Free Jet Scour below Dams and Flip Buckets. *Journals of Hydraulics Engineering.* 111(2), 220-235.
- [55] Cömert, M. (1991). Keban Barajı dolusavak iyileştirilmesi işine ait bilgiler ve uygulanan imalat yöntemleri. DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, Elazığ.
- [56] Hausler, E. (1972). Der Kolk unterhalb der Karibastaumauer. *Tiefbau Strassenbau.* Oktober, Heft10.
- [57] Emiroglu, M. E. and Tuna, M. C. (2011). Scour profiles at downstream of cascades. *Scientia Iranica.* Vol. 18, Issue 3, 338-347.
- [58] Emiroglu, M. E. and Tuna, M. C. (2011). The effect of tailwater depth on the local scour downstream of stepped-chutes. *KSCE Journal of Civil Engineering.* Vol. 15, Issue 5, 907-915.
- [59] Kökpınar, M. A. and Çelik, H. Ç. (2002). Deriner Barajı tünelli dolusavak havalandırıcıları büyük ölçekli hidrolik model çalışmaları. *Türkiye Mühendislik Haberleri.* 420-421-422/2002/4-5-6, 100-104.
- [60] Yıldız, D. And Üzücek, E. (1996). Dolusavak Sıçratma Eşiğinden Çıkan Jetlerin Oluşturduğu Oyulma Derinliğinin Hesaplanması. *İMO Teknik Dergi.* 7.34, .
- [61] Chanson, H. (1995). Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerators. *Journal of Hydraulic Research.* Vol. 33, Issue 3, 361-372.
- [62] Chanson, H. (1993). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulic Research.* Vol. 32, Issue 3, 445-460.
- [63] Aydın, M. C. (2005). *Alttan alışı dolusavak havalandırıcıların cfd analizi.* Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [64] Yılmaz, K. (2014). *Eğimli yüzeyli köprü yan ayaklarında oyulmayı önleyici yatay plaka uygulaması.* Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- [65] Koçak, P. P. (2013). *Su jetinden dolayı oluşan oyulma derinliği üzerinde zemin malzeme tabakası kalınlığının etkisi.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [66] Tuna, M. C. (2009). Kaskatların Mansabında Meydana Gelen Oyulmaların İncelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

7. ÖZGEÇMİŞ

AD, SOYAD: Mehmet Kaan AKGÜN
DOĞUM YERİ VE TARİHİ: Ankara, 27/07/1979
ADRES: Yakınca Mh. Oğuz Kağan Cd. No:65/C D:30
E-POSTA: akgunmk@hotmail.com
LİSANS: İnönü Üniversitesi, İnşaat Müh. (2011-2014) 2.5 YIL
YÜKSEK LİSANS: İnönü Üniversitesi, Fen Bil. Enst. (2014-2017) 3 YIL
MESLEKİ DENEYİM: Yakınca Bld. (2010-2014), Yeşilyurt Bld. (2014-?)

