T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALTTAN ALIŞLI DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARIN CFD ANALİZİ

Mehmet Cihan AYDIN

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2005

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALTTAN ALIŞLI DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARIN CFD ANALİZİ

Mehmet Cihan AYDIN

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 04/08/2005 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU

Üye: Doç. Dr. Ayhan ÜNLÜ

Üye: Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU

Üye: Doç. Dr. Ahmet BAYLAR

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31./.08./2005 tarih ve .2005-28./1..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken, katkı ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam *Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK*'e, pratik ve teorikteki değerli fikirleriyle her zaman beni aydınlatan ve destekleyen *İnşaat Yüksek Mühendisi Seçkin AYDIN*'a (DSİ Aydın 21. Bölge Müdürlüğü) ve her türlü desteğiyle beni bu süreçte yalnız bırakmayan sevgili eşim *Özlem AYDIN*'a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....IV
TABLOLAR LİSTESİ.....VII
EKLER LİSTESİ.....VII
SİMGELER.....IX
KISALTMALAR.....XIII
ÖZET.....XIV
ABSTRACT.....XV
1. GİRİŞ.....1
2. BARAJ DOLUSAVAKLARINDA KAVİTASYON.....5
2.1.Kavitasyon Hasarı.....5
2.2.Kavitasyon Hasarını Önleme Yolları.....6
2.3.Kavitasyon Riski.....8
3. DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARI.....11
3.1. Dolusavak Şut Kanallarında Havalandırma.....11
3.2. Gerekli Hava Konsantrasyonu.....13
3.3. Havalandırıcı Tasarımı.....14
3.4. Havalandırıcı Geometrisi ve Tipleri.....15
3.5. Hava Giriş Oranları.....19
3.5.1. Birinci Yaklaşım (Direkt yaklaşım).....19
3.5.2 İkinci Yaklaşım (Endirekt yaklaşım).....21
3.5.3. Froude Sayısının Hava Girişine Etkisi.....24
3.5.4. Diğer Yaklaşımlar.....25
3.5.5. Nap Hava Girişleri.....27
3.5.6. Üst Nap Hava Girişi.....28
3.6. Hava Çıkışı.....30
3.7. Jet Uzunluğu.....31
3.8. Hava Sağlama Sistemi.....32
3.9. Boşluk Alt Basınçları.....33
3.10 Havalandırıcının Yeri ve Aralığı.....35
3.11. Batık Havalandırıcılar.....37
4. SAYISAL YÖNTEMLER.....39
4.1. Havalandırıcıların Sayısal Modellemesi.....40

4.2. CFD Yazılımları 41
4.3. Fluent CFD Yazılımı (Fluent v5.3) 42
4.3.1. Dağınık Faz Modeli (*Dispersed Phase Model-DPM*) 43
4.3.2. Akışkan Hacmi (*Volume of Fluid -VOF*) Modeli 44
4.3.3. Cebirsel Kayma Karışım Modeli (*Algebraic Slip Mixture Model - ASMM*) 46
4.3.4. Kavitasyon Model (*Cavitation Model*) 48
5. DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI 49
5.1. Model Deneyleri ve Ölçek Etkileri 49
5.1.1. Model Ölçeği 51
5.1.2. Reynolds ve Weber Sayılarının Etkileri 59
5.1.3. Ölçek Etkisi Faktörü 52
5.2. Sayısal Analiz - Fiziksel Model Karşılaştırması 53
5.2.1. Fiziksel Model 54
5.2.2. Sayısal Model 55
5.2.3. Karşılaştırma 59
5.3. Prototip Datalarıyla Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması 64
6. İNCELENECEK HAVALANDIRICI MODELİNİN BELİRLENMESİ 69
6.1. Çalışılan Modeller 71
6.2. Alternatif Havalandırıcı Tiplerinin Değerlendirilmesi 72
6.3. Düşük Froude Sayılarındaki Durum 78
6.4. Boyut Analizi 80
6.5. İncelenecek Modelin Hazırlanışı 83
6.6. Sayısal Modelin Geometrisi 84
6.7. Çözüm Parametreleri 85
6.7.1. Seçilen Türbülans Modeli 86
6.7.2. Türbülanslı Akımda Cidar Pürüzlülüğü 87
6.7.3. Sınır Şartları (*Boundary Condition*) 88
6.7.4. İşletme Durumları (*Operating Conditions*) 89
7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 90
7.1. Direkt Yaklaşım 90
7.1.1. Froude Sayısının Etkisi 90
7.1.2 Rampa Yüksekliğinin Etkisi 94
7.1.3. Boyutsuz D^2/Lh Parametresinin Etkisi 97
7.1.4. Şut Kanalı Eğiminin Etkisi 99
7.1.5. Elde Edilen Bağıntılar 99

7.1.6. Hava Hızları 101
7.2. Endirekt Yaklaşım 101
7.3. Boşluk Altbasınçlarının Etkisi 109
7.4. CFD Analiz Sonuçlarından Örnek Görünüşler 114
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 120
KAYNAKLAR 123
ÖZGEÇMİŞ 127
EKLER 128

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 2.1	Kavitasyona neden olan bazı düzensizlikler	6
Şekil 3.1.	Havalandırma mekanizmasının tanımlanan bölgeleri	12
Şekil 3.2	Temel havalandırıcı tipleri	15
Şekil 3.3	Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısı, Yeni Zelanda	16
Şekil 3.4	Calacucia Barajı dolusavak havalandırıcısı, Fransa	16
Şekil 3.5	Foz do Areia Barajı Dolusavak Havalandırıcısı, Brezilya	16
Şekil 3.6	Mantaro Barajı dolusavak havalandırıcısı, Peru	17
Şekil 3.7	Ait Chouarit Barajı dolusavak havalandırıcısı, Maroc	17
Şekil 3.8	Klasik bir havalandırıcının görünüşleri	18
Şekil 3.9	Chanson'a göre Fr sayısı ile hava giriş oranının değişimi	25
Şekil 3.10	Bir havalandırıcı üzerindeki hava girişleri	27
Şekil 3.11	Havalandırma bölgesindeki akıma dik hava konsantrasyonu dağılımı	29
Şekil 3.12	Bir havalandırıcı jeti altındaki basınçlar	34
Şekil 4.1	a) Bir dolusavak üzerindeki 2D serbest yüzeyli akım b) Bir silindir ayak çevresindeki 3D serbest yüzeyli akım	40
Şekil 4.2	VOF model kullanılarak Fluent'le hazırlanmış serbest yüzeyli akım modeline bir örnek	44
Şekil 5.1	Demiröz [54] tarafından yürütülen model deneyinin prototip boyutları	55
Şekil 5.2	(a) Sayısal model için hazırlanan geometrik modelin sonlu elemanlar ağı, (b)Havalandırıcı üzerindeki akımın tanα=0.30, t_r=0.25, Fr=6.38 için serbest yüzey görünüşü	56
Şekil 5.3	(a) Şut kanalının tabanının orta ekseni (x ekseni) boyunca statik basınç dağılımları (b) Alt nap altındaki akıma dik eksen boyunca (z ekseni) statik basınç dağılımları	57
Şekil 5.4	(a) Şut kanalının orta eksenindeki yüzeyde tanımlanan eş basınç çizgileri (b) Hava bacasının ortasından geçen akım yönüne dik tanımlanan yüzeydeki hız vektörleri	58
Şekil 5.5	Pinto [51] tarafından sunulan bir havalandırıcı yan duvarlarındaki basınç dağılımı	58
Şekil 5.6	Tanα=0.30, t_r=0.25 için farklı Froude sayılarındaki faz görüntüleri	58
Şekil 5.7	(a) Fiziksel model ve Fluent rölatif hava debilerinin karşılaştırılması (b) Hesap ve Fluent rölatif hava debilerinin karşılaştırılması	62
Şekil 5.8	Foz do Areia Barajı dolusavak havalandırıcı sistemi	64
Şekil 5.9	Foz do Areia (B=10m) CFD sonuçlarından farklı görüntüler. (a) Modelin ağlara bölünmüş geometrisi, (b) Havalandırıcı üzerindeki akımın serbest yüzeylerinin görünüşü (q_w=75.10m^3/s/m), (c) Havalandırma bacasından alt basınç bölgesine giren havanın hız vektörleri(q_w=20.82 m^3/s/m), (d) Havalandırıcının bulunduğu kanal enkesitindeki hız değişimleri (q=7.58m^3/s/m)	65
Şekil 5.10	(a) Kanal genişliği boyunca jet altındaki alt basınç farkları değişimi (q_w=20.87 m^3/s/m) (b) Kanal genişliği boyunca jet altındaki havanın z ekseni yönündeki hız değişimi (q_w=20.87 m^3/s/m)	66
Şekil 5.11	Hava giriş katsayılarının karşılaştırılması	76
Şekil 6.1	Alttan alışlı havalandırıcı tipi	70
Şekil 6.2	Ilısu Barajı Dolusavak havalandırıcısının değiştirilmeden önceki ilk iki tasarımı [53]	70
Şekil 6.3	Yandan alışlı (klasik) havalandırıcı	71
Şekil 6.4	Alttan alışlı havalandırıcı	72
Şekil 6.5	Hava giriş katsayılarının Fr sayısı ile değişimi	73
Şekil 6.6	P_N basınç sayılarının Fr sayısına göre değişimleri	74
Şekil 6.7	Fr=12.77 için klasik havalandırıcıda kanal genişliği boyunca (a) Z yönlü hava hızlarının değişimi (b) Jet altındaki alt basınçların değişimi	74
Şekil 6.8	Klasik havalandırıcı için Farklı Fr sayılarında kanal genişliği boyunca jet altındaki statik basınçlar	75
Şekil 6.9	Alttan alışlı havalandırıcı için su jeti altındaki alt basınçlar (Fr=3.83)	76
Şekil 6.10	(a) Klasik havalandırıcı için serbest yüzeyler jet akımı (Fr=6.06) (b) Alttan alışlı havalandırıcı için serbest yüzeyler (Fr=3.83)	77

Şekil 6.11 (a) Klasik havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı (Fr=6.06)
(b)Alttan alışlı havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı (Fr=6.06)..... 77
Şekil 6.12 (a)Klasik havalandırıcı için taban basınçları (Fr=6.06)
(b)Alttan alışlı havalandırıcı için taban basınçları (Fr=6.06)..... 77
Şekil 6.13 (a) Klasik havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı (Fr=3.83)
(b)Alttan alışlı havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı(Fr=3.83)..... 78
Şekil 6.14 (a)Klasik havalandırıcı için şut kanalı tabanındaki basınçlar (Fr=3.83)
(b)Alttan alışlı havalandırıcı için şut kanalı tabanındaki basınçlar (Fr=3.83)..... 79
Şekil 6.15 (a)Alttan alışlı havalandırıcı için kanal enkesitindeki Z yönlü hava hızları
(b)Klasik havalandırıcı için kanal enkesitindeki Z yönlü hava hızları (Fr=6.06)..... 79
Şekil 6.16 Modelin genel geometrisi 85
Şekil 6.17 Modelin sonlu eleman ağı..... 85
Şekil 6.18 Modelin sınır şartları 89
Şekil 7.1 t_r=0.10m, α=9.65 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 91
Şekil 7.2 t_r=0.15m, α=9.65 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 91
Şekil 7.3 t_r=0.20m, α=9.65 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 91
Şekil 7.4 t_r=0.10m, α=14.57 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 92
Şekil 7.5 t_r=0.15m, α=14.57 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 92
Şekil 7.6 t_r=0.20m, α=14.57 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 92
Şekil 7.7 t_r=0.10m, α=29.68 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 93
Şekil 7.8 t_r=0.15m, α=29.68 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 93
Şekil 7.9 t_r=0.20m, α=29.68 için *Fr* ile hava giriş katsayısının(β) değişimi..... 93
Şekil 7.10 α=9.65 için t_r/h ile β değerlerinin değişimi 95
Şekil 7.11 α=14.57 için t_r/h ile β değerlerinin değişimi 95
Şekil 7.12 α=29.68 için *tr/h* ile ortalama β değerlerinin değişimi 95
Şekil 7.13 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.20)..... 96
Şekil 7.14 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.24) 96
Şekil 7.15 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.30)..... 96
Şekil 7.16 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.36)..... 97
Şekil 7.17 Ortalama β değerlerinin D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.10m) 98
Şekil 7.18 Ortalama β değerlerinin D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.15m) 98
Şekil 7.19 Ortalama β değerlerinin D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.20m) 98
Şekil 7.20 Farklı şut eğimlerine göre *Fr* ile ortalama β değerlerinin değişimi 99
Şekil 7.21 α=14.57 için boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi 102
Şekil 7.22 Boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi (α=14.57, tr=0.10m) 102
Şekil 7.23 Boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi (α=14.57, tr=0.15m) 103
Şekil 7.24 Boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi (α=14.57, tr=0.20m) 103
Şekil 7.25 Ortalama rölatif jet uzunluğunun, farklı kanal eğimlerine göre D^2/Lh ile değişimi..... 104
Şekil 7.26 Ortalama rölatif jet uzunluğunun t_r/h ile değişimi 104
Şekil 7.27 Ortalama rölatif jet uzunluğunun t_r/h ile değişimi (α=9.65) 105
Şekil 7.28 Ortalama boyutsuz jet uzunluğunun farklı kanal eğimlerine göre t_r/h ile değişimi 105
Şekil 7.29 Ortalama boyutsuz jet uzunluğunun farklı D/L değerlerine göre *Fr* sayısı ile değişimi 106
Şekil 7.30 Ortalama boyutsuz jet uzunluğunun farklı t_r değerlerine göre *Fr* sayısı ile değişimi 106
Şekil 7.31 Hava giriş oranının boyutsuz jet uzunluğu ile değişimi ve uydurulan (7.14) eğrisi 108
Şekil 7.32 Şut genişliği boyunca boşluk altbasınçları (α=9.65, t_r=0.15, *D/L*=0.30) 109
Şekil 7.33 Şut kanalı uzunluğu boyunca tabandaki statik basınçlar (α=9.65, t_r=0.15, *D/L*=0.30) 110
Şekil 7.34 Ortalama P_N basınç sayısının, D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.10m) 110
Şekil 7.35 Ortalama P_N basınç sayısının, D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.15m) 111
Şekil 7.36 Ortalama P_N basınç sayısının, D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.20m) 111
Şekil 7.37 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.20) 112
Şekil 7.38 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.24) 112
Şekil 7.39 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.30) 112
Şekil 7.40 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.36) 113
Şekil 7.41 P_N basınç sayısının, farklı şut eğimlerinde *Fr* ile değişimi 113
Şekil 7.42 Hava giriş oranının basınç sayısıyla değişimi (t_r=0.10 α=14.57°) 114
Şekil 7.43 Sayısal iterasyona başladıktan sonra, farklı zamanlardaki akımın faz durumları (Fr=10.10, t_r=0.15, D/L=0.36, α=9.65°) 114
Şekil 7.44 Farklı Fr sayıları için su jetinin boykesit görünüşü (t_r=0.15, α=9.65) 115

Şekil 7.45 Farklı Fr sayıları için şut tabanındaki faz oranları (t_r=0.15, α=9.65)..... 116
Şekil 7.46 t_r=0.15, α=9.65 için farklı Fr sayılarında şut tabanındaki basınçlar (N/m^2) 117
Şekil 7.47 Akımın serbest yüzey görünüşü (Fr=6.95, tr=0.15, α=9.65) 118
Şekil 7.48 Fr=6.06, tr=0.15, α=9.65, D/L=0.36 için hava girişi bölgesindeki hız vektörleri (m/s) 118
Şekil 7.49 Fr=6.06, tr=0.15, α=9.65, D/L=0.36 için şut kanalı tabanında a) Türbülans yoğunluğu
b) Dinamik basınçlar (N/m^2) 119
Şekil 7.50 Fr=6.06, tr=0.15, α=9.65, D/L=0.36 için boykesitteki eş basınç çizgileri (N/m^2) 119

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo No **Sayfa**

Tablo 2.1 Kavitasyon hasarının önlenmesi için kriterler 10
Tablo 3.1 Denklem (3.7) deki katsayılar..... 21
Tablo 5.1 tanα=0.30 için rölatif jet uzunluklarının karşılaştırılması 60
Tablo 5.2 Denklem (3.12)'nin katsayıları..... 62
Tablo 5.3 tanα=0.30 için rölatif hava giriş oranlarının karşılaştırılması..... 63
Tablo 5.4 Kökpınar ve Göğüş [28]'e göre hava giriş katsayılarının hesabı 67
Tablo 5.5 Foz do Areia 1 nolu havalandırıcısı için prototip karşılaştırılması 67
Tablo 6.1 Klasik havalandırıcı için sonuçlar..... 72
Tablo 6.2 Alttan alışlı havalandırıcı için sonuçlar..... 73
Tablo 6.3 Yaklaşan akım karakteristikleri..... 83
Tablo 6.4 Değişken olarak alınan değerler ve değişken sayıları..... 84

EKLER LİSTESİ

EK 1 : Regresyon İçin Matlab Programı

EK 2 : İncelenen Havalandırıcı Modelin CFD Analiz Sonuçları (Tablo 1 - Tablo 36)

SİMGELER LİSTESİ

A : Hava bacasının kontrol alanı(m^2)
a_p : İkinci akışkan fazının ivmesi
a, b, c, d : Deneysel sabitler
a_0, a_1 : Denklem katsayıları
A_a : Hava giriş enkesit alanı(m^2)
A_D : Havalandırıcı oluğunun enkesit alanı(m^2)
a_s : Ses hızı
A_{SD} : Baca giriş alanı(m^2)
A_w : Dolusavak şut kanalı akımının enkesit alanını (m^2)
B : Şut kanalı genişliği (m)
c : Deneysel bir katsayı
C : Hava konsantrasyonu
c_1, c_2 : Havalandırıcı ve şut geometrisine bağlı katsayılar
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$: Deneysel sabitler
C_D : Hava sağlama bacasının debi katsayısı
C_o : Ortalama hava konsantrasyonudur
C_μ : Türbülans yoğunluğunu hesaplamada kullanılan bir sabit
$\bar{c}$: Baca geometrisine bağlı bir katsayı
d : Denklem (3.31)'de tanımlanacak karakteristik derinlik (m)
D : Alttan alışlı havalandırıcılarda havalandırıcı delik çapı (m)
D_a : Dolusavak şutu uzunluğunca iki havalandırıcı arasındaki mesafe(m)
d_p : Parçacık çapıdır(m)
E : Euler Sayısı
e : Gözlem ile uydurulan model eğrisi arasındaki hata veya atıklar
E_{min}, : β=0 için Euler sayısı
f : Darcy-Weisbach sürtünme faktörü
Fr : Froude sayısı
g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
G_b : Batmazlık nedeniyle türbülans üretimini
G_k : Ortalama hız gradiyenti yüzünden üretilen türbülans kinetik enerjisi
h : Tabana dik yaklaşan akım derinliği(m)
h_o : Saptırıcı sonundaki su derinliği(m)
K : Deneysel sabit
k : Türbülans kinetik enerjisi (m^2/s^2)
K_1, K_2, K_3 : Havalandırıcı ve şut geometrisine bağlı deneysel katsayılar
K_s : Boyutsuz pürüzlülük yüksekliği
k_s : Yüzey pürüzlülüğü(m)
L : Altan alışlı havalandırıcılarda havalandırıcı delik aralığı (m)
L_j : Boşluk jet uzunluğunu(m)
L_r : Rampa (saptırıcı) uzunluğu (m)
L_x : Saptırıcı sonundan itibaren uzaklık(m)
L_δ : Sınır tabakasının yüzeye ulaşması için akım yönünde gerekli mesafe(m)
m : Polinom derecesi veya bağımsız değişken sayısı
M_t : Türbülans Mach sayısı
m_v : İkinci fazın kütlesi (Buhar kütlesi)
n : Akışkan veya faz sayısı, veya veri çifti sayısı
n_1 : Deneysel bir üst
n_b : Birim hacimdeki kabarcık sayısı
n_s : İkincil fazın hacim oranı gradiyentiyle tanımlanan yüzey normali

$\hat{n}_\omega$: Katı cidara normal birim vektör
$\hat{n}$: Yüzeye normal birim vektör
P : Akımdaki bazı referans noktalardaki mutlak basınç (N/m^2)
P_1, P_2 : Fazların arayüzeyin her iki tarafında kalan akışkanlardaki basınçlar (N/m^2)
P_{atm} : Atmosfer basıncı (N/m^2)
P_N : Boyutsuz basınç sayısı
Pr_t : Enerji için Prandtl sayısı
P_v : Buhar basıncı(N/m^2)
q_a : Birim hava debisi ($m^3/s/m$)
Q_a : Havalandırıcıdan sağlanan havanın debisi (m^3/s)
$Q_a(x)$: x eksenine göre hava bacasının hava ihtiyaç debisi(m^3/s)
Q_a^{alt} : Jetin alt napından giren hava debisi (m^3/s)
$Q_a^{deaerat.}$: Akımdan çıkan hava miktarıdır(m^3/s)
q_a^L : Alt ve üst nap arasında kalan birim hava debisi($m^3/s/m$)
Q_a^{max} : Jetin sonunda oluşmuş hava giriş debisi(m^3/s)
q_a^U : Üst naptan giren havanın birim debisi($m^3/s/m$)
$Q_a^{üst}$: Jetin üst napından giren hava debisi(m^3/s)
Q_{TA} : Toplam hava debisi(m^3/s)
q_w : Birim su debisi ($m^3/s/m$)
Q_w : Suyun debisi (m^3/s)
$(Q_a)_0$: Saptırıcının(rampa) sonundaki başlangıç serbest yüzey havalandırması(m^3/s)
R : Kabarcık yarıçapı
r : Korelasyon katsayısı
r_e : Şut boykesit profilinin eğrilik yarıçapı(m)
Re : Reynolds sayısı
R_L : Limit Reynolds sayısı
S : Ortalama gerilme oranının tensörü
SEF : Ölçek etkisi faktörü
S_r : Atıkların karelerinin toplamı
S_t : Bağımlı değişkenin (y) ortalama etrafındaki karelerinin tüm toplamı
$S_{y/x}$: Tahminin standart sapması veya standart hata
S_{ek} : Kaynak terimi
t : Zaman (s)
t_r : Rampa yüksekliği (m)
T_r : Rölatif rampa (saptırıcı) yüksekliği
t_s : Eşik yüksekliği (m)
T_s : Rölatif eşik yüksekliği
Tu : Türbülans yoğunluğu
$\hat{t}_\omega$: Katı cidara teğetsel birim vektör
u : Akışkanın hızı (m/s)
U : Ortalama akım hızı (m/s)
U_0 : Kavitasyon bölgesine yakın referans hız (m/s)
U_a : Ortalama hava giriş hızını (m/s)
$U_{a(max)}$: Maksimum hava giriş hızı (m/s)
u_{Dk} : Sürükleme hızları (m/s)
u_i : Hız vektörleri
u_m : Karışımın ortalama hızı (m/s)
u_r : Negatif alt basınç dağılımına maruz hava kabarcıklarının yükselme hızı (m/s)
U_w : Saptırıcıdan önceki ortalama su hızını (m/s)
$(U_w)_0$: Saptırıcı sonundaki ortalama su hızı(m/s)
V_D : Su jeti altındaki boşlukta akıma dik ilerleyen hava hızı(m/s)
We : Weber sayısı

x : Şut kanalı tabanına paralel değişen eksen uzunluğu(m)
x_l : Bağımsız değişken serisi
x_i : Yön vektörleri
$\bar{x}$: x_i serisinin ortalaması
y : Akıma dik değişen derinlik (m)
Y_{90}^{L} : Alt nap yakın %90 hava konsantrasyonunda tanımlanmış karakteristik derinlik (m)
Y_{90}^{L} : Üst nap %90 hava konsantrasyonunda tanımlanmış karakteristik derinlik (m)
Y_{Cmin} : Hava konsantrasyonunun minimum olduğu noktanın su jetine dik derinliği (m)
y_i : Bağımlı değişken serisi
Y_M : Genişleme yayılımı terimini(dilatation dissipation)
$\bar{y}$: y_i serisinin ortalaması
z : Havalandırıcı su jeti altında şut genişliğince artan uzunluk (eksen)
z_i : Regresyon analizi için belirlenmiş fonksiyonlar
α : Şut kanalı taban eğimi
β : Rölatif hava giriş oranı veya katsayısı (Rölatif hava debisi)
β_1, $(\beta_1)_p$: Denklem (3.17) kullanılarak Tablo 5.3'de hesaplanan hava giriş oranları
β_2 : Pinto(1991) tarafından önerilen Denklem(5.6)'dan elde edilen Hava giriş oranları
β_{c1} : Denklem (3.17) ile elde edilen hesap hava giriş oranı
β_{c2} : Denklem (3.12)'den elde edilen hesap hava giriş oranı
β_f : Fluent çözümleriyle elde edilen hava giriş oranı
β_m : Model deneylerinden elde dilen hava giriş oranı
β_{max} : Sıfır boşluk altbasıncı için hava giriş oranı
β_p : Prototip hava giriş oranı
β^U : Üst nap hava giriş oranı
$(\beta_{alt})_e$: Deneysel alt nap hava giriş oranı
$(\beta_{c1})_p$: Denklem (5.3) ile hesaplanan prototipe çevrilmiş hava giriş oranı
(β_f) : Fluent CFD analizinden elde edilen hava giriş oranı
(β_m) : Model deneyi hava giriş oranı
$(\beta_p)_c$: Prototip hesap değerini
γ : Suyun birim hacim ağırlığı (N/m^3)
δ : Sınır tabakası kalınlığı(m)
ΔB : Pürüzlülük fonksiyonu
ΔP : Atmosfer basıncı ile nap altı basınçların farkı veya boşluk alt basıncı(N/m^2)
$\Delta P(x)$: x eksenine göre altbasınçlar(N/m^2)
ΔP_C : Kenar bacalar boyunca basınç kaybı(N/m^2)
ε ve c : Havalandırıcı ve şut kanalı geometrilerine bağlı katsayılar
ε : Türbülans yayılım oranı (m^2/s^3)
ε_2 : İkincil fazın hacim oranını gösterir.
ε_k : k akışkanının veya fazının hacim oranını
ε_l : Sıvı fazın hacim oranı
ε_v : Buhar fazının hacim oranı
θ : Saptırıcı(rampa) açısını
θ_i : Su jetinin tabana çarpma açısı
θ_ω : Katı cidarla yüzey teğeti arasındaki ikincil faz içinde ölçülen temas açısı
$\bar{\theta}$: Sıçratma açısı
κ : Yüzey eğriliği
λ : Modelin ölçeği
λ_j : Boyutsuz jet uzunluğu
μ : Akışkanın viskozitesi (Ns/m^2)
μ_k : k akışkanının viskozitesi (Ns/m^2)
μ_m : Karışımın viskozitesi (Ns/m^2)
μ_t : Türbülans viskozitesini

μ_w : Suyun viskozitesi (Ns/m^2)
ν : Suyun kinematik viskozitesidir(m^2/s)
ξ ve ε : Geometriye bağlı katsayılardır
ξ_{tot} : Hava sağlama sistemindeki yük kaybı katsayısı
ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_a : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_l : Sıvı akışkan yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_m : Karışımın yoğunluğunu (kg/m^3)
ρ_v : Buharın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_w : Suyun yoğunluğu(kg/m^3)
σ : Kavitasyon sayısı veya indeksi
σ_k : Türbülans kinetik enerjisi (k) için Prandtl sayısı
σ_s : Yüzey gerilmesidir (N/m)
σ_ε : Yayılım (ε) için türbülans Prandtl sayısını gösterir.
τ_{pq} : Relaksiyon zamanı
φ', φ'' : Deneysel katsayılar
Φ', Φ'' : Deneysel katsayılar
ψ^{U} : Jetin yayılma açısı
∇ : Gradiyent ve diverjans operatörü

KISALTMALAR

ASMM	: Cebirsel Kayma Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model)
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
CSF	: Sürekli yüzey kuvveti (Continuum Surface Force)
DPM	: Dağılmış Faz Modeli (Dispersed Phase Model)
DSİ	: Devlet Su İşleri
TAKK	: Teknik Araştırma Kalite Kontrol Dairesi
VOF	: Akışkan hacmi (Volume Of Fluid)

ÖZET

Doktora Tezi

ALTTAN ALIŞLI DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARIN CFD ANALİZİ

Mehmet Cihan AYDIN

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2005, Sayfa: 141

Orta ve yüksek düşülü barajların dolusavakları yüksek hızlı akımlara ve bununla birlikte kavitasyon olayının yıkıcı etkisine maruz kalabilirler. Yüksek hızlı akımlarda kavitasyonal aşınmayı önlemek için alışılagelmiş yöntem havalandırıcı aygıtlar kullanmaktır. Dolusavak havalandırıcılarının gelişmesine büyük ölçüde fiziksel model deneyleri öncülük etmiştir. Fakat son zamanlardaki hesaplamalı yöntemlerdeki gelişmelerle birlikte ileri sayısal modeller fiziksel modellere karşı önem kazanmıştır.

İlk bölümlerde, bu çalışmaya temel oluşturmak ve dolusavak tasarımcıları için faydalı bir kaynak olması amacıyla dolusavak havalandırıcıları üzerinde detaylı bir literatür taraması sunulmuştur. Daha sonra, dolusavak havalandırıcıları için CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analiz sonuçları, başka araştırmacılar tarafından sunulan fiziksel model ve prototip datalarıyla karşılaştırılmıştır. CFD analiz sonuçları prototip datalarıyla yeterli bir uyum sağlarken, önemli ölçek etkileri içeren fiziksel model datalarıyla, beklendiği gibi, uyumlu sonuç vermemiştir. Böylece, CFD modellerinin bu gibi hidrolik uygulamalardaki kullanımı ve etkinliği tartışılmıştır. Son olarak, batık havalandırıcı durumunu engellemek, düşük Froude sayılarında ve geniş dolusavak şut kanallarında bile klasik havalandırıcılardan daha iyi bir havalandırma performansı ve daha üniform bir hava karışımı sağlamak için, ilk olarak bu tezde, "Alttan Alışlı Havalandırıcı" diye adlandırılan yeni bir havalandırıcı tipi önerilmiştir. Bu havalandırıcının performansını belirlemek için Fluent yazılımıyla, üç boyutlu CFD modelleri kullanılarak data analizi yürütülmüş ve yüksek korelasyonla bazı faydalı bağıntılar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dolusavak, havalandırıcı, kavitasyon, hava girişi, ölçek etkisi, batık havalandırıcılar, Fluent, CFD, alttan alışlı havalandırıcılar.

ABSTRACT

PhD Thesis

CFD ANALYSIS OF BOTTOM-INLET SPILLWAY AERATORS

Mehmet Cihan AYDIN

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

2005, Page: 141

Spillways for medium and high-head dams may be exposed to high velocity flows and the associated destructive phenomenon of cavitation. A conventional method to prevent cavitational erosion in high-velocity flow is achieved by aerator devices. The development of spillway aerators has been pioneered to very large extent through the use of physical hydraulic models. But, advanced numerical models have got importance against physical models with recently developing computational methods.

In the first parts, a detailed review of the literature for spillway aerators is presented to provide a background for this study and to be useful as a resource for spillway design practitioners. Later, the results of the CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis for the spillway aerators are compared to physical model and prototype data presented by other investigators. The results of CFD analysis fairly agree with prototype data, but they do not naturally with physical model data included considerable scale effects. So, the using and efficiency of the CFD models in hydraulic applications like this are discussed. The last, the first time in this thesis, a new aerator type called as "Bottom-inlet Aerator" is suggested in order to prevent submerged aerator condition and to provide a better aeration performance and more uniform air mixture than classical aerators, even for low Froude numbers and wide spillway chutes. For determination of the performance of this aerator, data analysis is performed by using three-dimensional CFD models with Fluent software, and some useful relations are obtained with high correlation.

Keywords: Spillway, aerator, cavitation, air entrainment, scale effect, submerged aerators, Fluent, CFD, bottom-inlet aerators.

1. GİRİŞ

Barajlar çeşitli amaçlarla inşa edilirler. Hangi amaç ile inşa edilirse edilsin barajların temel işlevi akarsuların taşımış olduğu su miktarını depolamaktır. Ancak iklim şartlarının ve buna bağlı olarak da yağış ve akış durumlarının rasgele özelliği yüzünden akarsuların akışlarını her zaman kontrol altına almak mümkün değildir. Bu yüzden barajlar üzerinde bazı emniyet yapılarının inşa edilmesi gereği duyulmuştur. Bu emniyet yapılarının en önemlilerinden biri de dolusavaklardır. Dolusavakların projelendirilmesi ve işletilmesi ayrı bir mühendislik problemi oluşturur. Baraj şekline, amacına, büyüklüğüne, aktarılacak debi miktarına göre dolusavaklar değişiklik gösterirler. Dolusavakların bir özelliği de her zaman işletilmemesi ve ancak ihtiyaç duyulduğunda çalıştırılmasıdır.

Dolusavaklar üzerindeki akımlar genellikle serbest yüzeyli ve çok büyük hızdadır. Özellikle uzun şut kanallarına sahip dolusavakların üzerindeki akımın hidroliği yüzünden bazı önemli mühendislik problemleri oluşmaktadır. Bu problemlerin en önemlilerinden biri de kavitasyon hasarı ve bunu önleme yollarının belirlenmesidir. Dolusavakların çok büyük akım hızlarında, yüzeyler üzerindeki düzensizlikler ve pürüzlerin neden olduğu küçük boşluklarda basınç oldukça düşer. Buradaki basınçlar suyun buhar basıncının altına düştüğünde su buhar kabarcıkları haline gelir. Buhar kabarcıkları akım doğrultusunda ilerlerken daha yüksek bir basınç bölgesiyle karşılaştığı anda ani bir faz değişimi meydana gelir. Yani buhar kabarcıkları tekrar sıvı hale geçer. Bu ani faz değişimi sırasında gürültülü bir patlama meydana gelir ve beton yüzeyde tahribat oluşur. Tahrip olan beton yüzeyde daha fazla oyuk ve düzensizlikler olacağından, hasarın boyutu zamanla büyüyerek dolusavak kanalları işletilemez hale gelebilmektedir.

Hidrolik yapılarda ve hidrolik makinelerdeki kavitasyon olayının önemli etkileri uzun yıllardan beri bilinmektedir. Kavitasyon hasarıyla ilgili ilk ciddi çaba, 1935'te Madden Barajı (Panama) üzerindeki hasarın rapor edilmesiyle başlamıştır [1]. Daha sonraki yıllarda kavitasyonla ilgili birçok hasar rapor edilmiştir. Son zamanlarda yapılan hidrolik yapıların, daha yüksek su yükleri altında ve daha büyük debilerle işletilmesi nedeniyle ilk zamanlara göre kavitasyon hasarlarında artışlar olmuştur. 1945 yılında ASCE'nin bir sempozyumunda hidrolik yapılar üzerindeki kavitasyon hasarından kısaca bahsedilmiştir. Havalandırıcıların ilk uygulanması Grand Coulee Barajı dipsavak kanalındaki akım probleminde gerçekleştirilmiştir (1959-60). Dolusavaklar için bu konudaki diğer ilk uygulamalar; Tayland'daki Sirikit ve Birleşmiş Devletlerdeki Yellowtail Tünel Dolusavakları ve Sovyetler Birliğindeki 100 m yüksekliğindeki beton ağırlık barajının dolusavağında gerçekleştirilmiştir (1968-69). Aynı zamanda Birleşmiş Devletlerdeki Palisades ve Navajo gibi projelerin dipsavaklarında kavitasyondan korunmak için havalandırıcılar kullanılmıştır.

1977-78'de İran'daki Karun dolusavağındaki büyük hasar, dipsavak işletmesi ve yüksek hızlı dolusavak kanallarındaki havalandırıcı ihtiyacının gerekliliği, teknik dünyanın dikkatini çekmiştir. Brezilya'daki Foz do Areia ve Emborcacao, Venezuela'daki Guri ve Pakistan'daki Terbela 4. tünel dipsavakları gibi geniş dolusavaklarda yapılan başarılı deneyler, kavitasyon hasarını önlemede havalandırıcı aygıtlarının güvenirliliğini önemli ölçüde desteklemiştir.

Arizona'daki Colorado Nehri üzerinde bulunan Glen Canyon Baraj dolusavağı Mayıs 1983'te 906 m^3/s ile işletilmiş ve ciddi kavitasyon hasarları meydana gelmiştir [1]. Glen Canyon tünel dolusavağındaki testler, kavitasyon önleyici hava girişinin etkilerinin yeni bir delili olmuştur [2]. Montana'da Kutenya Nehri üzerindeki beton ağırlıklı Libby Barajının, her biri 566 m^3/s kapasitesinde 3 adet tünel dolusavağında, 12 000 saatlik işletme sonunda ciddi kavitasyon hasarları meydana gelmiştir[1]. Türkiye'de Fırat nehri başlangıç noktasında bulunan Keban Barajı üzerindeki, maksimum 17 000 m^3/s savaklama kapasitesine sahip üç adet dolusavak, ilk olarak 1976 yılında su seviyesi 840.5 m iken her kanaldan 1000 m^3/s'lik debiyle çalıştırılmıştır. Daha sonra farklı yıllarda 800-1200 m^3/s debiler arasında sık sık çalıştırılmıştır. Havalandırıcılar inşa edilinceye kadar toplam $62x10^9$ m^3 su savaklanmıştır. Dolusavakların her çalıştırılmasında önemli kavitasyon hasarları gözlenmiştir. Bu hasarların en ciddileri, şut kanalı üzerindeki inşaat derzlerinin mansaplarında ve sıçratma eşiği profilinin mansabında olmuştur. [1, 3].

Dolusavaklardaki kavitasyonun başlangıcı ve kavitasyon hasarını önleme yollarıyla ilgili literatürde birçok çalışma sunulmuştur. Kavitasyon hasarlarının akım hızının 12-15 m/s değerleri arasında başlayabileceği, 30-40 m/s gibi daha büyük akım hızlarında ise dolusavak yüzeyini kavitasyon hasarından korumak için havalandırıcıların kullanılması gerektiği belirtilir. Chanson [4], farklı dayanımlardaki beton yüzeylerde yürüttüğü deneylerle, kavitasyon başlangıcı ile ilgili detaylar sunmuştur. Russel ve Sheehan [5], kavitasyon hasarını önlemek için gerekli hava konsantrasyonunu belirlemeye çalışmışlardır. Havalandırıcı performansını ölçmek için Pinto ve diğ. [6] boyutsuz hava giriş oranı ($\beta=q_a/q_w$) ile ilgili ilk yaklaşımı sunmuşlardır. Dolusavak yüzeyinde gelişen sınır tabakası ve serbest yüzey havalandırması Wood ve diğ. [7] tarafından çalışılmıştır. Pinto ve Neidert [8] hava giriş oranının bağlı olduğu bazı büyüklüklerle değişimini incelemişlerdir. Volkart ve Rutschmann [9] tarafından birçok havalandırıcı sistem örneği sunulmuştur. Falvey ve Ervine [10] tarafından yüksek hızlı su jetinin hava giriş karakteristikleri üzerinde durulmuştur. Tan [11], Low [12], Wood [13] ve Chanson [14] tarafından aynı model kullanılarak havalandırıcıların performansları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Chanson'dan [4] aktarıldığına göre; Vischer ve diğerleri tarafından da farklı tipteki havalandırıcıların özellikleri incelenmiştir. Dolusavak havalandırıcılarının performansının daha iyi anlaşılabilmesi ve hava giriş miktarını belirlenmesi için Chanson [4] bazı teorik ve deneysel çalışmalar yürütmüştür. Havalandırıcı yeri ve aralıklarını belirlemek amacıyla Chanson [15],

Clyde Barajı dolusavak modeli üzerinde deneyler yürütmüştür. Akım parametreleri ve havalandırıcı geometrisi gibi tüm parametrelerin direkt olarak hava girişi üzerindeki etkilerinin dikkate alındığı "*Direkt yaklaşım*" ve hava girişinin dolaylı olarak, jet uzunluğuna bağlı incelendiği "*Endirekt yaklaşım*" olmak üzere Rutschmann ve Hager [16] tarafından iki yaklaşım sunulmuştur. Prototip dataları üzerinde havalandırıcı ölçümleriyle ilgili en detaylı çalışmalardan biri Pinto [17] tarafından sunulmuştur. Bu çalışmasında, Foz do Areia, Amaluza, Emborcacao ve Colbun Barajı Dolusavakları ve Terbela Tünel Dolusavağı havalandırıcı ölçümleri mevcuttur [17]. Volkart ve Rutschmann [18] tarafından, dolusavak şut kanalları üzerinde kavitasyon hasarı oluşması, hasar tipleri ve bunları önleyebilecek havalandırıcı tipleri hakkında bilgi verilmiştir. Wood [19], dolusavaklar üzerindeki akımın serbest yüzey havalandırması üzerinde durmuştur. Havalandırıcılar üzerinde yapılmış birçok çalışma Kells ve Smith [1] tarafından özetlenerek bir araya getirilmiş ve bu konuda ortaya konulmuş önemli kriterlere yer verilmiştir. Dolusavaklar üzerindeki kavitasyon hasarını tespit etmek için Lee ve Hoopes [20] tarafından bir Fuzzy Matematiksel Model geliştirilmiştir. Nie [21], yapay olarak pürüzlendirilmiş yüzeylerle kavitasyon hasarını önleme konusunda çalışmıştır. Son yıllarda, Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından, havalandırıcı tasarımında kullanılabilecek bazı bağıntı ve kriterlerin belirlenmesi amacıyla fiziksel modeller üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Dolusavak havalandırıcılarıyla ilgili çalışmaların çoğu fiziksel model deneyleriyle yapılmaktadır. Ancak fiziksel model deneylerinin sonuçlarını etkileyen birçok olumsuzluğunun varlığı da bilinmektedir. Bu olumsuzluklardan belki de en önemlisi ölçek etkileridir. 1984'de Batı Almanya Esslingen'de, ölçek etkileri üzerinde yapılan sempozyumda açık kanal havalandırması ile ilgili birçok çalışma sunulmuştur [16]. Ölçek etkilerini belirlemek amacıyla farklı ölçekli modeller Volkart ve Rutscmann [9] tarafından çalışılmış ve model ve prototip sonuçları karşılaştırılmıştır. Kökpınar ve Göğüş [22], model datalarını bazı prototip datalarıyla karşılaştırarak ölçek etkilerini düzeltecek bazı bağıntılar elde etmişlerdir. Deneysel çalışmaların aksine sayısal (CFD) modellerde 1:1 ölçeklerle çalışıldığından ölçek etkileri beklenmeyecektir. Ancak, sayısal modellerin de olayı ne kadar doğru açıklayabileceği araştırılıp eksikleri tespit edilmelidir. Foz do Areia Baraj dolusavağı 1 nolu havalandırıcının sayısal modeli üzerinde çalışılmış ve sayısal analiz sonuçları prototip ve bazı ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır [23].

Günümüzde, havalandırıcıları da içeren çok fazlı ve serbest yüzeyli akımlar için sayısal yöntemlerin geliştirilmesine rağmen, dolusavak havalandırıcıları gibi hidrolik uygulamalar üzerinde henüz yeterli ve güvenilir sayısal model çalışması yoktur. Bu tezin amaçlarından biri de, özellikle önemli ölçek etkileri içeren fiziksel deney modelleri ile sayısal (CFD) modellerin etkinliğinin karşılaştırılmasıdır. Fluent gibi bir yazılımla yapılan sayısal modellerin en az

fiziksel modeller kadar güvenilir olabileceği ve hatta fiziksel modellere karşı bazı üstünlükleri tartışılmıştır. Böylece, havalandırıcılar gibi hidrolik problemlerde sayısal model (CFD) kullanımının yaygınlaştırılması hedeflenmiştir.

Batık havalandırıcılarda su jeti alt napı tabana yapışır ve bu durum akıma hava girişini engeller. Bu konuda bazı araştırmacılar yorum getirmiş ancak önlenmesi konusunda önemli bir çalışma yapılmamıştır. Batık havalandırıcı durumu Pinto ve diğ. [6], Chanson'a [24] ve Rutschmann ve Hager [16] tarafından tanımlanmıştır. Batık bir havalandırıcı düşük Froude sayılarında bile kavitasyon riski oluşturabileceğinden, havalandırıcılar tasarlandığı zaman boşluk alt basınçlarına özel ilgi gösterilmesi gerektiği çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [1, 25, 26, 27]. Havalandırıcılar tamamen batık hale gelmese bile, geniş dolusavak şut kanallarında klasik havalandırıcılar şut genişliği boyunca yeterli ve üniform bir hava karışımı sağlamayabilir. İyi tasarlanmış bir havalandırıcı, batık olmamalı ve tüm dolusavak genişliği boyunca üniform bir hava karışımı sağlamalıdır [18].

Bu tezde; havalandırıcıların batık durumunu engelleyebilecek, düşük Froude sayılarında ve geniş şut kanallarında bile üniform ve yeterli hava karışımı sağlayabilecek olan "**Alttan Alışlı Havalandırıcı**" tipi önerilmiştir. Alttan alışlı havalandırıcıların performansı üç boyutlu sayısal modellerle belirlenmeye çalışılmıştır. Uğraştırıcı matematik modeller kurmak yerine, bu konuda yılların birikim ve deneyimleri sonucu hazırlanmış, Fluent gibi genel amaçlı CFD yazılımlarının kullanılması çok daha uygun ve doğru olacaktır.

Bu tezde hedeflenen üç ana tema özetle şöyledir:

- Dolusavak havalandırıcılarıyla ilgili literatürde mevcut olan önemli bilgileri sunmak,
- Son yıllarda önem kazanan CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modellerinin hidrolik uygulamalarda kullanım ve doğruluğunu desteklemek ve fiziksel model deneyleriyle kıyaslamak,
- Bu tezde, ilk olarak önerilecek ve *Alttan Alışlı Havalandırıcı* diye adlandırılan dolusavak havalandırıcı tipinin tasarım kriterlerini belirlemektir.

2. BARAJ DOLUSAVAKLARINDA KAVİTASYON

2.1. Kavitasyon Hasarı

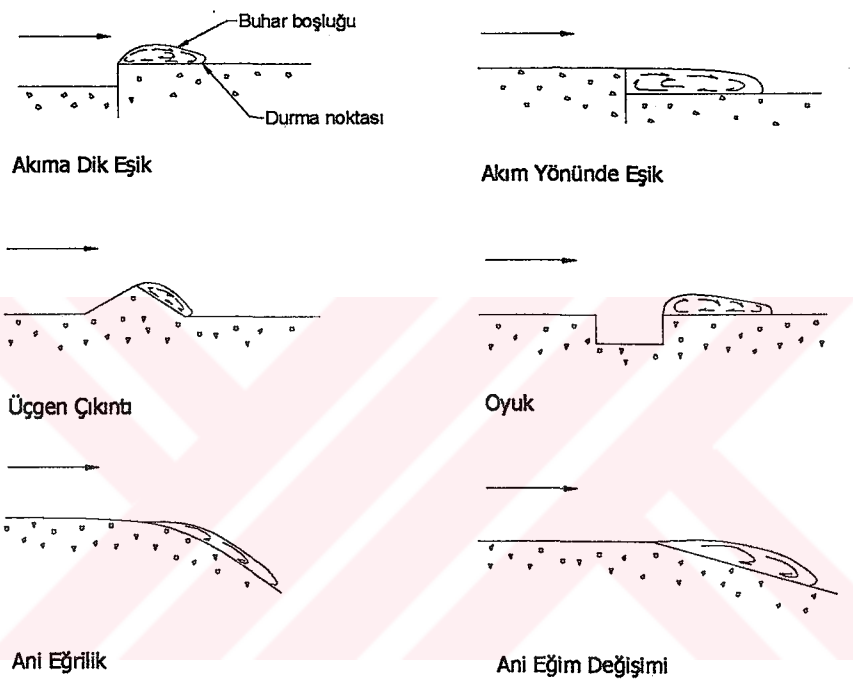
Yüksek hızlı akımlarda akımın kısmi bölgelerindeki basınçlar, cidar düzensizlikleri gibi nedenlerle çok fazla düşerek sıvının buhar basıncı altına inebilir. Bu durumda akışkan sıvı fazdan buhar fazına geçer. Bu olaya buharlaşma kavitasyonu denmektedir. Oluşan buhar ve gaz parçacıkları, hızlı akan suyun içinde görülebilir büyüklükte boşluklar oluşturabilir. Yüksek hızlı akımlar altındaki hidrolik yapılarda basınç azalması, genelde yüzey düzensizliklerinin neden olduğu lokal hızlardaki değişimlerle alakalıdır. Lokal hızın ortalamasıyla orantılı olarak basınç azalır ve kritik bir 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 hareket ederken çarpışırlar. Kabarcıkların ani çarpışması, yoğun basınç dalgalanmaları üretir. Bu durum yüksek bir gürültüyle birlikte kavitasyon hasarına neden olmaktadır. Akımın içine daldırılan buhar kabarcıkları, oluşan büyük buhar boşluğunun mansabındaki durma noktası civarında daha yüksek basınç bölgesiyle karşılaşır ve yoğunlaşarak tekrar sıvı faza geçiş yapar. Hasar, bu bölgede daha fazla olur. Şut kanalları üzerinde kavitasyona neden olan düzensizliklerden bazıları Şekil 2.1'de verilmiştir [2]. Yıllarca süren araştırma ve incelemelerden sonra kavitasyon hasarıyla ilgili aşağıdaki sonuçlara varılmıştır [20]:

- 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 gözönüne alınamamaktadır.
- Kavitasyon ve kavitasyon hasarına neden olan düzensizliklerin geometrisi ve yerini tahmin etmek zordur.
- Kavitasyon hasarı birçok faktöre bağlıdır, bunlar; akımın kavitasyon indeksi, akım hızı, yüzey malzemesinin direnci, işletim süresi gibi faktörlerdir.
- Kavitasyon başlangıç indeksini bulmak için dataların çoğu labaratuar deneylerinden elde edilir, bununla birlikte bazı tecrübe ve prototip gözlemlerinden de elde edilebilir.
- Bir dolusavak üzerindeki hasar, boşluk kabarcıkları çarpışması ve parçacık taşınımı, hız erozyonu, yıkıntı aşınması ve donma etkisinin bir kombinezonudur.

Dolusavaklar üzerinde kavitasyona sebep olan faktörler şöyle sıralanabilir [3]:

- Beton yüzeyler üzerindeki farklı düzensizliklerin varlığı,
- Akım yönünde veya 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 [2]

2.2. Kavitasyon Hasarını Önleme Yolları

Kavitasyon hasarını önlemek veya azaltmak için şu yöntemler kullanılabilir [1, 27, 21]:

- Kavitasyon olayının oluşma riskini azaltmak,
- Yüzey malzemesinin kavitasyon direncini arttırmak,
- İlk iki yöntemi birlikte uygulamak,
- Kavitasyon kabarcıklarının katı cidardan uzakta çarpışmasına yönlendirmek,
- Beton yüzeyi yapay olarak pürüzlendirmek,
- Akımı havalandırmak.

Kavitasyon hasarını önlemenin ilk akla gelen şekli, akımın temas ettiği katı cidar üzerindeki düzensizlikleri mümkün olduğu kadar azaltarak, akımın katı cidardan ayrılması önlemektir. Düzensizlikler ve pürüzler ihmal edilebilir derecede azaltılıp, oldukça düzgün ve cilalı bir yüzey elde ederek kavitasyon riski azaltılabilir. Özellikle dolusavak gibi büyük hidrolik yapılar inşa edilirken kaliteli işçilik ve malzeme ile dolusavak yüzeyi düzgün şekilde inşa edilmeli ve kalıp izleri, derz birleşimlerinden doğan düzensizliklere izin verilmemelidir. Ancak tamamen düzgün ve pürüzsüz bir yüzey oluşturmak mümkün değildir. Kavitasyon olayına engel olmanın diğer bir şekli ise akım hızlarını düşürmek veya işletme basınçlarını yüksek bir değerde tutmaktır. Akım hızlarını düşürmek için dolusavak şut kanallarının eğimini düşürmek veya genişliğini arttırmak gerekir. Bu durum, maliyeti arttıracağı gibi barajın yerleşeceği topografya ile de sınırlı olacağından çoğu zaman pratik kabul edilmez. Açık dolusavak kanallarındaki işletme basınçları direkt olarak akım derinlikleriyle alakalıdır. Bu nedenle, dolusavak kanalı eğiminin düşürülmesi aynı zamanda akım derinliğini ve dolayısıyla da işletme basınçlarını arttıracaktır [1].

Kavitasyon hasarından korunmak için kavitasyona dirençli malzemelerin hidrolik yapılarda kullanımı, daha çok risk altındaki küçük alanlar için önerilir. Özellikle dipsavak kapaklarının mansabındaki kısmi alanlarda kullanılabilir. Böyle bir uygulama, Glen Canyon Barajı dipsavak işletmesinin kapak kesitinde kullanılmıştır [1]. Bu tekniğin dolusavaklar gibi büyük yapılarda uygulanması oldukça pahalıdır. Bununla beraber, geniş alanlar üzerinde betonun kavitasyon direncini arttırmak için beton içine çelik lif karışımları, özel epoksi harcı ve polimerize karışımlar kullanılabileceği önerilmiştir [1]. Ancak, epoksi tabakasının kalınlığına ve düzgünlüğüne dikkat edilmesi gerektiği, aksi taktirde kendi kendine kavitasyon üretebileceği uyarısı yapılmıştır [1]. Bu yöntem özellikle kavitasyon riskinin sık meydana gelmeyeceği veya uzun süre devam etmeyeceği yapılar üzerinde kullanılması tavsiye edilmiştir [28].

Multijet giriş vanaları veya ani genişleyen bir kesit kullanarak kullanılarak, kavitasyon kabarcıklarının katı cidardan uzaktaki akışkan kütlesi içinde çarpışması sağlanabilir. Bu şekilde de katı yüzey kavitasyon hasarından korunabildiği belirtilmiştir [1]. Bazı uygulamalar için boşluk çarpışmasının yerini kontrol etme teknikleri başarı sağlasa da, genel olarak çok geniş koruma gerektiren dolusavak tasarımında uygulanmayacağı belirtilir [1].

Son yıllarda, şut kanalı yüzeyi yapay olarak pürüzlendirilmek suretiyle dolusavak şut kanalları üzerinde meydana gelen muhtemel kavitasyonun önlenebileceği belirtilmiştir. Deneyler göstermiştir ki, yapay olarak pürüzlendirilmiş bir yüzey, düzensizliklerin mansabındaki basınç düşmelerini ve dolayısıyla muhtemel kavitasyonu azaltır. Şut tabanı üzerinde düzensizlikler kaçınılmaz ise önündeki pürüzlülüğün arttırılması, düzensizliğin sebep olabileceği kavitasyon riskini azaltacaktır. Kavitasyon riskinin azaltılması bu bakımdan yüzey

pürüzlülüklerinin yüksekliğine ve aralığına bağlıdır. Pürüzlülükler, düzensizlik limitlerini de önemli ölçüde büyültür. Örneğin, işletme yüksekliğinin yaklaşık 100 m olması durumunda, pürüzlendirilmemiş yüzeyler için düzensizliklerin yükseklik limiti 2~3 mm iken, kanal tabanı uygun olarak pürüzlendirildiğinde düzensizlik limiti 10~20 mm'ye kadar çıkabilir [21].

Dolusavak yüzeyini kavitasyon hasarından korumak için kullanılan en yaygın yöntem, havalandırıcılar kullanarak akımı havalandırmaktır.

2.3. Kavitasyon Riski

Yüksek düşülü barajlardaki dolusavak tasarımcılarının sorunlarından biri, muhtemel kavitasyona karşı havalandırma ihtiyacının olup olmayacağıdır. Akım içindeki 3 mm düşey eşik tipli bir düzensizlik olması durumunda 11 m/s gibi düşük hızlarda bile kavitasyonun meydana gelebileceği ve akımdaki büyük bir girinti düzensizlikleri için kritik hızın 32 m/s olacağı belirtilmektedir [29]. Hızların 35 m/s'yi aşması durumunda dolusavak yüzeyi çok düzgün ve iyi inşa edilmiş olsa bile kavitasyon sorununa kesinlikle önlem alınması gerektiği bildirilmiştir [28]. Genelde akım hızının 30 m/s'yi geçtiği durumlarda kavitasyon olacağı kabul edilir [30]. Chanson [15], akım hızının 12~15 m/s hızlarda kavitasyon hasarının olabileceğini ifade etmiştir. 20~30 m/s hızlarda ise kavitasyondan kaçınmak için yüzey iyileştirmesinin ekonomik olamadığı ve havalandırmaya ihtiyaç duyulacağı belirtilmektedir [4, 15, 24, 27]. Vischer [31], kavitasyon hasarını önlemek için kötü pürüzlendirilmiş beton yüzeylerde akım hızının 25 m/s'yi aşması durumunda önlem alınması gerektiğini vurgulamıştır. Daha iyi cilalanmış yüzeyler için 35 m/s hızlara kadar çıkılabilir. Akım hızı 30 m/s'yi aştığında %20 hava girişine ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Volkart ve Rutschmann'a [18] göre, düşey eğriliği olmayan iyi bir beton yüzeyli dolusavakta 29 m/s'yi geçen akım hızlarında kavitasyon olabilir, ancak kavitasyon için sınır değer olarak 22~26 m/s aralığındaki hızların alınması gerekir. Pinto [2], akım hızının en az 30 m/s olması veya kavitasyon indeksinin 0.25'in altına düşmesi durumunda havalandırma ihtiyacının olacağını vurgulamıştır. İşletme yüksekliğinin 50-60 m'yi aşması durumunda kavitasyon için özel önlemler alınması gerektiği ifade edilir [32].

Kesin limitler üzerinde ısrarlı olmanın anlamsız olduğu ve bir kural olarak havalandırıcı kullanımının beton yüzeydeki tam bir cilalama işleminden daha pratik ve ekonomik olacağı belirtilmektedir [2].

Potansiyel kavitasyon başlangıcını belirlemek için kavitasyon sayısı (veya indeksi) aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$\sigma = \frac{(P - P_v)}{\rho U_0^2 / 2} \tag{2.1}$$

Burada; σ: Kavitasyon sayısı veya indeksi, P: Akımdaki bazı referans noktalardaki mutlak basınç (N/m^2), P_v: Suyun mutlak buhar basıncı (N/m^2), ρ: Sıvının (suyun) yoğunluğu (kg/m^3), U_0: Kavitasyon bölgesine yakın referans hız (m/s)'dır. P_v değeri, atmosfer basıncı ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. 100°C için P_v= 10 mss = P_0, 90°C için P_v= 6.5 mss, ve 30°C için P_v= 0.5 mss'dir. Genelde $P=P_v$ olduğu zaman normal su sıcaklığı için kavitasyonun başladığı varsayılmasına rağmen süspansiyon içindeki gaz ve/veya parçacıkların çözünmesi kavitasyonun daha yüksek basınçta olmasına neden olabilir. Bu durumda mühendislik tasarımlarında 7 mss civarındaki vakum basınçlarının altındaki basınçlardan sakınılması gerekir. Bununla birlikte, türbülanslı akımlarda ortalama basınç tehlike sınırının oldukça üzerinde olabilir, fakat dalgalanmalar nedeniyle sınır altına düşen basınçlar yüzünden kavitasyon meydana gelebilir. Bu durumda kavitasyon riskini belirlemek için türbülans basınç dalgalanmalarını analiz etmek gerekmektedir [28].

Alışılmış olarak referans hız, türbülans sınır tabakasının dışındaki dağılmamış akım bölgesinde oluşan hız olarak alınabilir. Yüzey üzerindeki düzensizlikler nedeniyle kavitasyonun başlaması durumunda U_0, Oskolkov ve Semenkov [32] tarafından pürüzlülüklerin üst seviyesindeki ortalama lokal hız olarak tanımlanmıştır. Referans basınç, aşağıdaki (2.2) denklemiyle şekilde tanımlanabilir [1].

$$\frac{P_0}{\gamma} = h.\cos\alpha \tag{2.2}$$

Burada; P_0/γ : Kavitasyon civarındaki (şut kanalı tabanı civarı) piyezometrik basınç yüksekliği (m), γ : Suyun birim hacim ağırlığı (N/m^3), h : Kanal tabanına dik havalandırılmamış akım derinliği (m), α : Şut kanalı eğim açısıdır.

Şut kanallarının konkav veya konveks eğriler olması durumunda ilgili referans basınç yüksekliği aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{P_0}{\gamma} = h.\cos\alpha \mp \left(\frac{U^2 h}{g.r_e}\right) \tag{2.3}$$

Burada; U: Ortalama akım hızı (m/s), g: Yerçekimi ivmesi (m/s^2), r_e: Şut boykesit profilinin eğrilik yarıçapı (m). Bu denklemde konkav eğri için '+', konveks eğri için ise '-' kullanılır. Mutlak basınçlar dikkate alınırsa ($P = P_{atm} + P_0$) kavitasyon indeksi aşağıdaki gibi de hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{\frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + h\cos\alpha \mp \frac{U^2 h}{gr}}{\frac{U^2}{2g}} \tag{2.4}$$

Kavitasyonu belirlemek için, σ değeri, kritik veya başlangıç kavitasyon indeksi olan σ_i değeri ile karşılaştırılabilir. Bir grup araştırmacı $\sigma>\sigma_i$ için kavitasyon hasarının olmayacağını ifade etmektedirler. Tablo 2.1'de sadece kavitasyon indeksi bakımından dolusavak şut kanalları üzerindeki kavitasyon için genel bir kriter sunulmuştur [1]. Ayrıca, kavitasyon indeksinin 0.20'yi aştığı durumda büyük hasarların meydana gelmeyeceğini belirtilmektedir [1]. Kritik kavitasyon indeksi (σ_i) geometrinin bir fonksiyonudur ve genelde değişik değerlerle anılmaktadır. Eşik ve dikdörtgen engeller için kritik kavitasyon indeksi bazı araştırmacılar tarafından tanımlanmıştır [29].

Tablo 2.1 Kavitasyon hasarının önlenmesi için kriterler [1]

Kavitasyon İndeksi (σ)	**Tasarım gereksinimi**
>1.80	Yüzey koruması gerekli değildir, kavitasyon önemli değildir
0.25~1.80	Şut yüzeyi özel pürüzlü kaplamalarla korunabilir.
0.17~0.25	Kanal yüzeyi şut profilinin ilave tasarım düzenlemesiyle veya tasarıma havalandırıcılar ilave edilerek korunabilir
0.12~0.17	Tasarıma havalandırıcılar eklenerek şut yüzeyi korunabilir.
<0.12	Şut yüzeyi muhtemelen kavitasyondan korunamayacaktır. Tasarım değiştirilmelidir.

3. DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARI

3.1. Dolusavak Şut 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 ulaşamaz ise kavitasyon hasarı meydana gelebilir [15]. Bu durumda havalandırıcılar kullanmak gerekebilir.

Dolusavak şut kanalları üzerinde meydana gelebilecek muhtemel kavitasyon hasarını önlemenin en verimli şekli havalandırıcıların kullanımı olmuştur. Havalandırıcılar, dolusavak şut 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 v.b. elemanların olması gerekir. En iyi sprey 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 altbasınç bölgesi oluşmayacak ve hava içeriye doğru emilmeyecektir. Hava girişinin bir rampa veya saptırıcı ile en etkili olduğu belirtilmektedir [1]. Bir rampa, serbest su jetini yüksek dereceli türbülansa maruz bırakır. Oskolkov ve Semenkov [32], rampa üzerinden geçen akımın sınır tabakasındaki büyümenin havalandırma yoğunluğunu arttıracağını ileri sürmüşlerdir. Bununla birlikte Volkart ve Rutschmann [9], rampaların hızlı akımlarda yüksek şok dalgalarına sebep olabileceğini ve bu durumun bazı dezavantajlarından bahsetmişlerdir.

Giren havanın kavitasyon üzerinde aşağıdaki etkilerinin olacağı belirtilmiştir [5]:

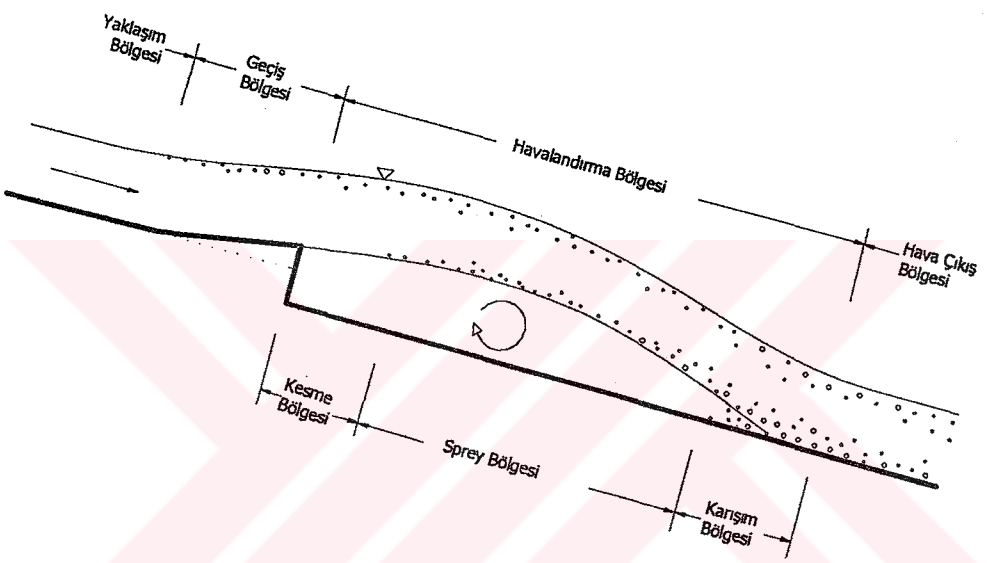
- Kavitasyon nedeniyle oluşan buhar boşluklarına giren hava, yüksek basınç bölgesinde meydana gelebilecek çarpışmalara yastık görevi yaparak su darbesini azaltacaktır.
- Su içindeki hava kabarcıklarının varlığı şok dalgalarının hızlanmasına engel olacak ve böylece yüzey malzemesi üzerindeki şok dalgalarının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

Falvey ve Ervine [10], Bruschin [33], Pinto [34], Chanson [4]ve Volkart ve Rutschmann [9] gibi araştırmacılar tarafından bir havalandırıcının havalandırma mekanizması tanımlanmıştır. Şekil (3.1) de gösterildiği gibi, bir havalandırıcı çevresi dört bölgeye ayrılmıştır [1, 4, 27] . Bunlar;

- 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 3.1).



Şekil 3.1. Havalandırma mekanizmasının tanımlanan bölgeleri [1, 4, 27]

Yaklaşım bölgesi havalandırıcının hemen menbasında yer alır. Bu bölgede dolusavağın 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 [34] tarafından sunulmuştur. Geçiş bölgesindeki basınç alanı değişimi akım türbülansında yükselişe sebep olur ve bu da havalandırma performansını arttırır [1].

Havalandırma bölgesi Şekil 3.1'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 sprey meydana gelir. Sprey bölgesinde oluşan spreyin, difüzyon işlevi görmesi nedeniyle giren hava

üzerinde yüksek derecede etkisi vardır. Gerçekten de bu bölge hava girişi üzerinde birinci derecede etkilidir. Sprey bölgesinin mansabında jet, şut 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 [4]. 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 [35] tarafından çalışılmıştır. Yerçekimi ve akım türbülansının etkileşiminin bir sonucu olarak hava kabarcıkları su ile karışır [34]. Bu bölgenin bitiminden sonra hava çıkışı başlar.

Hava çıkış bölgesinde, şut tabanı civarındaki hava konsantrasyonu hava kabarcıklarının yukarıya yükselmesiyle azalır. Akıma giren havanın bir difüzyon işlemi başlatacağı Bruschin tarafından belirtilmiştir [33]. 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 harekâtı arasında bir denge oluşur [1].

Bir havalandırıcı üzerindeki yüzey havalandırmasının başlaması veya artması yerçekimi kuvvetleriyle alakalı olduğu belirtilir [1]. 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 [1].

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

3.2. Gerekli Hava Konsantrasyonu

Kavitasyon hasarından kaçınmak için gerekli hava konsantrasyonu ile ilgili çalışmaların çoğunda, hava konsantrasyonunun %6~8 arasında olması gerektiği belirtilmiştir [1]. Russell ve Sheehan [5] malzeme testleri üzerine yaptığı çalışmada kavitasyon hasarını önlemek için %5 hava girişi sağlamanın yeterli olacağını savunmuşlardır. Saha ve model çalışmalarından Oskolkov ve Semenkov [32], kavitasyon hasarını önlemek için serbest hava değerinin %7~8 arasında olmasının uygun olacağını belirtmişlerdir. Rutschmann ve Volkart [36] 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 [1]. Diğer bazı araştırmacılara göre, maksimum hızların 44 m/s olması durumunda şut kanalı yüzeyine yakın hava konsantrasyonunun %4~8 olması hasarı önlemede yeterli olacağı

belirtilmiştir [27]. Abbasoğlu ve Okay'a [3] göre ise hava giriş oranının %8~2 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 şut kanalı yüzeyini kavitasyon hasarından koruyabilir. Ancak yeterli yüzey havalandırması yoksa veya düzensizlik toleransı kavitasyondan kaçınamayacak kadar ciddiyse (U>30 m/s) şut kanalları üzerine yerleştirilen havalandırıcılar kullanılarak akım yapay olarak havalandırılmalıdır [4, 15, 24].

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 [1, 32].

3.3. Havalandırıcı Tasarımı

Dolusavak şut 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 [1].

Pinto ve diğ. [6] ve Cassidy ve Elder [29] 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:

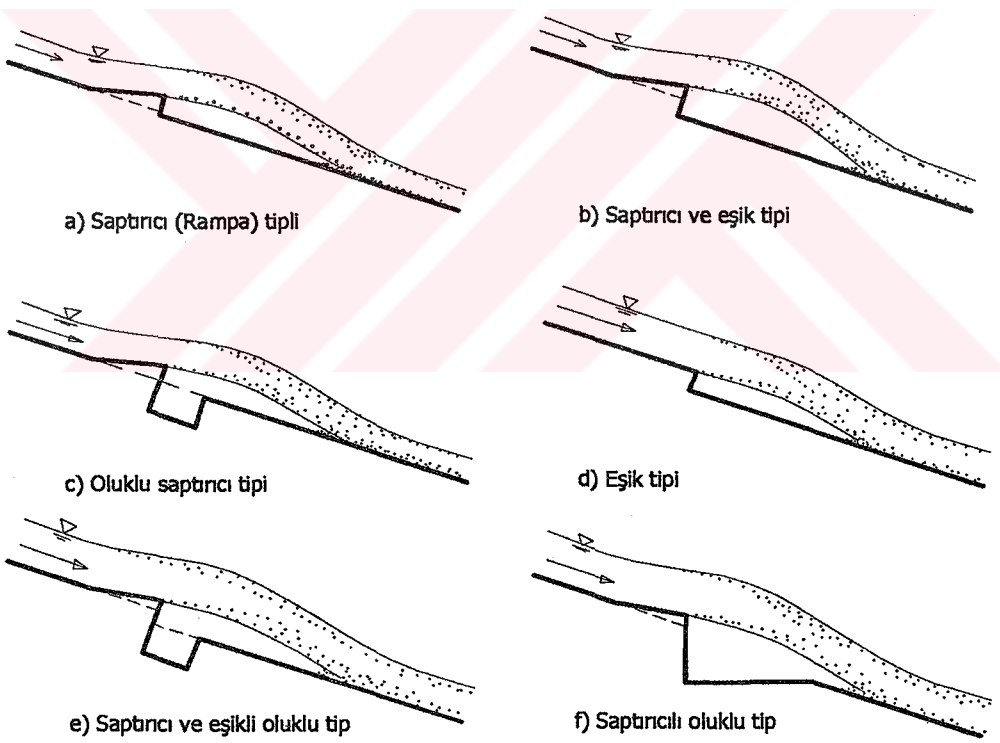
- Akımda istenen hava konsantrasyonu,
- Havalandırıcı elemanlarının, geometrisi, boyutları ve yeri,
- Diğer unsurlar.

Bu kriterlere ek olarak şut 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.

3.4. Havalandırıcı Geometrisi ve Tipleri

Klasik bir havalandırıcı genelde, kanal yüzeyine yerleştirilmiş genişlik boyunca bir oluk (grove), akımı tabandan ayırmak için bir rampa ve/veya eşik ve su jeti altındaki oluğu atmosfere açan hava besleme bacalardan 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 belirtilmiştir [15]. Çok sayıda havalandırıcı tipinin davranışları Volkart ve Chervet [37] tarafından fiziksel modeller üzerinde incelenmiştir.

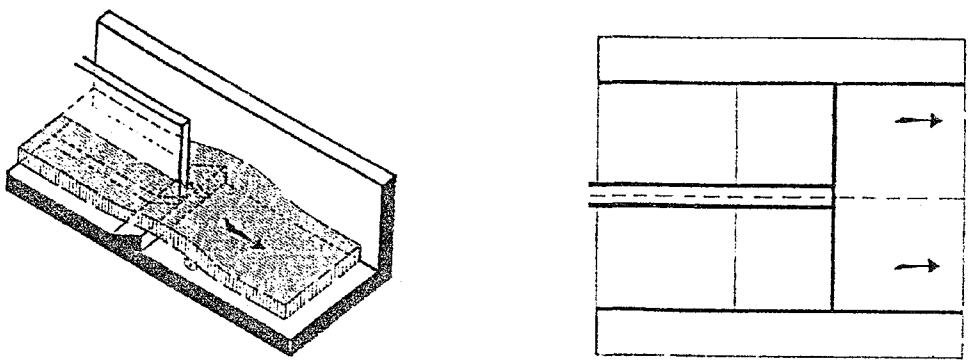
Şut kanalı yüzeyine yerleştirilen saptırıcı (rampa) ve eşikler katı cidar yakınındaki su akımının tabi havalandırılmasını sağlamakta kullanılan en basit ve pratik yapılardır. Tabandaki beslemenin aniden kesilmesi, yüksek su hızının havayı yoğun bir karışım içine sürüklediği yer boyunca hava-su ara yüzeyi oluşturur (Şekil 3.2, a ve d). Tabana yerleştirilen bir oluk jet altındaki boşluğa hava girişi sağlamak için herhangi bir şekilde yerleştirilebilir (şekil 3.2, c, e,f).



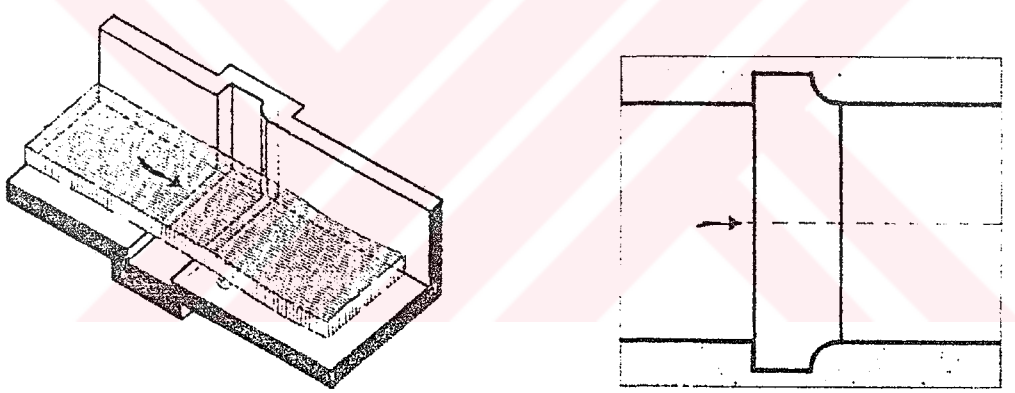
Şekil 3.2 Temel havalandırıcı tipleri [1, 29]

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 3.3 – 3.7'de gösterilmiştir. Yeni Zelanda'daki Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısında hava girişi, Şekil 3.3'de görüleceği gibi sonlandırılmış bir orta

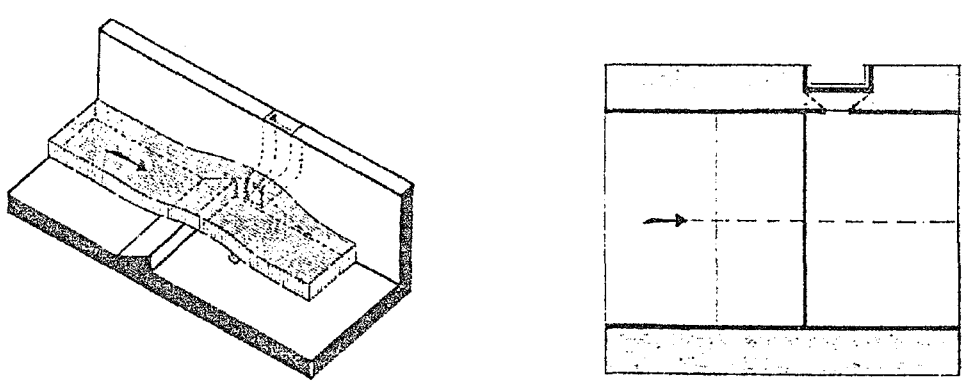
duvarın yardığı akım boşluğundan sağlanır. Calacucia Barajı havalandırıcısında, kenar duvarlara ve tabana gömülmüş oluklardan hava girişi sağlanmıştır (Şekil 3.4). Foz do Areia (Brezilya) Barajı havalandırıcısında, jet altındaki boşluğa, kenar duvarlara yerleştirilmiş bacalar vasıtasıyla hava girişi sağlanır (Şekil 3.5). Mantaro (Peru) ve Ait Chouarit Barajları havalandırıcılarında, kenar duvarlardaki eşik sayesinde akıma hava girişi sağlanır (Şekil 3.6 ve 3.7) [18].



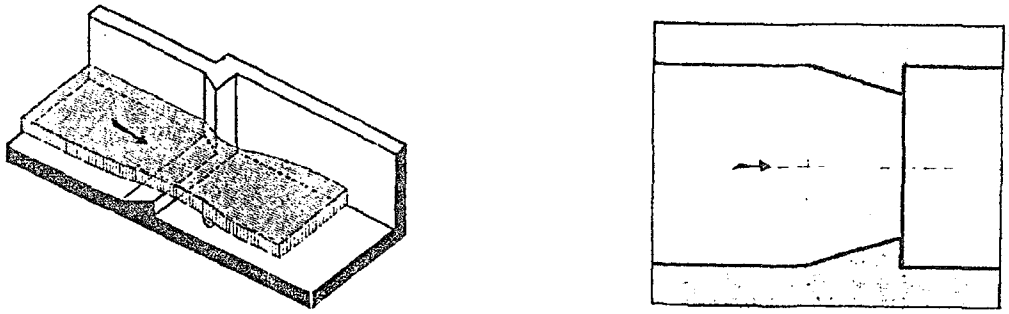
Şekil 3.3 Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısı, Yeni Zelanda [18]



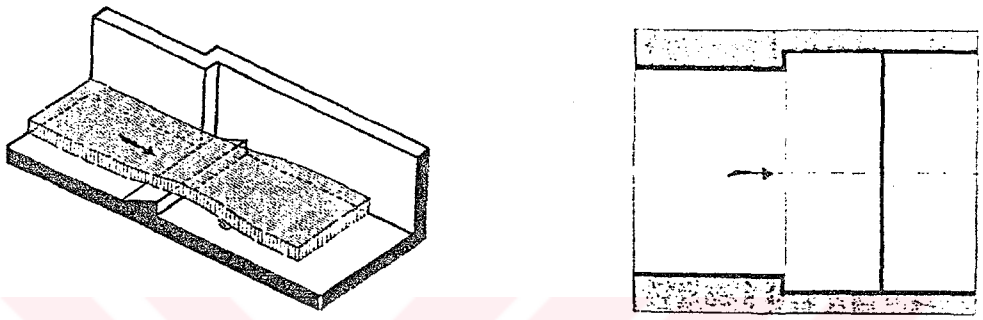
Şekil 3.4 Calacucia Barajı dolusavak havalandırıcısı, Fransa [18]



Şekil 3.5 Foz do Areia Barajı Dolusavak Havalandırıcısı, Brezilya [18]



Şekil 3.6 Mantaro Barajı dolusavak havalandırıcısı, Peru [18]



Şekil 3.7 Ait Chouarit Barajı dolusavak havalandırıcısı, Maroc. [18]

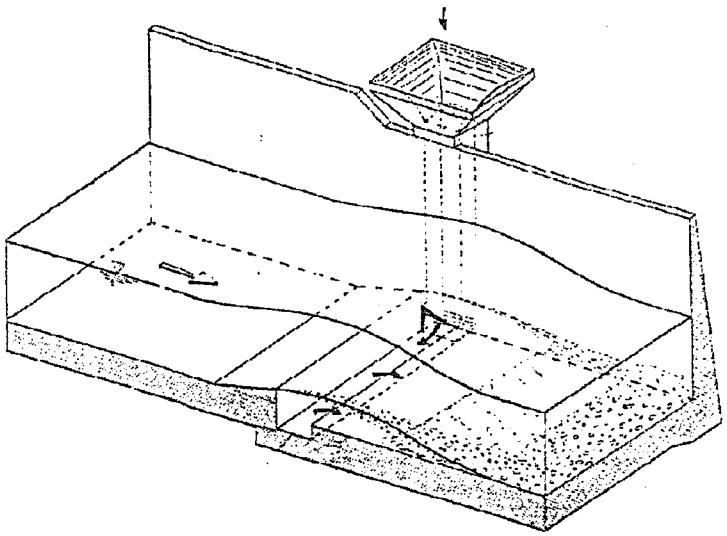
Tasarım açısından temel havalandırıcı şekilleri aşağıdaki şartları sağlamalıdır [18]:

- Şut kanalı uzunluğu boyunca tabandaki minimum hava gereksinimini sağlamalı,
- Basınç sayısının ($\Delta P/\rho_w gh$) yükselmesiyle, hava giriş oranının (β) 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.

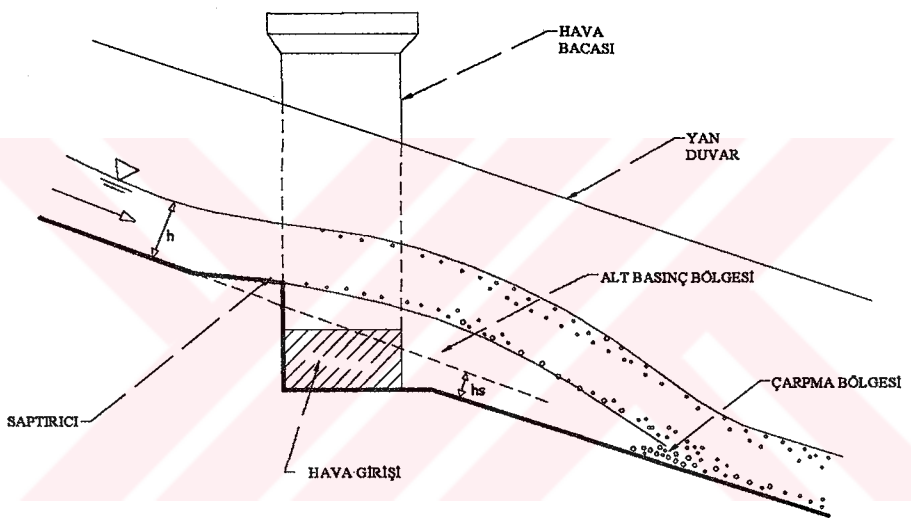
Burada; ΔP: Altbasınç farkı (N/m^2), ρ_w: Suyun yoğunluğu (kg/m^3), g: Yerçekim ivmesi (m/s^2), h: Su derinliği (m), β: Boyutsuz hava giriş oranı ($\beta = q_a / q_w$).

Rutschmann [38], 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'ın bulguları aşağıdaki maddeleri içerir [38]:

- 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 alt basınçlar için havalandırıcı performansını iyileştirir ve altbasınçların yükselmesiyle performans aniden düşer.



(a)



(b)

Şekil 3.8 Klasik bir havalandırıcının görünüşleri; a) 3D görünüş, b) Boykesit görünüşü

Deneysel bir kural olarak, yeterli hava girişi için jet uzunluğunun, rampa veya eşikteki akım derinliğine oranının (L_j/h) 3~5 aralığında olması gerektiği aktarılmıştır [1]. Bu kriter Guri barajı dolusavak şut kanalı havalandırmasında kullanılmıştır. Bununla birlikte, Pinto ve diğ. [6]'e göre de L_j/h=3~5 olmalı, fakat havalandırmanın memnun edici düzeyde olması için L_j/h değerinin 4~5 den fazla olması gerekir. L_j/h=3~5 aralığında seçilmesi hidrolik modeller için iyi bir kural olarak benimsenebilir [1, 6].

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 [32].

3.5. Hava Giriş Oranı

Dolusavak havalandırıcılarının havalandırma performansının belirlenmesinde kullanılan boyutsuz *hava giriş oranı (hava giriş katsayısı)*[1] birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır[2]. Bu parametre Denklem 3.1'deki gibi giren hava debisinin su debisine oranı olarak tanımlanır.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \tag{3.1}$$

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 şut ve havalandırıcı geometrisi gibi parametrelerin havalandırıcı performansı üzerindeki etkilerinin dikkate alındığı direkt yaklaşımdır. İkincisi ise, Pinto ve diğ. [6] 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.

3.5.1. 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 şut 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 (3.2) denklemiyle belirlenebileceği ifade edilmiştir [2]:

---

[1] İngilizcesi: "*Air entrainment rate*" veya "*Air entrainment coefficient*"

[2] Buna bağlı ortalama hava konsantrasyonu: $C_a = \frac{\beta}{1+\beta}$ ile hesaplanır.

$$q_a = c\sqrt{\Delta P} \tag{3.2}$$

Burada; q_a: Birim hava debisi ($m^3/s/m$), c: Deneysel bir katsayı, ΔP: Atmosfer basıncı ile nap altı basınçların farkı (rölatif basınçlar dikkate alınırsa, 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 (3.3) denklemiyle ifade edilmiştir [17, 39]:

$$Q_a = C_D A\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_a}} \tag{3.3}$$

Burada, C_D : Hava sağlama bacasının debi katsayısı, A: Hava bacasının kontrol alanı (m^2), ρ_a: Havanın yoğunluğu (kg/m^3), B: Kanal genişliğidir (m). Birim şut kanalı genişliğindeki efektif baca alanı $D_a = C_D A/B$ ile ifade edilebilir. Böylelikle havalandırıcının sağlayacağı hava giriş oranı, aşağıdaki boyutsuz değişkenlere göre yazılabilir [39]:

$$\beta = f\left(Fr, \frac{D_a}{h}, \alpha, \theta, \frac{t_r}{h}, \frac{t_s}{h}\right) \tag{3.4}$$

Buna bağlı olarak Pinto aşağıdaki fonksiyonu düzenlemiştir [39]:

$$\beta = a(Fr - K)^b \left[\frac{(t_r + t_s)}{h}\right]^c \left(\frac{D_a}{h}\right)^d \tag{3.5}$$

Burada; a, b, c, d ve K: Deneysel sabitler, h: Akım derinliği(m), α: Dolusavak şut 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 (3.6) denklemi düzenlenmiştir [17, 39]:

$$\beta = 0.47(Fr - 4.5)^{0.59}\left(\frac{D_a}{h}\right)^{0.6} \tag{3.6}$$

$(t_r + t_s)/h$ 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 [39].

Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısı için hava giriş oranının Froude ve basınç sayısına göre değişimi, Volkart ve Rutschmann [18] tarafından Denklem (3.7) ile ifade edilmiştir:

$$\beta = K_1(Fr - K_2) - K_3\left(\frac{\Delta P}{\rho_w g h}\right)^n \tag{3.7}$$

Burada; β : Hava giriş oranı (veya katsayısı), ΔP: Atmosfer basıncı ile su jet altındaki boşluk basıncı farkı (N/m^2), K_1, K_2, K_3: Havalandırıcı ve şut geometrisine bağlı deneysel katsayılar, n: Deneysel bir üstür. Eşik yüksekliği sıfır olması halinde n birim olarak alınabilir [1]. Katsayılar Foz do Areia, Guri ve Amaluza baraj dolusavaklarından alınan datalardan elde edilmiştir. Bu katsayılar Tablo 3.1'de verilmiştir [36]. Tabloda belirtilen barajlar için katsayılar hesaplandığından bu denklem sadece belirli geometrideki havalandırıcılar için uygulanabilir.

Verilen bir havalandırıcının hava giriş oranı aşağıdaki denklemle tanımlanabilir [16]:

$$\beta = c_1 \Delta F^{1.5}(1 - c_2 P_N) \tag{3.8}$$

Burada; c_1 ve c_2: Havalandırıcı ve şut geometrisine bağlı katsayılar, $\Delta F = Fr - F_c$ (F_c kritik Froude sayısıdır), $P_N = \Delta P / \rho_w g h$ (Boyutsuz basınç sayısı).

Tablo 3.1 Denklem (3.7) deki katsayılar [36]

Baraj Adı	Şut Eğimi (%)	Rampa Yüks.(m)	Rampa Eğimi	K_1	K_2	K_3
Foz do Areia[3]	25.84	0.2, 0.15	7.1	0.1713	4.9400	1.0000
Guri[4]	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 altı basınçlarının ve verilen havalandırıcı geometrisi için akım durumlarının bir fonksiyonu olarak Clyde barajı üzerinde çalışılmıştır [4, 24, 35].

3.5.2 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 (3.9) denklemi elde edilmiştir [10]:

$$q_a = \frac{(g.x^2 \tan\alpha)(f/8)^{0.5}}{U\cos^2\alpha} + U.x\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \tag{3.9}$$

[3] 1 ve 2. havalandırıcılar
[3] 1. şut kanalı ve 2. havalandırıcı

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 : Şut kanalı taban eğimi, g: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)'dir. Küçük eğimler için Denklem (3.9) aşağıdaki şekilde kısaltılabilir:

$$q_a = \left(\frac{f}{8}\right)^{0.8} UL_j \tag{3.10}$$

Burada; L_j: Su jetinin uzunluğudur (m). Jet uzunluğu, su jetinin başladığı yerden, havalandırıcının mansabında şut kanalı üzerindeki maksimum basınç noktasına olan uzaklık olarak alınabilir. Falvey ve Ervine [10] (3.9) ve (3.10) denklemlerinin yalnızca L_j/h oranının 50'den küçük olması durumunda kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Denklem (3.10) birçok araştırmacı tarafından aşağıdaki şekilde kabul görmüştür [1]:

$$q_a = KUL_j \tag{3.11}$$

Buradaki K boyutsuz bir katsayıdır. Denklem (3.11) 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 (3.11), $q_w=Uh$ ile bölünürse, hava giriş oranı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\beta = q_a/q_w = K\left(L_j/h\right) \tag{3.12}$$

Birkaç özel havalandırıcı tipi için bazı araştırmacılar tarafından Denklem (3.12) önerilmiştir [18]. Pinto ve Neidert [8], denklem (3.11)'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 [8]. Hamilton (1984) K değerleri için 0.01~0.05 aralığını önermiştir [1]. Pinto ve diğ. [6], 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 [1]. Emborcacao barajı dolusavağının orta havalandırıcısının K değeri 450~2800m^3/s debiler için 0.033 olarak verilmiştir [1]. Deklem (3.12) için bu katsayılar benzer bazı havalandırıcılara uygulanabilir ancak genel olarak uygulanabilir değildir.

Rutschmann [38], 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.

$$\beta = 0.0372(L_j/h) - 0.2660 \tag{3.13}$$

$$\beta = 0.0493(L_j/h) - 0.0061Fr^2 - 0.0859 \tag{3.14}$$

Bu denklemlerin oldukça geniş bir geometri ve akım şartlarına uygulanabilirliği görülmesine rağmen, Rutschmann bu iki denklem için uygulama sınırları vermiştir. Rutschmann bu iki denklemin, (3.7) 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 [16, 40] tarafından (3.15) denklemiyle tanımlanmıştır:

$$\beta = \frac{0.03(\lambda_{max} - 5)}{1 + 0.0085\frac{Fr}{\phi}\lambda_{max}} \tag{3.15}$$

$$\phi = \frac{A_a}{Bh}\left(0.43(1 + 2\xi_{tot})\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \tag{3.16}$$

Denklem (3.15) ve (3.16)'daki; ξ_{tot}: Hava sağlama sistemindeki yük kaybı katsayısı (ξ_{tot}=0.55 alınabilir), A_a: Hava giriş alanı (m^2), B: Şut 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 (3.15)'deki maksimum rölatif jet uzunluğu, sıfır alt basınçlar için olup, "*Jet Uzunluğu*" başlığı altında Denklem 3.45 ile verilmiştir.

Kökpınar ve Göğüş [22], rampa ve eşiğin birlikte kullanıldığı bir havalandırıcının alt ve üst naptan giren hava miktarını jet uzunluğuna bağlı olarak belirlemek için fiziksel model deneyleri yürütmüşlerdir. Bu model deneyi Demiröz [41], tarafından yapılana benzemekle birlikte 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 [22]:

$$(\beta_{alt})_e = 0.0189\left(\frac{L_j}{h}\right)^{0.83}\left[\left(\frac{A_a}{A_w}\right)(1 + \tan\alpha)\right]^{0.24} \tag{3.17}$$

Bu denklem bazı limitlerle sınırlandırılmıştır: $0° \le \theta \le 9.45°$; $0 \le \tan\alpha \le 1.25$; $5.56 \le Fr \le 10.00$; $0 \le t_r/t_s \le 0.8$; $0 \le t_r/h \le 0.4$; $0.02 \le A_a/A_w \le 1$ ve $109 \le We \le 182$. 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 membasında akımın enkesit alanı (m^2), θ: Rampa ile şut arasındaki eğim açısı, α: Şut kanalı eğim açısıdır. Bu denklemin beklenen ölçek etkilerini gidermek için Pinto [17] tarafından yayınlanan Brezilya'daki Foz do Aeia ve Emborcacao barajı ve Türkiye'deki Keban barajı havalandırıcılarından elde edilen prototip dataları kullanılmış ve aşağıdaki denklemler sunulmuştur [22]:

Simetrik havalandırıcılar için;

$$\left[(\beta_{alt})_p\right]_c = \xi'(\beta_{alt})_e^{\varepsilon'} \tag{3.18}$$

Asimetrik havalandırıcılar için;

$$\left[(\beta_{alt})_p\right]_c = \xi''(\beta_{alt})_e^{\varepsilon''} \tag{3.19}$$

Buradaki, c indisi hesap değerini, p indisi prototipi, e ise deneysel değerleri temsil eder. Denklemdeki katsayılar ξ'=5.194, ξ''=4.186, ε'=1.150, ε''=1.388 olarak elde edilmiştir [22].

3.5.3. Froude Sayısının Hava Girişine Etkisi

Chanson [24], verilen bir su derinliği ve havalandırıcı geometrisi için ve sabit basınçlar altında $\beta = f(Fr)$ bağıntısını incelemiş ve bu fonksiyonun değişimini, dört farklı bölgeye ayırmıştır (Şekil 3.9): Birinci bölgede, kritik bir hızın (U_c=0.80m/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 F_r<F_0 için hava girişi olamayacağı savunulur. İkinci bölge F_0<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 sayısıyla doğrusal olarak artar ve bu bölgede hava, serbest yüzeye yakın yüksek türbülans girdaplarıyla girer (F_1<F_r<F_2). Üçüncü bölgedeki hava girişi aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

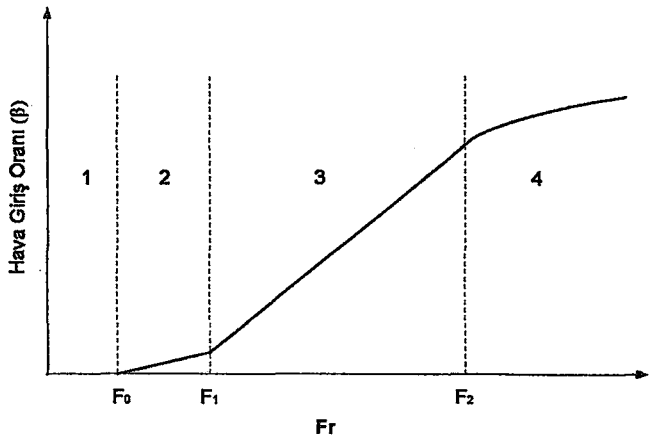
$$\beta = K_1(Fr - F_1) \tag{3.20}$$

Buradaki F_1 sayısı nap hava girişinin başladığı Froude sayısı olarak kabul edilir. Denklem (3.20)'deki F_1 ve K_1 sayıları istatiksel çalışmalar sonucu elde edilmiştir [24]:

$F_1 = f_1 + E_1\sqrt{P_N}$, 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 (3.31)'de tanımlanacak karakteristik derinlik (m), t_s: Eşik yüksekliği(m), P_N: Basınç sayısıdır ($P_N = \Delta P/(\rho_w g d)$). Denklem (3.20),

Clyde Barajı dolusavak modeli üzerindeki deneysel datalarla iyi bir uyum sağlamasına rağmen, farklı dolusavak eğimleri veya farklı geometrideki havalandırıcılar için genel olarak uygulanabilir değildir [24].



Şekil 3.9 Chanson'a göre Fr sayısı ile hava giriş oranının değişimi [24]

Dördüncü bölge ($F_r > F_2$) 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.

$$\beta = K_2 \sqrt{F_r - F_2} \tag{3.21}$$

Burada, K_2 katsayısı ve F_2 Froude sayısı farklı geometriler için deneylerden elde edilebilir [24].

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 sayısıyla doğrusal arttığı gözlenmiştir [18].

3.5.4. Diğer Yaklaşımlar

Bir havalandırıcı tarafından sağlanan hava giriş oranının bağlı olduğu büyüklüklerle değişimi deneysel ve analitik olarak Rutschmann ve Hager [16, 40] tarafından incelemiş ve aşağıdaki sonuç ve bağıntılar bulunmuştur:

I. β'nın Euler sayısıyla değişimi:

$$\frac{\beta}{\beta_{max}} = \left[\frac{2}{\pi}\arctan\left(3.10^{-3}\,\Delta E\right)\right]^{\zeta} \tag{3.22}$$

Burada, $\Delta E = E - E_{\min}$, $E = \rho U^2 / \Delta P$ (Euler sayısı), β_{max}: Sıfır boşluk altbasınçları için hava giriş oranıdır. Deneysel olarak ξ=0.70~0.80 aralığında elde edilmiştir. E_{min}, β=0 için Euler sayısıdır.

$$10^{-3} E_{\min} = \frac{1}{2.3}(\tan\theta)^{1.15} \exp\left[1.15(\tan\alpha)^2\right] + \frac{1}{3}\left(\frac{t_s}{h}\right)^2 \tag{3.23}$$

Burada; θ: Rampa eğim açısı, α: Şut 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. ΔP=0 olduğunda, $\beta_{\max}$ elde edilecektir.

$$\beta_{\max} = 0.45c(Fr - 5.4)^{\varepsilon} \tag{3.24}$$

Buradaki ε ve c katsayıları havalandırıcı ve şut kanalı geometrilerine bağlı olarak elde edilir. Rutschmann ve Hager [40] tarafından hazırlanan model deneylerinde, ε=0.35, c katsayısı ise farklı deney setleri için 1.76 ve 1.26 olarak belirlenmiştir. Bu denklem Fr>6 için geçerlidir.

III. Havalandırıcı rampası eğiminin (θ) etkisi;

$$\beta_{\max} = c_\alpha (\tan\theta)^{1.15} (Fr - 5.4)^{\varepsilon} \tag{3.25}$$

Burada; c_α önemli ölçüde dolusavak şut eğimine bağlı orantılık katsayısıdır.

IV. Dolusavak eğiminin(α) etkisi;

$c_\alpha = \exp\left[(1.15\tan\alpha)^2\right]$ olarak elde edilmiş ve bu durumda (3.25) yeniden yazılmıştır:

$$\beta_{\max} = (\tan\theta)^{1.15} \exp\left[(1.15\tan\alpha)^2\right](Fr - 5.4)^{\varepsilon} \tag{3.26}$$

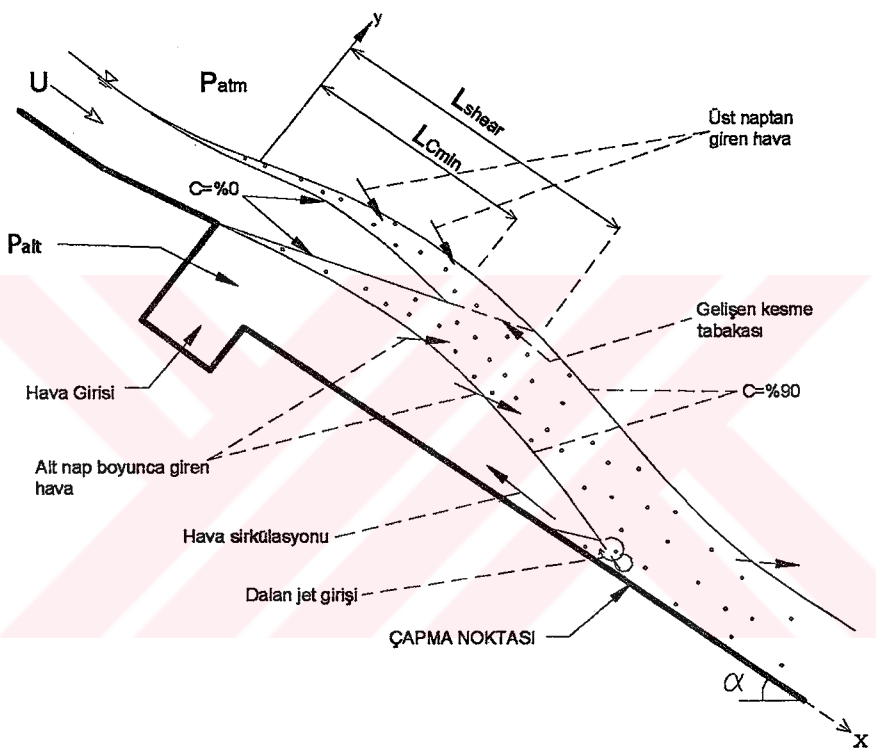
V. Boyutsuz jet uzunluğunun (λ_j=L_j/h) bir fonksiyonu olarak (3.27) denklemi elde edilmiştir.

$$\beta_{\max} = 0.030(\lambda_j - 5) \tag{3.27}$$

Bu denklem 12>F_*>6 için verilmiştir. Buradaki λ_j değeri "*Jet uzunluğu*" başlığı altında incelenmiştir.

3.5.5. Nap Hava Girişleri

Chanson [35] klasik bir havalandırıcı üzerindeki hava girişlerini Şekil (3.10)'daki gibi göstermiştir. Şekilde görüleceği gibi, L_{Cmin} uzunluğunda hava karışımsız 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 3.10 Bir havalandırıcı üzerindeki hava girişleri [35]

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 [4, 27], havalandırma bölgesindeki farklı hava girişlerini tanımlamış ve süreklilik denklemini kullanarak aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir:

$$Q_a^{max} = Q_a^{üst} + Q_a^{alt} + (Q_a)_0 \tag{3.28}$$

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 [4], havalandırıcı üzerindeki su jetinin alt ve üst nap arasında kalan toplam hava girişini, hava konsantrasyonuna bağlı olarak (3.29) denklemiyle ifade etmiştir.

$$q_a^T = \int_{Y_{90}^L}^{Y_{90}^U} C.U_a.dy \tag{3.29}$$

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:

$$\beta^T = \frac{q_a^T}{q_w} = \frac{Y_{90}^U - Y_{90}^L}{d} - 1 \tag{3.30}$$

Buradaki d karakteristik derinlik olup (3.31) denklemiyle hesaplanır [4, 15]:

$$d = \int_0^{Y_{90}} (1 - C)dy \tag{3.31}$$

Akan bir akışkan için ortalama hava konsantrasyonundaki ortalama bir derinlik, (3.32) denklemiyle tanımlanabilir [15]:

$$d = (1 - C_o)Y_{90} \tag{3.32}$$

Burada; C_o ortalama hava konsantrasyonudur.

3.5.6. 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 [2]. Dolusavak şut 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 şut uzunluğu L_δ=100*h olarak alınabilir. Bu uzunluk $\delta = L_\delta * 0.08(L/k_s)^{-0.233}$ denkleminden de bulunabilir. Buradaki, L_δ: Sınır tabakasının

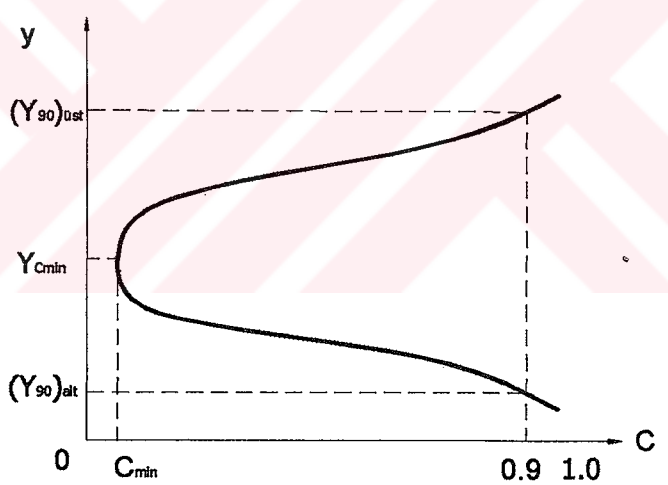
yüzeye ulaşması için akım yönünde gerekli mesafe, h: akıma dik su derinliği, δ: sınır tabakası kalınlığı, k_s: kum çakıl çapına eşit yüzey pürüzlülüğüdür [3].

Havalandırma bölgesinde üst naptan giren hava miktarı teorik olarak Chanson [4] tarafından sunulan aşağıdaki denklemlerle belirlenmiştir:

$$q_a^U = \int_{Y_{C\min}^L}^{Y_{90}^U} C.U.dy \tag{3.33}$$

$$\beta^U = \frac{q_a^U}{q_w} = \frac{Y_{90}^U - Y_{C\min}}{d} - \frac{\int_{Y_{C\min}}^{Y_{90}^U}(1-C)dy}{d} \tag{3.34}$$

Denklem (3.33) ve (3.34)'deki, Y_{Cmin}: Jetin iç merkezinde belirlenen hava konsantrasyonunun minimum olduğu (C=C_{min}) akıma dik derinlik (Şekil 3.11), q_a^U :Üst naptan giren havanın birim debisi, β^U: Üst nap hava giriş oranı(veya katsayısı)dır. Bu denklemlerde, hava giriş miktarı yalnızca hava konsantrasyonun bir fonksiyonudur [4].



Şekil 3.11 Havalandırma bölgesindeki akıma dik hava konsantrasyonu dağılımı [4, 35]

Chanson [35], serbest yüzeydeki hava kabarcıklarının yayılım denklemini analiz etmiş ve üst nap hava girişinin teorik bir çözümünü vermiştir.

$$\frac{Q_a^U}{Q_w} = K_0\left[\frac{L_x}{h_0}\tan\psi^U - 2\frac{(Q_a)_0}{Q_w}\ln\left(1+\frac{1}{2}\frac{\tan\psi^U}{(Q_a)_0/Q_w}\frac{L_x}{h_0}\right)\right] - 0.90\frac{L_x}{h_0}\frac{u_r}{(U_w)_o}\cos\alpha \tag{3.35}$$

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[5] (m/s), U_w: Su hızı (m/s), h_o: Saptırıcı sonundaki su derinliği (m), $(U_w)_0$: Saptırıcı sonundaki ortalama su hızı (m/s), ψ^U: Jetin yayılma açısı olup 0.75° alınabilir [35]. K_0=0.1755 olarak verilmiştir.

Chanson [4], havalandırma bölgesinde su jetinin üst naptan giren havanın ölçülmesinin mümkün olmadığını öne sürmüştür. Oysa üst naptan giren hava miktarı deneysel olarak Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından ölçülmüştür. Model deneyleri sonucunda, üst nap hava girişi için aşağıdaki ampirik denklem önerilmiştir [22].

$$(\beta_{üst})_e = 0.0278(Fr)^{0.60}\left(1+\frac{t_r}{h}\right)^{2.13}(1+\tan\alpha)^{0.48} \tag{3.36}$$

Buradaki e indisi denesel sonuçları ifade eder. Bu denklem bazı limitler için verilmiştir: $0°\leq\theta\leq5.71°$; $0\leq\tan\alpha\leq0.57$; $3.40\leq Fr\leq12.36$; $0\leq t_r/h\leq0.4$. Toplam hava giriş oranı $\beta=\beta_{alt}+\beta_{üst}$ şeklinde hesaplanabilir [22].

3.6. 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 [4].

Chanson [35] tarafından, hava çıkış işleminin öncelikle kanal tabanı ve jetin çarpma açısına bağlı olduğu bulunmuştur:

$$\frac{Q_a^{deaeration}}{Q_a^{\max}} = 0.0762(\theta_i-\alpha) \tag{3.37}$$

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 (3.38) denklemiyle ifade edilmiştir:

$$C^* = \frac{Q_a^{\max}-Q_a^{deaeration}}{Q_w+Q_a^{\max}-Q_a^{deaeration}} \tag{3.38}$$

[5]Chanson'un [12] Comolet(1979)'dan aktardığı ve Appendix 2'de elde edilen formülden u_r hesaplanabilir.

Deneysel sonuçlar göstermiştir ki, jet boyunca akım havalandırmasının maksimum %80'i çarpma bölgesinde kaybedilebilir. Hava çıkış miktarı Denklem (3.37)'de anlaşılacağı gibi çarpma ve kanal tabanı açısına bağlı olarak artacağından, sadece eşikli veya daha düz rampalı havalandırıcılar tasarlanarak çarpma açısının azaltılması tavsiye edilir [35]. Saptırıcının sonundan $1.5L_j$ uzaklıkta mansap bölgesi akımının başladığı kabul edilir. Mansap bölgesindeki akım kendi kendine havalanan akım tanımlamasına uyar [35].

3.7. Jet Uzunluğu

Havalandırıcı tarafından oluşturulan su jetinin yörüngesi, hava giriş kapasitesi ve boşluk altbasıncı 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 [11], jet uzunluğu üzerinde basınç sayısının etkisini dikkate alan bir yaklaşım sunmuştur.

$$P_N = \frac{\Delta P}{\rho_w g h} \tag{3.39}$$

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 [11] 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 uçma zamanı rampa ve eşik kombinezonlu havalandırıcı için tanımlanmıştır:

$$t = \frac{U \sin\theta}{g(\cos\alpha + P_N)}\left[1 + \sqrt{1 + 2(t_r + t_s)\frac{g(\cos\alpha + P_N)}{(U\sin\theta)^2}}\right] \tag{3.40}$$

Sadece eşikli havalandırıcılar için ise Denklem (3.41) önerilmiştir.

$$t = \sqrt{\frac{2t_s}{g(\cos\alpha + P_N)}} \tag{3.41}$$

Burada; U: Ortalama akım hızı (m/s), α: Şut 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:

$$L_j \frac{g\sin\alpha}{2} t^2 + U(\cos\alpha)t = 0 \tag{3.42}$$

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 [16]:

$$\lambda_j = F_r^2\bar{\theta}\left(1+\bar{\theta}\tan\alpha\right)\cos^{-1}\alpha\left[\left(1+2T\frac{\cos\alpha}{\left(\bar{\theta}F_r\right)^2}\right)^{1/2}+1\right]+T\tan\alpha \tag{3.43}$$

Sadece eşik bulunması durumunda;

$$\lambda_j = \left(2T\cos^{-1}\alpha\right)F_r + T\tan\alpha,\ \bar{\theta}=0 \tag{3.44}$$

denklemi kullanılır. Yukarıdaki parametre tanımlamalarına ek olarak burada; $T=(t_r+t_s)/h$ ve $\bar{\theta}$: sıçratma açısı olup $\bar{\theta}=\theta\sqrt{\tanh\left(t_r/(h\theta)\right)}$ ile hesaplanır. Atmosferik nap altı basınçlar için maksimum jet uzunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir [16, 40]:

$$\lambda_{\max} = \frac{F_r^2\bar{\theta}}{\cos\alpha}\left[1+\sqrt{1+\frac{2T\cos\alpha}{\left(\bar{\theta}F_r\right)^2}}\right] \tag{3.45}$$

Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından yürütülen model deneylerinden elde edilen 231 data ile regresyon analizinden boşluk jet uzunluğu için aşağıdaki ampirik bağıntı %88 korelasyonla elde edilmiştir:

$$\left(\frac{L_j}{h}\right)_e = 0.28(Fr)^{1.75}(1+\theta)^{0.22}\left(\frac{t_r+t_s}{h}\right)^{0.44}\left[(1+\tan\alpha)\frac{A_a}{A_w}\right]^{-0.087} \tag{3.46}$$

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: $5.56\leq Fr\leq 10.00$, $0.198\leq(t_r+t_s)/h\leq 1.985$, $0\leq\theta\leq 9.45°$, $0\leq\tan\alpha\leq 1.25$ ve $0.00684\leq A_a/A_w\leq 1$. Bu denklem Tan'ın [11], hesap değerleriyle karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gözlenmiştir [22]. Pratik uygulamalarda jet uzunluğunun belirlenmesi için (3.46) denklemi önerilebilir.

3.8. Hava Sağlama Sistemi

Havalandırıcılar, kanal tabanından yükseltilen su jetinin altındaki altbasınç bölgesine hava sağlayacak baca elemanları içerir. Bu bacalar genelde şut kanallarının kenar duvarları üzerine düşey olarak yerleştirilir. Havalandırma bacaları, kanal enkesiti profili boyunca yeterli ve üniform havayı sağlayacak genişlikte tutulmalıdır. Havanın, jet altındaki atmosfer altı basınç bölgesi boyunca akıma dik doğrultuda ilerlemesi için kanal genişliğince saptırıcının hemen

mansabında bir oluk yerleştirilebilir. Havalandırma bacaları içindeki akım genelde bir boyutlu olarak kabul edilir.

Nap altındaki atmosfer altı basınçlar hava giriş oranına ve hava bacasının sürtünme direncine bağlıdır. Eğer baca kapalı tutulursa basınç farkı maksimuma ulaşırken hava girişi sıfır olur [42]. Havalandırma bacaları yeterli hava girişini sağlayacak boyutlarda tasarlanmaz ise jet altındaki atmosfer altı basınçlar fazla düşer ve havalandırıcı batık hale gelebilir. Bu konu "*Batık Havalandırıcılar*" başlığı altında incelenmiştir.

Havalandırma bacalarındaki hava hızları maksimum bir değeri aşamaz. Dolayısıyla bir havalandırıcı tarafından sağlanacak hava miktarı bir limit hızla sınırlı olacaktır. Bu konuda bazı araştırmacılar farklı yorumlar getirmiştir. Besleme bacalarındaki hava hızının 50 m/s'yi aşamayacağı ve ayrıca, hızların 100 m/s'yi aşması halinde havanın sıkıştırılabilir özelliği nedeniyle hava giriş analizlerinin doğruluğunun etkilenebileceği belirtilmiştir [1]. Maksimum müsaade edilebilecek hava hızı Eccher ve Siegenther (1982) tarafından 60 m/s olarak verilmiştir [1]. Benzer şekilde Volkart ve Rutschmann [18], maksimum hava hızının 60~80 m/s ile sınırlandırılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Echavez ve Bourguett (1986), sıkıştırılabilir etkilerden sakınılabilmesi durumunda maksimum hava hızının 120 m/s olarak alınabileceğini belirtmişlerdir [1]. Rutschmann ve Volkart [36] göre ise bu limit değer 100 m/s olarak alınmalıdır. Bununla birlikte hava akım hızı burada belirtilen üst sınırların altında tutulmalıdır. Muhtemel akım düzensizlikleri ve sıkıştırma şoklarından ayrı olarak, işletmesel sesler de önerilen üst hız limitlerinde oldukça belirgin olacaktır [36].

Bir hava sağlama sistemindeki yüksek hızlı hava akımlarının olumsuz etkilerinin giderilebilmesi için besleme elemanları (bacalar, galeriler gibi) yeterince geniş tutulmalıdır.

3.9. Boşluk Alt Basınçları

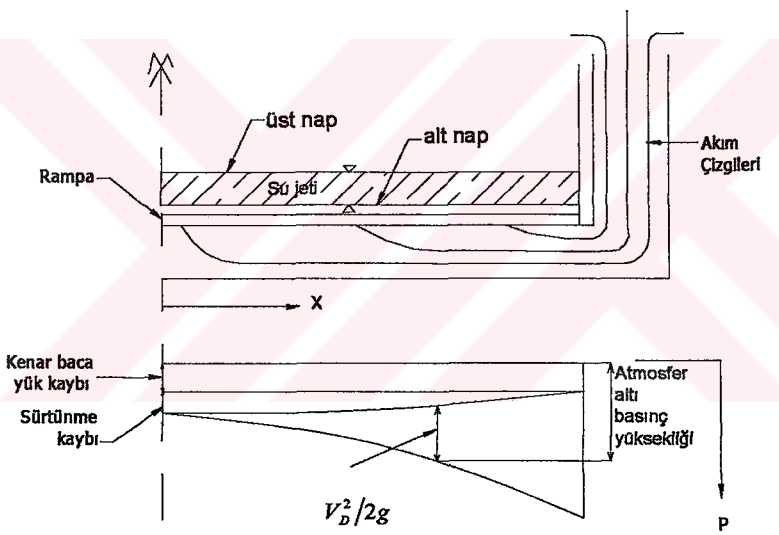
Rutschmann ve Volkart [36] ve Rutschmann [38] şut kanalı genişliği boyunca boşluk alt basınçlarının değişimini incelemişlerdir. Euler sayısının 50'nin üzerine çıktığı zaman havalandırıcı üzerindeki su jeti geometrisinin boşluk alt basınçlarından etkileneceği belirtilmiştir [6]. Verilen bir Froude sayısı için, hava debisinin azalması nap alt basınçlarının artmasına neden olur [24, 35].

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 3.12). Kenar bacalar boyunca basınç farkı Denklem (3.47)'de ifade edilebilir [18].

$$\Delta P_C = \xi_{tot} \frac{1}{2} \rho_a \left[\frac{Q_{TA}}{2A_{SD}} \right]^2 \tag{3.47}$$

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: 90^0 yuvarlatılmış dirsek ve çan ağız için 0.5, 90^0 yuvarlatılmış dirsekli ve dik köşeli ağızlar için 1.0, yuvarlatılmamış dirsekli ve dik köşeli ağızlar için 2.0 olarak alınabilir [18].

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 3.12'de herhangi bir x noktasında Bernoulli denklemi yazılırsa Denklem (3.48) elde edilir [18]:



Şekil 3.12 Bir havalandırıcı jeti altındaki basınçlar [18]

$$Q_a(x) = A_D \left[\frac{2(\Delta P(x) - \Delta P_C)}{\rho_a} \right]^{0.5} \tag{3.48}$$

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 dolusavak tabanından ayrılması, 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 [41] datalarıyla Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından yürütülen regresyon analizi sonucu basınç sayısını veren Denklem (3.49) elde edilmiştir:

$$(P_N)_e^{1/4} = \Phi' \ln\left[\left(\frac{L_j}{h}\right)^2 (1+\tan\alpha)^{3.5}\left(\frac{A_a}{A_w}\right)^{-0.9}\right] + \Phi'' \qquad (3.49)$$

Burada; Φ' ve Φ'': Deneysel katsayılardır. Φ'=0.0733 ve Φ''=-0.1033 değerleri 0.91 korelasyon katsayısıyla elde edilmiştir. Bu denklem için de bazı limitler verilmiştir: $1.095 \le L_j/h \le 30.06$, $0.3 \le \tan\alpha \le 1.25$, $0.00684 \le A_a/A_w \le 0.447$ ve $4.31 \le Fr \le 8.73$ [22]. 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 (3.49) bazı prototip ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve ölçek etkilerinin giderilmesi için aşağıdaki düzeltme yapılmıştır [22].

$$(P_N)_p = \varphi'(P_N)_e + \varphi'' \qquad (3.50)$$

Buradaki e indisi deneysel, p indisi ise prototip ölçümlerini ifade eder. φ' ve φ'' regresyon analizinden belirlenen katsayılardır. Guri barajının prototip dataları kullanılarak φ'=10.402 ve φ''=-0.087 değerleri 0.99 korelasyon katsayısıyla elde edilmiştir [22].

Yüksek rakımlarda yer alan havalandırıcıların performansları düşük atmosfer basınçlarından etkilenir. Atmosfer basıncının azalması giren hava debisini arttırır [24].

3.10. Havalandırıcının Yeri ve Aralığı

Potansiyel kavitasyonun meydana gelebileceği yerlerdeki havalandırma ihtiyacına uygun olarak dolusavak şut kanalı boyunca havalandırıcılar yerleştirilmelidir. Prensipte 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 şut tabanına asla ulaşmayacağı belirtilmiştir [1]. Akım tabanına yakın bölgelerde yeterli hava konsantrasyonunu sağlayacak şekilde havalandırıcılar yerleştirilmelidir. Dolusavak yüzeyine yakın hava konsantrasyonu minimum miktarın (C_{min}=%5~10) altına düştüğü zaman dolusavak yüzeyi kavitasyon hasarından korunamayacaktır. Bu oran ortalama

hava konsantrasyonunun C_o=%30'un altı anlamına gelir [15]. Chanson'a [15] göre, nispeten dik dolusavaklarda (α>20°) eğim azaltılmadıkça ek havalandırıcılara gerek duyulmaz. Ancak şut kanalının eğimi 20°'den küçükse, ortalama hava konsantrasyonun %30'un altına düştüğü yerlerde ek havalandırıcılar kullanılarak akım tekrar havalandırılmalıdır [15]. Abbasoğlu ve Okay'a [3] 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 [32] göre, bir havalandırıcının mansabındaki hava konsantrasyonu akım yönünde her metrede yaklaşık %0.2~0.4 oranında azalır. Bratsk barajı üzerindeki bir çalışmada, yaklaşık olarak birim metrede %1 azalmanın olduğu gösterilmiştir [1]. Diğer bir çalışmada, ortalama hava konsantrasyonunun şut kanalı boyunca birim metrede %0.5 oranında azaldığı, tabana 1.0cm yakın bölgede bu oranın 1.5~2 kez daha fazla olacağı belirtilmiştir [6].

Fikir vermesi bakımından havalandırıcı aralıklarıyla ilgili işletmedeki bazı dolusavak havalandırıcılarından örnekler verilebilir: 400m uzunluğundaki Foz do Areia barajı dolusavağı üzerindeki havalandırıcı aralığını 72 ve 90m; 330m uzunluğunda, %18 eğimli Emborcacao barajında havalandırıcı aralığı 103m, Venezüella'daki Guri barajı üzerinde havalandırıcı aralıkları ise 50~150m arasında verilmiştir. 100m uzunluğundaki Bratsk dolusavağında yalnızca bir havalandırıcı kullanılmıştır. İyi tasarlanmış bir havalandırıcının 50~100m aralıklarla yerleştirilmesi gerektiği belirtilir. Böylece şut kanalı boyunca beton taban kavitasyon hasarından korunabilir [6]. Nurek barajı dolusavağında her 20m de bir olmak üzere toplam 7 havalandırıcı bırakılmış ancak havalandırıcı sayısının çok olduğu düşüncesiyle bazıları kaldırılmıştır. Keban barajı dolusavağı üzerindeki kuzey ve orta şut kanallarındaki birinci ve ikinci havalandırıcı arasındaki mesafe 81.31m, diğer havalandırıcılar arasındaki mesafe ise 90m olarak tasarlanmıştır.

Vischer ve diğerleri [43] tarafından yürütülen model deneyleri sonucu havalandırıcı aralığı ile ilgili aşağıdaki bağıntı verilmiştir:

$$D_a = 1.1U \tag{3.51}$$

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.

3.11. Batık Havalandırıcılar

Su jeti altındaki atmosfer altı basınçların aşırı düşmesi sonucu, bir havalandırıcı üzerindeki su jetinin alt napı şut 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 ve/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 şut kanalı genişliğinin çok fazla olması gibi nedenlerden dolayı su jeti altındaki boşluk altbasınçları çok fazla düşebilir ve havalandırıcı batık hale gelebilir. Yapılan CFD analizlerinde, özellikle geniş açıklıklı dolusavak şut 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 [24], 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 (F_r^{sub}) ve minimum basınç sayısı ($P_N^{\min}$) tanımlamıştır. Chanson'a [24] göre, boşluk alt basınçları çok fazla düşerse havalandırıcı batık hale gelir ve havalandırma işlevini gerçekleştiremez.

Batık bir havalandırıcı durumu Pinto ve diğ. [6], tarafından da tanımlanmıştır. Sıfır altbasınç (ΔP=0) için rölatif jet uzunluğunun yaklaşık, L/h<5 olması durumunda havalandırıcının batık olacağı belirtilmiş ve bu durumdan bir şekilde kaçınılması gerektiği vurgulanmıştır. Rutschmann [38], 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 ($Ts=t_s/h$) dikkate alındığında ise; Ts<0.6 olması durumunda havalandırıcının batık çalışacağı belirtilmiştir. Rutschmann, Froude sayısının Fr<6

olması durumunda havalandırıcının batık hale geldiğini ifade etmiştir [16]. 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 [1, 24, 25] . Yeterince geniş bir hava sağlama bacasıyla boşluk alt basınçları minimize edilebilir. Ancak çok geniş dolusavaklar için yine de şut kanalı tabanına yakın hava karışımının üniform dağılımı sağlayamayabilir.

Bu açıklamalar doğrultusunda anlaşılacağı 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, ortalardaki 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 karışımın sağlamalıdır [18]. İlk olarak bu tezde önerilecek *Alttan Alışlı Havalandırıcılarla* batık çalışma riski klasik havalandırıcılara göre azaltılabilir. Bu havalandırıcılar ileriki bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır.

4. SAYISAL YÖNTEMLER

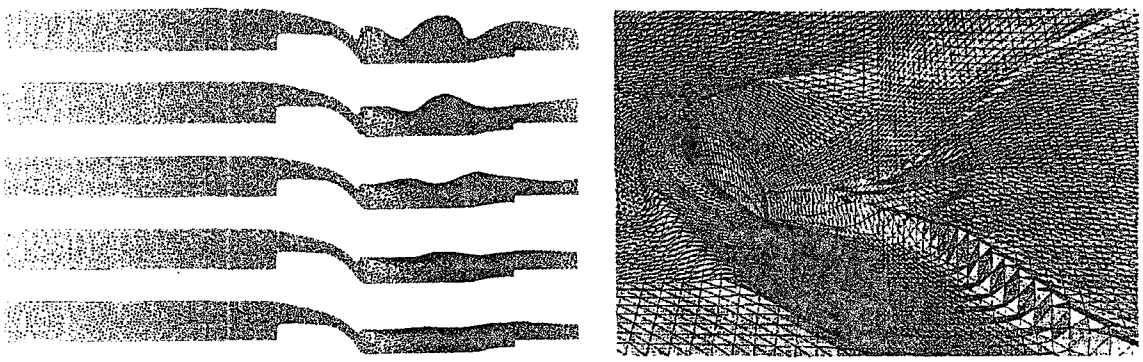
Dolusavaklar üzerindeki akımlar gibi inşaat mühendisliği hidrolik problemlerinin birçoğunda serbest yüzeyli akımlarla karşılaşılır. Tam dolu akan basınçlı borular, tek fazlı ve kapalı ortam akışları gibi problemlerin yanında serbest yüzeyli akımların sayısal modellemesi oldukça zordur. Serbest yüzeyli akımların çift fazlı olarak ele alınması, serbest yüzeyin alacağı şeklin belirlenmesi ve zamana bağlı değişmesi, bu yüzden de serbest yüzeyin sabit bir sınır olarak alınamaması, türbülans etkileri, cidar pürüzlülükleri gibi etmenler bu tür problemlerin sayısal modellemesini zorlaştıran sebeplerin başında gelir.

Akışkanların dinamik modellemesinde kullanılan sayısal yöntemler şunlardır:

- Sonlu Elemanlar Yöntemi
- Sonlu Farklar Yöntemi
- Sınır Elemanlar Yöntemi
- Fuzzy, Bulanık Mantık

Akışkanların sayısal modellemesinde kullanılan en etkili ve yaygın yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntem, havalandırıcı tasarımında genelde boşluk jet uzunluğunun tahmini için uygulanmıştır [1]. Soulis [44], iki boyutlu, homojen, sıkıştırılamaz, viskoz, sürtünmesiz ve akım boyunca hidrostatik basınç dağılımı olduğu kabullerini yaparak, bir açık kanaldaki serbest yüzeyli akımı sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerini birleştirerek modellemiştir. Sıkıştırılamaz ve zamanla değişen serbest yüzeyli akımların modellenmesi için Güler ve diğ. [45] tarafından iki ve üç boyutlu bir paralel sonlu elemanlar metodu geliştirilmiştir. Önerilen metotla serbest yüzeyin şekli hareketli ağ modelleme (moving mesh) ile belirlenir. Güler ve diğ.'nin [45] çalışmalarında, bir dolusavak üzerindeki ve silindir bir ayak çevresindeki akımlar oldukça başarılı şekilde modellenmiştir (Şekil 4.1). Bir dipsavak çıkışındaki su jetinin serbest yüzey profillerinin ve hız ve basınç dağılımlarının hesabı için iki boyutlu bir sonlu elemanlar metodu Daneshmand ve diğ. [46] tarafından sunulmuştur. Problemi çözmek için değişken ve sabit alanlı sonlu elemanlar yönteminin bir kombinezonu kullanılmıştır.

Deneme yanılma yöntemlerinin yerine direkt bir matematiksel yaklaşımla dolusavakların tasarımını desteklemek ve dolusavak profilini optimize etmek amacıyla Henderson ve diğ. [47] tarafından Sınır Elemanlar Yönteminin kullanıldığı bir model sunulmuştur. Dolusavak üzerindeki serbest yüzeyli akım, rotasyonel ve vizkoz olmayan, iki boyutlu, homojen, sıkıştırılamaz, zamanla değişmeyen akım olarak kabul edilmiştir. Debi ve serbest yüzeyi tanımlamak için Laplace ve Bernoulli Denklemleri kullanılmıştır [47].



(a) (b)

Şekil 4.1 a) Bir dolusavak üzerindeki iki boyutlu (2D) serbest yüzeyli akım **b)** Bir silindir ayak çevresindeki üç boyutlu (3D) serbest yüzeyli akım [45]

Lee ve Hoopes [20], dolusavaklar üzerindeki kavitasyon hasarını tahmin etmek için bir Fuzzy matematik modeli kullanmıştır. Bu modelde kavitasyon hasarına etki eden kavitasyon indeksi, akım hızı, malzeme direnci ve işletme zamanı dikkate alınmıştır. Matematik model Glen Canyon Barajı sağ ve sol tünel dolusavağı üzerinden alınan datalarla karşılaştırılmış ve uygun sonuçlar elde edilmiştir [20].

Serbest yüzeyli akımlarla ilgili geçmişteki sayısal model çalışmalarında şu eksiklikler dikkati çekmektedir:

- Modeller birçok kabul ve kısıt içermektedir.
- Modeller çoğunlukla özel problemlerle sınırlıdır.
- Geliştirilen yöntemler genelde uygulamaya dönük değildir.
- İşlem zorluğu nedeniyle genelde iki boyutlu çalışılmıştır.
- Önerilen sayısal yöntemler akımın sadece serbest yüzey, hız ve basınç gibi karakteristiklerini belirlemekte, hava-su karışımı gibi çok fazlı akım olayının analizine olanak sağlamamaktadır.

CFD analizleriyle çok fazlı (hava-su gibi) akım problemlerinin incelenmesine olanak sağlayan yazımlarla ilgili detaylar ileride ayrı bir başlıkta anlatılacaktır.

4.1. Havalandırıcıların Sayısal Modellemesi

Havalandırıcı tasarımında çoğunlukla fiziksel hidrolik modeller kullanılır. Şimdiye kadar az da olsa akım havalandırması üzerinde bazı sayısal modellemeler kullanılmıştır. Hoopping ve Hoopes (1988) karışım teorisini kullanarak bir matematik model geliştirmiş ve bu modelle akım havalandırmasını incelemiştir [1]. Bu araştırmacılar Aviemore Barajı ve labaratuar modelleri üzerinde bazı araştırmacıların ölçümleriyle modellerini test etmişlerdir [1]. Zarrati [48] tarafından yapılan bir çalışmada, bir dolusavak havalandırıcısının hava çıkış

bölgesinde akım profillerinin hava konsantrasyonunu tahmin etmek için kütle ve momentum korunum denklemleriyle bir matematik model geliştirilmiştir. Sonuçların yapılan deneylerle uyumlu olduğu görülmüştür. Havalandırıcıların tasarımı için sayısal yöntemlerin yeterli olmadığı ve daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir [1]. Günümüzde, çok fazlı ve serbest yüzeyli akımlar için sayısal yöntemlerin geliştirilmesine rağmen havalandırıcılar üzerinde henüz yeterli ve güvenilir çalışmaları yoktur. Yapılan bu çalışmada, hidrolik uygulamalarda sayısal modellemenin de fiziksel modeller kadar güvenilir olabileceği ve hatta fiziksel modellere karşı bazı avantajlarının olduğu da tartışılmıştır. Böylelikle, havalandırıcılar gibi hidrolik problemlerde sayısal modellerinin (CFD) kullanımı teşvik edilmeye çalışılmıştır.

Dolusavak havalandırıcıları hava-su karışımı içeren çok fazlı serbest yüzeyli akımlardır. Bu akımların sayısal modellemesi oldukça zor olmasına rağmen gelişen sayısal yöntemlerin hızlı bilgisayarlarla birleşmesiyle geçmişte mümkün görülmeyen üç boyutlu sayısal modeller, günümüzde gerçekleştirilebilmektedir.

4.2. CFD Yazılımları

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) ileri bir konudur. Akışkanların hareketini belirlemek için, temel denklemlerden ve deneysel sonuçlardan yola çıkılarak geliştirilmiş bazı matematiksel yöntemler vardır. Bu yöntemlerin sayısal çözümlemesi kompleks modeller için ancak bilgisayar desteği ile mümkün olabilmektedir. Sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler kullanılarak geliştirilen matematik modeller, bilgisayar desteği ile çok hızlı ve etkili bir şekilde çözülebilir. Hidrolikteki birçok problemin üç boyutlu olarak incelenmesi gerekmesine rağmen, önceleri yapılan sayısal modellemelerin birçoğu işlem zamanı düşünülerek iki boyutlu olarak dikkate alınmıştır. Üç boyutlu modellerde hassas çözüm için sonlu eleman sayısı çok fazla artacağından çözüm zamanı ve zorluğu da çok fazla artmaktadır. Üç boyutlu hassas çözümlemeler, günümüz hızlı ve bellek kapasitesi yüksek bilgisayarlar yardımıyla yeni yeni mümkün olmaktadır. Hatta bazı problemlerin sayısal çözümlemesi için sadece bir PC yeterli olmayıp, işlemci ve bellek kapasitesi çok yüksek birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı sistemler gerekebilmektedir. Bu konudaki ihtiyaçları karşılamak için ULAKBİM, 2*Intel(R) xeon 2.80GHz işlemci, 2GB bellek, 600GB yerel disk içeren bir sunucu ve Intel(R) PIV 2.66GHz işlemcili ve 1GB bellekli uç birimlerden oluşan 128 paralel bilgisayarlı *Beowulf* Sistemini kurmuştur. Yakın bir gelecekte Fluent gibi CFD yazılımlarının satın alınması ve bu sisteme dâhil edilmesi planlanmaktadır.

Çok fazlı ve serbest yüzeyli akımlar gibi problemlerin sayısal analizlerinin yapılabilmesi için yazılım şirketleri Çok Fazlı Model (*Multiphase Model*), Akışkan Hacmi

(*VOF - Volume of Fluid*) Modeli gibi CFD modelleri geliştirmiştir. Dolusavak havalandırıcılarındaki hava girişi olayı çok fazlı akımlara bir örnektir. Bu nedenle, bu çalışmada dikkate alınan problemin analizinde bahsedilen yöntemlerden yararlanılabilir.

CFD analizleri için genel bir çözüm algoritması hazırlamak oldukça güç ve çok sayıda kişinin çalışmasını gerektirecek bir işlemdir. Literatürdeki sayısal çalışmaların çoğunda, her problem için özel bir yöntem önerilir. Her bir problem için uğraştırıcı matematik modeller kurmak yerine, bu konuda yılların birikim ve deneyimleri sonucu hazırlanmış, Fluent gibi, genel amaçlı CFD yazılımlarının kullanılması çok daha uygun ve doğru olacaktır.

4.3. Fluent CFD Yazılımı (Fluent v5.3)

Bu tezde, dünya çapında CFD konusunda en etkili yazılımlardan biri olarak bilinen Fluent yazılımı kullanılmıştır. Özellikle hava-su karışımı gibi çok fazlı ve serbest yüzeyli akımların modellenmesindeki başarısı bu programı çözüm yöntemi olarak seçilmesinin temel nedenidir. Üç boyutlu model geometrilerini hazırlamak ve bu modelleri sonlu elaman ağlarına bölmek için de Gambit programı kullanılmıştır. Fluent gibi CFD yazılımlarının en büyük dezavantajı çözüm zamanı ve yüksek bellek gereksinimidir. Özellikle üç boyutlu modellerden hassas sonuçlar alabilmek için modeli daha küçük dolayısıyla daha fazla sonlu eleman ağına bölmek gerekmekte ve bu durumda da, daha fazla işlemci gücü ve bellek kapasitesine gereksinim duyulmaktadır. Ancak günümüzdeki yüksek hızlı işlemci (Pentium IV, Xeon gibi) ve yüksek bellekli (en az 512 MB RAM) PC'lerle bile yeterli sayıda sonlu eleman hücresine sahip üç boyutlu modeller çözülebilmektedir. Fluent ile sayısal çözümlerde, her 100.000 üç boyutlu eleman için yaklaşık 100MB RAM'a ihtiyaç duyulur. Bir örnek olarak, 512MB RAM bellekli bir bilgisayarla yaklaşık 500.000 üç boyutlu elemana sahip bir model çözülebilir. Çok daha fazla elemanlı model çözümü için veya çözüm zamanını daha azaltmak için paralel işlemci teknolojisinden yararlanılabilinir. Yukarıda bahsedilen ULAKBİM'in Beowulf Sistemi buna örnek gösterilebilir.

Fluent, aşağıda sıralanan çok fazlı akım (*Multiphase Flows*) problemlerinin modellenmesine olanak sağlar.

- **Kabarcık Akımı (*Bubble Flow*)**: Sürekli sıvı faz içindeki gaz veya hava kabarcıklarının modellenmesi (Havalandırıcılar gibi)
- **Damlacık Akımı (*Droplet Flow*)**: Sürekli gaz fazı ortamındaki sıvı zerreleri veya damlacıklarının modellenmesi
- **Sediment Akımı (*Particle-laden Flow*)**: Sürekli akışkan ortamındaki katı parçacık hareketi (sedimantasyon gibi)

- **Büyük Kabacık Akımı (*Slug Flow*)**: Sürekli sıvı ortamındaki büyük kabarcıkların modellenmesi
- **Halkasal Akış (*Annular Flow*)**: Cidarlar boyunca sürekli akışkan modellenmesi
- **Serbest Yüzeyli Akım (*Free Surface Flow*)**: Net bir şekilde belirlenmiş ara yüzeyle birbirine karışmayan akışkanlarının ayrılması.

Fluent'te çok fazlı akımlar genelde, birincil faz sürekli ortam akışkanı, diğeri ise bu akışkan içine dağılmış olan ikincil faz olarak tanımlanır. Atmosfere açık serbest yüzeyli akımlar için bu durum, sürekli ortam akışkanı hava, ikincil faz ise su olarak alınabilir. Bu tezde kullanılan ASM Model için ise tersi durum önerilmiştir. Çok fazlı akımlarda sonlu eleman ağlarıyla bölünmüş her bir hücre iki akışkanın belirli hacim oranlarıyla işgal edilir. '*k*' akışkanının hacim oranı için üç durum söz konusudur.

- ε_k=0 ise *k* akışkanın hücresi boş,
- ε_k=1 ise *k* akışkanı hücreyi tamamen doldurmuş,
- $0<\varepsilon_k<1$ ise hücre iki akışkanın ara yüzeyini içerir.

Fluent 5'de çok fazlı akışkan modelleri için 4 farklı model önermiştir:

- Dağınık Faz Modeli (*Dispersed Phase Model - DPM*)
- Akışkan Hacmi Modeli (*Volume of Fluid Model - VOF*)
- Cebirsel Kayma Karışım Modeli (*Algebraic Slip Mixture Model -ASMM*)
- Kavitasyon Modeli (*Cavitation Model*)

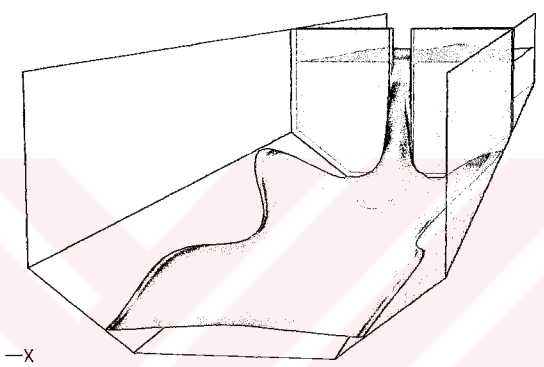
4.3.1. Dağınık Faz Modeli (*Dispersed Phase Model-DPM*)

Sürekli ortam akışkanından katı parçacıkları, sıvı damlaları veya gaz kabarcıklarının ayrılması gerekiyorsa bu model kullanılabilir. Hücrelerin %10'undan daha küçük hacim oranlarının belirlenebilmesi için uygundur. DPM, çözüm yaparken aşağıdaki hesapları gerçekleştirir:

- Sürekli akışkan içerisindeki ikincil faz akışkan parçacıklarının yörüngesi hesaplanır (kabarcıkların yörüngesi gibi)
- Sürekli ve ayrılmış akışkan fazları arasında ısı, kütle ve moment transferi hesaplarını gerçekleştirir.
- Parçacık-parçacık etkileşimini ihmal eder.
- Zamanla değişen veya değişmeyen akımların parçacık izlerini hesaplar.

4.3.2. Akışkan Hacmi (*Volume of Fluid -VOF*) Modeli

Karışmayan akışkanların net bir ara yüzey ile ayrılması bekleniyorsa bu model kullanımı uygun olmaktadır. Özellikle serbest yüzeyli akımlarda, serbest yüzeyin şeklinin önemli olduğu problemler için uygundur (Şekil 4.2). Kontrol hacimleriyle karşılaştırıldığında küçük kabarcıklar içeren akımlar için uygun değildir. Bu nedenle dolusavak havalandırıcıları gibi hava-su karışımının önemli olduğu problemler için de uygun olmayacaktır. Havalandırıcı problemlerinde akım içine karışan çok küçük hava kabarcıkları söz konusudur ve VOF modelde bu gibi küçük kabarcık tanımlaması ve hava-su karışım olayının modellenmesi mümkün olmamaktadır.



Şekil 4.2 VOF model kullanılarak Fluent ile hazırlanmış serbest yüzeyli akım modeline bir örnek

VOF modelde sıvı ve gaz fazı arasındaki ara yüzeyin belirlenmesi her k fazı için bir hacim oranı süreklilik denkleminin çözümü ile gerçekleşir:

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_i} = S_{\varepsilon_k} \tag{4.1}$$

Denklemin sağ tarafındaki kaynak terimi VOF model için sıfıra eşittir. Bu terim, kavitasyon model için sıfırdan farklıdır. Hacim oranı denklemi birincil faz için çözülmeyecektir. Birincil fazın hacim oranı (4.2)'deki sınırlamaya dayalı olarak hesaplanır.

$$\sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k = 1 \tag{4.2}$$

Denklem (4.1) ve (4.2)'deki; ε_k: k. fazın hacim oranı, u_i: Hız vektörleri, x_i: Yön vektörleri, $S_{\varepsilon k}$: Kaynak terimi, n: Akışkan sayısını ifade etmektedir. Seçilen sonlu elemanın boyutlarından daha küçük hassaslıkta arayüzey belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla daha net bir

arayüzey için daha hassas sonlu eleman ağı gerekecektir. VOF modelin çözüm özellikleri şunlardır:

- Her akışkan için momentum denkleminin bir seti çözülür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_i}\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})+\rho g_j+F_j \tag{4.3}$$

  Burada; ρ: Akışkanın yoğunluğu, μ: Akışkanın viskozitesi, u: Akışkanın hızı, g: Yerçekim ivmesi, F_j: Ek terimdir.
- Momentum denklemine eklenen bir terimle yüzey gerilimleri ve cidar adezyonu modellenebilir.
- Türbülanslı akımlar için türbülans transfer denklemlerinin tekil seti çözülür.
- Birincil faz için korunum denklemleri çözülür.

Fluent'teki yüzey gerilim kuvvetleri Brackbill ve diğ. [49] tarafından önerilen sürekli yüzey kuvveti (*Continuum Surface Force-CSF*) yöntemiyle modellenir. Buna göre, arayüzeyin her iki tarafında kalan akışkanların basınç farkı yüzey gerilim katsayısına bağlıdır. Yüzey eğriliği iki yarıçaplı (R_1 ve R_2) olarak tanımlanırsa, bu basınç farkı aşağıdaki (4.4) denklemiyle ifade edilir:

$$P_1-P_2=\sigma_s\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right) \tag{4.4}$$

Burada; P_1 ve P_2: Arayüzeyin her iki tarafında kalan akışkanlardaki basınçlar, σ_s: Yüzey gerilmesidir. CSF modeline göre VOF hesaplarında momentum denklemine eklenen ek terim, yüzeydeki kuvvetin bir hacim kuvveti olarak aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$F_{vol}(x)=2\sigma_s\kappa(x)\varepsilon_2\nabla\varepsilon_2 \tag{4.5}$$

Bu ek terim arayüzeyin yalnızca bir tarafına eklenir. Fluent VOF modelde bu ikincil fazdır. Burada; ε_2: İkincil fazın hacim oranı, κ: Yüzey eğriliğidir. Yüzey eğriliği, $\hat{n}$ vektörün diverjansı bakımından aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\kappa=\nabla.\hat{n}=\frac{1}{|n_s|}\left[\left(\frac{n_s}{|n_s|}.\nabla\right)|n_s|-(\nabla.n_s)\right] \tag{4.6}$$

Burada, n_s: İkincil fazın hacim oranı gradiyentiyle tanımlanan yüzey normalidir ($n_s=\nabla\varepsilon_2$). $\hat{n}=n_s/|n_s|$ olarak ifade edilir. Yine Brackbill ve diğ. [49] tarafından önerilen yöntemden alınarak VOF modelde kullanılan cidar adezyon açısı ile alakalı ifade aşağıdaki gibidir:

$$\hat{n} = \hat{n}_\omega \cos\theta_\omega + \hat{t}_\omega \sin\theta_\omega \tag{4.7}$$

Burada; $\hat{n}$: Yüzeye normal birim vektör, $\hat{n}_\omega$ ve $\hat{t}_\omega$: Sırasıyla, katı cidara normal ve teğetsel birim vektörler, θ_ω: Katı cidarla yüzey teğeti arasındaki ikincil faz içinde ölçülen temas açısıdır. ∇ operatörü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \quad \text{ve} \quad div(n) = \nabla . n$$

4.3.3. Cebirsel Kayma Karışım Modeli (*Algebraic Slip Mixture Model - ASMM*)

VOF modelden farklı olarak ASMM model akışkan fazlarının birbirine karışmasına izin verir. Sıvı içindeki çok daha küçük gaz kabarcıklarının modellenmesine olanak sağlar. Kontrol hacimlerinde 0~1 arasında hacim oranları elde edebilir. Bu nedenle dolusavak havalandırıcılarındaki akım modellemesinin ASMM ile yapılması daha uygun olacaktır. Bununla birlikte akışkan fazları arasında VOF model gibi net bir arayüzey elde edilemez. Bu tezdeki CFD analizleri ASMM yöntemi kullanılarak yapılmıştır. ASMM'nin çözüm özellikleri şunlardır:

- Karışımın süreklilik ve momentum denklemlerini çözer.
- İkincil fazın hacim oranının taşınımını çözer.
- Fazlar arasındaki kayma hızını hesaplamak için cebirsel bir bağıntı kullanır. Böylece iki faz akışkanın farklı hızlarda hareket etmesine olanak tanır.
- Zamanla değişen veya değişmeyen akımlar için de uygundur.
- Yalnızca iki fazlı akımlar modellenebilir.
- Akım sıkıştırılamaz olmalıdır.
- Tüm kontrol hacimleri tek bir akışkan fazıyla veya iki fazın birleşimiyle doldurulmalı boş hacim bırakılmamalıdır.

Karışımın süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_{m,i}) = 0 \tag{4.8}$$

Karışımın momentum denklemi iki ayrı faz için momentum denkleminin toplamıyla elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho u_{m,j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho_m u_{m,i} u_{m,j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\mu_m\left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i}\right) + \rho_m g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i}\sum_{k=1}^{n}\varepsilon_k \rho_k u_{Dk,i} u_{Dk,j} \tag{4.9}$$

Burada; n: Faz sayısı, ρ_m: Karışımın yoğunluğunu, u_m: Karışımın ortalama hızı, u_{Dk}: Sürükleme hızları, ε_k: k akışkanının hacim oranını, μ_m: Karışımın viskozitesi, μ_k: k akışkanının viskozitesidir. Karışımın yoğunluğu:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k \rho_k \tag{4.10}$$

Karışımın viskozitesi:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k \mu_k \tag{4.11}$$

Karışımın ortalama hızı:

$$\vec{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k \rho_k \vec{u}_k}{\rho_m} \tag{4.12}$$

Sürükleme hızı:

$$\vec{u}_{Dk} = \vec{u}_k - \vec{u}_m \tag{4.13}$$

denklemleriyle hesaplanır.

Kayma hızı olarak da adlandırılan fazlar arasındaki rölatif hız ikincil fazın birincil faza göre rölatif hızı olarak tanımlanır. Bu hız aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$\vec{u}_{rel} = \vec{u}_p - \vec{u}_q \tag{4.14}$$

$$\vec{u}_{rel} = \vec{a}_p \tau_{pq} \tag{4.15}$$

Burada; a_p: İkinci fazın ivmesi, τ_{pq}: Relaksiyon zamanıdır. Tanımlanan a ve τ_{pq} parametreleri sırasıyla (4.16) ve (4.17) denklemlerle ifade edilirler.

$$\vec{a}_p = (\vec{g} - (\vec{u}_m \cdot \nabla \vec{u}_m + \frac{\partial \vec{u}_m}{\partial t})) \tag{4.16}$$

$$\tau_{pq} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q} \tag{4.17}$$

Burada, d_p: Parçacık çapıdır. İkincil faz için yazılan süreklilik denklemi ikincil fazın hacim oranı denkleminin belirlenmesinde kullanılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_p \rho_p u_{m,i}) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_p \rho_p u_{Dp,i}) \tag{4.18}$$

Denklemlerdeki p indisi ikincil fazı, q indisi birincil fazı, m indisi karışımı, D indisi sürüklemeyi(*Drift*) ifade eder.

4.3.4. Kavitasyon Model (*Cavitation Model*)

VOF modelden iki yönüyle ayrılır. Birincisi, iki akışkan arasında arayüzey olması gerekmez, akışkanların birbirine karışması sağlanır. İkincisi, fazlar arasında dönüşüm mümkündür. Dolusavaklar gibi açık kanallar üzerinde meydana gelen kavitasyon olayında hem hava-su karışımı, hem de kavitasyondan dolayı hava-buhar karışımı söz konusudur. Dolayısıyla, burada hava-su-buhar gibi üç fazlı akım durumu mevcut olacaktır. Kavitasyon modelde ise yalnızca iki faz modellenebilir. Bu nedenle dolusavaklar üzerindeki kavitasyon olayının modellenmesi için uygun değildir. Kavitasyon modelin çözüm özellikleri şunlardır:

- Kavitasyonun başlangıcını ve kabarcıklarının yaklaşık boyutunu tahmin eder.
- Karışımın momentum denklemini hesaplar.
- Karışımın süreklilik denklemini çözer.
- Fazlar arasında kayma (*slip*) hızının olmadığı varsayılır.
- Buhar fazının hacim oranı taşınımı için çözüm yapar.
- Akım sıkıştırılamaz olmalıdır.
- Yalnızca iki faz modellenebilir.

İkincil faz için süreklilik denklemi hacim oranı denkleminin temelidir:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon_p\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\varepsilon_p u_j\right)=\frac{1}{\rho_p}\left(\dot{m}-\frac{d\rho}{dt}\right) \tag{4.19}$$

Reyleigh denklemi kullanılarak yaklaşık kavitasyon kabarcık büyümesi hesaplanır.

$$\frac{dR}{dt}=\sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_l}} \tag{4.20}$$

Toplam buhar kütlesi aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$m_v=\rho_v\frac{4}{3}\pi R^3 n_b \tag{4.21}$$

Bu denkleme dayalı olarak fazlar arası kütle transferi için aşağıdaki denklem yazılmıştır.

$$\dot{m}=\frac{3\rho_v\varepsilon_v}{R}\sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_l}} \tag{4.22}$$

Bu denklemlerdeki; m_v: İkinci fazın kütlesi (Buhar kütlesi), P_v: Buhar basıncı, P: Referans basınç, ρ_l: Sıvının yoğunluğu, ρ_v: Buharın yoğunluğu, R: Kabarcık yarıçapı, n_b: Birim hacimdeki kabarcık sayısı, ε_v: Buhar fazının hacim oranı, ε_l: Sıvı fazın hacim oranı($\varepsilon_v+\varepsilon_l=1$), t: Zamandır. Kabarcık yarıçapı ise Denklem (4.23) ile hesaplanır.

$$R=\left(\frac{\varepsilon_l}{4\pi n_b/3}\right)^{1/3} \tag{4.23}$$

5. DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde; Fluent yazılımı ile yapılan sayısal çözümlerin etkinliğini test etmek için sayısal analiz sonuçları, bazı fiziksel model ve prototip verileriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirilerek kullanılan sayısal yöntemin fiziksel modellere nazaran kullanılabilirliği tartışılmıştır. Karşılaştırmalarda direkt model deneyi sonuçlarının alındığı gibi, deney sonuçlarından elde edilen bazı ampirik bağıntılar da kullanılmıştır.

Dolusavaklar gibi hidrolik uygulamalarda alışılagelmiş yöntem, model deneyi hazırlamaktır. Uzun yıllardan bu yana hidrolik alanındaki çoğu gelişme model deneyleriyle sağlanmıştır. Akışkan mekaniğinin çok karmaşık bir konu olması, teorik bağıntılarla davranışlarının tam olarak kestirilememesi, basit teorik yaklaşımlarda olayın içinde dikkate alınmayan unsurların bulunması gibi nedenlerden dolayı deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bilindiği gibi fiziksel model deneyleriyle yapılan çalışmaların bazı olumsuzlukları bulunmaktadır. Çok zaman, maliyet ve emek gerektirmesi, esnek olmaması, yapılan deneyin ilgili problemle kısıtlı kalması, ölçüm hataları gibi bazı dezavantajlar sayılabilir. Özellikle dolusavak havalandırıcıları gibi model ölçeğinin önemli olduğu problemlerde ise "*Ölçek Etkisi (Scale Effect)*" gibi ciddi bir sorunla karşılaşılır. Özellikle önemli ölçek etkileri altındaki model deneylerinin yanında, günümüz bilgisayar teknolojisine uyarlanmış sayısal yöntemlerin (CFD analizleri) ne kadar etkili olduğu, CFD modellerinin fiziksel model deneylerine alternatif olup olamayacağı bu bölümde tartışılmıştır.

5.1. Model Deneyleri ve Ölçek Etkileri

Model deneylerinin havalandırıcı tasarımında kullanılması kabul görmüş olmasına rağmen, fiziksel hidrolik modellerle yapılan çoğu deneylerde önemli ölçek etkileri beklenir. Dolusavak şut kanalları üzerindeki gibi yüksek hızlı akımlarda yerçekimi, atalet ve basınç kuvvetleri hâkimdir ve bunların yanında viskoz ve yüzey gerilimi etkileri ihmal edilir. Bu nedenle dolusavak gibi yapıların modellenmesinde *Froude ve Euler Benzeşimleri* kullanılmaktadır. Ancak özellikle hava girişi olayında model ölçeği küçüldükçe viskoz ve yüzey gerilim etkileri kendini göstermeye başlar. Aynı anda Froude ve Euler benzeşimleri yanında Reynolds ve Weber benzeşimlerinin sağlanması mümkün olmadığından ölçek etkilerinden kaçınmak mümkün olmaz. Bu nedenle ölçek etkilerine ayrıca özen gösterilmesi gerekir.

Laminer alt tabakalar ve yüzey gerilim etkileri türbülans hareketlerini kısıtlar, su taneciklerinin formasyonu ve su jetinin dağılımını yavaşlatır. Bu olay modeldeki hava giriş

mekanizmasının etkilerinin azalmasına yol açar. Bir Froude modelindeki düşük Reynolds sayısı yüzünden modeldeki laminer alt tabaka prototiptekine oranla daha kalın olacaktır. Bunlar hava giriş olayında ölçek etkilerinin temel nedenleri olarak görülür. Bunu önlemek için tamamen pürüzlü bir akım oluşturmak gerekir. Viskoz etkileri minimize etmek için modelin prototipten daha pürüzlü yapılması gerekir. Bunun için de en azından modeldeki havalandırıcı bölgesinin yapay olarak pürüzlendirilmesi gerektiği önerilmiştir. Şut kanallarının beton yüzeyleri için pürüzlülük sayısı ks=0.5-1.0 mm arasındadır [2, 39].

Froude modellerinde su yüzey dağılımının bezerliğinin sağlanması ve yüzey gerilim etkisinin ihmal edilebilmesi için Weber sayısının belirli bir değerden büyük olması gerekir. Yeterli havalandırma olayına engel olan yüzey geriliminin etkili olduğu küçük ölçekli modeller kısmen de olsa havalandırıcı performansının tespitinde yardımcı olabileceği ve özellikle bu tür modellerin jet uzunluğunun tespiti için uygun olabileceği belirtilmiştir [2]. Reynolds ve Weber sayılarının bazı limit değerlerden büyük olması ve türbülans etkisinin ihmal edilmesi halinde, rölatif hava debisinin aşağıdaki değişkenlerin bir fonksiyonu olarak alınabileceği ancak bunun küçük ölçekli modellerde uygulanamayacağı ifade edilmiştir [16].

$$\beta = f\left(Fr, E, \alpha, \theta, t_r/h, t_s/h\right) \tag{5.1}$$

Burada; β: Hava giriş oranı, Fr: Froude sayısı, E: Euler sayısı, α: Şut kanalı eğim açısı, θ: Havalandırıcı rampasının eğim açısı, t_r: Rampa yüksekliği, t_s: Eşik yüksekliği, h: Yaklaşan akım derinliğidir.

Kökpınar ve Göğüş [22] deneylerinde, alt nap havalandırması ve havalandırıcı boşluk altbasınç sayısı için ölçek etkileri dikkate almışlardır. Alt nap havalandırması için Emborcacao, Foz do Areia ve Keban barajı dolusavak havalandırıcılarının prototip dataları, alt basınç sayıları için ise Guri Barajı prototip havalandırıcı dataları karşılaştırılmıştır. Kökpınar ve Göğüş [22] havalandırıcı tasarımında fiziksel model çalışmalarının uygun olabileceğini fakat çok pahalı ve zaman alıcı bir işlev olduğuna dikkat çekmişlerdir. Çalışmalarında Demiröz'ün [41] kullandığına benzer bir düzenek kullanmışlardır. Kökpınar ve Göğüş [22] Deneylerde, Froude sayısının 3.40~12.36 arasındaki değerler ile çalışmışlardır.

Havalandırıcılar üzerinde yapılan model deneylerinde karşılaşılan sorunlardan biri de gerekli olan yüksek hızlı ve yüksek debili jet akımının elde edilmesidir. Büyük ölçekli modeller için çoğu labaratuar ortamında bunu gerçekleştirecek alt yapı yoktur veya oldukça zordur. Yüksek hızlı akım elde etmek için ya yaklaşım kanalı yeterince uzun inşa edilmeli [9]; ya da modele yüksek hızlı akım sağlayacak *jet kutusu* (*Jet box*) denilen aygıtlardan faydalanılmalıdır.

5.1.1. Model Ölçeği

Pinto ve Neidert [50], ölçekleri 1:8'den 1:50 ye değişen ölçeklerde bir dizi model üzerinde deneyler yürütmüştür. Bu deneylerde, 1:15'ten daha büyük ölçekli modeller, tüm debiler için prototipinkine yakın değerler verirken; 1:30 – 1:50 ölçekli modeller, yalnızca büyük debiler için prototipe uygun değerler vermiştir. Chanson [15] ölçek etkilerinden kaçınmak için model çalışmasında 1:15 ölçeğini kullanmıştır. Tan [11] ise ölçek etkilerinden kaçınmak için model deneylerinde 1:8 gibi büyük bir ölçek seçmiştir. Tan [11], α=14.5, 5<Fr<17.39, 4,6 cm < h < 25 cm, $E > 0.117*10^3$ sınırlarını kullanarak, deney datalarını Foz do Areia prototip verileriyle karşılaştırmıştır. Burada; h: yaklaşan akım derinliği, E: Euler sayısıdır. Froude sayısının 6~13 aralığında prototip verileriyle deney sonuçları iyi bir uyum vermiştir. Fakat, bu aralıktan daha büyük ve küçük Froude sayıları için prototip hava girişi modele göre çok daha fazla olmuştur. Prototip karşılaştırmasında özellikle $\beta_{prototip}$>0.2 için iyi bir uyum elde edilmiştir [11].

Volkart ve Rutschmann [9] model ve prototip sonuçlarını karşılaştırmış ve bu karşılaştırmada jet uzunluğu üzerinde önemli bir ölçek etkisi gözlemlememişlerdir. Bununla birlikte modelin ölçeği büyüdükçe rölatif jet uzunluğunun (λ_j) azaldığı ifade edilmiştir. Bu kişilere göre model ölçeği 1:10'dan daha büyük olmalı ve prototip şartlarına benzeştirilebilmesi için model yaklaşım kanalının yeterince uzun olması gerekmektedir [9].

Foz do Areia barajı dolusavağının Pinto ve diğ. [6] tarafından çalışılan 1:50 ölçekli modelinde boşluk altbasınçlarıyla ilgili önemli ölçek etkileri belirlenirken, 1:8 ölçekli modelde ise model-prototip arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Ayrıca Euler sayısının 50'nin üzerine çıktığı zaman su jeti geometrisinin boşluk altbasınçlarından etkilenmeyeceği de belirtilmiştir.

Pinto [51, 39], Terbela tünelinin 1:12 ölçekli modelinde olduğu gibi büyük ölçekli bir modelde bile önemli ölçek etkileri tespit etmiştir. Bu modeldeki hava giriş oranının, prototip hava girişinin yalnızca %33-67 sine karşılık geldiği vurgulanmıştır.

Hava girişinin iyi bir niceliksel tahminini yapabilmek için, birçok araştırmacı tarafından büyük ölçekli modeller kullanılması gerektiği sonucuna varılmış ve uygun hava giriş mekanizmasının yalnızca 1:10'dan daha büyük ölçeklerde gerçekleşebileceği belirtilmiştir [1]. Vischer ve diğ. [43], 1:4 ölçeğinden daha küçük modellerde hava girişinin prototiptekinden daha küçük olacağını belirtmişlerdir. Yüzey havalandırması için ölçek etkileri ihmal edilecekse ölçeğin 1:4'den büyük seçilmesi gerektiği ifade edilmiştir [1].

DSİ labaratuarlarında dolusavak havalandırıcıları için hazırlanan modellerin birçoğu, fiziksel imkanlar da göz önünde bulundurularak 1:25 ve 1:30 ölçeğinde inşa edilmektedir. Dolayısıyla bu modellerde ölçek etkilerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

5.1.2. Reynolds ve Weber Sayılarının Etkileri

Froude modellerinde viskoz ve yüzey gerilimi kuvvetleri ihmal edileceğinden bu iki kuvvet etkisini temsil eden Reynolds ve Weber sayılarının limitlerinin belirlenmesi, ölçek etkilerinin kontrolünde fayda sağlayacaktır.

Ölçek etkileri ile ilgili limit bir Reynolds sayısı Pan ve Shao [52] tarafından belirlenmiştir. $Re>R_L=3.5*10^6$ sağlanırsa Froude benzeşimi için ölçek etkilerinin beklenmeyeceği ifade edilmiştir. Burada, U yaklaşan su hızını, L_j jet uzunluğunu, ν saf suyun kinematik viskozitesini göstermek üzere, $R_L = UL_j\nu^{-1}$ limit Reynolds sayısını verir [52]. Tamamen türbülanslı bir akımda (büyük Reynolds sayılarında) akım türbülansı temel olarak Reynolds sayısına bağlıdır. Pinto [2], Foz do Areia Barajı 1 nolu dolusavağının 1:8 ölçeğindeki modelini incelemiş ve $Re>3.3*10^5$, $We>800$ değerleri için Reynolds ve Weber etkilerinin ihmal edilebileceği ifade etmiştir.

Yüzey gerilmesinin ihmal edilebilmesi için birçok araştırmacı tarafından Weber sayısının yeterince yüksek olması gerektiği belirtilmiştir. Pinto [2], 93-186 $m^3/s/m$ birim debiler ve 30.5-39.6 m/s hızlar için, 1:10 ve 1:15 ölçekler kullanıldığında yüzey gerilimlerinin ihmal edilebileceğini göstermiştir ($We>1000$). Ancak, birçok yapının bitirilmiş modellerinde, ihtiyaç duyulan yüksek su debileri ve maliyet nedeniyle her zaman büyük modellerin kullanılması mümkün olmamıştır [2]. Havalandırma olayının yeterli üretimine engel olan bu yüzey gerilimlerinin meydana geldiği küçük ölçekli modellerin yine de havalandırıcı performansının incelenmesi için kullanılabileceği savunulmuştur [2]. Birçok araştırmacıya göre, $Re>10^5$ ve jet uzunluğuna bağlı $We>400$ için hava ihtiyacı bu değerleri temsil eden yüzey gerilmeleri ve viskoz kuvvetlerden etkilenmeyecektir [4]. Pinto ve Neidert [50] tarafından ölçek etkileri üzerinde yüzey gerilimi etkisini tanımlanmış ve havalandırıcı jet uzunluğuna (L_j) bağlı Weber sayısı dikkate alındığında $We>500$ için ölçek etkilerinin ihmal edilebileceği sonucuna varılmıştır.

5.1.3. Ölçek Etkisi Faktörü

Yukarıdaki nedenlerden dolayı çoğu zaman modellerde ölçek etkilerine izin verilmek zorunda kalınır. Bu etkileri gidermek için bazı bağıntı ve katsayılar verilmiştir. Volkart ve Chervet [37] tarafından San Raque havalandırıcısının 1:25 ölçekli bir Froude benzeşimi kullanarak ölçek etkilerini incelenmiş ve 1:25 ölçekli modelde, model hava giriş oranının (β) prototip değerine karşılık gelebilmesi için 1.5 katsayısıyla çarpılması gerektiği önerilmiştir. Harshbarger ve diğ.(1977) kapaklı bir tünel çıkışındaki serbest yüzeyli akımın 1:20 ölçekli

modelinde önemli ölçek etkilerinin görünmediğini belirtmelerine rağmen Sakuja ve diğ.(1984) bu modele çok yakın bir çalışmada 1.225 ölçek etkisi faktörünü tespit etmişlerdir [1].

Froude benzeşimi kullanılarak hazırlanmış havalandırıcı modellerin serbest yüzey hava girişi üzerindeki ölçek etkilerinin giderilmesi için Denklem (5.2) önerilmiştir [1].

$$\log_{10} SEF = 0.0048(\lambda - 1) \tag{5.2}$$

Burada; *SEF*: Ölçek etkisi faktörü, λ: Model ölçeğidir. Buna göre prototip hava giriş oranı $\beta_p = SEF * \beta_m$ bağıntısı ile elde edilebilir (*p* prototipi, *m* modeli temsil eden indislerdir). Bruschin (1984) alt nap hava girişi için ölçek etkilerini gidermek üzere model ölçeğine bağlı Denklem (5.3)'i önermiştir [22].

$$\beta_p = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{0.5} \beta_m \tag{5.3}$$

Burada; β_p: Prototip alt nap hava giriş oranı, β_m: Modelin alt nap hava giriş oranı, λ: Modelin ölçeğidir. Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından alt nap hava ihtiyacının ölçek etkilerini tanımlamak için aşağıdaki bağıntı sunulmuştur.

$$(\beta_c)_p = \xi \beta_m^{\varepsilon} \tag{5.4}$$

Burada; $(\beta_p)_c$: Prototip hesap değeri, β_m : Model değeri, ξ ve ε: Geometriye bağlı katsayılardır. Simetrik havalandırıcılı dolusavaklar için ξ=5.194, ε=1.150, Asimetrik havalandırmalı dolusavaklar için ise ξ=4.186 *ve* ε=1.388 değerleri verilmiştir [22].

Ilısu Barajı dolusavak boşaltım kanalının DSİ TAKK labaratuarlarında hazırlanan 1:30 ölçekli modelinde rölatif hava girişi için ölçek etkisi faktörü 1.4 olarak alınmıştır. Bu değer Escher ve Siegenthaler (1982) tarafından hava girişi ölçek etkileri için belirlemiş olan Denklem (5.5)'deki katsayı aralığından alınmıştır [53].

$$(q_a)_p = (1.11 \sim 1.43)(q_a)_m \tag{5.5}$$

Buradaki q_a birim hava debisini, *p* prototip, *m* modeli ifade eder.

5.2. Sayısal Analiz - Fiziksel Model Karşılaştırması

Sayısal analiz sonuçlarının doğruluğunu test etmek için, Demiröz [54] tarafından yürütülen fiziksel model deney dataları kullanılmıştır. Bu deneysel çalışma, dolusavak havalandırıcılarına ait proje kriterlerinin belirlenmesi amacıyla, DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi (TAKK) tarafından yaptırılmıştır [54].

5.2.1. Fiziksel Model

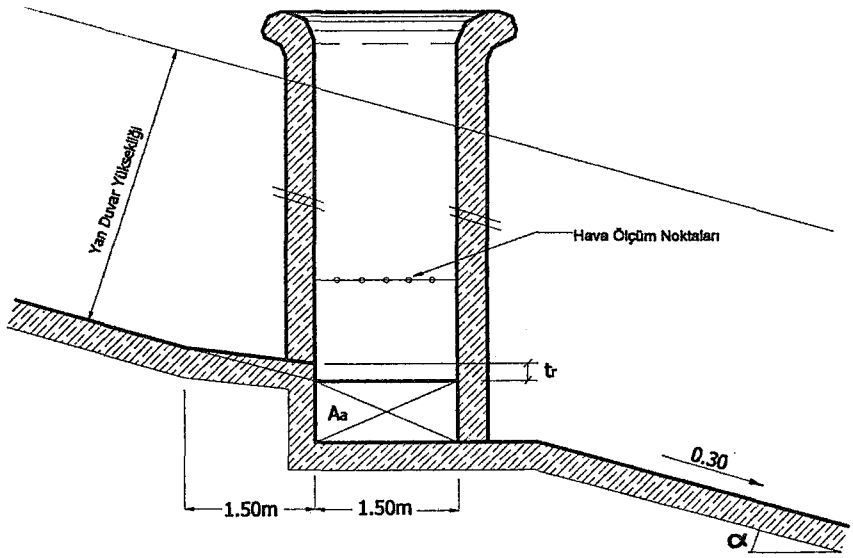
Demiröz [54] tarafından yürütülen deneyde, tabanı labaratuar zemininden 2.40 m yükseklikte, genişliği 1.65 m ve uzunluğu 8.0 m olan betonarme bir dikdörtgen yaklaşım kanalı ve eğimli bir beton döşeme üzerine dolusavak boşaltım kanalı inşa edilmiştir. Deney düzeneğine ölçülü su verebilmek için dikdörtgen kanal girişine genişliği 1.5 m olan keskin kenarlı dikdörtgen bir savak yerleştirilmiştir. Bu savak sabit yük altında istenilen debiyi verebilen yüksek bir depoya bağlanmıştır. Froude Benzeşimine göre inşa edilen modelin ölçeği 1:25'dir. Modelde, prototip boşaltım kanalının 5.0 m'lik genişliği temsil edilmiştir. Akımı gözleyebilmek için boşaltım kanalının her iki tarafı plexiglass'dan imal edilmiştir. Deneyde kullanılan ölçüm cihazları şunlardır:

- Su seviyesi ölçümleri için nokta uçlu seviye ölçüm aletleri kullanılmıştır.
- Su basınç ölçümleri için piyezometreler kullanılmıştır.
- Hava basınç ölçümleri eğimi ayarlanabilen mikromanometre ile gerçekleştirilmiştir.
- Debi ölçümleri keskin kenarlı dikdörtgen savaklarla yapılmıştır.
- Su hızı ölçümlerinde pitot tüpleri kullanılmıştır.
- Hava hızı ölçümleri sıcak telli bir uca sahip termo-anemometre ile yapılmıştır.

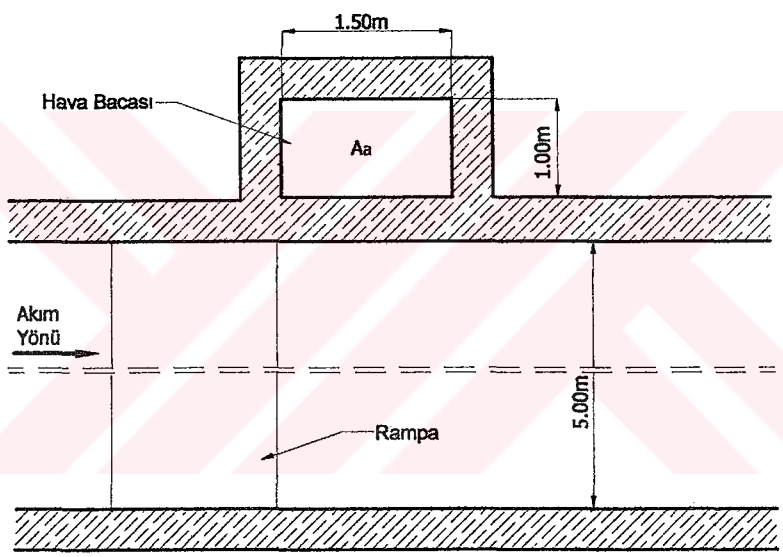
Deneysel çalışmalar boyut analizinden belirlenen bazı fonksiyonel bağıntıların ampirik olarak belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür. Boyut analiziyle belirlenmiş olay üzerindeki etkin boyutsuz parametreler (5.6) denklemiyle verilmiştir.

$$f\left(\beta, \frac{A_a}{A_w}, \frac{t_r}{h}, Fr^2, \tan\alpha\right) = 0 \qquad (5.6)$$

Burada; β: Hava giriş oranı, A_a: Hava girişi enkesit alanı (m^2), A_w: Havalandırıcıdan önceki şut akımının enkesit alanı (m^2), t_r: Rampa yüksekliği (m), h: Yaklaşan akım derinliği (m), α: Şut kanalı eğim açısıdır. Demiröz [54] tarafından yürütülen deneylerde, uygulamada ençok karşılaşılan bazı şut kanalı eğimleri dikkate alınmıştır ($tan\alpha$=0.30, 0.60, 1.25, 1.70). Havalandırma bacası alanı (A_a) ile saptırıcı yüksekliği (t_r) değiştirilerek farklı hidrolik büyüklükler için, akıma karışan hava miktarı, su jeti alt nap uzunluğu ve su jeti altındaki atmosfer altı basınçlar ölçülmüştür. Jet uzunlukları saydam olarak imal edilen boşaltım kanalı yan duvarlarındaki gözlemlere uygun ölçülmüştür. Akıma karışan hava miktarı havalandırma bacasında yapılan hava hız ölçümlerinden hesaplanmıştır. q=15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 100 $m^3/s/m$ lik birim debilerle çalışılmış ve bu debilere göre ortalama akım hızları ve derinlikleri tespit edilmiştir. Modelin, temsil ettiği prototip boyutlarına göre görünüşleri Şekil 5.1'de verilmiştir.



a) Boykesit



b) Plan

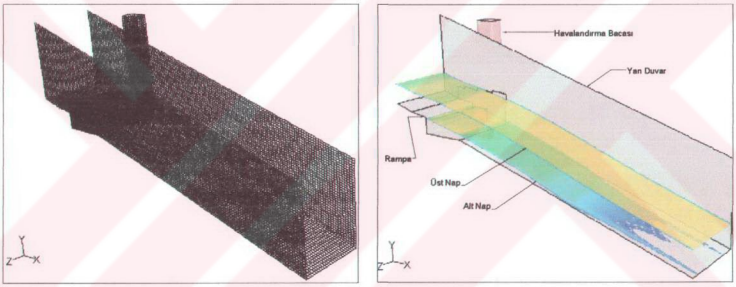
Şekil 5.1 Demiröz [54] tarafından yürütülen model deneyinin prototip boyutları

5.2.2. Sayısal Model

Sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırmak için fiziksel model geometrisine uygun sayısal modeller hazırlanmıştır. Yukarıdaki modelin, $tan\alpha$=0.30, A_a=1.5 m^2 sabit değerlerinde, t_r=0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 m değerleri için Froude sayısının 4.31 den 7.52 ye değişen değerlerindeki sonuçları dikkate alınmış ve bu değerlerdeki sayısal analiz sonuçları alınmıştır. Deney modelinin temsil ettiği prototip geometrisi Gambit programı ile hazırlanmıştır. Model geometrisi yaklaşık 180.000 üç boyutlu (3D) hexahedral hücreye bölünmüştür. Hava giriş olayını daha iyi inceleyebilmek için, hava giriş olayının cereyan ettiği baca giriş bölgesi

modelin diğer yerlerine göre iki kat daha hassas ağlara bölünmüştür. Modelin sonlu eleman ağlarına bölünmüş geometrisi Şekil 5.2(a)'da gösterilmiştir. Her saptırıcı yüksekliği için ayrı bir geometrik model hazırlanmış ve verilen Froude sayılarını sağlayacak yükseklik ve hızda su hız girişleri verilerek her bir Froude sayısı için ayrı çözüm yapılmıştır. Fluent çözümlerinde çok fazlı akım modellerinden ASM Model kullanılmıştır. Birincil faz su, ikincil faz hava alınmış ve bu elementlerin normal şartlardaki fiziksel özellikleri tanımlanmıştır. Çözüm yöntemi olarak, 3D Ayrılmış (Segregated) ve zamanla değişen (unsteady solver) çözüm; türbülans modeli olarak, k-ε türbülans model kullanılmıştır. Atmosfere açık sınırlar basınç girişi olarak tanımlanmış ve rölatif atmosfer basıncı olarak 0 Pa alınmıştır.

Sayısal analiz sonuçlarının anlaşılabilmesi için bazı şekil ve grafik çıktıları sunulmuştur. Şekil 5.2(b)'de hava-su arayüzeyi tanımlanarak serbest su yüzeyleri hız değişimleriyle birlikte gösterilmiştir. Bu Şekil'de havalandırıcı üzerindeki alt ve üst nap serbest su yüzeyleri ve jet altındaki alt basınç bölgesi açıkça görülebilmektedir.

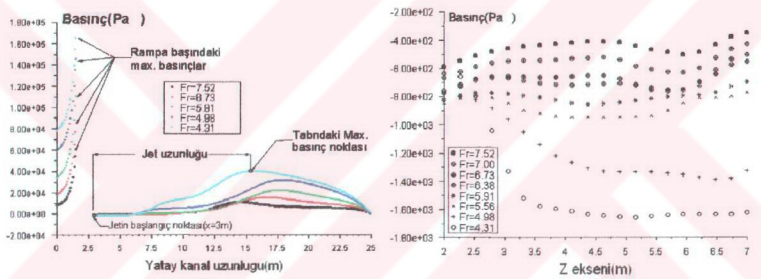


(a) (b)

Şekil 5.2 (a) Sayısal model için hazırlanan geometrik modelin sonlu elemanlar ağı,
(b) Havalandırıcı üzerindeki akımın tanα=0.30, t_r=0.25, Fr=6.38 için serbest yüzey görünüşü

Şekil 5.3(a)'da şut tabanının ortasından geçen eksenin yatay bileşeni (x ekseni) boyunca statik basınç değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Jet uzunluğunun başlangıç noktası saptırıcının hemen mansap noktası olan x=3.0 m'dir. Bu uzunluktan itibaren boşluk jet uzunluğu hesaplanmıştır. x=3.0 m den sonra şekilde görülen maksimum taban basıncı noktası jetin çarpma noktası olarak alınmıştır. x=3.0 m ile maksimum taban basıncının belirlendiği nokta arasındaki mesafenin $cos\alpha$'ya bölümüyle jet uzunlukları tespit edilmiştir. Şekil 5.3(b)'de ise jet altındaki atmosfer altı basınçlarının akıma dik "z" ekseni ile değişimi gösterilmiştir. Bu şekilde görüleceği gibi büyük Froude sayılarında eksen boyunca basınç dağılımı çok değişmezken hatta hava giriş ağzından uzaklaştıkça bir miktar artarken, düşük Froude sayılarında ise giriş ağzından

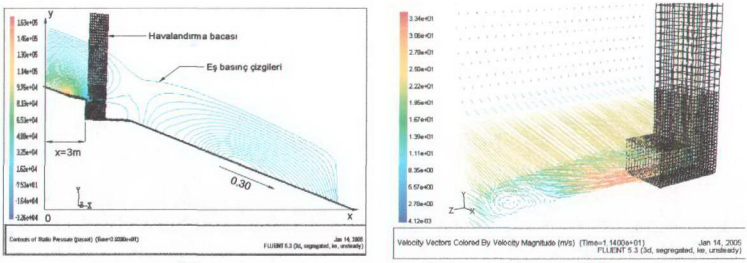
uzaklaştıkça basınçlar düşmektedir (ΔP basınç farkı artmaktadır). Yüksek Froude sayılarında giriş ağzına yakın bölgedeki giren havanın dinamik etkileri basınç değişiminde hâkimdir. Dolayısıyla hava hızının yüksek olduğu giriş ağzına yakın yerlerde Bernoulli denklemi uyarınca basınçlar düşecek, hava hızının girişten uzaklaştıkça (şut genişliğince) azalmasıyla basınçlar artacaktır. Bu durum kanal genişliği boyunca hava ihtiyacının karşılandığı ve üniform bir hava karışımının sağlandığına işarettir. Bu durumun aksine, düşük Froude sayılarında ise alt basınç bölgesinde kanal genişliği boyunca nap altındaki basınçlar giriş ağzından uzaklaştıkça düşecektir. Yani büyük Froude sayılarındaki z yönlü değişimin aksi durum oluşacaktır. Bu durumda ise kanal genişliği boyunca alt basınç dağılımın değişiminde nap altındaki hava girişinin sürtünme kayıpları hâkimdir. Basınçların fazla düşmesi havalandırıcının performansı düşürecek ve daha ileri halleri için havalandırıcının batık hale gelmesine yol açacaktır. Batık havalandırıcı durumu ileriki bölümlerde ayrıntılı incelenecektir.



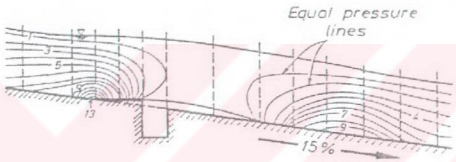
Şekil 5.3 (a) Şut kanalının tabanının ortasından geçen yatay eksen (x ekseni) boyunca statik basınç dağılımları, **(b)** Jet altındaki akıma dik eksen boyunca (z ekseni) statik basınç dağılımları. (Kanal genişliği z ekseninin [2m,7m] aralığındadır ve hava giriş ağzı z=2m noktasıdır)

Şekil 5.4(a)'da dolusavak şut kanalının boykesitindeki eş basınç eğrileri görülmektedir. Bu basınç dağılımı Şekil 5.5'de gösterilen Pinto [51]'nun bir model yan duvar üzerinde ölçtüğü statik basınçların dağılımı ile oldukça benzerdir [2, 18, 51]. Şekil 5.4(b)'de ise havalandırıcı bacası içinden geçen ve akıma dik kanalı kesen bir düzlem üzerindeki hız vektörleri gösterilmiştir.

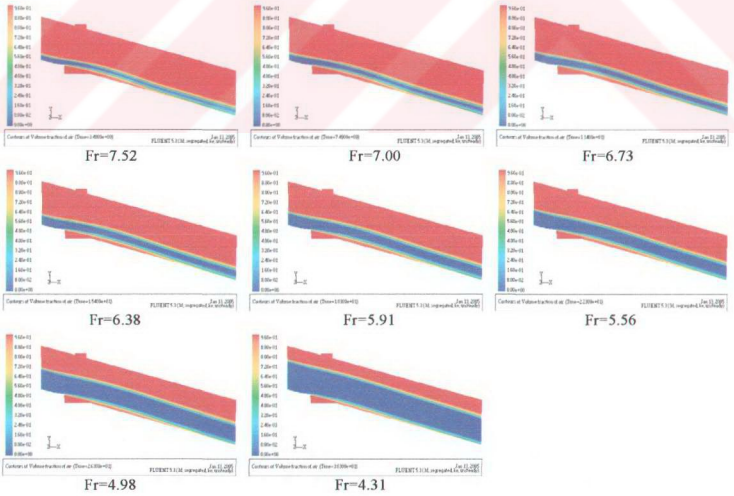
Sayısal olarak modellenen kısmi dolusavak şut kanalının farklı akım şartlarındaki faz durumları Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Şekilde $tan\alpha$=0.30, t_r=0.25m için farklı Froude sayılarındaki akım jeti görüntüleri sunulmuştur. Akım yüksekliğine ve Froude sayısına göre jet uzunlukları ve nap altındaki altbasınç bölgeleri şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 5.4 (a) Şut kanalının orta eksenindeki yüzeyde tanımlanan eş basınç çizgileri (Fr=4.31)
(b) Hava bacasının ortasından geçen akım yönüne dik tanımlanan yüzeydeki hız vektörleri



Şekil 5.5. Pinto [51] tarafından sunulan bir havalandırıcı yan duvarlarındaki basınç dağılımı



Şekil 5.6. Tanα=0.30, t_r=0.25 için farklı Froude sayılarındaki faz görüntüleri

5.2.3. Karşılaştırma

Tablo 5.1'de, fiziksel model deneyinden, Fluent CFD analizinden ve daha önceden belirlenmiş bazı ampirik bağıntılardan elde edilen rölatif boşluk jet uzunlukları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Model deneyindeki jet uzunlukları şut kanalının saydam yan duvarlarından gözlemlenerek ölçülmüştür. Sayısal analizde ise jet altındaki boşluğun mansabında ölçülen en büyük basınç noktasının saptırıcı ucuna olan mesafesi jet uzunluğu olarak alınmıştır [16, 38]. Tablo 5.1'deki Hesap sütunundaki değerler Bölüm 3.7'de anlatılan Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından elde edilmiş (3.46) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\left(\frac{L_j}{h}\right)_e = 0.28(Fr)^{1.75}(1+\theta)^{0.22}\left(\frac{t_r+t_s}{h}\right)^{0.44}\left[(1+\tan\alpha)\frac{A_a}{A_w}\right]^{-0.087} \tag{3.46}$$

Denklem ve tablolardaki; q_w :Birim su debisini, h: Su derinliğini, U_w: Saptırıcıdan önceki ortalama su hızını, Fr: Froude sayısını, θ: Saptırıcı(rampa) açısını, t_r: Saptırıcı yüksekliğini, t_s: Eşik yüksekliğini (burada eşik kullanılmadığından t_s=0), α: Şut kanalı eğimini, A_a: Hava bacası giriş alanını, A_w: Akımın enkesit alanını, L_j: Boşluk jet uzunluğunu, λ_j=L_j/h rölatif jet uzunluğunu, m, f, c ve p indisleri ise sırasıyla model, Fluent, hesap ve prototip değerlerini gösterir.

Tablo 5.1 incelendiğinde model jet uzunluğu ile Fluent jet uzunlukları arasında belirgin bir farkın olduğu görülür. Ancak hesap değerine bakıldığında bu değerler model değerlerinden Fluent sonuçlarına göre daha uzaktır. Fluent sonuçları iki değere daha yakın sonuç vermiştir. Ayrıca jet uzunlukları hesap ve Fluent değerlerinde Froude sayısıyla genelde ters orantılı iken deneysel sonuçlar aksini göstermiştir. Bu farklılıkların nedeni şunlar olabilir: Birincisi çoğu literatürdeki gibi Fluent ve hesap jet uzunlukları [22], jet altındaki boşluğun mansabındaki maksimum taban basıncına göre ölçülmüştür. Bu model deneyinde ise saydam yan duvarlardan gözleme dayalı ölçülmüştür dolayısıyla hata payı daha yüksek olabilir. İkinci olarak; boşluk alt basınçları, prototip boyutlarında modele oranla daha fazladır. Dolayısıyla prototip jet uzunluğu modele oranla atmosfer altı basınçlardan daha fazla etkilenerek kısalır. Volkart ve Rutschmann (1984)'ın bildirdiğine göre rölatif jet uzunluğu model ölçeğinin büyümesiyle azalacaktır [16]. Buna göre 1:25 gibi küçük sayılabilecek bir ölçek için L_j/h model değerleri prototipinkine kıyasla büyük olması doğal olacaktır. Üçüncü olarak; modeldeki ölçüm hataları, hesap değerindeki korelasyon katsayısı ve sayısal analizdeki hesap kabulleri sonuçları etkileyebilir.

Bu açıklamalar doğrultusunda Fluent ile elde edilen Tablo 5.1'deki değerler diğerlerine göre daha makul görünmektedir. Zaten model ve hesap değerleri birbirinden uzak çıkmasına rağmen Fluent dataları her iki değere de daha yakındır.

Tablo 5.1 tanα=0.30 için rölatif jet uzunluklarının karşılaştırılması

								Deney		Fluent		Hesap	
q_w (m^3/s.m)	h (m)	U_w (m/s)	Fr	θ	t_r (m)	t_r/h	A_e/A_w	$(L_j)_m$ (m)	$(L_j/h)_m$	$(L_j)_f$ (m)	$(L_j/h)_f$	$(L_j)_c$ (m)	$(L_j/h)_c$
15.00	0.74	20.27	7.52	13.13	0.10	0.135	0.405	**15.75**	21.28	**8.05**	10.88	**5.56**	7.51
20.00	0.94	21.27	7.00	13.13	0.10	0.106	0.319	**15.00**	15.96	**8.64**	9.19	**5.73**	6.09
25.00	1.12	22.32	6.73	13.13	0.10	0.089	0.268	**14.50**	12.95	**9.15**	8.17	**5.98**	5.34
30.00	1.31	22.90	6.39	13.13	0.10	0.076	0.229	**14.00**	10.69	**9.43**	7.20	**6.04**	4.61
40.00	1.67	23.95	5.92	13.13	0.10	0.060	0.180	**12.50**	7.49	**10.24**	6.13	**6.18**	3.70
50.00	2.02	24.75	5.56	13.13	0.10	0.050	0.149	**11.25**	5.57	**10.84**	5.37	**6.27**	3.10
70.00	2.72	25.73	4.98	13.13	0.10	0.037	0.110	**9.50**	3.49	**11.43**	4.20	**6.27**	2.31
100.00	3.80	26.31	4.31	13.13	0.10	0.026	0.079	**8.00**	2.11	**11.04**	2.91	**6.04**	1.59
15.00	0.74	20.27	7.52	11.31	0.15	0.203	0.405	**17.75**	23.99	**8.46**	11.43	**6.44**	8.71
20.00	0.94	21.27	7.00	11.31	0.15	0.160	0.319	**17.00**	18.09	**9.00**	9.57	**6.64**	7.06
25.00	1.12	22.32	6.73	11.31	0.15	0.134	0.268	**16.50**	14.73	**9.58**	8.55	**6.94**	6.20
30.00	1.31	22.90	6.39	11.31	0.15	0.115	0.229	**16.00**	12.21	**10.27**	7.84	**7.00**	5.35
40.00	1.67	23.95	5.92	11.31	0.15	0.090	0.180	**15.00**	8.98	**10.96**	6.56	**7.17**	4.29
50.00	2.02	24.75	5.56	11.31	0.15	0.074	0.149	**13.75**	6.81	**11.55**	5.72	**7.27**	3.60
70.00	2.72	25.73	4.98	11.31	0.15	0.055	0.110	**12.25**	4.50	**11.15**	4.10	**7.27**	2.67
100.00	3.80	26.31	4.31	11.31	0.15	0.039	0.079	**10.00**	2.63	**9.97**	2.62	**7.00**	1.84
15.00	0.74	20.27	7.52	9.46	0.20	0.270	0.405	**21.00**	28.38	**8.90**	12.03	**7.06**	9.54
20.00	0.94	21.27	7.00	9.46	0.20	0.213	0.319	**20.25**	21.54	**9.50**	10.11	**7.27**	7.73
25.00	1.12	22.32	6.73	9.46	0.20	0.179	0.268	**19.50**	17.41	**10.30**	9.20	**7.60**	6.79
30.00	1.31	22.90	6.39	9.46	0.20	0.153	0.229	**18.50**	14.12	**10.71**	8.18	**7.67**	5.85
40.00	1.67	23.95	5.92	9.46	0.20	0.120	0.180	**17.00**	10.18	**10.91**	6.53	**7.85**	4.70
50.00	2.02	24.75	5.56	9.46	0.20	0.099	0.149	**16.00**	7.92	**10.91**	5.40	**7.96**	3.94
70.00	2.72	25.73	4.98	9.46	0.20	0.074	0.110	**14.00**	5.15	**10.91**	4.01	**7.96**	2.93
100.00	3.80	26.31	4.31	9.46	0.20	0.053	0.079	**12.00**	3.16	**11.10**	2.92	**7.67**	2.02
15.00	0.74	20.27	7.52	7.59	0.25	0.338	0.405	**22.25**	30.07	**12.14**	16.41	**7.45**	10.07
20.00	0.94	21.27	7.00	7.59	0.25	0.266	0.319	**21.50**	22.87	**13.12**	13.96	**7.68**	8.17
25.00	1.12	22.32	6.73	7.59	0.25	0.223	0.268	**21.00**	18.75	**14.30**	12.77	**8.03**	7.17
30.00	1.31	22.90	6.39	7.59	0.25	0.191	0.229	**20.25**	15.46	**14.70**	11.22	**8.10**	6.18
40.00	1.67	23.95	5.92	7.59	0.25	0.150	0.180	**19.25**	11.53	**15.28**	9.15	**8.29**	4.96
50.00	2.02	24.75	5.56	7.59	0.25	0.124	0.149	**18.00**	8.91	**15.68**	7.76	**8.41**	4.16
70.00	2.72	25.73	4.98	7.59	0.25	0.092	0.110	**16.00**	5.88	**15.68**	5.76	**8.41**	3.09
100.00	3.80	26.31	4.31	7.59	0.25	0.066	0.079	**14.00**	3.68	**13.12**	3.45	**8.10**	2.13

Tablo 5.3'de Demiröz'ün [54] model deneyinden, sayısal analizinden ve bazı araştırmacılar tarafından önerilmiş ampirik bağıntılardan elde edilen rölatif hava giriş oranları karşılaştırılmıştır. Tablo 5.3'de beş ayrı rölatif hava debisi yer alır. Bunlar; (β_m): Model deneyi sonuçları [54], (β_f): Fluent ile sayısal analizinden elde edilen sonuçlar, β_{c1}: Bölüm 3'te bahsedilen Kökpınar ve Göğüş'ün [22] önerdiği (3.17) bağıntısından elde edilen sonuçlar, $(\beta_{c1})_p$: Denklem (3.17) sonuçlarının Denklem (5.4) ile ölçek etkilerinin giderilmiş değerleri, β_{c2}: Denklem (3.12)'den elde edilen hesap değerleridir.

$$\beta_{c1} = 0.0189\left(\frac{L_j}{h}\right)^{0.83}\left[\left(\frac{A_a}{A_w}\right)(1+\tan\alpha)\right]^{0.24} \tag{3.17}$$

Bu denklemden elde edilen sonuçların ölçek etkilerini gidermek için yine Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından önerilen Denklem (5.4) kullanılmıştır.

$$(\beta_{c1})_p = \xi\beta_m^{\varepsilon} \tag{5.4}$$

Denklem (3.12), birçok araştırmacı tarafından jet uzunluğuna bağlı olarak önerilmiştir [1].

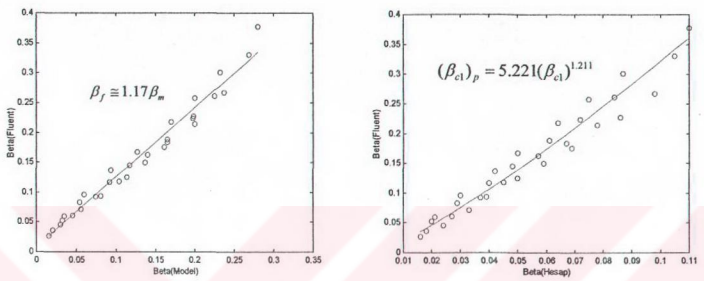
$$\beta_{c2} = q_a/q_w = K(L_j/h) \tag{3.12}$$

Tablo 5.3'deki fiziksel model ve Fluent sonuçları karşılaştırıldığında ilk bakışta büyük farklar varmış gibi görülür. Bunun sebebi fiziksel model datalarındaki ölçek etkileridir. Bu değerlenin prototipteki karşılıklarını tahmin etmek içim Bölüm 5.1.3'deki Ölçek Etkisi Faktörlerinden uygun olanı kullanılabilir. İki sonuç karşılaştırıldığında Fluent ve fiziksel modelden elde edilen birim hava debileri arasında ortalama $(q_a)_f \cong 1.30(q_a)_m$ oranı bulunmuştur. Escher ve Siegenthaler (1982) tarafından model ve prototip arasındaki bu oran 1.11~1.43 arasında verilmiş ve DSİ TAKK tarafından yapılan deneyde ise bu katsayı 1:30 ölçek için 1.40 alınmıştır [53]. Daha büyük olan 1:25 ölçekli incelediğimiz modelde ölçek etkileri 1:30 ölçekli modele göre daha az olacağından, bu katsayın da daha küçük olması beklenir. O halde model sonuçlarıyla karşılaştırıldığında bu 1.30 katsayısı, Fluent değerlerinin prototip değerlerine oldukça yakın olacağını gösterir. Şekil 5.7(a)'daki doğrusal bağıntı r=0.99 korelasyon ile $\beta_f \cong 1.17\beta_m$ elde edilmiştir.

Fluent rölatif hava debileri Denklem (3.17)'deki hesap sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Şekil 5.7(b)'de bu iki değer datalarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu iki değer arasında Denklem (5.4) deki katsayılar, r=0.98 korelasyon katsayısıyla, ξ=5.221 ve ε=1.211 olarak elde edilir. Deneysel olarak belirledikleri hava giriş oranları üzerindeki ölçek etkilerini giderip prototipe uyarlamak için Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından kullanılan bu katsayılar ise, simetrik havalandırıcılar için ξ=5.194, ε=1.150; asimetrik havalandırıcılar için ise

ξ=4.186, ε=1.188 'dir. Elde edilen katsayıların Kökpınar ve Göğüş'ün katsayılarına yakın çıkması Fluent değerlerinin Prototip değerlerine uygun olduğunu gösterir. Bu katsayılarla göre yazılan Denklem (5.7) kullanılarak, Denklem (3.17)'den elde edilen sonuçların ölçek etkileri giderilmiştir:

$$(\beta_{c1})_p = 5.221(\beta_{c1})^{1.211} \tag{5.7}$$



(a) (b)

Şekil 5.7. **(a)**Fiziksel model ve Fluent rölatif hava debilerinin karşılaştırılması.
(b) Hesap ve Fluent rölatif hava debilerinin karşılaştırılması.

Tablo 5.3'nin son sütunundaki β_{c2} değerleri, Tablo 5.1'deki Fluent ile elde edilen rölatif jet uzunluğuna olan $(L_f/h)_f$'e bağlı olarak Denklem (3.12) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (3.12)'deki K katsayısı Pinto ve Neidert [8] tarafından K=0.01~0.08, Hamilton (1984) tarafından K=0.01~0.05 [1], Uribante barajı dolusavağı için K=0.02 [1], Foz do Areia barjı dolusavağı havalandırıcısının simetrik durumu için K=0.033, asimetrik durumu için K=0.023 [6], Guri Barajı dolusavağ için K=0.01~0.035 olarak önerilmiştir [1]. Bu tezde elde edilen **K=0.023** değeri bu araştırmacıların değerleriyle uyuşmaktadır (Tablo 5.2). Bu katsayı kullanılarak Denklem (3.12)'den elde edilen β_{c2} ile β_f değerlerinin yakın sonuçlar verdiği görülür (Tablo 5.3). Bu durum Fluent sonuçlarının hesap sonuçlarıyla yeterince uyuştuğunu gösterir.

Tablo 5.2 Denklem (3.12)'nin katsayıları

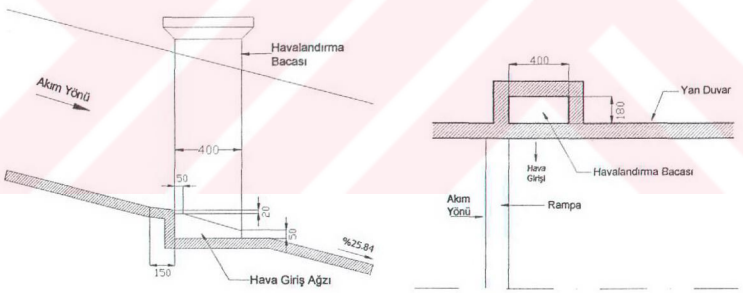
"K" değeri	**Referans**
0.01~0.08	Pinto ve Neidert(1983)
0.01~0.05	Hamilton(1984)
0.02	Coleman ve diğ.(1983)
0.023	Pinto ve diğ.(1982)
0.01~0.035	Wei ve DeFazio(1982)
0.023	**Bu Tezde (Fluent)**

Tablo 5.3. tanα=0.30 için rölatif hava giriş oranlarının karşılaştırılması

								Deney		Fluent			Hesap	
q_w (m^3/s.m)	h (m)	U_w (m/s)	Fr	θ	t_r (m)	t_r/h	A_a/A_w	$(q_a)_m$ (m^3/s.m)	β_m	$(q_a)_f$ (m^3/s.m)	β_f	β_{c1}	$(\beta_{c1})_p$	β_{c2}
15,00	0,74	20,27	7,52	13,13	0,10	0,135	0,405	2,97	**0,198**	3,42	**0,228**	0,086	0,269	0,250
20,00	0,94	21,27	7,00	13,13	0,10	0,106	0,319	3,22	**0,161**	3,52	**0,176**	0,069	0,203	0,211
25,00	1,12	22,32	6,73	13,13	0,10	0,089	0,268	3,42	**0,137**	3,75	**0,150**	0,059	0,169	0,188
30,00	1,31	22,90	6,39	13,13	0,10	0,076	0,229	3,42	**0,114**	3,78	**0,126**	0,050	0,140	0,166
40,00	1,67	23,95	5,92	13,13	0,10	0,060	0,180	3,24	**0,081**	3,76	**0,094**	0,039	0,104	0,141
50,00	2,02	24,75	5,56	13,13	0,10	0,050	0,149	2,80	**0,056**	3,56	**0,071**	0,033	0,083	0,123
70,00	2,72	25,73	4,98	13,13	0,10	0,037	0,110	2,10	**0,030**	3,23	**0,046**	0,024	0,056	0,097
100,00	3,80	26,31	4,31	13,13	0,10	0,026	0,079	1,50	**0,015**	2,67	**0,027**	0,016	0,035	0,067
15,00	0,74	20,27	7,52	11,31	0,15	0,203	0,405	3,55	**0,237**	4,02	**0,268**	0,098	0,312	0,263
20,00	0,94	21,27	7,00	11,31	0,15	0,160	0,319	4,00	**0,200**	4,30	**0,215**	0,078	0,236	0,220
25,00	1,12	22,32	6,73	11,31	0,15	0,134	0,268	4,12	**0,165**	4,60	**0,184**	0,067	0,197	0,197
30,00	1,31	22,90	6,39	11,31	0,15	0,115	0,229	4,20	**0,140**	4,88	**0,163**	0,057	0,162	0,180
40,00	1,67	23,95	5,92	11,31	0,15	0,090	0,180	4,16	**0,104**	4,70	**0,118**	0,045	0,121	0,151
50,00	2,02	24,75	5,56	11,31	0,15	0,074	0,149	3,70	**0,074**	4,64	**0,093**	0,037	0,096	0,132
70,00	2,72	25,73	4,98	11,31	0,15	0,055	0,110	3,15	**0,045**	4,29	**0,061**	0,027	0,065	0,094
100,00	3,80	26,31	4,31	11,31	0,15	0,039	0,079	2,00	**0,020**	3,56	**0,036**	0,018	0,041	0,060
15,00	0,74	20,27	7,52	9,46	0,20	0,270	0,405	4,02	**0,268**	4,96	**0,331**	0,105	0,342	0,277
20,00	0,94	21,27	7,00	9,46	0,20	0,213	0,319	4,50	**0,225**	5,21	**0,261**	0,084	0,258	0,232
25,00	1,12	22,32	6,73	9,46	0,20	0,179	0,268	4,92	**0,197**	5,59	**0,224**	0,072	0,215	0,212
30,00	1,31	22,90	6,39	9,46	0,20	0,153	0,229	4,95	**0,165**	5,68	**0,189**	0,061	0,177	0,188
40,00	1,67	23,95	5,92	9,46	0,20	0,120	0,180	4,68	**0,117**	5,83	**0,146**	0,048	0,133	0,150
50,00	2,02	24,75	5,56	9,46	0,20	0,099	0,149	4,60	**0,092**	5,86	**0,117**	0,040	0,105	0,124
70,00	2,72	25,73	4,98	9,46	0,20	0,074	0,110	3,78	**0,054**	5,78	**0,083**	0,029	0,071	0,092
100,00	3,80	26,31	4,31	9,46	0,20	0,053	0,079	3,20	**0,032**	5,33	**0,053**	0,020	0,045	0,067
15,00	0,74	20,27	7,52	7,59	0,25	0,338	0,405	4,20	**0,280**	5,67	**0,378**	0,110	0,361	0,377
20,00	0,94	21,27	7,00	7,59	0,25	0,266	0,319	4,64	**0,232**	6,04	**0,302**	0,087	0,273	0,321
25,00	1,12	22,32	6,73	7,59	0,25	0,223	0,268	5,00	**0,200**	6,46	**0,258**	0,075	0,228	0,294
30,00	1,31	22,90	6,39	7,59	0,25	0,191	0,229	5,10	**0,170**	6,54	**0,218**	0,064	0,187	0,258
40,00	1,67	23,95	5,92	7,59	0,25	0,150	0,180	5,08	**0,127**	6,72	**0,168**	0,050	0,140	0,210
50,00	2,02	24,75	5,56	7,59	0,25	0,124	0,149	4,70	**0,094**	6,84	**0,137**	0,042	0,111	0,179
70,00	2,72	25,73	4,98	7,59	0,25	0,092	0,110	4,20	**0,060**	6,70	**0,096**	0,030	0,076	0,133
100,00	3,80	26,31	4,31	7,59	0,25	0,066	0,079	3,50	**0,035**	6,02	**0,060**	0,021	0,047	0,079

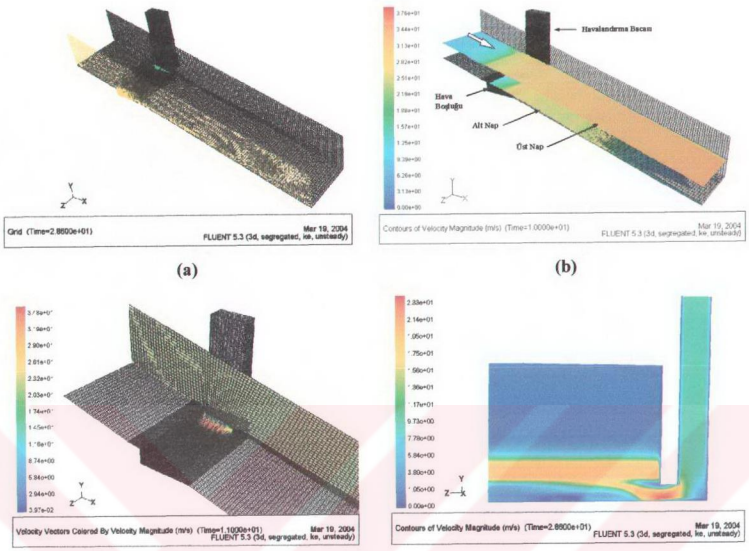
5.3. Prototip Datalarıyla Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kavitasyon önleyici havalandırıcılar üzerinde yapılan çalışmaların birçoğunda Brezilya'daki Foz do Areia barajı dolusavak havalandırıcısı model olarak kullanılmıştır. Özellikle bu dolusavak havalandırıcısının, Pinto ve diğ. [6] tarafından sunulan prototip dataları, bazı deneysel çalışmaları doğrulamak için de kullanılmıştır. Dolusavak havalandırıcıları için Brezilya'daki Foz do Areia Barajının dolusavağı örnek bir modeldir. Havalandırıcı prototip ölçümleri bakımından en kapsamlı çalışmalardan biri bu barajın dolusavakları üzerinde yapılmıştır. Bu tezde de karşılaştırma amaçlı olarak Foz do Areia barajının 1 nolu havalandırıcısının sayısal modeli çalışılmıştır. Burada dolusavak şut kanalının havalandırıcı bölgesindeki 50 m lik uzunluğu ve 20 m lik genişliği[1] dikkate alınmış ve çözüm zamanını kısaltmak için simetriği alınmıştır. Şut kanalının yatayla yaptığı açı α= 14.57° , saptırıcı açısı θ=7.10° , saptırıcı yüksekliği t_r=0.20 m, baca giriş alanı 7.2 m^2, basamak yüksekliği t_s=0 'dır. Foz do Areia Barajı 1 nolu havalandırıcısı Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Sayısal modelin simetrik durumu için elde edilen bazı görünüşler ise Şekil 5.9'da sunulmuştur.



Şekil 5.8 Foz do Areia Barajı dolusavak havalandırıcı sistemi

[1] Foz do Areia Barajı dolusavağının gerçek genişliği 70.6m'dir. Birim genişlikteki debilerle çalışıldığından ve çözüm zamanını kısaltmak için sayısal modelde 20m genişlik alınmıştır.



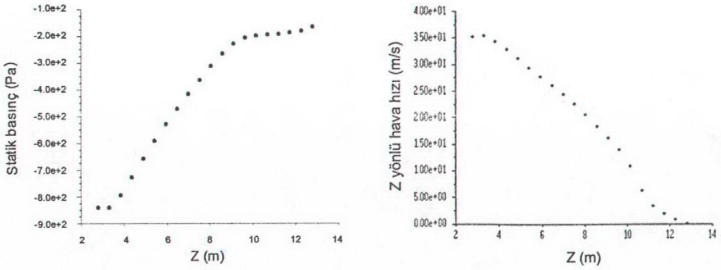
(a) **(b)**

(c) **(d)**

Şekil 5.9. Foz do Areia (B=10m) CFD sonuçlarından farklı görüntüler. **(a)** Modelin sonlu elemanlara bölünmüş geometrisi, **(b)** Havalandırıcı üzerindeki akımın serbest yüzeylerinin görünüşü (q_w=75.10m^3/s/m), **(c)** Havalandırma bacasından alt basınç bölgesine giren havanın hız vektörleri (q_w=20.82 m^3/s/m), **(d)** Havalandırıcının bulunduğu kanal enkesitindeki hız değişimleri (q_w =7.58 m^3/s/m)

Fluent çözümlerinde çok fazlı akım modellerinden ASM Model kullanılmıştır. Çözüm yöntemi olarak, üç boyutlu (3D) ayrılmış (*Segregated*) ve zamanla değişen çözüm (*unsteady solver*); türbülans modeli olarak, *k-ε* türbülans model kullanılmıştır. Sınır şartları model geometrisine uygun olarak; katı cidar, basınç girişi, hız girişi diye tanımlanmıştır.Atmosfere açık sınırlar *basınç girişi* olarak tanımlanmış ve rölatif atmosfer basıncı olarak 0 pascal alınmıştır.

Şekil 5.10 (a) ve (b)'de q_w= 20.87 m^3/s/m birim debi için sırasıyla statik basıncın ve z yönlü hava hızının nap altındaki kanal genişliği boyunca değişimi gösterilmiştir. Şekilde baca giriş ağzı grafiklerde yatay eksenin sol başlangıcındadır (z=2.8m). Kanal genişliği boyunca giren havanın hız yüksekliğinin azalmasıyla nap altındaki statik basınçlar artmaktadır (ΔP azalmaktadır). Yani kanal genişliği boyunca nap altındaki basınç dağılımı havanın dinamik etkisinin kontrolündedir. Bu durum Pinto [17], Volkart ve Rutschmann [18] tarafından sunulan basınç dağılımlarına uymaktadır.



(a) (b)

Şekil 5.10. (a) Kanal genişliği boyunca jet altındaki atmosfer altı basınçların değişimi (q_w=20.87 $m^3/s/m$) **(b)**Kanal genişliği boyunca jet altındaki havanın z ekseni yönündeki hız değişimi (q_w=20.87 $m^3/s/m$) (Şut kanalı genişliği z ekseninin [2.8m,12.8m] aralığındadır. Hava girişi z=2.8m noktasındadır.)

Bu bölümde dört ayrı β değeri karşılaştırılmıştır. Birincisi Foz do Areia Barajı dolusavağı prototip ölçümleri; ikincisi sayısal modelden elde edilen değerler; üçüncüsü model karşılaştırılmasında da kullanılan Denklem (3.17)'den elde edilen değerler; dördüncüsü ise Pinto [17] tarafından Foz do Areia, Emborcaçao, Amaluza, Colbun ve Terbela Barajlarının dolusavak havalandırıcı datalarıyla elde edilen Denklem (5.8) sonuçlarıdır [1, 17].

$$\beta = 0.29(Fr-1)^{0.62}(D/h)^{0.59} \tag{5.8}$$

$$D = \frac{\overline{c}A_a}{b} \tag{5.9}$$

Burada; β: Hava giriş oranı (veya katsayısı), $\overline{c}$: Baca geometrisine bağlı bir katsayı, A_a: Hava bacasının giriş enkesit alanı (m^2) , b: Dolusavak genişliğidir (m).

Tablo 5.4'te Denklem (3.46) ile rölatif jet uzunlukları (L_j/h) ve Denklem (3.17) ile rölatif hava giriş katsayıları (β_1) hesaplanmıştır. Denklem (5.4) kullanılarak ölçek etkileri giderilip $(\beta_1)_p$ prototip değerleri hesaplanmıştır. Denklem (5.4)'te simetrik havalandırma için verilen ξ=5.194, ε=1.150 değerleri kullanılmıştır [22].

Tablo 5.5'te Foz do Areia Barajı 1 nolu dolusavak havalandırıcısı için elde edilen dört ayrı sonuç karşılaştırılmıştır. Tablo 5.5 'teki ; q_w: Birim su debisi, h: Akım derinliği, B: Savak genişliği, U_w: Ortalama su hızı, Fr: Froude sayısı, β_p: Prototip hava giriş oranı, β_f: Sayısal analizden elde edilen hava giriş oranı (Fluent), β_1 ve $(\beta_1)_p$: Tablo 5.4'te hesaplanan değerler, β_2: Denklem (5.8)'den elde edilen sonuçlardır.

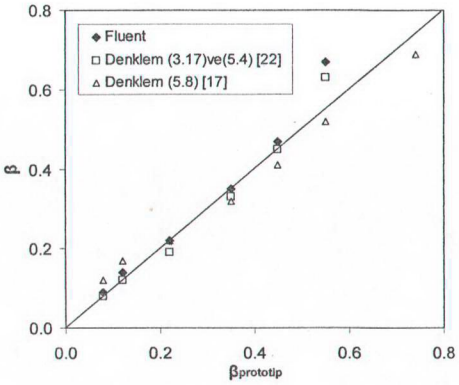
Tablo 5.4 Kökpınar ve Göğüş [22]'e göre Foz do Areia için hava giriş katsayılarının hesabı

h (m)	U (m/s)	t_r/h	Aa m^2	Aw m^2	A_a/A_w	(L_J/h)	β_1	$(\beta_1)_p$
0.38	19.94	0.53	14.4	26.83	0.54	20.65	0.21	0.87
0.59	24.01	0.34	14.4	41.65	0.35	16.61	0.16	0.63
0.81	25.71	0.25	14.4	57.19	0.25	12.76	0.11	0.45
1.08	27.41	0.19	14.4	76.25	0.19	10.07	0.09	0.33
1.64	28.50	0.12	14.4	115.78	0.12	6.37	0.06	0.19
2.41	31.20	0.08	14.4	170.15	0.08	4.59	0.04	0.12
3.29	31.90	0.06	14.4	232.27	0.06	3.28	0.03	0.08

Tablo 5.5 Foz do Areia 1 nolu havalandırıcısı için prototip karşılaştırılması

q_w ($m^3/s.m$)	h (m)	B (m)	U_w (m/s)	Fr	β_p	β_f	β_1	$(\beta_1)_p$	β_2
7.58	0.38	70.60	19.94	10.33	**0.74**	**0.90**	0.21	**0.87**	**0.69**
14.16	0.59	70.60	24.01	9.98	**0.55**	**0.67**	0.16	**0.63**	**0.52**
20.87	0.81	70.60	25.71	9.12	**0.45**	**0.47**	0.11	**0.45**	**0.41**
29.60	1.08	70.60	27.41	8.42	**0.35**	**0.35**	0.09	**0.33**	**0.32**
46.74	1.64	70.60	28.50	7.11	**0.22**	**0.22**	0.06	**0.19**	**0.22**
75.10	2.41	70.60	31.20	6.40	**0.12**	**0.14**	0.04	**0.12**	**0.17**
104.80	3.29	70.60	31.90	5.60	**0.08**	**0.09**	0.03	**0.08**	**0.12**

Şekil 5.11'de, Tablo 5.5'te verilen β değerlerinin prototip ölçümleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 5.5 ve Şekil 5.11 incelendiğinde görülecektir ki Fluent gibi bir CFD programıyla elde edilen sonuçlar prototip sonuçlarına oldukça yakındır. CFD sonuçları Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından bildirilen Denklem (3.17) ve Pinto [17] tarafından bildirilen Denklem (5.8) ile elde edilen sonuçlara göre daha tatmin edicidir. Sadece, Tablo 5.5 dikkatli incelendiğinde q_w=7.58 $m^3/s/m$ ile q_w=14.16 $m^3/s/m$ lik birim debilerdeki sayısal sonuçlar ile prototip arasında belirgin bir fark olduğu görülecektir. Bu fark seçilen sonlu eleman ağı büyüklüğünün küçük debilerdeki düşük su derinliğine oranla kaba kalmasından kaynaklanır. Doğal olarak, kanal tabanına yakın bölgeler daha hassas sonlu eleman ağına bölündüğü takdirde küçük debilerde de daha iyi sonuçlar alınabilir. Fakat daha hassas sonlu elaman ağına bölme çözüm zamanını ve hafıza gereksinimini arttıracaktır. Kökpınar ve Göğüş'ün [22] ampirik bağıntısı, ölçek etkileri dikkate alınmadığı zaman gerçek değerlerden çok uzaktır. Ancak Denklem (5.4) ile ölçek etkileri giderildiği taktirde gerçek sonuçlara yakın değerler elde edilmektedir. Ayrıca bu bağıntılar hız ve Froude değerlerinin belli sınırlar içerisinde kaldığı durumlar için geçerlidir.



Şekil 5.11. Hava giriş katsayılarının karşılaştırılması

Küçük ölçekli modellerde karşılaşılan büyük ölçek etkileri ve büyük ölçekli modellerin ise yapım zorlukları deneysel çalışmalarda dikkate alınması gereken önemli konulardır. İster büyük ister küçük ölçekli modeller olsun, ölçek etkilerinden çoğu durumda kaçınmak mümkün olmaz. Bu nedenle model deneyi çalışmalarına ek olarak ölçek etkilerinin belirlenmesi gerekir. Her deney için yapılacak ölçek etkisi çalışması için ise prototip değerlerine ihtiyaç duyulur. Prototip ölçümlerindeki azlıklar, zorluklar ve prototiplerin tek örnek olması bu durumu oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle ölçek etkileri üzerinde net ve genel kriterler belirlenememektedir.

Fiziksel model deneyleri yanında CFD modelleriyle 1:1 ölçekli çalışılabilindiğinden ölçek etkileri söz konusu olmayacaktır. Hazırlanması da model deneylerine göre fazla emek ve maliyet de gerektirmez. CFD modellerinin fiziksel model deneylerine göre verdiği sonuçlar bu bölümde anlatıldığı gibi oldukça kabul edilebilir düzeydedir. Bu çalışmanın bir amacı da bu tür CFD modellerinin hidrolik çalışmalarda uygulanabilirliğini desteklemek olmuştur.

Bu bölümde; fiziksel model, prototip ve hesap datalarıyla yapılan karşılaştırmalar, Fluent ile yapılan CFD analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunun kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Yani bu analizler dolusavak havalandırıcıları gibi hidrolik uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir.

6. İNCELENECEK HAVALANDIRICI MODELİNİN BELİRLENMESİ

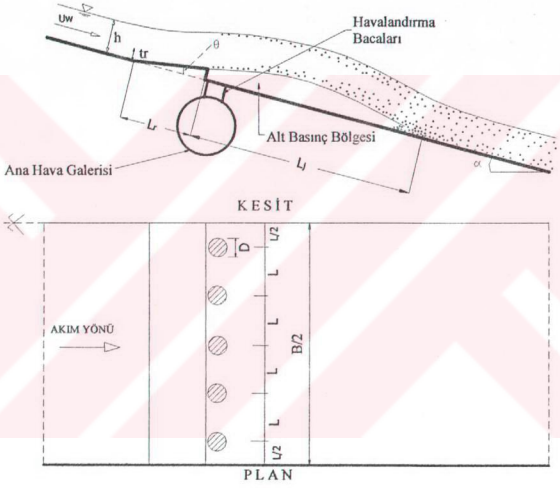
Bölüm 3.12'de, batık havalandırıcı durumu tanımlanmış ve klasik havalandırıcıların bazı durumlarda hava karışımını beklendiği gibi sağlayamayacağı ve bunun nedenleri açıklanmıştır. Bu bölümde, geniş dolusavak şut kanallarında bile üniform hava karışımı sağlayabilen ve basınç dağılımlarını dengeleyerek batık havalandırıcı durumunu engelleyebilecek farklı bir havalandırıcı tipi önerilmiştir. Bu havalandırıcı tipinin çalışma prensibi diğerlerinden çok farklı olmamakla birlikte, tabana belirli aralıklarla yerleştirilen girişler sayesinde özellikle geniş şut kanallarında kanal genişliği boyunca üniform bir hava karışımı sağlar. Havalandırıcı, klasik havalandırıcılarda olduğu gibi bir saptırıcı (rampa), bu saptırıcının hemen mansabında, şut tabanı üzerinde kanal genişliği boyunca belirli aralıklarla sıralanmış belirli çaptaki bacalar ve bu bacaları besleyebilecek kadar büyük kesitli ana besleme galerisinden oluşur. Bu galeri yan duvarlardan atmosfere açılabilir. Saptırıcı, kanal tabanı üzerindeki yüksek hızlı su jetini tabandan yükselterek bir alt basınç bölgesi oluşturur. Bunun için küçük açılı bir saptırıcı yeterli olmaktadır. Jet altındaki atmosfer altı basınçlar, tabana yerleştirilen ve ana hava galerisiyle beslenen bacalar tarafından havayı emerek akıma karıştırır.

Yandan alışlı klasik havalandırıcı tiplerinde kanal genişliği boyunca jet altında enerji kayıpları oluşur. Jet altındaki atmosfer altı basınçlar jetin alt napını savak yüzeyine doğru çeker. Bu durum kanal genişliğince nap altındaki enerji kayıplarını daha da arttırır ve havanın nap altında akıma dik hareketini kısıtlar. Havanın çoğu giriş ağızları yakınında akıma karışır ve kanal genişliği arttıkça orta bölgelere daha az hava ulaşır. Bu nedenle kenar bölgeler ortalara göre daha fazla havalandırılmış olur. Hatta şut genişliği arttıkça yeterli hava orta kısımlara ulaşamaması durumunda orta kısımlar tamamen batık hale gelebilir. Önerilen havalandırıcı da ise alttan hava girişleri sayesinde tüm kanal enkesiti boyunca üniform bir hava karışımı sağlamak ve basınç dağılımlarını dengelemek mümkün olabilir. Böylece batık hale gelme riski oldukça azaltılabilir. Şekil 6.1'deki havalandırıcı ilk olarak bu tezde önerilmiş ve "*Alttan alışlı havalandırıcı*" diye adlandırılmıştır. Şekil 6.3'de ise "*Klasik havalandırıcı*" tipi gösterilmiştir.

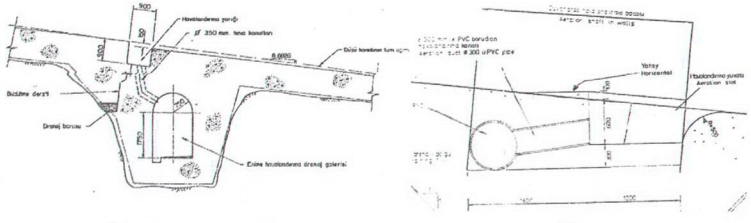
Bazı araştırmacılar *Alttan Alışlı Havalandırıcılara* kısmen benzer havalandırıcı örneklerine değinmiştir [1, 53]. Dicle nehri üzerinde planlanan Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı için benzer bir tasarım yapılmak istenmiştir [53]. İlk tasarımda asıl havalandırma yine klasik havalandırıcı prensibi ile yandan olmakta, buna ek olarak yerleştirilmiş galeri ve dağıtım borularıyla kanal genişliğince orta bölgelere daha fazla hava sağlanması düşünülmüştür (Şekil 6.2 a, b). Fakat bu tür havalandırıcıların çalışma prensipleri tam olarak bilinmediğinden ve maliyeti arttıracağından tasarım sonradan değiştirilerek klasik bir havalandırıcı tipi seçilmiştir. Ilısu için son kabul edilen klasik tasarımın model deneylerinde batık havalandırıcı

durumuyla karşılaşılmıştır [53]. Bu tezde önerilen havalandırıcı tipinde havalandırma yandan olmayıp belirli aralıklarda alttan olacaktır. Bu şekilde maliyet ve işçilik açısından basit, performans bakımından etkili bir havalandırıcı tipi hedeflenmiştir. Dolayısıyla bu tezde bahsedilen "**Alttan Alışlı Havalandırıcı**" tipi ilk olarak incelenmiş olacaktır.

Alttan alışlı havalandırıcıların diğer havalandırıcılara göre performansını belirlemek için yandan alışlı bir havalandırıcı (Klasik havalandırıcı tipi) ile alttan alışlı bir havalandırıcıların sayısal model sonuçları karşılaştırılmıştır. Düşük Froude sayılarında bile batık havalandırıcı durumunda kavitasyon riskinin olabileceği hatırlanırsa bu durumun bir şekilde bertaraf edilmesi gerekir. Batık havalandırıcılar için Alttan Alışlı Havalandırıcı tipi iyi bir çözüm olabilir.



Şekil 6.1 Alttan alışlı havalandırıcı tipi



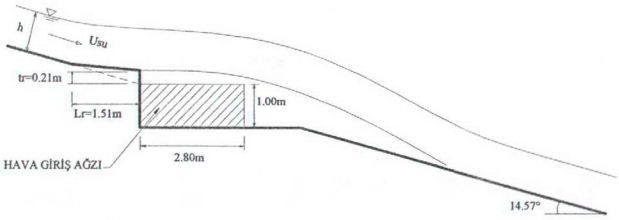
(a) (b)

Şekil 6.2 Ilısu Barajı Dolusavak havalandırıcısının değiştirilmeden önceki ilk iki tasarımı [53]

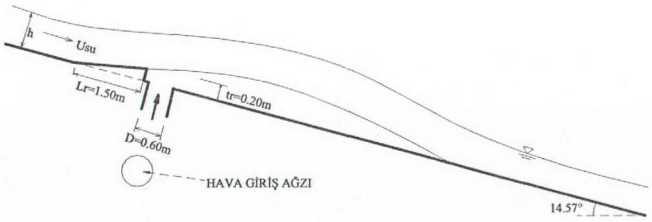
6.1. Çalışılan Modeller

Klasik bir havalandırıcı; temel olarak suyu tabandan saptırmak amacıyla bir saptırıcı, jet altında havanın gireceği bir oluk ve bu oluğu atmosfere açarak havayla besleyen yan bacalardan oluşmaktadır. Seçilen klasik havalandırıcı modeli, birçok çalışmada model olarak kullanılan Brezilya'daki Foz do Areia barajı dolusavak havalandırıcı geometrisinin benzeridir. Alttan alışlı havalandırıcı tipi ise yukarıda bahsedildiği gibi bir saptırıcı, saptırıcının hemen mansabında kanal genişliği boyunca sıralanmış bacalar ve bunları besleyen ana havalandırma galerisinden oluşmaktadır. İki tip havalandırıcıda da saptırıcı yüksekliği tr=0.20 m, saptırıcı uzunluğu Lr=1.50 m, Saptırıcı açısı θ=7.59°, kanal eğimleri α=14.57°'dir. Bu değerler Foz do Areia 1 nolu dolusavak havalandırıcısının değerleriyle aynıdır. Kanal genişlikleri boyunca hava karışımını ve basınç dağılımlarını inceleyebilmek için 50 m'lik bir kanal genişliği dikkate alınmıştır. Klasik havalandırıcı tipinde iki kenardan toplam 2x1.00x2.80=5.60 m^2 hava giriş ağzı bırakılmıştır. Alttan alışlı havalandırıcıda ise 2.50 m aralıkla 20 adet D=0.60 m çapında dairesel bacalar (borular) tabana yerleştirilmiştir. Bu havalandırıcının hava giriş alanı toplam; A_a=0.28x20=5.60 m^2 alınmıştır. Çözüm zamanı ve kolaylığı için kanalın orta ekseni simetri ekseni olarak alınıp modelin yarısı için çözümler yapılmıştır.

Karşılaştırmada birim debiler 8.0~75.0 $m^3/s/m$, su derinlikleri 0.40~2.50 m, akım hızları 20~30 m/s, Froude sayıları ise 6.05~10.10 arasındaki değerler dikkate alınmıştır. Çözümler için Fluent yazılımı kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Üç boyutlu modeller toplam 592518 ve 486358 hexahedral hücreye bölünmüştür. Daha iyi sonuç alabilmek için havalandırma olayının cereyan ettiği bölge diğer kısımlara göre daha küçük hücreli sonlu elemanlara bölünmüştür. Çözümde k-epsilon türbülans model kullanılmıştır. Taban ve yan duvarların pürüzlülüğü beton yüzey düşünülerek k_s=0.001 m alınmıştır. Fluent yazılımındaki çok fazlı akım modellerinden ASM Model kullanılmıştır. Atmosfer basıncı sıfır kabul edilerek rölatif basınçlar dikkate alınmıştır. İki ayrı modelin geometrisi Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterildiği gibidir.



Şekil 6.3 Yandan alışlı (klasik) havalandırıcı



Şekil 6.4 Alttan alışlı havalandırıcı

6.2. Alternatif Havalandırıcı Tiplerinin Değerlendirilmesi

Hava giriş kesitindeki ortalama hız, çözümlerden alınarak giren havanın debisi hesaplanmıştır. Saptırıcının hemen mansabındaki jet altı boşluk boyunca atmosfer altı basınçların ortalaması, ΔP olarak alınmıştır. Hava giriş oranı birçok araştırmacının dikkate aldığı boyutsuz β katsayısıyla ifade edilmiştir. Basınçlar ise Tan [11] tarafından belirlenen boyutsuz P_N sayısıyla temsil edilmiştir [22].

Taban eğimi α=14.57°, saptırıcı yüksekliği t_r=0.20 m, savak genişliği B=50 m, hava giriş alanı A=2.8 m^2 (simetrik) için klasik bir havalandırıcının simetrik durumdaki sonuçları Tablo 6.1 de verilmiştir.

Tablo 6.1 Klasik havalandırıcı için sonuçlar

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	β (--)	ΔP (Pa)	P_N (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	39.31	4.40	0.55	2763	0.7054
13.00	0.60	21.67	8.93	42.78	4.79	0.37	3719	0.6330
18.00	0.80	22.50	8.03	44.36	4.97	0.28	4644	0.5928
24.00	1.00	24.00	7.66	48.87	5.47	0.23	5390	0.5504
40.00	1.50	26.67	6.95	54.77	6.13	0.15	6859	0.4670
56.00	2.00	28.00	6.32	56.10	6.28	0.11	7910	0.4039
75.00	2.50	30.00	6.06	61.16	6.85	0.09	8766	0.3581

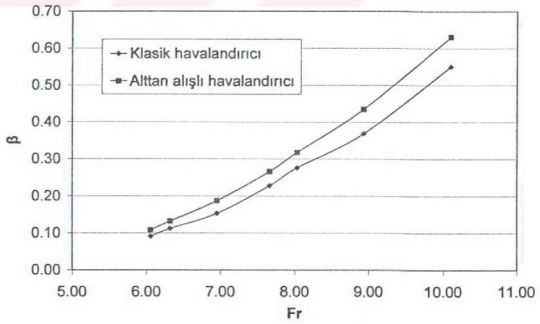
Taban eğimi α=14.57°, Saptırıcı yüksekliği t_r=0.20 m, savak genişliği B=50 m, boru çapları D=0.60 m, baca aralıkları L=2.50 m, toplam hava giriş alanı A=2.8 m^2 (simetrik) için alttan alışlı havalandırıcının simetrik durumdaki sonuçları Tablo 6.2 de verilmiştir.

Tablo 6.2 Alttan alışlı havalandırıcı için sonuçlar

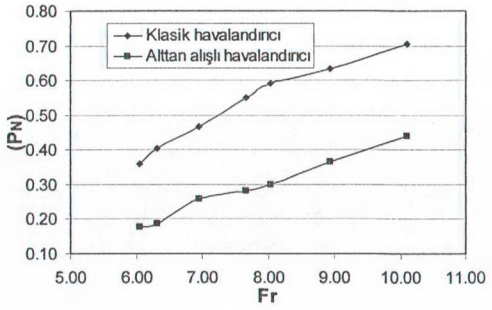
q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	β (--)	ΔP (Pa)	P_N (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	45.00	5.04	0.63	1726	0.4407
13.00	0.60	21.67	8.93	50.36	5.65	0.43	2152	0.3663
18.00	0.80	22.50	8.03	51.03	5.72	0.32	2354	0.3005
24.00	1.00	24.00	7.66	57.04	6.39	0.27	2748	0.2806
40.00	1.50	26.67	6.95	67.00	7.50	0.19	3770	0.2567
56.00	2.00	28.00	6.32	66.12	7.41	0.13	3667	0.1872
75.00	2.50	30.00	6.06	72.44	8.11	0.11	4377	0.1788

Tablolardaki, q_a: Havalandırıcı aygıttan sağlanan birim hava debisi ($m^3/s/m$), q_w: Birim su debisi ($m^3/s/m$), U_w: Ortamla su hızı (m/s), U_a: Giriş ağzından giren hava hızı (m/s), $\beta = q_a / q_w$: Boyutsuz hava giriş katsayısı, $Fr = U_w / \sqrt{gh}$: Froude sayısı, $P_N = \Delta P / \rho_w gh$: Boyutsuz basınç sayısı, ΔP: Atmosfer basıncı ile alt nap altındaki boşluk basıncı farkı (N/m^2), h: Yaklaşan akımın ortalama derinliği (m)'dir.

Tablo 6.1 ve Tablo 6.2 karşılaştırıldığında aynı hava giriş kesitine sahip iki havalandırıcıdan alttan alışlı havalandırıcının havalandırma performansının (β) daha iyi olduğu görülür. Basınç sayıları (P_N) alttan alışlı havalandırıcılarda klasik havalandırıcıyla kıyasla daha küçüktür. Bundan dolayı alttan alışlı havalandırıcılarda batık hale gelme riskinin daha az olduğu anlaşılır. İki havalandırıcının hava giriş katsayısı ve basınç sayılarının Froude sayılarına göre değişimleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Aynı hava giriş kesitine sahip bu havalandırıcıların performansları bu iki şekilde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

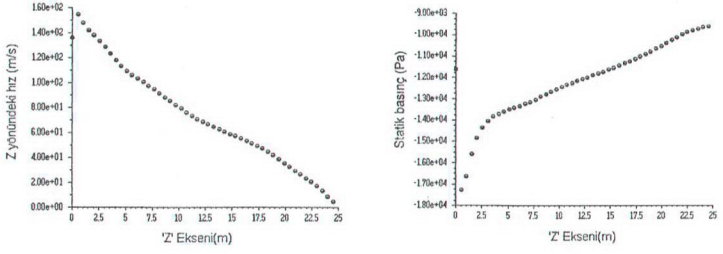


Şekil 6.5 Hava giriş katsayılarının (β) Froude sayısı ile değişimi



Şekil 6.6 P_N basınç sayılarının Fr sayısına göre değişimleri

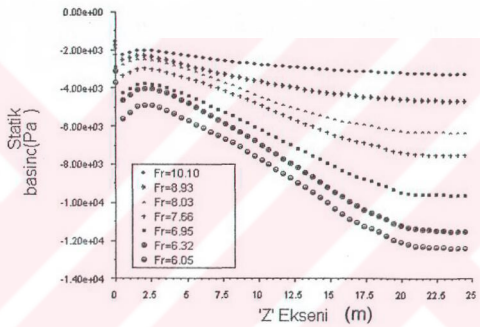
Klasik havalandırıcılar için, büyük Froude sayılarında ve hava ihtiyacı karşılandığı durumda, alt basınç farkları (ΔP) hava giriş ağızlarına yakın bölgelerde kanal genişliğinin ortalarına nazaran daha büyük olur. Foz do Areia barajı dolusavak havalandırıcısı üzerinde yapılan basınç ölçümlerinde simetrik durum için benzer dağılım elde edilmiştir [17]. Benzer alt basınç dağılımları farklı bazı araştırmacılar tarafında da sunulmuştur [1, 2, 17, vs]. Şekil 6.7(a)'da görüldüğü gibi nap altındaki Z yönlü (akıma dik eksen) hava hızları baca giriş ağzında yüksek, ortalara doğru düşmektedir. Dinamik etkiler nedeniyle ($\rho U_a^2/2$), nap altında kenarlardaki statik basınçlar ortalara göre daha düşük olacaktır. Su derinliği h=1.0 m, ortalama su hızı U_w=40 m/s alınarak Fr=12.77 gibi yüksek bir Froude sayısıyla elde edilen basınç farkının (ΔP) kanal genişliği boyunca dağılımı Şekil 6.7(b)'de görüldüğü gibidir. Bu dağılım beklenen basınç dağılımına uymaktadır. Bu şekildeki bir dağılım kanal genişliğince yeterli havalandırmanın sağlandığını gösterir.



(a) (b)

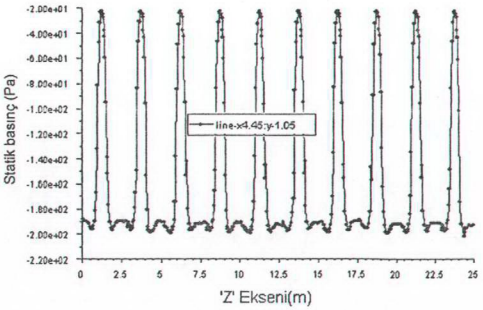
Şekil 6.7 Fr=12.77 için klasik havalandırıcıda kanal genişliği boyunca
(a) Z yönlü hava hızlarının değişimi **(b)** Jet altındaki alt basınçların değişimi

Yukarıdaki durumun aksine, Şekil 6.8'de zıt basınç dağılımları söz konusudur. Yani jet altındaki ΔP basınç farkları kenarlarda daha küçük, kanal genişliği boyunca ortalara doğru artmaktadır. Hava girişinden itibaren, şut kanalı genişliğince enerji kayıpları arttığından kanal ortalarına yeterli hava ulaşamayacak ve basınç dağılımı klasik basınç dağılımının aksi bir hal alacaktır. *Fr* sayısı azaldıkça şut kanalının ortalarına doğru basınç farkları artmaktadır. Böyle bir durum havalandırıcının batık çalışma riskinin olduğunu ve kanal enkesiti boyunca üniform olmayan bir hava karışımını gösterir. *Fr* sayısının düşük değerlerinde veya havalandırıcı giriş ağzının hava ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalması halinde bu durumla karşılaşılabilir. Şekillerdeki 'Z' ekseninin sıfır değeri hava giriş ağzının bulunduğu kenarı, 25 m değeri ise kanalın tam ortasını yani simetri ekseninin geçtiği noktayı gösterir.



Şekil 6.8 Klasik havalandırıcı için farklı Fr sayılarında kanal genişliği boyunca jet altındaki statik basınçlar.

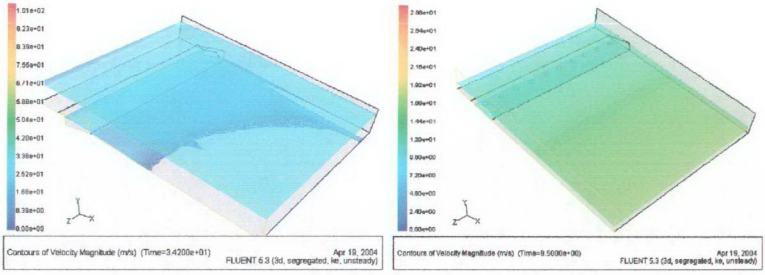
Şekil 6.9'da alttan alışlı havalandırıcının *Fr*=3.83 değeri için havalandırıcı girişlerinin hemen üstündeki statik basınç dağılımı gösterilmiştir. Hava giriş noktalarındaki basınç farkları daha az, boru aralarında ise daha fazladır. Şekil 6.9'daki basınç değişiminin kanal genişliğince fazla değişmediği ve klasik havalandırıcı şekillerine göre çok daha dar bir değer aralığında dalgalandığı görülür. Kanal genişliğince belirli aralıklarla hava girişi verildiğinden, klasik havalandırıcıda olduğu gibi basınç düşmelerinden fazla etkilenmez.



Şekil 6.9 Alttan alışlı havalandırıcı için su jeti altındaki alt basınçlar (Fr=3.83)

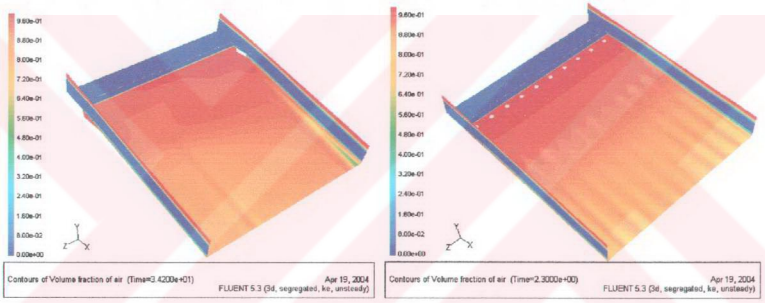
Şekil 6.10'da klasik ve alttan alışlı havalandırıcıların sayısal analizlerden elde edilen, akımın alt ve üst nap görünüşleri verilmiştir. Şekil 6.10(a)'da görüleceği gibi klasik havalandırıcıda basınçların daha fazla düştüğü kanal ortalarında, alt basınçların etkisiyle jet uzunluğu azalmıştır. Dolayısıyla orta bölgedeki hava karışımı da azalacaktır. Şekil 6.10(b)'de ise daha düşük bir *Fr* (3.83) sayısı seçilmesine rağmen kanal boyunca daha üniform bir hava girişi görülür. Şekil 6.11'da klasik ve alttan alışlı havalandırıcıların *Fr*=6.06 değeri için kanal tabanlarındaki faz oranları gösterilmiştir. Şekil 6.11(a) ve (b) karşılaştırıldığında, havalandırıcı mansabında kanal genişliğince hava karışımının alttan alışlı havalandırıcıda daha üniform olduğu, klasik havalandırıcıda ise ortalara doğru hava konsantrasyonunun azaldığı görülür. Klasik havalandırıcıdaki bu durum *Fr* sayısı azaldıkça daha belirgin olur ve sonunda havalandırıcı batık hale gelebilir. Şekil 6.11(a)'da kenar duvarın hemen bitişiğindeki daha az hava karışımının nedeni kenar duvarındaki kayma direnci ve kenar duvarda gelişen sınır tabakasıdır.

Şekil 6.12'de ise klasik ve alttan alışlı havalandırıcıların *Fr*=6.06 değeri için şut kanalı tabanı, yan duvar ve simetri ekseni üzerindeki basınç dağılımları gösterilmiştir. Şekil 6.12(a)'da jet altı bölgesinde kanal genişliğince atmosfer altı basınçlar düşerken, Şekil 6.12(b)'de atmosfer altı basınçlar daha dengelidir.



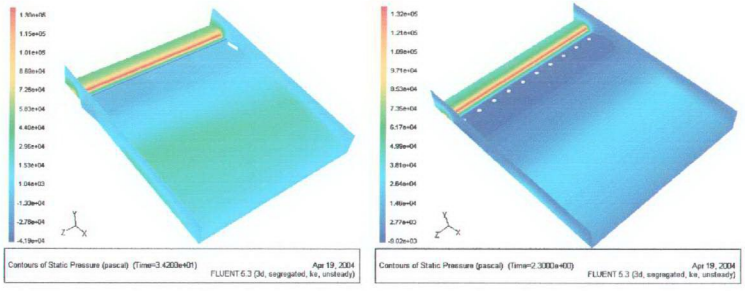
(a) (b)

Şekil 6.10 (a) Klasik havalandırıcılı için serbest yüzeyler (Fr=6.06)
(b) Alttan alışlı havalandırıcı için serbest yüzeyler (Fr=3.83)



(a) (b)

Şekil 6.11 (a) Klasik havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı (Fr=6.06)
(b) Alttan alışlı havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı (Fr=6.06)



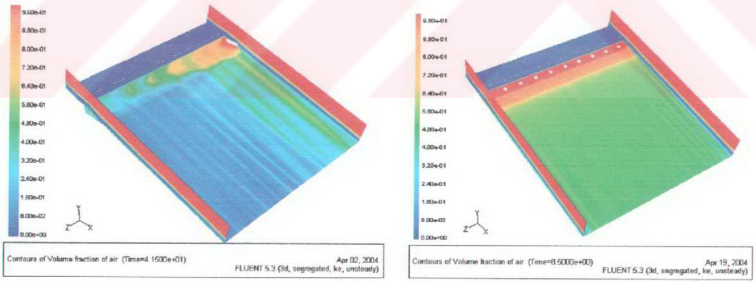
(a) (b)

Şekil 6.12 (a) Klasik havalandırıcı için taban basınçları (Fr=6.06)
(b) Alttan alışlı havalandırıcı için taban basınçları (Fr=6.06)

6.3. Düşük Froude Sayılarındaki Durum

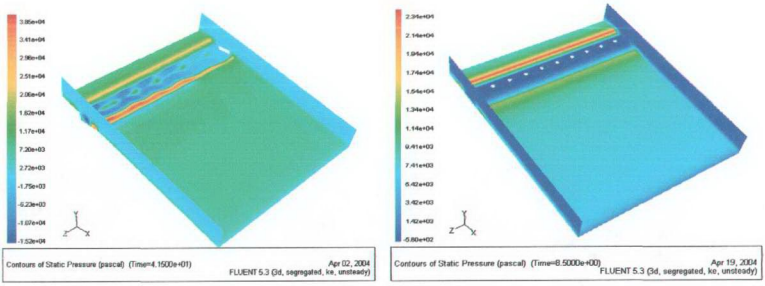
Fr=3.83 için Şekil 6.13(a) ve (b) karşılaştırıldığında, klasik havalandırıcı ile alttan alışlı havalandırıcıların düşük *Fr* sayılarındaki farkı çok açık şekilde görünmektedir. Klasik havalandırıcıda *Fr*=3.83 gibi düşük bir değerde, kanal kenarları dışında havalandırıcı büyük ölçüde batık hale gelmekte ve yeterli bir hava karışımı sağlayamamaktadır. Bu durumda kanalın orta bölgelerinde kavitasyon hasar riski oluşur. Şekil 6.13(b)'de ise alttan alışlı havalandırıcının *Fr*=3.83 için tabandaki hava karışımının oldukça üniform ve yeterli olduğu görülür. Şekil 6.14'de ise klasik ve alttan alışlı havalandırıcıların *Fr*=3.83 için şut kanal tabanındaki basınç dağılımları gösterilmiştir. Şekil 6.14(a) ve (b) karşılaştırıldığında düşük Froude sayılarında, jet altındaki alt basınç dağılımı bakımından alttan alışlı havalandırıcının klasik havalandırıcıya göre üstünlüğü görülür. Bu iki şekilde (Şekil 6.13 ve 6.14), alttan alışlı havalandırıcıların klasik havalandırıcılara göre özellikle düşük Froude sayılarında daha iyi basınç dağılımı ve hava karışımı sağladığı görülmektedir.

Şekil 6.15'de iki havalandırıcı tipinin hava giriş bölgesi enkesitlerinde, kanal genişliği doğrultusundaki giren hava hızları gösterilmiştir. Klasik havalandırıcıda hava akımı su jeti altına sadece yan taraftan girerken; alttan alışlı havalandırıcıda belirli aralıklarla jet altındaki alt basınç bölgesi beslenmektedir. Böylelikle oldukça geniş dolusavak şut kanallarında bile kanal enkesiti boyunca üniform bir hava karışımı sağlanabilir.



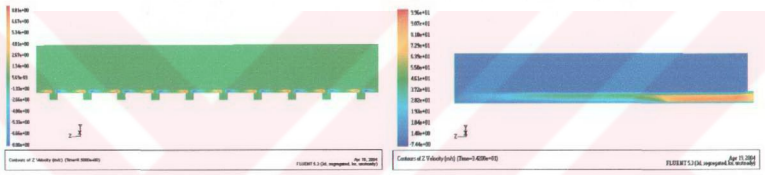
(a) (b)

Şekil 6.13(a) Klasik havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı (Fr=3.83)
(b) Alttan alışlı havalandırıcı mansabındaki taban hava karışımı(Fr=3.83)



(a) (b)

Şekil 6.14(a) Klasik havalandırıcı için şut kanalı tabanındaki basınçlar (Fr=3.83)
(b) Alttan alışlı havalandırıcı için şut kanalı tabanındaki basınçlar (Fr=3.83)



(a) (b)

Şekil 6.15(a) Alttan alışlı havalandırıcı için kanal enkesitindeki Z yönlü hava hızları (Fr=3.83)
(b) Klasik havalandırıcı için kanal enkesitindeki Z yönlü hava hızları (Fr=6.06).

Bu bölümde iki tip havalandırıcının performansları karşılaştırılmıştır. Özellikle geniş dolusavak şut kanallarında yandan alışlı klasik havalandırıcılar şut genişliği boyunca üniform bir hava karışımı sağlayamaz ve bu havalandırıcıların düşük Froude sayılarında batık hale gelme riski yüksektir. Bu bölümde önerilen alttan alışlı havalandırıcıların özellikle düşük Froude sayılarında ve geniş dolusavak şut kanallarında klasik havalandırıcılara göre daha etkin çalıştığı gösterilmiştir. Alttan alışlı havalandırıcılar sayesinde daha fazla ve daha üniform bir hava karışımı sağlanması mümkündür. Havalandırıcının batık çalışma riski de azaltılmış olur. Uygulanabilirlik açısından da alttan alışlı havalandırıcıların yapım maliyeti ve işçiliği klasik havalandırıcılardan çok farklı olmayacaktır. Birçok araştırmacı batık havalandırıcı durumunu tanımlamasına rağmen bununla ilgili yeterli çalışma yapılmamıştır. Özellikle batık çalışma riskini önlemek için Alttan Alışlı Havalandırıcıların kullanılması önerilebilir.

Bu bölümde alttan alışlı havalandırıcı tipinde, ana besleme galerisi boyutları ve galeri boyunca enerji kayıpları dikkate alınmamıştır. Ana galeri enkesitinin yeterli havayı sağlayacak büyüklükte olduğu kabul edilmiştir. Ana galerinin etkileri ayrıca incelenebilir.

6.4. Boyut Analizi

Şekil 6.1'de, incelenecek Alttan Alışlı Havalandırıcı modelinin tipik şekli gösterilmiştir. Bu tip bir havalandırıcının havalandırma olayına etki eden bağımsız parametreler üç grupta toplanabilir. Bunlar; akışkanların özellikleri, dolusavak ve havalandırıcı geometrisinin özellikleri ve akım özellikleridir. Suyun yoğunluğu ρ_w (kg/m^3), havanın yoğunluğu ρ_a (kg/m^3), suyun dinamik viskozitesi μ_w (N.s/m^2), su ve hava arasındaki yüzey gerilimi σ_s (N/m) akışkan özellikleri olarak; dolusavak şut kanalı eğimi α, saptırıcı açısı θ, şut kanalı genişliği B (m), saptırıcı (rampa) yüksekliği t_r (m), saptırıcı uzunluğu L_r (m), hava giriş ağzı çapı D (m) (veya alanı), kanal tabanı üzerindeki hava giriş ağızları arasındaki mesafe L (m), yüzey pürüzlülüğü k_s (m), ana galeri kesit alanı A (m^2) dolusavak ve havalandırıcı geometrisi olarak; giren havanın debisi Q_a (m^3/s), yaklaşan akımın ortalama hızı U_w=U_{su} (m/s), yaklaşan akım derinliği h (m), türbülans yoğunluğu Tu, su jeti altındaki boşluk altbasınç ile atmosfer basıncı farkı (boşluk alt basınçları) ΔP (N/m^2), su jetinin uzunluğu L_j (m) ise akım özellikleri olarak alınabilir. Havalandırıcı üzerindeki akım serbest yüzeyli akım olduğundan yerçekim ivmesi de olaya etki eden parametreler arasında yer alır.

Alttan alışlı havalandırıcılar üzerindeki havalandırma olayını belirleyen bu parametreler Denklem (6.1) deki fonksiyon ile tanımlanabilir.

$$f(Q_w, Q_a, U_w, h, L_j, \Delta P, \rho_w, \rho_a, \mu_w, \sigma_s, g, \alpha, \theta, t_r, L_r, D, L, k_s, A, Tu) = 0 \qquad (6.1)$$

Burada θ sabit alınıp, saptırıcı yüksekliği olan t_r değişken alındığında saptırıcı uzunluğu olan L_r de t_r ile temsil edilebilir. Bu tezde θ=7.59° olarak alınmıştır. Hava yoğunluğu ρ_a sabit olarak ve yüzey pürüzlülüğü k_s beton yüzeyler için yaklaşık 0.5~1.0 mm arasında sabit bir değer olarak alınabilirler [39]. Ayrıca bu çalışmada ana havalandırma galerisinin kesit ve yük kayıpları etkisi dikkate alınmamıştır. Dolusavak havalandırıcıları için türbülans yoğunluğu Tu, Chanson [4, 24], Rutschmann ve Hager [40, 55], Pinto ve diğ. [39] gibi birçok araştırmacı tarafından ihmal edilmiştir. Bu tezde de türbülans yoğunluğunun (Tu) hava giriş olayı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Bu parametreler çıkartılırsa, Denklem (6.1) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$f(Q_w, Q_a, U_w, h, L_j, \Delta P, \rho_w, \mu_w, \sigma_s, g, \alpha, t_r, D, L) = 0 \qquad (6.2)$$

Olay üzerindeki boyut etkisini ortadan kaldırmak için Denklem (6.2)'deki parametrelerden elde edilecek boyutsuz parametreler kullanılmalıdır. Temel büyüklükler olarak kütle (M), uzunluk(L) ve zaman(T), tekrarlanan büyüklükler olarak da U_w, h ve ρ_w seçilerek Pİ

teoremi uygulanırsa olay üzerinde ekili olacak boyutsuz parametreler bulunabilir. Bu boyutsuz parametreler aşağıda elde edilmiştir.

$$F(\Pi_1,\Pi_2,\Pi_3\Pi_4,\Pi_5,\Pi_6,\Pi_7,\Pi_8,\Pi_9,\Pi_{10})=0 \tag{6.3}$$

$$\Pi_1 = U^{-1}h^{-1}\rho^{-1}\mu = \frac{\mu}{Uh\rho} = \frac{\nu}{Uh} = \frac{1}{\mathrm{Re}} \text{ (Reynolds sayısı)}$$

$$\Pi_2 = U^{-2}.h^{1}.\rho^{0}.g = \frac{gh}{U^2} = \frac{1}{Fr^2} \text{ (Froude sayısı)}$$

$$\Pi_3 = U^{-2}.h^{0}.\rho^{-1}.\Delta P = \frac{\Delta P}{\rho U^2} = \frac{1}{E} \text{ (Euler sayısı)}$$

$$\Pi_4 = U^{-2}.h^{-1}.\rho^{-1}.\sigma_s = \frac{\sigma_s}{\rho h U^2} = \frac{1}{We} \text{ (Weber sayısı)}$$

$$\Pi_5 = U^{0}.h^{-1}.\rho^{0}.t_r = \frac{t_r}{h} \text{ (Rölatif rampa yüksekliği)}$$

$$\Pi_6 = \frac{D}{h} \text{ (Rölatif hava giriş çapı)}$$

$$\Pi_7 = \frac{L}{h} \text{ (Rölatif hava bacası aralığı)}$$

$$\Pi_8 = \alpha \text{ (Şut kanalı eğimi)}$$

$$\Pi_9 = \frac{L_j}{h} = \lambda_j \text{ (Rölatif jet uzunluğu)}$$

Q_w ve Q_a için ayrı ayrı iki boyutsuz parametre tanımlamaktansa bu ikisinin oranı olarak tek bir boyutsuz parametre belirlenebilir:

$$\Pi_{10} = \frac{Q_a}{Q_w} = \beta \text{ (Rölatif hava giriş debisi veya Hava giriş oranı)}$$

Bulunan boyutsuz parametreler kullanılarak Denklem (6.3) yeniden yazılırsa;

$$F\left(\frac{1}{\mathrm{Re}},\frac{1}{Fr^2},\frac{1}{E},\frac{1}{We},\frac{t_r}{h},\frac{D}{h},\frac{L}{h}\alpha,\frac{L_j}{h},\frac{Q_a}{Q_w}\right)=0 \tag{6.4}$$

veya

$$F\left(\mathrm{Re},Fr^2,E,We,\frac{t_r}{h},\frac{D}{h},\frac{L}{h},\tan\alpha,\lambda_j,\beta\right)=0 \tag{6.5}$$

Burada, Reynolds sayısı (Re) atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını, Froude sayısı (Fr) atalet kuvvetlerinin yerçekim kuvvetine oranını, Euler sayısı (E) atalet kuvvetlerinin basınç

kuvvetlerine oranını ve Weber sayısı (*We*) atalet kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranını ifade eder.

Dolusavak modelleri gibi modellerde atalet, yerçekim ve basınç kuvvetleri hâkimdir. Viskoz kuvvetleri temsil eden *Re* sayısı ve yüzey gerilim kuvvetlerini temsil eden *We* sayılarının hava giriş olayı üzerinde etkisi azdır ve ihmal edilebilir. Fakat özellikle küçük ölçekli model deneylerinde *Re* ve *We* sayılarının ihmal edilmesi önemli ölçek etkilerinin görülmesine neden olabilir. Ancak bu tezde 1:1 ölçekli sayısal modeller kullanıldığından ölçek etkisi gibi bir sorun yoktur. Dolayısıyla *Re* ve *We* sayılarının olay üzerindeki etkisi rahatlıkla ihmal edilebilir. *Re* ve *We* sayılarının etkisi ve ölçek etkileri Bölüm 5.1.2 ve 5.1.3'te ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Pinto [2], Rutchmann ve Hager [16], Chanson [4, 24], Pinto ve diğ. [39], Kökpınar ve Göğüş [22] gibi birçok araştırmacı *Re* ve *We* sayılarının belirli değerlerden büyük olması koşulunda hava girişi üzerinde önemli etkisinin olmayacağı ve ihmal edilebileceğini kabul etmişlerdir. Pinto [2], $Re>3.3x10^5$, $We>800$ değerleri için viskoz ve yüzey gerilimi etkilerinin ihmal edilebileceğini belirtmiştir. Bu tezde $Re>8x10^6$, $We>2x10^6$ ve jet uzunluğuna bağlı $We>22x10^6$ gibi büyük değerlerde çalışıldığından bu etkiler rahatlıkla ihmal edilebilir.

Denklemlerde yer alan *E* sayısı aslında bir Euler sayısı değildir. Gerçekte bu *E* sayısı su hareketinin sebep olduğu bir atalet reaksiyonu ve nap altındaki basınç farkı arasındaki oranı temsil eder. Bu basınç farkı giren hava ile alakalıdır [2, 39]. Basınç kuvvetlerini temsil etmek için *E* sayısı yerine birçok araştırmacı tarafından kabul gören, ilk kez Tan [11] tarafından tanımlanan ve önceki bölümlerde de kullanılan P_N basınç sayısı kullanılabilir.

$$P_N = \frac{\Delta P}{\rho_w g h} \tag{6.6}$$

D çapındaki tek bir baca alanının, besleyeceği akım kesit alanına oranı olarak, $\pi D^2/4Lh$ boyutsuz parametresi yazılabilir. Buradaki sabit sayılar atılırsa, Denklem (6.5)'teki *D/h* ve *L/h* yerine tek bir D^2/Lh boyutsuz parametresi yazılması uygun olacaktır. Bu parametre havalandırıcının hava sağlama kapasitesini belirleyen önemli parametrelerden biridir. Bu açıklamalar doğrultusunda boyutsuz parametrelerin oluşturduğu Denklem (6.5) tekrar yazılırsa aşağıdaki fonksiyon elde edilecektir.

$$f\left(\beta, \lambda_j, Fr^2, P_N, \frac{t_r}{h}, \frac{D^2}{Lh}, \tan\alpha\right) = 0 \tag{6.7}$$

Buradaki β rölatif hava debisi (veya hava giriş katsayısı), λ_j boyutsuz jet uzunluğu, *Fr* Froude sayısı, P_N basınç sayısı, t_r saptırıcı(rampa) yüksekliği, *D* sıralı bacaların çapı, *L* sıralı bacalar arasındaki uzaklık, *h* yaklaşan akım derinliği, α dolusavak şut kanalı eğim açısıdır. Denklem

(6.7)'de, β, λ_j ve P_N parametreleri geri kalan bağımsız parametrelerin bir fonksiyonu olarak elde edilebilir.

$$\beta, \lambda_j, P_N = F\left(Fr, \frac{t_r}{h}, \frac{D^2}{Lh}, \tan\alpha\right) \tag{6.8}$$

6.5. İncelenecek Modelin Hazırlanışı

Alttan alışlı havalandırıcı için hazırlanan modelin genel görünüşü Şekil 6.1'de verilmiştir. Çözüm zamanını ve sonlu eleman sayısını azaltmak için modelin boyuna simetrisi alınacaktır. Modelde şut kanalı genişliği B=20 m (simetrisi olduğundan 10 m) ve saptırıcı açısı θ=7.59° sabit olarak alınmıştır. Dolusavak tabanı üzerine değişen aralık (L) ve çaplarda (D) havalandırıcı bacaları yerleştirilmiştir. Bu bacaları atmosfere açarak besleyen nispeten daha büyük kesitli ana havalandırma galerisinin yeterli boyutta olduğu kabulü yapılmış ve galerinin yersel yük ve sürtünme kaybı gibi etkileri burada dikkate alınmamıştır. Tablo 6.3'te yaklaşan akımın debi, akım derinliği, hız ve Froude sayısı gibi akım karakteristikleri verilmiştir. Seçilen hızlar (U_w=20~30 m/s) kavitasyon için risk kabul edilebilecek hızlardır. Akım hızının 12~15 m/s değerlerinde kavitasyon hasarının olabileceği, 20~30 m/s hızlarda ise kavitasyondan kaçınmak için yüzey iyileştirmesi ekonomik olamamakta ve havalandırmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir [4, 24, 27]. Akım debileri 8~75 $m^3/s/m$, akım derinlikleri ise 0.4~2.5 m arasında tahmin edilmiştir. Tablo 6.3'teki değerler belirlenirken, kavitasyon riski altında işletmede bulunan dolusavaklarda ençok karşılaşılan Fr sayıları dikkate alınmaya çalışılmıştır.

Tablo 6.3 Yaklaşan akım karakteristikleri

q_w ($m^3/s.m$)	h (m)	U_w (m/s)	Fr
8.00	0.40	20.00	10.10
13.00	0.60	21.67	8.93
18.00	0.80	22.50	8.03
24.00	1.00	24.00	7.66
40.00	1.50	26.67	6.95
56.00	2.00	28.00	6.32
75.00	2.50	30.00	6.06

Saptırıcı yükseklikleri olarak (t_r) 0.10 m, 0.15 m ve 0.20 m üç farklı değer alınmıştır. Tabanda sıralanmış hava bacasının çapları (D) 0.40 m ve 0.60 m, baca arasındaki mesafe ise 2.00 ve 1.67 m alınarak D/h değerleri 0.20, 024, 030 ve 036 gibi dört farklı değerde değiştirilmiştir. Dolusavak şut kanalının taban eğimi α=9.65°, 14.57° ve 29.68° olarak değiştirilmiştir. Dolayısıyla tan α=0.17, 0.26 ve 0.57 değerlerini alacaktır. Her seferinde bir değişken değiştirilip diğerleri sabit tutularak tüm alternatifler için çözüm yapılmıştır. Böylelikle

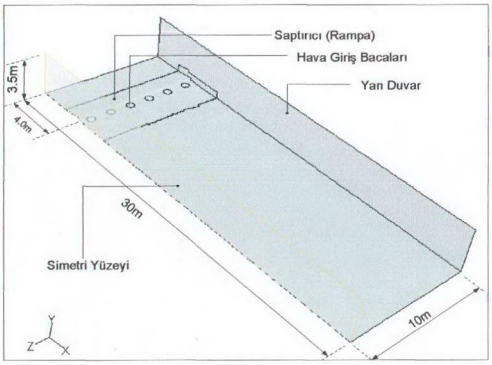
her değişkenin etkisi ayrı ayrı dikkate alınabilmiştir. Değişken sayları dikkate alındığında 7x3x4x3=252 adet farklı çözümden datalar elde edilmiştir (Tablo 6.4). Alttan alışlı havalandırıcının performansını belirlemek için bu datalarla regresyon analizleri yürütülmüş ve çeşitli bağıntılar elde edilmiştir.

Tablo 6.4 Değişken olarak alınan değerler ve değişken sayıları

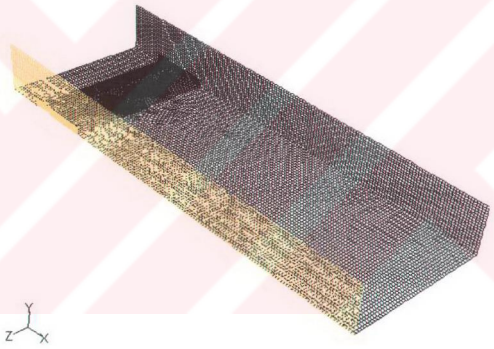
Fr	*tr(m)*	*D/L*	*tan α*
10.10	0.10	0.20	0.17
8.93	0.15	0.24	0.26
8.03	0.20	0.30	0.57
7.66		0.36	
6.95			
6.32			
6.05			
7	3	4	3

6.6. Sayısal Modelin Geometrisi

Üç boyutlu model geometrisini oluşturmak için Gambit yazılımı kullanılmıştır. Her farklı saptırıcı yüksekliği (t_r), hava giriş ağızlarının çapı (D) ve hava giriş aralıkları (L) için farklı bir geometrik model olmak üzere 12 farklı model geometrisi hazırlanmıştır. Diğer değişkenler ise çözüm sırasında değiştirilebilmektedir. Her farklı şut kanalı eğimi (α) için ayrı bir model geometrisi hazırlamak yerine çözümler sırasında eğimlere uygun yerçekimi ivmesinin vektörel bileşenlerini değiştirme yoluna gidilmiştir. Böylelikle çok daha fazla model geometrisi hazırlamaktan kaçınılmıştır. Model geometrisi için 30 m uzunluğunda 20 m (simetrik olduğundan 10 m) genişliğinde ve 3.5 m yüksekliğinde kısmi bir dolusavak şut kanalı dikkate alınmıştır. Şekil 6.16'da hazırlanan modelin genel görünüşü ve ölçüleri gösterilmiştir. Havalandırıcı mansabındaki akım jetini ve hava karışım olayını gözleyebilmek için saptırıcı sonundan 26 m uzaklık yeterli görülmüştür. Maksimum su derinliği 2.5 m olduğundan 3.5 m lik kanal derinliği de yeterli olacaktır. Havalandırma rampasının mansap ucu kısmi savak başlangıcından 4 m mesafededir. Havalandırma bacaları ise rampanın 10 cm mansabında yer alır. Model geometrisi oluşturulduktan sonra yine Gambit yazılımı yardımıyla model sonlu eleman ağına bölünmüştür. Çözümlerin hassas olabilmesi için modeller yaklaşık 250000 adet hexahedral hücreye bölünmüştür. Hava girişinin cereyan ettiği bölgeler iki kat daha küçük hücreli sonlu elemanlara bölünmüştür. Modelin sonlu eleman ağ yapısı Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Daha sonra yine Gambit yazılımıyla modelin sınır şartları (Atmosfer girişi, katı cidar, hız girişi gibi) belirlenmiştir.



Şekil 6.16 Modelin genel geometrisi



Şekil 6.17 Modelin sonlu eleman ağı

6.7. Çözüm Parametreleri

CFD analizlerinde, üç boyutlu (3D), ayrılmış (*Segregated*), zamanla değişen akım (*Unsteady*) çözüm modeli seçilmiştir. Çok fazlı akım modellerinden ASM (*Algebraic Slip Model*) kullanılmıştır. Bu modelin özellikleri Bölüm 4'de ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Birincil faz su, ikincil olarak da hava alınmış ve bu iki elementin fiziksel özellikleri tanıtılmıştır. Türbülans modeli olarak standart k-epsilon modeli kullanılmış ve türbülans parametreleri sabit olarak alınmıştır.

6.7.1. Seçilen Türbülans Modeli

Dolusavaklar üzerindeki akım türbülanslı akımdır. Akımın türbülansını modelleyebilmek için Fluent'deki türbülans modellerinden Standart k-ε model kullanılmıştır. k-ε model için Standart, RNG ve Realizable k-ε model seçenekleri vardır. Fluent ayrıca, Reynolds Stress Model (RSM), Spalart-Allmaras, Reynolds Stres, Large Eddy Simulation (LES) gibi türbülanslı akım modellerine de olanak sunmaktadır. Burada kullanılan standart k-ε modelin açıklaması yapılacaktır.

Standart k-ε model, türbülans kinetik enerji (k) ve bunun yayılımı (ε) için taşınım denklemleri üzerine kurulu yarı deneysel bir modeldir. Taşınım denklemi, k için kesin bir denklemden, ε için ise fiziksel sonuç çıkarma ve biraz da matematik yaklaşım desteği ile türetilir. Standart k-ε model türetilirken akım tamamen türbülanslı akım olarak kabul edilir ve moleküler viskoz etkiler ihmal edilir. Bu nedenle standart k-ε model sadece tamamen türbülanslı akımlar için geçerlidir. Dolusavak üzerindeki akımlar tamamen türbülanslı kabul edilebileceğinden bu model uygun olacaktır.

Türbülans kinetik enerjisi (k) ve yayılım oranı (ε) aşağıdaki taşınım denkleminden elde edilir:

$$\rho\frac{dk}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{6.9}$$

$$\rho\frac{d\varepsilon}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon}G_b\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6.10}$$

Burada; ρ: Akışkanın yoğunluğu, μ: Akışkanın viskozitesi, μ_t: Türbülans viskozitesi, G_k: Ortalama hız gradiyentinden dolayı üretilen türbülans kinetik enerjisi, G_b: Kaldırma kuvveti nedeniyle türbülans üretimi, Y_M: Genişleme yayılımı terimi (*dilatation dissipation*), σ_k, σ_ε : Sırasıyla k ve ε için türbülans Prandtl sayısı, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$: Sabitlerdir.

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6.11}$$

Buradaki, C_μ sabit bir sayıdır. Boussinesq hipotezine uygun olarak G_k aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$G_k=\mu_t S^2 \tag{6.12}$$

Burada, S ortalama gerilme oranının tensörü olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ ve ortalama gerilme oranı: $S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \tag{6.13}$$

$\Pr_t$ enerji için Prandtl sayısı olup, standart ve realizable k-ε model için varsayılan değeri $\Pr_t$=0.85'dir. Y_M genişleme yayılımı terimi Sarkar ve Balakrishnan [56] tarafından önerilen şekilde modellenir:

$$Y_M = \rho \varepsilon 2 M_t^2 \tag{6.14}$$

M_t Türbülans Mach sayısıdır:

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a_s^2}} \tag{6.15}$$

Buradaki, a_s ses hızıdır.

Çözümlerde kullanılan türbülans parametreleri: $C_{1\varepsilon}$=1.44, $C_{2\varepsilon}$=1.92 C_μ=0.09 σ_k=1.0 σ_ε=1.3 olarak alınmıştır.

6.7.2. Türbülanslı Akımda Cidar Pürüzlülüğü

Fluent'de türbülanslı akım için cidar pürüzlülüğü de hesaba katılır. Pürüzlülük etkileri nedeniyle akışkan hareketini engelleme miktarını belirleyen bir pürüzlülük fonksiyonu tanımlamıştır (ΔB). Bu fonksiyon genel olarak pürüzlülüklerin şekil ve boyutuna bağlıdır. Kumçakıl pürüzlülüğüne benzer üniform elemanlar için ΔB önemli ölçüde boyutsuz pürüzlülük yüksekliğine bağlıdır. Boyutsuz pürüzlülük yüksekliği (K_s) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$K_s = \frac{\rho k_s u^*}{\mu} \tag{6.16}$$

$$u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2} \tag{6.17}$$

Burada, ρ: Akışkanın yoğunluğu, μ: Akışkanın viskozitesi, k_s: Fiziksel pürüzlülük yüksekliği, k: Türbülans kinetik enerjisi, C_μ: Türbülans yoğunluğunu hesaplamada kullanılan bir sabittir. Deneysel analizler göstermiştir ki, pürüzlülük fonksiyonu (ΔB) yalnızca K_s nin tekil bir fonksiyonu değildir ve K_s'ye bağlı faklı formlar da alır. Üç farklı rejim durumu gözlemlenmiştir:

- Hidrolik cilalı rejim (K_s<3~5)

- Geçiş rejimi ($3\sim5<K_s<70\sim90$)
- Tam pürüzlü rejim ($K_s>70\sim90$)

Hidrolik cilalı rejimde pürüzlülük etkileri ihmal edilebilir. Ancak geçiş bölgesinde pürüzlülüğün önemi artmaya başlar ve tam pürüzlü akımda pürüzlülük etkisini tam olarak gösterir. Fluent'de tüm pürüzlülük durumları üç rejime ayrılmıştır ve her rejim için pürüzlülük fonksiyonunu hesaplamak üzere Nikuradse'nin datalarına bağlı olarak Cebeci ve Bradshaw [57] tarafından önerilen formüller kabul görmüştür. Buna göre;

- Hidrolik cilalı rejim için($K_s<2.25$): $\Delta B = 0$
- Geçiş rejimi için ($2.25<K_s<90$):

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa}\ln\left[\frac{K_s - 2.25}{87.75} + C_{Ks}K_s\right]\sin\left(0.4258(\ln K_s - 0.811)\right)$$

- Tam pürüzlü rejim için ($K_s>90$): $\Delta B = \frac{1}{\kappa}\ln\left(1 + C_{Ks}K_s\right)$

Burada; C_{Ks} pürüzlülük tipine bağlı pürüzlülük sabiti, $1/\kappa$ yarı logaritmik ölçekle çizdirilen pürüzlü cidara yakın ortalama hız dağılımının eğimidir (κ=0.4 alınabilir).

Fluent'te cidar pürüzlülük etkilerini modelleyebilmek için iki parametrenin belirlenmesi gerekir. Bunlar, pürüzlülük yüksekliği (k_s) ve pürüzlülük sabiti (C_{Ks}) dir. Cilalı yüzeyler için k_s=0 alınır. Yüzeyin pürüzlülüğüne uygun değer belirlenmelidir. Dolusavakların beton yüzeyleri için verilen pürüzlülük değeri yaklaşık k_s=0.5~1.0 mm'dir. Bu tezde dolusavak yüzey pürüzlülüğü olarak k_s=1.0 mm alınmıştır. Fluent'te varsayılan C_{Ks}=0.5 değeri, pürüzlendirilmiş borular için Nikuradse'nin direnç datalarından üretilen ve k-ε türbülans model için kullanılan bir değerdir. Üniform olmayan kum-çakıl pürüzlülüğü, tel ızgara pürüzlülüğü gibi pürüzlülüklerde bu değerin daha yüksek alınabileceği (0.5~1.0) tavsiye edilmiştir. Bu tezde savak yüzeyi üniform pürüzlendirilmiş kabul edilip C_{Ks}=0.5 değeri seçilmiştir.

6.7.3. Sınır Şartları (*Boundary Condition*)

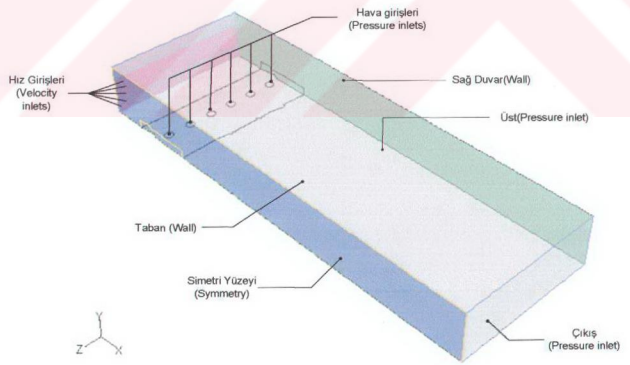
Modelin sınır şartları her bir sınır eleman için tanımlanmıştır. Şekil 6.18'de gösterilen modelin sınır şartları şunlardır:

- **Katı cidar (*Wall*):** Dolusavak şut kanalının yan duvarı, savak tabanı, hava giriş bacalarının yan kenarları bu sınırla tanımlanmıştır. Beton yüzeyler için pürüzlülük ks=0.001 m, C_{Ks}=0.5 sabit olarak alınmıştır.
- **Basınç girişleri (*Pressure inlets*):** Modelin üst ve çıkış kısımları ve hız girişleri dışındaki giriş kısmı atmosfer basınç girişi olarak tanımlanmıştır. Bu sınırlarda atmosfer basıncı sıfır alınarak çözümler rölatif basınçlara göre gerçekleştirilmiştir.

- **Hız girişleri (*Velocity inlets*):** Şut kanalının girişinde, farklı yüksekliklerde, su fazı için hız girişi yüzeyleri tanımlanmıştır. Böylece her bir farklı su derinliği ve su hızı için (Farklı *Fr* sayılarında) istenilen su debileri elde edilmiştir. Verilen su yüksekliğinin üzerindeki yüzeyler ise atmosfer girişi olarak tanımlanmıştır.
- **Simetri yüzeyi (*Symmetry*):** Çözüm zamanını ve hafıza gereksinimini yarıya indirmek için boyuna şut kanalının ortasından simetri yüzeyi geçirilerek modelin simetrisi alınmıştır.

6.7.4. İşletme Durumları (*Operating Conditions*)

Bu kısımda modelin, işletme basıncı, yerçekimi ivmesi, ortam yoğunluğu gibi parametrelerin belirlenmesi gerekir. Gerçek ortamda serbest yüzeyli akımlar atmosfer basıncı altında işletilmektedir. Bu modelde rölatif basınçlarla çalışmak işimizi kolaylaştırdığından işletme basıncı olan atmosfer basıncı sıfır olarak alınmıştır. Yerçekimi ivmesi g=9.807 m/s^2 olarak alınmıştır. Her kanal eğimi için farklı bir model hazırlama yerine, yerçekimi ivmesinin vektör bileşenlerini eğime göre ayarlayarak, eğimi göreceli değiştirme yoluna gidilmiştir. Gerçek ortamda fiziksel çevreyi saran bir hava kütlesi olduğundan ortam yoğunluğu olarak havanın yoğunluğu alınır (ρ_a=1.225 kg/m^3).



Şekil 6.18. Modelin sınır şartları

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tezde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve bunlara uygun bağıntılar kurulması amacıyla Matlab dilinde genel amaçlı bir regresyon programı hazırlanmıştır. Bu programda, m. dereceden polinom regresyonu, istenilen sayıda bağımsız değişkeni içeren çoklu doğrusal ve çoklu üssel regresyon yapabilen üç seçenek sunulmuştur. Regresyon analizi için hazırlanan Matlab programı EK-1'de verilmiştir.

Bu bölümde Alttan Alışlı Havalandırıcıların performanslarını belirlemek üzere Bölüm 6'da bahsedilen modelin sonuçları değerlendirilmiştir. Fluent'le yapılan sayısal analiz sonuçları Tablo ve grafikler halinde sunularak olayda etkin parametrelerin değişimleri incelenmiş ve sayısal analiz datalarına bağlı olarak yürütülen regresyon analizleriyle pratikte kullanılabilecek bağıntılar elde edilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen tüm sonuçlar tablolar halinde Ek-2'de sunulmuştur.

7.1. Direkt Yaklaşım

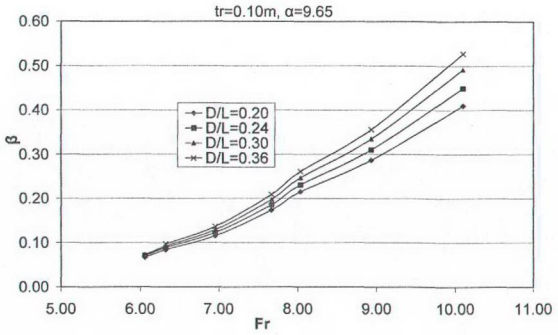
Bu yaklaşımda alttan alışlı havalandırıcının hava giriş performansının direkt olarak havalandırıcı ve şut kanalı geometrisine ve *Fr* sayısı gibi akım parametrelerine bağlı olduğu kabul edilir. Bu yaklaşımla hava giriş oranını belirlemek için Denklem (6.8) dikkate alınarak aşağıdaki fonksiyonel bağıntı kurulabilir.

$$\beta = f\left(Fr, \frac{t_r}{h}, \frac{D^2}{Lh}, \tan\alpha\right) \tag{7.1}$$

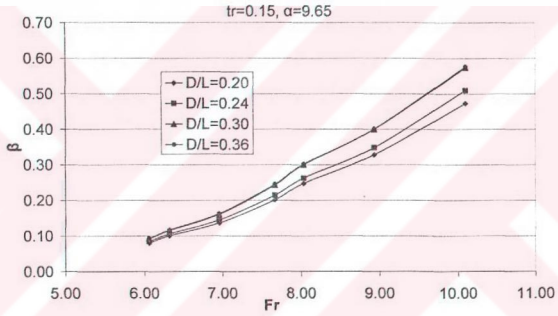
Her bir değişkenin hava giriş katsayısı üzerindeki etkilerini gösterebilmek için aşağıdaki grafikler hazırlanmıştır.

7.1.1. Froude Sayısının Etkisi

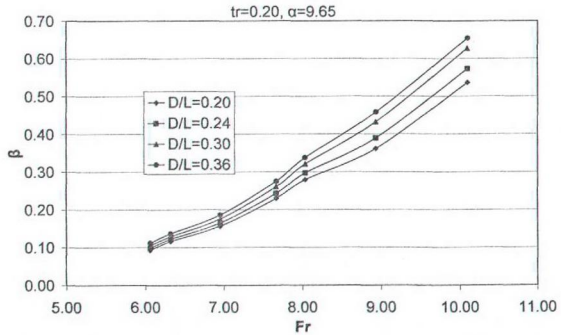
Şekil 7.1- 7.9 arasındaki dokuz adet grafik *Fr* sayısı ile boyutsuz hava giriş oranının (β), farklı geometriler için değişimini göstermektedir. Bu grafiklerde, hava giriş oranının (β) *Fr* sayısına önemli ölçüde bağlı olduğu görülür. Bu durum daha önceki farklı havalandırıcı türler üzerinde yapılmış çalışmalarla uyuşmaktadır. Grafiklerde ayrıca görüleceği gibi, boyutsuz *D/h* oranı (dolayısıyla D^2/Lh) da havalandırıcı performansını arttırıcı rol oynar. Sabit kanal eğimi (α), rampa yüksekliği (t_r) ve *Fr* sayısı için *D/L* oranı ile β'nın arttığı görülmektedir. Dolayısıyla, havalandırıcı performansını etkileyen diğer bir önemli değişken de D^2/Lh boyutsuz parametresidir.



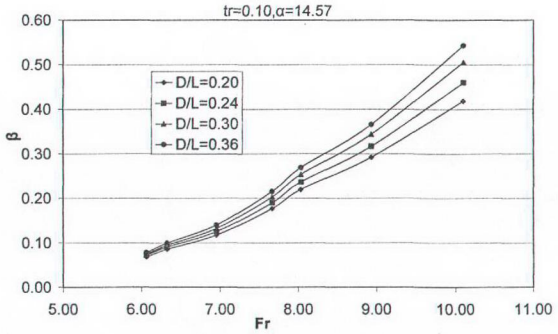
Şekil 7.1 t_r=0.10 m, α=9.65 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



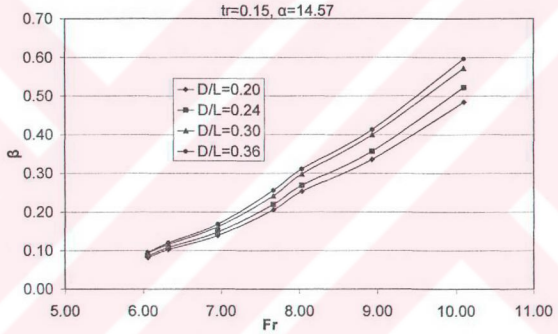
Şekil 7.2 t_r=0.15 m, α=9.65 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



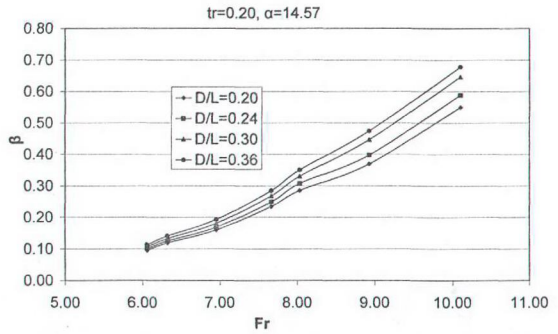
Şekil 7.3 t_r=0.20 m, α=9.65 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



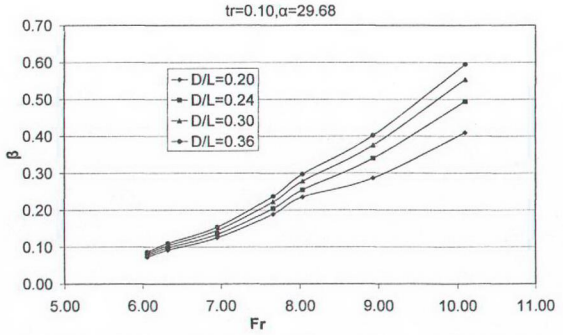
Şekil 7.4 t_r=0.10 m, α=14.57 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



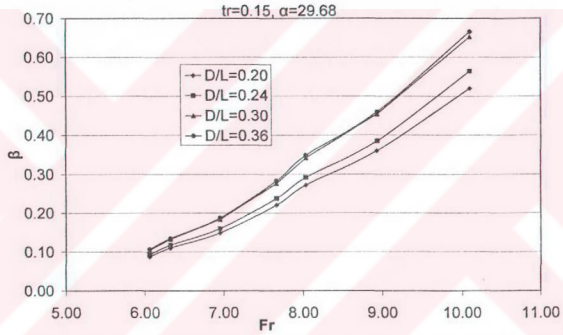
Şekil 7.5 t_r=0.15 m, α=14.57 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



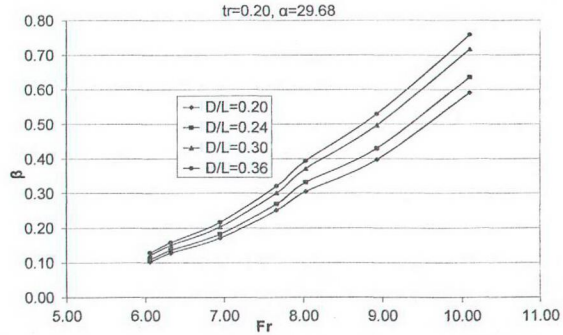
Şekil 7.6 t_r=0.20 m, α=14.57 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



Şekil 7.7 t_r=0.10 m, α=29.68 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



Şekil 7.8 t_r=0.15 m, α=29.68 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi



Şekil 7.9 t_r=0.20 m, α=29.68 için *Fr* ile hava giriş oranının (β) değişimi

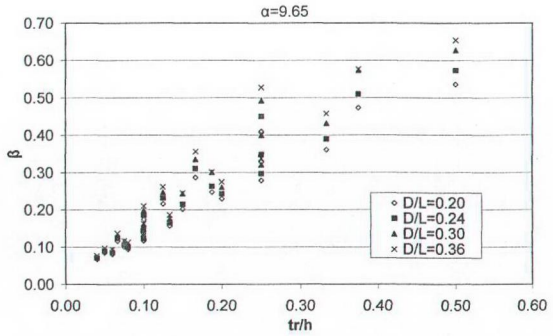
Hava giriş oranının *Fr* sayısı ile değişimi incelendiğinde tüm grafikler için de belirli bir *Fr* sayısında hava girişinin sıfır olacağı görülebilir. Grafikler yaklaşık aynı noktada *Fr* sayısının temsil edildiği yatay ekseni kesecektir. Bunun anlamı, belirli bir *Fr* sayısının altında hava girişi gerçekleşmeyecektir. Bu değer klasik havalandırıcılar için Rutschmann ve Hager [16] tarafından Fr=5.4, Pinto [17] tarafından Fr=4.5 olarak verilmiş ve bu minimum değerlerin altında hava girişinin olmayacağı kabul edilmiştir. Alttan alışlı havalandırıcılarda hava girişini sağlayan minimum *Fr* sayısını tespit etmek için β'nın *Fr* ile değişimini incelenmiştir. β'nın, *Fr* sayısının ikinci derece fonksiyonu olarak % 95.8 korelasyonla aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\beta = 0.0087 - 0.0478Fr + 0.0101Fr^2 \tag{7.2}$$

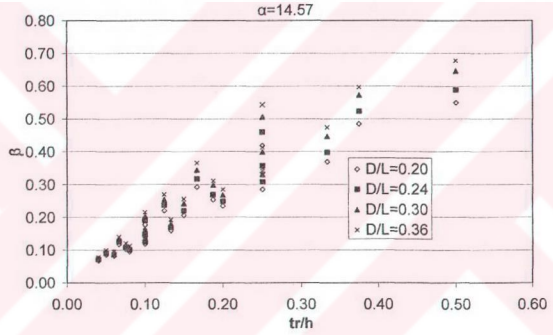
Fr sayısı negatif değerler alamayacağından ikinci derece parabolün yatay eksenini kestiği pozitif *Fr* değeri hava girişinin başlayacağı minimum değer olacaktır. Buna göre β=0 için (7.2) denkleminin pozitif kökü Fr=4.54 bulunur ki bu değer Pinto'nun [17] değeri ile hemen hemen aynıdır. Buna rağmen Bölüm 6'da gösterildiği gibi alttan alışlı havalandırıcılar daha düşük Fr sayılarında bile (Fr<4.5) oldukça iyi havalandırma sağlayabilir. Burada *Fr* sayısının 6.06~10.10 aralığı dikkate alınarak hava girişinin sıfır olacağı minimum *Fr* sayısı tahmin edilmiştir. Bölüm 6'da ise Fr=3.83 gibi küçük bir değer için bile alttan alışlı havalandırıcıların iyi bir havalandırma sağladığı hatırlanırsa Fr<6.05 için $\beta=f(Fr)$ ilişkisi incelendiğinde muhtemelen eğrinin yönü değişerek daha küçük bir *Fr* sayısında yatay ekseni kesecektir. Diğer bir ifade ile hava girişi sağlayan minimum *Fr* sayısının değeri 4.5'dan daha küçük olacaktır. Yine de, havalandırıcılar genelde büyük *Fr* sayıları için tasarlandığından bir kriter olarak Fr<4.5 alınması uygun olabilir.

7.1.2 Rampa Yüksekliğinin Etkisi

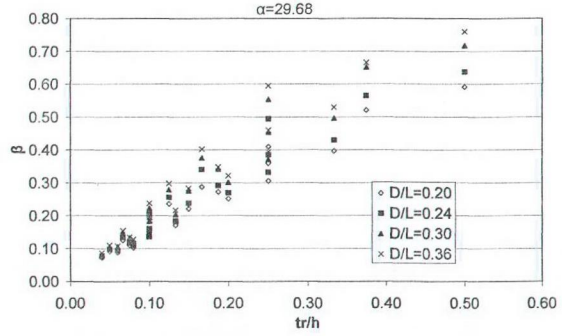
Şekil 7.10-Şekil 7.12 arasındaki üç adet grafikte boyutsuz rampa yüksekliğinin (t_r/h) hava giriş oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Dağılımın genel yapısı incelendiğinde boyutsuz rampa yüksekliğinin hava girişini önemli ölçüde arttırdığı görülür. Bu grafiklerde *Fr* sayısının dağılımdaki etkisini eleyerek boyutsuz rampa yüksekliğinin sabit *Fr* sayılarına göre hava giriş oranıyla değişimi Şekil 7.13~7.16 arasındaki grafiklerle gösterilmiştir. *Fr* sayısının sabit değerleri için hava giriş oranı boyutsuz rampa yüksekliğiyle doğrusal olarak artmaktadır. Yine bu şekillerde hava giriş oranının *Fr* sayısıyla artışı da görülebilmektedir. Şekil 7.13~7.16 arasındaki grafiklerde hava giriş oranları, şut kanalı eğimlerine göre ortalama değerler olarak alınmıştır.



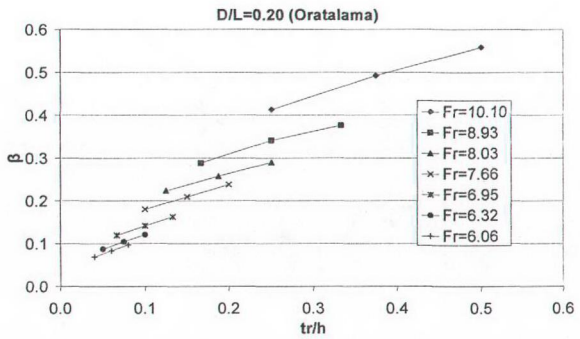
Şekil 7.10 α=9.65 için t_r/h ile β değerlerinin değişimi



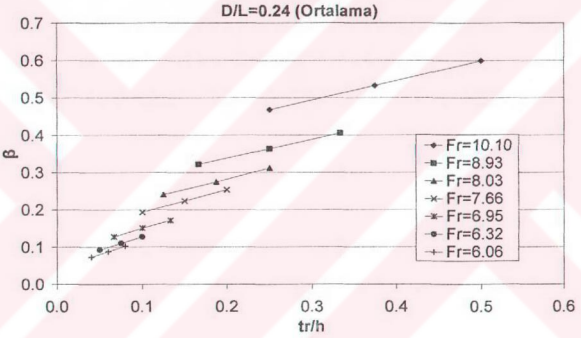
Şekil 7.11 α=14.57 için t_r/h ile β değerlerinin değişimi



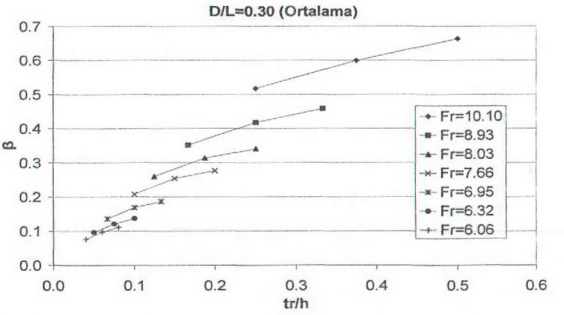
Şekil 7.12 α=29.68 için tr/h ile ortalama β değerlerinin değişimi



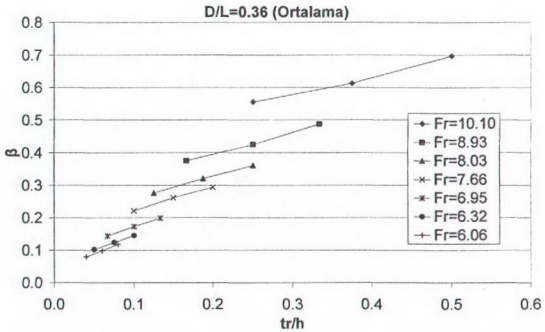
Şekil 7.13 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.20)



Şekil 7.14 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.24)



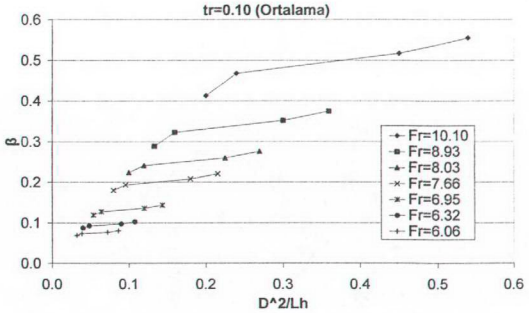
Şekil 7.15 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.30)



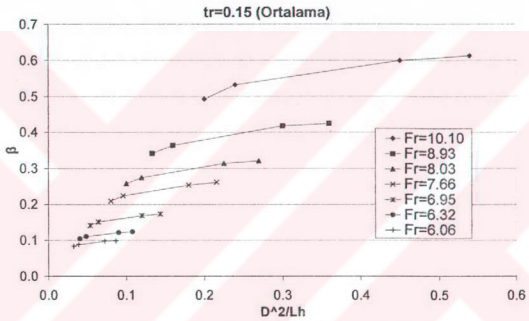
Şekil 7.16 Sabit *Fr* sayıları için ortalama β değerlerinin t_r/h ile değişimi (D/L=0.36)

7.1.3. Boyutsuz D^2/Lh Parametresinin Etkisi

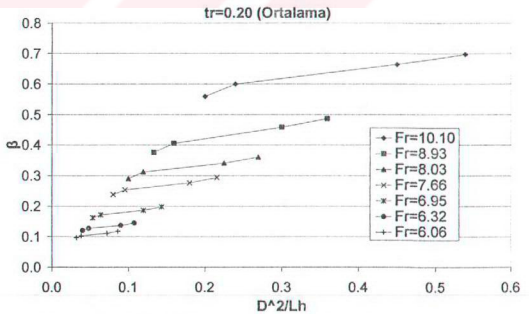
Tek bir bacanın enkesit alanının, besleyeceği akım kesit alanına oranını temsil eden D^2/Lh parametresinin havalandırma performansı üzerindeki etkisi Şekil 7.17~7.19'da görülebilir. Grafiklerde, hava giriş oranlarının şut kanalı eğimlerine göre ortalama değerlerinin, her bir sabit *Fr* sayısında D^2/Lh ile değişimi gösterilmiştir. Böylece hava giriş olayı üzerinde diğer parametrelerin etkisi elenerek sadece D^2/Lh parametresinin hava giriş oranı üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Şekillerde görülebileceği gibi D^2/Lh parametresinin, hava giriş oranı (β) üzerinde arttırıcı etkisi vardır. Bir havalandırıcının hava ihtiyacı jet altında üretilecek atmosfer altı basınçlarla sınırlı olduğundan, toplam hava giriş enkesitinin yeterli büyüklüğünden sonra (Hava ihtiyacını tam olarak karşılayacak bir büyüklük) bu parametrenin hava girişine etkisi azalacaktır. Burada önemli olan yeterli havalandırmayı sağlayabilecek en düşük *D/L* oranını elde etmektir.



Şekil 7.17 Ortalama β değerlerinin D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.10 m)



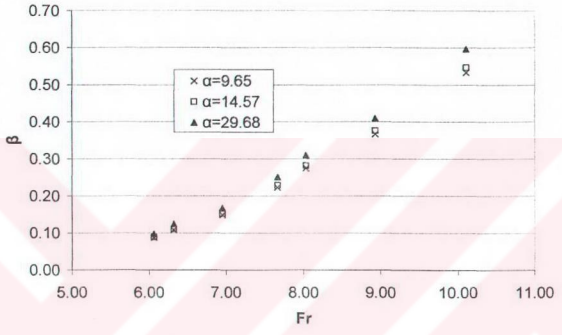
Şekil 7.18 Ortalama β değerlerinin D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.15 m)



Şekil 7.19 Ortalama β değerlerinin D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.20 m)

7.1.4. Şut Kanalı Eğiminin Etkisi

Şut eğiminin havalandırma performansı üzerindeki etkisi Şekil 7.20'den anlaşılabilir. Şekil 7.20'de farklı şut kanalı eğimleri için diğer değişkenlere göre ortalama hava giriş oranının *Fr* sayısı ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, kanal eğiminin atışıyla, hava giriş oranı artmakla birlikte bu artış oldukça düşüktür. Dolayısıyla şut kanalı eğiminin havalandırma performansı üzerindeki etkisinin çok az olacağı söylenebilir.



Şekil 7.20 Farklı şut eğimlerine göre *Fr* ile ortalama β değerlerinin değişimi

7.1.5. Elde Edilen Bağıntılar

Hava giriş olayında etkili olan yukarıda bahsedilen boyutsuz parametrelere bağlı olarak pratikte kullanabilecek bazı faydalı bağıntılar elde edilmiştir. Boşluk altbasınçları dolayısıyla P_N basınç sayısı önemli ölçüde D^2/Lh parametresine bağlıdır. Bu nedenle, D^2/Lh parametresi, P_N sayısının etkilerini temsil edecektir. Tüm parametreleri içeren bir eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\beta = a_1 Fr^{b_1}\left(\frac{D^2}{Lh}\right)^{c_1}\left(\frac{t_r}{h}\right)^{d_1}(1+\tan\alpha)^{e_1} \tag{7.3}$$

Buradaki a_1, b_1, c_1, d_1 ve e_1 katsayıları regresyon analizi ile belirlenebilen katsayılardır. Çoklu regresyon sonucu % 99.6 (r=0.996) korelasyon ile bu katsayılar belirlenmiş ve aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir:

$$\beta = 0.05 Fr^{1.29} \left(\frac{D^2}{Lh}\right)^{0.20} \left(\frac{t_r}{h}\right)^{0.44} (1+\tan\alpha)^{0.39} \tag{7.4}$$

Boyut analizi sonucu Pinto (1989) tarafından klasik havalandırıcılar için benzer olarak Denklem (7.5) önerilmiştir [39].

$$\beta = a(Fr-K)^b \left[\frac{t_r + t_s}{h}\right]^c \left(\frac{D_a}{h}\right)^d \tag{7.5}$$

Pinto'nun bu denkleminde t_s eşik yüksekliğini, D_a birim şut kanalı genişliğindeki efektif hava bacası alanını ifade eder. Pinto [17] tarafından $D_a = \bar{c} A_a / B$ olarak tanımlanmıştır. Buradaki $\bar{c}$ debi katsayısı, A_a hava bacası kesit alanı, B şut kanalı genişliğidir. Pinto'nun bu denklemi alttan alışlı havalandırıcılara uyarlanırsa, D_a/h yerine bezer bir parametre olan D^2/Lh ve eşik olmadığından t_s=0 yazılabilir. Buna göre benzer olarak aşağıdaki denklem (7.6) düzenlenebilir.

$$\beta = a_2 (Fr-K)^{b_2} \left(\frac{D^2}{Lh}\right)^{c_2} \left(\frac{t_r}{h}\right)^{d_2} \tag{7.6}$$

Bu denklemde dolusavak şut kanalı eğiminin etkisi ihmal edilmiştir. Denklemdeki K değeri β=0 için K=4.5 olarak alınabilir. a_2, b_2, c_2, d_2 katsayıları % 99.4 (r=0.994) korelasyon ile regresyon analizden elde edilip aşağıdaki Denklem (7.7) düzenlenmiştir:

$$\beta = 0.42(Fr-4.5)^{0.54} \left(\frac{D^2}{Lh}\right)^{0.19} \left(\frac{t_r}{h}\right)^{0.43} \tag{7.7}$$

Klasik havalandırıcı için Pinto ve diğ. [39] benzer denklemde rölatif rampa yüksekliğinin etkisinin çok az olduğunu ve ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Oysa bu tezde elde edilen Denklem (7.7) ve yukarıdaki grafiklerde görüleceği gibi, rölatif rampa yüksekliğinin (t_r/h) etkisi büyüktür ve ihmal edilemez. Bölüm 6'da gösterildiği gibi alttan alışlı havalandırıcılar Fr<4.5 için bile üniform bir hava karışımı sağlayabildikleri hatırlanacak olursa, düşük Fr sayıları için (7.7) bağıntısındansa (7.4) bağıntısı kullanılabilir.

Bu bölümde elde edilen bağıntılar için; $6.05 \le Fr \le 10.10$, $0.17 \le \tan\alpha \le 0.57$, $0.04 \le t_r/h \le 0.50$, $0.032 \le D^2/Lh \le 0.539$, θ=7.59° limitleri verilir. Bu limitlerin dışında denklemlerin doğruluğu tartışmaya açıktır.

7.1.6. Hava Hızları

Büyük şut eğimleri (α) ve rampa yüksekliklerinde (t_r), hava giriş kesit alanının yetersiz kalması nedeniyle hızlar çok yükselebilir. Ancak, Bölüm 3.8' de anlatılan, havanın sıkıştırılabilir etkilerinden kaçınmak gibi nedenlerden dolayı hava hızları maksimum bir değeri aşamaz. Hava giriş hızındaki bu limit değer; Volkart ve Rutschmann [18] tarafından 60~80 m/s, Echavez ve Bourguett (1986) tarafından 120 m/s [1], Rutschmann ve Volkart [36] tarafından 100 m/s olarak verilmiştir. Bu değerler klasik havlandırıcılar için verilen değerlerdir. Alttan alışlı havalandırıcılarda oluşan yüksek hava hızları tabana sıralı hava bacalarının 0.50 m gibi küçük bir boyunda gerçekleşmektedir. Dolayısıyla diğer araştırmacıların belirlediği limit değerlerin en yüksekleri maksimum hava hızı olarak kabul edilebilir. Bahsedilen etkiler yüzünden havalandırıcı tasarlanırken $U_{a(max)}$=100~120 m/s sınırlamasının getirilmesinde fayda olacaktır. Daha büyük D^2/Lh değerleri seçilerek yüksek hava giriş hızlarından kaçınılabilinir. Tasarımda hava giriş hızlarının tahmini ve kontrolü için % 99.2 korelasyon ile aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{U_a}{U_w} = 0.064 Fr^{1.29} \left(\frac{D^2}{Lh}\right)^{-0.80} \left(\frac{t_r}{h}\right)^{0.44} (1+\tan\alpha)^{0.39} \tag{7.8}$$

Tasarım sırasında U_a<120 m/s sınırlaması getirilebilir. Fakat yine de, işletim açısından ve bazı araştırmacıların vermiş olduğu limit değerlerin daha küçük olmasından dolayı maksimum hız değerinin daha küçük seçilmesinde fayda vardır.

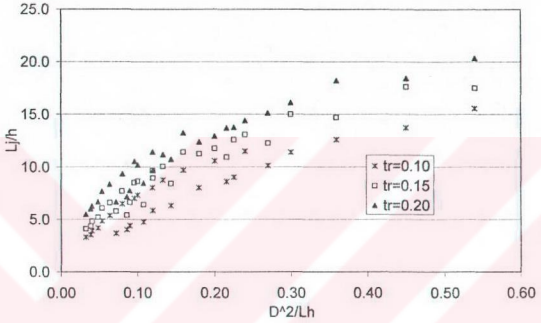
7.2. Endirekt Yaklaşım

Havalandırıcı ve şut kanalı geometrisini belirleyen boyutsuz büyüklüklerin hepsi, boyutsuz jet uzunluğu olan $\lambda_j=L_j/h$ ile ifade edilebilir. Bu yaklaşımdan yola çıkarak hava giriş oranı boyutsuz jet uzunluğuna bağlı olarak elde edilecektir. Bunun için önce boyutsuz jet uzunluğunun belirlenmesi gerekir. Boyutsuz jet uzunluğu, bağlı olduğu parametrelere göre aşağıdaki fonksiyonla ifade edilebilir:

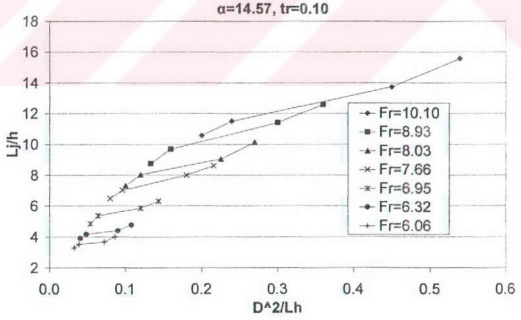
$$\lambda_j = f\left(Fr, \frac{D^2}{Lh}, \frac{tr}{h}, \tan\alpha\right) \tag{7.9}$$

Üç boyutlu sayısal analizlerinde, rampa ucundan itibaren kanal boyunca tabandaki maksimum statik basıncın oluştuğu uzaklık, jet uzunluğu olarak ölçülmüştür. Jet uzunluğunun bağlı olduğu parametrelerin etkilerini gözlemlemek için bir takım grafikler sunulmuştur. Şekil

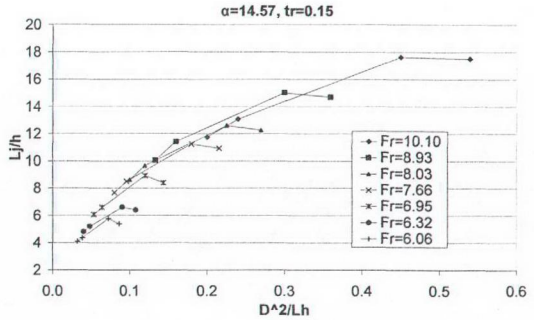
7.21'de α=14.57 için farklı rampa yüksekliklerinde boyutsuz jet uzunluğunun, D^2/Lh ile dağılımı gösterilmiştir. Bu genel dağılım incelendiğinde boyutsuz jet uzunluğu D^2/Lh parametresi ile parabolik olarak arttığı görülür. Şekil 7.21'deki dağılımda boyutsuz jet uzunluğunun üzerinde D^2/Lh ile birlikte Fr sayısının etkisi de vardır. Her bir sabit Fr sayısına göre rölatif jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi Şekil 7.22~7.24'deki grafiklerle verilmiştir. Böylelikle Fr sayısının dağılımdaki etkisi ayrılmış olur. Şekil 7.22~7.24'de sabit Fr sayılarında da rölatif jet uzunluğunun, D^2/Lh parametresiyle önemli ölçüde arttığı görülmektedir.



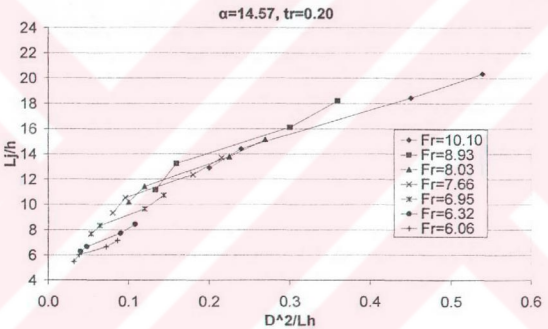
Şekil 7.21 α=14.57 için boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi



Şekil 7.22 Boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi (α=14.57, tr=0.10 m)

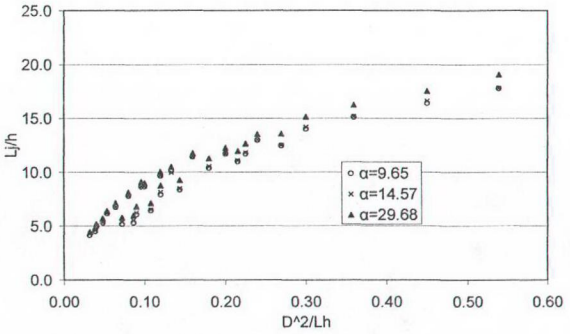


Şekil 7.23 Boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi (α=14.57, tr=0.15 m)



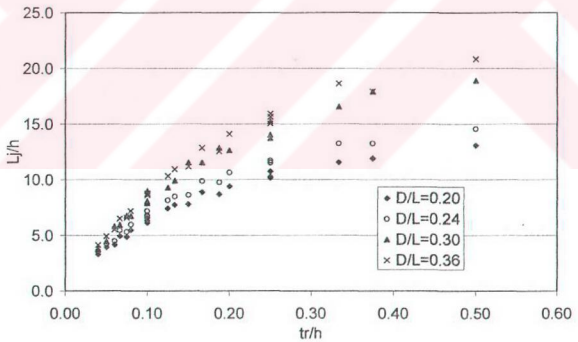
Şekil 7.24 Boyutsuz jet uzunluğunun D^2/Lh ile değişimi (α=14.57, tr=0.20 m)

Şekil 7.25'te boyutsuz rampa yüksekliklerine göre ortalaması alınan rölatif jet uzunluklarının farklı şut kanalı eğimlerinde D^2/Lh parametresiyle değişimleri gösterilmiştir. Şekil 7.25, şut kanalı eğiminin rölatif jet uzunluğu üzerinde fazla bir etkisinin olmadığını gösterir. Bu şekille birlikte $L_j/h = f(D^2/Lh)$ bağıntısıyla ilgili diğer şekillerden anlaşılacağı gibi D^2/Lh değeri arttıkça, D^2/Lh parametresinin, hava giriş oranındaki etkisi gibi rölatif jet uzunluğu üzerindeki etkisi de azalmaktadır. Jet altındaki boşluk altbasınç bölgesinde oluşan hava ihtiyacını karşılayabilecek D^2/Lh değerinden daha büyük değerlerde, D^2/Lh parametresinin rölatif jet uzunluğu üzerinde önemli etkisi olmayacaktır.



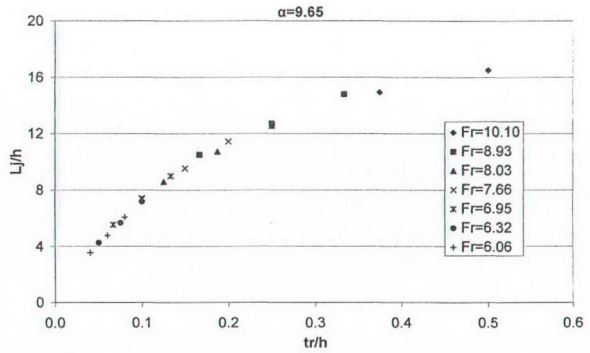
Şekil 7.25 Ortalama rölatif jet uzunluğunun, farklı kanal eğimlerine göre D^2/Lh ile değişimi

Şekil 7.26~7.28 arasındaki grafiklerde boyutsuz rampa yüksekliğinin, rölatif jet uzunluğu üzerindeki etkisi gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 7.26'da farklı D/L değerleri için boyutsuz jet uzunluğunun, t_r/h ile arttığı görülmektedir. Aynı zamanda sabit t_r/h değerleri için D/L de boyutsuz jet uzunluğunu arttırmaktadır.



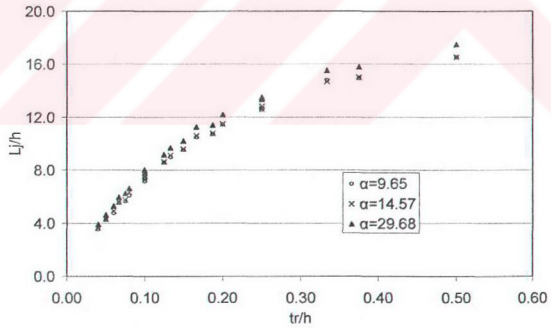
Şekil 7.26 Ortalama rölatif jet uzunluğunun t_r/h ile değişimi

Şekil 7.27'de farklı Fr sayılarında, D/L değerlerine göre rölatif jet uzunluklarının ortalamaları alınarak, boyutsuz rampa yüksekliğiyle değişimi görülmektedir. Burada, rölatif jet uzunluğunun önemli ölçüde boyutsuz rampa yüksekliğine bağlı olduğu ve bunun yanında Fr sayısı etkisinin önemsiz kaldığı görülmektedir (Şekil 7.27).



Şekil 7.27 Ortalama rölatif jet uzunluğunun t_r/h ile değişimi (α=9.65)

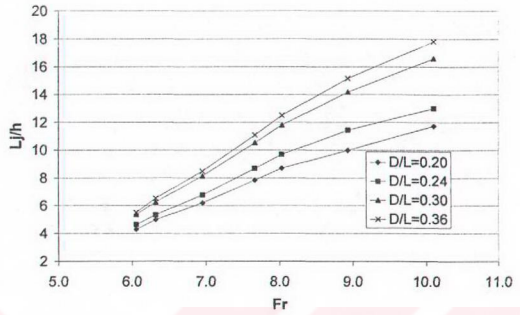
Şekil 7.28'de ise şut kanalı eğiminin rölatif jet uzunluğunu üzerindeki etkisinin, boyutsuz rampa yüksekliğinin etkisi yanında oldukça az olduğu görülmektedir. Şut kanalı eğiminin benzer etkisi yukarıdaki Şekil 7.25'te de görülebilir. Diğer bir ifadeyle, şut kanalı eğiminin rölatif jet uzunluğu üzerindeki etkisi, t_r/h ve D^2/Lh parametrelerinin etkisi yanında oldukça küçük olmaktadır.



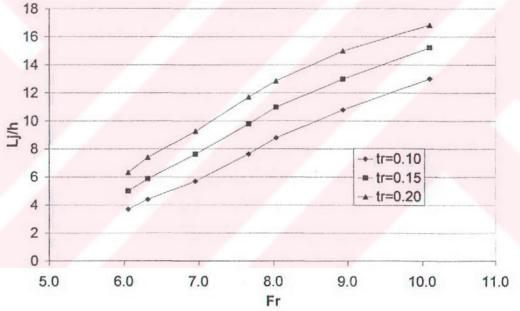
Şekil 7.28 Ortalama boyutsuz jet uzunluğunun farklı kanal eğimlerine göre t_r/h ile değişimi

Boyutsuz jet uzunluğunun, *Fr* sayısıyla değişimi Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da sunulmuştur. Şekil 7.29'da, t_r/h değerlerine ve şut eğimlerine karşılık gelen boyutsuz jet uzunlukları ortalamalarının, farklı *D/L* oranları için *Fr* sayısıyla değişimi görülmektedir. Şekil 7.30'da ise, *D/L* değerlerine ve şut eğimlerine karşılık gelen boyutsuz jet uzunlukları

ortalamalarının, farklı t_r değerleri için Fr sayısıyla değişimi görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere Fr sayısının artışı, boyutsuz jet uzunluğunu (L_j/h) arttırıcı yöndedir.



Şekil 7.29 Ortalama boyutsuz jet uzunluğunun farklı D/L değerlerine göre Fr sayısı ile değişimi



Şekil 7.30 Ortalama boyutsuz jet uzunluğunun farklı t_r değerlerine göre Fr sayısı ile değişimi

Boyutsuz jet uzunluğunu belirlemek için, (7.9)'daki tüm boyutsuz parametreler dikkate alınarak yürütülen çoklu regresyon analizinden, % 98.2 (r=0.98) korelasyon ile aşağıdaki (7.10) bağıntısı elde edilmiştir. Bu denklemin bir benzeri klasik havalandırıcılar için Kökpınar ve Göğüş [22] tarafından (3.46) denklemiyle sunulmuştur.

$$\frac{L_j}{h} = 583.59 Fr^{-1.17} \left(\frac{D^2}{Lh}\right)^{0.34} \left(\frac{t_r}{h}\right)^{0.60} (1+\tan\alpha)^{0.24} \qquad (7.10)$$

Ancak, grafiklerde açıklandığı gibi Fr ile L_j/h doğru orantılı artmasına rağmen, bu denklemde Fr sayısının etkisi ters orantılı olarak belirmiştir. Bu denklem çalışılan data aralığı için en uygun

eğriyi verse de her zaman doğru sonuç vermeyebilir. Buradaki sorun, Şekil 7.27'de görüldüğü gibi rölatif jet uzunluğu üzerinde t_r/h parametresinin yanında Fr sayısının etkisinin önemsiz kalmasıdır. t_r/h ve Fr parametrelerinin akım yüksekliği olan h değişkenine bağlı olması, iki parametreden birinin yanında diğerinin rölatif jet uzunluğu üzerindeki etkisini azaltır. Muhtemelen Denklem (7.10)'da bu etki t_r/h lehinde olmuş, dolayısıyla Fr sayısının etkisi anlam kazanmamıştır. Bu durumda bu iki parametreden birinde h değişkeni elenmelidir. Akım hızını içeren Fr sayısının jet uzunluğu üzerinde etkisi bekleneceğinden boyutsuz t_r/h yerine, boyutu *metre* olan sadece t_r parametresi kullanılarak denklem yeniden düzenlenmiştir. Buna göre %97.6 (r=0.98) korelasyon ile aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir:

$$\frac{L_j}{h} = 7.42 Fr^{0.97} \left(\frac{D^2}{Lh} \right)^{0.34} t_r^{\,0.60} (1 + \tan\alpha)^{0.24} \tag{7.11}$$

Bu bağıntı yukarıdaki açıklamaları doğrular niteliktedir. Denklem (7.11)'de dikkat çekilmesi gereken nokta, bu denklemin boyut homojenliğinin bozulmuş olmasıdır. Doğru sonuç alabilmek için, bu denklemdeki t_r'nin biriminin *metre* olmasına ve L_j/h'nin biriminin bundan bağımsız olacağına dikkat edilmesi gerekir.

Hava giriş oranının, önemli ölçüde boyutsuz jet uzunluğuna bağlı olduğu daha önceki bölümlerde (Bölüm 3) diğer araştırmacılara atıfta bulunarak belirtilmiştir. Boyutsuz jet uzunluğu (L_j/h) tespit edildikten sonra, hava giriş oranı bu büyüklüğe bağlı olarak elde edilebilir. Pinto ve diğ. [6], Bruschin [33] gibi birçok araştırmacı klasik havalandırıcılar üzerindeki prototip ve model çalışmaları sonucu (7.12) denklemini kabul görmüşlerdir.

$$\beta = K \left(\frac{L_j}{h} \right) \tag{7.12}$$

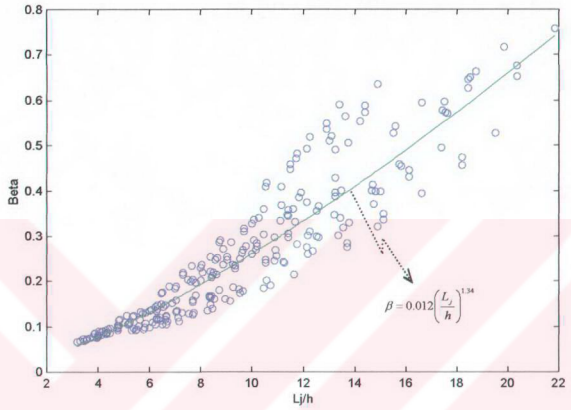
Pinto ve Neidert [8] tarafından Denklem (7.12)'nin kullanımı ile ilgili kapsamlı araştırmalar yapılmış ve K katsayısının havalandırıcı geometrisi ve boyutsuz akım karakteristiklerinin bir fonksiyonu olduğu ifade edilmiştir . K katsayılarını; Pinto ve Neidert [50] tarafından 0.01~0.08 aralığında, Hamilton (1984) tarafından, 0.01~0.05 aralığında [1], Foz do Areia barajı dolusavağının üç havalandırıcısı için simetrik havalandırma halinde 0.033, asimetrik havalandırma halinde 0.023 olarak [6], Guri barajı dolusavağı için 0.01~0.035 aralığında verilmiştir [1]. Emborcacao barajı dolusavağının orta havalandırıcısının K değeri 450~2800m^3/s debiler için 0.033 olarak belirlenmiştir [1].

Bu tezdeki datalarla yürütülen regresyon analizinden r=0.93 korelasyon katsayısıyla (7.13)'teki denklem elde edilmiştir (**K=0.036**).

$$\beta = 0.036(\lambda_j - 2.4) \tag{7.13}$$

Ancak, Şekil 7.31 incelendiğinde bu değişimin tam olarak doğrusal olmadığı ve Denklem (7.14)'ün bu değişimi daha iyi yansıtacağı görülür (r=0.92).

$$\beta = 0.012\left(\frac{L_j}{h}\right)^{1.34} \tag{7.14}$$



Şekil 7.31 Hava giriş oranının boyutsuz jet uzunluğu ile değişimi ve uydurulan (**7.14**) eğrisi

Denklem (7.13) veya (7.14) ile hava giriş oranının, rölatif jet uzunluğuna bağlı olarak yaklaşık tahmini yapılabilir. Daha doğru tahminler yapabilmek için *Fr* sayısı ve boyutsuz jet uzunluğuna bağlı olarak %99 korelasyonla (r=0.991)elde edilen Denklem (7.15) önerilir:

$$\beta = 0.022(Fr - 4.5)^{0.85}\left(\frac{L_j}{h}\right)^{0.64} \tag{7.15}$$

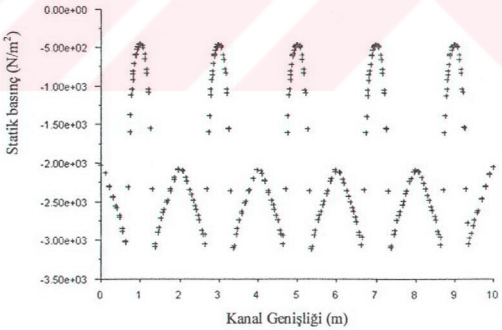
Direkt yaklaşımda olduğu gibi Denklem (7.15)'de, *Fr*>4.5 için hava girişi olacağı kabul edilir. Daha önceden de bahsedildiği gibi alttan alışlı havalandırıcılar daha düşük *Fr* sayılarında da yeterli hava girişi sağlayabilirler. Hava girişi için *Fr*>3.5 sınırlaması getirilirse, küçük Fr sayıları için Denklem (7.15) yerine aşağıdaki denklem hava giriş oranını hesaplamada kullanılabilir (*r*=0.99):

$$\beta = 0.011(Fr - 3.5)^{1.15}\left(\frac{L_j}{h}\right)^{0.64} \tag{7.16}$$

Bu denklemler, "Direkt Yaklaşım"da da bahsedilen ve Pinto [39] tarafından sunulan (7.5) denklemine benzemektedir. Pinto'nun elde ettiği bağıntıda Lj/h yerine kullanılan boyutsuz parametre boşluk altbasınçlarını temsil etmekte ve t_r/h ve α gibi bazı parametrelerin etkisi de ihmal edilmektedir. Burada bahsedilen denklemlerde ise L_j/h boyutsuz parametresi diğer parametrelerin hepsini temsil etmektedir.

7.3. Boşluk Altbasınçlarının Etkisi

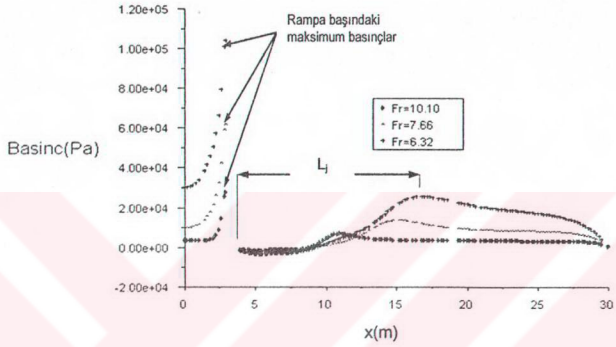
Sayısal modellerindeki altbasınç değerleri, su jeti altındaki altbasınç bölgesinde ve havalandırıcı bacaların biraz mansabında, kanal genişliğince tanımlanan bir doğru üzerindeki statik basınçların ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Atmosfer basıncı sıfır olarak kabul edildiğinden, okunan basınç değerleri doğrudan basınç farkını verir. Nap altındaki basınçlar, bacalardan giren havanın dinamik etkilerinden dolayı kanal genişliğince sabit olmayıp dalgalı bir değişim gösterir (Şekil 7.32). Şekilde kanal genişliğince hava giriş bacalarının yeri 1, 3, 5, 7 ve 9. m' lerdedir. Şekildeki bu noktalarda ΔP basınç farkları daha az, baca aralarında ise daha fazla olmaktadır. Ancak bu basınç dalgalanması kanal genişliğince kısa mesafelerde ve klasik tip havalandırıcılara göre daha küçük basınç farkı değerlerinde gerçekleşir. Böylece kanal genişliğince sürekli ve büyük bir basınç düşüşü gerçekleşmeyeceğinden havalandırıcının performansı artar ve batık hale gelme riski de azalır.



Şekil 7.32 Şut genişliği boyunca boşluk altbasınçları (α=9.65, t_r=0.15, D/L=0.30)

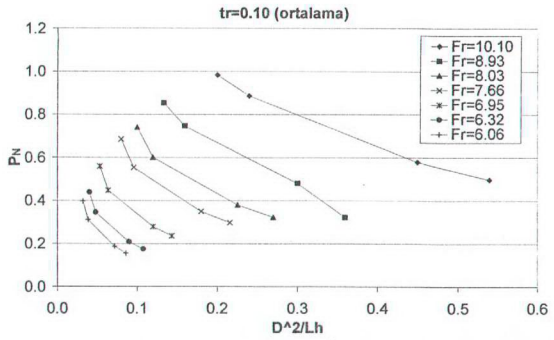
Kanal uzunluğu boyunca (x mesafesi), tabandaki basınç değişiminin tipik grafiği ise Şekil 7.33'de verilmiştir. Saptırıcı (rampa) tarafından sıçratılan su jetinin tabana çarptığı yerde basınçlar maksimum değer alacağından, bu nokta jet uzunluğunun tespitinde kullanılır [22, 16,

38]. Şekil 7.33'de görüldüğü gibi, saptırıcının sonu olan x=4 m ile bu noktanın mansabındaki en büyük taban basınç değeri arasındaki mesafe jet uzunluğu (L_j) olarak alınmıştır. Buradaki x=0 noktası kısmi savak model uzunluğunun başlangıç noktası, x=4 m noktası saptırıcının mansap noktasıdır. Şekil 7.33'de, akımın rampaya ilk çarpmasından dolayı rampanın başındaki (memba tarafı) maksimum basınç değerleri de görülmektedir.

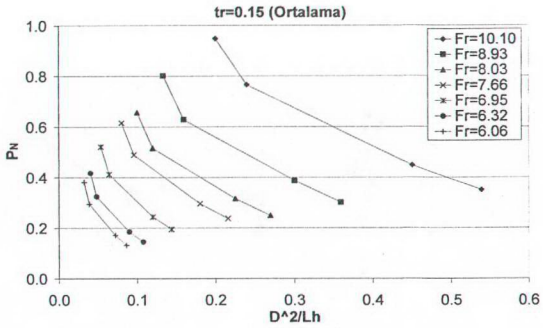


Şekil 7.33 Şut kanalı uzunluğu boyunca tabandaki statik basınçlar (α=9.65, t_r=0.15 m, D/L=0.30)

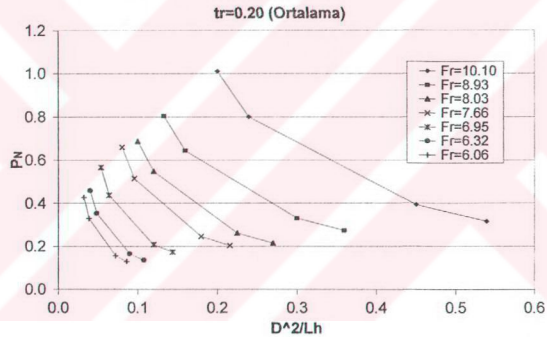
Şekil 7.34~7.36 arasındaki farklı rampa yükseklikleri(t_r) için üç grafikte, her bir sabit Fr sayısında, şut eğimlerine göre ortalama basınç sayısının (P_N), D^2/Lh boyutsuz parametresiyle değişimi gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi Basınç sayısı ile D^2/Lh parametresi ters orantılı olarak değişmektedir. Aynı zamanda basınç sayısı Fr sayısı ile artmaktadır.



Şekil 7.34 Ortalama P_N basınç sayısının, D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.10 m)

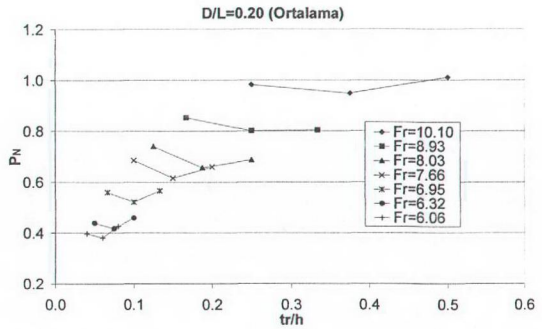


Şekil 7.35 Ortalama P_N basınç sayısının, D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.15 m)

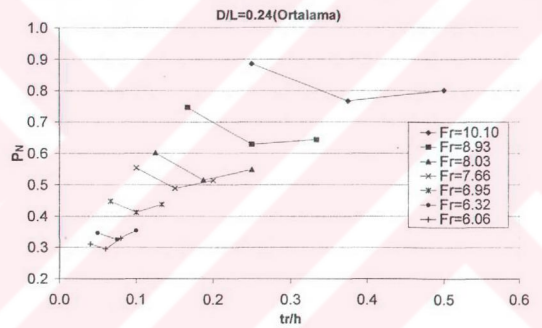


Şekil 7.36 Ortalama P_N basınç sayısının, D^2/Lh ile değişimi (t_r=0.20 m)

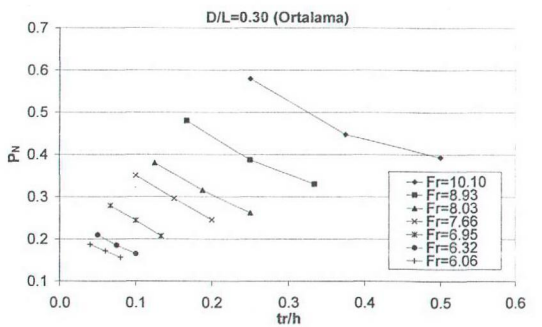
Şekil 7.37~7.40 arasısındaki farklı D/L oranları için üç grafikte, her bir Fr sayısında, şut eğimlerine göre ortalama basınç sayılarının boyutsuz rampa yüksekliğiyle (t_r/h) değişimi gösterilmiştir. Grafiklerde, boyutsuz rampa yüksekliğinin, D^2/Lh parametresi gibi basınç sayısıyla ters orantılı olduğu ve yine Fr sayısının da basınç sayısıyla doğru orantılı olduğu görülür.



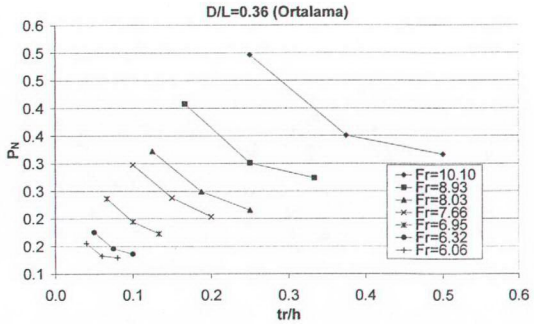
Şekil 7.37 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.20)



Şekil 7.38 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.24)



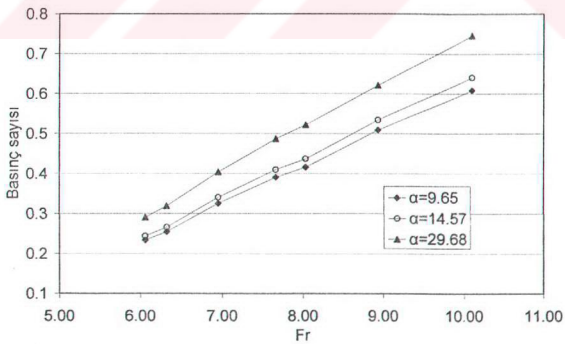
Şekil 7.39 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.30)



Şekil 7.40 Ortalama P_N basınç sayısının, t_r/h ile değişimi (D/L=0.36)

Şekil 7.41 incelendiğinde, basınç sayısının *Fr* ile doğrusal değiştiği, şut kanalı eğimiyle ise doğru orantılı fakat az miktarda değiştiği görülür. Bu grafikte, ortalama doğru denkleminin yatay ekseni (*Fr* eksenini) kestiği nokta basınç sayısının sıfır olduğu nokta alınarak bu noktadaki Froude sayısı *Fr*=3.6 elde edilir. Şut kanalı eğiminin Basınç sayısı üzerindeki etkisi az olduğundan ihmal edilebilir. Boyutsuz değişkenlere bağlı olarak basınç sayısı için çoklu regresyonla uydurulan en iyi eğri aşağıdaki (7.17) denklemiyle verilmiştir (r=0.97):

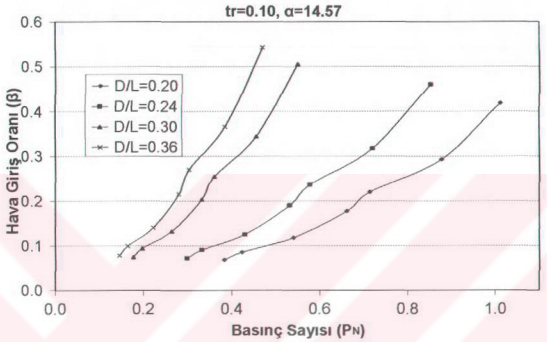
$$P_N = 0.0003(Fr-3.6)^{3.32}\left(\frac{D^2}{Lh}\right)^{-0.98}\left(\frac{t_r}{h}\right)^{-0.25} \tag{7.17}$$



Şekil 7.41 P_N basınç sayısının, farklı şut eğimlerinde *Fr* ile değişimi

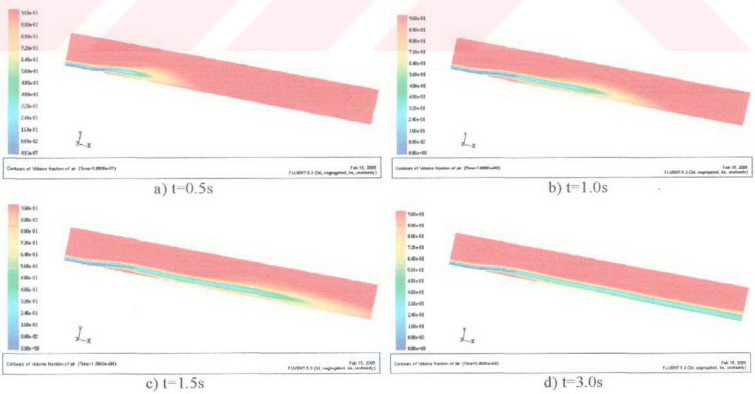
Bu bölümdeki bağıntılar; $6.05 \le Fr \le 10.10$, $0.17 \le \tan\alpha \le 0.57$, $0.04 \le t_r / h \le 0.50$, $0.032 \le D^2 / Lh \le 0.539$, θ=7.59° için elde edilmiştir. Bu aralıkların dışında denklemlerin doğruluğu tartışmaya açıktır.

Havalandırıcı tarafından sağlanan hava giriş oranının basınç sayısıyla değişimi, Şekil 7.42'de t_r=0.10 m ve α=14.57 için verilen tipik bir grafikle gösterilmiştir. Bu grafikte, basınç sayısıyla hava giriş oranının artışı görülmektedir.



Şekil 7.42 Hava giriş oranının basınç sayısıyla değişimi (t_r=0.10 m α=14.57°)

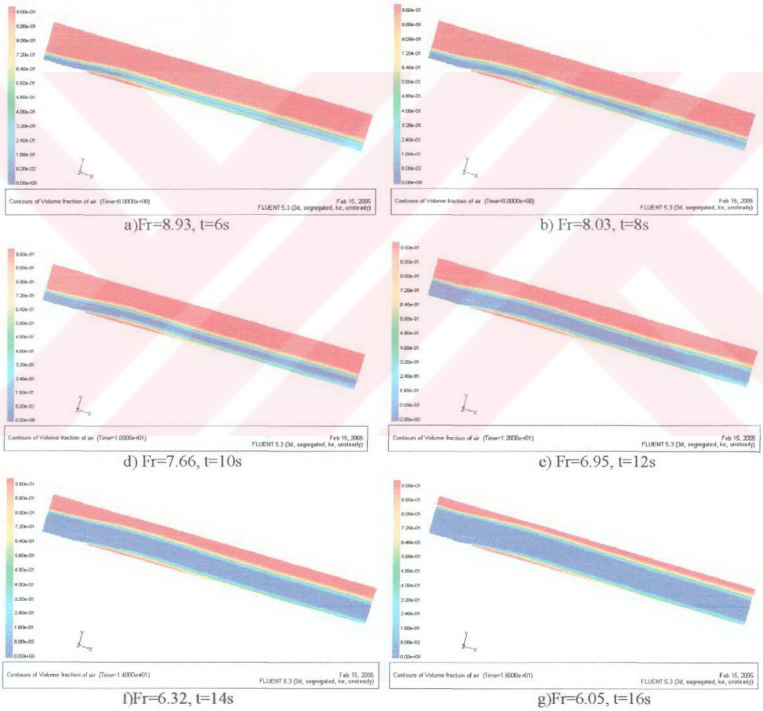
7.4. CFD Analiz Sonuçlarından Örnek Görünüşler



Şekil 7.43 Sayısal iterasyona başladıktan sonra, farklı zamanlardaki akımın faz durumları (Fr=10.10, t_r=0.15, D/L=0.36, α=9.65°)

Şekil 7.43'de Fr=10.10, tr=0.15 ve α=9.65 için iterasyona başladıktan sonraki ilk 0.5, 1.0, 1.5 ve 3.0s'deki akımın durumu yan profilden gösterilmiştir. Şekil 7.43(a)'da akımın rampadan sıçrayışı görülmektedir. Şekil (d)'de ise akımın kararlı hale gelmiş olduğu görülür.

Şekil 7.44'de t_r=0.15, α=9.65 için farklı Fr sayılarındaki su jetinin boykesitteki görüntüleri verilmiştir. Bu şekillerde su jeti altındaki nap altı boşluk bölgeleri açık şekilde görülmektedir. Şekil 7.43, 7.44 ve 7.45'deki mavi renkli bölgeler su fazını, kırmızı renkli bölgeler ise hava fazını temsil etmektedir. İki renk asındaki geçiş bölgeleri ise hava-su karışım oranını gösterirken, kırmızıya doğru hava faz oranı, maviye doğru ise su fazı oranı artmaktadır.



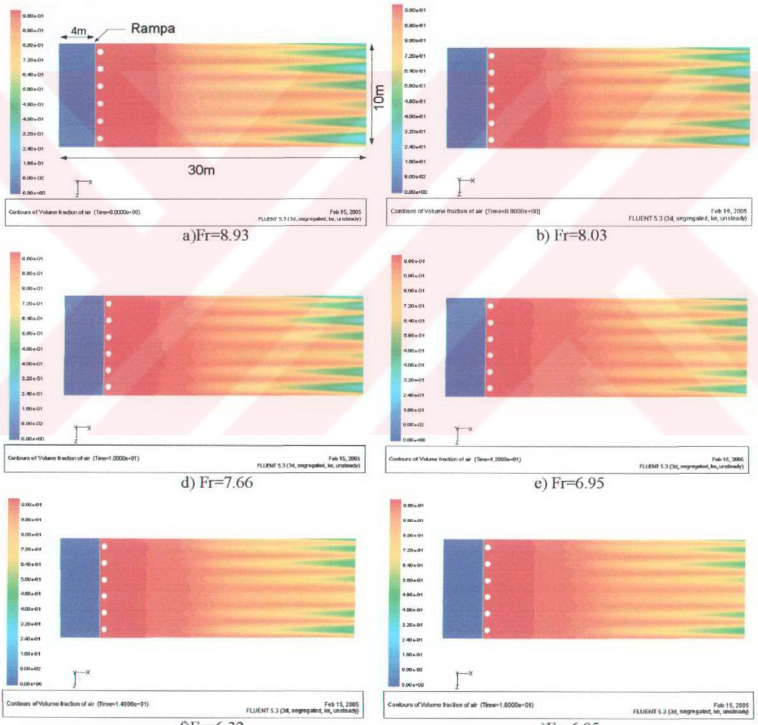
a)Fr=8.93, t=6s b) Fr=8.03, t=8s

d) Fr=7.66, t=10s e) Fr=6.95, t=12s

f)Fr=6.32, t=14s g)Fr=6.05, t=16s

Şekil 7.44 Farklı Fr sayıları için su jetinin boykesit görünüşü (t_r=0.15, α=9.65)

Şekil 7.45'te t_r=0.15, α=9.65 için farklı *Fr* sayılarında, dolusavak şut kanalı tabanındaki hava-su faz durumları gösterilmiştir. Su jeti saptırıcı tarafından tabandan sıçratıldıktan sonra, jetin şut tabanıyla tekrar birleştiği yer sarı renkli bölgelerin başladığı yerdir. Havalandırıcının mansabında tabana yakın hava karışım oranı da şekillerden yaklaşık olarak görülebilir. Havalandırıcının hemen mansabında tabandaki akımın hava karışımı hava bacaları hizasında daha fazladır. Akım havalandırıcı mansabında mesafe kat ettikçe hava ve su fazları iyice karışacak ve oldukça üniform bir dağılım sağlanmış olacaktır. Kısmi bir şut kanalı uzunluğu alındığından tabandaki tam üniform durum görülmemektedir. Şut kanalının görünen uzunluğundan daha uzun mesafelerinde bu durum net olarak kendini gösterecektir



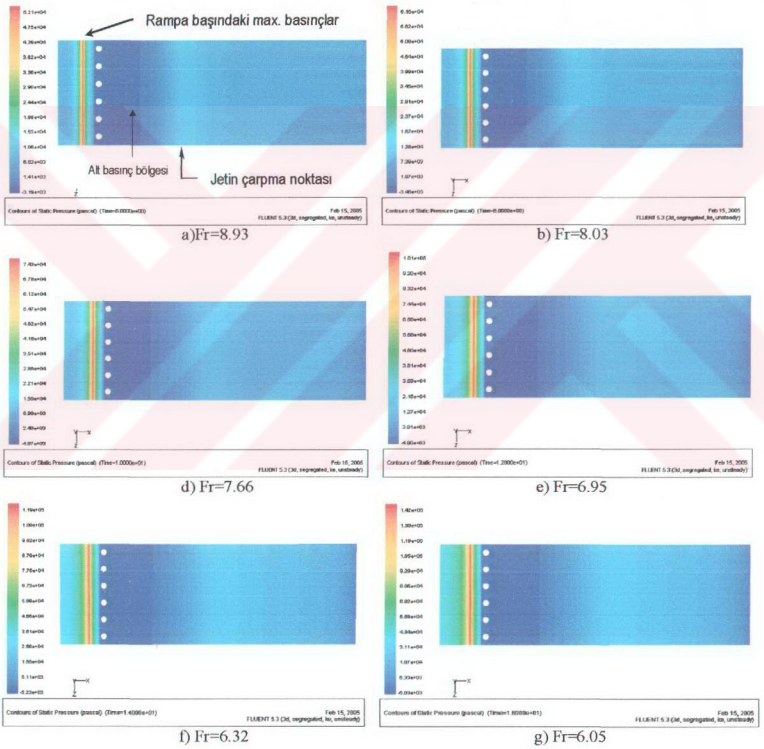
a)Fr=8.93 b) Fr=8.03

d) Fr=7.66 e) Fr=6.95

f)Fr=6.32 g)Fr=6.05

Şekil 7.45 Farklı Fr sayıları için şut tabanındaki faz oranları (t_r=0.15, α=9.65)

Şekil 7.46'de t_r=0.15, α=9.65 için farklı *Fr* sayılarında dolusavak şut kanalı tabanındaki statik basınçlar gösterilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi hava bacalarının mansabında oluşan maksimum basınç noktası su jetinin tabana çarptığı nokta olarak kabul edilir. Rampanın hemen membasında akım ani bir açı değişimiyle karşılaştığından basınçların aşırı olarak arttığı görülür. Saptırıcıdan sonra akımda oluşan nap altı boşlukta basınçlar iyice düşmektedir. Burası altbasınç bölgesi diye adlandırılır. Bu bölgedeki basıncın düşmesi, havalandırma bacalarından hava emilmesini sağlar. Daha sonra su jetinin kanal tabanına çarpmasıyla tabandaki statik basınçlar tekrar artar ve mansaba doğru basınçlar dengeye oturur.



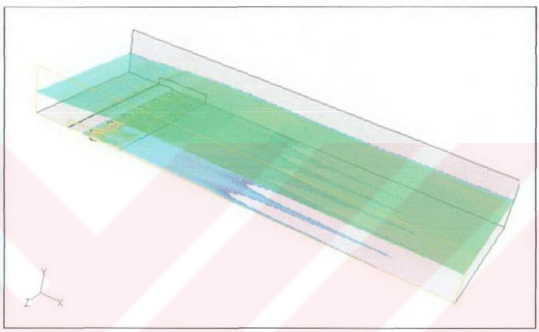
a)Fr=8.93 b) Fr=8.03

d) Fr=7.66 e) Fr=6.95

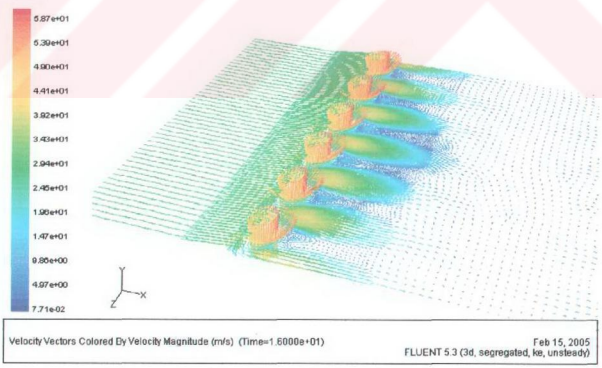
f) Fr=6.32 g) Fr=6.05

Şekil 7.46 t_r=0.15, α=9.65 için farklı Fr sayılarında şut tabanındaki basınçlar (N/m^2)

Şekil 7.47'de *Fr*=6.95, *tr*=0.15, *α*=9.65 için akımın serbest yüzeyleri görülmektedir. Hava karışımlı akımın serbest yüzeyi bu kadar net olmayacaktır. Buradaki serbest yüzeyler, yüzeye yakın belirlenmiş bir hava konsantrasyonunda tanımlanmış olan yüzeylerdir. Böylece su jetinin alt ve üst napı net bir şekilde görüntülenmiştir. Şekil 7.48'de ise *Fr*=6.06, *tr*=0.15, *α*=9.65, *D/L*=0.36 için, hava giriş bölgesindeki hız vektörleri gösterilmiştir. Havalandırma bacasından giren havanın giriş hızının büyüklüğü oldukça açık bir şekilde görülmektedir.

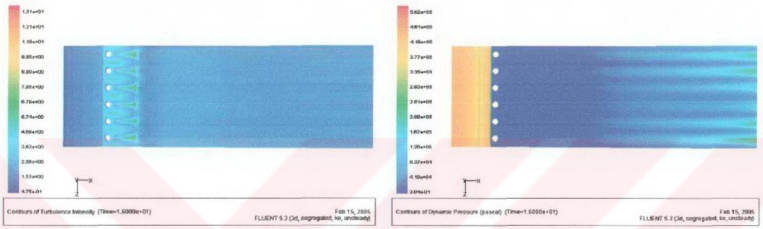


Şekil 7.47 Akımın serbest yüzey görünüşü (Fr=6.95, tr=0.15, α=9.65)



Şekil 7.48 Fr=6.06, tr=0.15, α=9.65, D/L=0.36 için hava girişi bölgesindeki hız vektörleri (m/s)

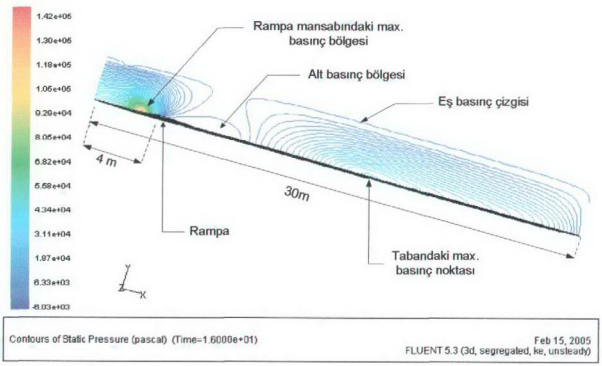
Şekil 7.49'da, *Fr*=6.06, *tr*=0.15, *α*=9.65, *D/L*=0.36 değerleri için dolusavak şut kanalı tabanındaki türbülans yoğunluğu ve dinamik basınçlar gösterilmiştir. Şekil 7.49(a)'da özellikle hava giriş ağızlarına yakın türbülans yoğunluğu yüksek olması dikkati çeker. Buradaki türbülans, akıma havanın karışmasında ve havalandırma kapasitesinin artmasında büyük rol oynar. Akım dengeye oturdukça türbülans yoğunluğu da azalmaktadır. Şekil (b)'de ise tabandaki dinamik basınçlar gösterilmiştir. Suyun tabana yapışık aktığı yerlerde dinamik basınçlar yüksektir.



(a) (b)

Şekil 7.49 Fr=6.06, tr=0.15, α=9.65, D/L=0.36 için şut kanalı tabanında **a)** Türbülans yoğunluğu, **b)** Dinamik basınçlar (N/m^2)

Şekil 7.50'de şut kanalı boykesitindeki basınç profili gösterilmiştir. Özellikle boşluk altbasınç bölgesindeki basınçlardaki düşme açıkça görülmektedir. Rampanın hemen başındaki ve su jetinin çarpma noktasındaki yüksek basınç bölgeleri de açık bir şekilde görünmektedir.



Şekil 7.50 Fr=6.06, tr=0.15, α=9.65, D/L=0.36 için boykesitteki eş basınç çizgileri (N/m^2)

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bölüm 2 ve 3'te literatür ışığında, kavitasyon önleyici dolusavak havalandırıcıları için detaylı bir çalışma sunulmuştur. Bölüm 4 ve 5'te Dolusavak havalandırıcıları gibi hidrolik uygulamalarda CFD modellerinin etkinliği tartışılmıştır. Bölüm 6'da, özellikle geniş dolusavak şut kanlarlında, daha iyi ve daha üniform bir hava karışımı sağlayabilen yeni bir havalandırıcı tipi belirlenmiştir. Bölüm 7'de *Alttan Alışlı Havalandırıcı* diye adlandıran yeni havalandırıcı tipinin tasarım kriterleri belirlenmiştir. Bu tezde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Yüksek hızlı akımlara maruz dolusavak şut kanallarındaki kavitasyon hasarını önlemek için havalandırıcılar kullanmak en etkili yöntemdir. Bunun dışında, dirençli yüzey malzemeleri kullanmak, yüzeyi yapay olarak pürüzlendirmek gibi yöntemler olsa da havalandırıcı kullanımı en yaygın olanıdır. Şut boyunca akıma karıştırılacak yeterli miktardaki hava konsantrasyonu, kavitasyon olayını dolayısıyla beton yüzeyin aşınıp dolusavağın kullanılmaz hale gelmesini önleyecektir. Bu nedenle dolusavak tasarımında havalandırıcılara özel ilgi gösterilmeli ve tasarım kriterleri iyi bilinmelidir.
2. Havalandırıcılar gibi hidrolik problemlerinde sayısal yöntemlerin (CFD) etkinliğini test etmek için, başka araştırmacılar tarafından yapılan model deneyi, prototip ve sayısal yöntem sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu gibi hidrolik uygulamalarda sayısal yöntemlerin (CFD modelleri), deneysel yöntemlere göre oldukça tatmin edici olduğu gösterilmiştir.
3. Fluent gibi bir CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modellemesiyle birebir ölçeklerle çalışılabilindiğinden ölçek etkileri beklenmeyecektir. CFD modellerindeki bazı kabullerden dolayı muhtemel hata paylarının, prototip datalarıyla karşılaştırıldığında, deneysel çalışmalardaki ölçek etkisi ve ölçüm gibi diğer hataların yanında çok daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca ekonomiklik, zaman, esneklik ve kolaylık açısından, CFD modellerinin uygulanması fiziksel model deneylerine göre daha avantajlıdır.
4. CFD modellerinin de bazı dezavantajları vardır: Genel amaçlı bir CFD yazılımı ancak, akışkanlar mekaniği ve sayısal yöntemler hakkında ileri düzey bilgiye sahip, tecrübeli ve kapsamlı bir ekibin uzun süreli çalışmasıyla hazırlanabilir (Fluent gibi). Kısmi problemleri çözmek için kişisel hazırlanmış sayısal analiz yöntemleri çok fazla esneklik sağlayamamakta ve sadece ilgili problemle sınırlı kalmaktadır. Üç boyutlu ve hassas CFD modellerinin çözümü için çok fazla bellek gereksinimi, işlemci gücü ve zamana ihtiyaç duyulur. Bazen fiziksel olmayan sonuçlar almak mümkündür. Bu tür programları doğru bir şekilde kullanmak belirli bir birikim ve deneyim gerektirir.

5. Çok fazlı ve serbest yüzeyli akımlar oldukça kompleks bir konudur. Fluent CFD yazılımı içindeki ASM veya VOF modelleri, dolusavak havalandırıcılarındaki gibi çok fazlı ve serbest yüzeyli akımların modellenmesinde oldukça etkilidir.
6. Klasik bir havalandırıcıda, düşük Fr sayısı, şut kanalı genişliğinin fazla olması, yetersiz hava girişi gibi durumlarda nap altı basınçlar çok fazla düşerek havalandırıcıyı batık hale getirebilir. Havalandırıcı tam olarak batık hale gelmese bile şut genişliğince üniform bir hava karışımı sağlamayabilir. Bu durumu önlemek ve havalandırma performansını arttırabilmek için bu tezde "***Alttan Alışlı Havalandırıcılar***" diye adlandırılan yeni bir havalandırıcı tipi önerilmektedir.
7. Alttan alışlı havalandırıcılar, klasik havalandırıcılardaki hava girişi için belirlenen minimum *Fr* sayısının altındaki *Fr* sayıları için bile yeterli hava girişi sağlayabilmektedir (Fr<4.5~5.5).
8. Alttan alışlı havalandırıcılar, özellikle geniş açıklıklı dolusavak şut kanallarında kanal genişliği boyunca daha üniform bir hava karışımı sağlar.
9. Alttan alışlı havalandırıcılar tasarlanırken, havalandırma bacaları ve galerisi dışında, küçük eğimli bir saptırıcı kullanmak yeterli olacaktır. Ayrıca, eşik ve hava oluğu gibi elemanlara gerek yoktur.
10. Alttan alışlı havalandırıcıların tasarım ve uygulama alanında, tasarımcılara yardımcı olacak bazı faydalı bağıntılar, yüksek korelasyonla elde edilmiştir.
11. Alttan alışlı havalandırıcının havalandırma performansını belirlemek içi direkt ve endirekt yaklaşım olmak üzere iki yaklaşım sunulmuştur. Direkt yaklaşımda, akım ve havalandırıcı geometrisiyle ilgili tüm boyutsuz parametrelerin hava girişi üzerine doğrudan etkisi dikkate alınmıştır. Endirekt yaklaşımda ise, hava giriş oranı boyutsuz jet uzunluğuna bağlı olarak elde edilmiştir. Her iki yaklaşımdan da elde edilen bağıntılar havalandırıcı performansını belirlemede kullanılabilir. Ayrıca akım jeti altında oluşan atmosfer altı basınçlar incelenmiş ve bunun hava giriş olayı üzerine etkisi değerlendirilmiştir.
12. Direkt yaklaşımla havalandırıcı performansını belirlemek için, bu tezde elde edilen Denklem (7.4) veya (7.7)'de elde edilen bağıntılar önerilir. Endirekt yaklaşımla ise, (7.15) veya (7.16) denklemleri havalandırıcı performansını belirlemek için kullanılabilir. Alttan alışlı havalandırıcıların havalandırma ihtiyacını ve havalandırıcı boyutları bu bağıntılarla belirlenebilir. Diğer bir değişle uygulamacıların kolaylıkla kullanabileceği pratik yaklaşımlar sunmaktadır.
13. Denklem (7.7) ve (7.15)'te Fr<4.5 için hava girişinin olmayacağı kabul edilmesine rağmen alttan alışlı havalandırıcılar daha düşük *Fr* sayılarında bile yeterli ve üniform hava girişi sağlayabilir. Bu nedenle daha düşük *Fr* sayıları için Denklem (7.16) önerilmiştir.

14. Endirekt yaklaşımdaki rölatif jet uzunluğunu belirlemek için (7.11) denklemi kullanılabilir. Ancak bu denklemin boyut homojenliğinin bozulduğuna dikkat etmek gerekir. Denklemdeki t_r parametresinin birimi *metre* alınmalıdır.
15. Birçok araştırmacı tarafından kabul edilen ve hava giriş oranının jet uzunluğuna göre doğrusal değişimini öngören (7.12) denklemindeki katsayı alttan alışlı havalandırıcı için K=0.036 olarak elde edilmiştir. Bu değer diğer araştırmacıların klasik havalandırıcılar için önerdiği değerlere yakın fakat daha büyüktür. Bu da alttan alışlı havalandırıcılarının havalandırma kapasitesinin diğer havalandırıcılara göre daha iyi olduğunu gösterir.
16. Alttan alışlı havalandırıcılarda, hava giriş hızları için maksimum değer $U_{a(max)}$=120m/s alınmalıdır. Hava giriş hızı bu değerin üzerine çıkamayacağı kabul edilir. Ancak mümkünse, verilen bu limit değerin daha da altında maksimum hava giriş hızına göre tasarım yapılması önerilir($U_{a(max)}$<100 gibi). Tasarım sırasında hava giriş hızı, elde edilen (7.8) denklemiyle hesaplanarak, maksimum değeri aşıp aşmadığı kontrol edilebilir.
17. Bölüm 7'deki bağıntılar; $6.05 \le Fr \le 10.10$, $0.17 \le \tan\alpha \le 0.57$, $0.04 \le t_r / h \le 0.50$, $0.032 \le D^2 / Lh \le 0.539$, θ=7.59° için elde edilmiştir. Bu limitlerin dışında, denklemlerin doğruluğu kontrol edilmelidir.
18. Dolusavak yüzeyini kavitasyondan korumak için gerekli minimum hava konsantrasyonu, önceki araştırmacıların ortaya koyduğu değerlerin ortalaması olarak %6 alınabilir. Bu değer β=0.064 değerine karşılık gelmektedir ($\beta=C/(1-C)$). Bu tezde alttan alışlı havalandırıcılar için elde edilen en küçük değer β=0.067'dir. Dolayısıyla, verilen limitler dahilinde kavitasyon hasarından korunmak için gerekli hava konsantrasyonu bu havalandırıcı tarafından her durumda sağlanabilmiştir.

Öneriler:

1. Bu tezde dikkate alınmayan, alttan alışlı havalandırıcıların ana havalandırma galerisinin havalandırma üzerindeki etkileri ayrıca incelenebilir. Bununla birlikte, en iyi havalandırma performansı sağlayacak D/L oranı için bir optimizasyon çalışması yapılabilir.
2. Hidrolik yapılarda şimdiye kadar çok fazla uygulanma şansı olmayan CFD modelleri, akışkan problemlerini içeren her türlü hidrolik uygulamada kullanılabilir. Bu konuda Fluent, dünya çapında kabul görmüş bir yazılımdır.
3. Bu ve buna benzer çalışmaların fiziksel model deneyleriyle de desteklenmesi, elde edilen sonuçları daha da güçlendirebileceği gibi CFD modellerinin etkinliği konusunda gelecekteki çalışmalara daha fazla ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

1. Kells, J. A. and Smith, C. D., 1991, Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment, Canadian Journal of Civil Engineering, 18, No.3, 358-377.

2. Pinto, N. L. De S., 1988, Cavitation and aeration, *in Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation.* Edited by R.B. Jansen, Kluver Academic Publishers, 620-634.

3. Abbsoğlu, C., and Okay, G., 1992, The remedial structures on the spillway of Keban dam, Water Power and Dam Construction, Dec., p22-27.

4. Chanson, H., 1989, Study of air entrainment and aeration devices, Journal of Hydraulic Research, 27, No.3, 301-319.

5. Russell, S. O., and Sheenan, G. J., 1974, Effect of entrained air on cavitation damage, Canadian Journal of Civil engineering, Vol.1, 97-107.

6. 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, 34, No.3, 42-44.

7. Wood, I.R., Ackers, P. and Loveless, J., 1983, General method for critical point on spillways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109, No.2, 308-312.

8. Pinto, N. L. De S. and Neidert, S. H., 1983, Evaluating entrained air flow through aerators, Water Power and Dam Construction, 35, No. 8, 40-42.

9. Volkart, P. and Rutschmann, P., 1984, Rapid flow in spillways chutes with and without deflectors a model- prototype comparison, Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Research, Esslingen, Germany, September 3-6, 4.5-1 to 4.5-8

10. Falvey, H. and Ervine, D. A., 1988, Aeration in jets and high velocity flows. Proceedings of the International Symposium on Model-Prototype Correlation of Hydraulic Structures, American Society of Civil Engineers/International Association for Hydraulic Research, Colorado Springs, CO, August 9-11, 25-55

11. Tan, T. P., 1984, Model studies of aerators on spillways. Research Report 84-6, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

12. Low, H. S. 1986, Model studies of Clyde Dam spillways aerators, Research report 85-6, Dept. of Civ. Eng., Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

13. Wood, I. R., 1988, Aerators-the interaction of nappe and duct air entrainment, Int. Symp. On Hydr. For High Dams, IAHR, 611-618.

14. Chanson, H., 1988, A model study of aerator performance, Thesis presented to The University of Canterbury, at Christchurch, New Zealand, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

15. Chanson, H., 1989, Flow downstream of aerator-aerator spacing, Journal of Hydraulic Research, 27, No.4, 519-536.

16. Rutschmann, P. and Hager, W.H., 1990, Air entrainment by spillway aerators, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116, No.6, 765-782.

17. Pinto, N. L. De S., 1991, Prototype aerator measurements, *in Air Entrainment in Free Surface Flows,* Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications, Rotterdam, 115-130.

18. Volkart, P. and Rutschmann, P., 1991, Aerators on spillways, *in Air Entrainment in Free Surface Flows,* Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications, Rotterdam, 85-114.

19. Wood, I. R. 1991, Free surface air entrainment on spillways, *in Air Entrainment in Free Surface Flows,* Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications, Rotterdam, 55-84

20. Lee, W. and Hoopes, J. A., 1996, Prediction of cavitation damage for spillways., Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 122, No.9, 481-488.

21. Nie, M.-X., 2001, Cavitation prevention with roughened surface, Journal of Hydraulic Engineering, 127, No.10, 878-880.

22. Kökpınar, M. A. and Göğüş, M., 2002, High-speed jet flows over spillway aerators, Canadian Journal of Civil Engineering, Dec.29, No.6, 885-898.

23. Aydın, M.C., ve Aydın, S., 2004, Dolusavak şut kanalları üzerindeki havalandırıcı performanslarının CFD modelleri ile değerlendirilmesi, I. Ulusal Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Sempozyumu, DSİ Genel Müdürlüğü, Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, Ankara, 655-664.

24. Chanson, H., 1990, Study of air demand on spillway aerator, Journal of Fluid Engineering, 112, No.3, 343-350.

25. Marcano, A. and Castillejo, N., 1984, Model-prototype comparison of aeration devices of Guri Dam spillway. Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Structures, International Association for Hydraulic Research, Esslingen, Germany, September 3-6, 4.6-1 to 4.6-5.

26. Rutschmann, P., Volkart, P. and Wood, I. R., 1986, Air entrainment at spillway aerators., Proceedings of the 9th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland, New Zealand, December 8-12, 350-353.

27. Chanson, H., 1994, Aeration and deaeration at bottom aeration devices on spillways, Canadian Journal of Civil Engineering, 21, No.3, 404-409.

28. Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C. and Narayanan, R., 1990, Dam Outlet Works, *in Hydraulic Structures*, UK. 153-176.

29. Cassidy, J. and Elder, R., 1984, Spillways of high dams, *in Developments in Hydraulic Engineering 2*, Edited by P. Novak, Applied Science Publishers Ltd. Essex, UK, 153-173.

30. Chadwick, A.J. and Morfett, J. C., 1986, Spillways, *in Hydraulic in Civil Engineering,* London UK, 390-403.

31. Vischer, D., 1988, Recent developments in spillway design, Water Power and Dam Construction, 40, No.1, 8-9.

32. Oskolkov, A. G., and Semenkov, V. M., 1979, Experience in designing and maintance of spillway structures on large rivers in th USSR, Thirteenth International Congress on Large Dams, New Delhi, India, Q.50, R.46, 789-802.

33. Bruschin, J., 1987, Forced aeration of high velocity flows, Journal of Hydraulic Research 25, No.1, 5-14.

34. Pinto, N. L. De S., 1986, Basic hydraulics of shooting flows over aerators. Proceedings of the Specialty Conference on Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics and Hydraulics, American Society of Civil Engineers, Minneapolis, MN, June 3-6, 1007-1017.

35. Chanson, H., 1991, Aeration of a free jet above a spillway, Journal of Hydraulic Research, 29, No.5, 665-667.

36. Rutschmann, P. and Volkart, P., 1988, Spillway chute aeration, Water Power and Dam Construction 40, No.1, 10-15.

37. 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, Hydrologia und Glaziologie, No. 66, Zürich, Switzerland.

38. Rutschmann, P., 1988, Calculation and optimum shape of spillway chute aerators., Proceedings of The International Symposium on Model-Prototype Correlation of Hydraulic Structures, American Society of Civil Engineers /International Association For Hydraulic Research, Colorado Sprigs, Co, August 9-11, 118-128.

39. 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.

40. Rutschmann, P. and Hager, W.H., 1990, Design and performance of spillway chute aerators, International Water Power and Dam Construction, 42, No.1, 36-42.

41. Demiröz, E., 1985, Yüksek hızlı akımlar için dolusavak havalandırıcılarının proje kriterleri., Mühendislik Araştırma Grubu, Proje 606. TÜBİTAK, ANKARA.

42. Kobus, H. and Koschitzky, H. P., 1991, Local surface aeration at hydraulic structures *in Air Entrainment in Free Surface Flows,* Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications, Rotterdam, 29-54.

43. Vischer, D., Volkart, P. and Sigenthaler, A., 1982, Hydraulic modeling of air slots in open chute spillways. *in Papers Presented at the International Conference on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures,* Coverntry, U.K., 22-24 sept. 1982, Edited by H.S. Stephens and C.A. Stapleton. BHRA, Fluid Engineering Crafield, U.K. 239-252.

44. Soulis, J. V., 1991, A numerical method for subcritical and supercritical open channel flow calculation, International Journal For Numerical Methods in Fluids, 13, No.4, 437-464.

45. Güler, I., Behr, M. And Tezduyar, T., 1999, Parallel finite element computation of free-surface flows, Computational Mechanics, 23, No.2, 117-123.

46. Daneshmand, F., Sharan, S. K., and Kadivar, M. H., 2000, Finite-element analysis of double-free-surface flows through slit in dam., Journal of Engineering Mechanics, 126, No.5, 515-522.

47. Henderson, H. C., Kok, M., and De Koning, W. L., 1991, Computer-aided spillway design using the boundary element method and non-linear programming, International Journal For Numerical Methods in Fluids, 13, No.5, 625-641.

48. Zarrati, A. R., 1994, Mathematical Modeling of air-water mixtures in open channels, Journal of Hydraulic Research, 32, No.5, 707-720.

49. Brackbill, J. U., Kothe, D. B., and Zemach, C., 1992, A continuum method for modeling surface tension, J. Comput. Phys., 100, 335-354.

50. Pinto, N. L. de S. and Neidert, S. H., 1982, Model prototype conformity in spillway flow. International Conference on Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Coventry, England, September 22-24, 273-284.

51. Pinto, N. L. de S., 1984, Model evaluation of aerators in shooting flow, Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, H. Kobus, ed., International Association of Hydraulic Researchers, 4.2-1 – 4.2-6.

52. Pan, S. and Shao, Y., 1984, Scale Effects in modeling air demand by a ramp slot. Symposium On Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, International Association for Hydraulic Research, Esslingen Germany, September, 3-6, 4.7-1 – 4.7-5.

53. Demiröz, E., 1982, Ilısu Barajı dolusavak boşaltım kanalı havalandırması model çalışma raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Yayın no: Hİ-719, Model no: M-194, Ankara, 39s.

54. Demiröz, E., 1986, Dolusavak boşaltım kanalı havalandırması için yapıya ilave edilecek havalandırıcılara ait proje kriterlerinin belirlenmesi. DSİ, Teknik araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No: Hİ-754, Model No: M-212. Ankara, 220s.

55. Rutschmann, P. and Hager, W.H., 1992, Air entrainment by spillway aerators(Closure), Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118, No.1, 116-119

56. Sarkar, S., and Balakrishnan, L., 1990, Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer, ICASE Report 90-18, NASA CR 182002.

57. Cebeci, T. and Bradshaw, P., 1977, Momentum transfer in boundary layers, Hemisphere Publishing Corporation, New York.

58. Chapra, C.S. ve Canale, R.P., 2003, *Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler için Sayısal Yöntemler*, (Türkçe çevrisi) Literatür Yayınları: 82, İstanbul.1004s.

59. Çınar, B. 1992, Berke Barajı dolusavağı model deney raporu, DSİ, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı, Yayın no. Hİ-831, Model No: M-262, Ankara, 61s.

60. Demiröz, E., 1982, Sır Barajı dolusavak şut kanalı havalandırması model çalışmaları raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Yayın no: Hİ-721, Model no: M-199, Ankara, 31s.

61. Kobus, H. and Koschitzky, H. P., 1991, Local surface aeration at hydraulic structures *in Air Entrainment in Free Surface Flows,* Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications, Rotterdam, 29-54.

62. Kökpınar, M. A., 1996, Air-entrainment in high speed free surface flows, The Thesis of PhD, The Graduate Scholl of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.

63. Rutschmann, P. and Hager, W.H., 1991, "ERRATA", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117, No.4, 545.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini tamamladıktan sonra, 1991-1995 yılları arasında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitimini tamamladı. 1996-1998 yılları arasında F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Hidrolik dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 1998 yılından bu yana F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı Hidrolik dalında doktora eğitimine devam etmektedir.

Mehmet Cihan AYDIN

EKLER

EK-1. REGRESYON İÇİN MATLAB PROGRAMI

```
%EN KUCUK KARELER ILE EGRI UYDURMA
%(GENEL MATRİS FORMU KULLANILMISTIR)
%Bağımlı ve bağımsız degiskenleri iceren data dosyası
%yuklenmelidir
load beta1.dat
dataxy=beta1
[n,m1]=size(dataxy);
m=m1-1;
if n<m+1
   error('n<m+1 oldugundan regresyon mumkun degildir');
end
x=dataxy(:,1:m)
y=dataxy(:,m1)
disp('1-POLINOM REGRESYONU');
disp('2-COKLU DOGRUSAL REGRESYON');
disp('3-ÇOKLU USSEL REGRESYON');
secenek=input('bir model giriniz:');
e=ones(length(x),1);
a=0;,b=0;,Z=0;,A=0;
switch secenek
case 1   % m. dereceden polinom egrisi uydurması
   if ~isequal(size(x),size(y))
      error('x and y vectorleri aynı boyutta olmalıdır')
   end
   m=input('polinom derecesini gir:');
   for j=1:m+1
      Z(1:n,j)=x.^(j-1);
   end
   a=Z'*Z;
   b=Z'*y;
   A=a\b;
   top=0;
   for j=1:m+1
      top=top+A(j)*x.^(j-1);
   end
   yy=top;
   disp('Denklemin katsayıları(A):'), disp(A);
   disp('y = A1 + A2*x + A3*x^2 + ... + A(m+1)*x^m');
   r=koralasyon1(x,y,yy,n);
   xy=corrcoef(x,y)
case 2 % m degiskenli coklu regresyon
   Z=[e x];
   a=Z'*Z;
   b=Z'*y;
   A=a\b;
   yy=Z*A;
   disp('Denklemin katsayıları(A):'), disp(A);
   disp('y = A1 + A2*x1 + A3*x2 + ... + A(m+1)*x(m)');
```

```
   r=koralasyon1(x,y,yy,n);
case 3 % m degiskenli ussel coklu regresyon
   Z=[e log(x)];
   logy=log(y);
   a=Z'*Z
   b=Z'*logy
   A=a\b;
   logyy=Z*A;
   yy=exp(logyy);
   r=korelasyon1(x,y,yy,n);
   A(1)=exp(A(1)); %Denklem katsayılarının A(1)=log(A(1))
   %oldugundan A(1)icin bu donusum yapılır. yy degerleri
   %log(A(1)) ile heaplandigindan yy'yi heapladıktan sonra
   %bu donusun yapilmistir
   disp('Denklemin katsayıları(A):'), disp(A);
   disp('y = A1 * x1^A2 * x2^A3 ... x(m)^A(m+1)');
otherwise
   disp('_____Böyle bir model tanımlanmamıştır!!!____');
end
```

Korelasyon Katsayısı ve Grafik Çizimi İçin Alt Program

```
function r=korelasyon(x,y,yy,n)
St=sum((y-mean(y)).^2);
Sr=sum((y-yy).^2);
r=sqrt((St-Sr)/St);
disp('Korelasyon Katsayısı(r):');, disp(r);

%#### POLINOM REGRESYONU ICIN BU KISIM SIRALI ####
%####    x DEGERLERINE GORE CIZDIRILEBILIR    ####
[xs,k]=sort(x);
ys=y(k);
yys=yy(k);
plot(xs,ys,'o',xs,yys,'-');
%title('UYDURULAN EGRININ DEGISIMI')
xlabel('Beta(Hesap)')
ylabel('Beta(Fluent)')
```

EK-2. İNCELENEN HAVALANDIRICI MODELİN CFD ANALİZ SONUÇLARI

Tablo 1. tr=0.10 m, D/L=0.20, α=9.65, B=10.00m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.170	0.40	2.00	0.628	0.200	52.19	3.278	3791	0.9678	4.21	10.525	0.410
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.170	0.40	2.00	0.628	0.133	59.33	3.726	4939	0.8406	5.23	8.717	0.287
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.170	0.40	2.00	0.628	0.100	61.71	3.875	5363	0.6846	5.82	7.275	0.215
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.170	0.40	2.00	0.628	0.080	66.41	4.171	6233	0.6365	6.45	6.450	0.174
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.170	0.40	2.00	0.628	0.053	73.49	4.615	7658	0.5214	7.22	4.813	0.115
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.170	0.40	2.00	0.628	0.040	74.98	4.709	7969	0.4069	7.70	3.850	0.084
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.170	0.40	2.00	0.628	0.032	79.81	5.012	9030	0.3689	8.00	3.200	0.067

Tablo 2. tr=0.10 m, D/L=0.24, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.170	0.40	1.67	0.754	0.240	47.71	3.595	3183	0.8126	4.60	11.500	0.449
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.170	0.40	1.67	0.754	0.160	53.49	4.031	4038	0.6873	5.80	9.667	0.310
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.170	0.40	1.67	0.754	0.120	55.20	4.160	4318	0.5512	6.40	8.000	0.231
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.170	0.40	1.67	0.754	0.096	59.22	4.463	4993	0.5099	7.00	7.000	0.186
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.170	0.40	1.67	0.754	0.064	65.15	4.910	6067	0.4130	8.00	5.333	0.123
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.170	0.40	1.67	0.754	0.048	66.04	4.977	6228	0.3180	8.20	4.100	0.089
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.170	0.40	1.67	0.754	0.038	70.12	5.284	7020	0.2868	8.60	3.440	0.070

Tablo 3. tr=0.10 m, D/L=0.30,α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.170	0.60	2.00	1.413	0.450	27.83	3.932	2022	0.5162	5.29	13.225	0.492
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.170	0.60	2.00	1.413	0.300	30.80	4.352	2524	0.4296	6.65	11.083	0.335
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.170	0.60	2.00	1.413	0.225	31.44	4.442	2654	0.3388	7.23	9.038	0.247
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.170	0.60	2.00	1.413	0.180	33.63	4.752	3070	0.3135	7.81	7.810	0.198
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.170	0.60	2.00	1.413	0.120	36.59	5.170	3678	0.2504	8.59	5.727	0.129
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.170	0.60	2.00	1.413	0.090	36.57	5.167	3665	0.1871	8.59	4.295	0.092
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.170	0.60	2.00	1.413	0.072	38.72	5.471	4112	0.1680	8.97	3.588	0.073

Tablo 4. tr=0.10 m, D/L=0.36, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.170	0.60	1.67	1.696	0.539	24.89	4.220	1723	0.4399	6.20	15.500	0.528
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.170	0.60	1.67	1.696	0.359	27.29	4.627	2123	0.3613	7.50	12.500	0.356
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.170	0.60	1.67	1.696	0.269	27.73	4.702	2216	0.2829	8.00	10.000	0.261
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.170	0.60	1.67	1.696	0.216	29.63	5.024	2569	0.2623	8.40	8.400	0.209
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.170	0.60	1.67	1.696	0.144	32.17	5.455	3076	0.2094	9.40	6.267	0.136
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.170	0.60	1.67	1.696	0.108	32.01	5.428	3031	0.1548	9.50	4.750	0.097
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.170	0.60	1.67	1.696	0.086	33.76	5.724	3378	0.1380	9.85	3.940	0.076

Tablo 5. tr=0.15 m, D/L=0.20, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.170	0.40	2.00	0.628	0.200	60.25	3.784	3418	0.8726	4.68	11.700	0.473
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.170	0.40	2.00	0.628	0.133	67.95	4.267	4348	0.7400	6.00	10.000	0.328
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.170	0.40	2.00	0.628	0.100	70.98	4.458	4742	0.6053	6.85	8.563	0.248
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.170	0.40	2.00	0.628	0.080	76.96	4.833	5581	0.5699	7.60	7.600	0.201
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.170	0.40	2.00	0.628	0.053	86.80	5.451	7104	0.4836	9.00	6.000	0.136
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.170	0.40	2.00	0.628	0.040	89.47	5.619	7541	0.3850	9.50	4.750	0.100
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.170	0.40	2.00	0.628	0.032	95.79	6.016	8639	0.3529	10.00	4.000	0.080

Tablo 6. tr=0.15 m, D/L=0.24, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (^{5}–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.170	0.40	1.67	0.754	0.240	54.10	4.077	2744	0.7005	5.20	13.000	0.510
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.170	0.40	1.67	0.754	0.160	60.10	4.529	3383	0.5758	6.83	11.383	0.348
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.170	0.40	1.67	0.754	0.120	62.72	4.727	3687	0.4706	7.68	9.600	0.263
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.170	0.40	1.67	0.754	0.096	68.30	5.147	4383	0.4476	8.46	8.460	0.214
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.170	0.40	1.67	0.754	0.064	76.86	5.792	5556	0.3783	9.80	6.533	0.145
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.170	0.40	1.67	0.754	0.048	78.64	5.926	5815	0.2969	10.25	5.125	0.106
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.170	0.40	1.67	0.754	0.038	83.91	6.323	6619	0.2704	10.80	4.320	0.084

Tablo 7. tr=0.15 m, D/L=0.30, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.170	0.60	2.00	1.413	0.450	32.46	4.587	1584	0.4044	7.02	17.550	0.573
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.170	0.60	2.00	1.413	0.300	36.79	5.198	2050	0.3489	8.90	14.833	0.400
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.170	0.60	2.00	1.413	0.225	38.24	5.403	2244	0.2864	10.02	12.525	0.300
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.170	0.60	2.00	1.413	0.180	41.27	5.831	2632	0.2688	11.20	11.200	0.243
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.170	0.60	2.00	1.413	0.120	45.51	6.431	3221	0.2193	12.80	8.533	0.161
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.170	0.60	2.00	1.413	0.090	45.66	6.452	3231	0.1650	12.80	6.400	0.115
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.170	0.60	2.00	1.413	0.072	48.96	6.918	3721	0.1520	13.60	5.440	0.092

Tablo 8. tr=0.15 m, D/L=0.36, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.170	0.60	1.67	1.696	0.539	27.21	4.614	1193	0.3046	6.98	17.450	0.577
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.170	0.60	1.67	1.696	0.359	30.71	5.207	1545	0.2630	8.79	14.650	0.401
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.170	0.60	1.67	1.696	0.269	32.01	5.428	1695	0.2164	9.75	12.188	0.302
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.170	0.60	1.67	1.696	0.216	34.71	5.885	2013	0.2056	10.85	10.850	0.245
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.170	0.60	1.67	1.696	0.144	38.35	6.503	2480	0.1688	12.56	8.373	0.163
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.170	0.60	1.67	1.696	0.108	38.50	6.528	2487	0.1270	12.65	6.325	0.117
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.170	0.60	1.67	1.696	0.086	41.00	6.952	2826	0.1154	13.30	5.320	0.093

Tablo 9. tr=0.20 m, D/L=0.20, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.170	0.40	2.00	0.628	0.200	68.30	4.289	3640	0.9293	5.16	12.900	0.536
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.170	0.40	2.00	0.628	0.133	74.76	4.695	4353	0.7409	6.95	11.583	0.361
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.170	0.40	2.00	0.628	0.100	79.92	5.019	4980	0.6357	8.14	10.175	0.279
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.170	0.40	2.00	0.628	0.080	87.59	5.501	5967	0.6094	9.33	9.330	0.229
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.170	0.40	2.00	0.628	0.053	99.57	6.253	7704	0.5245	11.51	7.673	0.156
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.170	0.40	2.00	0.628	0.040	103.45	6.497	8319	0.4248	12.51	6.255	0.116
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.170	0.40	2.00	0.628	0.032	111.48	7.001	9657	0.3945	13.30	5.320	0.093

Tablo 10. tr=0.20 m, D/L=0.24, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.170	0.40	1.67	0.754	0.240	60.82	4.583	2858	0.7297	5.76	14.400	0.573
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.170	0.40	1.67	0.754	0.160	67.11	5.057	3474	0.5913	7.94	13.233	0.389
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.170	0.40	1.67	0.754	0.120	70.91	5.344	3878	0.4950	9.13	11.413	0.297
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.170	0.40	1.67	0.754	0.096	77.18	5.816	4590	0.4687	10.52	10.520	0.242
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.170	0.40	1.67	0.754	0.064	87.38	6.585	5877	0.4001	12.50	8.333	0.165
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.170	0.40	1.67	0.754	0.048	90.50	6.820	6313	0.3223	13.30	6.650	0.122
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.170	0.40	1.67	0.754	0.038	98.25	7.404	7445	0.3041	14.49	5.796	0.099

Tablo 11. tr=0.20m, D/L=0.30, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.170	0.60	2.00	1.413	0.450	35.52	5.019	1368	0.3493	7.37	18.425	0.627
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.170	0.60	2.00	1.413	0.300	39.74	5.615	1709	0.2909	9.67	16.117	0.432
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.170	0.60	2.00	1.413	0.225	40.82	5.768	1799	0.2296	10.83	13.538	0.320
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.170	0.60	2.00	1.413	0.180	44.19	6.244	2107	0.2152	12.17	12.170	0.260
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.170	0.60	2.00	1.413	0.120	49.64	7.014	2671	0.1818	14.28	9.520	0.175
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.170	0.60	2.00	1.413	0.090	50.94	7.198	2824	0.1442	15.05	7.525	0.129
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.170	0.60	2.00	1.413	0.072	55.97	7.909	3425	0.1399	16.21	6.484	0.105

Tablo 12. tr=0.20 m, D/L=0.36, α=9.65, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.170	0.60	1.67	1.696	0.539	30.87	5.234	1079	0.2755	8.14	20.350	0.654
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.170	0.60	1.67	1.696	0.359	35.08	5.948	1400	0.2383	10.92	18.200	0.458
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.170	0.60	1.67	1.696	0.269	35.82	6.074	1457	0.1860	12.11	15.138	0.337
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.170	0.60	1.67	1.696	0.216	38.89	6.594	1721	0.1757	13.70	13.700	0.275
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.170	0.60	1.67	1.696	0.144	43.81	7.428	2202	0.1499	15.68	10.453	0.186
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.170	0.60	1.67	1.696	0.108	45.04	7.637	2333	0.1191	16.47	8.235	0.136
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.170	0.60	1.67	1.696	0.086	49.53	8.398	2834	0.1158	16.67	6.668	0.112

Tablo 13. tr=0.10 m, D/L=0.20, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.260	0.40	2.00	0.628	0.200	53.33	3.349	3963	1.0118	4.22	10.550	0.419
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.260	0.40	2.00	0.628	0.133	60.53	3.801	5149	0.8764	5.25	8.750	0.292
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.260	0.40	2.00	0.628	0.100	63.00	3.956	5597	0.7145	5.85	7.313	0.220
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.260	0.40	2.00	0.628	0.080	67.68	4.250	6482	0.6619	6.48	6.480	0.177
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.260	0.40	2.00	0.628	0.053	74.81	4.698	7947	0.5410	7.25	4.833	0.117
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.260	0.40	2.00	0.628	0.040	76.38	4.797	8281	0.4228	7.80	3.900	0.086
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.260	0.40	2.00	0.628	0.032	81.23	5.101	9367	0.3826	8.25	3.300	0.068

Tablo 14. tr=0.10 m, D/L=0.24, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.260	0.40	1.67	0.754	0.240	48.81	3.678	3338	0.8522	4.60	11.500	0.460
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.260	0.40	1.67	0.754	0.160	54.67	4.120	4227	0.7194	5.81	9.683	0.317
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.260	0.40	1.67	0.754	0.120	56.52	4.259	4535	0.5789	6.42	8.025	0.237
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.260	0.40	1.67	0.754	0.096	60.48	4.558	5214	0.5325	7.02	7.020	0.190
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.260	0.40	1.67	0.754	0.064	66.41	5.005	6315	0.4299	8.04	5.360	0.125
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.260	0.40	1.67	0.754	0.048	67.37	5.077	6498	0.3318	8.34	4.170	0.091
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.260	0.40	1.67	0.754	0.038	71.46	5.385	7305	0.2984	8.80	3.520	0.072

Tablo 15. tr=0.10 m, D/L=0.30, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.260	0.60	2.00	1.413	0.450	28.63	4.045	2156	0.5504	5.49	13.725	0.506
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.260	0.60	2.00	1.413	0.300	31.65	4.472	2683	0.4566	6.84	11.400	0.344
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.260	0.60	2.00	1.413	0.225	32.32	4.567	2822	0.3602	7.23	9.038	0.254
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.260	0.60	2.00	1.413	0.180	34.51	4.876	3251	0.3320	8.00	8.000	0.203
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.260	0.60	2.00	1.413	0.120	37.48	5.296	3880	0.2642	8.78	5.853	0.132
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.260	0.60	2.00	1.413	0.090	37.45	5.292	3862	0.1972	8.78	4.390	0.094
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.260	0.60	2.00	1.413	0.072	39.60	5.595	4328	0.1768	9.17	3.668	0.075

Tablo 16. tr=0.10 m, D/L=0.36, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.260	0.60	1.67	1.696	0.539	25.63	4.346	1844	0.4708	6.23	15.575	0.543
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.260	0.60	1.67	1.696	0.359	28.05	4.756	2261	0.3848	7.55	12.583	0.366
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.260	0.60	1.67	1.696	0.269	28.56	4.843	2372	0.3028	8.10	10.125	0.269
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.260	0.60	1.67	1.696	0.216	30.48	5.168	2744	0.2802	8.60	8.600	0.215
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.260	0.60	1.67	1.696	0.144	33.02	5.599	3268	0.2225	9.46	6.307	0.140
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.260	0.60	1.67	1.696	0.108	32.83	5.567	3215	0.1642	9.53	4.765	0.099
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.260	0.60	1.67	1.696	0.086	34.58	5.863	3572	0.1459	10.00	4.000	0.078

Tablo 17. tr=0.15 m, D/L=0.20, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.260	0.40	2.00	0.628	0.200	61.69	3.874	3585	0.9153	4.70	11.750	0.484
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.260	0.40	2.00	0.628	0.133	69.50	4.365	4550	0.7744	6.03	10.050	0.336
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.260	0.40	2.00	0.628	0.100	72.55	4.556	4960	0.6331	6.90	8.625	0.253
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.260	0.40	2.00	0.628	0.080	78.50	4.930	5814	0.5937	7.68	7.680	0.205
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.260	0.40	2.00	0.628	0.053	88.47	5.556	7383	0.5026	9.10	6.067	0.139
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.260	0.40	2.00	0.628	0.040	91.49	5.746	7854	0.4010	9.60	4.800	0.103
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.260	0.40	2.00	0.628	0.032	97.63	6.131	8978	0.3667	10.25	4.100	0.082

Tablo 18. tr=0.15 m, D/L=0.24, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.260	0.40	1.67	0.754	0.240	55.46	4.179	2886	0.7368	5.23	13.075	0.522
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.260	0.40	1.67	0.754	0.160	61.57	4.640	3555	0.6051	6.85	11.417	0.357
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.260	0.40	1.67	0.754	0.120	64.19	4.837	3867	0.4936	7.72	9.650	0.269
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.260	0.40	1.67	0.754	0.096	69.90	5.268	4592	0.4689	8.50	8.500	0.219
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.260	0.40	1.67	0.754	0.064	78.55	5.920	5806	0.3953	9.88	6.587	0.148
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.260	0.40	1.67	0.754	0.048	80.41	6.060	6082	0.3105	10.40	5.200	0.108
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.260	0.40	1.67	0.754	0.038	85.65	6.455	6905	0.2821	10.90	4.360	0.086

Tablo 19. tr=0.15 m, D/L=0.30, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.260	0.60	2.00	1.413	0.450	32.40	4.578	1576	0.4024	7.05	17.625	0.572
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.260	0.60	2.00	1.413	0.300	36.77	5.196	2059	0.3504	9.00	15.000	0.400
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.260	0.60	2.00	1.413	0.225	37.97	5.365	2207	0.2817	10.08	12.600	0.298
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.260	0.60	2.00	1.413	0.180	41.04	5.799	2599	0.2654	11.25	11.250	0.242
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.260	0.60	2.00	1.413	0.120	45.72	6.460	3254	0.2215	13.40	8.933	0.162
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.260	0.60	2.00	1.413	0.090	45.97	6.496	3278	0.1674	13.20	6.600	0.116
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.260	0.60	2.00	1.413	0.072	50.47	7.131	3980	0.1626	14.40	5.760	0.095

Tablo 20. tr=0.15 m, D/L=0.36, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.260	0.60	1.67	1.696	0.539	28.15	4.773	1288	0.3288	7.00	17.500	0.597
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.260	0.60	1.67	1.696	0.359	31.68	5.372	1657	0.2820	8.82	14.700	0.413
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.260	0.60	1.67	1.696	0.269	33.04	5.602	1819	0.2322	9.80	12.250	0.311
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.260	0.60	1.67	1.696	0.216	36.20	6.138	2210	0.2257	10.93	10.930	0.256
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.260	0.60	1.67	1.696	0.144	39.75	6.740	2692	0.1833	12.60	8.400	0.169
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.260	0.60	1.67	1.696	0.108	39.63	6.720	2655	0.1356	12.80	6.400	0.120
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.260	0.60	1.67	1.696	0.086	42.26	7.166	3034	0.1239	13.46	5.384	0.096

Tablo 21. tr=0.20 m, D/L=0.20, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.260	0.40	2.00	0.628	0.200	70.00	4.396	3824	0.9763	5.16	12.900	0.550
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.260	0.40	2.00	0.628	0.133	76.46	4.802	4556	0.7754	6.69	11.150	0.369
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.260	0.40	2.00	0.628	0.100	81.66	5.128	5199	0.6637	8.14	10.175	0.285
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.260	0.40	2.00	0.628	0.080	89.53	5.622	6235	0.6367	9.33	9.330	0.234
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.260	0.40	2.00	0.628	0.053	101.58	6.379	8024	0.5463	11.51	7.673	0.159
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.260	0.40	2.00	0.628	0.040	105.60	6.632	8660	0.4422	12.51	6.255	0.118
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.260	0.40	2.00	0.628	0.032	113.71	7.141	10047	0.4104	13.69	5.476	0.095

Tablo 22. tr=0.20 m, D/L=0.24, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.260	0.40	1.67	0.754	0.240	62.47	4.708	3017	0.7702	5.76	14.400	0.588
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.260	0.40	1.67	0.754	0.160	68.57	5.167	3631	0.6180	7.94	13.233	0.397
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.260	0.40	1.67	0.754	0.120	73.39	5.531	4160	0.5310	9.13	11.413	0.307
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.260	0.40	1.67	0.754	0.096	79.16	5.965	4830	0.4932	10.52	10.520	0.249
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.260	0.40	1.67	0.754	0.064	89.40	6.737	6163	0.4196	12.50	8.333	0.168
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.260	0.40	1.67	0.754	0.048	92.65	6.982	6620	0.3380	13.30	6.650	0.125
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.260	0.40	1.67	0.754	0.038	99.91	7.529	7696	0.3144	15.00	6.000	0.100

Tablo 23. tr=0.20 m, D/L=0.30, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.260	0.60	2.00	1.413	0.450	36.60	5.172	1455	0.3715	7.37	18.425	0.646
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.260	0.60	2.00	1.413	0.300	41.05	5.800	1828	0.3111	9.67	16.117	0.446
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.260	0.60	2.00	1.413	0.225	42.08	5.946	1918	0.2448	11.02	13.775	0.330
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.260	0.60	2.00	1.413	0.180	45.51	6.431	2247	0.2295	12.36	12.360	0.268
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.260	0.60	2.00	1.413	0.120	51.04	7.212	2837	0.1931	14.47	9.647	0.180
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.260	0.60	2.00	1.413	0.090	52.45	7.411	3002	0.1533	15.44	7.720	0.132
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.260	0.60	2.00	1.413	0.072	56.42	7.972	3482	0.1422	16.59	6.636	0.106

Tablo 24. tr=0.20 m, D/L=0.36, α=14.57, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.260	0.60	1.67	1.696	0.539	31.98	5.423	1163	0.2969	8.14	20.350	0.678
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.260	0.60	1.67	1.696	0.359	36.33	6.160	1510	0.2570	10.92	18.200	0.474
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.260	0.60	1.67	1.696	0.269	37.18	6.304	1578	0.2014	12.11	15.138	0.350
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.260	0.60	1.67	1.696	0.216	40.28	6.830	1856	0.1895	13.70	13.700	0.285
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.260	0.60	1.67	1.696	0.144	45.37	7.693	2373	0.1616	16.08	10.720	0.192
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.260	0.60	1.67	1.696	0.108	46.34	7.857	2480	0.1266	16.87	8.435	0.140
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.260	0.60	1.67	1.696	0.086	49.71	8.429	2859	0.1168	17.86	7.144	0.112

Tablo 25. tr=0.10 m, D/L=0.20, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.570	0.40	2.00	0.628	0.200	52.20	3.278	3792	0.9681	4.45	11.125	0.410
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.570	0.40	2.00	0.628	0.133	59.32	3.725	4938	0.8405	5.50	9.167	0.287
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.570	0.40	2.00	0.628	0.100	67.43	4.235	6439	0.8219	6.10	7.625	0.235
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.570	0.40	2.00	0.628	0.080	72.21	4.535	7406	0.7563	6.75	6.750	0.189
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.570	0.40	2.00	0.628	0.053	79.63	5.001	9042	0.6156	7.65	5.100	0.125
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.570	0.40	2.00	0.628	0.040	81.59	5.124	9493	0.4847	8.10	4.050	0.091
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.570	0.40	2.00	0.628	0.032	86.68	5.444	10714	0.4376	8.56	3.424	0.073

Tablo 26. tr=0.10 m, D/L=0.24, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.570	0.40	1.67	0.754	0.240	52.45	3.953	3879	0.9903	4.85	12.125	0.494
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.570	0.40	1.67	0.754	0.160	58.62	4.418	4889	0.8321	6.15	10.250	0.340
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.570	0.40	1.67	0.754	0.120	60.85	4.586	5290	0.6753	6.70	8.375	0.255
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.570	0.40	1.67	0.754	0.096	64.94	4.894	6053	0.6181	7.50	7.500	0.204
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.570	0.40	1.67	0.754	0.064	71.28	5.372	7321	0.4984	8.45	5.633	0.134
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.570	0.40	1.67	0.754	0.048	72.61	5.472	7598	0.3880	8.90	4.450	0.098
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.570	0.40	1.67	0.754	0.038	76.90	5.795	8521	0.3481	9.50	3.800	0.077

Tablo 27. tr=0.10 m, D/L=0.30, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.570	0.60	2.00	1.413	0.450	31.35	4.430	2632	0.6720	5.68	14.200	0.554
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.570	0.60	2.00	1.413	0.300	34.54	4.881	3250	0.5532	7.28	12.133	0.375
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.570	0.60	2.00	1.413	0.225	35.44	5.008	3460	0.4417	7.81	9.763	0.278
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.570	0.60	2.00	1.413	0.180	37.77	5.337	3969	0.4053	8.39	8.390	0.222
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.570	0.60	2.00	1.413	0.120	41.00	5.793	4731	0.3221	9.36	6.240	0.145
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.570	0.60	2.00	1.413	0.090	41.16	5.816	4770	0.2436	9.55	4.775	0.104
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.570	0.60	2.00	1.413	0.072	43.37	6.128	5300	0.2165	9.94	3.976	0.082

Tablo 28. tr=0.10 m, D/L=0.36, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.250	0.570	0.60	1.67	1.696	0.539	28.06	4.758	2267	0.5788	6.65	16.625	0.595
13.00	0.60	21.67	8.93	0.167	0.570	0.60	1.67	1.696	0.359	30.80	5.222	2799	0.4764	8.08	13.467	0.402
18.00	0.80	22.50	8.03	0.125	0.570	0.60	1.67	1.696	0.269	31.55	5.350	2982	0.3807	8.70	10.875	0.297
24.00	1.00	24.00	7.66	0.100	0.570	0.60	1.67	1.696	0.216	33.60	5.697	3433	0.3506	9.26	9.260	0.237
40.00	1.50	26.67	6.95	0.067	0.570	0.60	1.67	1.696	0.144	36.29	6.153	4060	0.2764	10.30	6.867	0.154
56.00	2.00	28.00	6.32	0.050	0.570	0.60	1.67	1.696	0.108	36.27	6.150	4048	0.2067	10.48	5.240	0.110
75.00	2.50	30.00	6.06	0.040	0.570	0.60	1.67	1.696	0.086	38.08	6.457	4467	0.1825	11.10	4.440	0.086

Tablo 29. tr=0.15 m, D/L=0.20, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.570	0.40	2.00	0.628	0.200	66.28	4.162	4143	1.0577	4.90	12.250	0.520
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.570	0.40	2.00	0.628	0.133	74.46	4.676	5228	0.8898	6.27	10.450	0.360
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.570	0.40	2.00	0.628	0.100	77.90	4.892	5727	0.7311	7.10	8.875	0.272
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.570	0.40	2.00	0.628	0.080	84.16	5.285	6686	0.6828	8.05	8.050	0.220
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.570	0.40	2.00	0.628	0.053	94.71	5.948	8472	0.5768	9.45	6.300	0.149
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.570	0.40	2.00	0.628	0.040	98.09	6.160	9097	0.4645	10.04	5.020	0.110
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.570	0.40	2.00	0.628	0.032	104.76	6.579	10351	0.4228	10.90	4.360	0.088

Tablo 30. tr=0.15 m, D/L=0.24, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.570	0.40	1.67	0.754	0.240	59.91	4.515	3376	0.8619	5.45	13.625	0.564
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.570	0.40	1.67	0.754	0.160	66.40	5.004	4144	0.7053	7.10	11.833	0.385
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.570	0.40	1.67	0.754	0.120	69.58	5.244	4557	0.5817	8.05	10.063	0.291
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.570	0.40	1.67	0.754	0.096	75.56	5.694	5385	0.5499	8.87	8.870	0.237
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.570	0.40	1.67	0.754	0.064	84.78	6.389	6787	0.4621	10.51	7.007	0.160
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.570	0.40	1.67	0.754	0.048	87.21	6.572	7184	0.3668	11.24	5.620	0.117
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.570	0.40	1.67	0.754	0.038	92.88	6.999	8149	0.3329	11.95	4.780	0.093

Tablo 31. tr=0.15 m, D/L=0.30, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.570	0.60	2.00	1.413	0.450	36.93	5.218	2099	0.5359	7.40	18.500	0.652
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.570	0.60	2.00	1.413	0.300	41.73	5.896	2712	0.4616	9.50	15.833	0.454
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.570	0.60	2.00	1.413	0.225	43.50	6.147	2965	0.3785	10.75	13.438	0.341
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.570	0.60	2.00	1.413	0.180	46.83	6.617	3460	0.3533	12.15	12.150	0.276
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.570	0.60	2.00	1.413	0.120	51.79	7.318	4264	0.2903	14.20	9.467	0.183
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.570	0.60	2.00	1.413	0.090	52.46	7.413	4371	0.2232	14.50	7.250	0.132
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.570	0.60	2.00	1.413	0.072	55.67	7.866	4922	0.2011	15.55	6.220	0.105

Tablo 32. tr=0.15 m, D/L=0.36, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.375	0.570	0.60	1.67	1.696	0.539	31.39	5.322	1641	0.4189	7.50	18.750	0.665
13.00	0.60	21.67	8.93	0.250	0.570	0.60	1.67	1.696	0.359	35.26	5.979	2105	0.3583	9.45	15.750	0.460
18.00	0.80	22.50	8.03	0.188	0.570	0.60	1.67	1.696	0.269	36.96	6.267	2336	0.2982	10.56	13.200	0.348
24.00	1.00	24.00	7.66	0.150	0.570	0.60	1.67	1.696	0.216	40.00	6.782	2759	0.2818	11.75	11.750	0.283
40.00	1.50	26.67	6.95	0.100	0.570	0.60	1.67	1.696	0.144	44.17	7.489	3398	0.2313	13.90	9.267	0.187
56.00	2.00	28.00	6.32	0.075	0.570	0.60	1.67	1.696	0.108	44.39	7.527	3424	0.1748	14.06	7.030	0.134
75.00	2.50	30.00	6.06	0.060	0.570	0.60	1.67	1.696	0.086	47.26	8.013	3871	0.1581	14.55	5.820	0.107

Tablo 33. tr=0.20 m, D/L=0.20, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (--)	t_r/h (--)	tanα (--)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (--)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (--)	L_j (m)	L_j/h (--)	β (--)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.570	0.40	2.00	0.628	0.200	75.30	4.729	4420	1.1284	5.36	13.400	0.591
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.570	0.40	2.00	0.628	0.133	82.13	5.158	5257	0.8947	7.15	11.917	0.397
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.570	0.40	2.00	0.628	0.100	87.47	5.493	5962	0.7611	8.34	10.425	0.305
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.570	0.40	2.00	0.628	0.080	95.87	6.021	7157	0.7309	9.53	9.530	0.251
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.570	0.40	2.00	0.628	0.053	108.88	6.838	9210	0.6270	11.71	7.807	0.171
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.570	0.40	2.00	0.628	0.040	113.62	7.135	9980	0.5096	12.90	6.450	0.127
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.570	0.40	2.00	0.628	0.032	122.10	7.668	11580	0.4730	13.89	5.556	0.102

Tablo 34. tr=0.20 m, D/L=0.24, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.570	0.40	1.67	0.754	0.240	67.60	5.094	3535	0.9025	5.95	14.875	0.637
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.570	0.40	1.67	0.754	0.160	74.11	5.585	4239	0.7215	7.94	13.233	0.430
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.570	0.40	1.67	0.754	0.120	79.22	5.970	4849	0.6190	9.33	11.663	0.332
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.570	0.40	1.67	0.754	0.096	85.67	6.456	5668	0.5788	10.92	10.920	0.269
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.570	0.40	1.67	0.754	0.064	96.83	7.297	7222	0.4917	13.10	8.733	0.182
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.570	0.40	1.67	0.754	0.048	100.75	7.593	7822	0.3994	14.09	7.045	0.136
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.570	0.40	1.67	0.754	0.038	108.01	8.140	9002	0.3677	15.28	6.112	0.109

Tablo 35. tr=0.20 m, D/L=0.30, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.570	0.60	2.00	1.413	0.450	40.61	5.738	1800	0.4595	7.94	19.850	0.717
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.570	0.60	2.00	1.413	0.300	45.69	6.456	2281	0.3882	10.44	17.400	0.497
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.570	0.60	2.00	1.413	0.225	47.27	6.679	2438	0.3112	11.79	14.738	0.371
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.570	0.60	2.00	1.413	0.180	51.08	7.218	2857	0.2918	13.36	13.360	0.301
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.570	0.60	2.00	1.413	0.120	57.49	8.123	3626	0.2469	15.82	10.547	0.203
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.570	0.60	2.00	1.413	0.090	59.13	8.355	3853	0.1967	16.78	8.390	0.149
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.570	0.60	2.00	1.413	0.072	64.41	9.101	4588	0.1874	17.74	7.096	0.121

Tablo 36. tr=0.20 m, D/L=0.36, α=29.68, B=10.00 m

q_w (m^2/s)	h (m)	U_w (m/s)	Fr (–)	t_r/h (–)	tanα (–)	D (m)	L (m)	A_a (m^2)	D_s^2/Lh (–)	U_a (m/s)	q_a (m^2/s)	ΔP (N/m^2)	P_N (–)	L_j (m)	L_j/h (–)	β (–)
8.00	0.40	20.00	10.10	0.500	0.570	0.60	1.67	1.696	0.539	35.83	6.075	1480	0.3778	8.73	21.825	0.759
13.00	0.60	21.67	8.93	0.333	0.570	0.60	1.67	1.696	0.359	40.59	6.882	1913	0.3256	11.71	19.517	0.529
18.00	0.80	22.50	8.03	0.250	0.570	0.60	1.67	1.696	0.269	41.78	7.084	2025	0.2585	13.30	16.625	0.394
24.00	1.00	24.00	7.66	0.200	0.570	0.60	1.67	1.696	0.216	45.44	7.705	2403	0.2454	14.88	14.880	0.321
40.00	1.50	26.67	6.95	0.133	0.570	0.60	1.67	1.696	0.144	51.00	8.648	3045	0.2073	17.47	11.647	0.216
56.00	2.00	28.00	6.32	0.100	0.570	0.60	1.67	1.696	0.108	52.08	8.831	3188	0.1628	18.26	9.130	0.158
75.00	2.50	30.00	6.06	0.080	0.570	0.60	1.67	1.696	0.086	56.70	9.614	3799	0.1552	19.25	7.700	0.128