

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARININ
SAYISAL MODELLE İNCELENMESİ

Muhammed Reşid ÖZDEMİR

OCAK 2021

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARININ
SAYISAL MODELLE İNCELENMESİ

Hazırlayan
Muhammed Reşid ÖZDEMİR

Danışman
Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN
Prof. Dr. Fevzi ÖNEN
Doç.Dr. Ercan IŞIK

OCAK 2021

ONAY

Muhammed Reşid ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “**DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARININ SAYISAL MODELLE İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr Mehmet Cihan AYDIN

(Başkan)

Prof. Dr. Fevzi ÖNEN

(Üye)

Doc. Dr. Ercan IŞIK

(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr Zeki ARGUNHAN

Enstitü Müdürü

BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**DOLUSAVAK HAVALANDIRICILARININ SAYISAL MODELLE İNCELENMESİ**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 18/01/2021

Muhammed Reşid ÖZDEMİR

İmza

ÖZET

DOLUSAVAK HAVALANDIRICISININ SAYISAL MODELLE İNCELENMESİ

Muhammed Reşid ÖZDEMİR

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

Ocak 2021, 74 sayfa

Barajların hidrolik açıdan en önemli elmanı olan dolusavaklar baraj tipine ve geçireceği debilere göre birçok farklı tipte tasarlanmaktadır. Dolusavaklar tasarlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri de kavitasyon önleyici havalandırıcılardır. Bu çalışmada dolusavaklarda beton yüzeyinde oluşan kavitasyon hasarı ve dolusavak havalandırıcılarının kavitasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Alparslan II Barajının dolusavağı model olarak seçilmiştir. İlk olarak modelin üç boyutlu sayısal modeli hazırlanıp Flow 3D programıyla belirli yükseklik hız ve farklı Froude sayılarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Aydın (2005) tarafından önerilen alttan alıslı havalandırıcılar modele yerleştirilerek orijinal havalandırıcılara benzer şekilde HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve her iki havalandırıcının da kavitasyon hasarından yeterince korunduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dolusavak, Flow 3D, Havalandırıcı, Kavitasyon, Sayısal Analiz

ABSTRACT

SPILLWAY AERATOR INVESTIGATION BY NUMERICAL MODEL

Muhammed Reşid ÖZDEMİR

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate Education Institute

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

January 2021, 74 pages

The spillways, which are the most important hydraulic elements of the dams, are designed in many different types according to the dam type and flow rates. One of the most important issues to be considered when designing spillways is the design of the aerators. In this thesis, the cavitation damage on the concrete surface of spillways and the effects of aerators on the cavitation were investigated. For this purpose, the spillway of the Alparslan II Dam was chosen as a model. First, the three-dimensional numerical model was prepared and Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis was performed with the Flow 3D program at certain heights and speeds (for different Froude Numbers). Later, CFD analyses were carried out similar to the original aerators, which were placed in the model with the bottom aerators proposed by Aydin (2005). The results obtained from the CFD analyses were compared with each other and it was concluded that both aerators sufficiently protected from cavitation damage.

Keywords: Spillway, Flow 3D, Aerator, Cavitation, Numerical Analysis

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden baŐlayarak son aŐamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Cihan AYDIN'a Őükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans tez çalıŐmamda kullanmış olduğum FLOW-3D programı konusunda desteklerinden dolayı İOG Mühendislik'e, Alpaslan II Barajı ve HES Projesi Dolusavak Hidrolik Hesap Raporu ve Proje izim Detayları için ENERGO-PRO firmasına ve DSİ TAKK Dairesi Başkanlığına teşekkür ederim.



ÖNSÖZ

Su ve enerjinin önemi günümüzde artan nüfus ile birlikte çok daha fazla dikkate alınması gereken konulardan biri olmuştur. Su ve enerji gibi ihtiyaçları karşılamak için baraj gibi su yapıları inşa edilmektedir. Barajlar enerji üretimi sulama taşkın koruma gibi çeşitli amaçlarla farklı tiplerde inşa edilirler. Barajlar inşa edilirken veya tasarlanırken barajın elamanlarından biri olan dolusavaklar konusunda hassas davranılmalıdır. Dolusavak üzerindeki akım hızının artmasıyla mutlak basınç buhar basıncının altına düşerse buhar kabarcıkları meydana gelir. Yüksek basınç bölgesinde meydana gelen kabarcıklarda patlama gerçekleşir. Patlamayla kinetik enerji basınç enerjisine dönüşüp yüzeylerde aşınma oluşturur. Aşınma oluşan yüzeylerde yüksek kavitasyon meydana gelir ve kavitasyonu önlemenin en önemli yollarında biride yüksek basınç bölgelerinde havalandırıcıların inşa edilmesidir. Bu amaçla dolusavaklar üzerine yerleştirilen birçok farklı tipte havalandırıcılar mevcuttur. Buradaki amaç akıma herhangi bir dışardan enerji ihtiyacı duymadan en fazla ve taban boyunca üniform bir havalandırma sağlamaktır. Havalandırıcılar üzerinde yapılan çalışmalar daha çok fiziksel model deneyleriyle yürütülmektedir. Prototip ölçümleri ise oldukça zor ve az bulunur niteliktedir. Bununla birlikte deneysel model çalışmalarında bu tür çok fazlı akımlarda önemli derecede ölçek etkileri oluşmaktadır. Son yıllarda sayısal hesaplama tekniklerinin gelişmiş bilgisayarlarla kullanıldığı Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) teknikleri tasarımcılar ve araştırmacılar için önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu tezde HAD yöntemleri kullanılarak dolusavak havalandırıcılarının performansları araştırılmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİMİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİMİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
1.2. Dolusavaklarda Kaviteasyon	9
1.3. Kaviteasyon Riskinin Belirlenmesi	12
1.4. Dolusavak Havalandırıcıları	14
1.5. Diğer Kaviteasyon Önleme Yöntemleri	19
2. MATERYAL VE YÖNTEM	20
2.1. Örnek Dolusavak Modeli.....	20
2.2. Örnek Havalandırıcı Tasarımı.....	23
2.3. Hava Konsantrasyonunun Tayini.....	26
2.4. Sayısal Model	26
2.5 Hava Giriş Modeli (Air Entrainment Model)	32
2.6. Sayısal Model Geometrileri	33
2.7. Sayısal Modellerin Ağ Yapıları	36
2.8. Sayısal Modellerin Sınır Koşulları	36

3.BULGULAR VE TARTIŞMA	38
3.1. Orijinal Havalandırıcı Tasarımı	38
3.2. Altan Alışlı Havalandırıcı	48
3.3 Kavitasyon hesaplamaları	54
3.4. Tasarımların Karşılaştırılması.....	59
3.5. Literatür Karşılaştırması	62
4. SONUÇLAR.....	66
5. KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	74



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGELER

Sayfa

1.1. Kavitasyon hasarının önlenmesi için kriterler (Kels ve Smith, 1991).....	14
2.1. Alpaslan II Barajının hidrolojik özellikleri (Hidro dizayn, 2018).....	20
2.2. Alpaslan II Barajı dolusavağının özellikleri (Hidro dizayn, 2018)	21
3.1. Orijinal havalandırıcı için HAD sonuçları.....	45
3.2. Alttan alıslı havalandırıcı için HAD sonuçları	52
3.3. Orijinal havalandırıcı için kavitasyon indeksi hesap tablosu ($h=3.00$ m, $V_o=20$ m/s)	56
3.4. Alttan alıslı havalandırıcı kavitasyon indeksi hesapları ($h=3.00$ m, $V_o=20$ m/s).....	58
3.5. Orijinal havalandırıcıda kavitasyon indeksi hesap tablosu ($h=3.00$ m, $V_o=30$ m/s)	59
3.6. Alttan alıslı havalandırıcı kavitasyon indeksi hesapları ($h=3.00$ m, $V_o=30$ m/s).....	59
3.7. Hava giriş katsayısı ile ilgili literatürdeki bazı bağıntılar.....	63
3.8. Hava giriş katsayılarının literatürle karşılaştırılması.....	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİLLER

Sayfa

1.1. İran Karun-1 Barajı dolusavak hasarı (Falvey, 1990)	10
1.2. Glen Kanyon Barajının (ABD) tünel dolusavağının kavitasyon hasarı (Falvey, 1990).....	11
1.3. Keban Barajında sonradan yapılan havalandırıcılar (Abbsoğlu ve Okay, 1992)	11
1.4. Ortalama Sıcaklık-Buhar Basıncı değişimi (Hidro dizayn, 2019).....	13
1.5. Dolusavak üzerinde su ve hava tabakasının gelişimi (Demiröz, 2012).....	15
1.6. Temel havalandırma tipleri (Aydın, 2005)	16
1.7. Falvey tarafından önerilen havalandırma tipleri (Falvey,1990)	17
1.8. Dünyada kullanılan farklı havalandırıcı tipleri (Volkart ve Rutschmann, 1991)	18
2.1. Alparslan II Barajı dolusavağının görüntüleri (ENERGO-PRO, 2019)	22
2.2. Örnek dolusavak havalandırıcısının detayları (DSİ, 2013)	24
2.3. Havalandırıcı üzerindeki saptırıcı parametreleri ve boyutları (DSİ, 2013)	25
2.4. Flow-3D sayısal model konseptleri: a) Hücre sistemi, b) Akışkan yüzey (TruVOF) konsepti, c) FAVOR yöntemi	29
2.5. Orijinal proje durumu dolusavak birinci havalandırıcı sayısal modellenmesi	34
2.6. Alttan alıslı havalandırıcının sayısal modellenmesi	34
2.7. Alttan alıslı havalandırıcıların detayları	35
2.8. Sayısal modellerin ağ yapısı	36
2.9. Sayısal modellerin sınır koşulları (FAVOR ile kullanımı).....	37
3.1. Orijinal havalandırıcı tasarımı için akımın zamanla değişimi ($h=3$ m $V_o=30$ m/s)	39
3.2. Farklı akım durumlarında zamana göre hava debileri	40
3.3. Orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım durumlarındaki havalandırıcı üzerindeki su jeti görüntüleri	41
3.4. Orijinal havalandırıcı tasarımı için havalandırıcı üzerindeki enkesit hız dağılımları	43
3.5. Orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım hızlarında; a) Hava giriş oranının b) Ortalama hava konsantrasyonunun Fr sayısı ile değişimi	46
3.6. Orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım derinliklerinde; a) Hava giriş oranının b) Ortalama hava konsantrasyonunun Fr sayısı ile değişimi.	46
3.7. Orijinal havalandırıcı tasarımı için boy kesitlerindeki hava-su karışımı oranları	47
3.8. Alttan alıslı havalandırıcı tasarımı için farklı akım durumlarındaki havalandırıcı üzerindeki su jeti görüntüleri.....	48

3.9. Alttan alışlı havalandırıcı tasarımı için havalandırıcı üzerindeki enkesit hız dağılımları	50
3.10. Alttan alışlı havalandırıcı tasarımı için farklı akım hızlarında; a) Hava giriş oranının, b) ortalama hava konsantrasyonunun Froude sayısı ile değişimi	51
3.11. Alttan alışlı havalandırıcı tasarımı için farklı akım derinliklerinde; a) Hava giriş oranının b) Ortalama hava konsantrasyonunun Froude sayısı ile değişimi.	53
3.12. Alttan alışlı havalandırıcı tasarımı için boy kesitlerindeki hava-su karışımı oranları	53
3.13. $V_o = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için orjinal havalandırıcı boykesit basınç dağılımı	55
3.14. $V_o = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için orjinal havalandırıcı boykesit hız dağılımı	55
3.15. $V_o = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için alttan alışlı havalandırıcı boykesit basınç dağılımı	57
3.16. $V_o = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için alttan alttan alışlı havalandırıcı boykesit hız dağılımı	57
3.17. Orijinal ve alttan alışlı havalandırıcı sonuçlarının karşılaştırılması a) Hava giriş oranı, b) Ortalama hava konsantrasyonu.....	60
3.18. Orijinal ve alttan alışlı havalandırıcılar üzerindeki serbest akım durumlarının karşılaştırılması ($h=2.5$ m).....	61
3.19. Orijinal ve alttan alışlı havalandırıcıların akım boykesitlerindeki hava karışım oranlarının karşılaştırılması.....	62
3.20. Hava giriş katsayılarının literatürle karşılaştırılması.....	65

SİMGELER DİZİNİ

σ	Kavitasyon indeksi
P_t	Toplam basınç
P_v	Buhar basıncı
ρ :	Akışkan yoğunluğu(kg/m ³)
U^2 :	Ortalama akım hızı (m/s)
P_a	Atmosfer basıncı
Q_a	Akım giren hava debisi (m ³ /s)
Q_w	Su debisi (m ³ /s)
β	Hava giriş oranı (veya katsayısı)
C_0	Ortalama hava konsantrasyonu
V_f	Akışkanın hacim oranı
R_{DIF}	Türbülans difüzyon terimi
R_{SOR}	Kütle kaynağı
$(x, y, z, r, RSOR)$	koordinat sistemi
(u, v, w)	hız bileşenleri
A_{xx}	yönündeki fraksiyonel akış alanı
A_y	y yönündeki fraksiyonel akış alanı
A_z	z yönündeki fraksiyonel akış alanı
dA	hücredeki kaynak yüzeyinin alanı,
\forall	sürüklenen hava hacmi
C_{air}	hava sürükleyen yüzey alanı kısmı
A_s	sıvının yüzey alanı
k	türbülans kinetik enerji
L_t	türbülans uzunluk ölçeği
g_n	serbest yüzeyde yerçekimi kuvveti
ε	türbülans dağılım oranı
U	Ortalama makroskopik hız
I	Türbülans yoğunluğu
C_v	Türbülans modeli katsayısı
L_T	Türbülanslı uzunluk ölçeği

KISALTMALAR DİZİNİ

ASCE	Amerika Mühendisler Derneği
DSİ	Devlet Su İşleri
HES	Hidroelektrik Santralleri
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
VOF	Volume of Fluid
FEM	Sonlu Elamanlar Yöntemi
FDM	Sonlu Farklar Yöntemi
FVM	Sonlu Hacimler Yöntemi
RNG	Renormalized Group Model
TAKK	Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol
LES	Large-Eddy Simulation

1.GİRİŞ

Barajlar başta enerji üretimi, içme ve sulama suyu temini, taşkın kontrolü gibi çeşitli amaçlarla ve farklı tiplerde (Beton ağırlık, dolgu, kemer, SSB gibi.) inşa edilirler. Hangi amaç ve tipte inşa edilirse edilsin barajların en önemli elemanlarından biri dolusavaklardır. Dolusavaklar baraj rezervuarına giren taşkın debilerinin atılması için kullanılan yüksek kapasiteli deşarj kanallarıdır. Birçok farklı tipi olmasına karşılık temelde kapaklı (kontrollü) ve kapaksız (kontROLSÜZ) olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Serbest akışlı dolusavaklar, karşıdan alıslı, yandan alıslı, kuyulu, sifonlu, labirent, basamaklı ve tehlike savakları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Kontrollü dolusavaklar kullanıldığı kapak türüne göre silindir kapak, radyal kapak, düşey düz kapak, çatı kapak ve sektör kapaklı dolu savaklar şeklinde isimlendirilmektedir. Dolusavak tipi seçilirken ekonomik olması mambadaki su seviyesini ayarlama deşarj kapasitesini ayarlama gibi bazı özellikler dikkate alınarak seçilmesi gerekmektedir. Dolusavak kapasiteleri hesaplanırken uzun yıllar boyunca görülebilecek muhtemel en büyük taşkın debisine ve diğer işletme debilerine göre belirlenir ve tasarlanırlar. Benzer tiplerde olmasına karşın her bir barajın dolusavağı barajın topografik ve morfolojik yapısından dolayı birer prototip olarak nitelendirilmelidir. Bu nedenle genelde uygulama projelerinden önce dolusavakların fiziksel hidrolik modelleriyle testleri yapılmaktadır. Bu testler oldukça pahalı olup ciddi zaman ve efor gerektirir. Son yıllarda gelişen hesaplama tekniklerinin gelişmiş bilgisayarlara uygulanmasıyla karmaşık yapıdaki akışkan akımlarının bile sayısal modellemesi mümkün olabilmektedir. Bu yöntemlerin doğruluğu, seçilen matematiksel modelin uygunluğu, çözüm ağı yapısı, kullanan kişinin bilgi ve becerisi gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle bu tür sayısal modellerin kullanılmasından önce çeşitli yöntemlerle doğruluğunun test edilmesi tavsiye edilir. En önemli test ve kalibrasyon işlemi ise fiziksel model veya prototip sonuçlarıyla karşılaştırmaktır. Bu durumda sayısal modelin avantajı ortadan kalkabilmektedir. Bu paradoksu aşmak için genelde elde edilen verilerle sayısal modelin kalibrasyon ve doğrulaması yapılır ve daha sonra farklı ve alternatif tasarımlar için sayısal modeller kullanılabilir. Böylece sayısal modellerin esnekliği ve avantajlarından yararlanılırken aynı zamanda güvenilir sonuçlar da elde edilir ve böylece farklı tasarımlar kolaylıkla denenerek tasarımlar iyileştirilebilir. Diğer önemli bir katkısı ise sayısal analizlerde deneylerde elde edilmesi çok zor veya mümkün olmayan değişkenlerin de detaylı bir şekilde gözlemlenebilmesidir. Gelişen bilgisayar ve hesaplama yöntemlerinin kullanıldığı Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımları bu konuda çok iyi bir imkân sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında model olarak Alpaslan II Barajının dolusavağı seçilmiştir. Alpaslan II Barajı ve HES, Muş İli sınırları içerisinde olup Murat Nehri üzerinde yapılması planlanmış bir tesistir. Projenin tamamlanması ile yıllık 780 Gwh/yıl elektrik enerjisi üretimi planlanmaktadır. Alpaslan II Barajının amacı Muş ilini taşkından korumak, ovayı sulamak ve enerji temin etmektir. Baraj tipi ön yüzü beton kaplı kil çekirdekli kaya dolgu olarak projelendirilmiş olup talvegden olan yüksekliği 99 m'dir. Alpaslan II Barajı'nın dolusavağı, sol sahile yerleştirilmiş olup her birinin genişliği 11 m olan toplam beş radyal kapakla kontrol edilmektedir. Dolusavak, maksimum feyezan debisi olan 6705.80 m³/s debiye göre tasarlanmıştır.

Bu açıklamalar doğrultusunda tezin amacı; Alpaslan II barajının dolusavak ve havalandırma yapılarının yaygın olarak kullanılan bir çeşidi olan kapaklı dolusavakların farklı tasarım ve hidrolik koşulları altında gerçekleşen akım performanslarını sayısal simülasyon/modelleme yöntemleriyle belirlemek ve çözüm önerileri sunmak olacaktır. Bu amaçla, öncelikle dolusavağın üç boyutlu (3B) sayısal modeli hazırlanacak ve sonra mevcut tasarımın DSİ tarafından belirlenen proje debileriyle (özellikle Maksimum Taşkın debisine göre) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizlerinden elde edilen sonuçlar DSİ (2016)'nin 1/70 ölçekli fiziksel model deney sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır. Böylece hem mevcut tasarımın hidrodinamiği hakkında deneylerden daha fazla bilgi elde edilecek hem de sayısal modelin doğruluğu ve kalibrasyonu sağlanmaya çalışılacaktır. 1/70 gibi küçük sayılabilecek ölçeklerde özellikle akıma hava girişi olayı için fiziksel model deneylerinde önemli ölçek etkileri beklenebilir. Sayısal modelde 1/1 prototip ölçeklerinde çalışılacağından ölçek etkilerinden de kaçınılmış olacaktır. Bu bakımdan deneysel sonuçların ölçek etkileri de ayrıca değerlendirilecektir. Ayrıca, mevcut havalandırıcıya alternatif olarak, ilk kez Aydın (2005) tarafından önerilen bir havalandırıcı tipi olan Alttan Alışlı Havalandırıcı tipi uygulanarak havalandırma ve kavitasyon önleme performansı incelenmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Yüksek akım hızlarına maruz yüksek düşümlü dolusavak şut kanallarındaki en önemli sorunlardan biri kavitasyon hasarlarıdır. Dolusavaklarda kavitasyon olayı fark edilmeden önce bu hasarlar nedeniyle birçok baraj dolusavağı kullanılmaz hale gelmiştir. Hidrolik yapılar üzerindeki kavitasyon etkileri uzun zamandır bilinmektedir. Dolusavak kanallarındaki kavitasyon hasarıyla ilgili ilk çalışmalar, 1935'te Panama'daki Madden Barajı kavitasyon hasarının bildirilmesiyle başladığı belirtilmektedir. 1945 yılında ASCE (American Society of Civil Engineers)'nin

hazırladığı bir sempozyumunda hidrolik yapılar üzerindeki kavitasyon hasarına kısaca değinilmiştir. 1959-60 yıllarında Grand Coulee Barajı dipsavak kanalında ilk havalandırıcı uygulaması yapılmıştır. 1968-69 yıllarında Tayland'daki Sirikit ve ABD'deki Yellowtail Tünel ve Sovyetler Birliğindeki 100 m yüksekliğindeki beton ağırlık barajının dolusavakalarındaki havalandırıcı uygulamaları bu konudaki diğer örneklerdendir. Daha sonra 1970-1980 yılları arasında Türkiye'deki Keban Barajı ile İran'daki Karun Barajı dolusavakları üzerinde görülen geniş çaplı hasarlar bilim dünyasının ilgisini tekrar bu konu üzerine çekmiştir. Türkiye'nin Elazığ ili sınırları içerisinde Fırat nehri başlangıcında inşa edilen Keban Barajı dolusavakları (maksimum savaklama kapasitesi 17 000 m³/s olan üç adet dolusavak kanalı), ilk kez 1976 yılında rezervuar seviyesi 840.5 m'de iken her kanaldan 1000 m³/s'lik kapasiteyle çalıştırılmıştır. Sonraki yıllarda zaman zaman 800-1200 m³/s kapasiteler arasında çalıştırılmıştır ve dolusavakların her çalıştırılmasında önemli kavitasyon hasarları meydana gelmiştir. Sonradan inşa edilen havalandırıcılar sayesinde kavitasyon hasarının önüne geçilebilmiştir. Bu tarihlerden sonra dolusavaklarda kavitasyon ve önleme yolları konusunda birçok çalışma yapılmış ve literatürde yerini almıştır. Özellikle havalandırıcılar yardımıyla akıma hava karıştırmak suretiyle kavitasyon hasarından korunmak bu alanda en etkili yöntem olarak günümüze kadar gelmiştir. Brezilya'daki Foz do Areia ve Emborcacao, Venezuela'daki Guri ve Pakistan'daki Terbel 4. Barajları dipsavak ve dolusavakları havalandırıcıları üzerinde yapılan deney ve prototip ölçümleri birçok araştırmacıya ışık tutmuştur (Kells ve Smith, 1991; Absoğlu ve Okay, 1992; Pfister ve Hager, 2010a; Aydın, 2005).

Yukarıda rapor edilen önemli kavitasyon hasarlarından sonra, 1900'lü yıllarda bu konu üzerinde literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Russel ve Sheehan (1974), kavitasyon hasarından kaçınmak için gerekli hava miktarını belirlemek üzere bir dizi çalışma yürütmüşlerdir. Pinto vd. (1982) havalandırıcı performansını belirlemek için ilk kez boyutsuz hava giriş oranını ($\beta=q_a/q_w$) tanımlamışlardır. Wood vd. (1983), dolusavak yüzeyinde sınır tabakası gelişimi ve üst nap havalandırması üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Pinto ve Neidert (1983), temel bazı büyüklüklere bağlı olarak hava giriş oranının değişimini incelemişlerdir. Volkart ve Rutschmann (1984), farklı tiplerde dolusavak havalandırıcı tasarımlarını sunmuşlardır. Demiröz (1986), Türkiye'deki kavitasyon hasarına karşı yapılan çalışmalara ilk öncülük eden araştırmacıdır. Havalandırıcıların farklı boyut ve akım koşulları için 1/25 ölçeğindeki fiziksel model üzerinde kapsamlı deneysel çalışmalar yürütmüştür. Daha sonraki yıllarda Aydın (2005), Demiröz'ün deneysel sonuçlarının bir bölümünü sayısal model karşılaştırması için kullanmıştır. Falvey ve Ervine (1988), yüksek hızlı su jetinin hava giriş karakteristikleri üzerindeki etkileri üzerinde durmuşlardır. Tan (1984), Low (1986), Wood (1988) ve Chanson (1988), aynı modeli kullanarak

havalandırıcıların performansları üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Chanson (1989a), kanal yüzeylerinin kavitasyona karşı güçlendirilmesiyle ilgili farklı dayanımlardaki beton yüzeylerde deneyler yapmıştır. Chanson (1989b), havalandırıcı yeri ve aralıklarını belirlemek için Clyde Barajı dolusavak modeli üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüştür. Rutschmann ve Hager (1990), akım ve havalandırıcı parametrelerin direkt olarak hava girişi üzerindeki etkilerinin dikkate alındığı “direkt yaklaşım” ve jet uzunluğuna bağlı incelendiği “endirekt yaklaşım” diye iki farklı yaklaşım sunulmuştur. Pinto (1991), Foz do Areia, Amaluza, Emborcacao ve Colbun Barajı Dolusavakları ve Terbela Tünel Dolusavağı havalandırıcılarının prototip ölçümlerini sunmuştur. Bu veriler birçok araştırmacı için deneylerin ölçek etkilerinin kalibrasyonu ve sayısal model hatalarının belirlenmesinde oldukça faydalı olmuştur. Volkart ve Rutschmann (1991), dolusavak şut kanalları üzerinde kavitasyon hasarı, hasar tipleri ve havalandırıcı tipleri ile ilgili detaylı bilgi vermişlerdir. Wood (1991), dolusavaklar üzerindeki akımın serbest yüzey havalandırması üzerinde durmuştur. Kells ve Smith (1991), kavitasyon ve havalandırmayla ilgili birçok çalışmanın özetlendiği kapsamlı bir derleme çalışması sunmuşlardır. Bu çalışma birçok araştırmacı için kılavuz niteliğindedir.

Son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalar ise aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

Nie (2001), yüzeyleri kavitasyon hasarından korumak için yapay olarak pürüzlendirilmiş yüzeyler üzerinde çalışmıştır. Kökpınar ve Göğüş (2002), havalandırıcılar üzerinde kapsamlı bir deneysel çalışma yürüterek havalandırıcı tasarımında kullanılabilecek faydalı bazı bağıntı ve kriterler belirlemişlerdir. Boes ve Hager (2003), basamaklı dolusavaklarda akışın hava konsantrasyonu, hız analizi gibi bazı hidrolik özellikleri incelemek için fiziksel model üzerinde bazı çalışmalar yürütmüşlerdir. Viskozite ve yüzey gerilim etkisini ihmal ederek minimum Reynold ve Weber sayılarını sırasıyla 100 ile 100000 olarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Hava kabarcık difüzyon yöntemiyle kavitasyon riskini bulmaya çalıştılar.

Aydın (2005) ve Öztürk vd. (2008), geniş dolusavaklarda Ilısu Barajına benzer olan “Alttan Alışlı Havalandırma” sistemini önermişlerdir. Hesaplamalarında HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanarak deneysel çalışmalarla havalandırma performansını incelemişlerdir. Daha sonra Aydın (2018) deneysel bir çalışmaya dayalı olarak alttan alışlı dolusavak havalandırıcıdan elde edilen sonuçları geleneksel havalandırıcı tipleri için literatürde verilen ampirik bağıntılarla karşılaştırmış ve alttan alışlı havalandırıcıların çok daha iyi havalandırma performansı sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca bu araştırmacılar, hidrolik model çalışmalarında havalandırıcı ölçümleri için önemli ölçek etkilerinin olduğundan deneysel ölçüm değerlerinin gerçek prototip değerlerinden çok daha küçük olacağını, sayısal analizlerde ise gerçek prototip boyutlarında çalışıldığından ölçek etkisi gibi bir sorun olmayacağını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, sayısal

modeldeki sayısal hata ve kabullerden meydana gelecek hatalara da dikkat edilmesi, fakat iyi kurgulanmış bir sayısal modelde bu hataların hava girişi bakımından küçük ölçekli fiziksel modellerdeki ölçek etkileri yanında çok daha az olacağını savunmuşlardır.

Dargahi (2006), 3B sayısal model üzerinde dolusavak akışını modellemiştir. Model üzerindeki sonuçları doğrulamak üzere birkaç deney yapmış ve dolusavak duvar şeklinin sınır katmanına etkisini Reynold sayı olarak göstermiştir.

Chen vd. (2010), girdaplı düşüyle tasarlanan bir şaft tünelinin özelliklerini laboratuvar ortamında incelemiştir. L şeklinde olan kanal ile birleştirilen şaft yapısında birkaç noktadan ölçümler yapmıştır. Akımla ilgili teorik analizler gerçekleştirmiş, verilerin deneyle analizlerinde verilerle uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca bu tür hidrolik yapılarda kavitasyon riskinin de göz alınması gerektiğini belirtilen makalede, teorik analize göre deşarj arttığında kavitasyon riskinin de artacağı bilindiğinden şaftlarda bu riski azaltmak için havalandırmaların önemi vurgulanmış ve uygulamalarda dikkate alınması önerilmiştir.

Zhang vd. (2011), hidroelektrik santrallerde yüksek basınçlı akımların sebep olduğu kavitasyon hasarlarının havalandırıcılar yardımıyla ekonomik olarak çözülebileceğini belirtmişlerdir. Sayısal modelleme yardımıyla, realizable $k-\varepsilon$ türbülans modeli, akışkan hacimleri (VOF) ve hava karışım (*mixture*) modellerini kullanılarak karmaşık bir akımı analiz etmişlerdir. Edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Aydın (2012), yan savaklar üzerindeki serbest yüzeyli akımın sayısal simülasyonunu gerçekleştirmiş ve deneysel sonuçlarla oldukça iyi bir uyum sağlamıştır. Bu çalışma, serbest yüzeyli akımların modellenmesinde VOF modelin ne kadar başarılı olduğunu göstermiştir.

Aydın ve Emiroglu (2013), yan savak kapasitesini belirlemek için deneysel ve sayısal model kullanarak ve ağ yapısının sayısal model sonuçları üzerindeki etkisini ayrıca vurgulanmışlardır. HAD analizi sonucu elde edilen sayısal model sonuçlarının deneysel gözlem ve ölçümlerle iyi bir uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Gümüş (2014), çalışmasında bir dolusavak modelinde altı farklı debideki deney durumuna ait hız ve su yüzü profili ölçümlerini aynı koşullardaki akımların iki-boyutlu sayısal çözüm bulgularının doğrulanması için kullanmıştır. Hesaplamalarda Standard $k-\varepsilon$, Renormalization group $k-\varepsilon$, Realizable $k-\varepsilon$, Modified $k-\omega$, Shear Stress Transport ve Reynolds Stress Model türbülans modelleri kullanılmış, su yüzü profilleri Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF) ile hesaplanmıştır. Basınç düzeltme algoritması ve iterasyon sayılarının model üzerindeki tesirlerini araştırmış ve en uygun modeli belirlemeye çalışmıştır. Sayısal bulgular ve uygulanan deneyler neticesinde Realizable $k-\varepsilon$ ve Reynolds Stress Model ile elde edilen bulguların birbirlerine çok yakın ve her

iki modelin de dolusavak akımında hız alanı ve su yüzü profilinin hesaplanmasında diğer modellere göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Pfister ve Chanson (2014), çalışmalarında; iki fazlı (su-hava) akımların deneysel çalışmalarında ölçek etkilerine dikkat edilmesi gerektiğini, bilinen faktörlere ilave olarak yeni bazı faktörler elde etmeyi amaçlamışlardır. Çift fazlı akım deneylerinde model ve prototip Froude, Weber ve Reynold sayılarının aynı olması gerektiği fakat bunun ancak tam (prototip) boyuttaki çalışmalarda mümkün olabileceği, bu nedenle Morton sayısının ayarlanmasının yapılan hesapların doğruluğu açısından önemli olduğu, sonuçta deneysel çalışma sonuçlarının doğruluğu için ölçek etkilerinin doğru belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğu, kabarcık boyutu ve türbülans ölçekleri gibi bazı parametrelerin büyük ölçekli laboratuvar modellerinde bile ölçek etkilerinden etkilenebileceği belirtmişlerdir.

Zamankhan (2015), yapay havalandırmanın dolusavak üzerindeki etkilerine ilişkin yüksek enerjili bir dolusavak olan Krahnjukar Barajının dolusavağı üzerindeki bir takım çalışmalar yürütmüştür. Araştırmacı, dolusavak yapısı, dolusavağın akış karakteristiklikleri, fiziksel model, hesaplamalı akışkan dinamiğiyle havalandırıcının konumları gibi kavitasyonu etkileyen bazı faktörleri incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda yapay havalandırıcılarının potansiyel kavitasyon hasarını en düşük seviyeye indirmek için giriş bölgesinden maksimum 100 m uzağa yerleştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Kamel ve Abdulhameed (2016), Ogee tepeli dolusavaklar üzerinde, basınç ve enerji dağılımını belirlemek için 1/50 ölçekli fiziksel model üzerinde çalışmışlardır. Model üzerinde üç farklı noktada (dolusavağın aşağısında, yukarısında ve içinde) deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, dolusavağın konumunun enerji değişiminde etkisi olmadığı gösterilmiştir.

Teng vd. (2016), dolusavak havalandırıcılarında akımın hava sürüklemesi ve iki fazlı akımın doğru bir şekilde tahmin edilmesinin güvenilir bir dolusavak işletmesine katkıda bulunacağını belirterek, 2 boyutlu sayısal model yardımıyla havalandırılmış akımdaki hava konsantrasyonunu tahmin etmek için iki-fazlı bir akım modeli kullanmışlardır. Hava kabarcığı boyutlarına bağlı olarak, boşluk bölgesinde deneylerle nispeten iyi bir uyum sağlamışlardır. Simülasyonların, muhtemelen fazların arayüz kuvvetlerinin olduğundan az tahmin edilmesinden dolayı havalandırma boşluğunun mansabında daha yüksek hava konsantrasyonuna neden olduğunu belirtmişlerdir.

Kumcu (2016), son yıllardaki sayısal hesaplama ve tekniklerin gelişmesi sayesinde hidrolik yapılardaki akım ile ilgili özelliklerinin artık sayısal modeller yardımıyla elde edilmesinin mümkün olduğunu belirtmiştir. Kumcu (2016) çalışmasında Kavşak Barajı ve HES'nin hidrolik özelliklerini sayısal ve fiziksel model yardımıyla belirlemeye çalışmıştır. 1/50 ölçeğindeki

deneysel çalışmalarda farklı akım koşulları için akım derinliği, debi ve basınç değerleri elde edilmiş ve orijinal proje üzerinde ciddi değişiklikler yapılmıştır. Daha sonra Flow-3D yazılımı yardımıyla sayısal model çalışmaları yürütülmüş ve akış özellikleri bakımından elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel ölçümler arasında iyi bir uyum gözlenmiştir.

Kaplan (2018), İlisu Barajı dolusavağı ve havalandırıcısının sayısal simülasyonunu ANSYS-Fluent yazılımını kullanarak gerçekleştirmiştir. Tasarımın ilk ve revize tasarımını sayısal yöntemin esnekliği yardımıyla analiz etmiş ve tasarımların performanları hakkında detaylı bilgi sunmuştur. Karaduman (2018) ise İlisu Barajı Dipsavak tasarımının sayısal simülasyonunu Flow-3D yazılımıyla gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, havalandırıcı galerisinin farklı tasarımlarını kullanarak havalandırıcı performansında %100'e kadar artış sağlanmıştır. Her iki çalışmadaki sayısal analiz sonuçları DSI'nin model deneyi sonuçlarıyla kıyaslanmış ve sayısal model kontrolü sağlanmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği birçok farklı hidrolik yapıların tasarımında etkin bir şekilde kullanılmıştır

Bai vd. (2018), dolusavak tabanındaki hava mikrokozmetik özelliklerine dikkat çekmişlerdir. Kabarcık çeşitliliklerini göstermek için birden fazla deney yaparak alt kabarcık frekansını ve akor boyunu ölçmüşlerdir. Testler, alt kabarcıkların akor uzunluğunun, darbe bölgesi boyunca keskin bir düşüş eğilimi gösterdiğini ve denge bölgesinde daha az azalma olduğunu göstermektedir.

Morovati ve Eghbalzadeh (2018), kademeli savakların havalandırma bölgelerindeki basınç dağılımını gözlemlemek için Flow 3D yazılımını kullanmışlardır. Dolusavakta serbest yüzey akışı ve türbülans özelliklerini uygulamak için VOF yöntemi ve RNG $k-\epsilon$ modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak havuz yüksekliğinin başlangıç noktası üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiş, havuzlanmış dolusavaklarda kavitasyon hasarının meydana gelmediği ve dikey basamaklı dolusavaklarda negatif basınç eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

Tokuy ve Kurt (2018), tek eğim ve tek bir basamak kullanarak sel rejimi akımlarda farklı debiler için dolusavak sut kanallarının havalandırmasını ANSYS-Fluent yazılımıyla analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, hava-su arayüzeyini elde etmek için Akışkan Hacmi (VOF), türbülansı hesaba katmak için ise k-epsilon türbülans modeli kullanmışlardır. Havalandırıcı tasarımı olarak, ilk kez Aydın (2005) tarafından önerilen Altan Alışlı Havalandırıcı tipine benzer olarak dairesel kesitli havalandırıcı borular kullanılmıştır. Sayısal sonuçları doğrulamak için literatürdeki jet uzunluğu ile ilgili ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Çalışmalarında sonuç olarak hava konsantrasyonunun hava çıkış bölgesi boyunca akış yönünde logaritmik olarak azaldığını gözlemlemişlerdir.

Bahena vd. (2018), bir baraj dolusavağı kreti üzerine yerleştirilen orta ayakların ve mansabına yerleştirilen basamak-rampa tipi havalandırıcıların dolusavak akımı üzerindeki

havalandırma etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, sadece havalandırıcı kullanımına nazaran, orta ayakla birlikte havalandırıcı kullanımının akımdaki hava konsantrasyonunu arttırdığı ve böylece kavitasyon riskini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Kıranoğlu (2019), klasik ve basamaklı tipteki dolusavaklarda tasarım ve akım analizi gerçekleştiren bir yazılım geliştirmiştir. Bu amaçla hava girişi, çeşitli akım koşullarında kret üzerinde oluşacak basınç dağılımı, dolusavak boyunca yüzeyde kavitasyon oluşma olasılığı gibi konular dikkate alınarak dolusavak yüzeyindeki su yüzü profili belirlemeye çalışmıştır.

Telkiran vd. (2019), Dereyurt Göleti dolusavağı üzerinden geçen türbülanslı akımı sayısal olarak modellemişlerdir. Akımın hareketini yöneten temel bünye denklemlerini, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent program yardımıyla Standart $k-\varepsilon$, modifiye $k-\omega$, Kayma Gerilmesi Taşınımı (*Shear Stress Transport*) ve Reynolds Gerilmeleri Modeli (*Reynolds Stress Model*) türbülans modelleri kullanılarak çözmüşlerdir. Su yüzü profilinin hesabında Akışkan Hacimler Yöntemi (VOF=Volume of Fluid) kullanılmıştır. Sayısal olarak elde edilen su yüzü profilleri, standart adım yöntemiyle hesap edilen su yüzü profili ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan tüm türbülans modellerinin dolusavak ve şut kanalı üzerindeki akım profilini belirlemede oldukça başarılı oldukları belirtilmiştir.

Sarwar (2019), sayısal modelleme yardımıyla, dik eğimli dolusavak (26° - 32°) havalandırıcılarının hidrolik performansını belirlemeye dönük çalışmalar yürütmüştür. Bu çalışma için Pakistan'daki Bunji Barajının dolusavağını kullanmıştır. Çalışmasında barajın dolusavağındaki havalandırıcılarının rampa açısını ve hava boşluk boyutunu değiştirerek FLOW-3D programında sayısal analizler yapmış ve elde edilen sayısal verileri kullanarak bazı ampirik bağıntılar elde etmiştir. Elde ettiği denklemlerle, 26° ila 32° arasında değişen bir dışbükey eğriliğe yol açan kısa bir yatay esnemeye sahip delikli dökülme havalandırıcılarının boyutsuz boşluk uzunluğunun ve hava giriş katsayısının hesaplanmasında yararlı olacağını belirtmiştir.

Marquez vd. (2019), kademeli dolusavaklarda yüksek debilerde kavitasyon meydana geleceğini belirterek, kavitasyondan korunmak için akımda serbest jet oluşumuna izin veren bazı havalandırıcı elemanlar üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında farklı akım koşullarında jet uzunluklarının değiştiğini ve jetin çarpma noktasının membasında basınçların sifira yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Demeke vd. (2019), HAD yönteminin akışkan akımlarının modellenmesi için güçlü bir araç haline geldiğini, daha düşük ve esnek yapılarıyla HAD yazılımlarının karmaşık mühendislik problemlerinde makul bir şekilde kullanılabileceğini belirtmiş ve çalışmalarında Etopya'daki Tendaho Barajı dolusavağı taşkın akışını Flow-3D yardımıyla başarı bir şekilde modellemişlerdir.

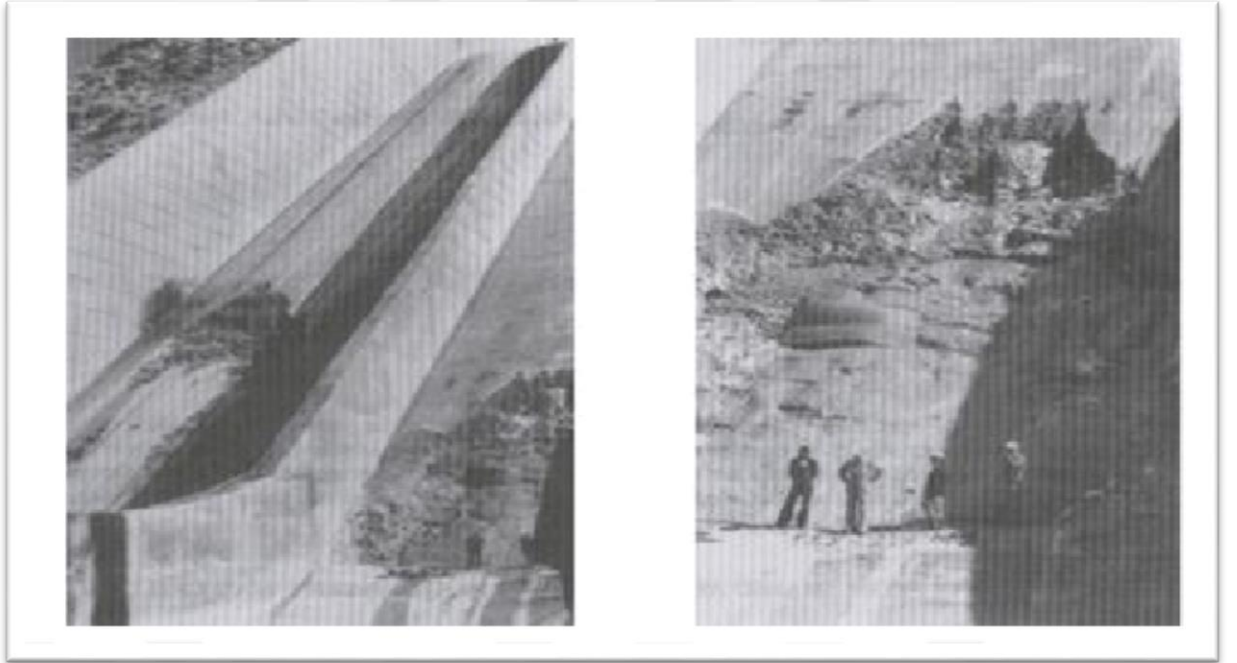
Imanian ve Mohammadian (2019), Ogee profilli bir dolusavak üzerinde farklı türbülans modelleri (Standard $k-\varepsilon$, Realizable $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST ve LRR (Launder-Reece-Rodi)) 2 boyutlu HAD modelleri ile hesaplayarak performanslarını karşılaştırmıştır. Araştırmacılar, farklı savak yüklerinde akış parametrelerinin deneysel verilerle karşılaştırılması sonucu, RSM (Reynolds Stress Models) modeller içinde LRR modelin en iyi sonuç verdiği sonucuna varmışlardır.

Daneshfaraz vd. (2020), yapay bloklarla pürüzlendirilmiş bir Ogee-profilili dolusavağı üzerindeki enerji sönümlemesi ve jet uzunluğunu HAD kullanarak incelemişlerdir. Diğer bazı araştırmacılar gibi bu araştırmacılar da serbest yüzeyle akım koşullarını simüle edebilmek için Akışkan Hacmi (VOF) yöntemi ve türbülans modeli olarak da RNG k-epsilon modeli kullanmışlardır. Sayısal simülasyondan elde edilen sonuçlar tatmin edici bulunmuştur.

1.2. Dolusavaklarda Kaviteasyon

Barajlar hangi amaçla inşa edilirse edilsin temel görevlerinden biri taşımış oldukları suyu depolamaktır. Ancak bölgelerin topografik, coğrafik ve hidrolojik koşulların farklılık göstermesi gibi nedenlerle baraj rezervuarlarında biriken suyun kontrol altında tutulması baraj güvenliği açısından en önemli konulardan biridir. Bundan dolayı barajlarda taşkın sularını mansaba güvenle aktaracak dolusavak yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu önemli su yapılarının tasarlanması ve işletilmesi büyük bir mühendislik hizmeti gerektirir. Özellikle yüksek düşümlü ve yüksek debili dolusavakların tasarımında iki türlü oyuлма/aşınma problemi vardır. Bunlardan biri, yüksek enerjiden dolayı dolusavak mansabındaki yerel oyuılmalar, diğeri ise yüksek hızlara maruz dolusavak yüzeylerinde meydana gelen kaviteasyon hasarlarıdır. İlk bahsedilen hasarlar, çeşitli enerji kırıcı elemanlar sayesinde önlenmeye çalışılır. Kaviteasyon hasarından korunmanın ise çeşitli yolları bulunmakla birlikte en etkili yöntem doğal havalandırıcı aygıtlar yerleştirmektir. Kaviteasyon, teorik olarak, sıvı içindeki basıncın buhar basıncı altına düşmesi sonucu akım içinde gaz kabarcıklarının oluşması olayına denir. Kaviteasyon olayının mühendislikteki önemi ise, sistemler içinde yüksek hızlı akım sonucu oluşan kaviteasyon kabarcıklarının yüksek basınç bölgelerine rastladığında tekrar sıvı faza geçmeleri sırasında oluşturduğu patlamalardan kaynaklı yüzey aşınmalarıdır. Su türbinleri, gemi pervaneleri, çelik boyu sistemleri gibi hidrolik sistemlerde oluşan kaviteasyon o kadar güçlü olabilir ki yüksek mukavemetli çelik elemanları bile zamanla aşındırarak kullanılmaz duruma getirebilir. Baraj dolusavaklarındaki açık kanal akımlarında ise yüksek düşüden dolayı şut kanalları üzerindeki akım hızları oldukça yüksek olabilmektedir. Bernoulli ilkesi gereği hızın artması basıncı düşüreceğinden ve yüzeydeki düzensizlikler nedeniyle

de oluşan vakum basınçları suyun buhar basıncı altına düşmesi sonucu kavitasyon olayı (sıvıdan gaz haline geçiş) başlamaktadır. Bu buhar kabarcıklarının akım içindeki daha yüksek hidrostatik basınç seviyeleriyle karşılaşması sonucu ani faz değiştirmeleri (gazdan sıvıya geçiş) olayı sonucunda oluşan ani patlama şokları beton yüzeyi aşındırmaya başlar. Bu aşınmalar daha büyük kavitasyonu, bu da daha büyük aşınmaları meydana getirerek dolusavak kanalını tümünden işlemez hale getirebilir. Hatta önlem alınmaz ise tüm baraj gövdesini etkileyerek geri dönüşümü imkansız hasarlara neden olabilir (Şekil 1.1, 1.2). Dolusavak kavitasyon hasarı ve havalandırıcılarla ilgili rapor edilen ilk örnekler olarak; 1935'te Madden Barajı (Panama) üzerindeki kavitasyon hasarı (Kells ve Smith, 1991), 1977-1978 İran'daki Karun Barajındaki dolusavağının kavitasyon hasarının havalandırıcı ile çözülmesi gerektiğinin rapor edilmesi (Şekil 1.1) sayılabilir. 1983 yılında Glen Kanyon Barajının tünel dolusavağında 11 m derinliğinde 40 m uzunluğunda 15 m genişliğinde büyük çaplı bir kavitasyon çukuru meydana gelmiştir (Şekil 1.2). Yerleştirilen havalandırıcılar sayesinde maksimum 1400 m³'lük debi 72 saat süre içerisinde verilmesine rağmen herhangi bir kavitasyonun hasarı gözlemlenmemiştir (Pinto, 1988).



Şekil 1.1. İran Karun-1 Barajı dolusavak hasarı (Falvey, 1990)



Şekil 1.2. Glen Kanyon Barajının (ABD) tünel dolusavağının kavitasyon hasarı (Falvey, 1990)

Ülkemizin Fırat Nehri başlangıç noktasında inşa edilen Keban Barajı üzerindeki, maksimum $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ savaklama kapasitesine sahip üç adet dolusavak, ilk olarak 1976 senesinde su seviyesi 840.5 m iken her kanalda $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ lik debiyle çalıştırılmıştır. Daha sonra farklı yıllarda $800\text{-}1200 \text{ m}^3/\text{s}$ debilerle sık sık çalıştırılmış ve her seferinde dolusavak şut kanalları yüzeyinde kavitasyon hasarları meydana gelmiştir. Yapılan havalandırıcılar sayesinde günümüzde hala orjinalliğini korumaktadır. (Abbsoğlu ve Okay, 1992)



Şekil 1.3. Keban Barajında sonradan yapılan havalandırıcılar (Abbsoğlu ve Okay, 1992)

1.3. Kaviteasyon Riskinin Belirlenmesi

Barajların dolusavağını tasarlayan mühendislerin karşılaşabileceği en büyük sorunlardan biri muhtemel kaviteasyona karşı havalandırma yapılıp yapılmayacağı konusudur. Dolusavak şut kanallarındaki kaviteasyon oluşumuyla ilgili literatürde yer alan bazı kritik akım hızı değerleri aşağıda verilmiştir:

- Literatürdeki genel görüş, akım hızının 35 m/s geçen yerlerde kesinlikle kaviteasyon meydana geleceğidir.
- Chanson (1990), akım hızının 12-15 m/s kaviteasyon meydana gelebileceğini, daha yüksek hızlarda onarımın ekonomik olmayacağını ifade etmiştir.
- Volkart ve Rutschmann (1991), beton kaplamalı dolusavaklarda 29 m/s akım hızında kaviteasyon hasarıyla karşılaşılabileceği fakat sınır değer için 22-26 m/s tutulması gerektiğini belirtmişlerdir.
- Pinto (1988), akım hızının 30 m/s olması veya kaviteasyon indeksinin 0.25'in altına düşmesi durumunda kesinlikle özel tedbirlerin alınması gerektiği ifade etmiştir.

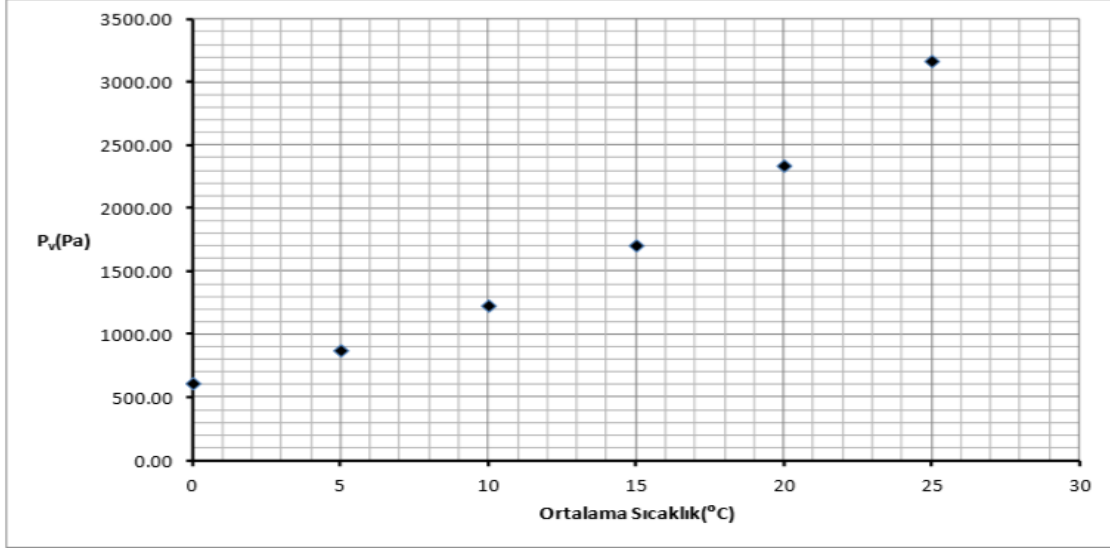
Kaviteasyon başlangıcı konusunda daha iyi fikir sahibi olmanın başka yolu ise kaviteasyon indeksinin belirlenmesidir. Kaviteasyon indeksi Denklem (1.1) ile hesaplanabilir. Kaviteasyon indeksinin hesabı için gerekli parametreler, hesaplanacak noktadaki toplam basınç (P_t) ve aynı noktadaki ortalama akım hızıdır (U). Akıma ait boyutsuz kaviteasyon indeksi aşağıda verilen formül yardımı ile hesaplanır

$$\sigma = \frac{P_t - P_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad 1.1$$

Buradaki; σ : Kaviteasyon indeksi, P_t : Toplam basınç (Pa), P_v : Buhar basınç (Pa), ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m^3), U : Ortalama akım hızıdır (m/s). Sayısal analizlerde yapılan basınç ölçümlerinde okunan değer manometre basıncıdır. Toplam basıncın elde edilmesi için atmosfer basıncının manometre basıncına eklenmesi gerekmektedir. Atmosfer basıncı için aşağıda verilen denklem kullanılabilir (Hidro dizayn, 2019).

$$P_a = 101325 [1 - (2.25577 \cdot 10^{-5}) \cdot Z_{\text{kot}}]^{5.2588} \quad 1.2$$

Bu denklem atmosfer basıncını mevcut kot değerine bağlı olarak vermekte olup buradaki Z kot değeridir. Alparslan II barajı dolusavak ve proje alanı kotları göz önüne alınarak su yüzeyi kotu 1 320 m olarak seçildiğinde atmosfer basıncı 86 440,47 Pa olarak hesaplanmıştır. Buhar basıncı, ortalama sıcaklığa göre değişen bir parametredir. Aralarındaki ilişki Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Ortalama Sıcaklık-Buhar Basıncı değişimi (Hidro dizayn, 2019)

Yukarıdaki grafik ve literatürde kullanılan değerler incelendiğinde P_v değeri için ortalama 18.5°C için 2 235 Pa değeri alınabilir. $H=3$ m ve $v=30$ /sn verileri kullanılarak kavitasyon indeksi hesaplaması yapılmıştır. Kavitasyon indekslerine göre tasarım gereksinimleri aşağıdaki Çizelge 1.1'de verilmiştir.

$$P_T = P_{\text{atm}} + P$$

$$P_T = 13658.6 + 86440.47$$

$$P_T = 100099.07 \text{ Pa}$$

$$P_v = 2235 \text{ Pa}$$

$$\rho = 365.84 \text{ kg/m}^3 \text{ (Akıma giren hava ile birlikte jet altındaki noktadan(425m) olarak okunmuştur)}$$

$$U = 40 \text{ m/s (425m'deki hız değeridir)}$$

$$\sigma = \frac{100099.07 - 2235}{\frac{1}{2} * 365.84 * 40 * 40}$$

$$\sigma = 0.33$$

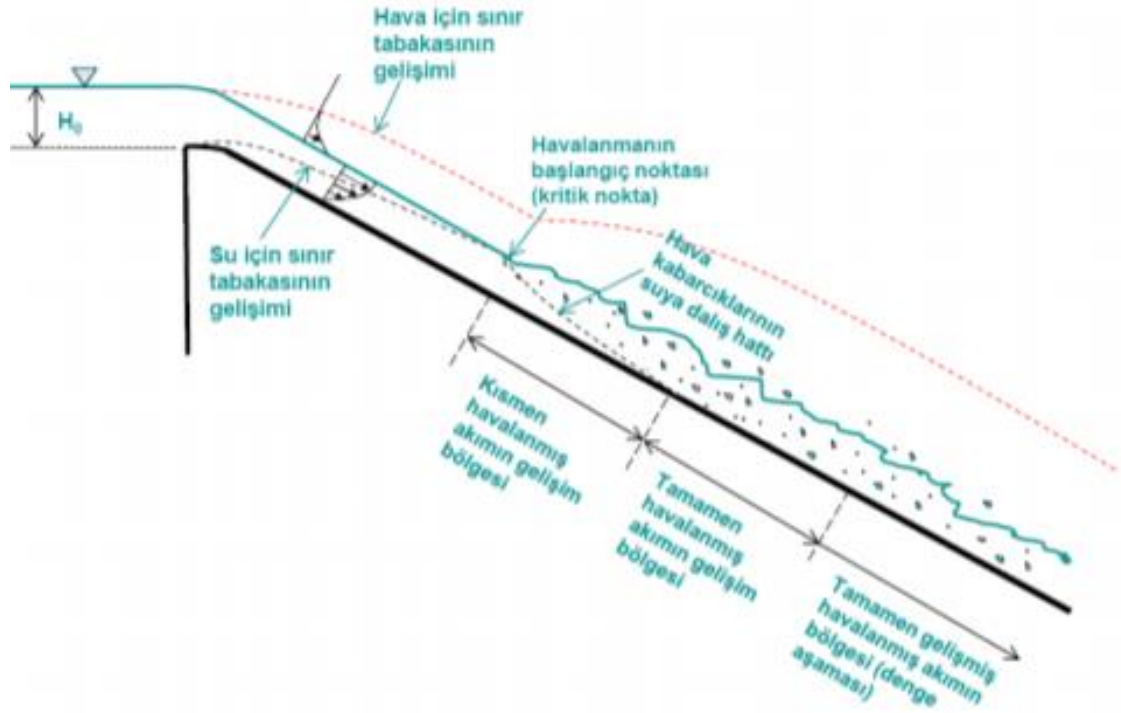
Genel görüşe göre kaviteasyon indeksinin 0,2-0,5 arasında olması kaviteasyon hasarı potansiyelinin olabileceğinin göstergesidir

Çizelge 1.1. Kaviteasyon hasarının önlenmesi için kriterler (Kels ve Smith, 1991)

Kaviteasyon İndeksi (σ)	Tasarım Gereksinimi
>1.8	Yüzey korunması gerekli değildir, kaviteasyon önemli değildir.
0.25 – 1.8	Şut yüzeyi özel pürüzlü kaplamalarla korunabilir.
0.17 - 0.25	Kanal yüzeyi şut profilinin ilave tasarım düzenlenmesiyle veya tasarıma havalandırıcılar ilave edilerek korunabilir.
0.12 -0.17	Tasarıma havalandırıcılar eklenerek şut yüzeyi korunabilir.
<0.12	Şut yüzeyi muhtemelen kaviteasyondan korunamayacaktır. Tasarım değiştirilmelidir.

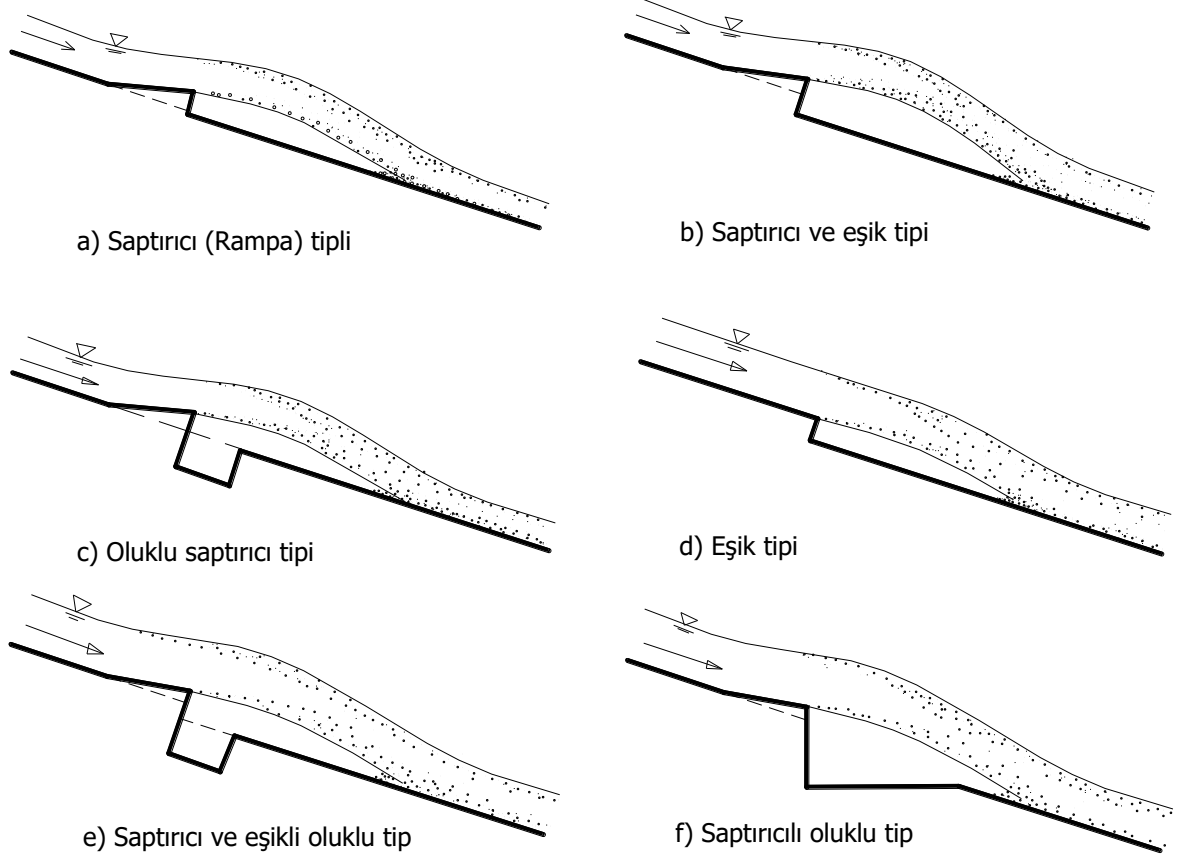
1.4. Dolusavak Havalandırıcıları

Dolusavaklarda sınır tabaka kalınlığının akım derinliğine eşit olduğu nokta tam gelişmiş akımın başladığı nokta olarak ifade edilir. Tam gelişmiş akım durumunda türbülans sayesinde bazı durumlarda havalandırma ihtiyacına gerek kalmadan akım havalandırılmış olur (Şekil 1.5). Bu kritik nokta sonrasında hava konsantrasyonunun şut tabanına ulaştığı mesafe tasarım debisi gibi yüksek debilere ulaştığı için kendi kendine havalandırma uygulanabilir olmamaktadır. Şekil 1.5'te bir havalandırıcısız bir dolusavak üzerindeki akımın havalandırma bölgeleri sınıflandırılmıştır. Serbest yüzey havalandırması düşük debi ve su derinliklerinde etkili olabilse de yüksek debi ve Froude sayılarında yeterli hava sağlayamaz. Kaviteasyonu önlemek ve hava sirkülasyonunu sağlamak amacıyla havalandırıcılarının kullanılması gerekmektedir. Bu şekilde yüzeysel havalandırmadan tabana yeterince sağlanamayan hava havalandırıcı aygıtlar sayesinde akımın alt kısımlarına sağlanabilmekte ve böylece dolusavak şut kanalı yüzeyi kaviteasyon hasarından korunabilecektir.



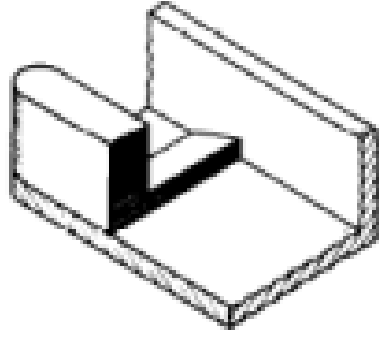
Şekil 1.5. Dolusavak üzerinde su ve hava tabakasının gelişimi (Demiröz, 2012)

Havalandırıcılar, dolusavak şüt kanalları üzerindeki yüksek hızlı su jeti altında yapay olarak oluşturulan boşluk içinde meydana gelen atmosfer altı basınçlar sayesinde, dışarıdan hava emmek suretiyle çalışırlar. Bu amaçla genel olarak bir havalandırıcıda, yüksek hızlı su jetini kanal tabanından yükseltecek bir eleman (rampa veya sapırtıcı ve/veya basamak) ve su jetinin altındaki alt basınç bölgesini besleyecek baca vb. elemanların olması gerekir. En iyi spray etkisini sağlamak için genelde eşik ve rampa birlikte kullanılır. Kanal kesiti boyunca rampa ve/veya eşiğin hemen mansabında bir oluk yerleştirilerek kanal genişliğince daha iyi hava girişi sağlanabilir. Ancak yalnız başına bir oluk kesinlikle kullanılmamalıdır. Genel olarak kullanılan havalandırıcı tipleri ve elemanları Şekil 1.6'da gösterilmiştir (Aydın 2015).

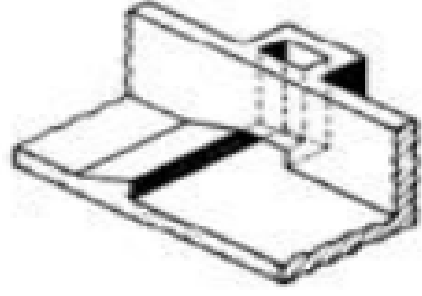


Şekil 1.6. Temel havalandırma tipleri (Aydın, 2005)

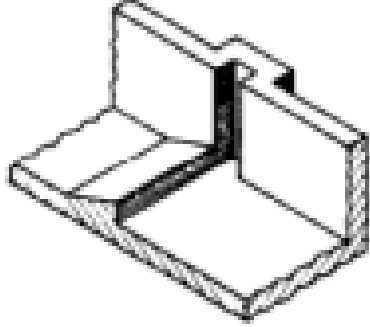
Temel havalandırma tipleri yukarıda belirtilmiş olmasının yanı sıra dolusavak havalandırıcıları üzerinde çalışmaları olan Falyev (1990) tarafından yedi farklı havalandırıcı tipi geliştirilmiştir (Şekil 1.7). Çalışmaların bütününde rampa kullanmıştır. Dört tanesinde havalandırma bacası yalnız iki tanesinde kanal kullanmıştır. Alparslan II Barajı saptırıcı, havalandırma bacası ve kanal yapılarıyla Falyev'in geliştirdiği havalandırıcı örneğine benzemektedir (Şekil 1.7f). Uygulamada kullanılan farklı havalandırıcı tipleri ise Şekil 1.8'de verilmiştir (Volkart ve Rutschmann, 1991).



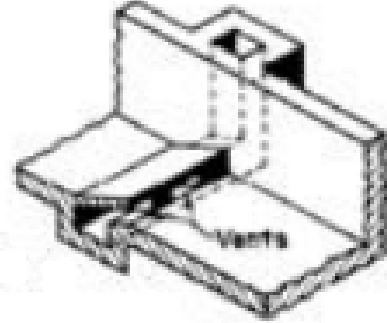
a) pier in flow



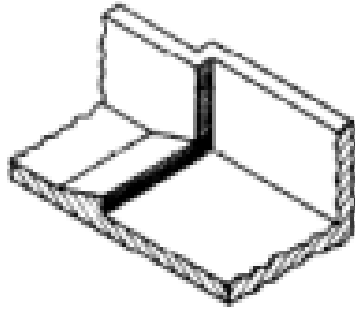
e) duct through sidewall



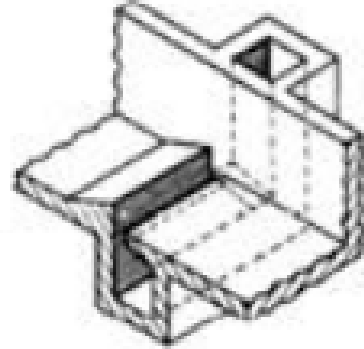
b) slot in sidewall



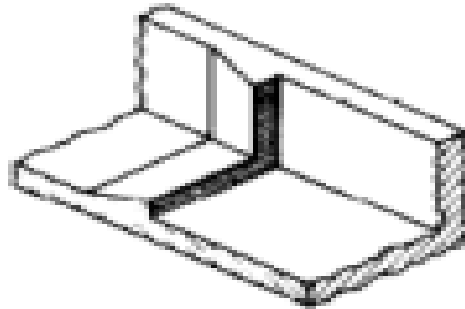
f) duct under ramp



c) offset sidewall

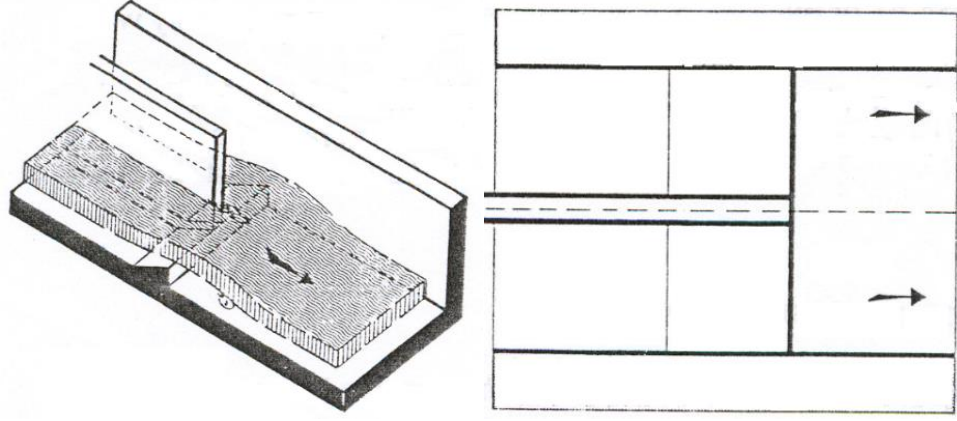


g) duct down stream of ramp

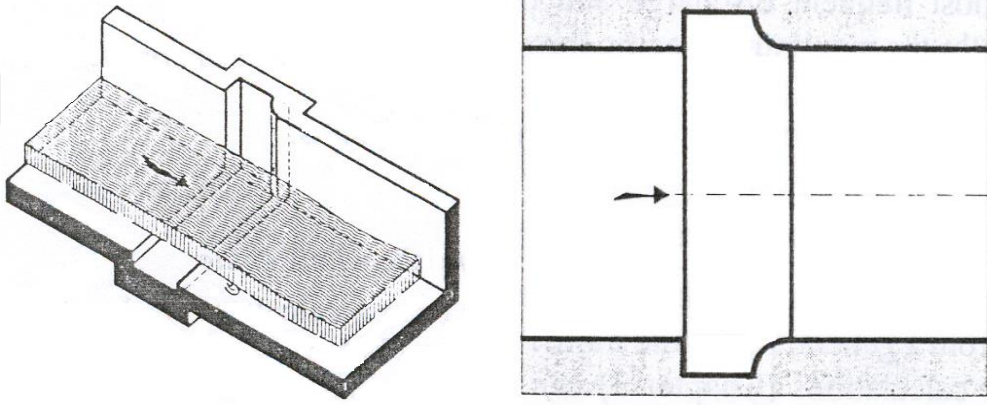


d) ramp on sidewall

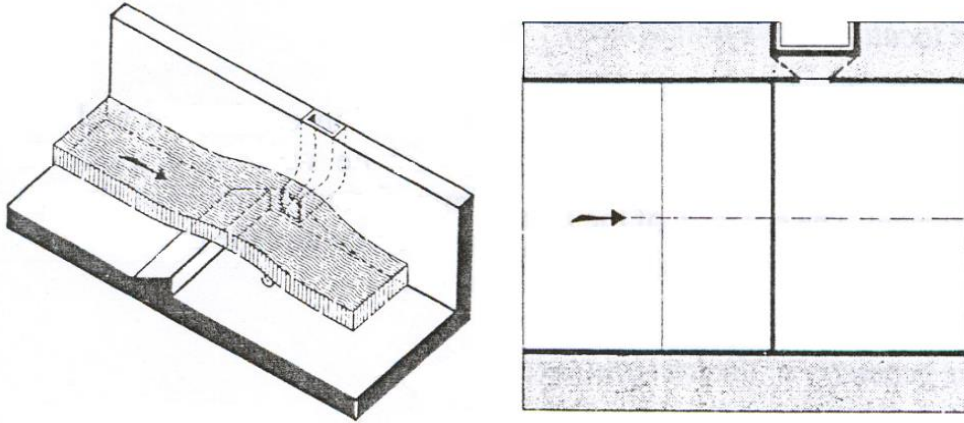
Şekil 1.7. Falvey tarafından önerilen havalandırma tipleri (Falvey,1990)



a) Clyde Barajı dolusavak havalandırıcısı, Yeni Zelanda



b) Cilacica Barajı dolusavak havalandırıcısı, Fransa



c) Foz do Areia Barajı Dolusavak Havalandırıcısı, Brezilya.

Şekil 1.8. Dünyada kullanılan farklı havalandırıcı tipleri (Volkart ve Rutschmann, 1991)

1.5. Diğer Kavitasyon Önleme Yöntemleri

Kavitasyon hasarını önleme yöntemlerinden ilki dolusavak üzerindeki düzensizlikleri azaltmak ve yüzeyin pürüzsüz olmasını sağlamaktır. Dolusavak gibi büyük hidrolik yapılar inşaa sırasında kalıp izleri ve derz birleşim yerlerinin pürüzsüz ve sürekli olmasına dikkat edilmelidir. Fakat çoğu zaman pürüzsüz yüzey elde edilemez (Kells ve Smith, 1991). Akım hızını düşürmek, barajın dolusavağının eğimini azaltmak ve dolusavağın genişliğini artırmakla da kavitasyon hasarı önenebilir veya risk azaltılabilir. Fakat barajın coğrafik ve tapagroğrafik gibi bazı dış etkenler bu durumu her zaman uygulanabilir yapmamaktadır. Bu durum gerçekleşebilirse bile barajın maliyeti ve işletme basınçlarını artıracakı belirtilmektedir (Kells ve Smith, 1991).

Kavitasyon hasarını azaltmanın yollarından bir tanesi ise, risk altındaki küçük alanlar için yüzeyin kavitasyon direncini artırıcı malzemeler kullanılmalıdır. Direnç artırıcı malzeme olarak beton içerisine çelik lifler epoksi harçları ve polimzer karışımların kullanılması gerekmektedir. Epoksi kullanırken dikkat edilmelidir. Çünkü epoksinin kendi kendine kavitasyon üretme potansiyelinin olduğu bilinmektedir (Kells ve Smith, 1991).

Özet olarak kavitasyon önlemek ve azaltmak için aşağıdaki uygulamalar yapılabilir: (Kells ve Smith, 1991; Chanson, 1994; Nie, 2001)

- Kavitasyon oluşumunu en aza indirecek tasarım ve işçilikle ilgili önlemler almak
- Dolusavak yüzeyinin katkı maddeleriyle direnç kazanmasını sağlamak
- Yüzeyin pürüzsüz olmasını sağlamak yada yapay olarak pürüzlendirmek
- Havalandırıcı inşaa ederek akımın havalanmasını sağlamak

Eğer tasarım herhangi bir önlem alınmasını zorunlu kılıyorsa en etkili yöntemlerin başında havalandırıcı kullanmak gelir. Günümüzdeki birçok büyük baraj projesinde havalandırıcılar başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Örnek Dolusavak Modeli

Bu tezde, örnek alınacak model, ilgili proje firmasından gerekli izinler alınarak (ENERGO-PRO), Alpaslan II Barajı Dolusavağı projesi ve Hidrolik Hesap Raporundaki (Hidro dizayn, 2018),bilgilere uygun olarak hazırlanmıştır. Alpaslan II Barajı ve HES Projesi, Türkiye’de, Doğu Anadolu Bölgesi’nde, Muş ilinde, Fırat nehrinin ana kollarından Murat nehri üzerinde Muş kent merkezine yaklaşık 34 km uzaklıkta ve Murat nehrinin 1 267.00 m talveg kotunda projelendirilmiş ve inşaatı halen devam etmektedir. Proje, 1967’de ‘DSİ Genel Müdürlüğü’ tarafından başlatılmış, zamanla değişen ve gelişen durumlarla 1994’te raporu oluşturulmuştur (DSİ, 2013).

Alpaslan II barajı mansabında Muş Ovası yer almaktadır. Bu çerçevede, Murat Nehrine mansaplanan Karasu Nehrinin taşkınlarından Muş Ovası’nı korumak için Alpaslan II barajı rezervuarında taşkın kontrol hacmi ayrılmıştır. Talvegden yüksekliği 99 m olan barajın asıl amaçları enerji üretimi, sulama, taşkından korumak olarak tasarlanmıştır. Projenin sonunda yıllık 780 Gwh/yıl elektrik enerji üretimi amaçlanmaktadır. Barajın dolusavağı sol sahile yerleştirilmiş olup barajın gövdesi asfalt çekirdekli kum-çakıl-kaya dolgu olarak yapılmasına karar verilmiştir. Barajın hidrolojik özellikleri Çizelge 2.1’de, baraj dolusavağının karakteristik özellikleri ise Çizelge 2.2’de verilmiştir (Hidro dizayn, 2018).

Çizelge 2.1. Alpaslan II Barajının hidrolojik özellikleri (Hidro dizayn, 2018)

Drenaj Alanı [km ²] :	17 505.00
Doğal akım [hm ³]	4 414.04
Doğal akım [m ³ /s]	139.89
Mevcut durum [hm ³]	4 102.74
Mevcut durum [m ³ /s]	129.98
Gelecekteki durum [hm ³]	3 470.43
Gelecekteki durum [m ³ /s]	109.94

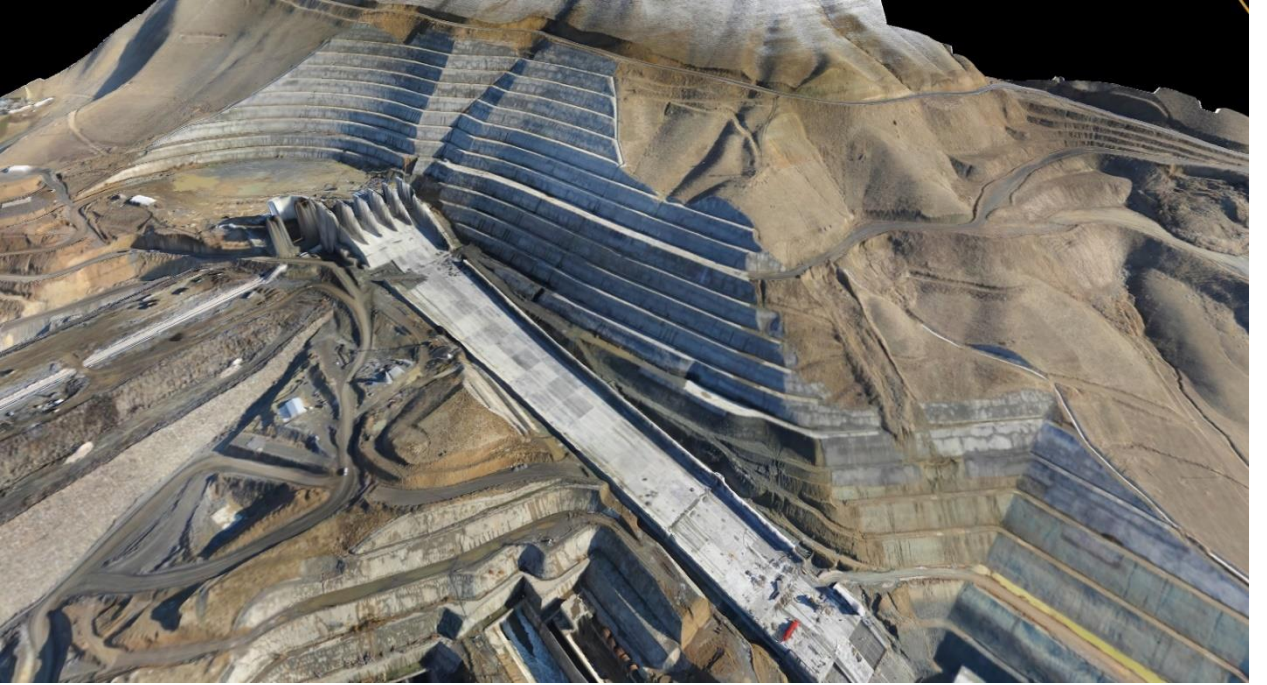
Çizelge 2.2. Alpaslan II Barajı dolusavağının özellikleri (Hidro dizayn, 2018)

Dolusavak Giriş Piki [m ³ /s]	6 705.80
Tipi	Radyal Kapaklı
Kapak Adedi	5
Kapak Genişliği-Yüksekliliği	11.00 x 13.00
Dolusavak toplam brüt genişliği [m]	71.00
Dolusavak toplam net genişliği [m]	55.00
Dolusavak Yaklaşım Kanalı Kotu [m]	1 350.00
Dolusavak Eşik Kotu [m]	1 355.50

Alpaslan II barajının sol sahile yerleştirilen dolusavağının yaklaşık platform kotu 1350 m ve eřik kotu ise 1355.50 m olarak uygulanmıştır. Tahliye edilebilecek maksimum debi 6705.80 m³/s olarak hesaplanmıştır. Kapaklı olarak tasarlanan dolusavağın 5 adet 11x13 m (YxD) radyal kapağı vardır. Dolusavağın orta ayaklarla birlikte genişliği 71 m, net genişliği 55 m'dir. Başlangıçta genişliği 71 m olan dolusavağın membaya doğru genişliği 19.80 m azalarak 51.20 m'ye dūřmektedir. řut kanalının uzunluğu 539 m'dir. řut yapısının sonunda enerji kırıcı bir havuz yerleştirilmiştir. Dolusavağın inşaatına ait bazı görüntüler şekil 2.1'de verilmiştir. (Hidro dizayn, 2018).



(a) Üstten

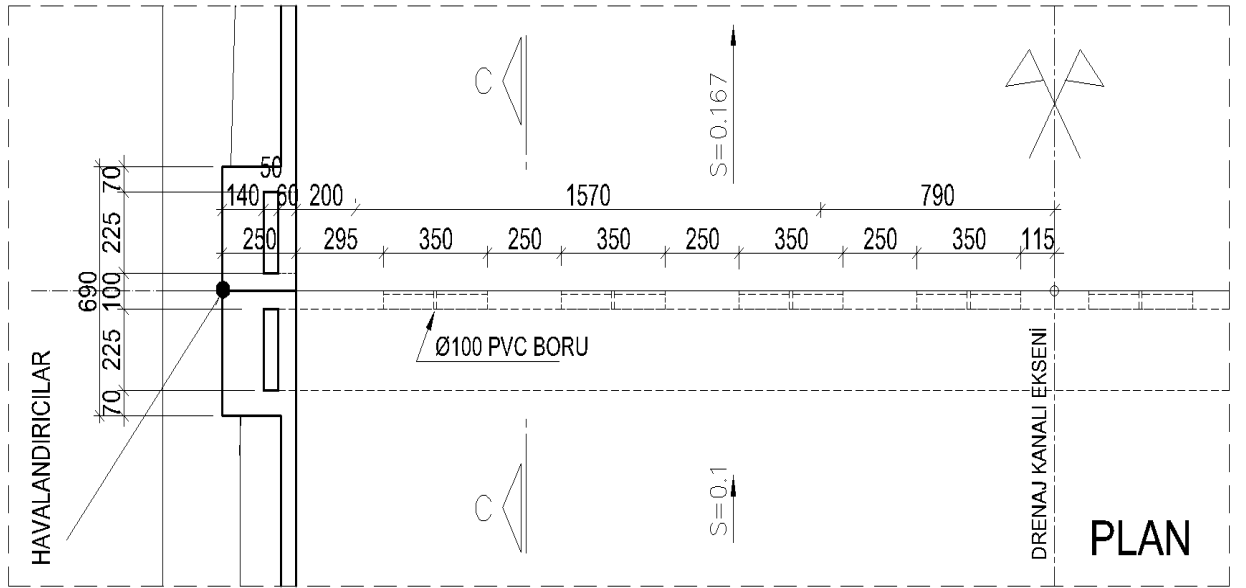


(b) Profilden

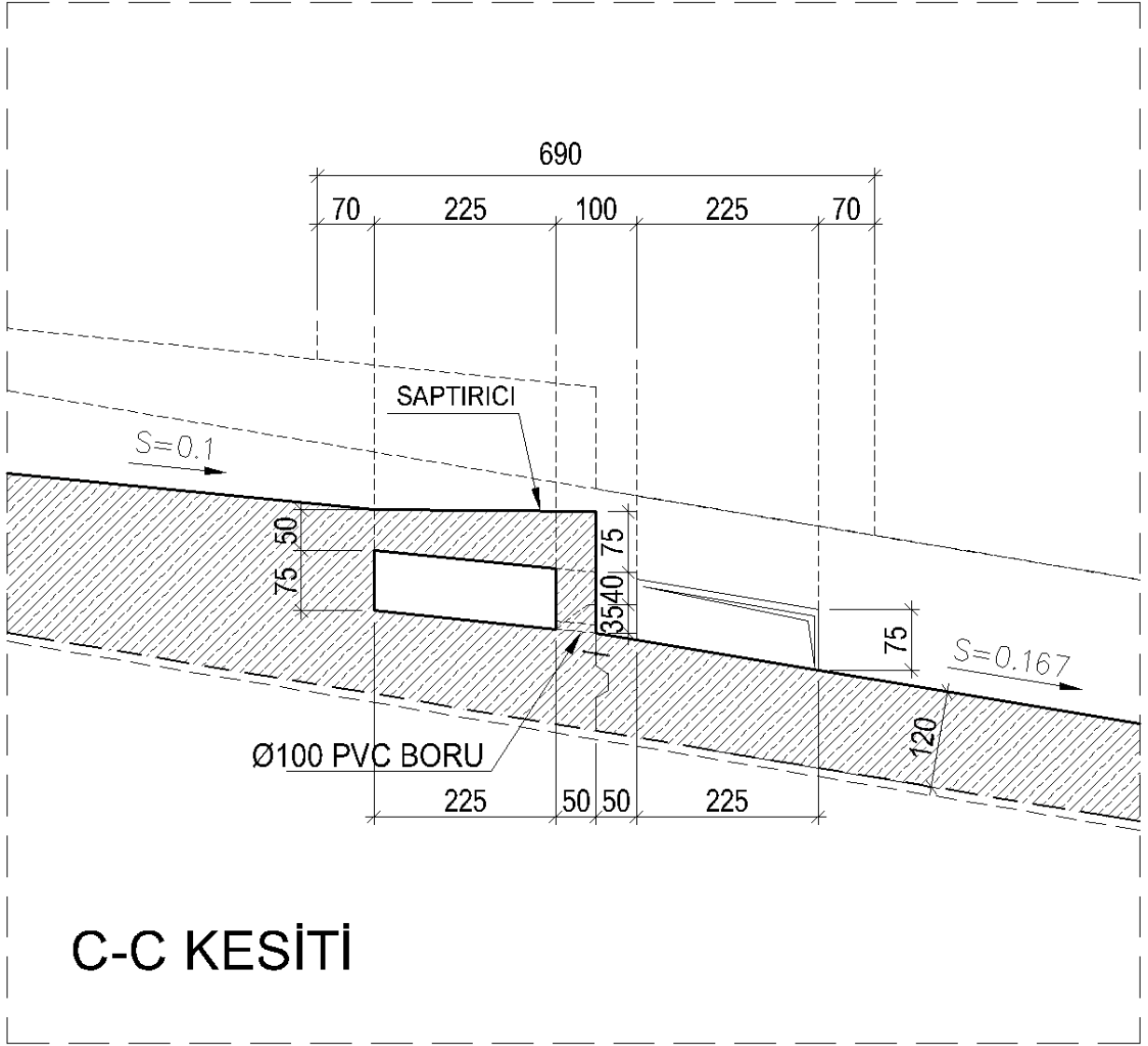
Şekil 2.1. Alparslan II Barajı dolusavağının görüntüleri (ENERGO-PRO, 2019)

2.2. Örnek Havalandırıcı Tasarımı

Dolusavaklarda akım hızının 25-30 m/s aralığında olduğunda literatürde belirtildiği gibi kavitasyon meydana gelir. Örnek barajda yapılan kavitasyon hesaplamaları sonucunda havalandırıcıların gerekli tasarım ve boyutlandırılması proje firması tarafından yapılmıştır. Yapılan kavitasyon indeksi hesaplamaları sonucunda bir havalandırıcı yetersiz kaldığından, 0+400.0 ve 0+470.0 km'lerinde iki adet havalandırıcı projelendirilmiştir. Havalandırıcı şut kanalı boyunca yerleştirilen bir ana galeri, bu galeriye ve jet altı boşluğa açılan iki taraflı toplamda dört adet bacadan oluşmaktadır. Şut kanalı üzerindeki akım ana galeri ile oluşturulan bir eşik (basamak) ve ana galeri üzerine yerleştirilmiş bir rampa (saptırıcı) ile şut yüzeyinden saptırılmaktadır. Böylece ikincil bacaların beslediği jet altı havalandırma boşluğu oluşturularak yanlardan jet altına hava girişi sağlanması amaçlanmıştır. Ana havalandırma bacaları dikdörtgen kesitli olup yan duvarlar içine düşey bir şekilde konumlandırılmıştır. Ana havalandırma galerisinin içerisinde su birikmesini önlemek amacıyla şut kanalı genişliği boyunca belirli aralıklarda Ø100'lük drenaj boruları yerleştirilmiştir. Ana galeri ile su jeti altındaki havalandırma boşluğu arasındaki bağlantı belli aralıklarda yerleştirilen dikdörtgen kesitli havalandırıcı kanallarıyla sağlanmıştır. Bu kanalların bir özelliği de kanal genişliği boyunca orta kesimlere yeterli hava sağlayabilmek için bu kesitlerin kanal genişliği boyunca değişken olmasıdır. Örnek alınacak olan havalandırıcı tasarımının boyut ve detayları Şekil 2.2'de verilmiştir (DSİ, 2013).



a) Plan

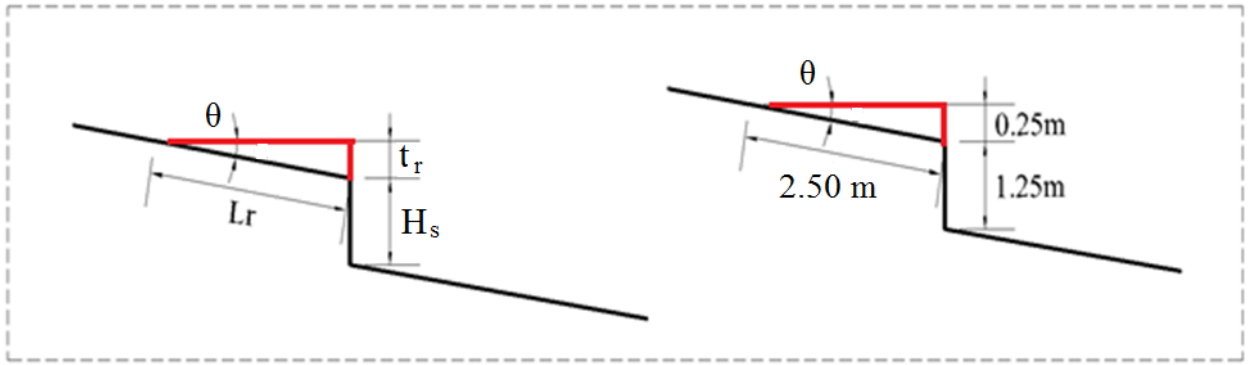


b) Kesit

Şekil 2.2. Örnek dolusavak havalandırıcısının detayları (DSİ, 2013)

Dolusavak boşaltım kanallarındaki akıma daha fazla hava karışmasını sağlamak, böylece boşaltım kanalı boyunca oluşabilecek kavitasyon riskini minimuma indirmek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır (Demiröz, 1986; Kökpınar ve Göğüş, 2002; Aydın, 2005; Kaplan, 2018). Bu çalışmalar neticesinde, havalandırıcılardan ayrılan su jetinin yörüngesinin akıma karışan havanın miktarında kayda değer derecede rol oynadığı gözükmektedir. Havalandırıcılardan ayrılan su jetinin uzunluğu ile akıma karışan hava arasındaki ilişkisini tespit ederek deney ve analizlerle ispatlanmıştır (Kökpınar ve Göğüş, 2002; Aydın, 2006).

Bu bilgiler doğrultusunda, serbest su jeti uzunluğunu arttırmak ve böylece havalandırıcının verimi arttırmak amacıyla havalandırıcı tasarımında bazı düzenlemeler DSİ (2013) tarafından yapılmıştır. Havalandırıcıların neden olduğu su jetinin boyunun artırılmasının en kolay yöntemi havalandırıcıların üzerine bir saptırıcının (rampa) yerleştirilmesidir. Saptırıcılar absorbe edilen hava miktarının fazlaşmasına ve su jetinin boyunun uzamasına sebep olmaktadır. Serbest jet uzunluğunun arttırılması amacıyla kritik kavitasyon indeksi değeri de gözönüne alınarak havalandırıcıların üzerine saptırıcıların yerleştirilmiştir. Böylece kavitasyon riskinin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Havalandırıcılar üzerine yerleştirilen saptırıcıların detayları Şekil 2.3'te verilmiştir (DSİ, 2013).



Şekil 2.3. Havalandırıcı üzerindeki saptırıcı parametreleri ve boyutları (DSİ, 2013)

Saptırıcıların boyutları hesaplanırken, literatürdeki çalışmalardan faydalanarak genel olarak aşağıdaki yol izlenmiştir (DSİ, 2013):

$$\frac{t_r}{L_r} = 0.1 \text{ ve } \frac{t_r}{H_s} \sim 0.1 - 0.2 \text{ olarak verilmektedir.}$$

Bu değerlerden $\frac{t_r}{H_s} = 0.2$ seçilmiştir (DSİ, 2013).

Proje değerlerinden her iki havalandırıcı $H_s = 1.25$ m'dir. Yukarıdaki bağıntılar her iki havalandırıcıda uygulandığında $t_r = 0.25$ m ve $L_r = 2.5$ m olarak hesaplanmıştır. Yukarıdaki hesaplamalarla bulunan $t_r = 0.25$ m değeri modele uygulandıktan sonra yapılan gözlemler sonucu yeterli havalandırmayı sağlamadığı için saptırıcıyı yükseltme yoluna gidilip orijinal proje durumuna getirilmiştir (DSİ, 2013).

2.3. Hava Konsantrasyonunun Tayini

Dolusavak havalandırma performansını belirlemede literatürde birçok denklem önerilmiştir. Bu denklemler birbirinden farklı gibi olmasına rağmen, temelde bu denklemler akımın (su hızı, Froude sayısı vb.) ve havalandırıcının (jet uzunluğu boşluk alt basınçları, havalandırıcı geometrisi gibi) bir fonksiyonudur (Aydın, 2005). Havalandırma performansını ortaya çıkaran en belirgin yöntem hava giriş oranının belirlenmesidir. Akıma giren hava debisinin akım debisine bölünmesiyle hava giriş oranı elde edilir (Denklem 2.1).

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad 2.1$$

Burada;

Q_a : Akım giren hava debisi (m^3/s),

Q_w : Su debisi (m^3/s),

β =Hava giriş oranıdır (veya katsayısıdır).

Hava giriş oranına bağlı olarak ortalama hava konsantrasyonu ise;

$$C_o = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad 2.2$$

olarak hesaplanabilir. Havalandırıcı performansında en etkili parametre hava giriş oranıdır. Bazı araştırmacılar çalışmalarında yüksek hızlı akımlar, hava giriş karakteristikleri, ortalama hava konsantrasyonu gibi parametreler üzerinde çalışmışlardır. Genel olarak kavitasyon hasarına uğramamak için hava konsantrasyonun %5'den fazla olması gerektiğini, aksi takdirde akıma yeterince hava karışmayacağını ve kavitasyon meydana geleceğini ifade etmişlerdir.

2.4. Sayısal Model

Günümüzde akışkan hareketleri, deneysel, analitik ve sayısal olmak üzere üç farklı yöntemle modellenmektedir. Çoğu hidrolik tasarım gibi dolusavak ve havalandırıcıları için kullanılan geleneksel yöntem fiziksel deney modelleridir. Geçmişten bugüne birçok akışkan hareketi ve hidrolik tasarımlar ölçekli fiziksel modeller kullanılarak modellenmiş ve prototip uygulamasına geçilmeden önce son kontroller bu modellerle gerçekleştirilmiştir. Akışkan

hareketinin önemli olduğu her türlü uygulamada (havacılık, uzay, gemi, kimya, inşaat gibi alanlarda) model deneyinin önemi tartışılmazdır. Model deneyleri aslında kuramsal olarak üretilen analitik/matematiksel modellerin yetersiz kaldığı durumlarda önem kazanmaya başlamıştır. Fizik ve beraberinde akışkanlar mekaniği alanlarında 17. yy'da başlayıp 18.yy'ın sonlarına kadar gelişen kuramsal bilgiler doygunluğa ulaşmış ve 19.yy'ın başlarında yerini deneysel çalışmalara bırakmıştır. Bu yüzyıldaki bilimsel ve teknolojik gelişmelerin çoğu deneysel çalışmalara borcu olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Bununla birlikte 20.yy'da gelişen sayısal hesaplama teknikleri ve yine bu yüzyılın sonlarında gelişmeye başlayan bilgisayar teknolojileriyle birlikte uygulanma fırsatı bulmuştur. Bu tekniklerin temeli aslında 17.yy'dan itibaren ortaya konmuş olan kuramsal bilgiler oluşturmaktadır. Günümüze geldiğinde yüksek kapasiteli gelişmiş bilgisayarlarla birlikte yazılım tekniklerinin sayısal yöntemler üzerine uygulanması sonucu bir çok alanda olduğu gibi akışkanlar dinamiği konusunda da gerçeğe yakın 2 ve 3 boyutlu sayısal modellerle anlaşılabilir. Akışkanların temel denklemlerinin çeşitli sayısal yöntemlerle yaklaşık çözümlerine dayalı olarak geliştirilmiş 2 ve 3 boyutlu sayısal modellemenin günümüzdeki adı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ya da İngilizcesi olan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) olarak bilinmektedir.

Bu tezde Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) yöntemiyle oluşturulmuş üç boyutlu modeller kullanılarak dolusavaklar üzerindeki havalandırıcıların analizleri yapılacaktır. Hesaplamalı Akışkan Dinamiği yöntemi karmaşık çok fazlı akımların analizini sayısal modelleme teknikleri kullanarak basitleştirir. Bu teknik sayesinde sıvı ve gazların katı ile etkileşimleri gibi karmaşık problemler de sayısal ortamda simüle edilebilmektedir. Simülasyondan doğru sonuçlar elde edebilmek için bilgisayarın performansı, modelin doğruluğu, modelin ağ yapısı gibi faktörler etkilidir. Bu yöntemin esas mantığı temel üç ana denklemden (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) hız sıcaklık basınç gibi verilere ulaşmaktadır (Karamanoğlu, 2006). Akışkanların dinamik modellenmesinde kullanılan sayısal yöntemler genel olarak; Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) ve Sonlu Hacimler Yöntemi (FVM) olarak sayılabilir. Sonlu Hacimler Yöntemi (FVM) çoğunlukla HAD analizlerinde tercih edilen yöntemlerden biridir.

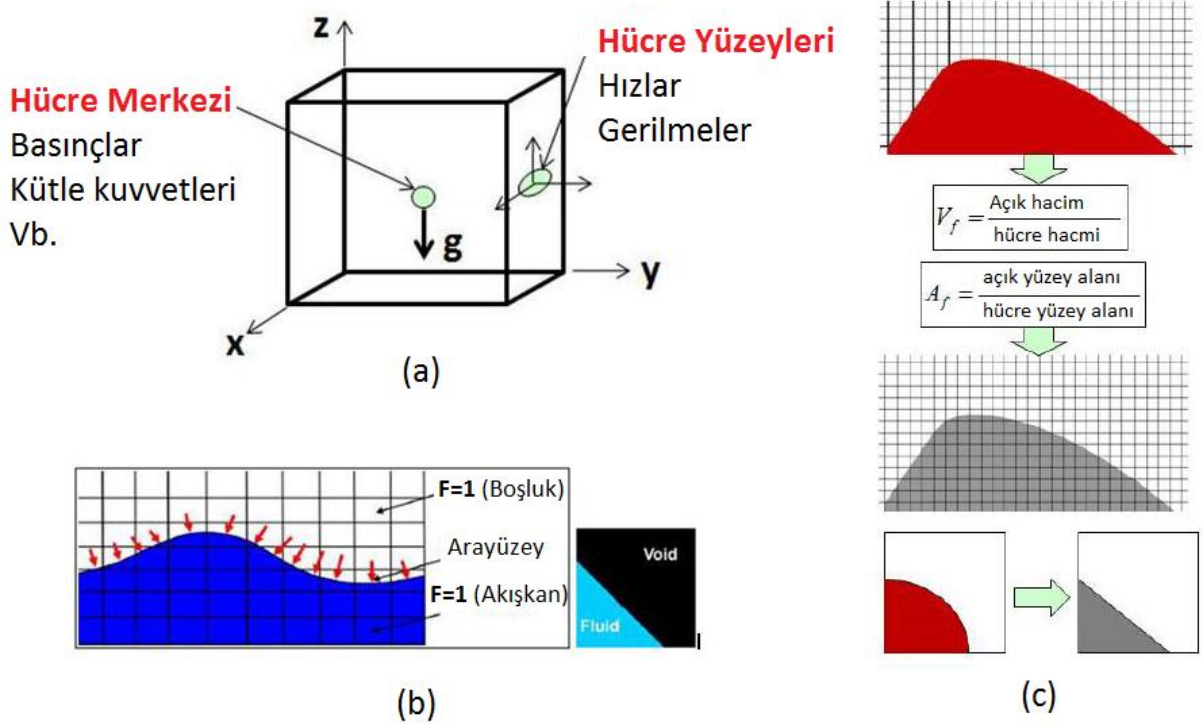
HAD analizleri genelde üç ana aşamada gerçekleştirilir. Birincisi işlem öncesi (pre-processor), ikincisi çözüm (solver) ve sonuncusu ise işlem sonrası (post-processor) aşamalarıdır. İlk aşamada (pre-processor), çözülecek akış probleminin sayısal modeli ve girdi parametreleri oluşturulur. İkinci aşamada (solver), akışın temel denklemleri ayrıştırılarak her akış parametresi her hücre için hesaplanmak suretiyle tüm sayısal hücreler için çözüm koşturulur. Dolayısıyla,

hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu sonucunda büyük miktarda veri üretilmektedir. Son aşamada (post-processing) elde edilen veriler görselleştirilerek sonuçlar yorumlanır.

Bu çalışmada akışkanlar konusunda ve birçok mühendislik alanlarında tercih edilen Flow 3D sayısal analiz programı kullanılmıştır. Flow 3D, laminer ve türbülanslı, tek ve çok fazlı karmaşık akımların hareketini, akışkanın lineer olmayan temel bünye denklemleri ve literatürdeki bazı ampirik yaklaşımlarla birlikte çözerek simüle eden ileri düzey bir HAD paket programıdır. Özellikle serbest yüzeyli akışların simülasyonunda kullanılan Flow-3D üç boyutlu süreklilik ve hareket (RANS) denklemlerinden oluşan diferansiyel denklem sistemini sonlu hacimler yöntemiyle çözer.

Diğer bazı yazılımların aksine Flow 3D yapılandırılmış ortogonal ağ yapısı kullanmaktadır. Akışkana ait büyüklükler kontrol hacminin merkezinde yer almakta ve vektörel büyüklükler kontrol hacminin yüzeyinde hesaba katılmaktadır (Şekil 2.4a). Programı diğer HAD yazılımlarından ayırt eden en önemli özelliği geometri tanımlanmasında kullanıldığı FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) ile serbest yüzey tanımlamasındaki TruVOF (Modified Volume of Fluid) teknikleridir. Modelin geometrisi, çözüm ağı üzerinde bir kısım hücrelerin katı cisim olarak kapatılmasıyla elde edilmektedir. FAVOR adı verilen bu yöntemde kontrol hacmi içerisinde bulunan bir katı modelin ne kadarını kapladığı (volume fraction) ve bu kontrol hacminin her bir yüzeyinde ne kadar alanı kapladığı hesaplanarak iki değer orantılanmaktadır (Şekil 2.4c). Hücre tamamen katı ile dolu ise bu değer sıfır, tamamen boş ise 1 değerini alır. Eğer bir hücre kısmen katı ile dolu ise bu değer hücrede kapladığı hacim yüzdesine bağlı olarak sıfır ile 1 arasında bir değer almaktadır. Bu durum aslında her bir hücredeki yüzeylerin akıma açık olduğu alanları dolayısıyla bu hücrede ne kadar akışkan bulunduğunu ifade etmektedir (Flow-Science, 2016).

Açık kanal akımları gibi iki faz arasındaki (hava-su arayüzü) serbest yüzeyi tanımlamak için modifiye edilmiş akışkan hacmi (TruVOF) yöntemini kullanmaktadır (Şekil 2.4b). Bu yöntem FAVOR yöntemine benzer şekilde akışkanı hücrelerin boş, dolu ya da kısmen dolu şeklinde tanımlamaktadır. Eğer hücre tamamen akışkanla dolu ise hacim oranı $F=1$, boş ise $F=0$ ve akışkan arayüzü içeriyorsa (kısmen dolu ise) $0 < F < 1$ değerlerini alır. TruVOF ile serbest yüzeyin takibi üç aşamadan oluşur; ilkin serbest yüzeyin yeri tespit edilir, fazlar arası (veya boşluk-akışkan arası) keskin bir arayüzey belirlenir ve son olarak bu arayüzeye sınır şartları uygulanır. Bu şekilde arayüzey üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmış olur. Ayrıca, Flow-3D türbülanslı akımlar için $k-\epsilon$, $k-w$, Prandtl karışma boyu, türbülans enerjisi, RNG (Renormalized Group) ve LES (Large-Eddy Simulation) gibi birçok farklı türbülans yaklaşımları bünyesinde barındırır (Flow-Science, 2016).



Şekil 2.4. Flow-3D sayısal model konseptleri: a) Hücre sistemi, b) Akışkan yüzey (TruVOF) konsepti, c) FAVOR yöntemi

Bunun avantajları yanında bazı dezavantajları da vardır. Yapılandırılmış meş (*structured mesh*) meş (ağ) yapısındaki çarpıklık gibi meş yapısından kaynaklı sorunları ortadan kaldırırken çözüm alanına göre hassas meş gerektiren yerlerde değişken meş uygulanamadığından, yüksek çözünürlüklü meş gerektiren problemlerde eleman sayısında ve dolaylı çözüm zamanında ciddi artışlara neden olur. Bu nedenle asıl modellemelere geçmeden meş yapısının iyi bir şekilde optimize edilmesi gerekir. Flow-3D’de kullanılan akışkanın temel denklemleri aşağıda verilmiştir (Flow Science 2016).

Kütle süreklilik denklemi:

$$VF \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u Ax) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho u Ay) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w Az) + \varepsilon \frac{\rho u Ax}{x} = RDIF + RSOR \quad 2.3$$

Burada;

V_f = Akışkanın hacim oranı,

ρ : Akışkanın yoğunluğu,

R_{DIF} = Türbülans difüzyon terimi,

R_{SOR} = Kütle kaynağı,

$(x, y, z, r, RSOR)$: koordinat sistemi,

(u, v, w) = hız bileşenleri,

$A_x = x$ yönündeki fraksiyonel akış alanı,

$A_y = y$ yönündeki fraksiyonel akış alanı,

$A_z = z$ yönündeki fraksiyonel akış alanıdır.

Denklemdaki R katsayısı aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi koordinat sisteminin seçimine bağlıdır.

$$\frac{\partial}{\partial y} \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad 2.4$$

Bu denklemin son hali aşağıda ifade edilmiştir:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{rm}{r} \frac{\partial}{\partial y} \quad 2.5$$

Burada:

$$y = rm * q \quad 2.6$$

R_m =düzenlenmiş referans yarıçapıdır.

Kütle süreklilik denklemine ek olarak FLOW-3D'de akışkan hareketinin momentum denklemi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{VF} + \left(uAx \frac{\partial u}{\partial x} + vAyR \frac{\partial u}{\partial y} + wAz \frac{\partial u}{\partial z} \right) - e \frac{Ayv^2}{xVF} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Gx + fx - bx - \frac{RSOR}{\rho VF} (u - uw - \delta us) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{VF} \left(uAx \frac{\partial v}{\partial x} + vAyR \frac{\partial v}{\partial y} + wAz \frac{\partial v}{\partial z} \right) - e \\ = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + Gy + fy - by - \frac{RSOR}{\rho VF} (u - uw - \delta us) \end{aligned} \quad 2.7$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{VF} \left(uAx \frac{\partial w}{\partial x} + vAyR \frac{\partial w}{\partial y} + wAz \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Gz + fz - bz - \frac{RSOR}{\rho VF} (u - uw - \delta us) \end{aligned}$$

Burada:

(Gx, Gy, Gz) : Kütle ivmesi,

(fx, fy, fz) : Viskoz ivmeleri,

(bx, by, bz) : Gözenekli ortamlarda akım kayıpları,

$Uw = (uw, vw, ww)$: Kütle kaynağının hızı,

$Us = (us, vs, ws)$: Kütle kaynağının kendisine göre kaynağın yüzeyindeki akışkanın hızını ifade eder.

Kontrol hacmi aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$Us = \frac{dQ}{\rho Q dA} n \quad 2.8$$

Bu denklemde:

dQ : Toplam debi,

ρQ : akışkanın yoğunluğu,

dA : hücredeki kaynak yüzeyinin alanı,

n : yüzeye dıştan normaldir

2.5 Hava Giriş Modeli (Air Entrainment Model)

Bu çalışmada Flow-3D'de nap yüzeyinden giren hava miktarlarını belirleyebilmek için Hava Giriş Modeli (*Air Entrainment Model*) kullanılmıştır. Hava Giriş Modeli, türbülans ve akış durumundan dolayı sıvı içerisindeki yaklaşık hava miktarını belirlemede yardımcı olur. Bu model dolusavak akış modellerinde metal dökümündeki gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Temel fikir, türbülanslı girdapların, havayı hapseden ve sıvının gövdesine geri taşıyan serbest bir yüzeyin üzerine küçük sıvı elementleri yerleştirilmesidir. Hava sürüklenme oranı türbülans dengesi ve yüzey gerilimine bağlıdır (Flow Science, 2016).

$$\frac{\partial V}{\partial t} = C_{air} \cdot A_s \left[2 \cdot \left(\frac{\rho k - \rho g_n L_t - 2\sigma / L_t}{\rho} \right) \right]^{1/2} \quad 2.9$$

V = sürüklenen hava hacmi

C_{air} = hava sürükleyen yüzey alanı kısmı, $0 < C_{air} < 1$; başlangıç olarak 0.5 kullanılır

A_s = sıvının yüzey alanı

ρ = Akışkanın yoğunluğu,

k = türbülans kinetik enerjisi

L_t = türbülans uzunluk ölçeği

g_n = serbest yüzeyde yerçekimi kuvveti

σ = yüzey gerilim katsayısı

Hava sürüklenme modeli kurumu için gerekli detaylara (skalar model, sürüklenme akısı modeli) karar verildikten sonra başlangıç ve sınır koşulları için türbülans parametreli seçilmelidir. Türbülans parametreleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir (Flow Science 2016).

$$k = 3/2(U*I)^2 \quad 2.10$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L_T} \quad 2.11$$

k = türbülans kinetik enerjisi

ε = türbülans dağılım oranı

U = Ortalama makroskopik hız

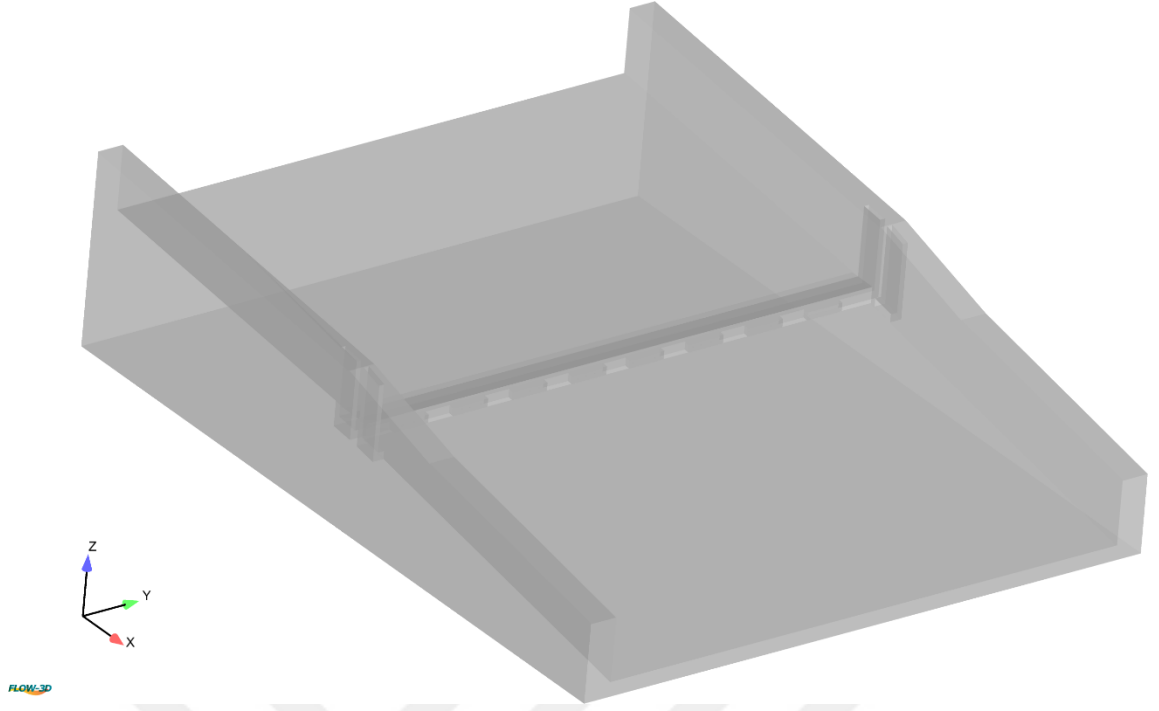
ε = Türbülans yoğunluğu (düşük türbülans için% 1-5, yüksek türbülans için % 5-20 olup genellikle %5 seçilir).

C_V = Türbülans modeli katsayısı (tipik olarak 0.09)

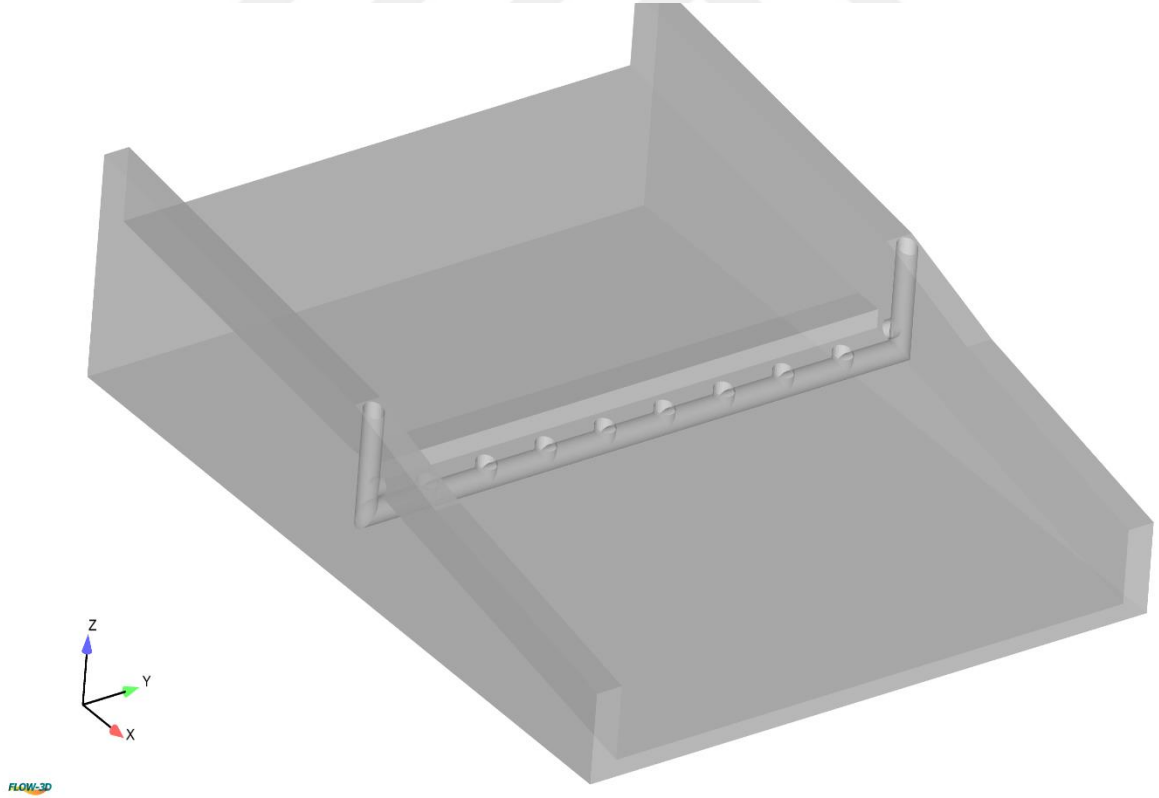
L_T = Türbülanslı uzunluk ölçeği; en büyük çalkantılı girdapların boyutunu açıklar.

2.6. Sayısal Model Geometrileri

Öncelikle seçilen örnek modelin orijinal projedeki boyutlarına göre üç boyutlu modeli sayısal modeli hazırlanmıştır (Şekil 2.5). Çözüm kolaylığı açısından dolusavağın tümü yerine sadece +370 km ve +430 km arasında kalan Alparslan II Barajının birinci dolusavağın +400 km'deki birinci havalandırıcısı dikkate alınmıştır. Havalandırıcı membasında sınır tabaka teorisine göre tam gelişmiş akım elde etmek için yeterli bir uzunluk bırakılmıştır. Mansap kısmına ise jetin sıçramasından sonra serbest jet uzunluğunun oluşumu için yeterli bir uzunluk alınmıştır. Çözümler kanal ortasındaki simetri eksenine göre yarısı için yapılarak çözüm zamanından kazanılmıştır. Sonraki adımda orijinal projedeki havalandırıcılar yerine ilk kez Aydın (2005) tarafından önerilen yeni bir havalandırıcı tipi olan Altın Alışlı Havalandırıcı tipi uygulanarak havalandırma ve kaviteasyon önleme performansı incelenmiştir (Şekil 2.6). Geometri oluşturulmasında ilk modeldeki benzer prosedür izlenmiştir. Yeni oluşturulan havalandırıcının havalandırma alanının önceki havalandırıcıya eşit olmasına dikkat edilerek oluşturulmuştur. Hazırlanan iki model üzerinde farklı yükseklik hız ve Froude sayılarında sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Sayısal model çözümlerinde Flow 3D programında bulunan mesh aralığının doğru ve sağlıklı çözüm almak açısından önemlidir. Diğer yandan gereğinden fazla yüksek çözünürlük hem bilgisayar işletim sistemini zorlamakta hem de çözümü gereksiz yere uzatmaktadır. Ancak çözüm ağının yetersiz oluşu, sayısal hataların artmasına ve sonuçların yakınsamamasına neden olacaktır. Ayrıca Flow 3D nin FAVOR tekniği nedeniyle katı modelin net bir şekilde elde edilebilmesi için yeterince yüksek çözünürlüklü bir meş yapısına ihtiyaç vardır. Tüm bu durumlar göz önünde tutularak farklı çözünürlükte meş yapıları denenmiş ve en iyi çözüm hassasiyeti/çözüm zamanı oranı yakalanmaya çalışılmıştır.

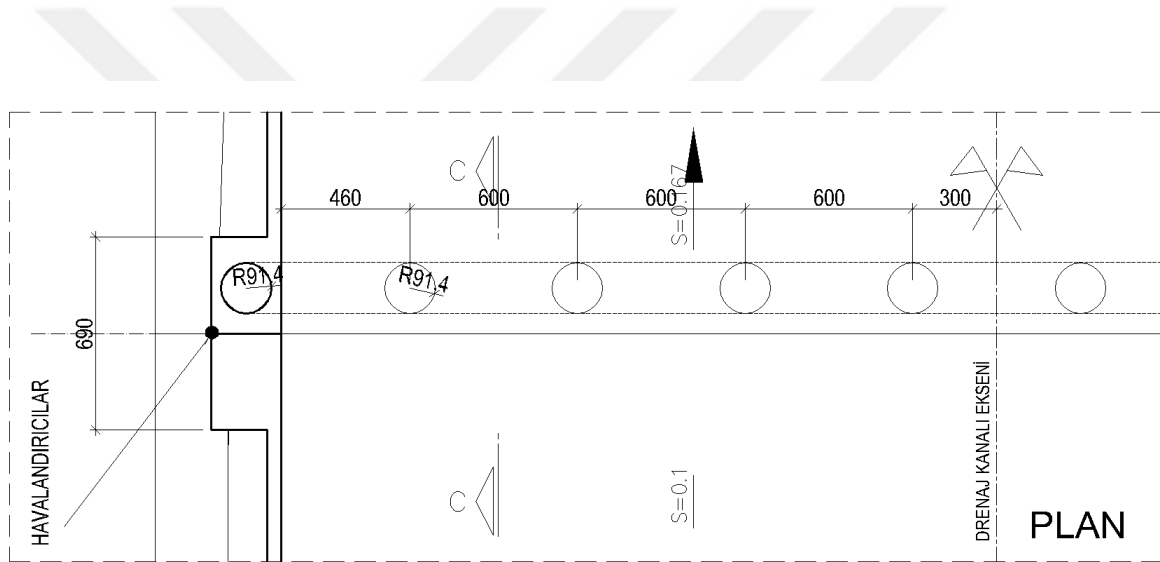


Şekil 2.5. Orijinal proje durumu dolusavak birinci havalandırıcı sayısal modellenmesi

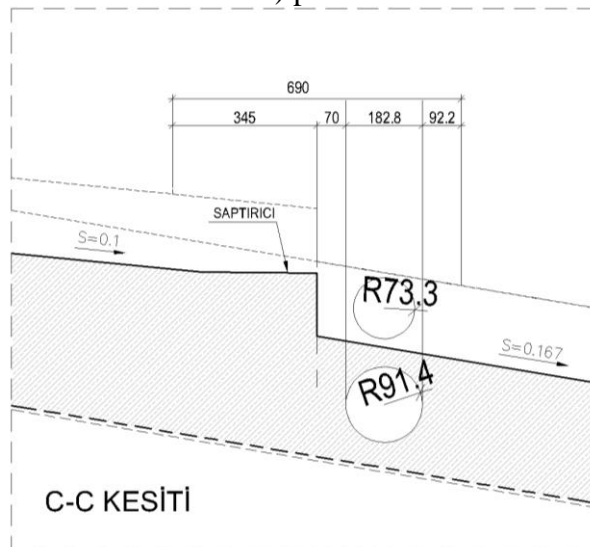


Şekil 2.6. Alttan alıslı havalandırıcının sayısal modellenmesi

Orijinal havalandırıcı tasarımı yerine kullanılacak olan Alttan alışı havalandırıcı modeli ilk kez Aydın (2005) tarafından önerilmiştir. Yandan alışı klasik havalandırıcılarda havanın çoğunun jet altındaki enerji kayıpları nedeniyle giriş ağzlarına yakın akıma karışır ve orta kısımlara yeterince hava ulaşmaz. Alttan alışı havalandırıcılarda ise kanal genişliği boyunca yerleştirilen hava delikleri sayesinde üniform bir basınç dağılımı ve hava karışımını sağlanabildiğinden özellikle geniş dolusavak kanallarının havalandırılmasında etkili olmaktadır. Bu havalandırıcı bir saptırıcı (rampa), ve bu saptırıcının hemen mansabında şut tabanı üzerinde kanal genişliği boyunca belirli aralıklarla aynı çaptaki dairesel kesitler ve bu kesitleri besleyecek ana galeri yerleştirilmiştir. Aydın (2005) tarafından verilen modelden farklı olarak rampa ile birlikte orijinal projedekine benzer bir eşik kullanılmıştır. Oluşturulan alttan alışı havalandırıcı modelin boyut ve detayları Şekil 2.7'deki plan ve kesitte verilmiştir.



a) plan

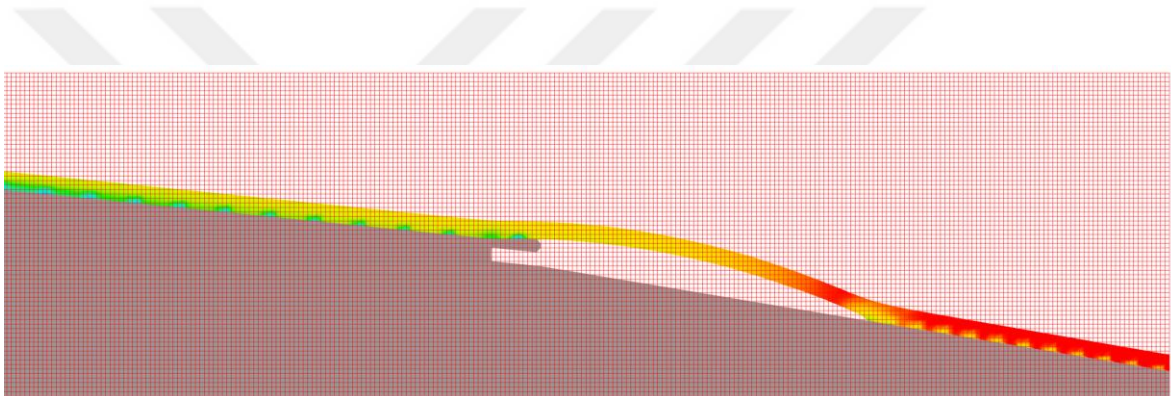


b) kesit

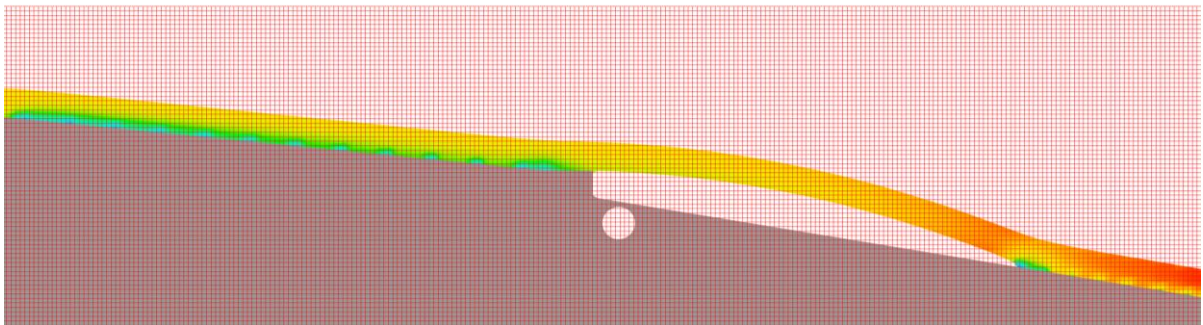
Şekil 2.7. Alttan alışı havalandırıcıların detayları

2.7. Sayısal Modellerin Ağ Yapıları

Örnek dolusavağının ve alttan alışlı dolusavak modellerinin oluşturulan sayısal modellemesinin mesh yapısı, 0.25 metrelik ‘conform’ ağ kullanarak oluşturulmuştur. Sayısal modelde FAVOR tekniği kullanıldığından seçilen ağ yapısının model geometrisinin keskinliği üzerinde de etkisi olacaktır. Ağ yapısının katı model geometrisi ve sonuçlar üzerine etkisini gözlemek için farklı meş yapıları denenerek, çözüm hassasiyet ve çözüm zamanı açısından en uygun meş yapısı seçilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan sayısal modellerde dolusavağın uzunluğu (L) 70 m genişliği (b) 55 m yüksekliği (h) 5 m olarak verilmiştir. Oluşturulan her iki modelde de yaklaşık 4.4 milyon adet yapısal kübik hücre kullanılmıştır. Oluşturulan sayısal modellerin ağ yapısı Şekil 2.8’ de verilmiştir.



a) orijinal havalandırıcı



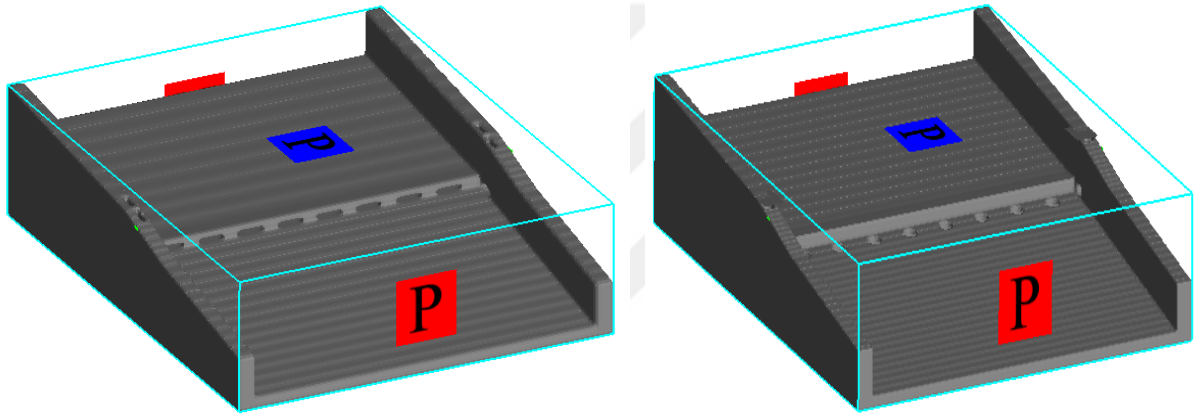
b) alttan alışlı havalandırıcı

Şekil 2.8. Sayısal modellerin ağ yapısı

2.8. Sayısal Modellerin Sınır Koşulları

Sayısal modelin ağ çözünürlüğünün model geometrisi üzerindeki hassasiyetini (etkisini) göstermek için FLOW-3D’deki ‘FAVOR’ özelliği kullanılarak bazı görüntüler elde edilmiştir.

Favor özelliği geometri efektlerini bünye denklemine dahil etmek için kullanılan çok güçlü bir yöntemdir. Bu yapının anlamı, hücre boyutundan daha küçük olan özelliklerin çözülmemesidir. Daha spesifik olarak, bir hücre yüzü boyunca uzanan ancak bu hücre yüzünün bir köşesini içermeyen herhangi bir geometri parçası, alan fraksiyonu (area fraction) tarafından algılanmasını sağlamaktadır. Yani bu yöntem kullanılırken oluşturulan modellerin köşelerinin geometri içerisinde kalmasına dikkat edilmelidir. FAVOR özelliğinde ızgara (grid) çözünürlüğü arttıkça denklemleri algılama ve çözüm ağı gelişerek çok daha doğru sonuçlar verecektir (Flow Science 2016). Şekil 2.9'da FAVOR özelliği kullanılarak oluşturulan modellerin sınır koşulları ile birlikte görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden anlaşılacağı üzere oluşturulan sayısal modelin ağ yapısı model geometrisininin detaylarını yeterince yansıttığını söyleyebiliriz.



a) orijinal havalandırıcı

b) alttan alıslı havalandırıcı

Şekil 2.9. Sayısal modellerin sınır koşulları (FAVOR ile kullanımı)

Oluşturulan sayısal modelin sınır şartları olarak, suyun giriş kısmı yani x_{min} kısmında hız (*velocity*), x_{max} kısmında basınç (*pressure*), y_{min} ve y_{max} kısmında simetri (*symetric*), z_{min} 'de simetri (*symetric*), z_{max} 'da basınç (*pressure*) seçilmiştir. Suyun giriş kısmında Flow 3D programında hız (*velocity*) sınır şartına hız ve su yükseklik değerleri girilerek istenilen debi ve akım koşulları oluşturulmuştur. Bu sınır şartları hazırlanan her iki model için aynı şekilde uygulanmıştır. Giriş sınır şartında dolusvağın maksimum taşkın debisi de dikkate alınarak farklı debilere karşılık gelen farklı akım derinlikleri ve hızları ve dolayısıyla farklı Froude sayıları tanımlanarak her bir akım durumu için HAD analizleri yürütülmüştür.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

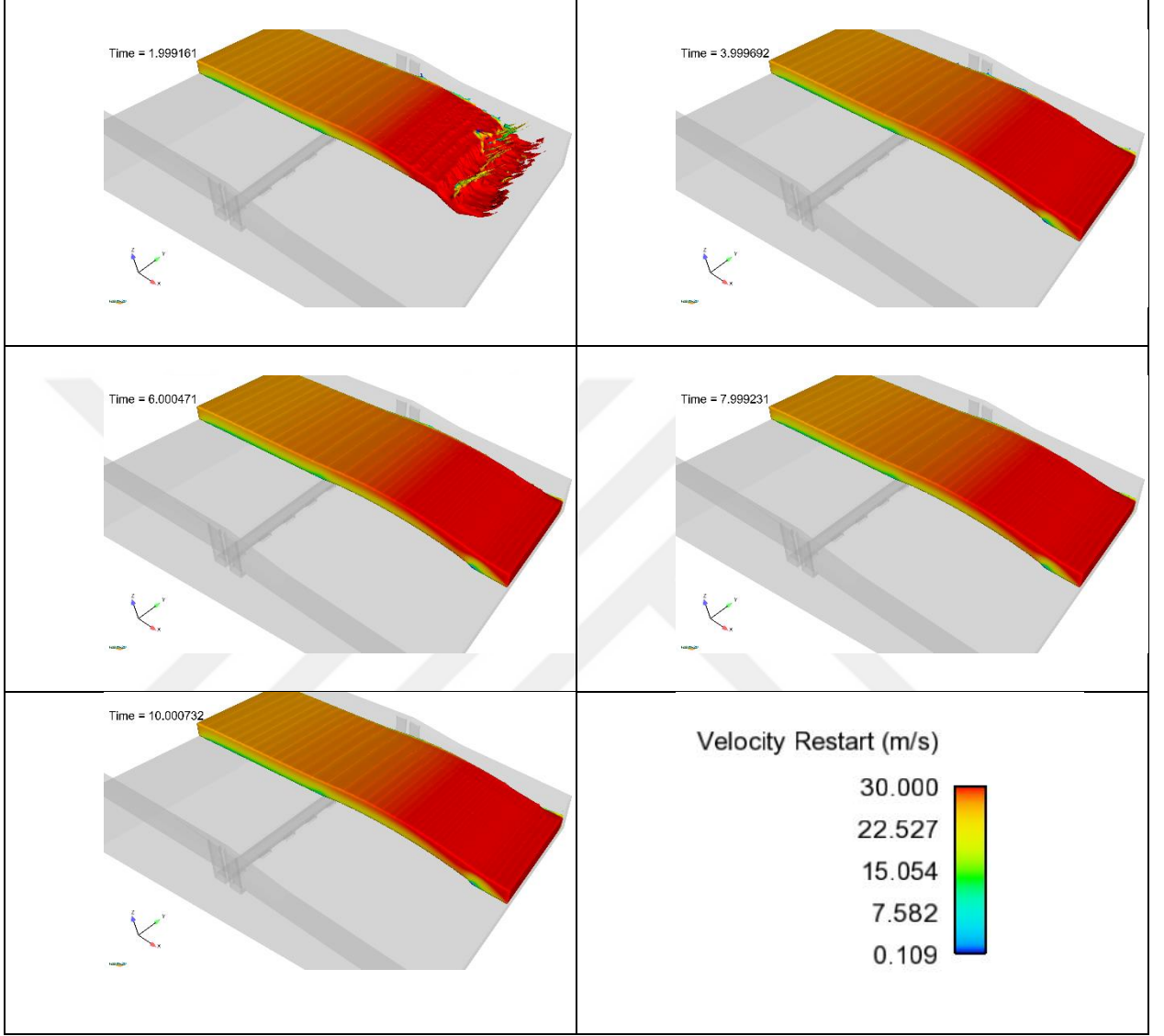
Bu çalışmada model olarak seçilen Alparslan II barajı dolusavak modeli proje firması (Hidro dizayn, 2019) tarafından Flow-3D kullanarak modellenmiş ve elde edilen bu sonuçlar hesap raporunda detaylı olarak sunulmuştur. Bu raporda yer alan analiz sonuçlarından, kullanılan yöntemin yeterince doğru sonuçlar verdiği ve test edildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu tezde sayısal modelin doğrulanması konusunda ek bir çalışma yapılmasına gerek duyulmamıştır. Bu çalışmada sayısal modeller yardımıyla farklı akım koşulları için sadece tek bir havalandırıcı üzerine yoğunlaştırılmıştır. Buradaki amacımız örnek dolusavak modelin bütün olarak incelemesi olmayıp (ki zaten yapılmış) tek bir havalandırıcı performansının ve hidrolik karakteristiklerinin belirlenmesine yöneliktir. Bu çalışmada akıma karışan hava miktarını tespit etmek için Flow-3D programı yardımıyla “Air Entrainment” çözüm modeli kullanılmıştır. İlk olarak orijinal proje durumu için sonuçlar verilecek, daha sonra bunun yerine alternatif bir havalandırıcı tipi (Altın Alışlı Havalandırıcı) kullanılarak elde edilen sonuçlar tartışılacaktır. Son olarak elde edilen çıktılar kendi aralarında ve literatürdeki bazı çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

3.1. Orijinal Havalandırıcı Tasarımı

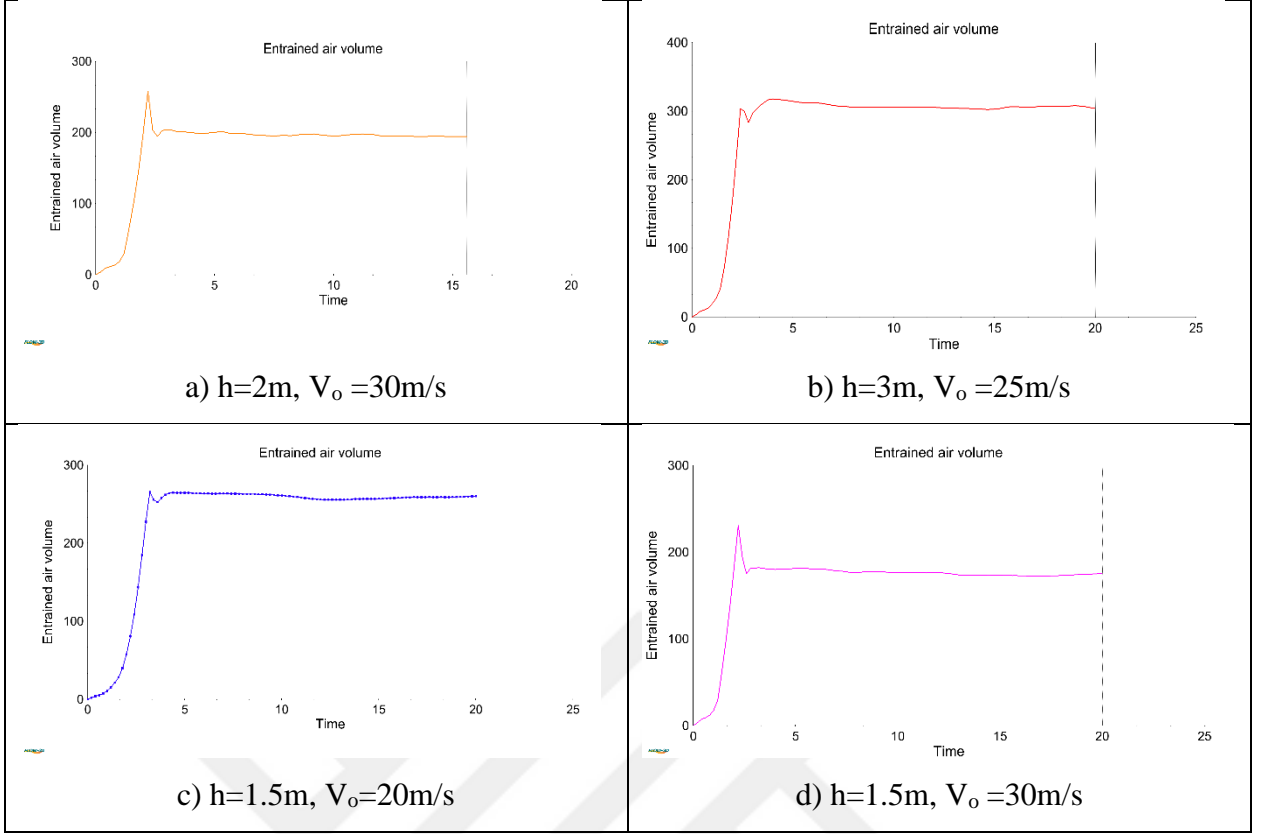
Dolusavak uygulama projesindeki (Hidro dizayn, 2018) orijinal havalandırıcı tasarımına göre hazırlanmış sayısal modellerin analizleri yürütülmüştür. Farklı debilerde farklı akım koşulları elde etmek için $h = 1.00, 1.50, 2.00, 2.50$ ve 3.00 m 5 farklı akım derinliği için kavitasyon riski oluşturan $20, 25$ ve 30 m/s olmak üzere 3 farklı giriş hızı seçilmiştir (V_0). Böylece $F_0 = 3.69 - 9.58$ aralığında 15 farklı memba Froude sayısı için analizler yapılmıştır. Flow-3D’de nap yüzeyinden giren hava miktarlarını belirleyebilmek için Hava Giriş Modeli (Air Entrainment Model) kullanılmıştır. Şekil 3.1’de simülasyon başlangıcından itibaren akımın zamana göre değişimi verilmiştir. Akımın ilk başlarda ($t < 3$ s) kararlı halde değilken belirli bir zaman sonunda ($t > 3$ s) kararlı (düzenli akım) hale geldiği görülmektedir. Havalandırıcı membasındaki akım derinliği boyundaki hız değişimleri (tabana yakın düşük hızlar, yükseldikçe hız artıyor) başlangıçtan itibaren sınır tabakasının değişimini göstermekte ve tam gelişmiş akımın teşekkül ettiği görülmektedir.

Düzenli akımın tam olarak teşekkül ettiğinden emin olmak için çözümler belirli bir süre daha devam ettirilmiş ve böylelikle sayısal yakınsama sağlandıktan sonra çözümler sonlandırılmıştır. Sayısal çözümlerinin yakınsaması, bizim için önemli bir parametre olan

akıma giren hava miktarının zamana göre değişimini veren Şekil 3.2'deki grafiklerle kontrol edilmiştir.

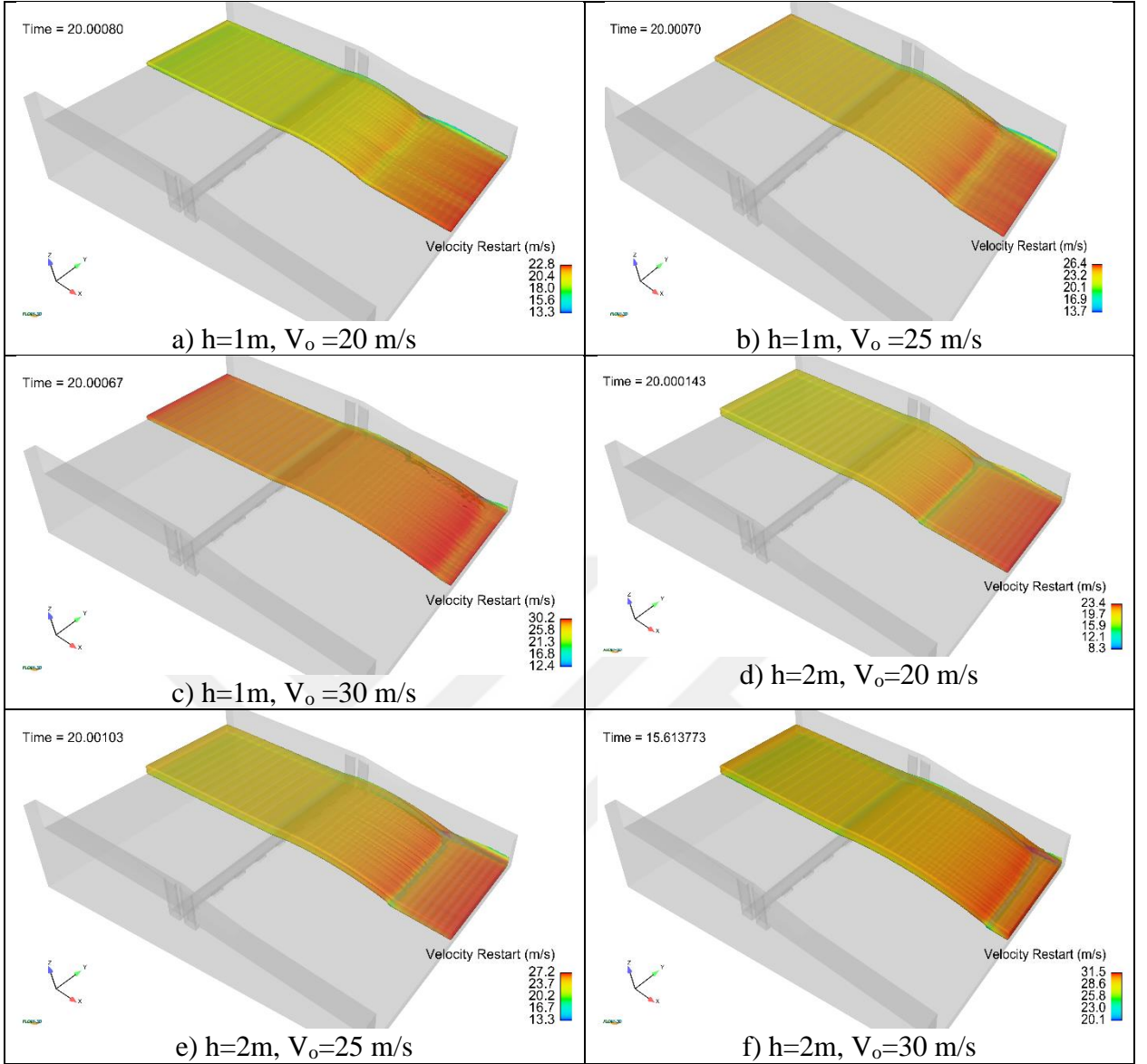


Şekil 3.1. Orijinal havalandırıcı tasarımı için akımın zamanla değişimi ($h=3$ m $V_o=30$ m/s)

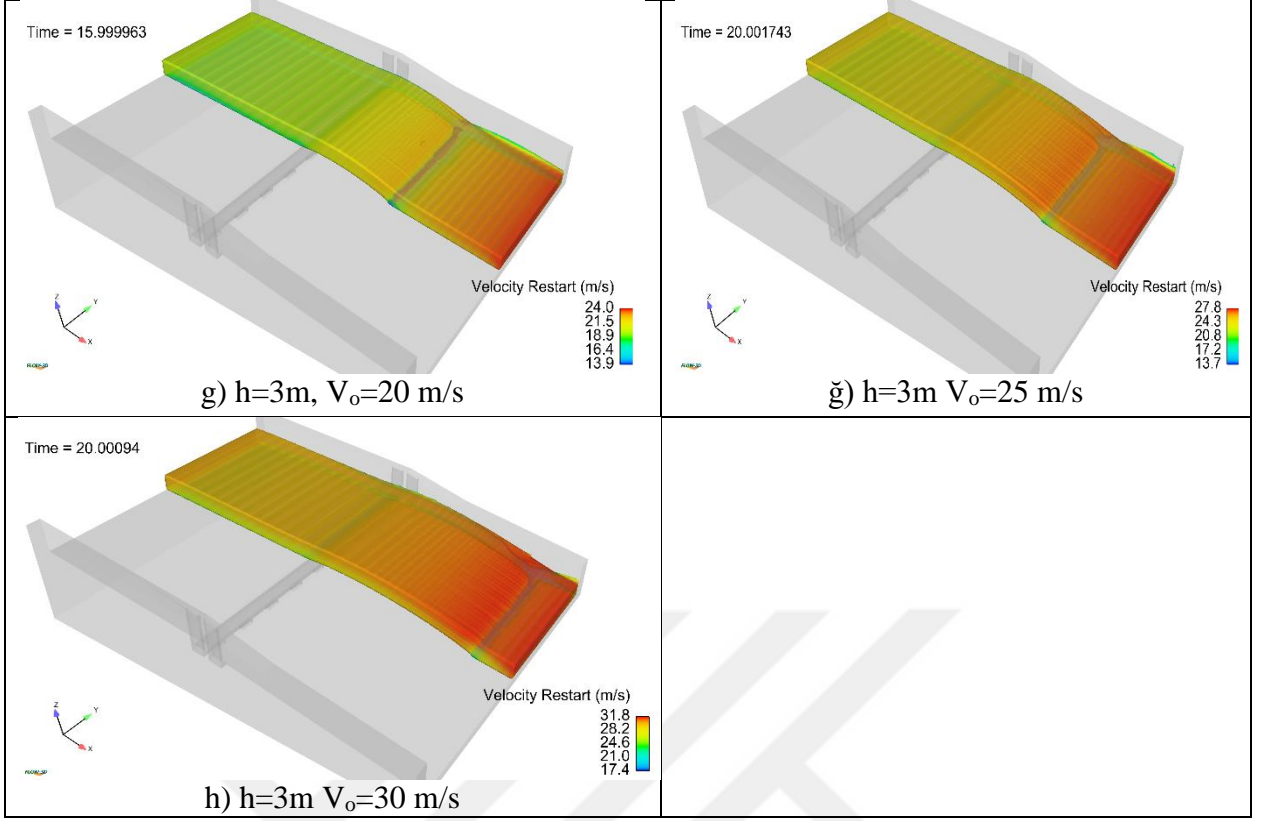


Şekil 3.2. Farklı akım durumlarında zamana göre hava debileri

Şekil 3.3'te orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım derinliği ve hızlarındaki serbest yüzey akım naplarının görüntüleri hız kontörleriyle birlikte verilmiştir. Verilen sayısal model görüntüleri akımların fiziksel olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Akım sıçratma rampasına çarparak yükselmekte, su jeti eşik ve rampanın etkisiyle tabandan ayrılarak belirli bir havalandırılmış serbest jet uzunluğu boyunca yol aldıktan sonra şut tabanına çarpmaktadır. Çarpma noktası (impact point) adı verilen bu birleşme noktasında tabandaki dinamik basınçlar çarpmanın etkisiyle artmakta ve çarpma noktasına yakın hızlar ise azalmaktadır. Havalandırıcı üzerinde oluşan bu serbest jet uzunluklarının akım hızlarıyla birlikte arttığı görülmektedir. Çeşitli araştırmacılar serbest jet uzunluğunun akımın havalandırıcı performansı üzerinde önemli etkisi olduğu belirtmektedirler (Aydın, 2005).

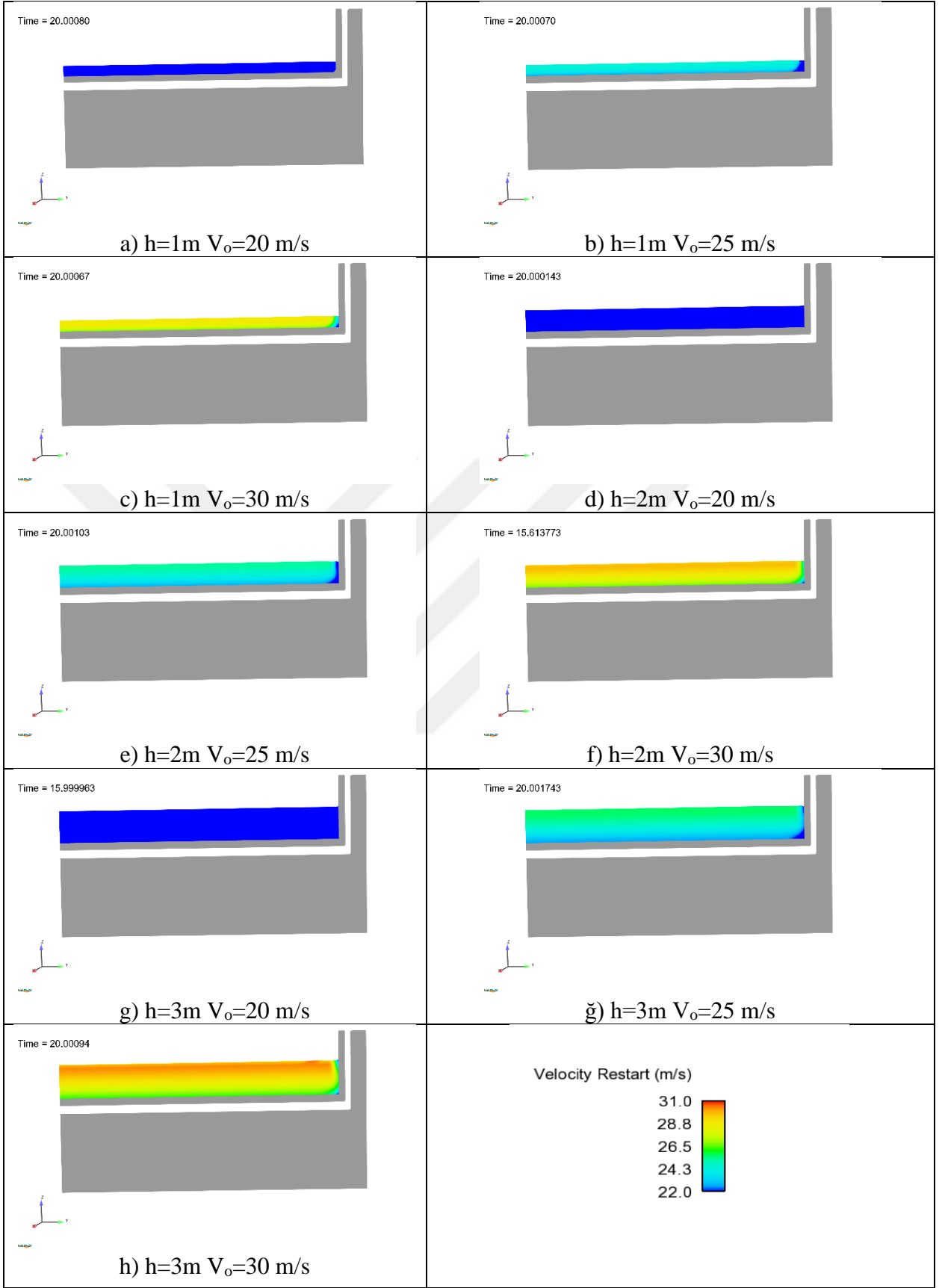


Şekil 3.3. Orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım durumlarındaki havalandırıcı üzerindeki su jeti görüntüleri



Şekil 3.3. Orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım durumlarındaki havalandırıcı üzerindeki su jeti görüntüleri(devamı)

Şekil 3.4'te ise orijinal tasarım için havalandırıcı üzerindeki akıma dik enkesitler boyunca hız dağılımları gösterilmiştir. Katı sınırlara yakın hız değerleri düşükken akımın iç kısımlarına doğru hız değerleri yükselmektedir. Bu durum gerçek (viskoz) akım teorisini desteklemektedir.



Şekil 3.4. Orijinal havalandırıcı tasarımı için havalandırıcı üzerindeki enkesit hız dağılımları

Uygulama projesinde verilen orijinal projesine göre hazırlanmış sayısal (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, HAD) modeli sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Sayısal modellerden, havalandırıcı ve serbest nap yüzeylerinden sağlanan hava miktarı okunarak hava giriş oranı (β) ve ortalama hava konsantrasyonu (C_o) hesaplanmıştır. Bu değerlerin daha iyi yorumlanabilmesi için aşağıdaki grafikler çizdirilmiştir.

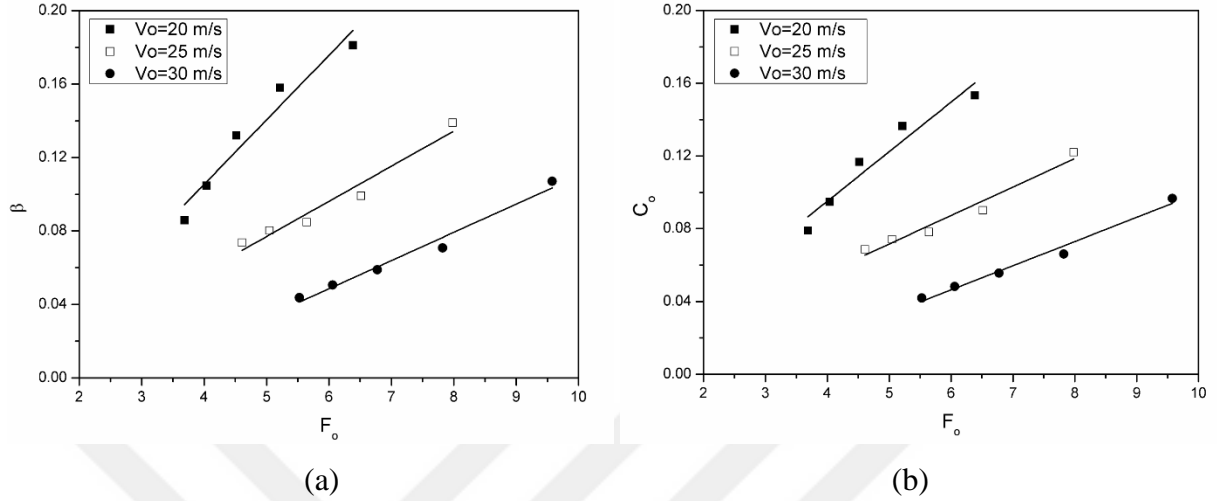
Şekil 3.5’te verilen ilk grup grafiklerde üç farklı ortalama akım hızı için hava giriş oranı ve hava konsantrasyonunun Fr sayısı ile değişimleri çizdirilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere sabit bir akım hızı için hava giriş oranı ve ortalama hava konsantrasyonu Froude sayısı ile doğrusal olarak artmaktadır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi hava giriş oranı $\beta=q_a/q_w$, ortalama hava konsantrasyonu ise $C_o=\beta/(1+\beta)$ bağıntısı ile tanımlanmaktadır. Aydın (2005) gerekli hava konsantrasyonu için detaylı bir literatür taraması yapmış ve buna dayalı olarak kavitasyon hasarından sakınmak için akım içindeki gerekli hava konsantrasyonunun yaklaşık olarak en az %7, akımın atomize olmaması için ise en fazla %45 olması gerektiği sonucuna varmıştır. Bu değerler hava giriş oranı için yaklaşık $\beta=0.08-0.82$ aralığında kalması gerektiği anlamına gelmektedir. Bazı araştırmacılara göre minimum sınır şartının $C_o>\%5$ olabileceği belirtilmektedir. Bu açıklamalar doğrultusunda Şekil 5.5 (a) ve (b)’deki grafikler incelendiğinde, orijinal tasarım için kavitasyon riskinin yüksek olacağı akım hızlarının $V_o=20$ m/s için gerekli hava giriş oranı ve hava konsantrasyonunun %8’den daha yüksek olduğu ve bunun da kavitasyondan sakınmak için gerekli minimum hava şartını sağladığı anlaşılmaktadır. Daha yüksek akım hızlarında ise sağlanan ortalama hava konsantrasyonunun yaklaşık olarak %5’den daha büyük olduğu görülmektedir. Elde edilen bu oranların orijinal tasarım için kavitasyon hasarını önlemede yeterli olacağı değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.1. Orijinal havalandırıcı için HAD sonuçları

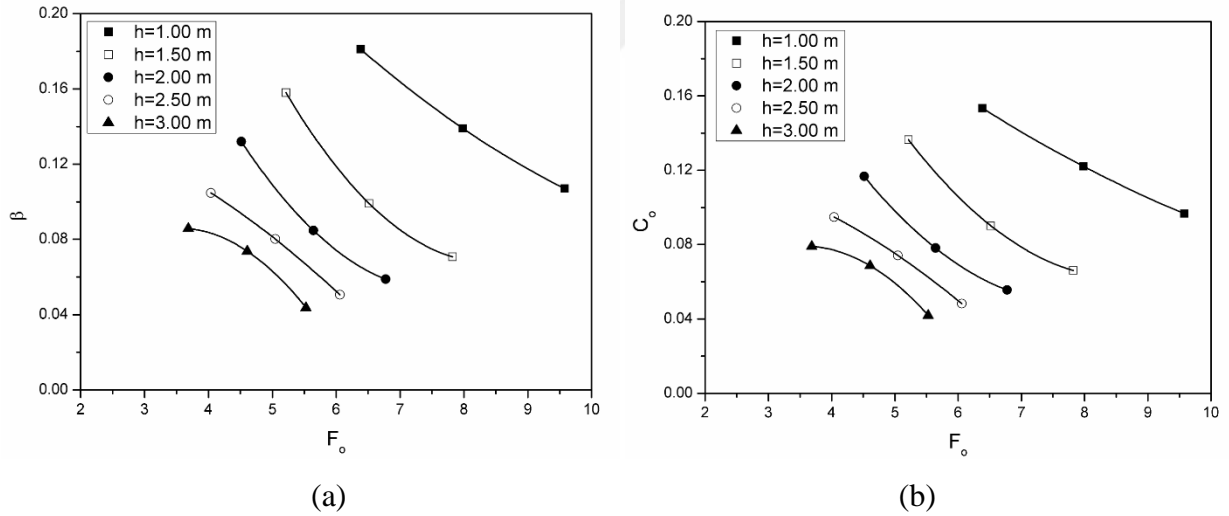
Model No	h (m)	B (m)	V _o (m/s)	F _o	Q _a (m ³ /s)	β	C _o
1	1.00	55.00	20.00	6.39	199.22	0.18	0.15
2	1.00	55.00	25.00	7.98	191.23	0.14	0.12
3	1.00	55.00	30.00	9.58	176.59	0.11	0.10
4	1.50	55.00	20.00	5.21	260.69	0.16	0.14
5	1.50	55.00	25.00	6.52	204.40	0.10	0.09
6	1.50	55.00	30.00	7.82	175.20	0.07	0.07
7	2.00	55.00	20.00	4.52	290.47	0.13	0.12
8	2.00	55.00	25.00	5.64	233.06	0.08	0.08
9	2.00	55.00	30.00	6.77	194.29	0.06	0.06
10	2.50	55.00	20.00	4.04	288.13	0.10	0.09
11	2.50	55.00	25.00	5.05	275.37	0.08	0.07
12	2.50	55.00	30.00	6.06	208.76	0.05	0.05
13	3.00	55.00	20.00	3.69	282.95	0.09	0.08
14	3.00	55.00	25.00	4.61	304.12	0.07	0.07
15	3.00	55.00	30.00	5.53	216.23	0.04	0.04

Şekil 3.6’da ise yine orijinal tasarım için hava giriş oranı ve ortalama hava konsantrasyonlarının Froude sayısı ile değişimleri farklı akım derinlikleri için çizdirilmiştir. Buna göre akım derinliği arttıkça hava giriş oranı ve dolayısıyla hava konsantrasyonları azalmaktadır. Hava konsantrasyonları en yüksek derinlik olan h=3.00m için yaklaşık %4-8 arasında kalmakta iken en düşük derinlik olan h=1.00 m için yaklaşık %8-15 aralığında kalmaktadır. Bu oranların kavitasyon hasarından kaçınmak için yeterli olduğu değerlendirilmektedir. Sabit akım derinliklerinde hava giriş miktarının Fr sayısı ile (ve dolayısıyla akım hızıyla) azaldığı da bu grafiklerden okunmaktadır. Düşük akım derinliklerinde bu azalış hızı (Teğetin eğimi) Fr sayısı ile azalmakta iken yüksek akım derinliklerinde tam tersi olarak azalış hızı artmaktadır. Bu değişimlerin bir nedeninin uygulanan yöntemin tek fazlı akım modeli olması ve dolayısıyla boşluk alt basınçlarının etkisinin yeterince dikkate alınmaması olabilir. Bu durumda havalandırıcı üzerinde sıçrayan serbest su jetinin uzunluğu havalandırma verimi üzerindeki belirleyici parametre olacaktır. Bununla birlikte akım hızı ve derinliğiyle akımın rejimini birlikte tayin eden boyutsuz Froude sayısı dikkate alındığında genel olarak hava giriş oranının Fr sayısı ile arttığı söylenebilir.

Ayrıca belirtmek gerekir ki Hava Giriş Modeli (Air Entrainment Model) ile elde edilen hava giriş miktarları akıma alt ve üst nap boyunca sürüklenerek giren hava miktarı olarak hesaplanmaktadır.



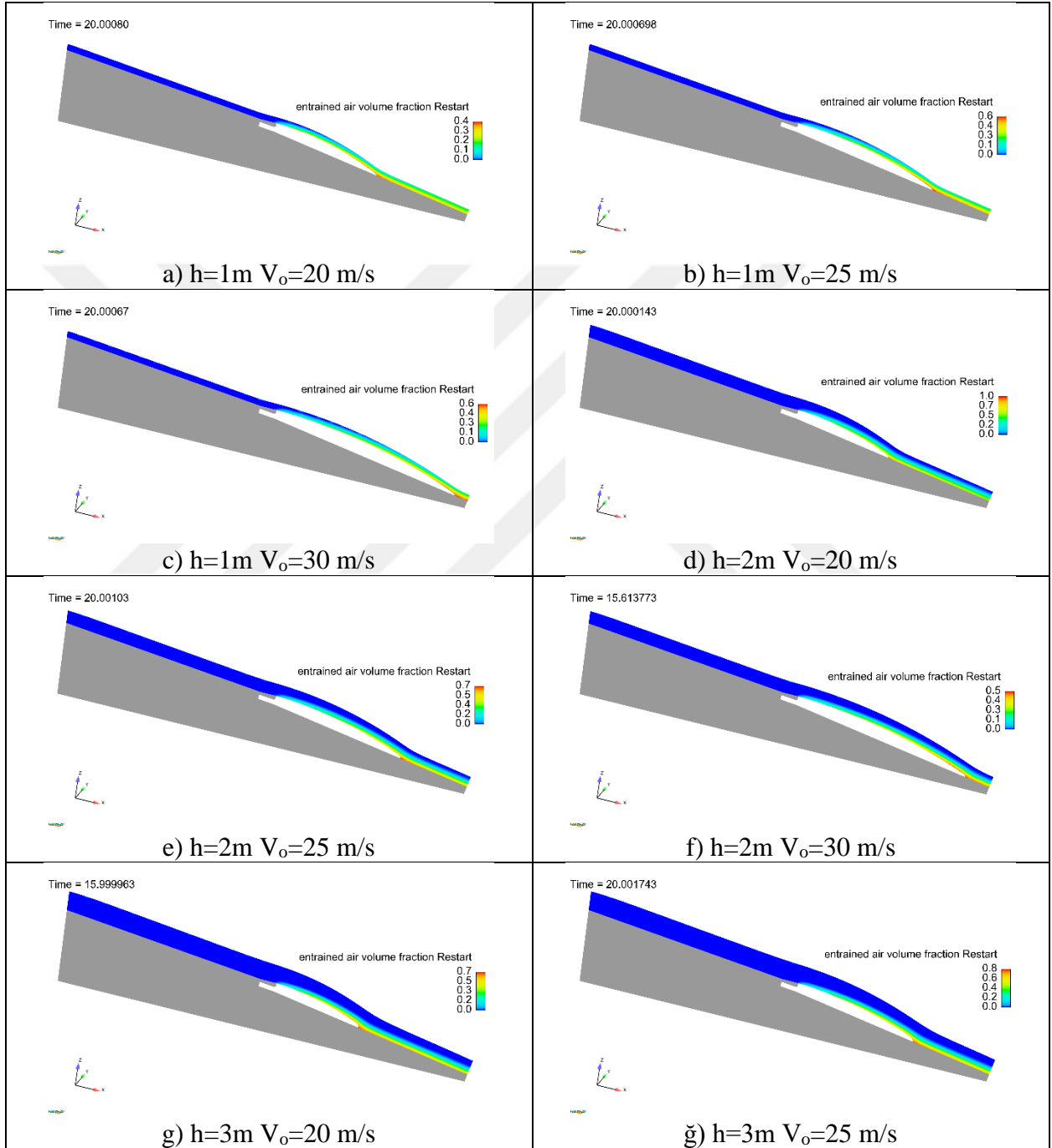
Şekil 3.5. Orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım hızlarında; a) Hava giriş oranının b) Ortalama hava konsantrasyonunun F_r sayısı ile değişimi



Şekil 3.6. Orijinal havalandırıcı tasarımı için farklı akım derinliklerinde; a) Hava giriş oranının b) Ortalama hava konsantrasyonunun F_r sayısı ile değişimi.

Şekil 3.7'de farklı akım durumları için orijinal havalandırıcı için verilen hava girişi hacim oranlarının boykesitler üzerindeki dağılımları görülmektedir. Havalandırıcı tarafından oluşturulan alt naptan havalandırıcı saptırıcı ucundan itibaren akıma önemli miktarda hava karışmaktadır. Alt naptan giren hava serbest jet uzunluğu boyunca akıma karışmakta ve karışım bölgesinin kalınlığı artmaktadır. Düşük akım derinliklerinde mansaptaki hava karışımı tüm akım derinliğinde etkili

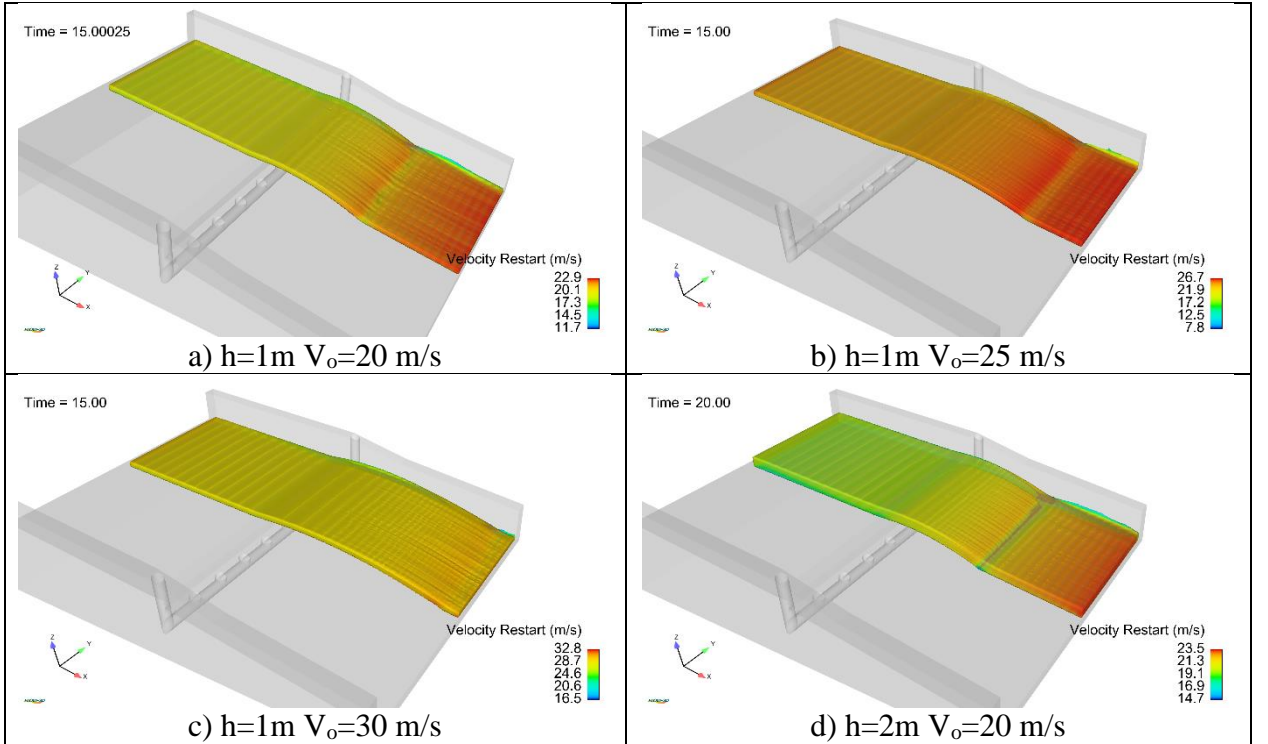
olurken, yüksek akım derinliklerinde giren hava mansapta tabana yakın dağılmaktadır. Akımdaki hava konsantrasyonunun tabana yakın yoğunlaşması tabanı kavitasyon hasarından korunması açısından olumlu bir etki yaratacaktır. Şekillerdeki akım durumları için her durumda tabana yakın yeterli hava konsantrasyonunun sağlandığı görülmektedir.



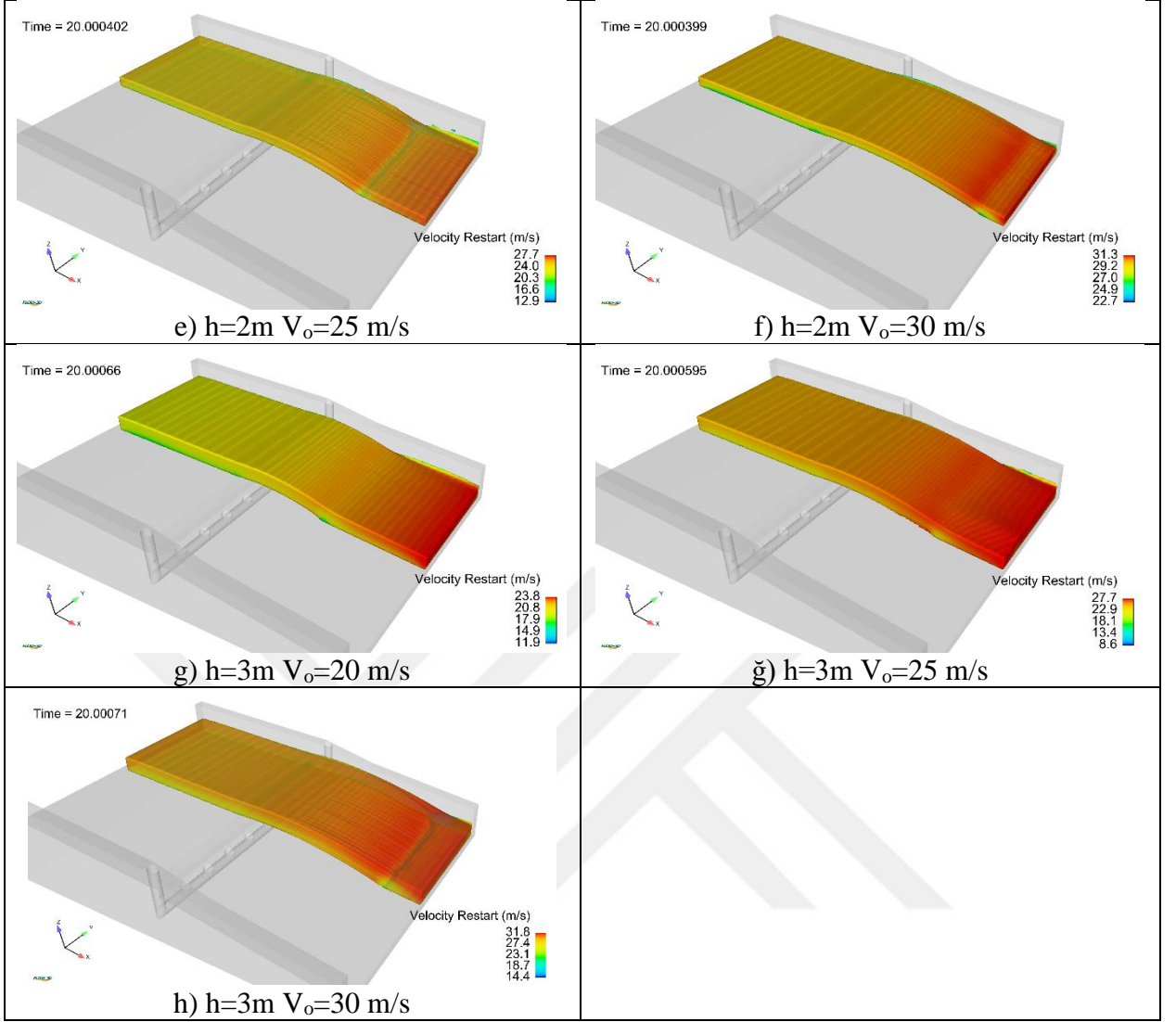
Şekil 3.7. Orijinal havalandırıcı tasarımı için boy kesitlerindeki hava-su karışımı oranları

3.2. Alttan Alışlı Havalandırıcı

Bu bölümde, Aydın (2005) tarafından önerilen alttan alışlı havalandırıcı tipi orijinal tasarım havalandırıcı yerine kullanılarak elde edilen HAD sonuçları tartışılmıştır. Tasarım yapılırken orijinal havalandırıcıların alanına eşit olacak şekilde alttan alışlı havalandırıcılar modele yerleştirilmiştir. Bu bölümde de orijinal havalandırıcılardaki gibi 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 ve 3.00 m akım yüksekliklerinde literatürde belirtildiği gibi kavitasyon meydana getirebilecek 20, 25 ve 30 m/s'lik akım hızlarında farklı froude sayılarında analizler yürütülmüştür. Analizler yürütülürken Flow-3D'de nap yüzeyinden giren hava miktarlarını belirleyebilmek için Hava Giriş Modeli (Air Entrainment Model) kullanılmıştır. Modelde şut kanal genişliği $B=55$ m (simetrisi olduğundan $B=27.5$ m) ve saptırıcı açısı sabit tutularak analizler gerçekleştirilmiştir. Alttan alışlı havalandırıcılar için hazırlanan modellerin genel görünüşleri farklı akım derinlikleri ve hız kontürleri ile birlikte Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Oluşturulan şekillerden anlaşılacağı üzere akım sıçratma rampasına kadar üniform devam ettiği, eşik ve rampanın etkisiyle akım belirli mesafe alarak şut tabanına çarptığı gözlenmiştir. Akımın hızı 20 m/s'den 30 m/s'ye artırıldığında serbest jet uzunluklarının arttığı görülmüştür. Çarpma noktalarında hızların azaldığı, çarpmanın etkisiyle dinamik basınçların arttığı görülmüştür.

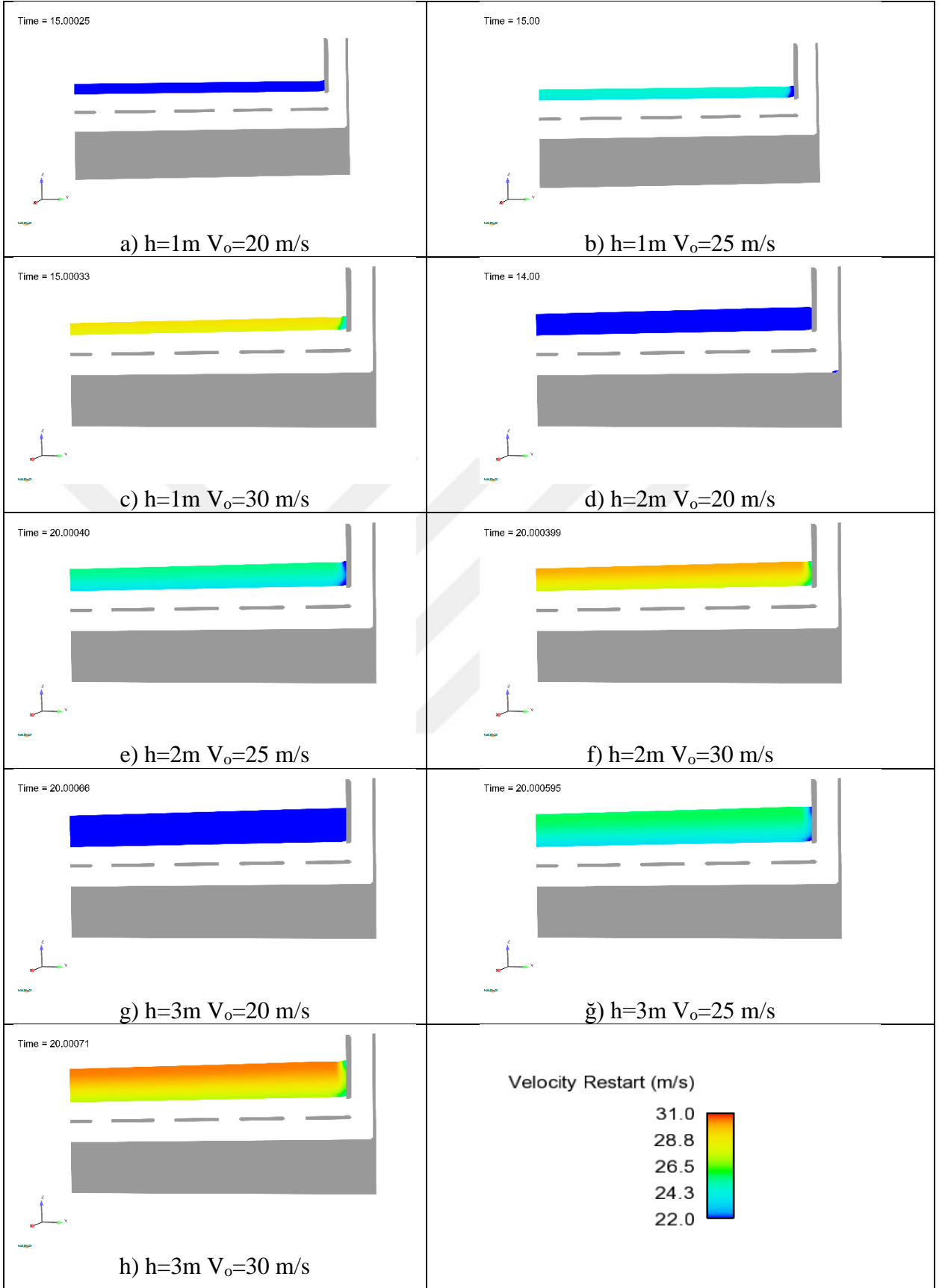


Şekil 3.8. Alttan alışlı havalandırıcı tasarımı için farklı akım durumlarındaki havalandırıcı üzerindeki su jeti görüntüleri



Şekil 3.8. Alttan alıŖlı havalandırıcı tasarımı için farklı akım durumlarındaki havalandırıcı üzerindeki su jeti görüntüleri(devamı)

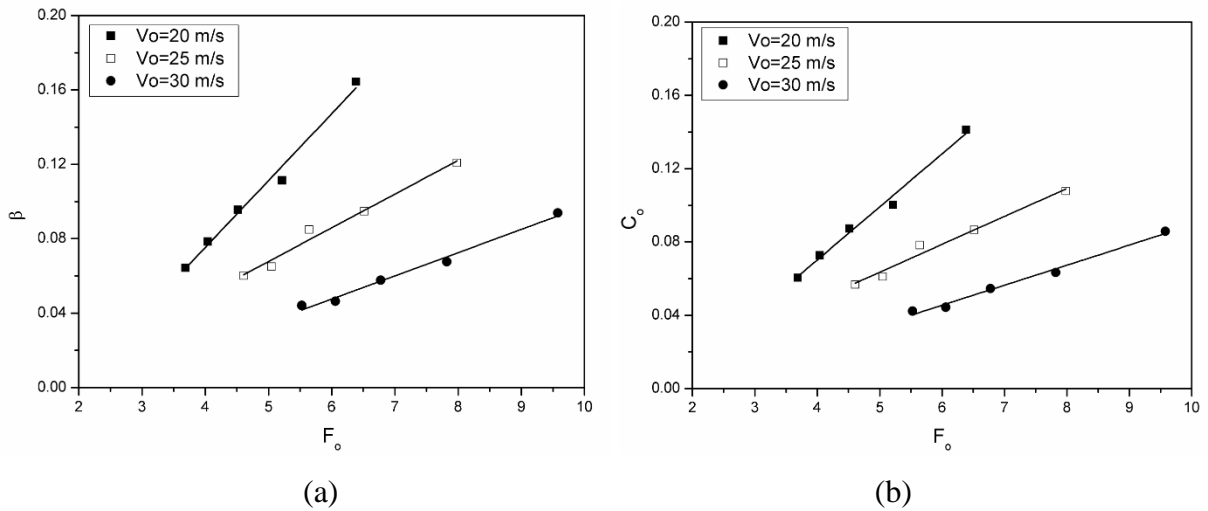
Şekil 3.9 da alttan alıŖlı havalandırıcı tasarımı için dik enkesitler boyunca hız dağılımını veren görseller oluşturulmuştur. Şekillerden anlaşılacağı üzere katı kısımlarda yani şut kanallarında ve çevreleyen duvarlarda hızların düşük (renginin maviye yakın) iç kısımlarında daha yüksek (renginin kırmızıya yakın) olduğu saptanmıştır. Ayrıca iç kısımlardaki hızların akımın yüksekliği ve verilen hızlara yakın olduğu görülmüştür. Elde edilen hız profillerinin gerçek akım koşullarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.9. Alttan alışı havalandırıcı tasarımı için havalandırıcı üzerindeki enkesit hız dağılımları

Orijinal proje yerine alternatif olarak hazırlanan alttan alışlı havalandırıcıların HAD analizi sonuçları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Tabloda yükseklik (h), genişlik (B), hız (v_0), hava debisi (Qa), hava giriş oranı (β) ve ortalama hava konsantrasyonu (C_o) hesaplanmıştır. Sonuçların daha anlaşılabilir olması için farklı grafikler oluşturulmuştur.

Şekil 3.10’da alttan alışlı havalandırıcıların tasarımı için farklı akım hızlarında hava giriş oranı ve ortalama hava konsantrasyonunun Froude sayısıyla değişimi gösterilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere sabit hızlarda Froude sayısı artıkça hava giriş oranlarının ve ortalama hava konsantrasyonların artığı gözlemlenmiştir. Orijinal havalandırıcı kısmında da bahsedildiği gibi kavitasyon hasarından kaçınmak için gerekli hava konsantrasyonun %7-%45 aralığında ya da $\beta=0.08-0.82$ aralığında kalması ve bazı araştırmacılar için minimum sınır şartının $C_o>0.05$ olması gerektiği belirtilmiştir. $V_0=20$ m/s iken en düşük hava konsantrasyonu 0.06 iken en yüksek hava konsantrasyonu 0.16’dır. Bu açıklamalar doğrultusunda Şekil 5.10 (a) ve (b)’deki grafikler incelendiğinde, kavitasyon hasarı meydana getirebilecek hızlardan biri olan 20 m/s ‘lik hızlarda sadece 3.0 m lik akım yüksekliği haricinde %8 den büyük olduğu saptanmış ve gerekli minimum hava şartını sağladığı gözlenmiştir. Tüm akım hızlarına bakıldığında hava konsantrasyonun yaklaşık %5 ten büyük olduğu saptanmıştır. Bu grafiklerden elde edilen verilere göre alttan alışlı havalandırıcıların kavitasyon hasarı meydana getirmeden gerekli hava konsantrasyonunu sağladığı saptanmıştır.

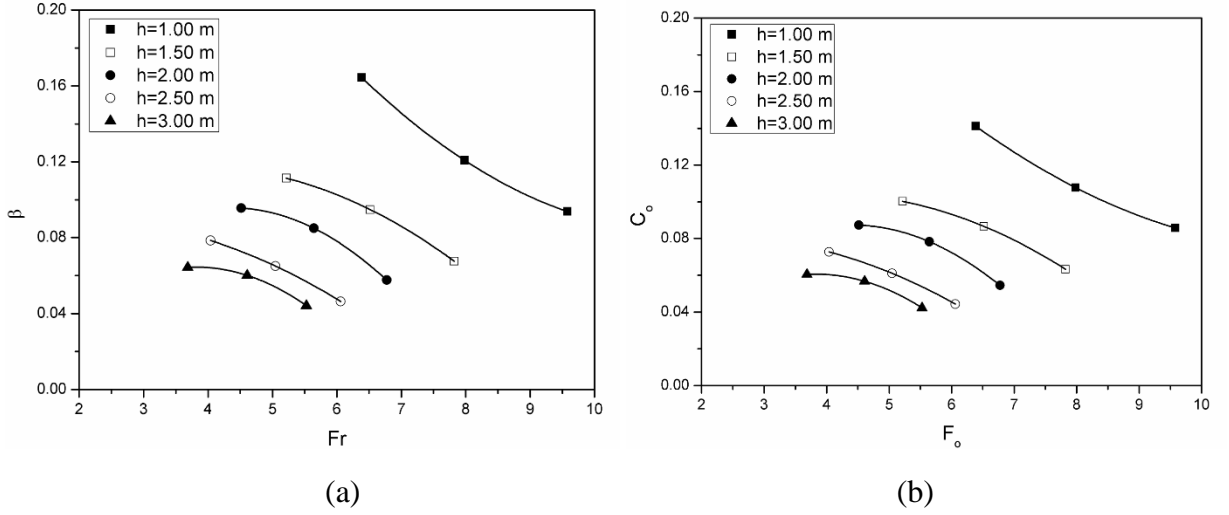


Şekil 3.10. Alttan alışlı havalandırıcı tasarımı için farklı akım hızlarında; a) Hava giriş oranının, b) ortalama hava konsantrasyonun Froude sayısı ile değişimi

Çizelge 3.2. Alttan alıŖlı havalandırıcı için HAD sonuçları

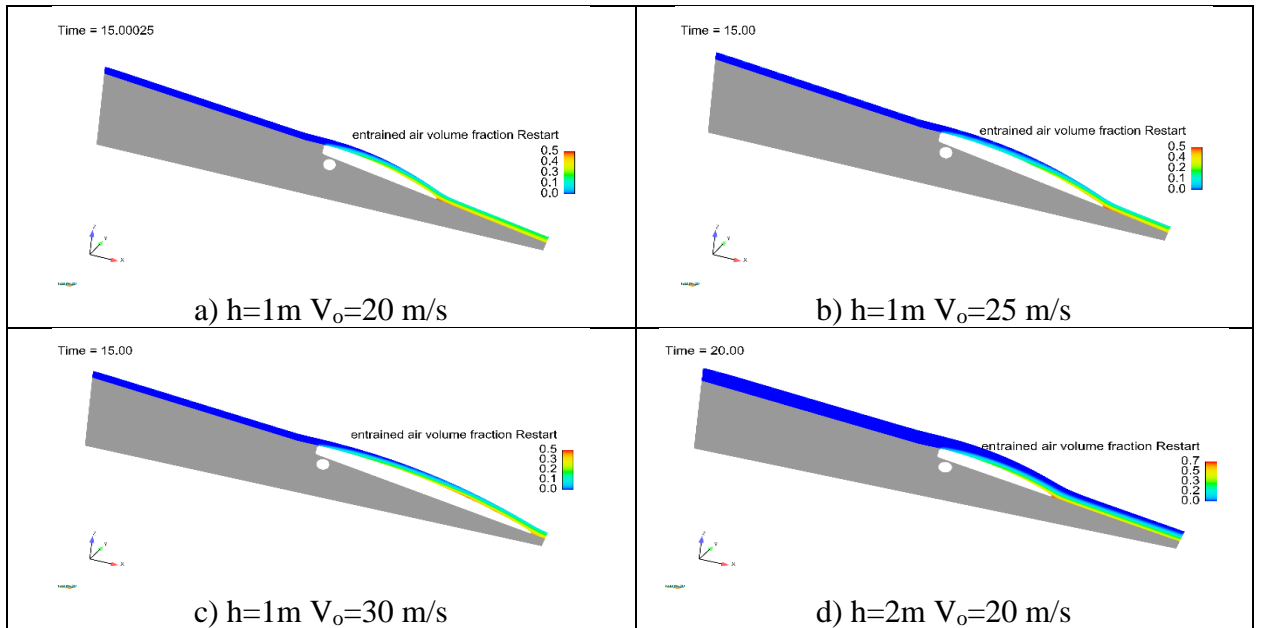
Model No	h (m)	B (m)	V _o (m/s)	F _o	Q _a (m ³ /s)	β	C _o
1	1.00	55.00	20.00	6.39	180.89	0.16	0.14
2	1.00	55.00	25.00	7.98	166.09	0.12	0.11
3	1.00	55.00	30.00	9.58	154.78	0.09	0.09
4	1.50	55.00	20.00	5.21	183.90	0.11	0.10
5	1.50	55.00	25.00	6.52	195.56	0.09	0.09
6	1.50	55.00	30.00	7.82	167.43	0.07	0.06
7	2.00	55.00	20.00	4.52	210.40	0.10	0.09
8	2.00	55.00	25.00	5.64	233.57	0.08	0.08
9	2.00	55.00	30.00	6.77	190.28	0.06	0.05
10	2.50	55.00	20.00	4.04	215.80	0.08	0.07
11	2.50	55.00	25.00	5.05	223.58	0.07	0.06
12	2.50	55.00	30.00	6.06	191.33	0.05	0.04
13	3.00	55.00	20.00	3.69	212.58	0.06	0.06
14	3.00	55.00	25.00	4.61	248.10	0.06	0.06
15	3.00	55.00	30.00	5.53	218.23	0.04	0.04

Ŗekil 3.11 de alttan alıŖlı havalandırıcıların tasarımı için hava giriŖ oranı ve ortalama hava konsantrasyonlarının Froude sayısı ile deęiŖimlerinin h=1.00, 1.50, 2.00, 2.50 ve 3.00m gibi akım derinliklerine göre grafikler oluŖturulmuŖtur. Grafiklere bakıldığında h=1 m için Froude sayısı 6.39 iken okunan hava giriŖ oranı 0.16, Froude sayısı 9.58 iken okunan hava giriŖ oranı 0.09'dur. Yani Froude sayısı artıkça okunan hava giriŖ oranı ve ortalama hava konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Literatürdeki aksine bu deęiŖimin sebebi muhtemelen seçilen "air entrainment model" in akımı tek faz olarak çözmesi ve jet altındaki boŖluktaki hava basınçlarının dikkate alamamasından, diğer bir bakıŖ açısıyla sadece alt naptan akıma sürüklenen havayı hesaplamasından kaynaklanmaktadır. Bunlara paralel olarak h=1 m iken çizilen teğetin eğiminin h=3 m iken çizilen teğetin eğiminden daha dŖk olduğu saptanmıŖtır. Diğer bir husus ise akım yüksekliği artıkça ortalama hava konsantrasyonunun azaldığı grlmŖtir. h=1 m iken hava konsantrasyonunun %9-%16 arasında deęiŖtięi gzlemlenmiŖtir. Alttan alıŖlı havalandırıcılar için tüm akım yüksekliklerine bakacak olursak hava konsantrasyonlarının minumun yaklaŖık %5 maksimum %16 arasında deęiŖtięi grlmŖ ve yeterli derecede hava konsantrasyonunu sağladığı grŖne varılmıŖtır.

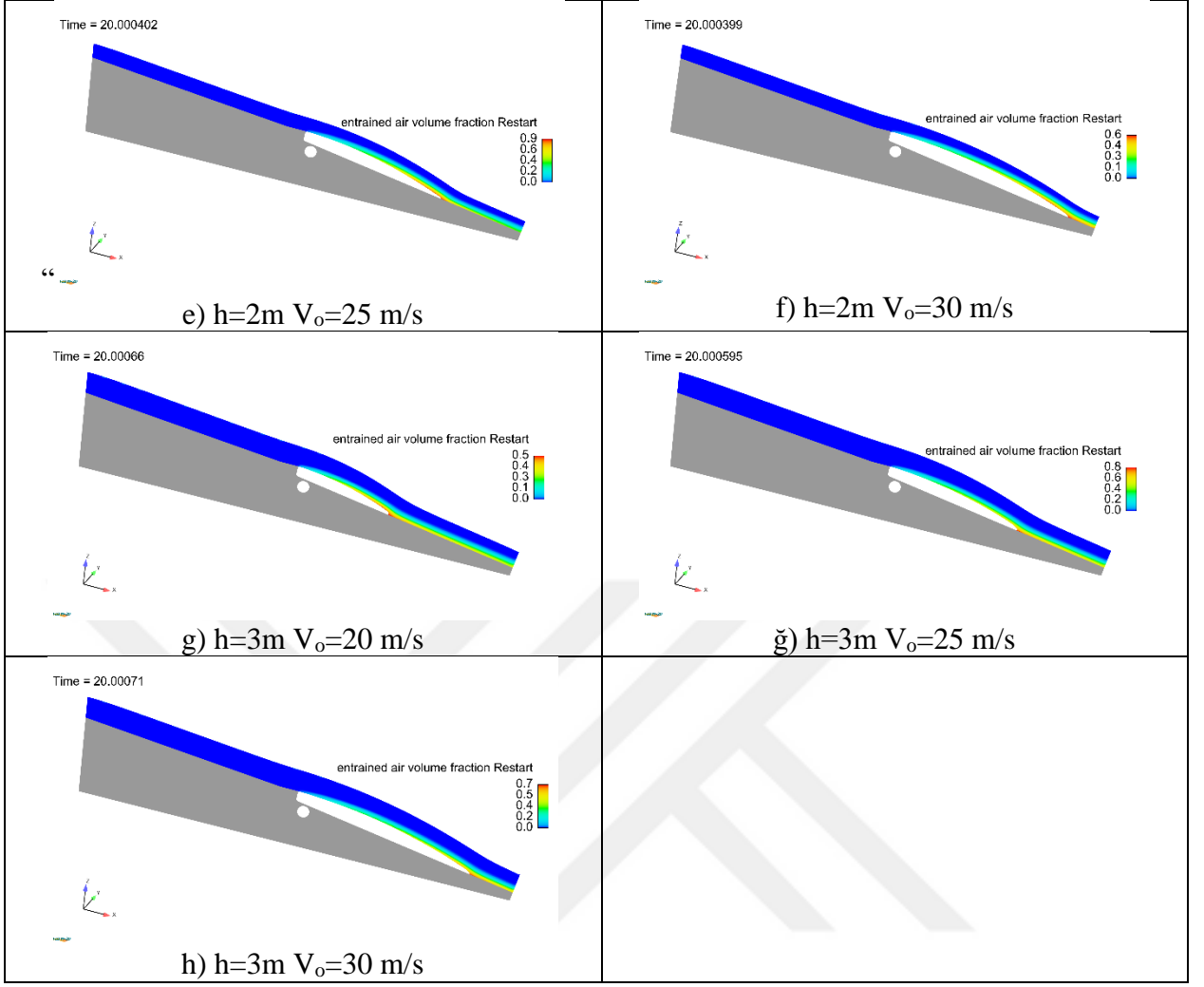


Şekil 3.11. Alttan alıŖlı havalandırıcı tasarımı için farklı akım derinliklerinde; a) Hava giriŖ oranının b) Ortalama hava konsantrasyonunun Froude sayısı ile deęiŖimi.

Şekil 3.12’de farklı akım yüksekliği ve hızları için hava giriŖ hacim oranları (*entrained air volume fraction*) akımın boykesitleri üzerinde gösterilmektedir. Grafiklerden anlaŖılacaęı üzere alt naplarda tabana yakın kısımlarda hava karıŖımının yeterli olduğu görölmüŖtür. $h=1$ m iken havanın dağılımının tüm akım derinliğinde görölmüŖ fakat $h=3$ m iken havanın dağılımının çoğunlukla katı yüzeyde (tabanda) görölmüŖtür. Alttan alıŖlı havalandırıcılar için tüm akım yüksekliği ve hızlarda hava karıŖımının tabanda oluŖu kavitasyon açısından olumlu deęerlendirilmiŖtir.



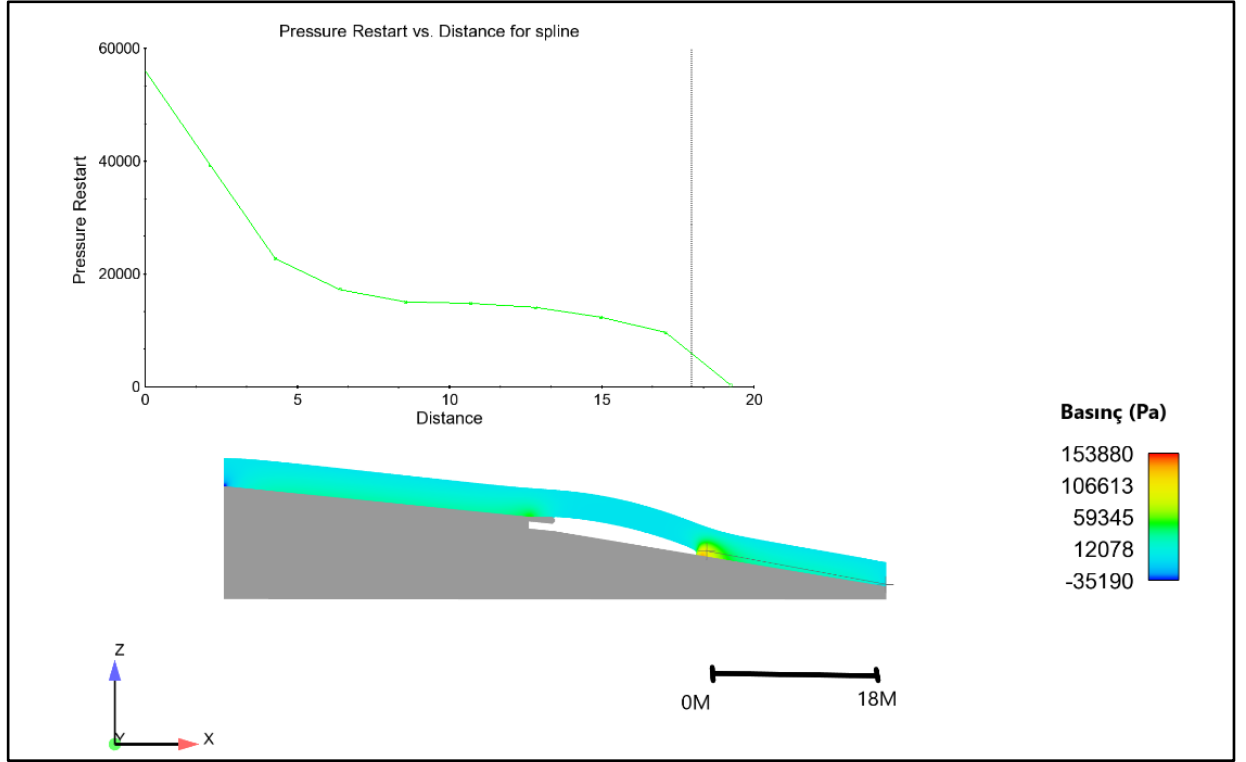
Şekil 3.12. Alttan alıŖlı havalandırıcı tasarımı için boy kesitlerindeki hava-su karıŖımı oranları



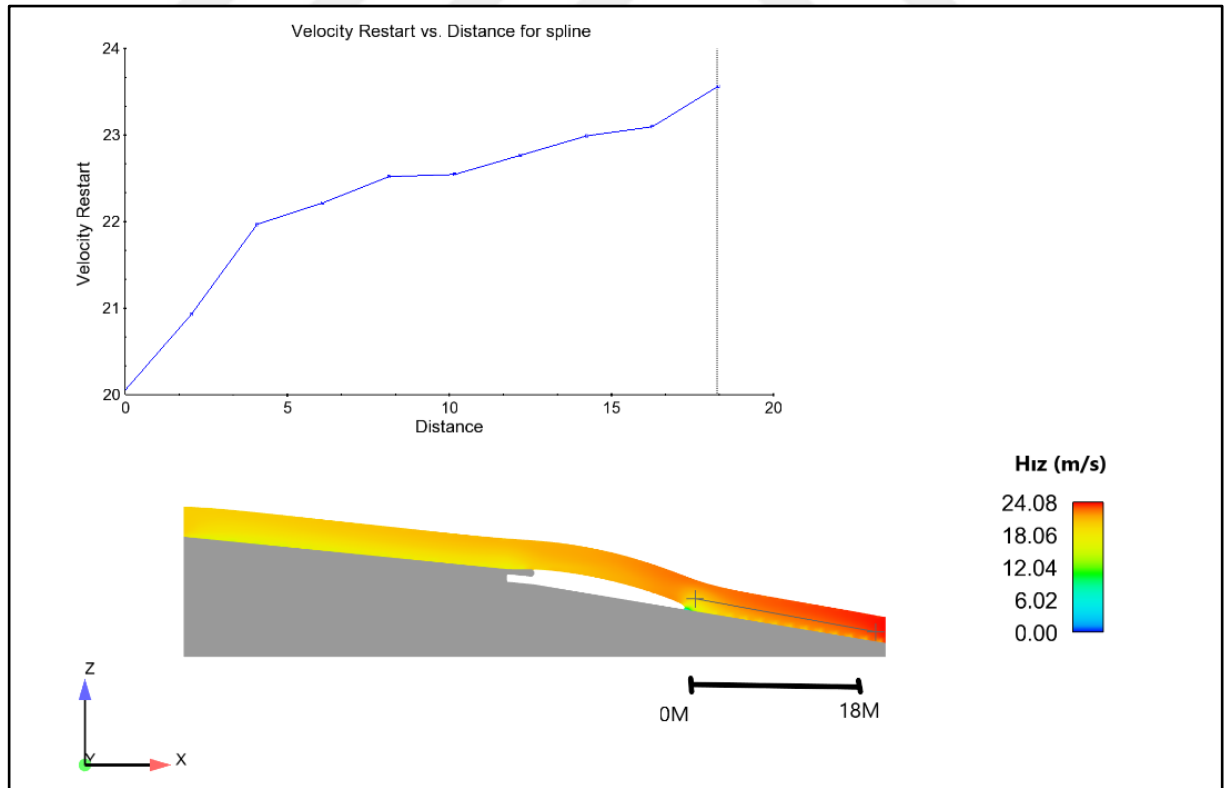
Şekil 3.12. Alttan alışı havalandırıcı tasarımı için boy kesitlerindeki hava-su karışımı oranları(devamı)

3.3 Kaviteasyon hesaplamaları

Örnek havalandırma modeli için $h=3.00$ m için kaviteasyon hesaplamaları yapılmıştır. Orijinal durum için 20 m'lik yatay jet boyunca alınan 9 ölçüm noktasında $h = 3.00$ m'lik su derinliğinde oluşan basınç ve ortalama hız değerleri sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Hesaplanan kaviteasyon indeksleri Çizelge 3.3'de sunulmuştur. Hesaplamalar yapılırken, ortalama sıcaklığın 20 °C olduğu kabul edilerek, buhar basıncı (P_v) değeri 2338 Pa, atmosfer basıncı (P_{atm}) 86440.47 Pa ve $\rho_{su} = 818.94$ kg/m³ alınmıştır (Hidro dizayn, 2019). Oluşturulan grafiklerde anlaşılacağı üzere en yüksek basınç 56011.4 Pa ve en yüksek hız ise 23.50 m/s olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.13. $V_o = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için orjinal havalandırıcı boykesit basınç dağılımı



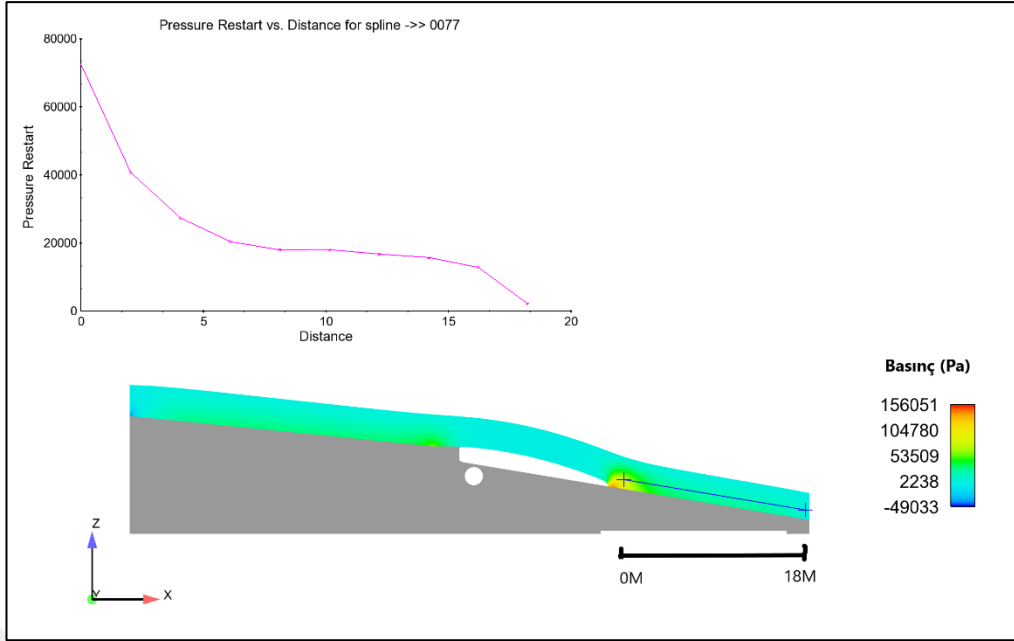
Şekil 3.14. $V_o = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için orjinal havalandırıcı boykesit hız dağılımı

Çizelge 3.3. Orijinal havalandırıcı için kaviteasyon indeksi hesap tablosu ($h=3.00$ m, $V_o=20$ m/s)

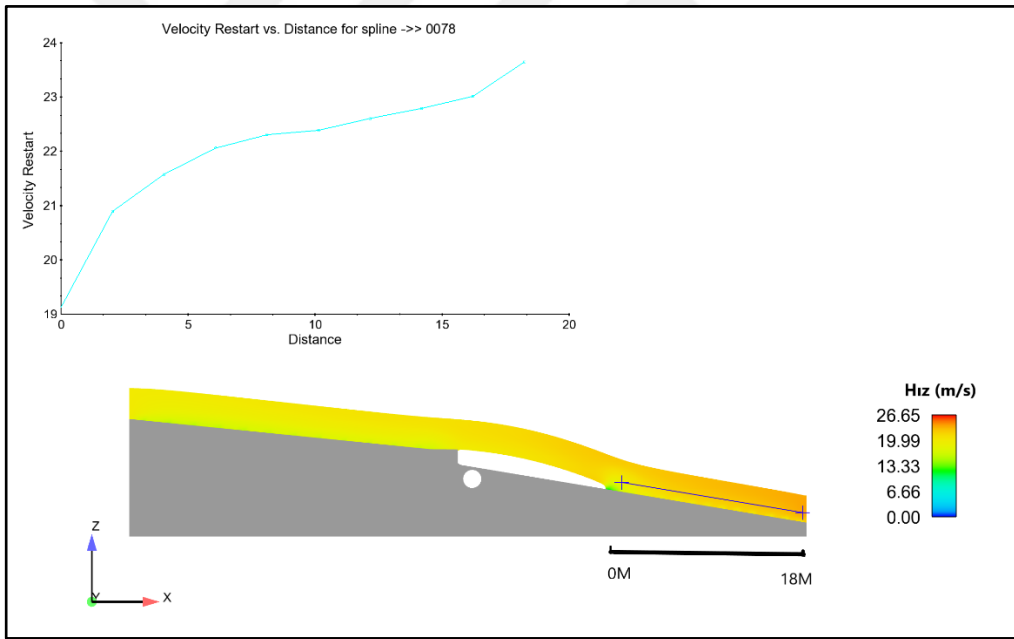
Kesit yeri	Kesit noktası(m)	$P_{Basınç}$ (Pa)	P_{toplam} (Pa)	U (m/s)	σ (kaviteasyon indeksi)
1	2	39334.8	125775.27	20.92	0.68
2	4	22835.9	109276.37	21.94	0.54
3	6	17532.6	103973.07	22.23	0.50
4	8	15124.5	101564.97	22.52	0.47
5	10	14879.8	101320.27	22.54	0.47
6	12	14324.1	100764.57	22.74	0.46
7	14	13078.3	99518.77	22.96	0.45
8	16	10924.7	97365.17	23.08	0.43
9	18	5979.7	92420.17	23.50	0.39

Alttan alışlı havalandırıcı durumunda kaviteasyon hesabı için orijinal havalandırıcı modelinde alındığı gibi $h=3.00$ m ve $V_o = 20$ m/s'deki akım durumu dikkate alınmıştır. Orijinal durum için 20 m'lik yatay jet boyunca alınan 9 ölçüm noktasında $h = 3.00$ m'lik su yükünde oluşan basınç ve ortalama hız değerleri sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Hesaplanan kaviteasyon indeksleri Çizelge 3.4'te sunulmuştur. Buradaki V_o havalandırıcının membasındaki ortalama akım hızıdır (giriş hızı).

Hesaba katılan noktalarda yapılan kaviteasyon indeksi hesabına göre bulunan bütün değerler 0.20'nin üzerinde olduğundan, hem orijinal hemde alttan alışlı havalandırıcıların mansabında kaviteasyon riski düşüktür. Bu durumda dolusavak şut kanalı yüzeyini havalandırmak suretiyle korumak etkili olacaktır. Dolayısıyla havalandırıcılar tarafından sağlanan yeterli hava konsantrasyonları sayesinde kaviteasyon hasarından kaçınılmış olacaktır.



Şekil 3.15. $V_0 = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için alttan alıslı havalandırıcı boykesit basınç dağılımı



Şekil 3.16. $V_0 = 20$ m/s, $h = 3.00$ m için alttan alttan alıslı havalandırıcı boykesit hız dağılımı

Çizelge 3.4. Alttan alıŖlı havalandırıcı kaviteyon indeksi hesapları ($h=3.00$ m, $V_o=20$ m/s)

$P_{atm} = 86440.47$ Pa		$P_v = 2338$ Pa		$\rho_{su} = 818.94$ kg/m ³	
$g = 9.81$ m/s ²		$h = 3.00$ m		$T = 20$ °C	
Kesit yeri	Kesit noktası (m)	$P_{Basınc}$ (Pa)	P_{toplam} (Pa)	U (m/s)	(kaviteyon indeksi) σ
1	2	40792.5	127232.97	20.90	0.69
2	4	27682.9	114123.37	21.57	0.58
3	6	20703.7	107144.17	22.04	0.52
4	8	18085.4	104525.87	22.30	0.50
5	10	18072.4	104512.87	22.38	0.49
6	12	16824.3	103264.77	22.60	0.48
7	14	15826.3	102266.77	22.78	0.47
8	16	13129.2	99569.67	23.00	0.44
9	18	3352.6	89793.07	23.61	0.38

Kaviteyon riskinin en yüksek olabileceği durumdaki ($Q_{max}=218.23$ m³/s ve $V_o=30$ m/s) kaviteyon indeksleri orijinal ve alttan alıŖlı havalandırıcı tipi için sırasıyla Çizelge 3.5 ve 3.6'da hesaplanmıŖtır. Çizelgelerdeki kesit numaraları (1-6) jetin çarpma noktasından (ki buradaki taban basıncı maksimumumdur) başlayıp mansaba doğru sıralanmaktadır. En düşük kaviteyon indeksi her iki durum için de 0.23 değeri kritik kaviteyon indeksinin biraz üzerinde yer almaktadır. Çizelge 1.1'e göre dolusavak Ŗut yüzeyinin havalandırmak suretiyle korunması uygun olacağı anlaŖılmaktadır. Diğer bir deyiŖle dolusavaklar üzerine havalandırıcı aygıtlar kullanmak yerinde olmuŖtur. Bu durumda havalandırıcılar tarafından sağlanan yeterli miktardaki hava, kaviteyon oluŖsa bile buradaki faz deđiŖimlerinden oluŖan patlama Ŗoklarını sönümleyerek ve beton yüzeye bir koruma yastığı gibi davranarak dolusavaklar Ŗut yüzeylerini kaviteyon hasarından koruyabilecektir.

Çizelge 3.5. Orijinal havalandırıcıda kavitasyon indeksi hesap tablosu ($h=3.00$ m, $V_o=30$ m/s)

$P_{atm} = 86440.47$ $g = 9.81$ m/s²		$P_v = 2338$ Pa $h = 3.00$ m		$\rho_{su} = 818.94$ kg/m³ $T = 20$ C	
Kesit yeri	Kesit noktası(m)	$P_{Basınç}$ (Pa)	P_{toplam} (Pa)	U (m/s)	σ(kavitasyon indeksi)
1	0	176615.30	263055.77	22.90	1.21
2	1.19	117367.20	203807.67	25.49	0.75
3	2.38	72986.40	159426.87	27.45	0.50
4	3.57	42156.30	128596.77	28.99	0.36
5	4.76	26494.50	112934.97	29.59	0.31
6	5.97	4598.90	91039.37	30.50	0.23

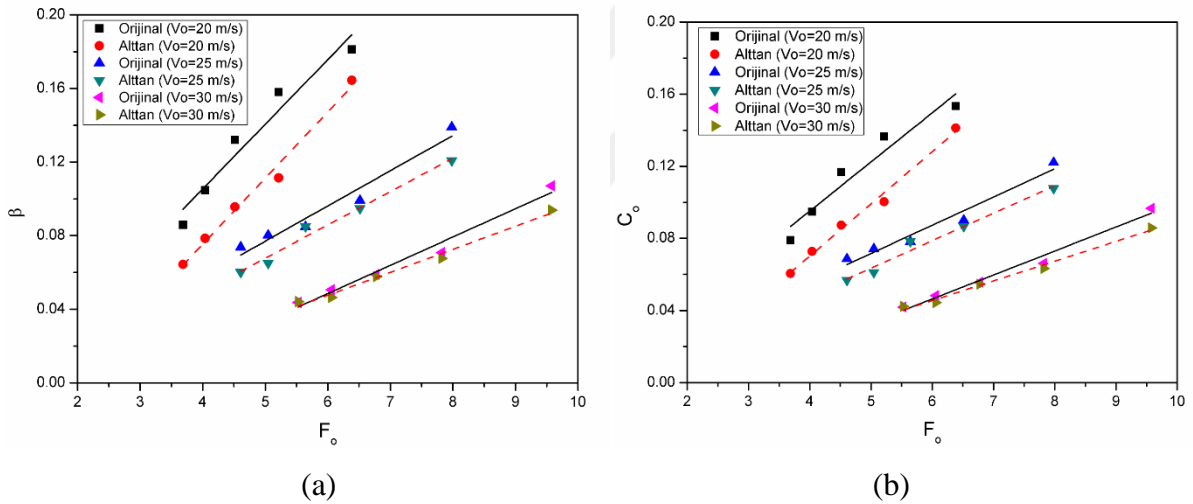
Çizelge 3.6. Alttan alıslı havalandırıcı kavitasyon indeksi hesapları ($h=3.00$ m, $V_o=30$ m/s)

$P_{atm} = 86440.47$ $g = 9.81$ m/s²		$P_v = 2338$ Pa $h = 3.00$ m		$\rho_{su} = 818.94$ kg/m³ $T = 20$ C	
kesit yeri	kesit noktası(m)	$P_{Basınç}$ (Pa)	P_{toplam} (Pa)	U (m/s)	σ(kavitasyon indeksi)
1	0	158647.20	245087.67	24.33	1.00
2	1.19	114138.10	200578.57	26.40	0.69
3	2.38	81014.30	167454.77	27.51	0.53
4	3.57	53423.40	139863.87	28.52	0.41
5	4.76	28343.60	114784.07	29.73	0.31
6	5.97	4826.70	91267.17	30.32	0.23

3.4. Tasarımların Karşılaştırılması

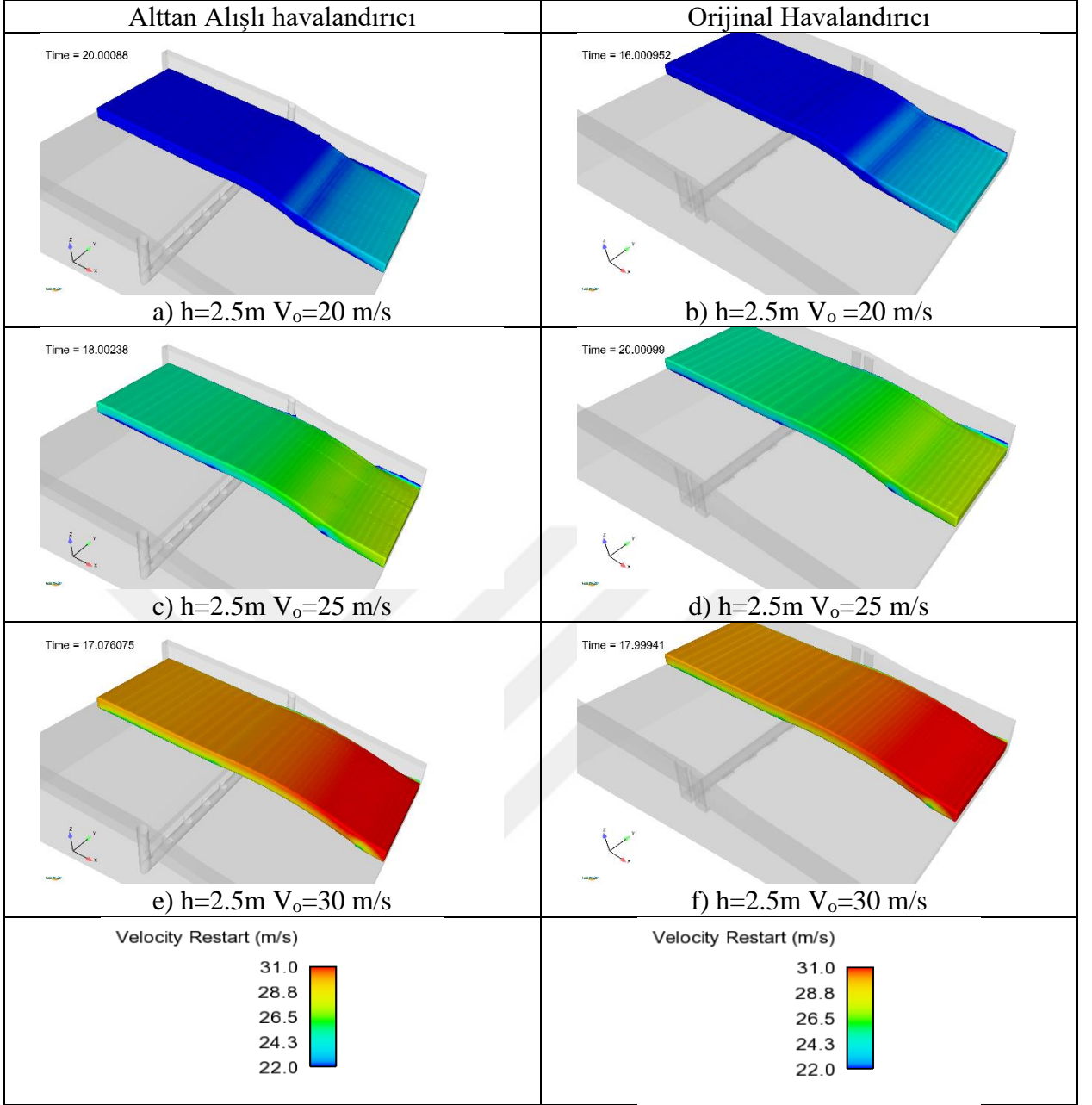
Aşağıdaki grafiklerde, her iki tip havalandırıcı tipinin havalandırma performanslarını karşılaştırılmıştır. Şekil 3.17(a)'da hava giriş oranları, Şekil 3.17(b)'de ise ortalama hava konsantrasyonları farklı akım hızları için Fr sayısı ile değişimleri verilmiştir. Yüksek hızlarda ($V_o = 30$ m/s gibi) iki havalandırıcı performansı arasında pek bir fark gözlemlenmezken, düşük hızlarda orijinal tasarımın havalandırma performansının belirgin şekilde üstün olduğu görülmektedir. Bu farklar ortalama olarak $V_o = 30$ m/s için %5, $V_o = 25$ m/s için %10, $V_o = 20$ m/s için %20, genel ortalamada ise %12 civarındadır. İki baca ve kanal boyunca iki farklı galeri/oluk

ile beslenmesi orijinal havalandırıcının havalandırma performansının üstün yüksek olmasının başlıca sebebi sayılabilir. Proje firması(Hidro dizayn-2018) tarafından hem yandan hem de eşik altındaki galerilerden sağlanan hava sayesinde iyi bir havalandırma sağlanmıştır. Sadece şut altındaki havalandırma galerileri sayesinde havalandırma sağlayan alttan alıslı havalandırıcı ise düşük hızlar dışında yakın bir havalandırma sağlamaktadır. Bu havalandırıcının avantajının kanal boyunca üniform hava sağlanması ve özellikle düşük Froude sayılarında iyi performans göstermesidir (Aydın 2005). Bu nedenle özellikle düşük debi ve F_o sayılarında iyi bir performans gösterecektir ki bu da düşük debilerdeki batık çalışma riskini azaltacaktır. Düşük Froude sayılarında tasarımcı orijinal tasarımda hem alttan alıslı havalandırıcıya benzer hem de yandan havalandırma sağlayan klasik bir havalandırıcıyı bir rampa/eşikle birlikte kullanarak melez bir tasarım geliştirmiş böylelikle her iki havalandırıcının avantajlarını birleştirerek hem düşük hem de yüksek debi ve Froude sayılarında iyi bir havalandırma elde ettiği görülmektedir.



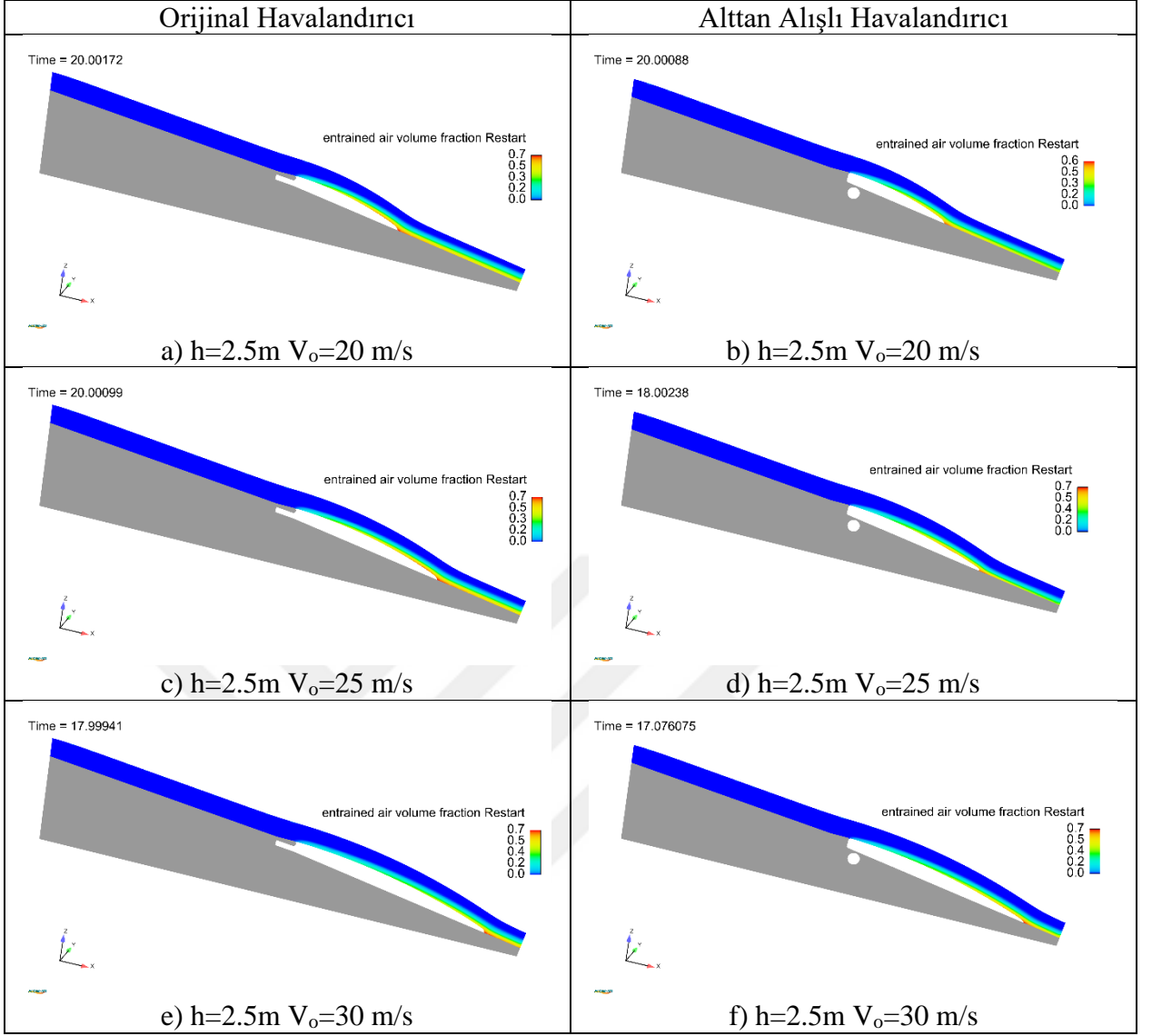
Şekil 3.17. Orijinal ve alttan alıslı havalandırıcı sonuçlarının karşılaştırılması a) Hava giriş oranı, b) Ortalama hava konsantrasyonu

Şekil 3.18 orijinal ve alttan alıslı havalandırıcılar üzerinde serbest akım durumlarında ($h=2.5m$) karşılaştırmaları yapılmıştır. Oluşturulan sayısal görüntülerin akımın fiziksel olarak gerçekleştiği görülmüştür. Her iki havalandırıcıda da akım yüksekliği sabit tutulup hız artırıldığında serbest jet uzunluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Her iki havalandırıcı durumunda da jetin çarpma noktalarında hızlarda düşüş olduğu ve dinamik basınçlarda artış olduğu gözlemlenmiştir. Hız bakımından her iki havalandırıcıların sonuçları birbirlerine benzerlik göstermektedir.



Şekil 3.18. Orijinal ve alttan alışlı havalandırıcılar üzerindeki serbest akım durumlarının karşılaştırılması ($h=2.5\text{ m}$)

Şekil 3.19 da orijinal ve alttan alışlı havalandırıcıların akım boykesitlerindeki hava karışım oranlarının ($h=2.5\text{ m}$) karşılaştırılması yapılmıştır. Sayısal modellerden anlaşılacağı üzere tabana yakın alt naptlarda hava karışımının yeterli olduğu her iki havalandırma modellerinde saptanmıştır. Her iki modelde hava karışımının benzer olduğu kavitasyon hasarı meydana getirmeyecek kadar yeterli olduğu saptanmıştır. Jet uzunluğunun hava giriş oranı üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere orijinal havalandırıcı durumunun serbes jet uzunlukları ve dolayısıyla alt naptan karışan hava miktarları daha büyüktür.



Şekil 3.19. Orijinal ve alttan alışlı havalandırıcıların akım boykesitlerindeki hava karışım oranlarının karşılaştırılması

3.5. Literatür Karşılaştırması

Dolusavak havalandırıcıların hava giriş oranlarıyla ilgili daha önce yapılmış bazı çalışmalardan elde edilmiş bağıntılar Çizelge 3.7’de verilmiştir. Kökpınar ve Göğüş (2002) yaptığı kapsamlı deneysel çalışma sonucu hava giriş katsayısını boyutsuz serbest jet uzunluğu, boyutsuz hava giriş oranı ve şut eğimine bağlı olarak veren Denklem (3.1)’i önermişlerdir. Verilen bu denklem model deneyleri sonucu elde edilmiş olup ölçek etkileri içermektedir. Öztürk vd. (2008) Alttan alışlı havalandırıcılar için Froude sayısı yanında boyutsuz havalandırıcı ve saptırıcı geometrisini de içeren bir bağıntı elde etmişlerdir (Denklem 3.2). Pfister ve Hager (2010b) hava giriş katsayısını Froude sayısı ve saptırıcı eğimine bağlı olarak veren amprik bir bağıntı elde

etmişlerdir (Denklem 3.3). Aydın (2018), Öztürk vd. (2008)'in çalışmasına benzer olarak iki fazlı HAD analizi sonucu, hava giriş oranının memba Froude sayısıyla doğrusal değiştiğini veren bir bağıntı vermişlerdir (Denklem 3.4). Bu denklemde $F_o > 2.8$ için verilmiş olup bu değer altında hava girişini olmadığı kabul edilmiştir.

Çizelge 3.7. Hava giriş katsayısı ile ilgili literatürdeki bazı bağıntılar

$\beta_m = 0.0189 \left(\frac{L_j}{h} \right)^{0.83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w} \right) (1 + \tan \alpha) \right]^{0.24}$	Kökpınar ve Göğüş (2002) Denklem (3.1)
$\beta_c = 0.14 (F_o - 2.8) \left(\frac{D^2}{Lh} \right)^{0.20} \left(\frac{t_r}{h} \right)^{0.35}$	Öztürk vd. (2008) Denklem (3.2)
$\beta = 0.0028 F_o^2 [1 + F_o \times \tan \theta] - 0.1$	Pfister ve Hager (2010b) Denlem (3.3)
$\beta = 0.047 (F_o - 2.80)$	Aydın (2018) Denklem (3.4)

Çizelge 3.7’de verilen denklemlerdeki, F_o memba Froude sayısını, L_j havalandırıcı serbest jet uzunluğunu (saptırıcı ucundan jetin taba birleştiği çarpma noktasına olan mesafe, m), h memba akım derinliğini (m), D alttan alıslı havalandırıcıların tabana yerleştirilen hava deliklerinin çapını (m), L alttan alıslı havalandırıcı deliklerinin ara mesafesini (m), α dolusavak şut kanalı eğim açısını, θ ise havalandırıcı saptırıcı (rampa) açısını, A_a ve A_w sırasıyla hava bacası giriş ve akım kesitlerini ifade etmektedir. Öztürk vd. (2008) ile Aydın (2018), verdiği denklemleri $2.80 \leq F_o \leq 10.00$, $0.17 \leq \tan \alpha \leq 0.57$, $0.04 \leq t_r/h \leq 0.50$, $0.032 \leq D^2/Lh \leq 0.539$ aralıkları için önermiştir. Bu araştırmacılar saptırıcı açısını $\theta=5.71^\circ$ alırken bu çalışmada $\theta=5.71^\circ$ olarak alınmıştır. Bu çalışmadaki havalandırıcının verilen literatürdekilerden diğer bir farkı ise rampa ile birlikte bir eşik kullanılmış olmasıdır.

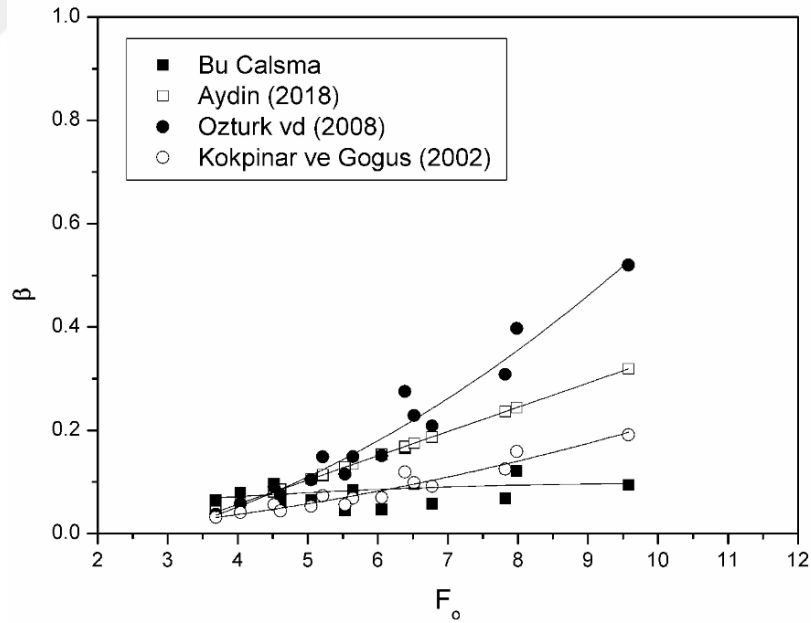
Verilen denklemlerden elde edilen hava giriş katsayıları Çizelge 3.8’te verilmiştir. Farklı koşullar ve farklı yöntemlerle elde edilmiş olsa da fikir vermesi açısından bu karşılaştırma yapılmıştır. Pfister ve Hager (2010b) tarafından verilmiş olan olan deneklem sonuçları incelendiğinde yaklaşık olarak $F_o < 5$ için hava giriş katsayısının negatif çıktığı görülmektedir.

Froude sayısının bu sınır değeri kavitasyon için yüksek bir değer olması formülün güvenilirliğini şüpheye düşürmektedir.

Diğer formüllerden elde edilen değerler Şekil 3.20’de verilen grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiklerde görüleceği üzere küçük Froude sayılarında sonuçlar arasında önemli farklar gözükmezken büyük Froude sayılarında aralarındaki farklar büyümektedir. Anlaşılacağı üzere problemin zorluğu ve yüksek hız ve türbülanslı hava-su akımı karmaşıklığı nedeniyle özellikle akımın enerjisinin yüksek olduğu yüksek Froude sayılarında yöntemler farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu çalışmadaki HAD modellerle elde edilen hava giriş katsayıları da düşük Froude sayılarında diğerleriyle yakın sonuçlar vermişken yüksek Froude sayılarında en düşük değeri vermiştir. Bunun muhtemel sebebi sayısal modellerde kullanılan “Air Entrainment” çözüm tekniğidir. Yukarıda da belirtildiği gibi bu modelde, türbülans ve akış durumundan dolayı sıvı içerisindeki yaklaşık hava miktarını belirlenmeye çalışılır. Yöntemdeki ana fikir, türbülanslı girdapların, havayı hapseden ve sıvının gövdesine geri taşıyan serbest bir yüzeyin üzerine küçük sıvı elementleri yerleştirilmesidir. Hava sürüklenme oranı türbülans dengesi ve yüzey gerilimine bağlıdır (Flow Science, 2016). Yöntem tek fazlı akım modeli üzerinden çalışır ve dolayısıyla aslında hava fazını ve dolayısıyla gerçek bir karışımı hesaplamaz. Hava fazını içermediğinden boşluk hacimlerindeki hava hız ve basınçlarını hesaplayamayacaktır. Yani özellikle yüksek akım hızlarında meydana gelen jet altı basınçları ve dolayısıyla basınç farkından meydana gelecek hava girişlerini hissetmeyecektir. Diğer bir deyişle bu yöntemde jet altı boşluğun tam havalandığı kabul edilir ve jet altı basınçların etkisi ihmal edilmiş olur. Bu çalışmada elde edilen hava giriş oranları özellikle kavitasyon riskinin yüksek olduğu yüksek akım hızlarında diğer yöntemlerden nispeten daha düşük sonuç değerleri verdiği için tasarımılar için daha güvenli olacaktır.

Çizelge 3.8. Hava giriş katsayılarının literatürle karşılaştırılması

F_o	Kökpınar ve Gögüş (2002)	β			
		Öztürk vd (2008)	Pfister ve Hager (2010b)	Aydın (2018)	Bu çalışma
6.39	0.12	0.27	0.09	0.17	0.16
7.98	0.16	0.40	0.22	0.24	0.12
9.58	0.19	0.52	0.40	0.32	0.09
5.21	0.07	0.15	0.02	0.11	0.11
6.52	0.10	0.23	0.10	0.17	0.09
7.82	0.12	0.31	0.21	0.24	0.07
4.52	0.06	0.09	-0.02	0.08	0.10
5.64	0.07	0.15	0.04	0.13	0.08
6.77	0.09	0.21	0.12	0.19	0.06
4.04	0.04	0.06	-0.04	0.06	0.08
5.05	0.05	0.10	0.01	0.11	0.07
6.06	0.07	0.15	0.06	0.15	0.05
3.69	0.03	0.04	-0.05	0.04	0.06
4.61	0.04	0.08	-0.01	0.08	0.06
5.53	0.06	0.11	0.03	0.13	0.04



Şekil 3.20. Hava giriş katsayılarının literatürle karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Bu tezde öncelikle uygulamadaki bir dolusavak modeli örnek alınarak kavitasyon önlemek için üzerine yerleştirilen havalandırıcıların sayısal modelle performansı incelenmiştir. Daha sonra aynı ölçüler ve akım koşullarındaki bir dolusavak şut kanalına farklı bir havalandırıcı tipi uygulanarak performansları sayısal modelle analizleri yapılmıştır. Her iki tip havalandırıcının havalandırma ve kavitasyon önleme performansları belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadaki asıl amacımız örnek dolusavak ve havalandırıcı modelin bütün şekilde incelemesi olmayıp (ki bu tasarım raporlarında zaten yapılmış) şut üzerindeki tek bir havalandırıcının kavitasyon önleme performansını incelemektir. Orijinal projesindeki (Hidro dizayn, 2018) tekbir havalandırıcı kısmı dikkate alınarak hazırlanmış sayısal model üzerinde farklı akım koşulları oluşturularak sayısal modellerin analizleri yürütülmüştür. Farklı debilerde farklı akım koşulları elde etmek için 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 ve 3.00 m 5 farklı akım derinliği için kavitasyon riski oluşturan 20, 25 ve 30 m/s olmak üzere 3 farklı akım derinliği kullanılmıştır. Böylece 3.69 - 9.58 aralığında 15 farklı Froude sayısı için analizler Flow 3D programı yardımı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı akım koşullarında orijinal havalandırıcı tasarımı yerine Aydın (2005) tarafından önerilen Alttan Alışlı Havalandırıcı tipi kullanılarak analizler yürütülmüştür. Sayısal analizler programının “*Air Entrainment*” çözüm modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen dikkat çekici sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Orijinal ve alttan alışlı havalandırıcılar üzerinde serbest akım durumlarında karşılaştırmaları yapılmıştır. Oluşturulan sayısal görüntülerin akımın fiziksel olarak gerçekleştiği görülmüştür. Her iki havalandırıcıda da akım yüksekliği sabit tutulup hız artılığında serbest jet uzunluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Her iki havalandırıcı da değme noktalarında hızlarda düşüş olduğu ve dinamik basınçlarda artış olduğu gözlemlenmiştir. Hız bakımından her iki havalandırıcıların sonuçları birbirlerine benzerlik göstermektedir.

2. Her iki tip havalandırıcı tipinin havalandırma performansları hava giriş oranları ve ortalama hava konsantrasyonları farklı akım hızları için Fr sayısı ile değişimleri karşılaştırılmıştır. Yüksek hızlarda ($V=30$ m/s gibi) iki havalandırıcı performansı arasında pek bir fark gözlemlenmezken, düşük hızlarda orijinal tasarımın havalandırma performansının belirgin şekilde üstün olduğu görülmektedir. Bu farklar ortalama olarak $V=30$ m/s için %5, $V=25$ m/s için %10, $V=20$ m/s için %20, genel ortalama ise %12 civarındadır. İki baca ve kanal boyunca iki farklı galeri/oluk ile beslenmesi orijinal havalandırıcının havalandırma performansının üstün olmasının başlıca sebebi sayılabilir. Orijinal projede saptırıcı eşik sayesinde oluşturulan su jeti altındaki hava boşluğu, jet altına yandan bağlanan bir baca ve eşik altında şut genişliği boyunca uzanan ana

havalandırma galerisini besleyen ikinci bir baca sayesinde oldukça iyi bir havalandırma sağlanmıştır. Birinci baca sayesinde yandan yüksek oranda hava sağlanırken, ikinci bacanın beslediği yatay ana ve dağıtıcı galeriler sayesinde şut kanalının orta bölgelerine de yeterli hava sağlanmıştır. Bu şekilde orijinal tasarımında iki tip havalandırıcı tipinin (Klasik ve Alttan Alışlı Havalandırıcının) birlikte kullanıldığı melez (hibrid) bir havalandırıcı elde edildiği anlaşılmaktadır.

3. Sadece şut altındaki havalandırma galerileri sayesinde havalandırma sağlayan alttan alışlı havalandırıcı ise düşük hızlar dışında orijinal havalandırıcıya yakın havalandırma sağladığı saptanmıştır. Bu da düşük hızlarda yandan havalandırmanın (orijinal havalandırıcıda yer alan) düşük hızlarda daha ekili olduğu anlamına gelebilir. Bu havalandırıcının avantajının kanal boyunca üniform hava sağlaması ve özellikle düşük Froude sayılarında iyi performans göstermesi olduğu belirtilmiştir. Her iki tip havalandırıcıda kanal genişliği boyunca alttan havalandırma sağlandığından tek başına bu orijinal havalandırıcıya karşı bir avantaj sağlamamıştır. Düşük Froude sayılarında tasarımcı orijinal tasarımda hem alttan alışlı havalandırıcıya benzer hem de yandan havalandırma sağlayan klasik bir havalandırıcıyı bir rampa/eşikle birlikte kullanarak melez bir tasarım geliştirmiş böylelikle her iki havalandırıcının avantajlarını birleştirerek hem düşük hem de yüksek debi ve Froude sayılarında iyi bir havalandırma elde ettiği görülmektedir.

4. Orijinal ve alttan alışlı havalandırıcıların akım boykesitlerindeki hava karışım oranlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Sayısal modellerden anlaşılacağı üzere tabana yakın alt naplarda hava karışımının yeterli olduğu her iki havalandırma modellerinde saptanmıştır. Her iki modelde hava karışımının benzer olduğu kavitasyon hasarı meydana getirmeyecek kadar yeterli olduğu saptanmıştır.

5. Bu sonuçlar ışığında dolusavaklar tasarlanırken kavitasyon hasarını önlemek için havalandırıcıların önemi bir kez daha gösterilmiştir. Havalandırıcı tasarlanırken havalandırıcının tipi de önemli bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan orijinal ve alttan alışlı havalandırıcı tiplerinin kavitasyon hasarından korunmak için gayet iyi çalıştığı gösterilmiştir. Elde edilen havalandırma performansları ve kavitasyon indeksleri göstermiştir ki, incelenen model için orijinal havalandırıcı tasarımı daha güvenli olmakla birlikte her iki havalandırıcı tipi de kavitasyon önlemede etki olacaktır.

6. Bu çalışmadan elde edilen hava giriş katsayıları (oranları) literatürdeki bazı bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında görülmüştür ki; düşük Froude sayıları için sonuçlar birbirine oldukça yakın iken yüksek Froude sayılarında ise aralarındaki fark artmaktadır. Bu farklar genel olarak problemin aşış koşullarını karmaşıklığı ve kullanılan yöntemlerin farklılığındandır. Yüksek hız ve türbülans içeren iki fazlı akım problemleri küçük ölçekli deneysel

çalışmalarda önemli ölçek etkileri içerdiği bilinmektedir. Sayısal modellerde ise kullanılan yöntemin çözümler üzerine etkisi önemli hale gelebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan “Air Entrainment” çözüm modeli gerçekte hava fazını içermediğinden ve dolayısıyla jet altındaki boşluktaki akış özellikleri hesaplanmadığından özellikle yüksek Froude sayılarında diğer yöntemlere göre düşük değerler elde edilmiştir.

7. Bu çalışmada HAD analizlerinin deneysel çalışmalarının olanak olmadığı durumlarda ya da zaman kavramının kısıtlı olduğu durumlarda ekonomik olarak test edilmesine olanak sağladığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlara dayalı olarak, sayısal hatalardan arınmış uygun meş yapılı iyi tasarlanmış modellerde deneysel verilere gerek kalmadan yeterince iyi ve ekonomik sonuçlar vereceği söylenebilir. Özellikle hava su karışımı olan modellerde fiziksel etkiler göz önüne alınırsa daha faydalı olacağı görülmüştür. Ancak unutulmamalıdır ki imkân var ise deneysel veriler ile sayısal analiz verilerinin birbiriyle kalibre edilmesi önerilir. Ayrıca belirtmek gerekir ki bu çalışmada kullanılan “*Air entrainment*” modelin kısıtlamalarından dolayı boşluk alt basınçları sayesinde bacalardan çekilebilecek hava miktarları hesaba katılmadığından (yani tam havalandırılmış ve boşluk alt basıncı sıfır kabul edildiğinden) gerçek havalandırma miktarı bu miktarlardan biraz daha fazla olabilir. Belki daha doğru bir yaklaşım olarak iki fazlı (hava-su) akım modelleri kullanılabilir. Fakat bu gibi çok fazlı akım modelleriyle çözüm yapmak hem zaman alıcıdır ve hem de çözümlerin yakınsaması oldukça karmaşıklaşmaktadır.

5. KAYNAKLAR

- Abbasoğlu C, Okay G, 1992. The remedial structures on the spillway of Keban dam. *Water Power and Dam Construction*, Dec., p: 22-27.
- Aydın MC, 2005. Alttan alışı dolusavak havalandırıcıların CFD analizi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Aydın MC, 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Advances in Engineering Software*, 45: 159-166.
- Aydın MC, 2018. Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24 (3):330-336.
- Aydın MC, Emiroğlu ME, 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29: 1–8.
- Aydın MC, Öztürk M, 2009. Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at the spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering (ISI)*, 36 (5): 826-836.
- Aydın MC, Ulu AE, Karaduman C, 2018. CFD Analysis of Ilisu Dam Sluice Outlet. *Turkish Journal of Science and Thecnology*, 13 (1):119-124.
- Bahena JCL, Pozos-Estrada O, Ortiz-Martínez VM, Gracia-Sánchez J, 2018. Experimental Investigation of Artificial Aeration on a Smooth Spillway with a Crest Pier. *Water*, 10 (1383): 1-17.
- Bai R, Liu C, Feng B, Liu S, Zhang F, 2018. Development of Bubble Characteristics on Chute Spillway Bottom. *Water*, 10 (9): 1129, 1-11.
- Boes MB, Hager WH, 2003. Two-phase flow characteristics of stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (9): 661-670.
- Chanson H, 1990. Study of air demand on spillway aerator. *Journal of Fluid Engineering*, 112 (3): 343-350.
- Chanson H, 1991. Aeration of a free jet above a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 29 (5): 665-667.
- Chanson H, 1994. Aeration and deaeration at bottom aeration devices on spillways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21 (3): 404-409.
- 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.

- Chanson H, 1989a Study of air entrainment and aeration devices. *Journal of Hydraulic Research*, 27 (3): 301-319.
- Chanson H, 1989b, Flow downstream of aerator-aerator spacing. *Journal of Hydraulic Research*, 27 (4): 519-536.
- Chen HY, Xu WL, Deng J, Niu ZP, Liu SJ, Wang W, 2010. Theoretical and experimental studies of hydraulic characteristics of discharge tunnel with vortex drop. *Journal of Hydrodynamics*, 22 (4): 582–589.
- Daneshfaraz R, Ghaderi A, Akhtari A, Di Francesco S, 2020. On the Effect of Block Roughness in Ogee Spillways with Flip Buckets. *Fluids*, 5 (182): 1-17.
- Dargahi , 2006. Experimental Study and 3D Numerical Simulations for a FreeOverflow Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (9): 899-907.
- Demeke GK, Asfaw HD, Shiferaw YS, 2019. 3D Hydrodynamic Modelling Enhances the Design of Tendaho Dam Spillway. *Ethiopia, Water*, 11 (82): 1-16.
- 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.
- DSİ, 2013. Alparslan II Barajı ve HES Dolusavak Model Raporu (Model No:394). DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Hidrolik Model Laboratuvarı Şube Müdürlüğü. Hazırlayan: M. Üyüküoğlu, Ankara, Yayın No: 1020, Rapor No: Hİ-1020, 115s.
- Falvey H, Ervine DA, 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
- Falvey HT, 1990. Cavitation in chutes and spillways. A water resources technical publication *Engineering Monograph No 42 : 63*, Colorado.
- Flow Science, 2016. *FLOW-3D User Manual. Theory Guide*.
- Gümüş V, 2014. Dolusavak akımının sayısal modellenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Hidro dizayn, 2018. Alparslan II Barajı ve HES Projesi Dolusavak Hidrolik Hesap Raporu. ENERGO-PRO, Murat Nehri Enerji Üretim A.Ş.
- Hidro dizayn, 2019. Alparslan II Barajı ve HES Projesi Dolusavak Hidrolik Hesap Raporu. ENERGO-PRO, Murat Nehri Enerji Üretim A.Ş.

- Imanian H, Mohammadian A, 2019. Numerical simulation of flow over ogee crested spillways under high hydraulic head ratio. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13 (1): 982-1000.
- Jothiprakash V, Bhosekar VV, Deolalikar PB, 2015. Flow characteristics of orifice spillway aerator: numerical model studies. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 21 (2), 216–230.
- Kamel A, Abdulhameed I, 2016. Study the Effect of Spillway Locations on the Hydraulic Properties of Spillway. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 31 (5): 90-106.
- Kaplan C, 2018. İlisu Barajı Dolusavak Havalandırıcısının Performans Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karamanoğlu Y, Mobedi M, Ertöz AÖ, 2006. Pompa tasarımının geliştirilmesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin kullanılması. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*. 91: 46-55.
- Kells JA, Smith CD, 1991. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18 (3):358-377.
- Kıranoğlu M, 2019. Dolusavak düşüleri üzerinde oluşan akımın bilgisayar destekli analizi. Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi.
- Kökpınar MA, Göğüş M, 2002. High-speed jet flows over spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Dec. 29 (6): 885-898.
- Kökpınar MA, Göğüş M, 2002. High-speed jet flows over spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29 (6): 885-898.
- Kramer K, 2004. Development of aerated chute flow. *Mitteilung*, 183, H.-E. Minor, ed., Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) ETH, Zurich
- Kumcu ŞY, 2016. Investigation of Flow Over Spillway Modeling and Comparison between Experimental Data and CFD Analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering* 21 (3): 994-1003.
- Low HS, 1986. Model studies of Clyde Dam spillways aerators. Research report 85-6, Dept. of Civ. Eng., Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Morovati K, Eghbalzadeh A, 2018. Study of inception point, void fraction and pressure over pooled stepped spillways using Flow-3D. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 28 (4): 982-998.
- Nie, M.-X, 2001. Cavitation prevention with roughened surface. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (10): 878-880.
- Novakoski CK, Hampe RF, Conterato E, Marques MG, Teixeira, ED, 2017. Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway. *Brazilian Journal of Water Resources*, 22 (42): 1-8.

- Öztürk M, Aydın MC, Aydın S, 2008. Damage Limitation - A New Spillway Aerator. *Water Power and Dam Construction*, 60 (5): 36-40.
- Pfister M, Chanson H, 2014. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. *Journal of Hydrodynamics*, 26 (2): 291-298.
- Pfister M, Hager WH, 2010a. *Hydraulics of spillways and energy dissipaters*. Marcel Dekker Publishers, New York. Khatsuria, R. M.
- Pfister M, Hager WH, 2010b. Chute Aerators. II: Hydraulic Design, *J. Hydraul. Eng.* 136: 360-367.
- Pinto NL De S, Neidert SH, Ota JJ, 1982. Aeration at high velocity flows. *Water Power and Dam Construction*, 2: 34-38, 3:42-44.
- Pinto, N. L. De S. and Neidert, S. H, 1983, Evaluating entrained air flow through aerators. *Water Power and Dam Construction*, 35 (8): 40-42.
- Pinto, NL De S, 1988. Cavitation and aeration, in *Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation*. Edited by R.B. Jansen, Kluwer Academic Publishers, 620-634.
- Pinto NL 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.
- Pinto NL De S, Neidert SH, Ota JJ, 1982. Aeration at high velocity flows. *Water Power and Dam Construction*, 34 (2): 34-38, 34 (3): 42-44.
- Pinto, NL De S, 1991. Prototype aerator measurements in *Air Entrainment in Free Surface Flows*. Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications. Rotterdam.
- Russell SO, Sheenan GJ, 1974. Effect of entrained air on cavitation damage. *Canadian Journal of Civil engineering*, 1 (1): 97-107.
- Rutschmann P, Hager WH, 1990. Air entrainment by spillway aerators. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116: 765-782.
- Rutschmann P, Hager WH, 1990. Design and performance of spillway chute aerators. *International Water Power and Dam Construction*, 42 (1): 36-42.
- Rutschmann P, Hager WH, 1990. Air entrainment by spillway aerators. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116 (6): 765-782.
- Sarwar MK, Ahmad I, Chaudary ZA, Mughal HUR, 2019. Experimental and numerical studies on orifice spillway aerator of Bunji Dam. *Journal of The Chinese Institute of Engineers*, 2019:1-10.
- Tan TP, 1984. Model studies of aerators on spillways. Research Report 84-6, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

- Telkiran MN, Aköz MS, Şimşek O, Soydan NG, 2019. Dolusavak Üzerinden Geçen Akımın Sayısal Analizi. Mersin Dereyurt Göleti Dolusavak Örneği, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 34 (1): 155-167.
- Teng P, Yang J, Pfister M, 2016. Studies of Two-Phase Flow at a Chute Aerator with Experiments and CFD Modelling. Modelling and Simulation in Engineering, Article ID 4729128, 11p.
- Teng P, Yang J, 2016. CFD modeling of two-phase flow of a spillway chute aerator of large width. J. Appl. Water Eng. Res., 4 (2): 163–177.
- Tokyay T, Kurt C, 2018. Application of VOF and k- ϵ turbulence model in simulation of flow over a bottom aerated ramp and step structure. Water SA, 45 (2): 278-290.
- Ulu A. E, 2019. Labirent Kretli Dolusavakların Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Volkart P, 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
- Volkart P, 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.
- Wood IR, 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.
- Wood IR, 1988. Aerators-the interaction of nappe and duct air entrainment. Int. Symp. On Hydr. For High Dams, IAHR, 611-618.
- Wood IR, Ackers P, Loveless J, 1983. General method for critical point on spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109 (2): 308-312.
- Zamankhan P, 2015. Simulation of cavitation water flows. Mathematical Problems in Engineering. Article ID 872573, 2015: 1-16.
- Zhang JM, Chen JG, Xu WL, Wang YR, Li GJ, 2011. Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 23 (1): 71-80.

ÖZGEÇMİŞ

■■■■ yılında ■■■■ doğdum. İlköğretimi Muş Alparslan YİBO İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu Muş Alparslan YİBO İlköğretim Okulu'nda ve liseyi TOBB Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladım. 2013 yılında kazandığım Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2018 yılında mezun oldum. 2018'de Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladım. Ocak 2021'de yüksek lisansımı tamamladım. Yabancı dilim İngilizce'dir

Muhammed Reşid ÖZDEMİR

