T.C
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ VE DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ILISU BARAJI DİPSAVAK PERFORMANSININ SAYISAL MODELLE BELİRLENMESİ

Çimen KARADUMAN

MAYIS 2018

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ILISU BARAJI DİPSAVAK PERFORMANSININ SAYISAL MODELLE BELİRLENMESİ

Hazırlayan

Çimen KARADUMAN

Danışman

Doç. Dr. M. Cihan AYDIN

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. M. Cihan AYDIN

Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ

Doç. Dr. Fevzi ÖNEN

MAYIS 2018

Çimen KARADUMAN tarafından hazırlanan **"Ilısu Barajı Dipsavak Performansının Sayısal Modelle Belirlenmesi"** adlı tez çalışması **09/05/2018** tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Doç. Dr. M. Cihan AYDIN (Danışman)	
Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ (Üye)	
Doç. Dr. Fevzi ÖNEN (Üye)	

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21./06./2018 gün ve 24./02 Sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Koray KÖKSAL
Enstitü Müdürü

ÖZET

ILISU BARAJI DİPSAVAK PERFORMANSININ SAYISAL MODELLE BELİRLENMESİ

Çimen KARADUMAN

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. M. Cihan AYDIN
Mayıs 2018, 56 sayfa

Ilısu Barajı ve Hidroelektrik santrali ülkemizin en önemli projelerinden biridir. Tamamlandığında ülke ekonomisine yılda yaklaşık 300 Milyon $ katkı sağlaması beklenmektedir. Barajın en dikkat çekici mühendislik tasarımlarından birisi, 12 m çaplarında ve yaklaşık 1 km uzunluğundaki derivasyon tünellerinin dipsavak yapılarına dönüştürülmesi çalışmalarıdır. Bu çalışmada Ilısu Barajı dipsavak ve havalandırma tünellerinin, farklı akım ve tasarım koşulları altındaki hidrodinamik davranışları Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak incelenmiş ve bazı alternatif tasarımlar geliştirilmiştir. Elde edilen veriler öncelikle Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılan model deneyleri ile karşılaştırılmış ve daha sonra fiziksel deneylerde elde edilmesi mümkün olmayan analizler HAD yardımıyla yürütülmüştür. Analizler Flow-3D yazılımı ve iki fazlı türbülanslı akış modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinden elde edilen ilk sonuçlar model deneyleriyle uygun sonuçlar vermiştir. Daha sonra geliştirilen farklı alternatif tasarımlarında ise havalandırıcı performansı bakımından DSİ'nin orijinal tasarımına göre %50 - %100 arasında verim artışı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ilısu Barajı, Dip Savak, HAD, Sayısal Analiz

ABSTRACT

DETERMINATION OF ILISU DAM OUTLET PERFORMANCE BY NUMERICAL MODEL

Çimen KARADUMAN

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate School of Sciences
Department of Civil Enginering
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN
May 2018, 56 pages

Ilisu Dam and Hydroelectric Power Plant are among the most important projects of our country. Once completed, it is expected that it will contribute to the country economy approximately $300 million annually. One of the most remarkable engineering designs of the dam is the conversion of the diversion tunnels of 12 m in diameter and about 1 km in length into sluice outlet structure. In this thesis, alternative designs of Ilisu Dam sluice outlet were discussed to assess and evaluate hydrodynamic behaviors under different flow and design conditions using Computational Fluid Dynamics (CFD). First, the data obtained were compared with the model experiments conducted by the State Hydroulic Works (SHW), and then analyzes that cannot be obtained in the physical experiments were conducted using CFD. As a method, Flow 3D software with turbulent and two-phase flow model was used to analyses of the models. The fist results conducted by the CFD analyses are considerably agree with the data of experimental results of the SHW. Then it was concluded that the new developed designs of the aerator has given 50% and 100% more efficiency than the original design of SHW.

Keywords: Ilısu Dam, Outlet, CFD, Numerical Analysis

TEŞEKKÜR

Bu tezde, Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BEBAP 2017.04) tarafından desteklenen projeden elde edilen veriler kullanılmıştır. Bundan dolayı Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan karşılaştığım her türlü soruna çözüm bulan kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. M. Cihan AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez aşaması süresince bana yardımını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Ali Emre ULU'ya da ayrıca teşekkür ederim.

Bugünlerimi borçlu olduğum, sevgili biricik aileme minnettarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
İÇİNDEKİLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
SİMGELER DİZİNİ viii
KISALTMALAR DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL VE YÖNTEM 6
3.1. Ilısu Barajı ve Dipsavağı 6
3.1.1 Ilısu Barajı Derivasyon Tünelleri 9
3.1.2 Ilısu Barajı Dipsavak Yapısı 10
3.2. Deneysel Model 11
3.3. Sayısal Model 16
4. BULGULAR 22
4.1. Ölçek Etkisi 23
4.2. Hava Girişi 23
4.3. Hidrodinamik Analizler 28
4.3.1. Havalandırıcı Boykesit Hız Dağılımları 28
4.3.2. Havalandırıcı Enkesit Hız Dağılımları 33
4.4. Alternatif Havalandırıcı Galerisi Tasarımı 38
4.4.1. İkinci Alternatif (HAD-2) 38
4.4.2. Üçüncü Alternatif (HAD-3) 43
4.5. Alternatif Tasarımların Karşılaştırılması 49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 50
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE Sayfa

3.1. Ilısu Barajının Özellikleri (DSİ) 8

3.2. Ilısu Barajı ve HES genel proje karakteristikleri 9

3.3. Derivasyon tünellerinin boyutları 10

3.4. Kullanılan Froude Modelinin Ölçek Değerleri 11

4.1. Ilısu Barajı dipsavak yapısı proje karakteristikleri (DSİ, 2013) 22

4.2. 1/40 ölçekli modelin HAD ve deney sonuçları 25

4.3. Prototip ölçekli HAD ve deney sonuçları 27

4.4. Alternatif Havalandırıcı Tasarımların Karşılaştırılması 48

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL Sayfa

3.1. Ilısu Barajı 6
3.2. Ilısu Barajı Dipsavak Yapısı 10
3.3. Havalandırma tünelinin konumu ve ulaşım tüneline ait plan ve kesitler ile sürgülü vanalara ait detaylar (Orijinal Proje) (DSİ, 2013) 14
3.4. Ilısu Barajı Dipsavak ve havalandırıcısının fiziksel model deneyi düzeneği (DSİ, 2013) ..15
3.5. Fiziksel modelin membadan (soldaki) mansaptan (sağdaki) görünüşleri (DSİ, 2013) 15
3.6. Havalandırma galerisi kesiti ve hava hızı ölçüm noktaları (DSİ, 2013) 16
3.7. Ilısu Baraj dipsavağı sayısal model geometrisi 19
3.8. Sayısal modelin sınır şartları 19
3.9. Sayısal modelin ağ yapısı (En ve boy kesit) 20
3.10. Sayısal simülasyondan bir görünüş (Q_w=392 m^3/s) 21
4.1. Zamana bağlı çözüm yakınsamaları: (a) Model, (b) Prototip 24
4.2. Model ölçeği için sayısal model deney sonuçlarının karşılaştırılması: a) Hava debisi, b) Hava giriş oranları. 25
4.3. Model ölçeği için sayısal model deney sonuçlarının karşılaştırılması: a) Hava debisi, b) Hava giriş oranları. 27
4.4. HAD analizlerinden elde edilen Model-prototip oranlarının karşılaştırılması a) Hava debisi, b) Hava giriş oranları. 27
4.5. Havalandırma galerisi kesitindeki model hız kontörleri 29
4.6. Havalandırma galerisi kesitindeki prototip hız kontörleri 31
4.7. Havalandırma galerisi kesit yerleri 33
4.8. Model hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=0.0389 m^3/s) 34
4.9. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=392 m^3/s) 34
4.10. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=581 m^3/s) 35
4.11. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=764 m^3/s) 35
4.12. Q_w=392 m^3/s için havalandırıcı galerisinde Y-Z düzlemindeki hız vektörleri 36
4.13. Havalandırma galerisi orta ekseni boyunca a) hız değişimleri, b) basınç değişimleri 37
4.14. İkinci alternatifin sayısal simülasyondan bir görünüşü (Q_w=392 m^3/s) 38
4.15. Havalandırma galerisi kesitindeki prototip hız kontörleri 39
4.16. Havalandırma galerisi kesit yerleri 41

4.17. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=392 m^3/s) 41
4.18. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=581 m^3/s) 42
4.19. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=764 m^3/s) 42
4.20. Üçüncü alternatif sayısal simülasyondan bir görünüş (Q_w=392 m^3/s) 43
4.21. Havalandırma galerisi kesitindeki prototip hız kontörleri 44
4.22. Havalandırma galerisi kesit yerleri 46
4.23. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=392 m^3/s) 46
4.24. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=581 m^3/s) 47
4.25. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=764 m^3/s) 47
4.26. HAD analizlerinden elde edilen HAD-1,HAD-2 ve HAD-3 prototip oranlarının karşılaştırılması a) Hava giriş oranları, b). Hava debisi 49

SİMGELER DİZİNİ

$	Dolar
%	Yüzde
€	Avro
a	İvme
Ax, Ay, Az	Sırasıyla x, y, ve z yönlerinde akıma açılan kısmi alanlar
b	Gözenekli ortamlarda akım kayıpları
f	Viskoz ivmeleri
F_D	Sadece iki fazlı akım uygulamalarını içeren difüzyon terimini
Fr	Froude Sayısı
F_S	Yoğunluk kaynak terimi
G	Kütle ivmesi
g	Yerçekimi ivmesi
k	Kinetik enerjisi
L	Uzunluk
Q	Debi
Re	Reynold Sayısı
T	Zaman
u, v, w	Sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız bileşenleri
V	Hız
ε	Yayılma oranı
ρ	Akışkanın yoğunluğu
υ	Kinematik Viskosite

KISALTMALAR DİZİNİ

DSİ	Devlet Su İşleri
DT1	Derivasyon tüneli 1
DT2	Derivasyon tüneli 2
DT3	Derivasyon tüneli 3
VOF	Volume of Fluid
TAKK	Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol
RNG	Renormalized Group Model

1. GİRİŞ

Dicle Nehri üzerinde inşa edilmekte olan Ilısu Barajı ve Hidroelektrik santrali, ülkemizin en önemli projelerinden biridir. Baraj, Mardin ve Şırnak sınırları arasında yer alıp, Cizre ve Dargeçit ilçelerine sırasıyla 35 ve 15 km, Türkiye-Suriye sınırına ise 45 km uzaklıkta yer almaktadır. Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu tipinde inşa edilen Ilısu Barajının talvegden yüksekliği 130 m, kurulu gücü 1200 MW olup yıllık 3833 GWh enerji üretmesi planlanmaktadır. Bu güç Türkiye'nin mevcut hidroelektrik santrallerinin yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir (DSİ, 2013). Ilısu barajı ülkemizdeki, gövde hacmi açısından ikinci ve kurulu güç bakımından ise dördüncü büyük barajdır.

Barajın en dikkat çekici yapı elemanlarından biri de devasa boyutlardaki üç adet derivasyon tünelleridir. İnşaatı sırasında kullanılan 12 m çapındaki DT1, DT2, DT3 diye adlandırılmış bu derivasyon tünellerinden DT2 tünelinin, işletme aşamasında dip savak yapısı olarak kullanılması planlanmıştır. Dipsavağın işletilmesi sırasındaki yüksek akım hızları nedeniyle meydana gelebilecek kavitasyon hasarlarını önlemek için akıma hava sağlanması gerekmektedir. İlk tasarımında bu dipsavağın, vana odasına giden ulaşım tünelleri, akıma hava sağlayan havalandırma galerileri olarak planlanmış, fakat yapılan test ve analizlerde daralan kesitlerdeki hava ağzının 100 m/s gibi büyük hızları aşacağı ve bunun sonunda hava patlamaları ve işletme sorunlarının oluşacağı anlaşılmıştır. Bu nedenle DT2 tüneline paralel olan diğer iki derivasyon tünelinden, yaklaşık 1 km uzunluğunda ve 12 m çapındaki DT1 tüneli havalandırma galerisi olarak kullanılması planlanmıştır. DT1 tünelinden DT2 tüneline hava sağlamak için bu iki tüneli, vana odasının hemen mansabında, birleştiren at nalı şeklinde diğer bir havalandırma galerisi kullanılmıştır.

DSİ mühendisleri tarafından tasarlanan bu alışılmadık tasarım, DSİ Teknik Araştırma ve Kontrol (TAKK) Dairesi başkanlığı tarafından 1/40 ölçekli fiziksel model deneyleriyle, farklı hidrolik ve işletme koşullarında test edilmiştir. Ancak, Froude modeli kullanılarak gerçekleştirilen 1/40 gibi küçük bir ölçekli modellerde, özellikle de hava karışımı gibi ölçümlerde ölçek etkilerinden kaçınmak zordur. Ayrıca bu tür fiziksel modeller oldukça pahalı ve değişiklik yapılması zor ve zaman alıcıdır. Detaylı ve hassas ölçüm yapmak eldeki ölçüm aletlerinin yeterliliği ve deneyi yapan kişilerin uzmanlık bilgi ve becerilerine de bağlıdır. Bu nedenle deneysel çalışmaların her koşul altında yapılması mümkün olamamaktadır.

Bu tezin amacı**,** Ilısu Barajı dip savak ve havalandırma yapılarının farklı hidrolik ve tasarım şartları altındaki performanslarını sayısal modelleme yöntemleriyle belirlemek ve çözüm

önerileri sunmaktır. Bu amaçla önce dip savak yapısının 1/40 ölçeğindeki fiziksel model deneylerine uygun üç boyutlu (3B) sayısal modeli hazırlanmış ve Flow-3D yazılımıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar DSİ tarafından gerçekleştirilen model deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulaması da sağlanmıştır. Daha sonra yapının gerçek prototip boyutlarıyla 1/1 ölçeğindeki sayısal modeller üzerinde çalışılarak tasarımın performansı değerlendirilmiştir. DSİ tarafından yapılan fiziksel modelin sayısal analiz sonuçları bittikten sonra galeriden geçen hava miktarını arttırmak için hava galerisi ve boyutları değiştirilerek iki tane farklı alternatif için 1/1 ölçeğinde prototip tasarımlar için Flow-3D ile sayısal analizler yapılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları üç farklı tasarım için de kıyaslanmıştır. Böylelikle prototip ve model ölçekli sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak ölçek etkileri de belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında mevcut ve alternatif tasarımların performansları HAD yardımıyla elde edilebilecek detaylı sonuçlarla değerlendirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Su yapılarında alışılagelen yöntemlerden en yaygın kullanılanı hidrolik model deneyleridir. İnşaat mühendisliğindeki birçok önemli su yapısı projesi, inşaatına geçilmeden önce uzun süren model deneyleriyle test edilir. Fakat bu laboratuvar deneyleri oldukça yorucu ve pahalı olmakla beraber tam dinamik benzeşimin sağlanamaması nedeniyle önemli ölçek etkileri içerebilir. Hidrolik model deneylerindeki bu ölçek etkileri üzerinde literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Volkart ve Rutscmann (1984), ölçek etkilerini belirlemek amacıyla bir dizi ölçekli model üzerinde çalışmalar yapmış ve model ile prototip sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kökpınar ve Göğüş (2002), dolusavak havalandırıcıları üzerindeki yüksek hızlı akım jetlerini incelemiş, model ve prototip datalarını kullanarak modeldeki ölçek etkilerini belirlemeye yarayan bazı eşitlikler elde etmişlerdir. Kells ve Simith (1991), kavitasyon önleyici dolusavak havalandırıcılarıyla yapılmış önemli çalışmaları bir araya getiren geniş bir derleme çalışması sunmuşlar ve havalandırıcılardaki hava girişi olayı ile ilgili ölçek etkileri üzerinde de durmuşlardır. Aydın (2005) ve Öztürk vd. (2008) yaptıkları çalışmalarda dolusavak havalandırıcılarının sayısal modelleri üzerinde çalışmış ve hava giriş üzerinde model deneylerindeki ölçek etkileri üzerinde detaylı olarak durmuştur. Aydin ve Öztürk (2009), American Society of Mechanical Engineers (Freitas, 1993) tarafından sunulan prosedürüne uygun olarak dolusavaklar üzerinde yaptıkları HAD analizlerinin doğrulaması ve geçerliliği üzerine çalışmışlardır.

Teng ve Yang (2016), havalandırmaların savaklardaki yüksek debili akımın neden olduğu kavitasyon riskini azalttığını belirterek su-hava karışımlı akımların karakteristik özellikleri üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında 25 m uzunluğunda ve 35 m genişliğindeki Bergeforsen barajı havalandırma sisteminin sayısal modellemesi yapılarak performansı değerlendirilmiştir. Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) modellemesinde, kapakların tamamen açık olduğu durumda oluşan akımın davranışı incelenmiştir. Sonuçta, bulunan sayısal değerler deneysel çalışma sonuçlarına oldukça yakın bulunmuş ve geniş boşaltım kanallarının orta noktalarına havalandırma açıklıkları bırakılması tavsiye edilmiştir (Teng ve Yang, 2016). Bir başka çalışmada ise Teng vd. (2016), savaklarda bulunan havalandırma sistemlerinin önemini vurgulayarak, Zürih'te bulunan hidrolik, hidroloji ve glasioloji laboratuvar çalışmasından ve 2 boyutlu sayısal bir modelde elde edilen hava konsantrasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan simülasyon sonucunda bulunan değerler, memba bölgesinde hava konsantrasyonun arttığını göstermiştir. Kramer ve Hager (2005), hava kabarcık yükselme hızının bağlı olduğu kriterleri belirlemeye çalışmışlardır. Yüksek hızla akan akışlarda, hava kabarcığı üzerine etki

eden kuvvetlerin sayısı, türbülans, hidrostatik olmayan basınç gradyanı, kesme kuvveti, kabarcık bulutları ve serbest yüzey sürüklenmesiyle arttığı ifade edilmiştir. Burada ana parametreler hidrolik eğim, Froude sayısı ve hava konsantrasyonudur (Kramer ve Hager, 2005). Pfister (2011), kendisine ait daha önce yapılmış şut havalandırıcıları ile ilgili bir çalışmayı temel almıştır. Daha önce yapılan araştırmada analiz yapılmayan iki konu; dik deflektörleri ve boşluk alt basınç etkisini incelemiştir. Araştırmada, şut yapısının hidrolik karakterleri sistematik olarak değiştirilerek performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu karakterler, ofset yüksekliği, şut alt açısı, yaklaşan akımın Froude sayısı ve derinlik olarak sıralanmıştır. Çalışma sonunda, optimum havalandırma performansının, şut tabanına göre 10° civarında saptırıcı açılarda, elde edildiği gösterilmiştir (Pfister, 2011). Pfister ve Hager (2010) şut havalandırıcılarının memba yönündeki bulunan hava transfer ve akım yapısına odaklanmıştır. Çalışmada şut havalandırıcılar üzerindeki akış üç bölgeye ayrılmıştır. Bunlar jet bölgesi, yeniden birleşme püskürtme bölgesi ve uzak saha bölgesidir. Elde edilen sonuçlara göre; havalandırıcıların ağırlıklı olarak ortalama hava konsantrasyonunu arttırdığı, alttaki hava konsantrasyonu önemli derecede etkilediği ve deflektörlü havalandırıcıların hava girişi açısından, ofsetlerden daha verimli çalıştığı görülmüştür (Pfister ve Hager, 2010). Pfister ve Hager (2010), bir başka çalışmalarında ise bir önceki çalışmalarının devamı niteliğinde olarak, şut havalandırıcıların hidrolik dizaynlarını incelemişlerdir. Havalandırıcı veriminin, çoğu zaman, hava besleme kanalları boyunca çekilen hava debisinin su debisine oranı ile açıklandığı belirtilmiştir. Çalışmada, şut havalandırıcılarının mansabındaki akım boyunca hava taşınımının gelişimi incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, deflektörlü havalandırıcıların, ofsetlerden daha yüksek hava konsantrasyonları ürettiği, dik deflektörlerin 30^o'den dik şutlerde küçük değerlere sahip olanlardan daha fazla etkili olduğu ve dik şutlerdeki 30^o havalandırıcılar düz olanlarına göre daha verimli çalıştıkları gözlemlenmiştir (Pfister ve Hager, 2010). Zhang vd. (2011) tarafından yapılan çalışma, hidroelektrik santrallerde görülebilen kavitasyon sorunun hava girişi ile ekonomik olarak çözülebileceğini ifade ederek kavitasyonlu kompleks akım dinamiklerini, realizable k-ε türbülans modeli (Volume of Fluid (VOF)) ve hava-su karışımı modeli (Mixture türbülans model) kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle analiz etmişlerdir. Elde edilen veriler deneysel sonuçla kıyaslanmıştır. Sayısal analizden elde edilen sonuçlar deneyde gözlemlenen ile uyuştuğu görülmüştür. (Zhang vd., 2011). Chatila ve Tabbara (2004), Ogee tarzı profile sahip bir regülatörü; HAD analizleri kullanarak üzerine gelen hidrodinamik etkileri araştırmışlardır. Çalışmalarında, fiziksel olarak yapılan deneysel çalışmaların önemi vurgulanırken, deneysel metotların zaman ve ekonomik anlamda kayıplarından da bahsederek sayısal yöntemlerin avantajları vurgulanmıştır. Çalışma bulguları, yapılan sayısal analizle elde edilen verilerin

fiziksel yani deneylerden elde edilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğunu göstermiştir (Chatila ve Tabbara, 2004). Pfister ve Chanson (2014), iki fazlı (su-hava) akımların deneysel ortama uygulanırken dikkat edilmesi gereken ölçek etkilerini belirtmişlerdir. Bu zamana kadar uygulanan ve dikkat edilmesi gereken faktörlere ilave olarak da bir takım üzerinde durulması gereken yeni bazı faktörler de bulmak amaçlanmıştır. Çalışmalarında iki fazlı modelleme yapılırken Froude, Weber ve Reynold sayılarının model ve prototipte aynı olması gerektiği belirtilmiştir. Ancak eğer tam boyutlarla çalışılamadığında bu olasılığın imkânsız olacağı da söylenmiştir. Bu sebeple Morton sayısının yapılan hesapların doğruluğu ve güvenilirliği açısından iyi ayarlanması gereği ortaya konmuştur. Sonuçta, yapılan deneysel araştırmaların sonuçları, ölçek etkilerini hesaplamak için doğru kriterlerin seçilmesinin kritik önem arz ettiği vurgulanmış ve kabarcık boyutları ve türbülans ölçekleri gibi bazı parametrelerin, büyük boyutlu laboratuvar modellerinde (1/2 ile 1/3) bile ölçek etkilerinden etkileneceği belirtilmiştir (Pfister ve Chanson, 2014).

Yukarıdaki çalışmaların çoğu dolusavak havalandırıcıları üzerinde olup dipsavak havalandırmasıyla ilgili literatürde çok fazla çalışma olmadığı görülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Ilısu Barajı ve Dipsavağı

Türkiye'nin doğu ve güneyinde yer alan Dicle-Fırat Nehri ülkedeki suyun yaklaşık % 29'luk bir kısmını oluşturmaktadır. Dicle Nehrinden beslenen Ilısu Barajı Türkiye'ye ekonomik katkı sağlanması beklenen önemli bir yatırım projesidir. Ilısu Barajı Mardin-Şırnak il sınırları arasında bulunup Cizre'ye 35 km ve Dargeçit ilçesine de 15 km uzaklıkta bulunmaktadır. Türkiye-Suriye sınırına da 45 km uzaklıktadır. Enerji üretimi bakımından Atatürk, Karakaya ve Keban Barajlarından sonra Türkiye'nin dördüncü, Gövde hacmi açısından ise Türkiye'nin ikinci büyük barajı olması hedeflenmektedir. Ilısu Barajının genel görünüşü Şekil 3.1'de verilmiştir.

Şekil 3.1. Ilısu Barajı

Baraj gövde tipi ön yüzü beton kaplı kaya dolgu tipinde inşa edilmiştir. Gövde hacmi kaya dolgu 24.000.000 m^3, beton ağırlık 600.000 m^3'dür. Temelden yüksekliği 135 m, kret uzunluğu 2330 m ve göl hacmi ise 10.6 milyar m^3 dür. Barajın inşaat tahminin yapım bedelinin: 875.000.000 € olması beklenmektedir.

Dünya sıralamasında, en uzun krete ve en büyük ön yüzü beton kaplama (ÖYBK) alanına sahip barajlar arasında birinci sırada yer almaktadır. Bu tipte ÖYBKtip barajların diğer tür barajlara göre bazı üstünlükleri vardır:

- Uygulanacak bütün amaç ve yükseklik için uygundur.

- Memba ve mansap şevleri 1:1.3 ile 1:1.5 arasında seçilebilir. Şevlerin daha dik olmasından dolayı taban kalınlığı daha azdır ve daha az dolgu malzemesi gerekir. Diğer yapı boyutları da taban kalınlığına bağlı olarak azalır.
- Tepe oturması olmadığı için hava payı azdır. Ayrıca gövde üzerinde dolu savak yapılabilir.
- Boşluk suyu basıncı yoktur.
- Boşluk suyu basıncı, sıkıştırma donanımına ihtiyaç, sızma ve kaçak problemleri yoktur.
- İnşaatı daha kısa sürede tamamlanabilir.
- Deprem tehlikesine karşı daha dayanıklıdır.
- Yüksek mukavemetli temel gerekli değildir. Bütün bunların sonucu olarak maliyeti daha düşüktür.

Ilısu Barajı enerji üretmek amacıyla inşa edilmiş olup kurulu gücü 12000 MW, yıllık üretmesi beklenen enerji ise 3833 GWh'dır. Bu güç Türkiye'deki Hidroelektrik santralleriyle üretilen enerjinin yaklaşık % 10'luk bir kısmına denk gelip barajın işletime açılmasıyla yılda 300 milyon $ gelir getirmesi beklenmektedir. Ilısu Barajının yapımına 2009 yılında DSİ tarafından başlanmış olup 2018 yılında bitirilmesi hedeflenmektedir. Barajın yapımı sırasında bölgedeki yaklaşık 4 bin kişiye iş imkânı sağlanmıştır. Ilısu Barajına ait karekteristik özellikler Çizelge 3.1'de HES yapısına ait karekteristik özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Ilısu Barajının Özellikleri (DSİ 2013)

Hidroloji	Drenaj Alanı		35 517 km^2
	Ortalama Debi (Doğal)		490 m^3/s
Rezervuar	Maksimum Su Seviyesi		526.82 m
	Maksimum Su Seviyesi Rezervuar Alanı		313 km^2
	Normal Su Seviyesinde Toplam Rezervuar Alanı		$10410*10^6$ m^3
Dolgu Baraj	Tipi		Merkezli Kil Çekirdekli Kaya Dolgu
	Talveg Kotu		400.00 m
	Gövde Dolgu Hacmi (Mansap Dolgusu Dahil)		$43.79*10^6$ m^3
Memba Batardosu	Tipi		Merkezli Kil Çekirdekli Kaya Dolgu
Mansap Batardosu	Tipi		Kaya Dolgu
Derivasyon Tünelleri	Tipi		Dairesel, Beton Kaplamalı
	Tünel Sayısı		3
Dipsavak	Tipi		Tünel
Beton Baraj Ve Dolusavak	Beton Barajı Maksimum Yüksekliği		48.00 m
Enerji Su Alma Yapıları ve Cebri Borular	Tünel Sayısı		3
Santral Binası	Tipi		Yarı Gömülü
	Ünite Sayısı		6
	Toplam Kurulu Güç		1200 MW
	Ortalama Yıllık Enerji Üretimi		3833 GWh
Kuyruksuyu Kanalı	Uzunluğu		1100.00 m
	Maksimum Genişliği		143.00 m
Türbinler	Tipi		Düşey Francis
	Türbin Adedi		6
	Yardımcı Ünite Tipi		Yatay Francis
	Türbin Adedi		1
Jeneratörler	Tipi		Düşey Eksenli Senkron Jeneratör
	Ünite Sayısı		6
	Anma Gücü		223 MVA
	Tipi		Yatay Senkronize Jeneratör
	Ünite Sayısı		1
	Anma Gücü		5.5 MVA
Transfarmatörler	Ünite Adedi		18+1 Yedek
Şalt Sahası	**a)**380 Kv Şalt Sahası	Tipi	Harici
		Anma Gerilimi	380 Kv
	b)154 Kv Şalt Sahası	Tipi	Harici
		Anma Gerilimi	154 Kv

Çizelge 3.2. Ilısu Barajı ve HES genel proje karakteristikleri (DSİ 2013)

Baraj tipi	Ön yüzü beton kaplı, kaya dolgu baraj
Amacı	Enerji üretimi
Kurulu güç	1200 MW
Ortalama yıllık enerji üretimi	3.833 GWh
Yeri	Mardin ve Şırnak il sınırları arasında, Dargeçit İlçesi
Tesis edildiği akarsu	Dicle Nehri
Dipsavağın eğimi	% 0.1
Derivasyon yapısı	DT1+DT2+DT3 derivasyon tünelleri
Dipsavak yapısı	DT2 derivasyon tüneli
Dipsavak çapı	12 m
Dipsavak uzunluğu	1016.1 m
Kontrol vanasının şekli	Sürgülü vana
Kontrol vanasının sayısı	2 adet
Kontrol vanasının boyutları	2.65 m x 4.00 m

3.1.1 Ilısu Barajı Derivasyon Tünelleri

Derivasyon yapıları, üzerine baraj inşa edilecek akarsu yatağı güzergahının çeşitli şekillerde inşaat süresince değiştirilmesi için yapılan yapılardır. Amaç, barajın inşaatının gerçekleşmesi için gerekli olan memba ve mansap batardolarının yapılması, bu iki batardo arasında kalan akarsu yatağının kurutularak baraj temel kazısına hazırlanması ve baraj inşaatı süresince su gelişinin engellendiği bu bölgede emniyetli çalışma sahasının sağlanmasıdır.

Ilısu Barajı ve HES İnşaatı kapsamında Dicle Nehri üç adet beton kaplamalı (DT1,DT2,DT3) derivasyon tünelleri ile derive edilmiştir. Kazı çapı 13.30 m, beton kaplama çapı 12 m ve uzunlukları 916 m, 1016 m ve 1064 m'dir. Deşarj edilecek maksimum debi 10,276 m^3/s tür. Sadece derivasyon tünelleri için bugüne kadar 141 milyon TL harcama yapılmıştır. Derivasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra nehrin önünü kapatacak olan memba batardosuna ait kalan imalatlar tamamlanmıştır. Memba batardosu kret kotu 436.50 m olup 1.350.000 m^3 gövde dolgu hacmine sahiptir. Memba batardosu imalatlarının bitiminden sonra baraj alanı 50 yıllık taşkın debisine karşı emniyetli hale getirilmiştir.

Çizelge 3.3. Derivasyon tünellerinin boyutları (DSİ 2013)

Tünel Adı	Tünel Çapı(m)	Tünel Uzunluğu(m)
DT1	12	1064,0
DT2	12	1016,1
DT3	12	915,3

3.1.2 Ilısu Barajı Dipsavak Yapısı

Dipsavak, ölü hacim dışında hazneyi gerektiğinde tamamen boşaltma olanağı sağlayan tesislerdir. Dipsavakların taşkın süresince ve taşkından sonra da belirli bir süre çalıştırılmasının faydası vardır. Haznedeki su dipsavak vasıtasıyla aşağıdaki maksatların birisi için boşaltılır.

- Haznedeki su barajın onarımı veya bakımı için;
- Haznedeki suyu belli bir seviyeye düşürüp haznedeki taşkınlar, hacim oluşturmak için,
- Baraj mansabındaki akarsu kesiminde en az belli bir su debisi sağlamak için ,

Taşkın sularının önemli bir kısmı dolu savaktan atılmakla birlikte dipsavak taşkın sularının bir kısmını mansaba aktarmak için devreye sokulabilir. Baraj yıkılma tehlikesine karşı barajdaki suyu boşaltmak için de dipsavaklar kullanılır. Ilısu Barajı derivasyon tünellerin çıkış ağızından bir görüntü Şekil 3.2'de verilmiştir.

Şekil 3.2. Ilısu Barajı Dipsavak Yapısına dönüştürülen derivasyon tünelleri

Ilısu Barajı üç adet derivasyon tünelinden (DT1, DT2, DT3), 12 m çapındaki ve 1000 m uzunluğundaki DT2 tüneli barajın inşaatı sonrası dipsavak yapısına dönüştürülmüştür. Böylece baraj yapımından sonra kullanılmayan tüneller değerlendirilerek ekonomi ve zaman tasarrufu sağlanmıştır. Bu tünelin paralelindeki DT1 tüneli ise bir baypass galerisi vasıtasıyla havalandırma tüneli olarak düşünülmüştür.

3.2. Deneysel Model

Ilısu Barajının dipsavak tüneli olarak kullanılacak DT2 ve buna bir bağlantı galerisiyle hava sağlamak için kullanılacak DT1 tünellerinin fiziksel model deneyleri DSİ TAKK (Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol) Dairesi Başkanlığı Hidrolik Model Laboratuvarı Şube Müdürlüğü tarafından yapılmıştır (DSİ, 2013). Model çalışmasında farklı akım koşulları ve kapak açıklık durumları için prototip akım şartlarını belirlemek ve havalandırıcıdan elde edilecek hava giriş oranlarını belirlemek için çok sayıda deney yapılmıştır. Model deneylerinde, havalandırma galeri membasındaki akım basınçlı ve asıl incelenecek kapakların mansabındaki havalandırılmış akım ise serbest yüzeyli olduğundan, viskoz kuvvetler ihmal edilerek atalet ve yerçekim kuvvetlerinin dikkate alındığı 1/40 ölçeğindeki Froude modelleri kullanılmıştır. Buna göre dinamik benzeşim için kullanılan diğer ölçek değerleri Froude benzeşimine göre Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan Froude Modelinin Ölçek Değerleri

Fiziksel Parametre	**Birim**	**Eşitlik**	**Ölçek**
Uzunluk (L)	M	$L_r=L_P/L_M$	40
Hız (V)	m/s	$V_r=L_r^{(1/2)}$	6.3245
Debi (Q)	m^3/s	$Q_r=L_r^{(5/2)}$	10119.49
Zaman (T)	S	$Tr=L_r^{(1/2)}$	6.3245

Geometrik ve kinematik benzeşimin yanında tam dinamik benzeşimi de sağlamak için model ve prototipin uzunluk zaman ve kuvvet oranlarının aynı olması gerekir. Dinamik benzeşim iki şekilde sağlanır:

1. Eğer akım serbest yüzeyli değilse model ve prototipin Reynolds sayıları birbirine eşittir.
2. Serbest yüzeli akımda ise Reynolds, Froude ve eğer gerekli ise Weber ve Kavitasyon sayılarının her biri model ve prototip için birbirine eşit olmalıdır. Serbest yüzey içeren

model testlerinde tam dinamik benzeşim ancak model ve prototip sayılarının aşağıdaki gibi birbirine eşitliğiyle sağlanabilir (White, 2003).

$$\mathrm{Re}_m = \mathrm{Re}_p \Rightarrow \frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p} \tag{3.1}$$

$$Fr_m = Fr_p \Rightarrow \frac{V_m^{\,2}}{gL_m} = \frac{V_p^{\,2}}{gL_p} \tag{3.2}$$

Her iki eşitliğin sağlanabilmesi için kinematik viskozite oranının aşağıdaki gibi olması gerekir:

$$\frac{\nu_m}{\nu_p} = \frac{L_m}{L_p}\frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m}{L_p}\left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2 = L_r^{\,3/2} \tag{3.3}$$

Bu ise ancak modelde farklı bir viskozite değerine sahip bir akışkan kullanımıyla olur ki bu çoğu deneysel çalışmada mümkün olamamaktadır. Buradaki deneyde olduğu gibi çoğu hidrolik model deneylerinde su kullanılmaktadır. Bu nedenle, serbest yüzeyli akış ihtiva eden durumlarda model benzeşimlerinde viskoz etkilerin çok küçük olduğu düşüncesiyle ihmal edilip sadece atalet ve yerçekimi kuvvetlerinin akım üzerinde etkili olduğu kabul edilerek dinamik benzeşim Froude benzeşim kuralı kullanılarak sağlanır. Genel olarak model Reynolds sayısının $10<\mathrm{Re}<1000$ aralığında ihmal edilmesi için yeterince küçük olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda, yüksek Reynolds sayılarına sahip prototip datalarını tahmin edebilmek için düşük Re model datalarından elde edilen extrpolasyon eğrileri kullanılabilir. Prototipteki önemli belirsizlikler özellikle Reynolds sayısının 10^6'dan büyük değerlerinde ortaya çıktığı belirtilmektedir (White, 2003). Bu durumlarda viskoz etkilerin ihmal edilmesinden doğabilecek **ölçek etkilerini** kabullenerek deneylerin yapılmasından başka bir seçenek yoktur. Önceki çalışmalar göstermiştir ki özellikle hava girişi problemleri gibi hava-su karışımı problemlerinde Froude modeli için önemli ölçek etkileri ortaya çıkabilmektedir.

Diğer bir taraftan, hidrolik modellerde hava akımı dikkate alındığında Reynolds ve Mach sayıları önem arz etmektedir. Bu durumda sıkıştırılabilen akışkanlar için aşağıdaki bağıntı yazılabilir. Gazlardaki sıkıştırılabilme ile ilgili parametreler viskozite ve basınç gibi değerlerine de etki edebilmektedir.

$$\frac{V_m}{a_m} = \frac{V_p}{a_p} \tag{3.4}$$

Denklem (3.1)'den:

$$\frac{\nu_m}{\nu_p} = \frac{L_m}{L_p}\frac{a_m}{a_p} \tag{3.5}$$

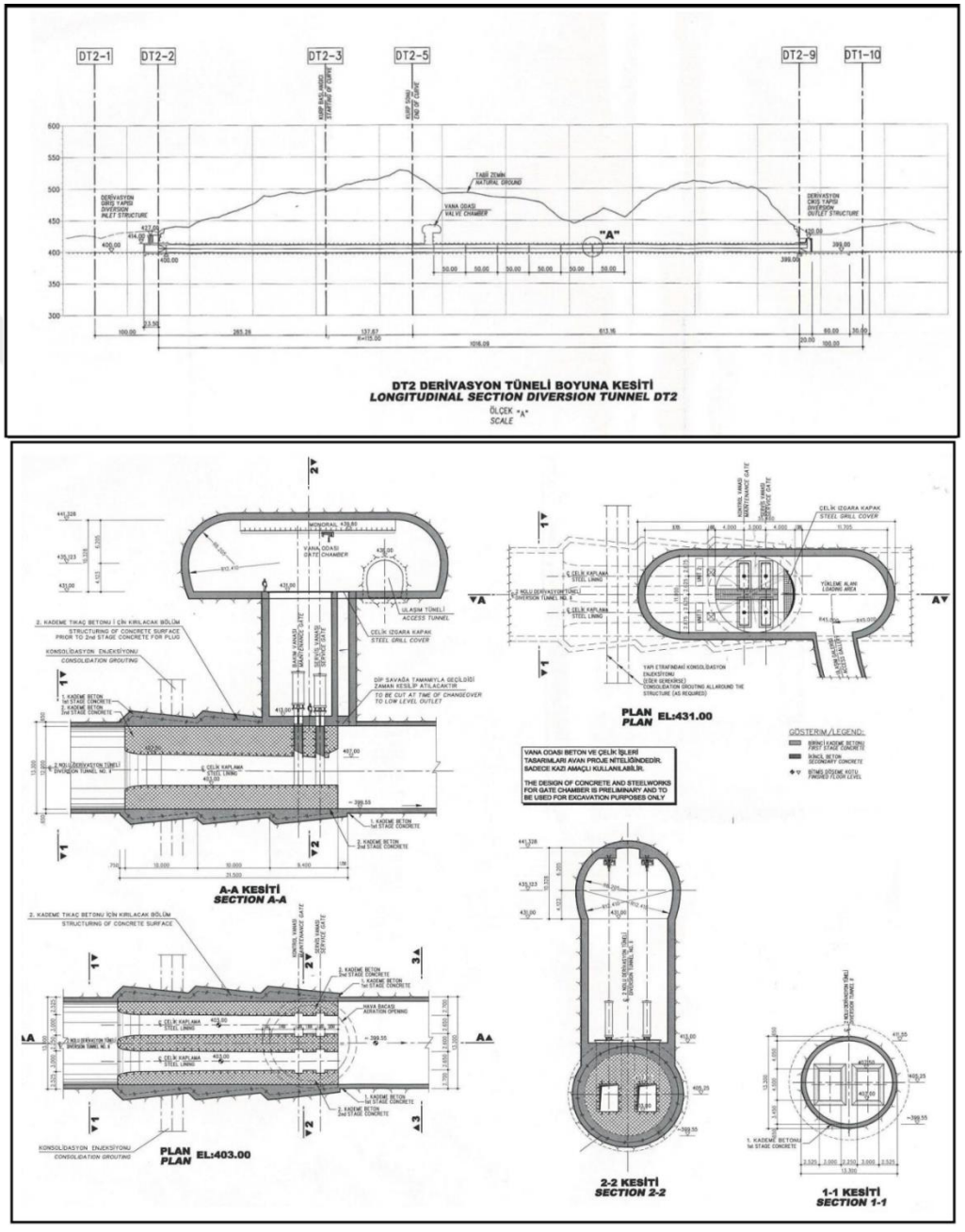
Bu, rüzgar tüneli testleri gibi hava akımı modellerinde düşük viskozite ve yüksek ses hızı gerektirir. Bu durumda modellerde hava yerine hidrojen kullanılabilir fakat çok pahalı ve tehlikeli olduğundan tercih edilmez (White, 2003). Bu açıklamalardan anlaşılabileceği gibi hava-su akımlarının model benzeşimi oldukça karmaşıktır. Bu nedenle prototipteki yüksek hızlı hava akımlarının sıkıştırabilirlik etkileri de, Froude modellerinde ihmal edilir.

Tüm bu açıklamalar özellikle bu çalışmadaki gibi yüksek hızlı hava akımlarının yer aldığı Froude modellerinde önemli ölçek etkilerinin meydana gelebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla laboratuvar ortamında yapılan 1/40 ölçekli (ki bu model deneyleri için küçük sayılabilecek bir ölçektir.) Froude modellerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu tartışabilir hale getirir. Bu nedenle, prototip ölçümleri de mevcut olmadığından, model deneyleriyle birlikte model ve prototip ölçülerinde 3-boyutlu sayısal modeller kullanılarak ölçek etkileri belirlenmeye çalışılacaktır. Sonrasında sayısal modelin avantajları kullanılarak sistemin çalışması ve performansı hakkında detaylı analizler verilecektir.

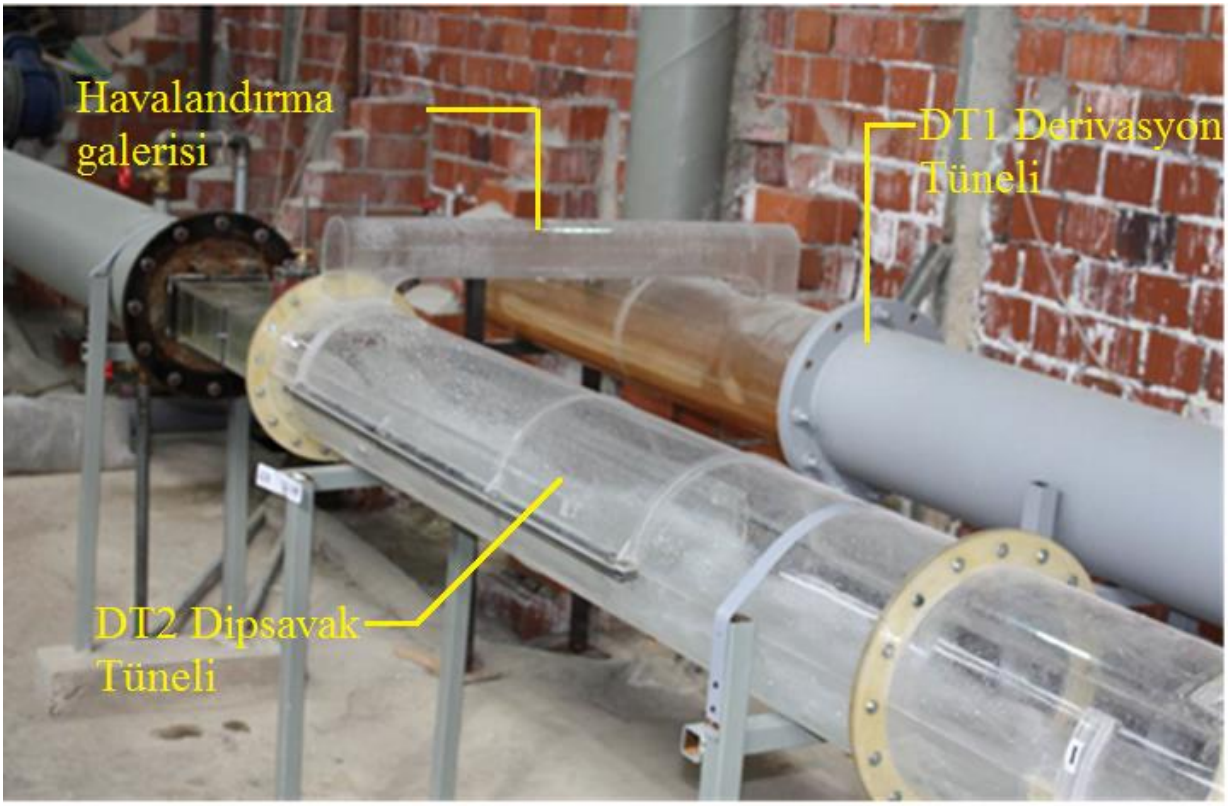
Dipsavak tünellerinin orijinal tasarımında akım havalandırması kontrol odasına ulaşım tünellerinden, kapak odası boyunca kuyruk suyu tüneline doğru yapılması planlanmıştır (Şekil 3.3). Fakat daha önceki deney raporlarında ulaşım tünellerindeki hava hızlarının çok büyük olacağı (100 m/s gibi) görülünce ulaşım tünelindeki insan hareketini olumsuz etkileyeceği de düşünülerek önceki tasarımdan vazgeçilip DT1 derivasyon tünelinin havalandırma tüneli olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla DT1'den DT2 tüneline hava sağalmak için iki tünel arasına bir havalandırma galerisi planlanmıştır. Böylece bu sorun akılcı bir mühendislik düşüncesiyle çözülmeye çalışılmıştır (DSİ, 2013).

DSİ TAKK Dairesi Hidrolik laboratuvarlarında gerçekleştirilen deneylerde Ilısu barajının derivasyon tünelleri olan biri olan DT2 tüneli dipsavak, DT1 derivasyon tüneli ise havalandırma için kullanılmıştır. Her iki derivasyon tüneli arasında at nalı kesitli bir havalandırma galerisi bırakılmıştır. Dipsavak debisi havalandırma galerisinin hemen membasında kutu kesitli iki adet kapakla kontrol edilmektedir. 1/40 ölçeğiyle hazırlanmış laboratuvar fiziksel modelin görüntüleri

Şekil 3.4 ve 3.5'te verilmiştir. Deneyler farlı akım koşulları ve alternatif kesit tasarımlar için gerçekleştirilmiştir. Havalandırma galerisindeki hava debisini belirlemek için galeri kesiti içerisinde Şekil 3.6'da gösterilen farklı noktalardaki hava hızı değerleri anemometre ile okunmuş ve sayısal integrasyon yöntemiyle önce alanlar sonra debiler elde edilerek toplam hava debisi hesaplanmıştır.

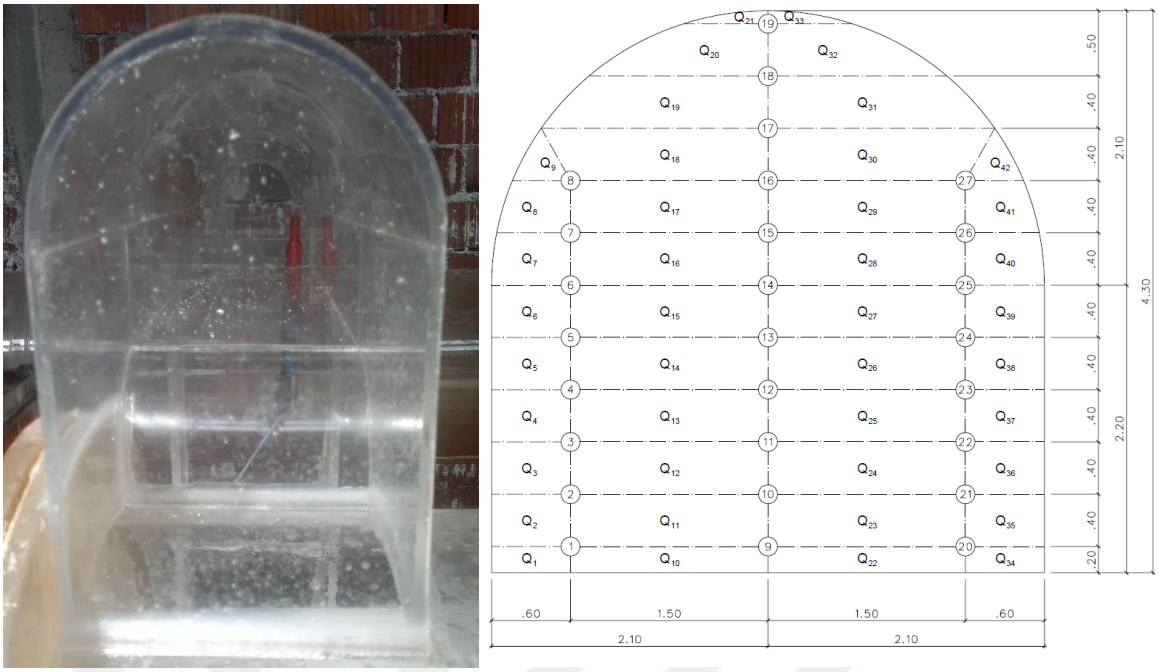


Şekil 3.3. Havalandırma tünelinin konumu ve ulaşım tüneline ait plan ve kesitler ile sürgülü vanalara ait detaylar (Orijinal Proje) (DSİ, 2013)



Şekil 3.4. Ilısu Barajı Dipsavak ve havalandırıcısının fiziksel model deneyi düzeneği (DSİ, 2013)

Şekil 3.5. Fiziksel modelin membadan (soldaki) mansaptan (sağdaki) görünüşleri (DSİ, 2013)



Şekil 3.6. Havalandırma galerisi kesiti ve hava hızı ölçüm noktaları (DSİ, 2013)

3.3. Sayısal Model

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) günümüzde birçok hassasiyet içeren mühendislik dallarında kullanılan sayısal bir yöntemdir. Deneysel çalışmalara göre daha az zaman, ekipman ve ekonomik kazanç sağlayan HAD yazılımları deneylerden elde edilenden daha fazla ve detaylı bilgiye de kolaylıkla erişmeyi sağlamaktadır. Bu bağlamda, baraj dipsavaklarında önemli bir problem olan kavitasyon sorunu iki fazlı (hava-su) bir akış olduğundan daha fazla bir önem ve dikkat gerektirmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) akışkanların teorik ve yarı ampirik dinamik denklemlerine çeşitli sayısal yöntemler ve hesaplama araçları kullanılarak çözen gelişmiş bir tekniktir. Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde çok karmaşık sistemlerin hidrodinamiği bile analiz edilebilmektedir. Hidrolikte geleneksel yöntem olarak fiziksel model deneyleri kullanılsa da HAD analizlerinin kullanımı her geçen gün artmakta ve hidrolik sistemlerin modellenmesi ve tasarımında büyük avantajlar sunmaktadır. Çok fazlı akışkan modelleri ve serbest yüzeyli akımların sayısal modellenmesi diğer tür akım modellerine göre oldukça zordur. Hacim oranları metotları gibi (VOF: *Volume of Fluid*) yöntemler sayesinde hava ve su arasındaki serbest yüzey net olarak belirlenebilmektedir. Fakat bu projedeki gibi dolusavak ya da dipsavak havalandırma problemleri için hava ve su karışımlarını ve bu fazlar arasındaki kayma gerilmelerini dikkate alan daha karmaşık modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, Ilısu Barajının dipsavak ve havalandırıcısı FLOW-3D yazılımı kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. FLOW-3D genel amaçlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. FLOW-3D diğer HAD yazılımları gibi akışkan hareketini belirlemek için bir takım temel akışkan denklemini sayısal olarak çözer. Akışkan hareketi lineer olmayan bu tür denklemlerin çözümüyle yönetilir. Akışkan hareketinin temel denklemleri FLOW-3D gibi programlar yardımıyla sonlu elemanlar veya hacimler kullanılarak kolaylıkla çözülebilmektedir. Sıkıştırılamayan akışkan (ρ=sabit) kabulüyle akışkanın temel denklemleri aşağıda verilmiştir (FLOW-3D, 2016).

Kütle süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}\left(vA_y\right) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \tag{3.6}$$

Burada; ρ akışkanın yoğunluğu, *Ax*, *Ay*, *Az* sırasıyla *x*, *y*, ve *z* yönlerinde akıma açılan kısmi alanlar; *u*, *v*, *w* = sırasıyla *x*, *y* ve *z* yönlerindeki hız bileşenleridir.

Akışkan hareketinin momentum (Navier-Stokes) Denklemleri:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left[uA_x\frac{\partial u}{\partial x} + vA_y\frac{\partial u}{\partial y} + wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right] = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\
&\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left[uA_x\frac{\partial v}{\partial x} + vA_y\frac{\partial v}{\partial y} + wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right] = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\
&\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left[uA_x\frac{\partial w}{\partial x} + vA_y\frac{\partial w}{\partial y} + wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right] = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Burada:(G_x, G_y, G_z): Kütle ivmesi, (f_x, f_y, f_z): Viskoz ivmeleri, (b_x, b_y, b_z): Gözenekli ortamlarda akım kayıplarını ifade etmektedir. İki fazlı akımların çözümü için hacim oranları metodu (VOF: Volume of Fluid) kullanılmıştır. Bu metotta her birim hacim için 1. akışkanın hacmi aşağıdaki VOF fonksiyonu ile tanımlanır (Hirt ve Nichols, 1981).

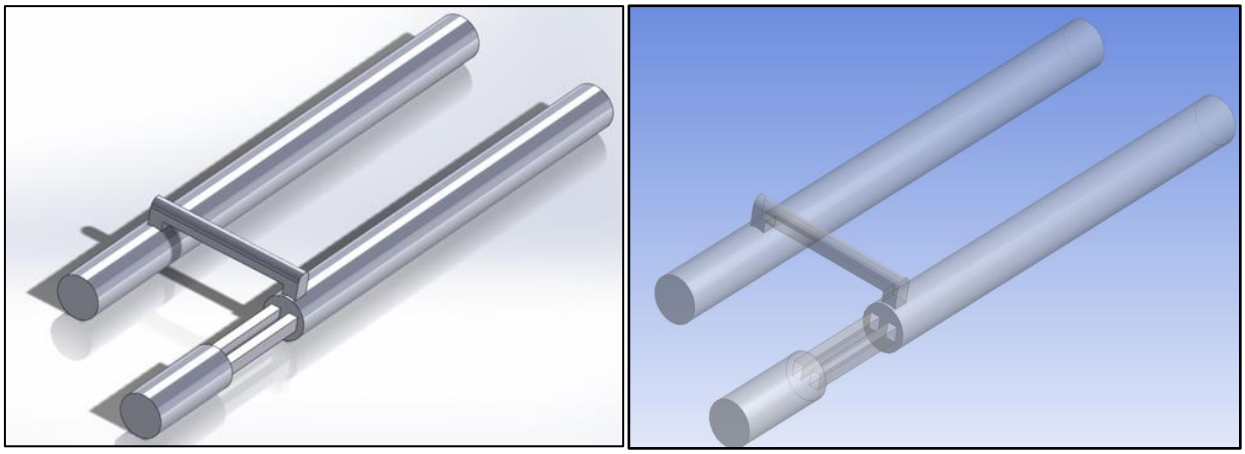
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial 1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + R\frac{\partial}{\partial y}\left(FA_y v\right) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) + \varphi\frac{FA_x u}{x}\right] = F_D + F_S \tag{3.8}$$

Burada; F_D sadece iki fazlı akım uygulamalarını içeren difüzyon terimini, F_S ise yoğunluk kaynak terimini temsil eder (FLOW-3D 2016).

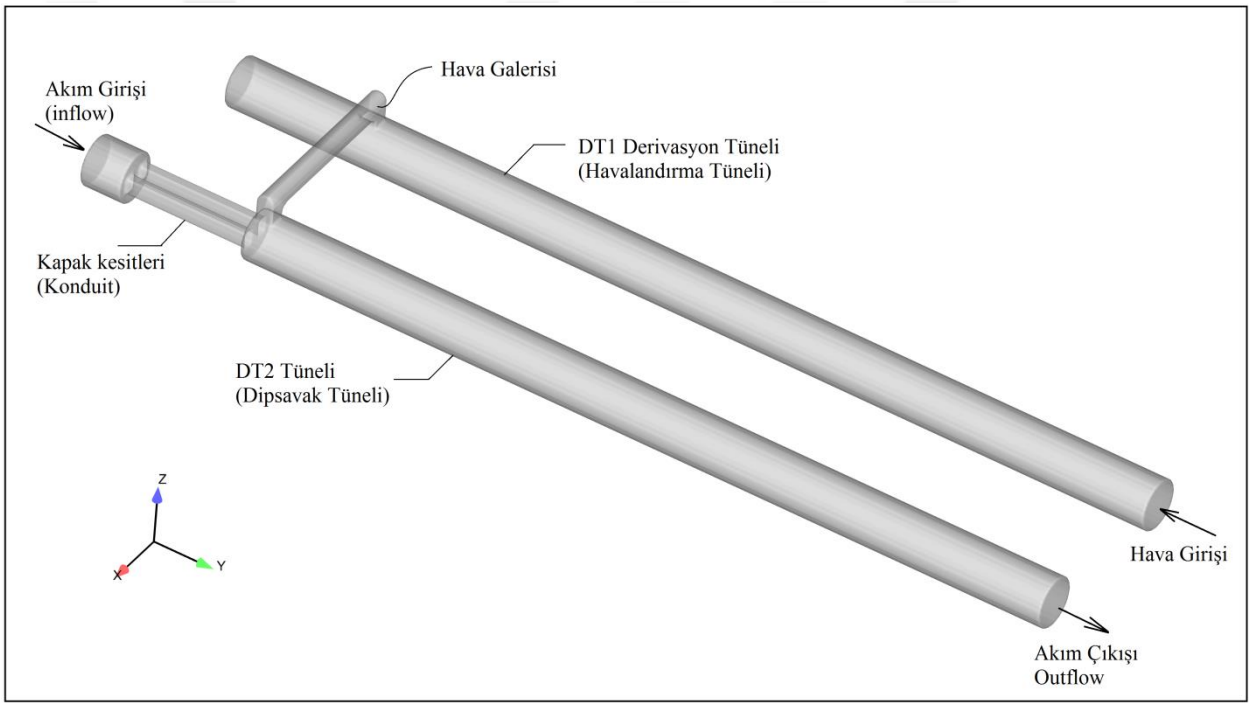
İncelenen modelin hidrodinamik analizleri zamana bağlı (permanant olmayan), sıkıştırılamayan, türbülanslı ve çift fazlı (hava-su) akım şartları için yürütülmüştür. HAD analizlerinde tek fazlı akım modelleri yalnızca bir akışkan için bünye denklemlerini çözerken çok fazlı akım modelleri her bir akışkan için hareket denklemlerini çözerler. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan iki fazlı akım modeli tek fazlı akım modellerine göre çok daha fazla bilgisayar eforu ve çözüm zamanı gerektirir.

Sayısal analizlerde türbülans modeli olarak RNG (Renolmalized Group Model) modeli kullanılmıştır (Yakhot ve Orszag 1986; Yakhot ve Smith 1992). Bu metot, türbülans kinetik enerji ve yayılım oranı gibi türbülans parametrelerini için istatiksel metotlar kullanır. RNG model standart k-ε modele benzemekle birlikte denklem sabitlerini deneysel olarak tespit eden standart k-ε modelden farklı olarak RNG model bu sabitleri açık olarak hesaplar. Genel olarak iki denklemli modellerden biri olan RNG model standart k-ε modele göre daha yaygın olarak kullanılır. Standart k-ε model, Reynolds gerilmeleriyle birlikte türbülans kinetik enerjisi (k) ve yayılma oranı (ε) için iki adet taşınım denklemini çözer. Bu model akımın tamamen türbülanslı olduğu ve viskoz etkilerin ihmal edildiği kabullerine dayanır.

Ilısu Barajının dipsavak ve havalandırıcı yapılarının üç boyutlu sayısal modelleri çeşitli çizim programlarıyla gerçek prototip ölçülerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan 3B sayısal model geometrileri Şekil 3.7'de verilmiştir. Dipsavak ve derivasyon yapılarının ölçüleri Şekil 3.3'de verilen orijinal projeden alınmıştır. Sayısal modellerde, çözüm zamanını kısaltmak için DT1 ve DT2 tünellerinin tüm uzunlukları değil sadece model sonuçlarına etki etmeyecek kadar yeterince bir uzunluğu dikkate alınmıştır. Bunun için asıl analizlerden önce farklı uzunluklarda birkaç deneme çözümü yapılmış ve sonuçlar arasında önemli farklar görülmeyen bir uzunluk tercih edilmiştir. Sayısal modelin sınır şartları Şekil 3.8'de verilmiştir. Buna göre, dipsavak olarak kullanılacak DT2 tünelinin girişi farklı rezervuar su yüklerine göre belirlenen akım girişi (debi girişi) olarak belirlenmiştir. DT1 ve DT2 tünelinin çıkışı akımın atmosfere serbest giriş ve çıkışına olanak veren akım giriş ve çıkışı olarak ayarlanmıştır. Model ve prototip için iki ayrı geometri oluşturmak yerine program içerisinde geometri ölçek faktörü kullanılarak hazırlanan geometri model ölçeğine (1/40) uygun laboratuvar model boyutlarında küçültülmüştür. Böylece model ve prototip ölçeklerinde sayısal analizler yapılmıştır.

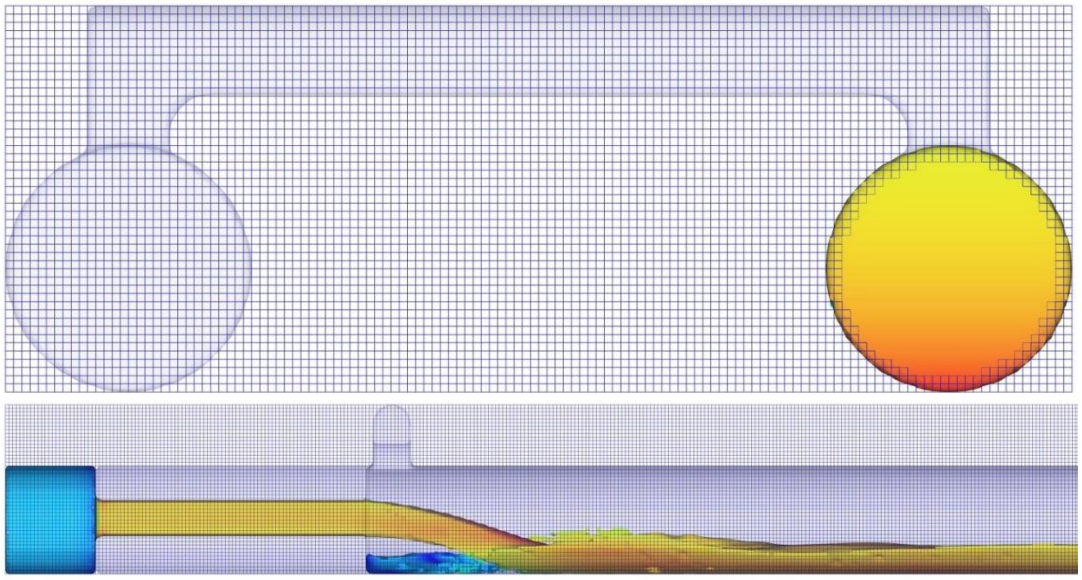


Şekil 3.7. Ilısu Baraj dipsavağı sayısal model geometrisi

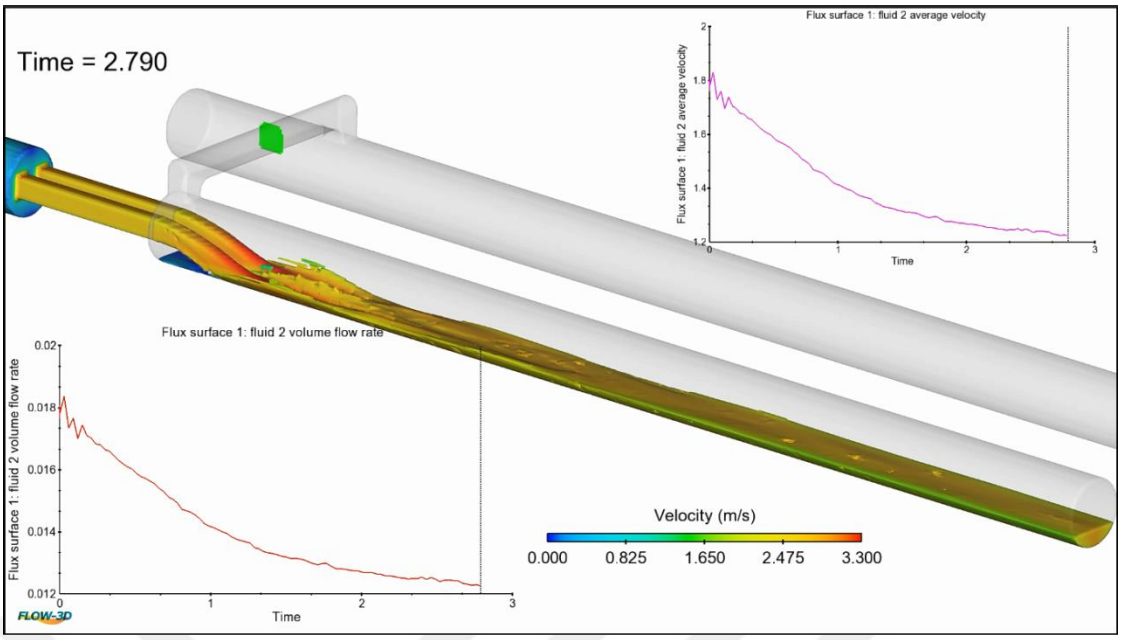


Şekil 3.8. Sayısal modelin sınır şartları

FLOW-3D'de tek tip yapısal meş (ağ) yapısı kullanılmaktadır. Meş yapısı geometriden bağımsız olarak yapılabilmektedir. Bu durumunun bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Geometri meşlenirken geometriden kaynaklanan herhangi bir zorluk yaşanmaz iken, geometrinin hassas meşleme yapılması gereken yerlere ise aynı meş yapısı atanması ise bir olumsuzluktur. Bu durum sayısal geometri hassasiyetini seçilen meş boyutuna göre ayarlamakta ve geometriye bağlı sayısal hataları arttırabilmektedir. Tüm çözüm alanının meş hassasiyetinin arttırılması durumunda ise hücre sayısı gereksiz yere artmakta ve çözüm zamanı da önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle modelin meş duyarlılığını görmek için kaba ve ince tabir edilen iki farklı meş boyutu ile çalışılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel datalarla karşılaştırılarak ve çözüm zamanları da değerlendirilerek uygun meş yapısına karar verilmeye çalışılmıştır. Sayısal modelin nihai meş yapısı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Sayısal modelin ağ yapısı (En ve boy kesit)



Şekil 3.10. Sayısal simülasyondan bir görünüş (Q_w=392 m^3/s)

4. BULGULAR

HAD analizleri, model ve prototip boyutları için ayrı ayrı olmak üzere Çizelge 4.1'de verilen rezervuar su yükleri ve dolayısıyla su giriş debileri için kapakların tam açık durumda yürütülmüştür. Model ve prototip değerleri arasındaki dönüşümler 1/40 Froude ölçeğine göre Çizelge 3.4'de verilen ölçeklere göre yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Ilısu Barajı dipsavak yapısı proje karakteristikleri (DSİ, 2013)

Rezervuar su seviyesi (m)	430	440	450	460	470	480	500
Debi (m^3/s) (Prototip)	392	464	526	581	632	679	764
Hız (m/s) (Prototip)	3.47	4.10	4.65	5.14	5.59	6.01	6.76
Hız (m/s) (Model)	0.55	0.65	0.74	0.81	0.88	0.95	1.07

Hava-su karışımları gibi çok fazlı akımların, türbülans, fazlar arası sürükleme, karışım, viskozite ve havanın sıkıştırılabilirlik gibi nedenlerle sayısal modellemesi oldukça karmaşık ve zordur. Sayısal modellemedeki kabuller, sayısal hatalar, modelin meş (ağ) yapısı, deneysel ölçümlerdeki ölçüm ve imalat hataları gibi nedenlerle sayısal model ve fiziksel (deneysel) model sonuçları arasındaki farklar büyük olabilmektedir. Burada öncelikle amaç mümkün olduğunca deneysel verilere yaklaşacak sonuçlar veren sayısal model yardımıyla sayısal analizin avantajları kullanılarak model ve prototip arasındaki ölçek etkilerinden kaynaklanabilecek farkları belirlenecektir. Bu amaçla önce 1/40 model ölçülerine göre HAD analizleri yapılmış ve hava giriş debileri ve boyutsuz hava giriş oranları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra aynı sayısal model parametreleriyle prototip ölçülerindeki sayısal analizler yapılmış ve ölçek etkilerini görebilmek için model ölçülerindeki sayısal verilerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra tasarımın detaylı hidrodinamik davranışları incelenerek tasarım hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Model analizleri 8.0 s, prototip analizleri için ise 80 s'lik simülasyon yapılmıştır. Her bir analizin süresi model ve meş yapısına göre birkaç saatten birkaç güne kadar değişebilmektedir.

4.1. Ölçek Etkisi

Bölüm 2'de de belirtildiği gibi birçok araştırmacı, havalandırıcı model deneylerinde hava girişlerinin doğru tahmin edilebilmesi ve ölçek etkilerinden kaçınılabilmesi için 1/10'dan daha büyük model ölçeklerinin kullanılmasını önermektedir (Kells ve Simith, 1991). Ayrıca birçok araştırmacı ölçek etkilerinin ihmal edilebilmesi için Reynolds (Re) sayısının 10^5'ten büyük olması gerektiğini belirtmiştir. Pinto (1988), Foz do Areia Barajı dolusavağının 1:8 ölçeğindeki deneylerinde $Re>3.3\times10^5$ için ölçek etkilerinin oluşmayacağını belirtmiştir. Pinto ve Neidert (1982) hava ölçümü deneylerinde, ölçekleri 1:8'den 1:50 ye değişen model ölçekleri kullanmış ve 1:15'ten daha büyük ölçekli modellerin tüm debilerde prototipe uygun değerler verirken; 1:30 – 1:50 ölçekli modeller, yalnızca büyük debiler için prototipe yakın değerler verdiğini belirtmişlerdir. Dolusavak havalandırıcılarıyla ilgili yapılan diğer bazı çalışmalarda ölçek etkilerinden kaçınmak için model ölçeğini Chanson (1989) 1:15 Tan (1984) ise 1:8 gibi büyük ölçekler seçmiştir. Terbela tünelinin 1:12 gibi büyük ölçekli bir model deneylerinde bile hava girişi bakımından % 33-67 gibi önemli ölçek etkileri belirlenmiştir (Pinto 1984).

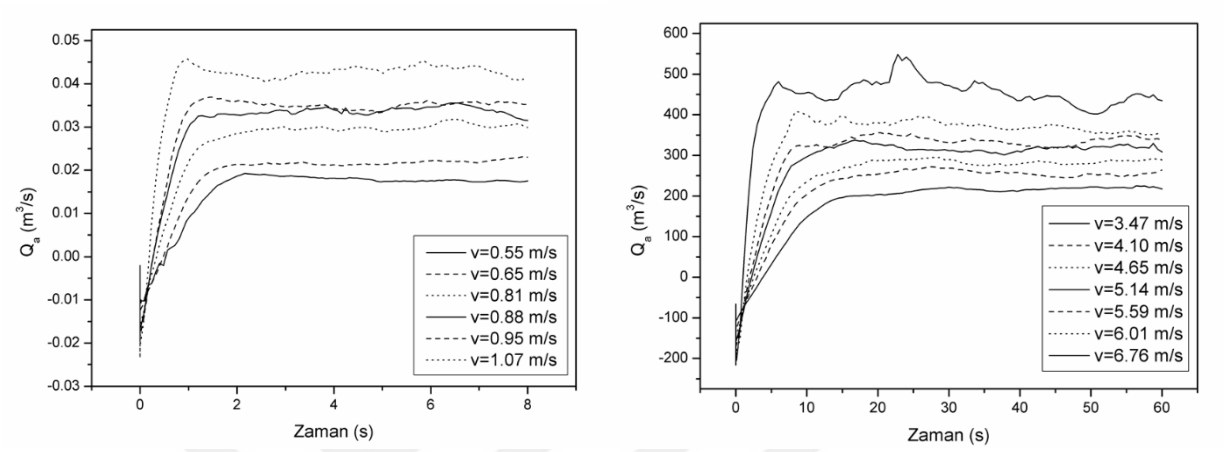
Aydın vd. (2017), yaptığı çalışmada 1:40 ölçekli sayısal ve deneysel model sonuçları arasında düşük debi değerleri için hava giriş oranları bakımından sadece % 2 gibi bir fark elde etmiştir. Aydın ve Ulu (2017), Flow-3D tek fazlı akış modelinin kullanıldığı kapak altı akımlar üzerinde yaptığı model ve prototip HAD analizlerinde önemli bir ölçek etkisi belirlemezken, Aydın vd. (2017) tarafından çift fazlı akım modelleriyle yapılan HAD analizlerinde model ve prototip hava giriş oranları arasında yaklaşık %10 gibi bir ölçek etkisi belirlenmiştir. Bu konudaki analiz ve tartışmalar aşağıda daha detaylı olarak verilmiştir.

Ölçek etkileri konusundaki bu açıklamalar doğrultusunda DSİ tarafından yapılan Ilısu Barajı dipsavak havalandırıcının 1/40 ölçekli Froude modelinde önemli ölçek etkileri bekleneceği söylenebilir. Bu çalışmanın amaçlarından biri de gerçek prortotip sonuçları elde olmadığından HAD analizleri yardımıyla bu etkilerinde belirlemektir.

4.2. Hava Girişi

Sayısal simülasyonlar model ve prototip ölçeklerinde sırasıyla 8 s ve 80 s'lik süreler için yapılmıştır. Model ve prototip çözümlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Hava galerisinden sağlanan hava debileri model için yaklaşık 1-2 s sonra kararlı hale gelirken, prototip için ise yaklaşık 7-14s sonra yakınsama sağlanmıştır. Çizelge 3.4'de verildiği gibi Froude modeli zaman ölçeği 6.32 olduğu dikkate alındığında 2s'lik model zamanı prototip için yaklaşık 13s'ye karşılık gelmektedir ki bu da yaklaşık olarak sayısal analizlerin bu oranı

sağladığını göstermektedir. Özellikle prototip sonuçları için yüksek debilerde sonuçların dalgalandığı ve kararlı hale gelmediği görülmektedir. Bunun sebebi muhtemelen yüksek hızlardaki yoğun türbülans ve sayısal hatalar olabilir. Grafiklerde belirtilen hızlar su giriş hızları olup temsil ettikleri debi ve rezervuar su yükleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.1. Zamana bağlı çözüm yakınsamaları: (a) Model, (b) Prototip

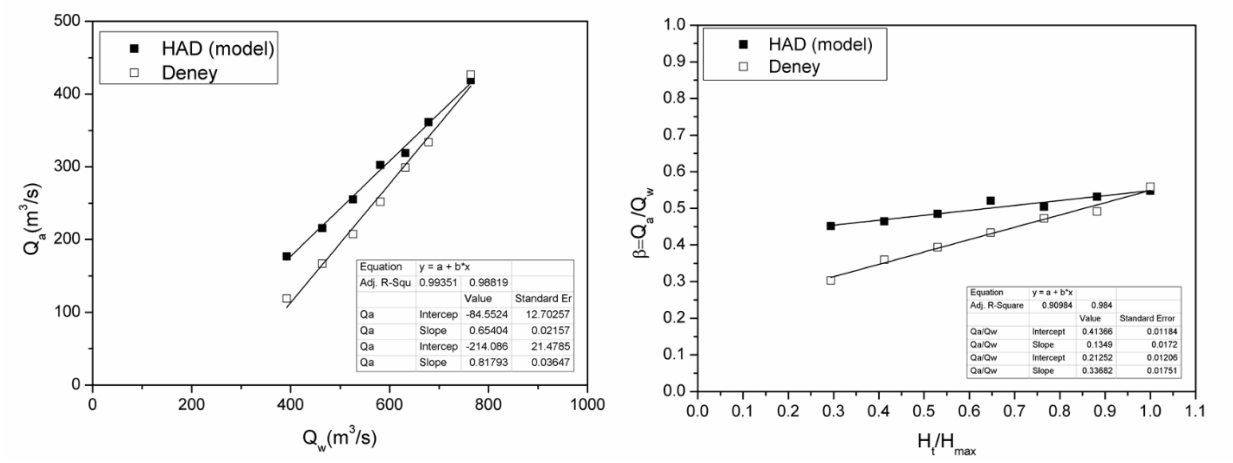
Çizelge 4.1'de verilen rezervuar su seviyesine karşılık gelen su debisi değerleri için DT1 tünelinden DT2 tüneline hava galerisi sayesinde giren hava debisi miktarları HAD analizleri sonucu elde edilmiştir. 1/40 ölçekli model için elde edilen HAD ve deneysel verilerin su giriş debilerine göre değişimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.2 (b)'de ise hava giriş oranlarının boyutsuz rezervuar yüküne göre değişimleri verilmiştir. Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2'de görüleceği üzere küçük debi değerleri için farklar belirgin iken (% 49) yüksek debi değerlerinde ise % 2 hata ile oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Ortalama bağıl hata % 20 civarındadır. Küçük debilerdeki farklar ağırlıklı olarak sayısal modelin meş yapısından ve deney aletlerindeki ölçüm hatalarından kaynaklanabilir. Bu farkların bir diğer nedeni de kullanılan türbülans modelde akımın tamamen türbülanslı kabul edildiğinden düşük debi ve dolayısıyla düşük hızlardaki kendini daha fazla gösterebilecek viskoz etkilerin ihmal edilmesi olabilir. Daha küçük meş yapısı kullanıldığında küçük debiler için deneylerle daha uyumlu (%2-3 gibi) sonuçlar elde edilebilmiş fakat bu kez de yüksek debilerde önemli farklar görüldüğünden çözüm zamanı da dikkate alınarak daha uyumlu sonuçlar veren bu sonuçlar kullanılmıştır. Bu gibi yüksek türbülanslı hava-su karışımı içeren havalandırma problemleri için olayın karmaşık yapısından dolayı bu farklar kabul edilebilir seviyededir.

Uygun bir model-prototip karşılaştırması yapabilmek için deney sonuçlarına en yakın konfigürasyonu sağlayan sayısal modeller kullanılmıştır. Böylece muhtemel sayısal hatalar model ve prototip için de aynı oranda olduğu kabul edilecektir.

Çizelge 4.2. 1/40 ölçekli modelin HAD ve deney sonuçları

				HAD					DENEY		Bağıl
H_t/H_{max}	V_w	D	A	$(Q_w)_m$	$(Q_a)_m$	Q_w	Q_a	$\beta=Q_a/Q_w$	Q_a	$\beta=Q_a/Q_w$	Hata
--	(m/s)	(m)	(m^2)	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)	(--)	(m^3/s)	(--)	
0.29	0.55	0.3	0.0707	0.0389	0.0175	392.00	177.09	0.452	118.76	0.303	0.491
0.41	0.65	0.3	0.0707	0.0459	0.0213	464.00	215.54	0.465	167.05	0.360	0.290
0.53	0.74	0.3	0.0707	0.0523	0.0252	526.00	255.01	0.485	207.09	0.394	0.231
0.65	0.81	0.3	0.0707	0.0573	0.0299	581.00	302.57	0.521	251.91	0.434	0.201
0.76	0.88	0.3	0.0707	0.0622	0.0315	632.00	318.76	0.504	298.68	0.473	0.067
0.88	0.95	0.3	0.0707	0.0672	0.0357	679.00	361.26	0.532	333.79	0.492	0.082
1.00	1.07	0.3	0.0707	0.0756	0.0414	764.00	418.94	0.548	426.92	0.559	0.019

Çizelge, H_t=rezervuar su yükü, H_{max} maksimum rezervuar su yükü, D=Dipsavak tünelinin çapı, A=dipsavak tünelinin kesit alanı, V=hız, Q=debi, β=hava giriş oranıdır. Alt indisler w, a ve m sırasıyla su, hava ve modeli temsil etmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.2. Model ölçeği için sayısal model deney sonuçlarının karşılaştırılması: a) Hava debisi, b) Hava giriş oranları

Model analizlerinden sonra Ilısu Barajı dipsavağının projesine uygun gerçek prototip ölçüleri kullanılarak üç boyutlu sayısal analizler yürütülmüştür. Boyutlar dışında tüm sayısal parametreler modelinkiyle aynı alınmıştır. Meş yapısı model ölçeği oranında (1/40) büyütülmüştür. Böylelikle aynı şartlarda model ve prototip karşılaştırmasına imkan sağlanmıştır. Çizelge 4.3'de hava giriş debisi ve katsayısıyla ilgili elde edilen prototip HAD sonuçları ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılması sunulmuştur. Şekil 4.3'de ise bu sonuçların grafiksel

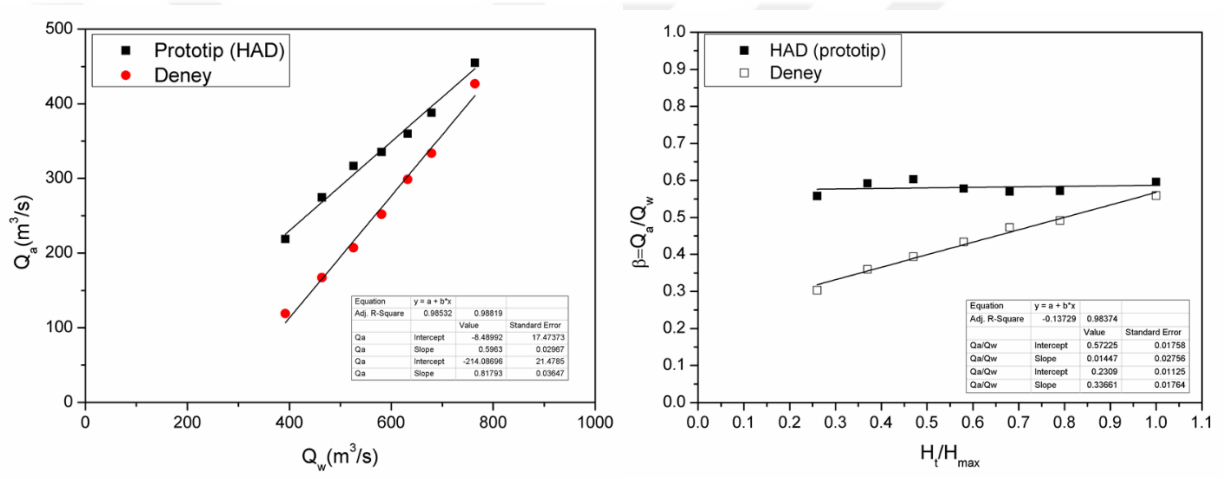
karşılaştırılması yapılmıştır. Beklendiği gibi ölçek etkilerinde kaynaklandığı düşünülen, prototip sonuçlarıyla deney sonuçları arasında model sonuçlarına oranla daha büyük farklar gözlenmiştir. Küçük debi için bağıl hata %84 iken, büyük debi için bu fark %6.5'a kadar düşmektedir. Bu farklar modeldeki hata yüzdelerinin 2-3 katı kadardır. Sayısal analizlerde ölçek dışında model ve prototipte başka bir değişiklik yapılmadığından bu farkın tek açıklaması Froude modelinin ölçek etkisidir. Benzer olarak Pinto ve Neidert (1982), ölçek etkileri nedeniyle 1/30 – 1/50 ölçekli modellerde yalnızca büyük debiler için uyumlu değerler verdiğini belirtmişlerdir. Bu durum bu çalışmadaki 1/40 ölçekli modelden elde edilen sonuçların farklarının nedeni de açıklamaktadır. Bunun sebebi Froude modelinde ihmal edilen viskoz etkilerinin düşük debilerde dolayısıyla düşük akım hızlarında büyük akım hızlarına göre daha fazla olmasıdır. 1/40 ölçekli sayısal verilerdeki farkların da daha az olmakla birlikte benzer olarak küçük debilerde fazla çıkmasının nedeni ise yine türbülans modeldeki kabuller olabilir. Model ve prototip arasındaki ölçek etkilerini eşit şartlarda daha iyi gösterebilmek için aynı konfigürasyonlu HAD analizlerinden elde edilen 1/40 ölçekli model ve prototip sonuçları karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.4'te verilmiştir. Deneysel ve HAD sonuçlara bağlı olarak elde edilen ölçek etkisi oranı ortalama %40 olarak belirlenmiş; fakat daha uygun bir kıyaslama olacağından, Şekil 4.4'deki karşılaştırmaya göre sırasıyla büyük ve küçük debi değerleri için ölçek etkileri %8.6 ila %23.5 olarak değişmekte, ortalama ise %16 olarak tespit edilmiştir.

Model ve prototipin Reynolds sayıları hesaplandığında model için $Re=1.6x10^5 \sim 3.2x10^5$ arasında, prototipte ise $Re=42x10^6 \sim 81x10^6$ aralığında değişmektedir. Genel olarak ölçek etkilerinin ihmal edilebilmesi için Reynolds (Re) sayısının 10^5'ten büyük olması gerektiğini belirtilmektedir. Pinto (1988) ise 1/8 ölçeğindeki dolusavak havalandırıcı deneylerinde $Re>3.3\times10^5$ için ölçek etkilerinin oluşmayacağını belirtmiştir. Bu çalışmadaki 1/40 ölçekli modelin Re sayıları Pinto (1988) tarafından verilen sınır Re değerinin altında, 10^5'in ise üzerinde kaldığı görülmektedir. Prototip için hesaplanan Re sayılarının ise modele oranla oldukça büyük olduğu görülmektedir. Elde edilen Re sayıları seçilen 1/40 ölçeğiyle birlikte değerlendirildiğinde; bu ölçek verilen limit ölçek değerlerinin oldukça altında kaldığından model deneylerinde ölçek etkilerinin bekleneceği aşikârdır. Bu da elde edilen ölçek etkileri değerlerini doğrulmaktadır.

Çizelge 4.3. Prototip ölçekli HAD ve deney sonuçları

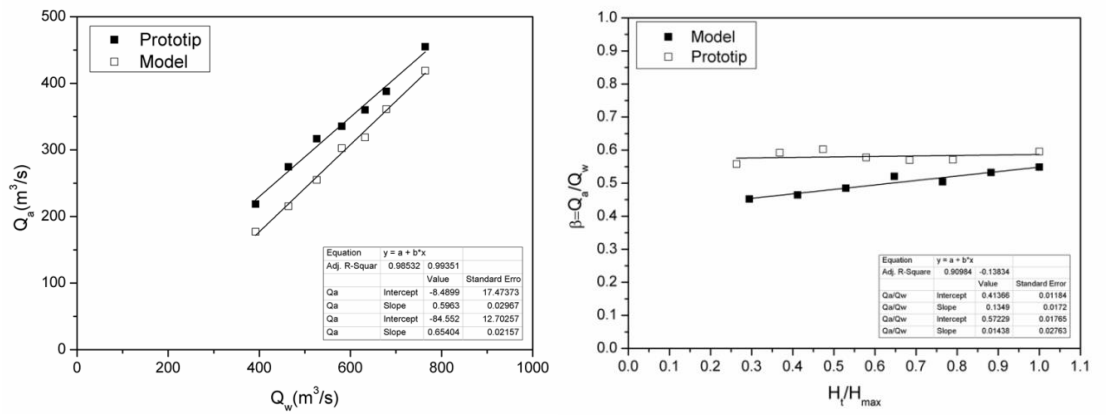
					HAD			DENEY		Bağıl
H_t/H_{max}	Q_w	D	A	V_w	Q_a	V_a	$\beta=Q_a/Q_w$	Q_a	$\beta=Q_a/Q_w$	Hata
-	(m^3/s)	(m)	(m^2)	(m/s)	(m^3/s)	(m/s)	(--)	(m^3/s)	(--)	
0.26	392.00	12.00	113.04	3.47	218.70	9.72	0.558	118.76	0.303	0.842
0.37	464.00	12.00	113.04	4.10	274.59	16.57	0.592	167.05	0.360	0.644
0.47	526.00	12.00	113.04	4.65	316.88	18.14	0.602	207.09	0.394	0.530
0.58	581.00	12.00	113.04	5.14	335.59	19.35	0.578	251.91	0.434	0.332
0.68	632.00	12.00	113.04	5.59	360.00	21.05	0.570	298.68	0.473	0.205
0.79	679.00	12.00	113.04	6.01	387.79	21.97	0.571	333.79	0.492	0.162
1.00	764.00	12.00	113.04	6.76	454.86	27.27	0.595	426.92	0.559	0.065

Çizelgedeki, H_t=rezervuar su yükü, H_{max} maksimum rezervuar su yükü, D=Dipsavak tünelinin çapı, A=dipsavak tünelinin kesit alanı, V=hız, Q=debi, β=hava giriş oranıdır. Alt indisler w ve a sırasıyla su, havayı temsil etmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.3. Model ölçeği için sayısal model deney sonuçlarının karşılaştırılması: a) Hava debisi, b) Hava giriş oranları



(a) (b)

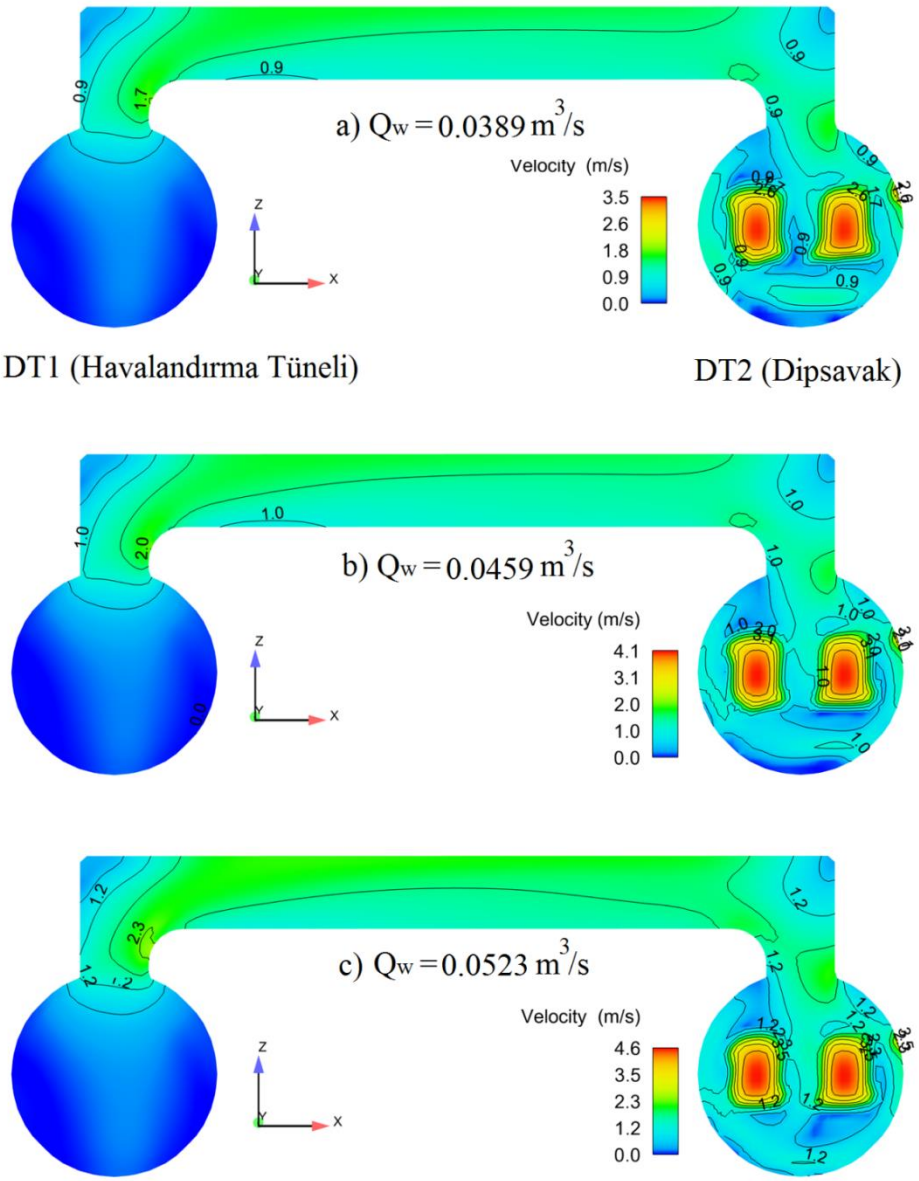
Şekil 4.4. HAD analizlerinden elde edilen Model-prototip oranlarının karşılaştırılması a) Hava debisi, b) Hava giriş oranları

4.3. Hidrodinamik Analizler

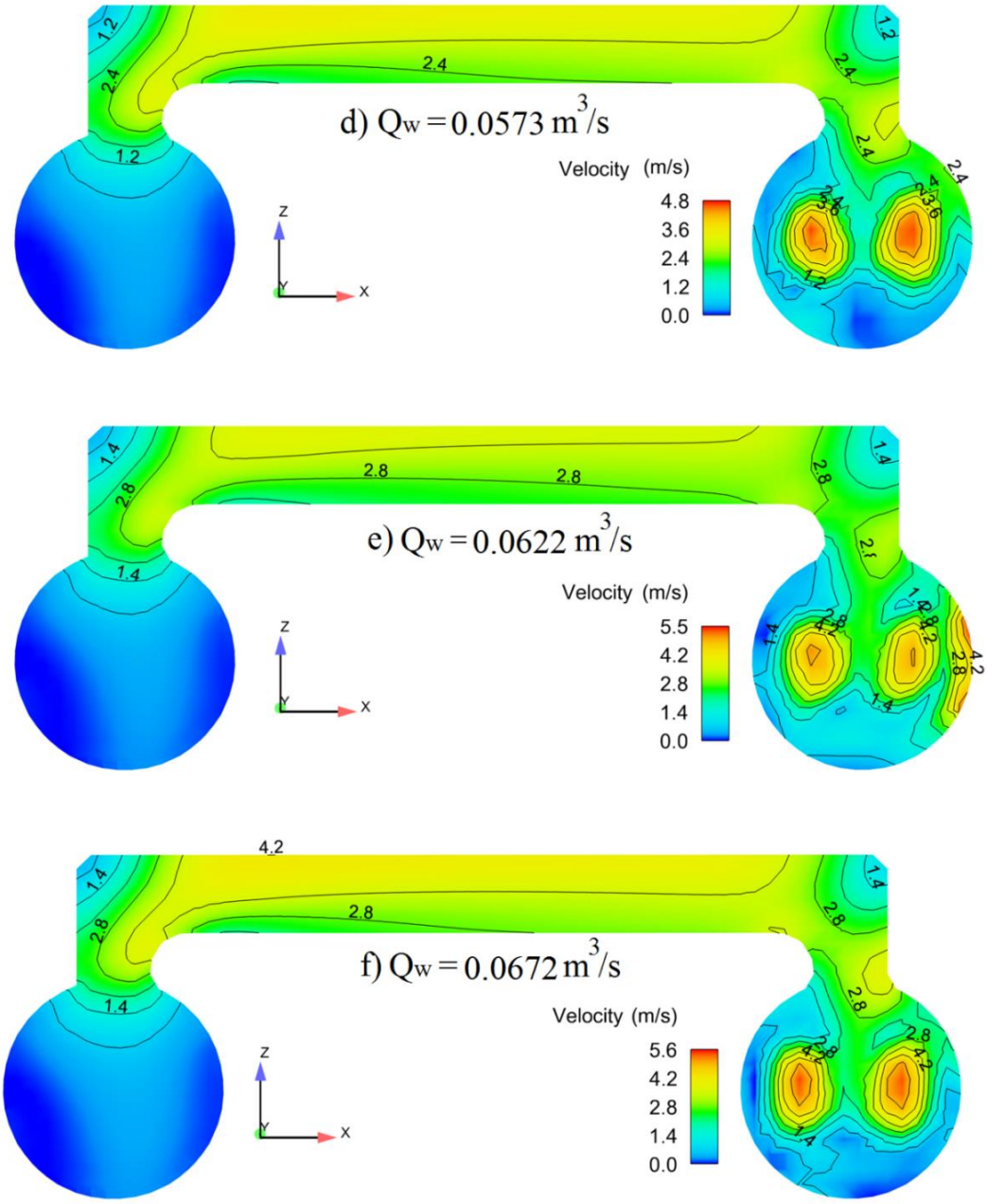
Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler sadece ölçüm aletlerinin ve ölçme yapan kişilerin yeteneklerine bağlıdır. Eldeki imkânlar doğrultusunda sadece ölçüm yapılmak istenen noktalardan veri alınabilmektedir. Deneysel modelin tamamında ölçüm yapılması çok zor hatta imkânsız olduğundan akışın hidrodinamiği üzerinde detaylı davranışını incelemek de mümkün olamamaktadır. HAD analizlerinde ise böyle bir durum söz konusu değildir. Bu bölümde HAD analizlerinin bu avantajı kullanılarak modelin hava giriş mekanizmasını daha iyi anlayabilmek için sayısal analizlerinden elde edilen bazı çıktılar elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

4.3.1. Havalandırıcı Boykesit Hız Dağılımları

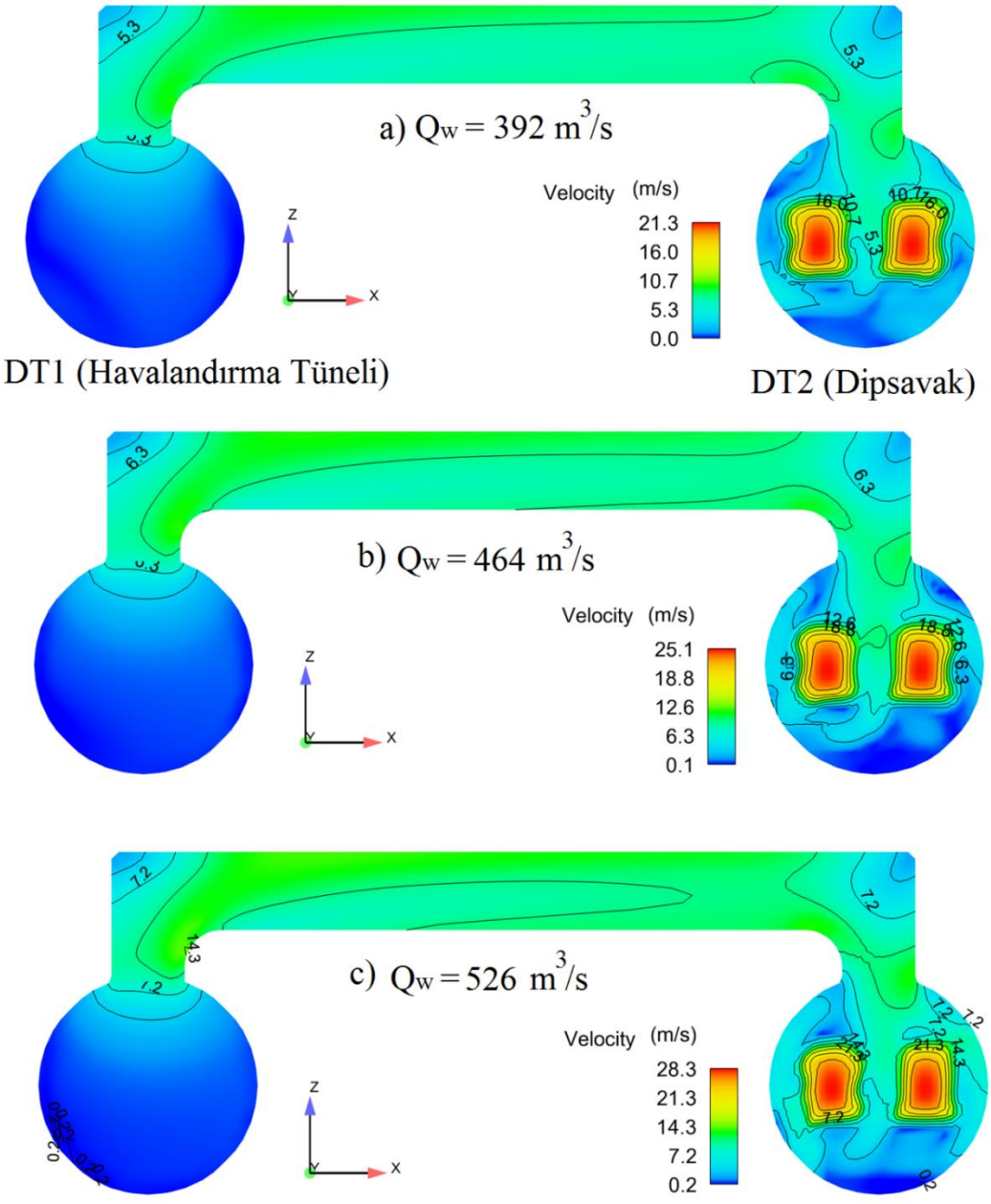
Farklı su debiler için model ve prototip ölçeklerindeki havalandırıcı galerisi boyunca hız kontörleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Karşılıklı debi değerleri için model ve prototip hız dağılımlarının yaklaşık olarak Froude ölçeğine (6.32) uygun olduğunu görebiliriz. DT2 tünelinde oluşan iki gözlü maksimum hız bölgeleri su akımını temsil etmektedir. Hava galerisindeki maksimum hızlar DT1 tünelinin hava çıkışının sağ köşesinde ve DT2 dipsavak tünelinin hava girişinin yine sağ köşesinde meydana gelmektedir. Hava galerisi içerisinde ise, girişte yuvarlatılmış sağ köşeye çarpan hava galerinin üst bölgelerine yönelmekte ve alt kesimlerde düşük hız bölgeleri oluşmaktadır. Galerinin sağ ve sol üst köselerinde ise hava hızı neredeyse durma seviyesine gelerek ölü bölgeler (durma noktaları) oluşmaktadır. Hava galerisindeki bu hız dağılımları galeri boyunca kesitlerin tam verimle çalışmadığını göstermektedir. Hava hareketinin davranışını daha iyi anlayabilmek için enkesit boyunca da hız dağılımlarını görmek gerekir.



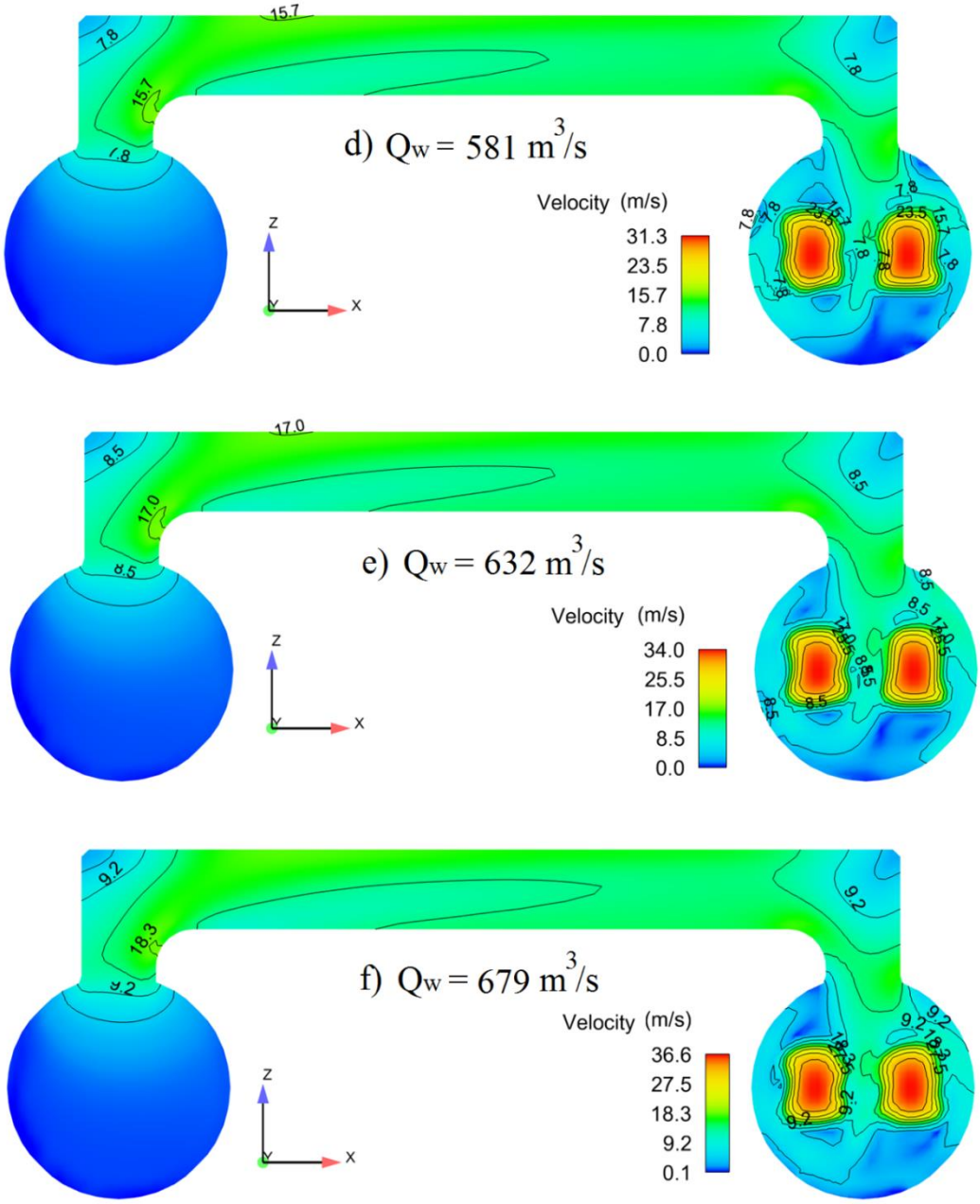
Şekil 4.5. Havalandırma galerisi kesitindeki model hız kontörleri



Şekil 4.5. (devamı)



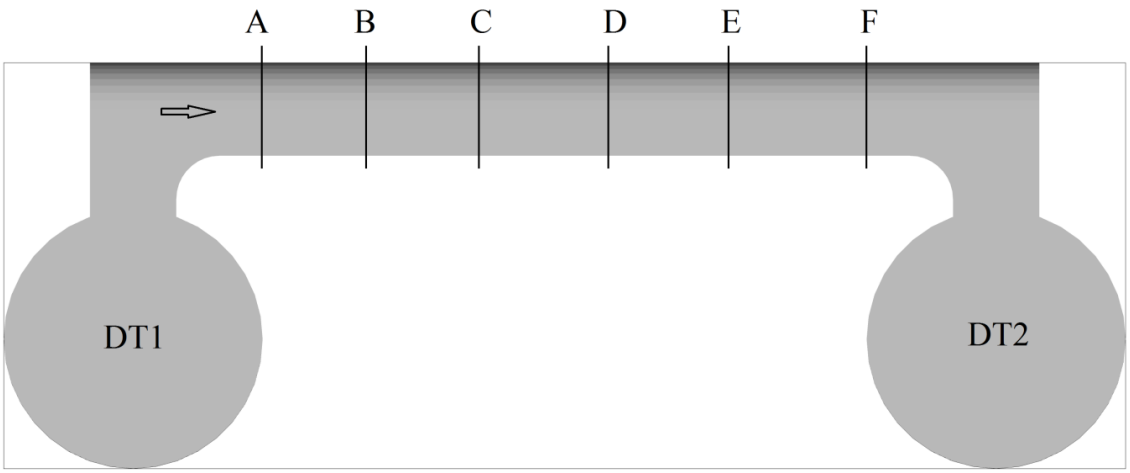
Şekil 4.6. Havalandırma galerisi kesitindeki prototip hız kontörleri



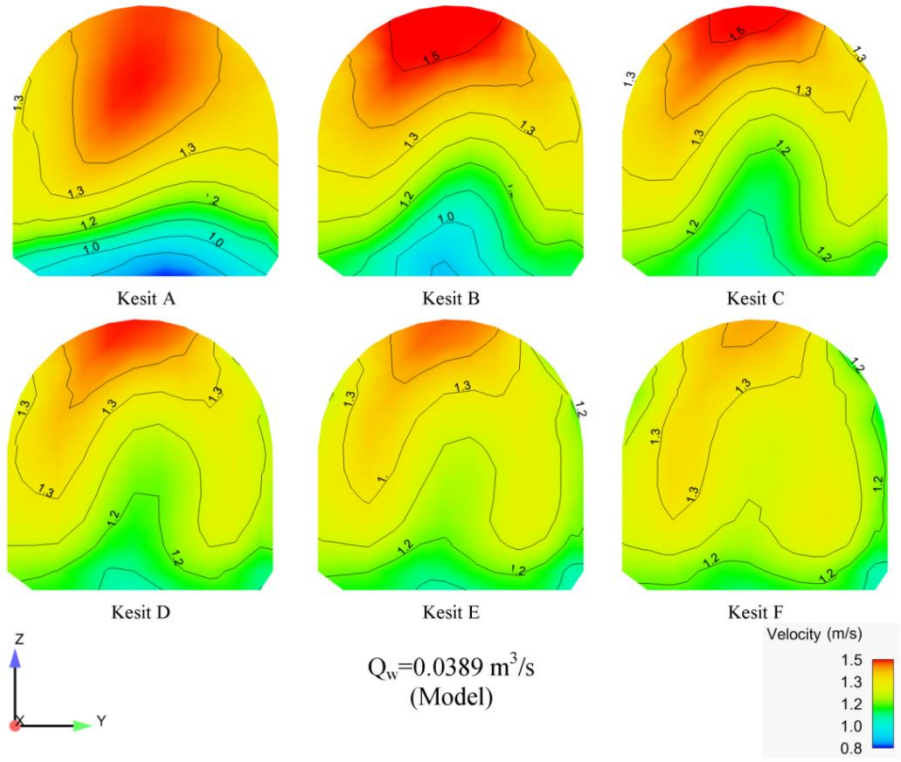
4.6. Şekil (devamı)

4.3.2. Havalandırıcı Enkesit Hız Dağılımları

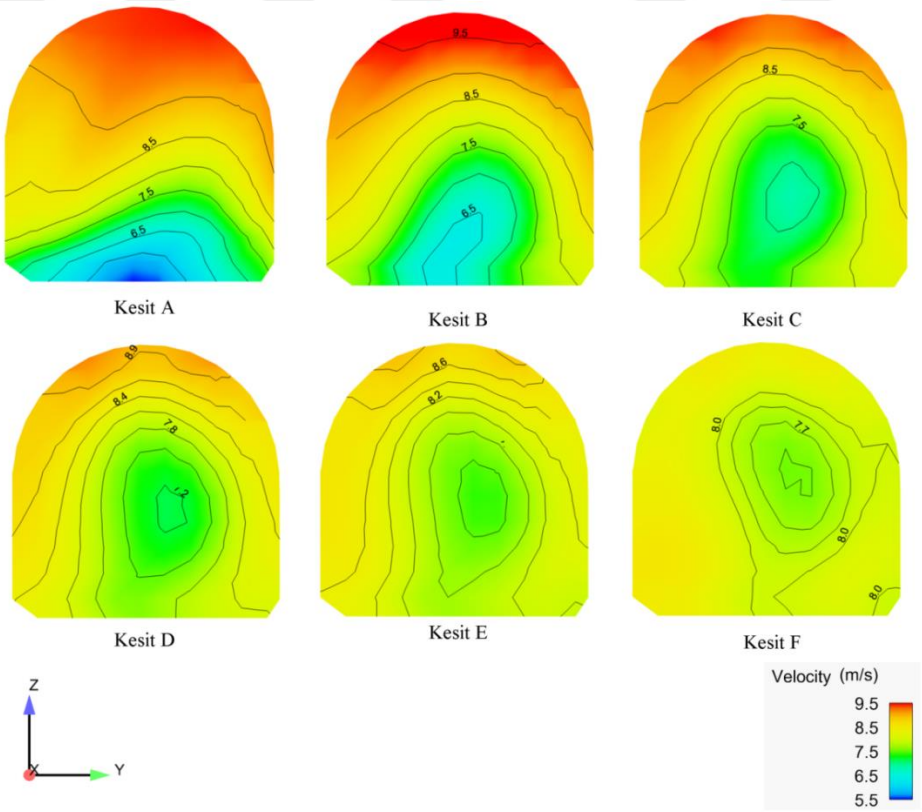
Havalandırma galerisindeki akımın enkesit üzerindeki değişimlerini görebilmek için Şekil 4.7'de belirtilen kesitlerden hız kontörleri elde edilmiştir. Hız değişimlerini gösteren bu enkesitler model için Şekil 4.8'de prototip için ise Şekil 4.9, 4.10, 4.11'de verilmiştir. Model için sadece minimum model debisi için verilirken, Prototip için ise minimum, orta ve maksimum olmak üzere üç farlı debi için verilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki eşdeş model ve prototip hız değerlerine bakıldığında model ve prototip arasındaki Froude hız ölçeğini yaklaşık olarak sağladığı görülmektedir. Bu iki şekildeki eşdeş şekiller karşılaştırdığında benzer hız dağılımları görülmekle birlikte alttan gelişerek kesitin orta bölgesine ilerleyen düşük hız bölgesinin modelinkinden farklı olarak prototipte galerinin yaklaşık orta bölgesinden (C kesiti) kenardan koparak kapalı hız bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Bu durumun enkesit boyuncaki sekonder akımından meydana geldiği söylenebilir. Prototip kesitlerinin tamamı incelendiğinde DT1 yakınındaki A kesitinde galerinin alt kesiminde C, D, E ve F kesitlerinde ise yaklaşık galeri ortalarında düşük hız bölgeleri ve durma noktaları (stagnation point) oluştuğu görülmektedir. Meydana gelen bu sekonder akım ve düşük hız bölgeleri kesitlerin havalandırma verimini olumsuz yönde etkilemektedir.



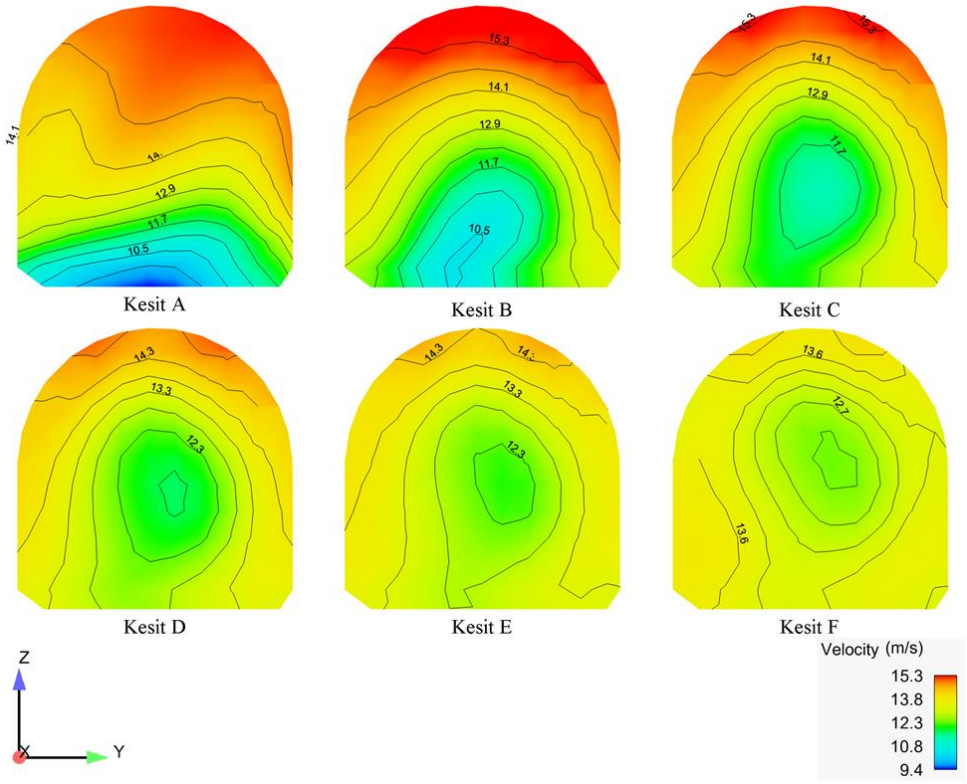
Şekil 4.7. Havalandırma galerisi kesit yerleri



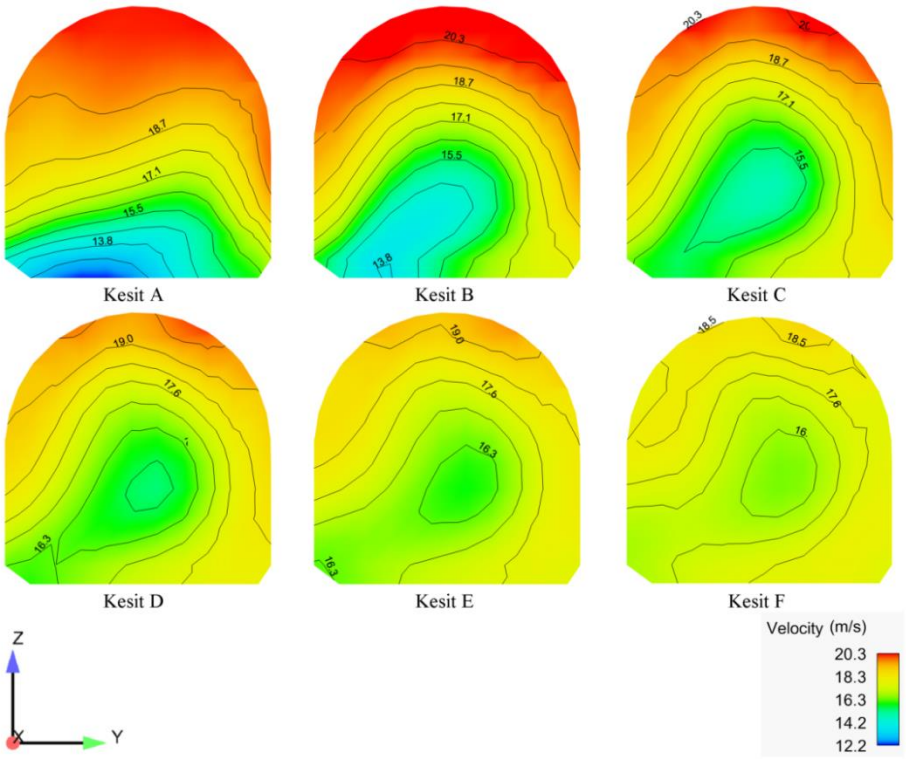
Şekil 4.8. Model hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=0.0389 m^3/s)



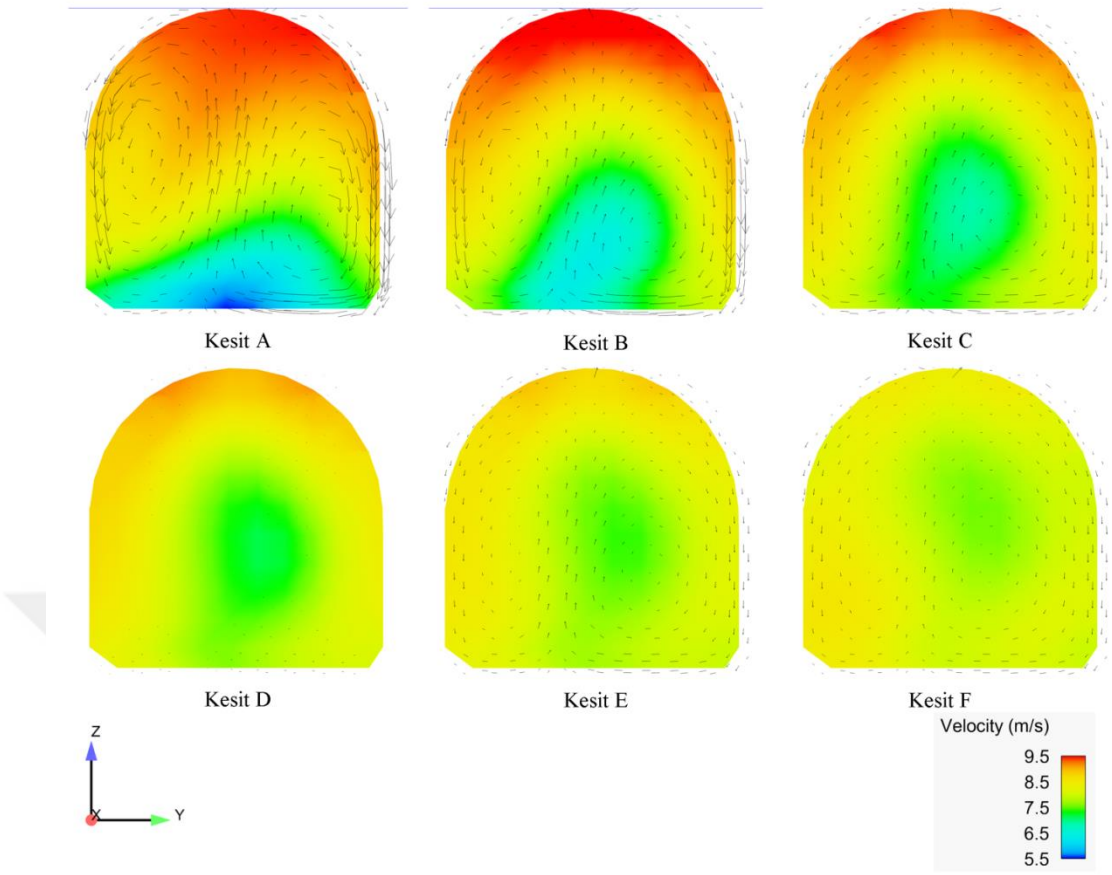
Şekil 4.9. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=392 m^3/s)



Şekil 4.10. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=581 m^3/s)



Şekil 4.11. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=764 m^3/s)



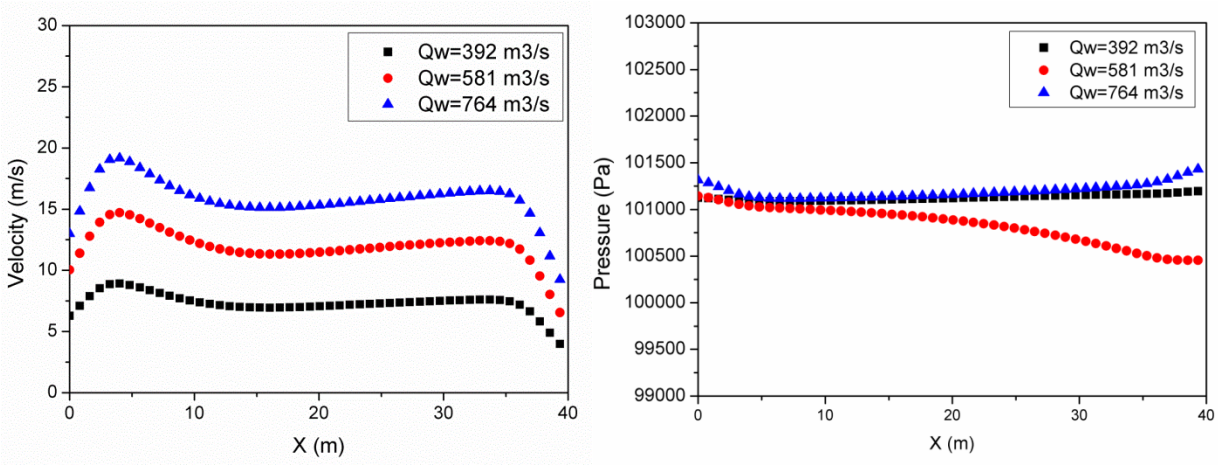
Şekil 4.12. Q_w=392 m^3/s için havalandırıcı galerisinde Y-Z düzlemindeki hız vektörleri

Q_w=392 m^3/s giriş su debisi için prototipteki havalandırıcı galerisi kesitlerindeki hız vektörleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu kesitlerde görüleceği gibi özellikle A ve B kesitlerinde DT1 tünelinden alttan giren havanın yukarıya doğru etkisiyle iki gözlü sekonder akımın oluşumu net bir şekilde görülmektedir. İki gözün dairesel akımı kesitin alt orta kesiminde karşılaşmakta ve burada bir durma noktası meydana gelerek etrafındaki hızı azaltmaktadır. Daha sonra yukarıya doğru yönelen akım kesitin üst kesimlerinde X yönünde yüksek akım hızları oluşturmaktadır. Çift gözlü vorteks şeklinde oluşan bu sekonder akım ileriki kesitlerde etkisini kaybetmekte ve galerinin ortasının hemen mansabındaki D kesitinde sekonder akım etkisi nerdeyse yok olmaktadır. Aynı yönlü sekonder akım E ve F kesitlerinde azda olsa tekrar oluşmakta ve daha sonra DT2 tüneline geçiş gerçekleşmektedir.

Burada belirtmek gerekir ki sayısal analizlerde katı cidarlardaki akım hız değerleri sıfır olarak kabul edilmesine rağmen kesitlerde hızların katı sınırlara kadar devam ettiği görünmektedir. Bunun sebebi seçilen meş yapısıyla ilgilidir. Kullanılan meş boyutları katı sınıra yakın sınır tabakanın gelişimini hissedemeyecek büyüklükte olduğundan bu değişim sayısal

analizlerde gözlemlenememiştir. Ayrıca sayısal analizlerde değerler hücre merkezleri baz alınarak hesaplanmakta ve hücre merkezleri ise seçilen meş yapısına bağlı olarak cidardan biraz uzakta yer aldığından katı cidarlarındaki sıfır hızlar okunamamıştır. Sınır tabakanın gelişimini hesaba katmak için sınırlara yakın çok daha hassas meş yapısına ihtiyaç vardır ki üniform meş yapısı kullanan Flow-3D ile bu mümkün olamamıştır. Çözüm alanının tamamını ise daha hassas meşleme yapmak ise çözüm zamanını aşırı derecede arttıracağından mümkün olmamıştır. Dolayısıyla her ne kadar çıktılara yansımasa da katı cidarlardaki hızlar sıfır olarak alınmış, sayısal hataların fazla olmayacağı düşüncesiyle sınır tabakası gelişimi etkisi ise ihmal edilmiştir.

Son olarak havalandırma galerisi içeresindeki hız ve basınçların eksen boyunca değişimini incelemek için farklı prototip debileri için Şekil 4.13'deki grafikler çizdirilmiştir. Orta eksen boyunca hızların giriş ve çıkışa yakın bölgeler dışında değişmediği, sadece galeriye girişte hızların arttığı, çıkışta ise azaldığı görülmektedir. Su debisinin artışıyla birlikte hız değişimleri debilerle orantılı şekillerde daha üst seviyelerde aynı trendi izlemektedir. Basınç dağılımlarına bakıldığında ise atmosferik basınca yakın ve çok fazla değişmeyen bir dağılım görülmektedir. Sadece Q=581 m^3/s ve bu debilere yakın değerler için galeri çıkışına doğru basıncın bir miktar azalma eğilimi olduğu görülmektedir. Orta debilerde böyle bir durumun meydana gelmesi sadece basınç merkezinin kesit boyunca eksen kaydığı şeklinde yorumlanabilir.



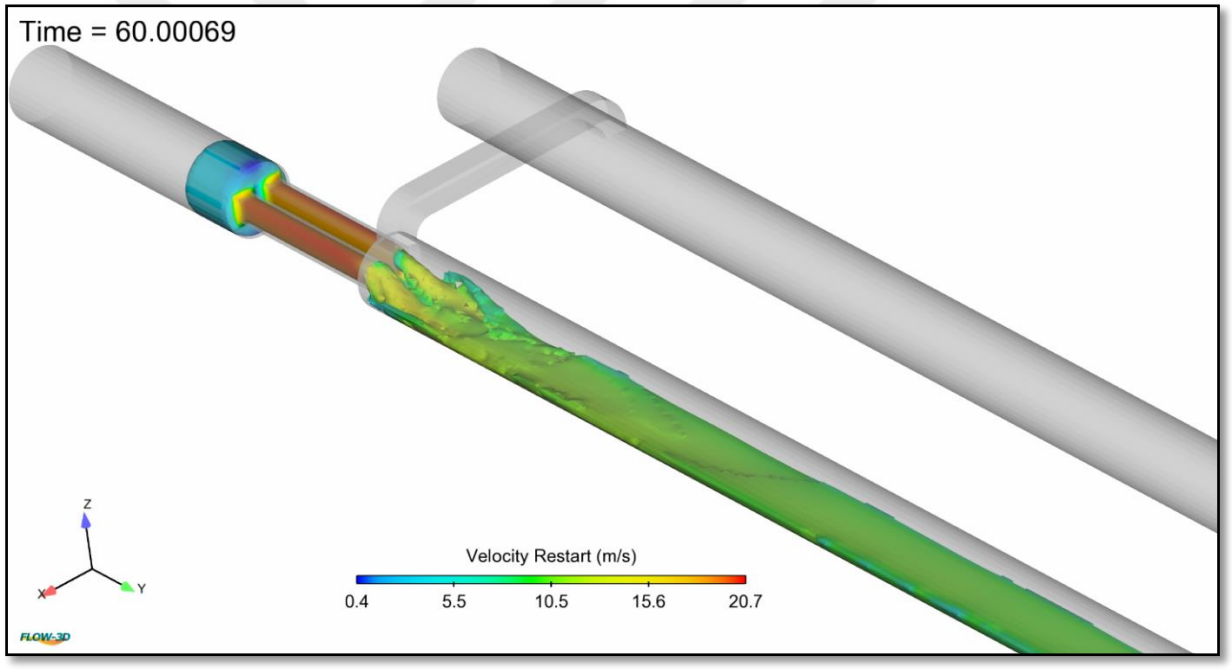
(a) (b)

Şekil 4.13. Havalandırma galerisi orta ekseni boyunca a) hız değişimleri, b) basınç değişimleri

4.4. Alternatif Havalandırıcı Galerisi Tasarımı

4.4.1. İkinci Alternatif (HAD-2)

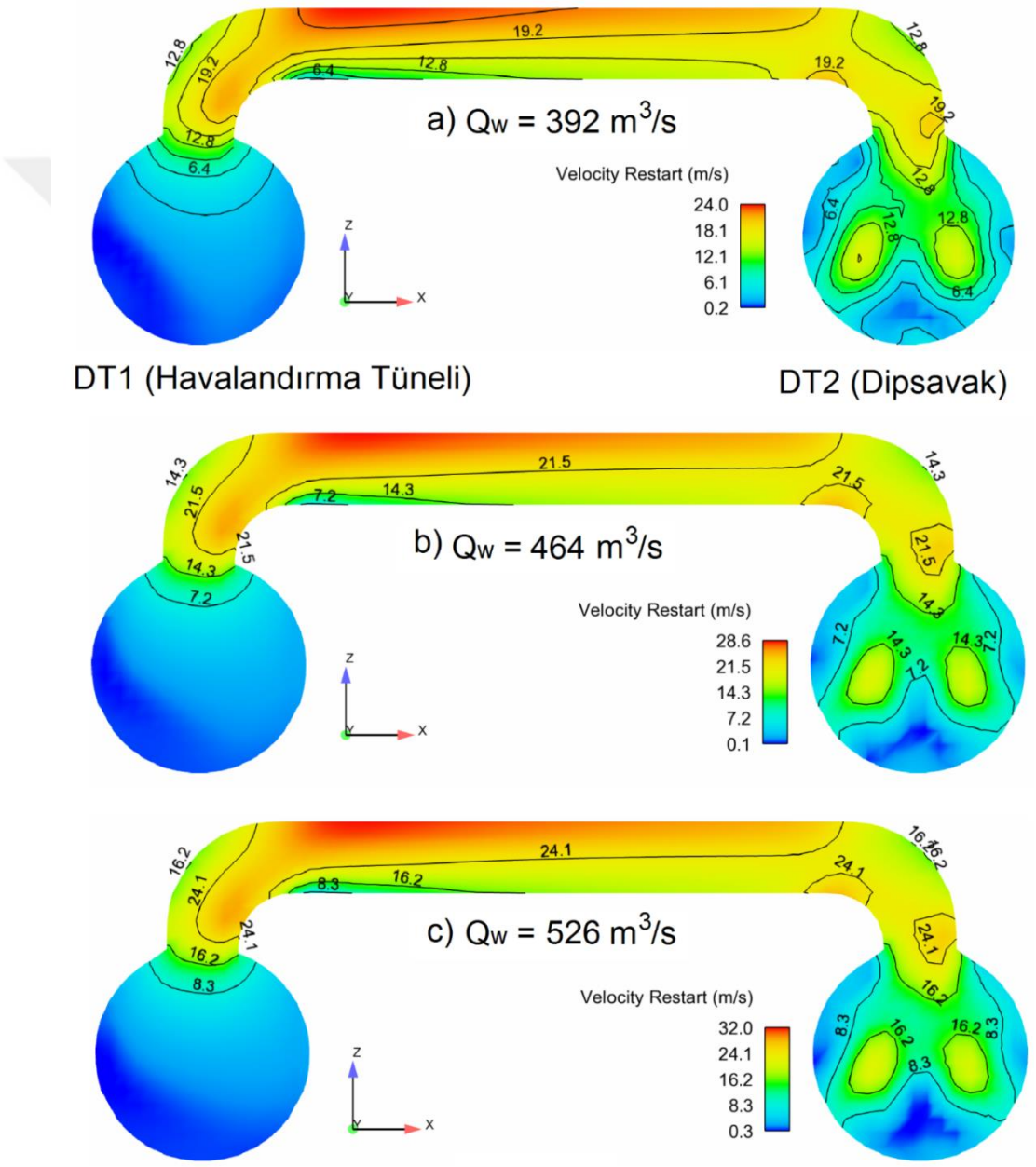
DSİ tarafından yapılan at nalı hava galerisinin tünellere birleştirmek için kullanılan bağlantılarda keskin dönüşler olduğundan hava akımının galeriden DT2 tüneline geçişi sırasında önemli enerji kayıpları meydana gelmekte ve böylece havalandırma performansının düştüğü görülmüştür. Hava akımı çizgilerinin daha yumuşak bir geçişle enerji kayıplarını azaltmak için at nalı galeri kesiti yerine 4.20x4.00 m boyutunda dikdörtgen bir kesit kullanılmış ve 6.00m yarıçaplı kurplarla 90^{o} açıyla Şekil 4.14 gösterildiği gibi DT1 ve DT2 tünellerine bağlanmıştır. Bu yeni tasarım "İkinci Alternatif" olarak adlandırılmış olup sayısal analiz sonuçları "HAD-2" adıyla verilecektir.



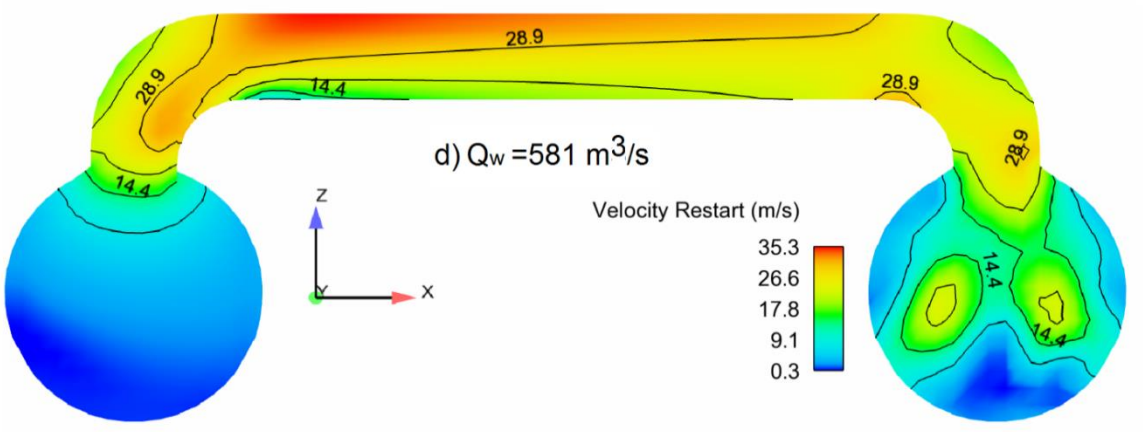
Şekil 4.14. İkinci alternatifin sayısal simülasyondan bir görünüşü (Q_w=392 m^3/s)

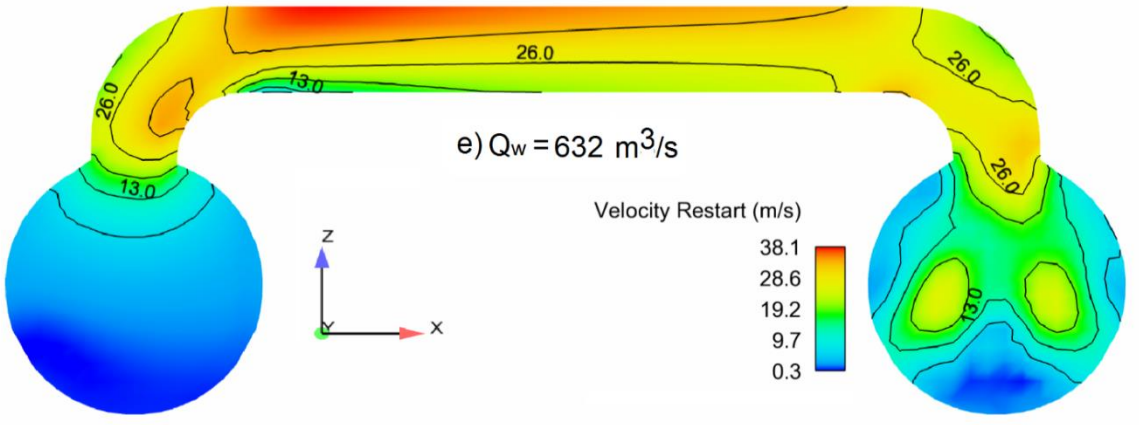
İkinci alternatif doğrultusunda yapılan çalışmada prototip ölçeği dikkate alınarak farklı debiler sonucunda havalandırıcı galerisinde oluşan hız kontörleri Şekil 4.15'de verilmiştir. DT1 tünelindeki hızların en alt kısımlarda en düşük seviyede olduğu görülüp hava galeri girişine doğru hızların arttığı gözlemlenmiştir. Hava galerisi boyunca galerinin alt kısımlarında hızın orta seviyede olup en üst noktalarda ise hızın maksimum olduğu görülmektedir. DT2 dipsavak tünelinin girişinde ve iki kapak boyunca hızlar orta seviyelerde devam edip tünelin alt

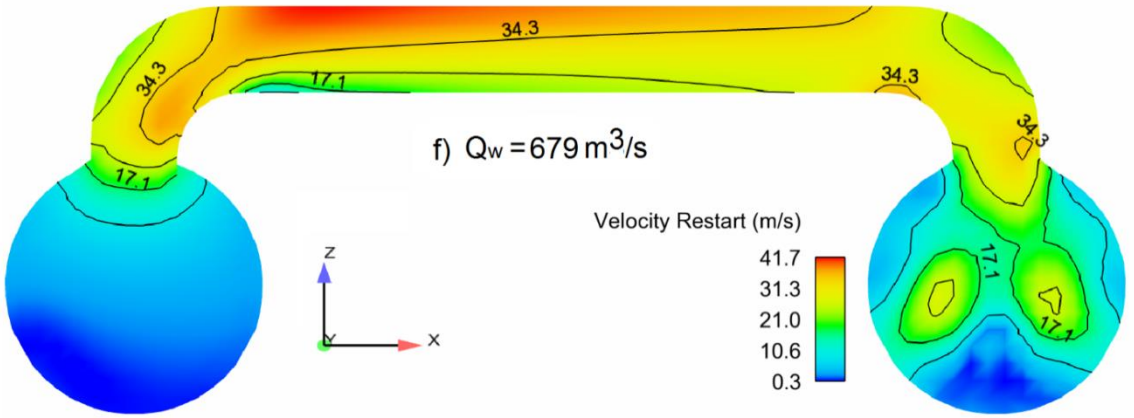
kısımlarında ve kenarlarda hızların neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. Birinci alternatifte galerinin sağ ve sol üst köselerinde hava hızlarının neredeyse durma seviyesine gelerek ölü bölgeler (durma noktaları) oluşturduğu ve hava galerisindeki hız dağılımlarının galeri boyunca kesitlerin tam verimle çalışmadığını görülmekteydi. Bu alternatifte köşeler yay şeklinde yuvarlatıldığı için sağ üst ve sol üst köşelerde durma noktaları oluşmayıp tam tersine yüksek hızların meydana geldiği görülmektedir. Bu da ilk alternatife göre dipsavak tüneline daha fazla hava girmesini sağlayarak, önemli ölçüde bir iyileşme yapıldığını göstermektedir.



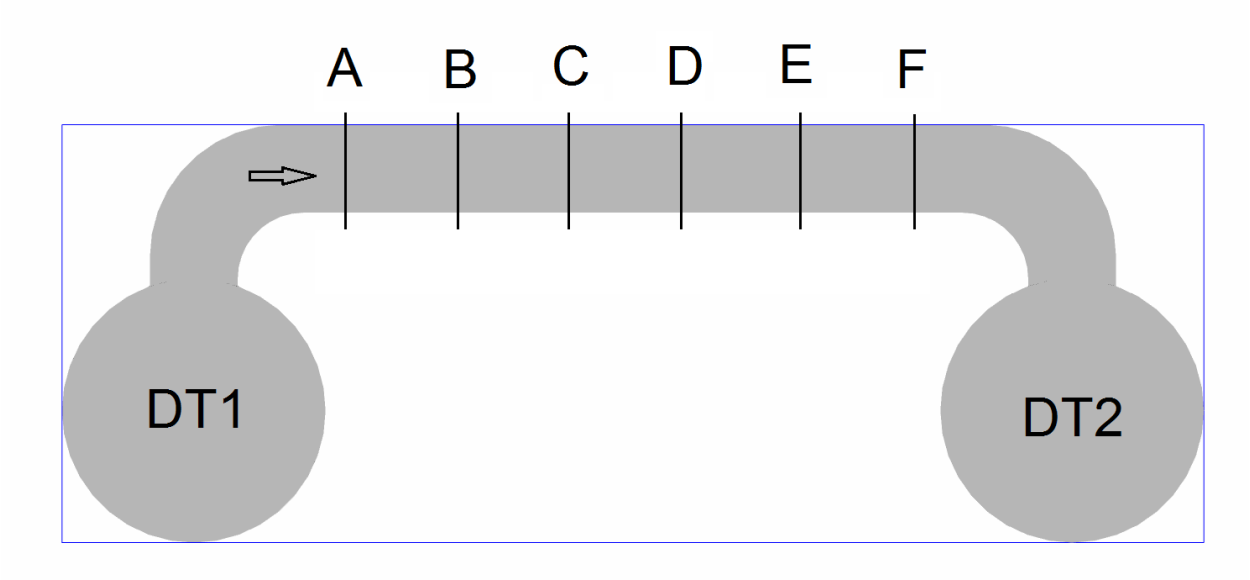
Şekil 4.15. Havalandırma galerisi kesitindeki prototip hız kontörleri



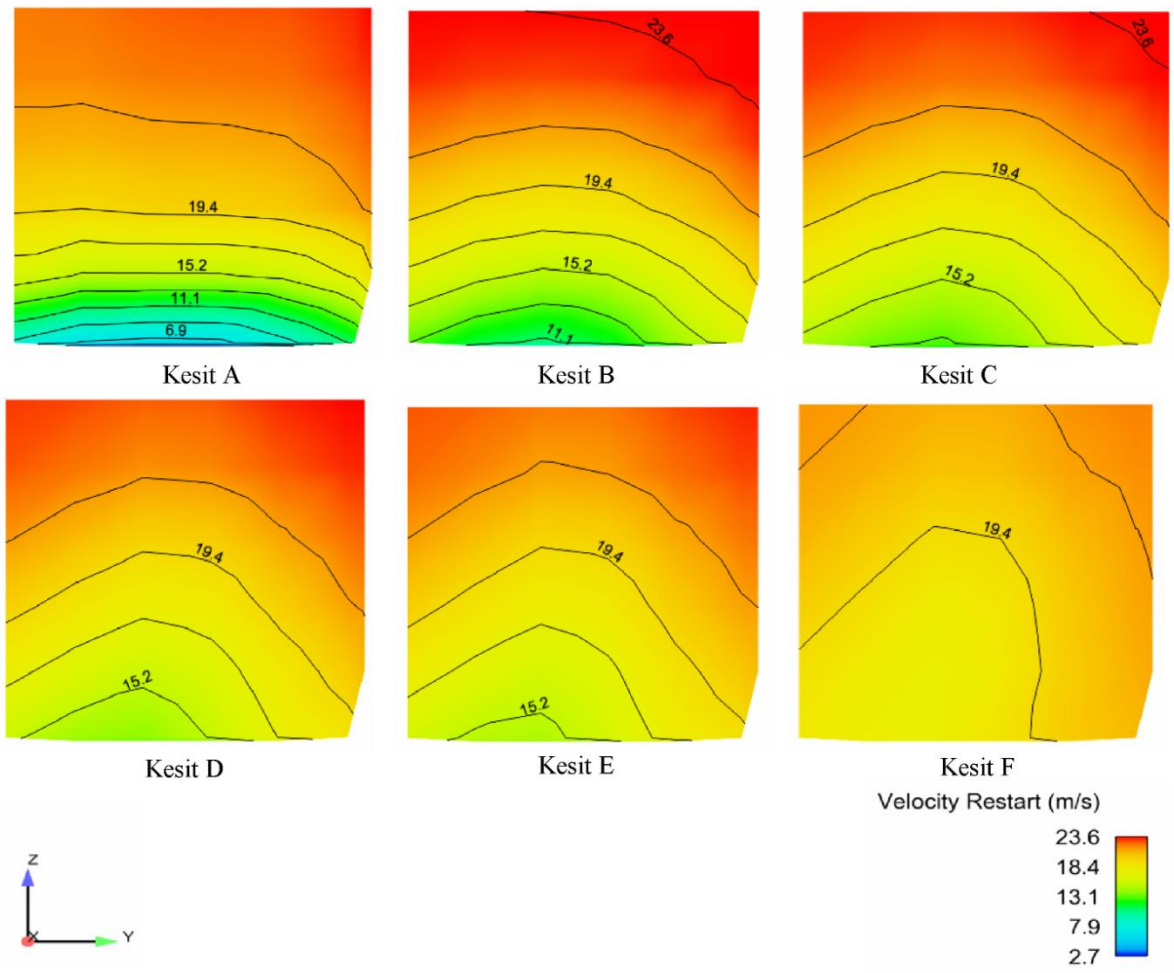




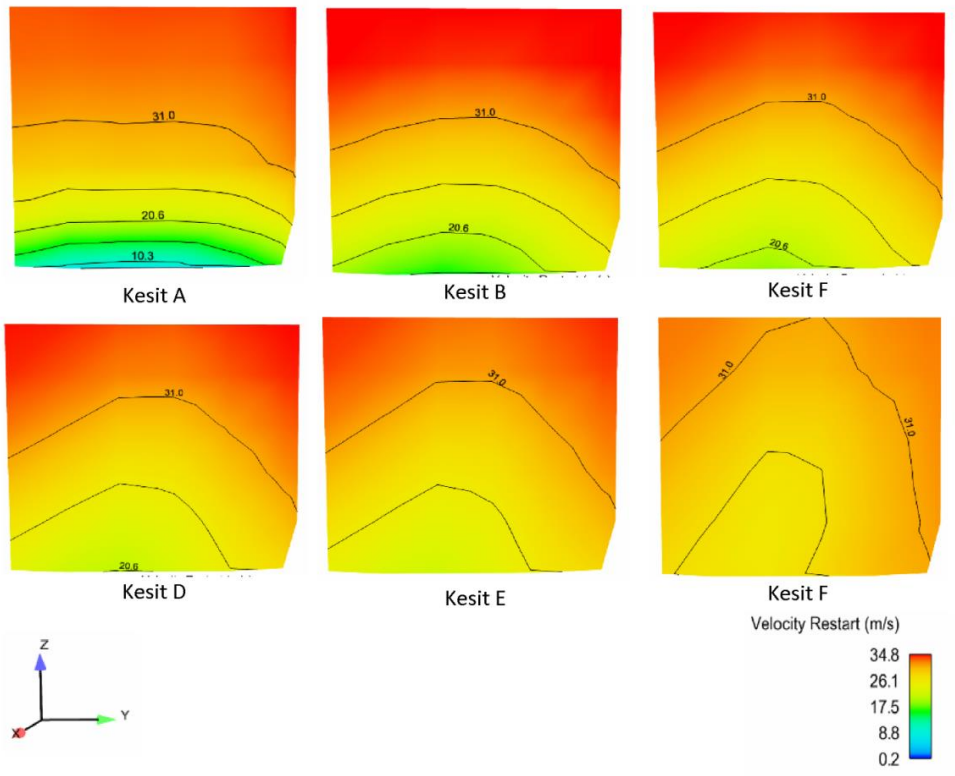
4.15. Şekil (devamı)



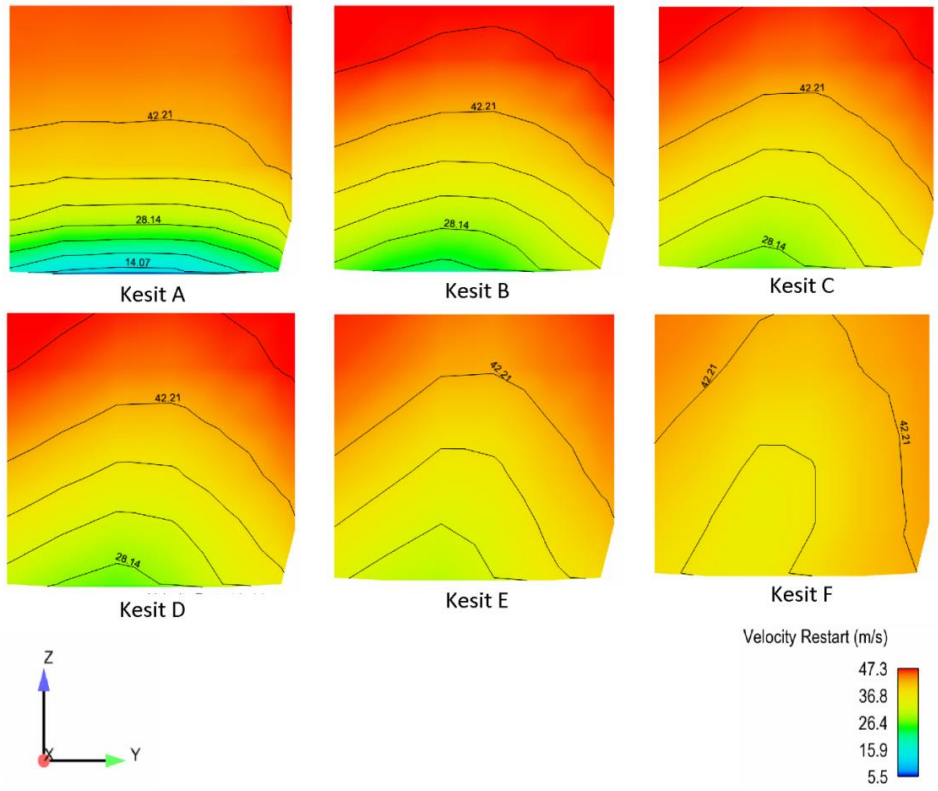
Şekil 4.16. Havalandırma galerisi kesit yerleri



Şekil 4.17. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=392 m^3/s)



Şekil 4.18. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=581 m^3/s)

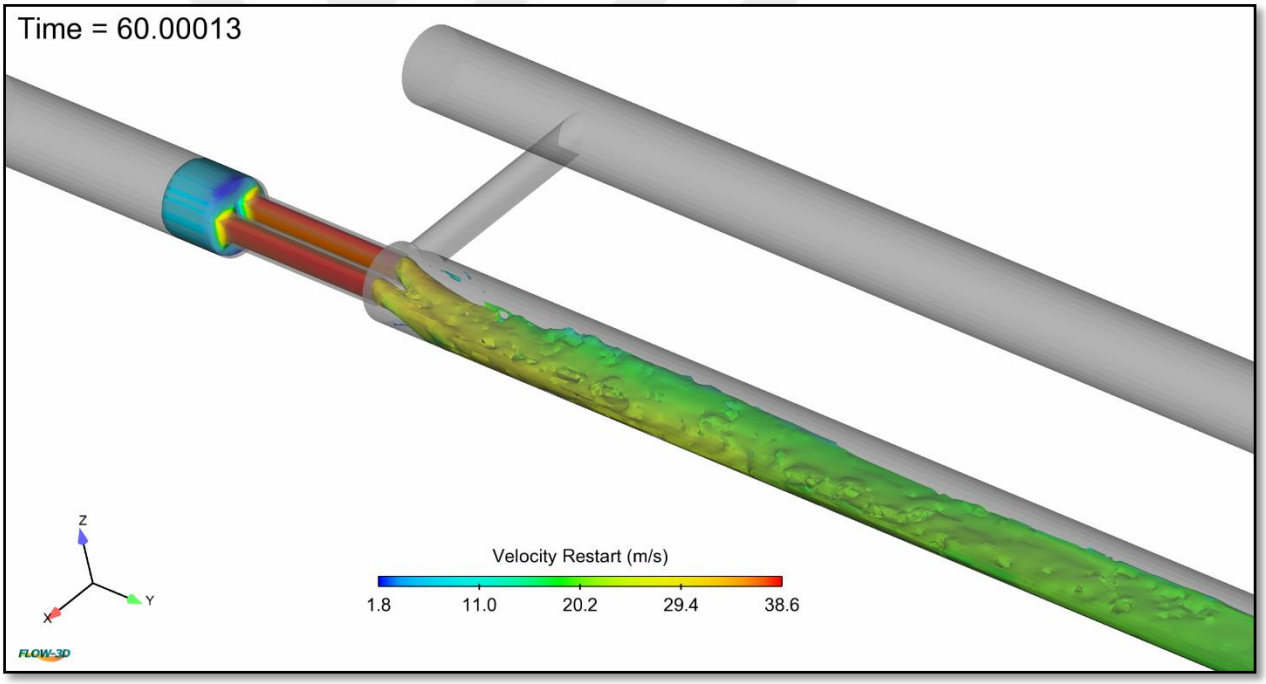


Şekil 4.19. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=764 m^3/s)

Şekil 4.17-4.18-4.19'da üç farklı su debisi için havalandırma galerisinin Şekil 4.16'da verilen altı farklı kesitlerdeki hız dağılımları verilmiştir. Kesitlerdeki hız dağılımları incelendiğinde, A, B ve C kesitlerinde yukarı doğru giriş akımın etkisiyle alt kesimlerde düşük hızlar üst kesimlerde ise yüksek hızlar olduğu görülür. Alt ve üst kesimlerdeki bu hız farkları galeri boyunca azalmakta ve özellikle E ve F kesitlerinde etkisini iyice yitirerek DT2 tünel girişine yakın kesitte (F kesiti) hız dağılımı hemen hemen üniform hale gelmektedir.

4.4.2. Üçüncü Alternatif (HAD-3)

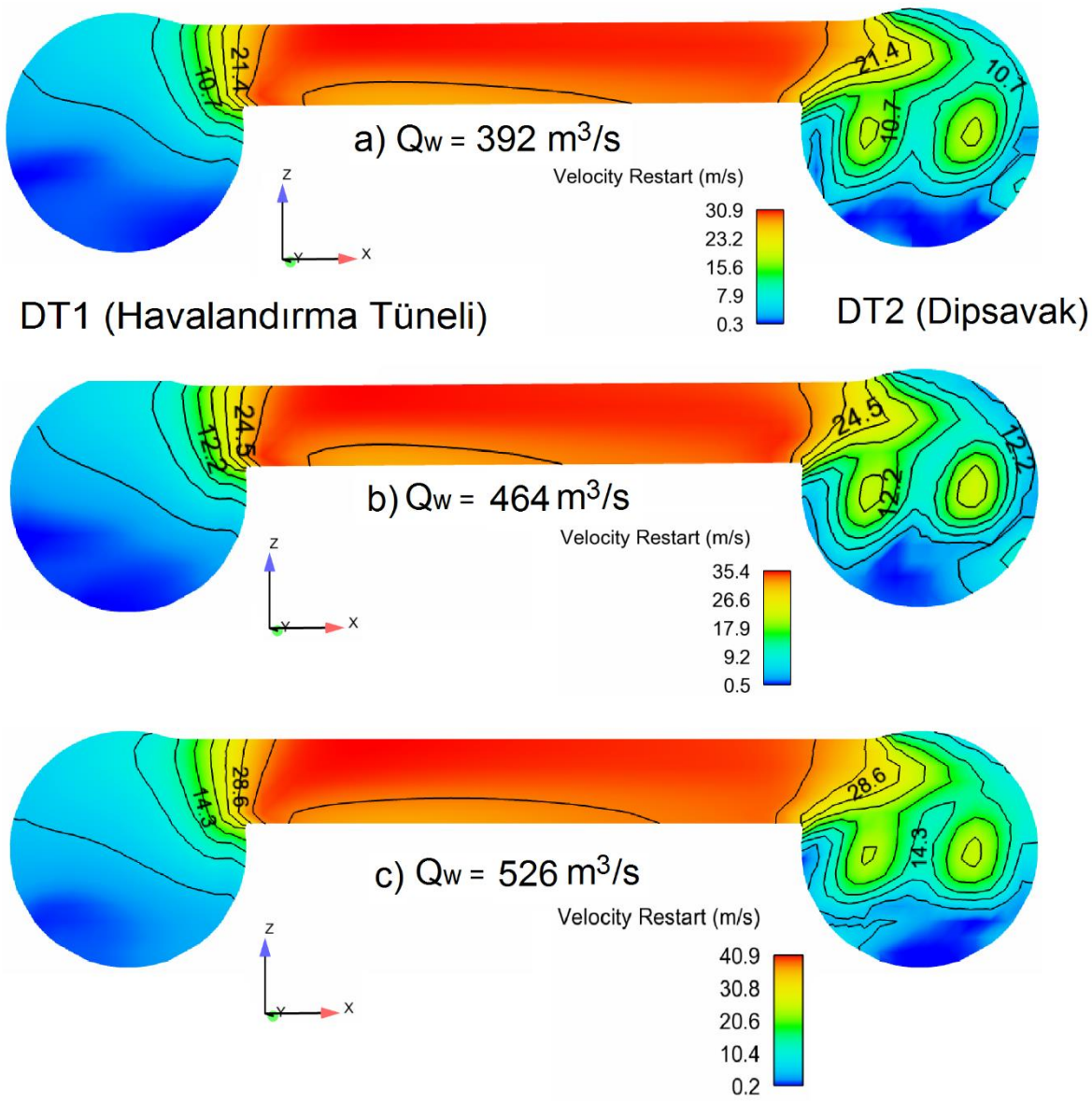
Diğer bir tasarım olarak, DSİ tarafından kullanılan orijinal at nalı galeri kesiti korunarak sadece tünellere 90^o üstten bağlantılardan vazgeçilip galeri aşağı kaydırılarak DT1 ve DT2 tünellerini direkt bağlantı sağlanmıştır. Şekil 4.20'de gösterilen bu tasarım "Üçüncü Alternatif" olarak adlandırılacak ve sayısal model sonuçları "HAD-3" ile verilecektir.



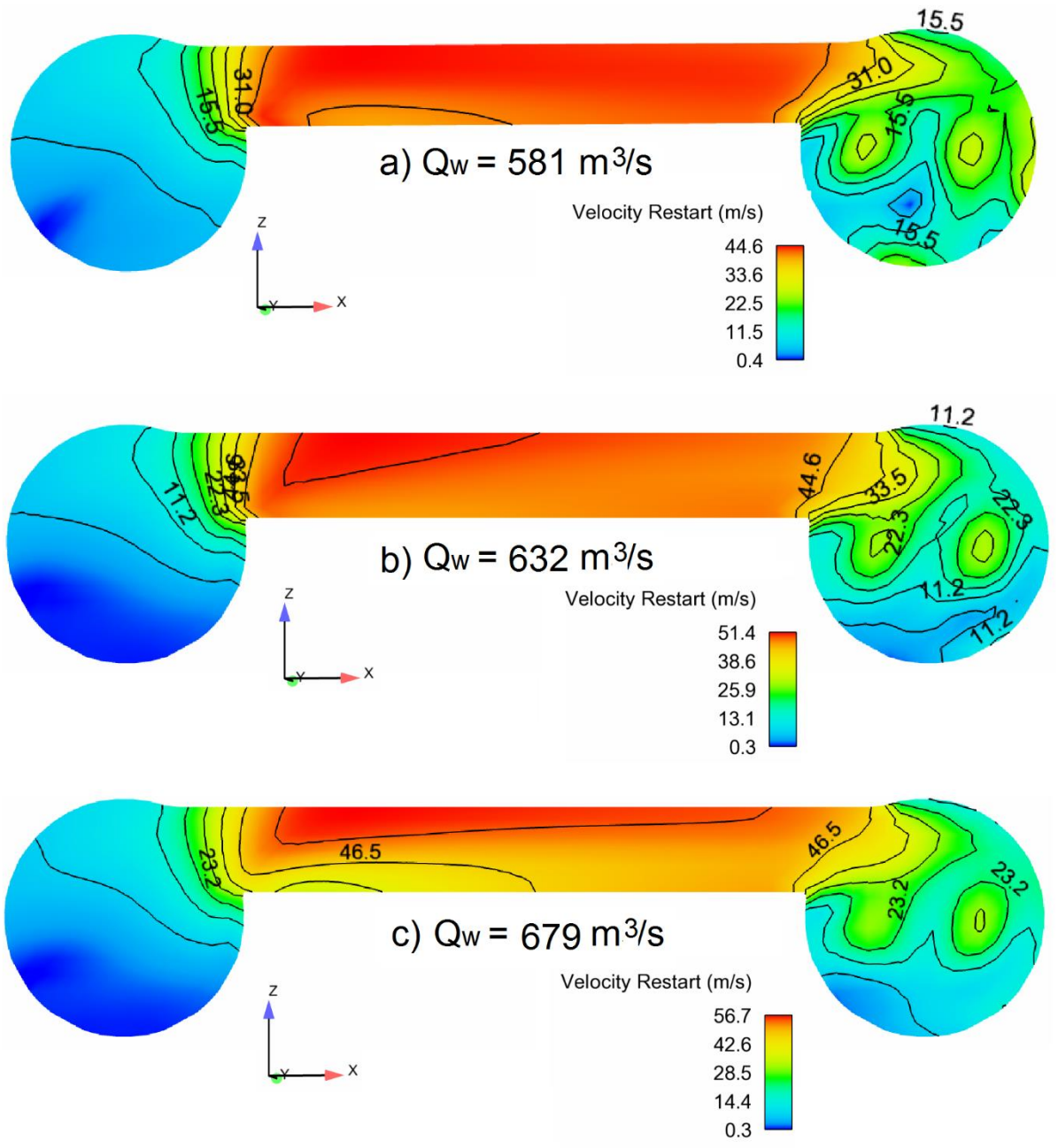
Şekil 4.20. Üçüncü alternatif sayısal simülasyondan bir görünüş (Q_w=392 m^3/s)

Üçüncü alternatif tasarım için farklı debilerle havalandırıcı galerisindeki hız kontörlerinin dağılımı Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm debilerde havalandırıcı tüneli olan DT1 tünelinin alt kesimlerinde düşük hız bölgeleri oluşmakta galeri girişine doğru ise hava hızları akmaktadır. DT1 tünelinde galeriye girişten sonra hızların diğer alternatif tasarımlara göre

oldukça yüksek ve üniform olduğu görülmektedir. Hava hızlarındaki bu dağılım Şekil 4.21'de ki tüm debiler için de geçerli olmakla birlikte su debisinin akmasıyla hava geçiş hızlarının da arttığı görülmektedir. Bu sonuçlardan, üçüncü alternatif tasarımın diğer tasarımlara göre daha yüksek hava sağladığı ve böylelikle havalandırma performansının çok iyileştirdiği söylenebilir.



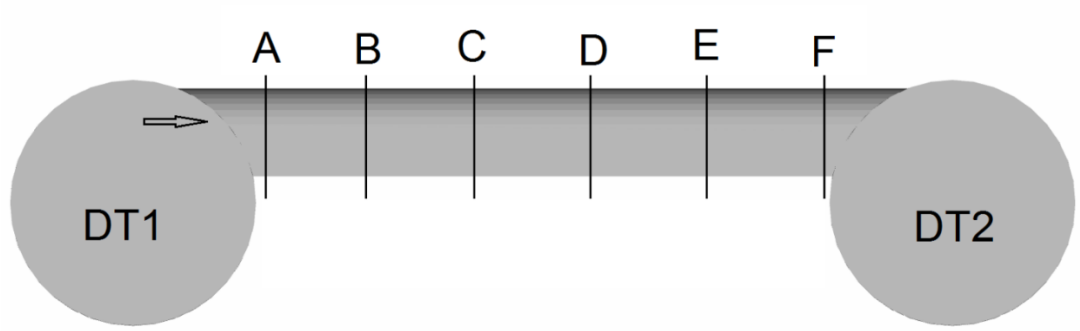
Şekil 4.21. Havalandırma galerisi kesitindeki prototip hız kontörleri



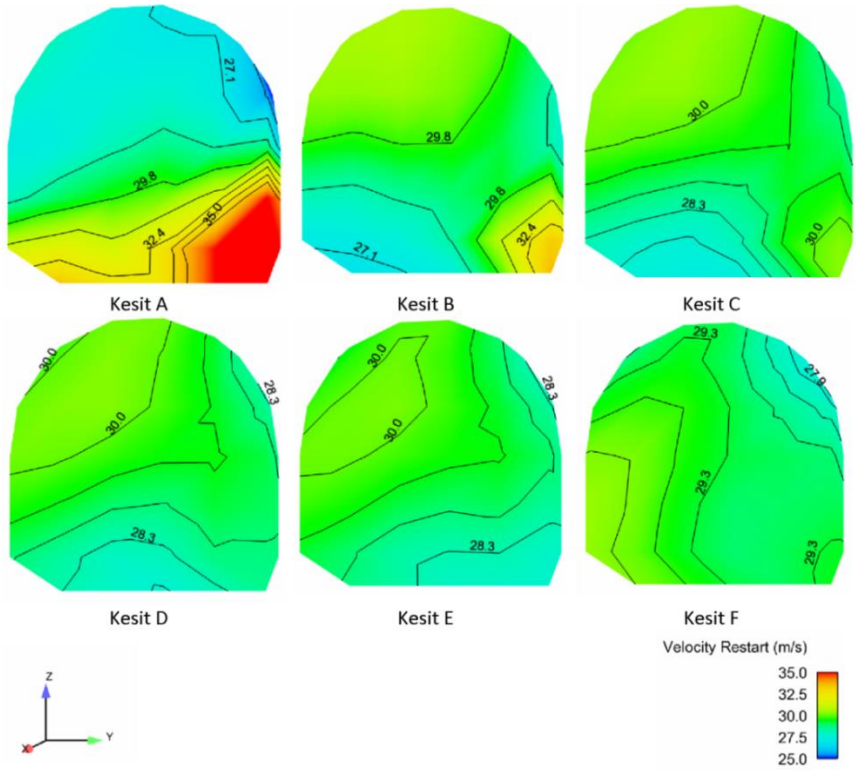
Şekil 4.21. (devamı)

Bu tasarımdaki havalandırıcı galerisinin farklı kesitlerindeki hava hızı değişimlerini izleyebilmek için önceki tasarımlarda olduğu gibi Şekil 4.22'de gösterilen kesitlerdeki hız dağılımları üç farklı debi değeri için (küçük, orta, büyük) sırasıyla Şekil 4.23-4.24-4.25'de verilmiştir. Bu üç şeklin en dikkat çekici noktası A kesitinin sağ alt köşesinde oluşan yüksek hız bölgeleridir. DT1 hava tünelinde girişine yakın olan bu kesite giriş hızlarının etkisiyle bu bölgede yoğun hava girişi olmakta ancak ilerleyen kesitlerde yani DT2 tüneline doğru kesitteki hız dağılımı üniform hale gelip kesit daha verimli çalışmaktadır. Fakat bu durum daha çok düşük ve orta su debileri için

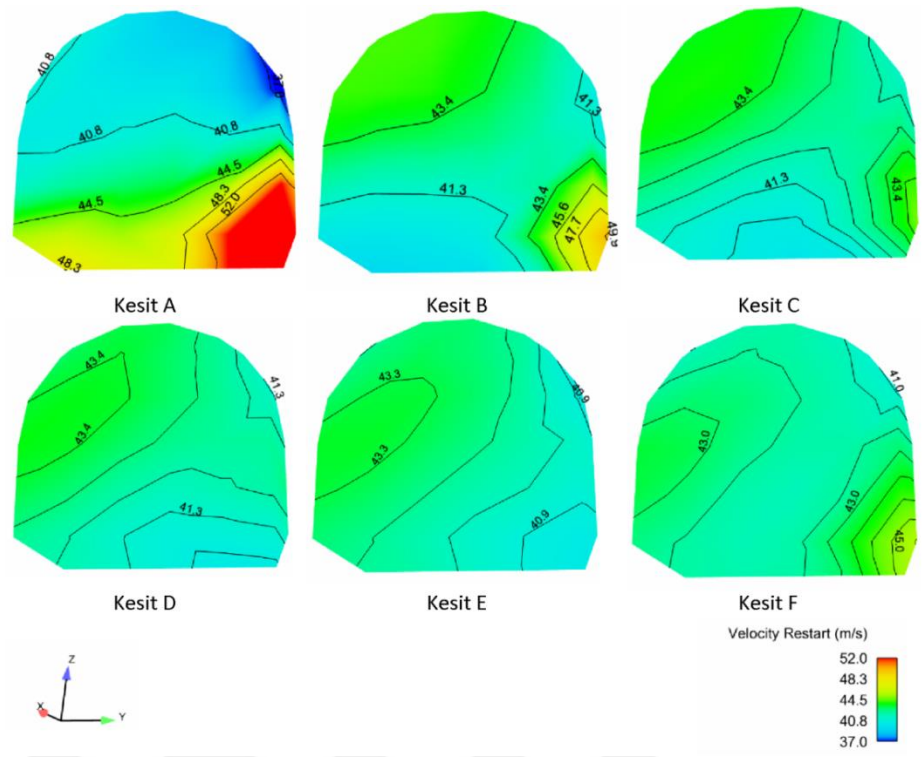
geçerli olup Şekil 4.25'de görüldüğü gibi yüksek su debileri için havalandırma galerisindeki hız dağılımları biraz daha farklıdır. Şekil 4.25'de verilen yüksek hız debisi için kesitler incelendiğinde yüksek hava giriş hızları DT1 tüneline yakın A kesitin tüm alt bölgesine yayılmış, daha düşük su debilerinde görülen köşedeki yüksek hız yoğunlaşması ise B kesitine hatta galerinin ortasına yakın C kesitine kadar ilerlemiştir. Bundan sonra yoğun türbülans ve sekonder akım etkisi ile kesitlerdeki hız daha üniform olmakla birlikte küçük ve orta debiler için verilen hız debilerine oranla daha karmaşık bir dağılım sergilemektedir. DT2 tüneline girişte ise tekrar akımın yön değiştirmesine bağlı olarak üniform olmayan bir hız dağılımı oluşmaktadır.



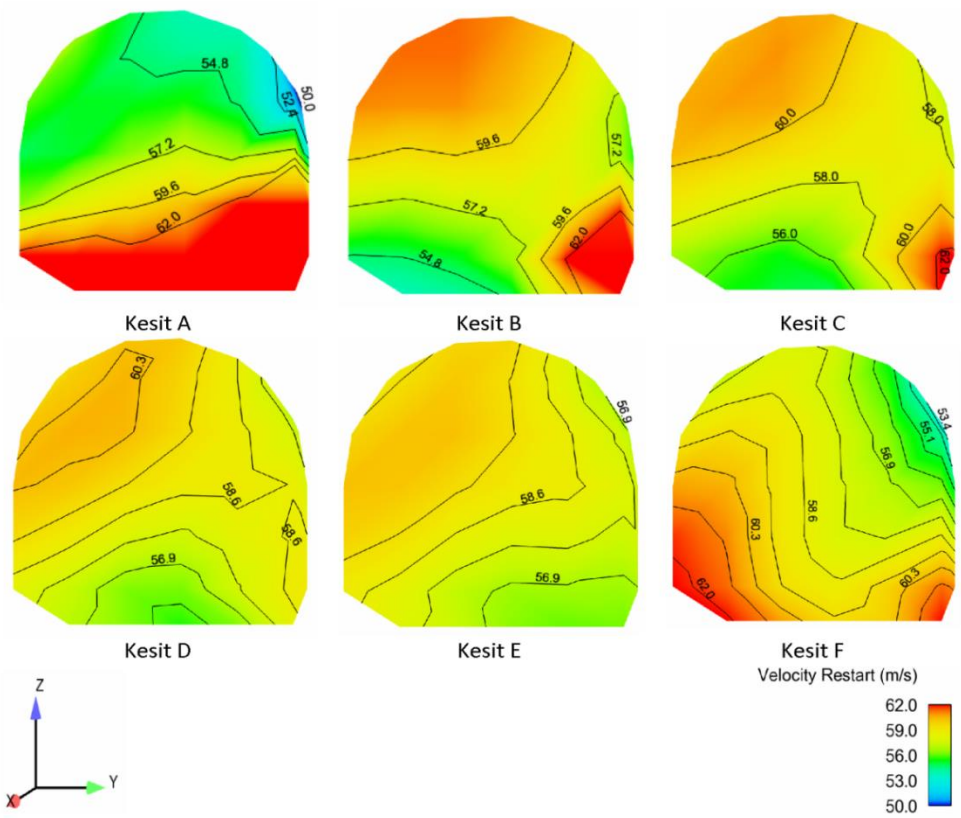
Şekil 4.22. Havalandırma galerisi kesit yerleri



Şekil 4.23. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=392 m^3/s)



Şekil 4.24. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=581 m^3/s)



Şekil 4.25. Prototip hava galerisi kesitlerindeki hız kontörleri (Q_w=764 m^3/s)

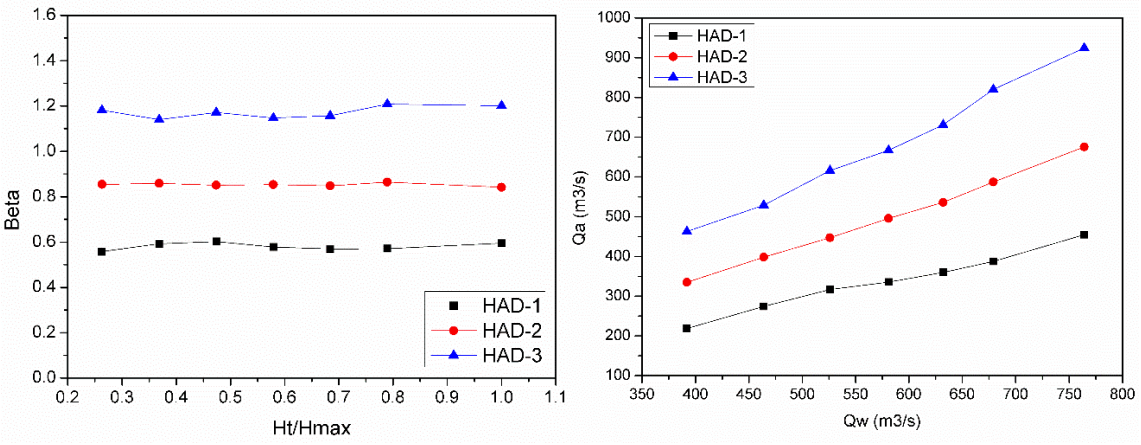
Çizelge 4.4. Alternatif Havalandırıcı Tasarımların Karşılaştırılması

					HAD-1			HAD-2				HAD-3			
H_t/H_{max}	Q_w	D	A	V_w	Q_a	V_a	$\beta=Q_a/Q_w$	Q_a	V_a	$\beta=Q_a/Q_w$	ARTIŞ	Q_a	V_a	$\beta=Q_a/Q_w$	ARTIŞ
-	(m^3/s)	(m)	(m^2)	(m/s)	(m^3/s)	(m/s)	(--)	(m^3/s)	(m/s)	(-)	(%)	(m^3/s)	(m/s)	(-)	(%)
0.26	392.00	12.00	113.04	3.47	218.70	9.72	**0.558**	334.91	19.94	**0.854**	**53.1**	462.80	29.47	**1.181**	**111.6**
0.37	464.00	12.00	113.04	4.10	274.59	16.57	**0.592**	398.50	23.75	**0.858**	**45.0**	529.10	33.69	**1.140**	**92.7**
0.47	526.00	12.00	113.04	4.65	316.88	18.14	**0.602**	447.20	26.63	**0.850**	**41.1**	615.80	39.21	**1.171**	**94.3**
0.58	581.00	12.00	113.04	5.14	335.59	19.35	**0.578**	495.80	29.53	**0.853**	**47.7**	666.60	42.45	**1.147**	**98.6**
0.68	632.00	12.00	113.04	5.59	360.00	21.05	**0.570**	536.20	31.93	**0.848**	**48.9**	731.20	46.56	**1.157**	**103.1**
0.79	679.00	12.00	113.04	6.01	387.79	21.97	**0.571**	587.10	34.96	**0.864**	**51.3**	820.00	52.2	**1.208**	**111.5**
1.00	764.00	12.00	113.04	6.76	454.86	27.27	**0.595**	675.50	40.23	**0.841**	**41.3**	924.10	58.85	**1.210**	**103.2**

4.5. Alternatif Tasarımların Karşılaştırılması

Üç farklı tasarım için sayısal analizler yapılmış ve elde edilen değerler Çizelge 4.4'de verilmiştir. Hava galerisi değiştirilerek yapılan tasarımların aynı hızlara karşılık gelen prototip debi değerleri büyük oranda değişimler gösterip debi değerleri DSİ tarafından yapılan orijinal tasarımlarda en düşükken HAD-2'de debi değerleri artış göstermiş olup bu debi değeri HAD-3 tasarımında ise maksimum değere ulaştığı Çizelge 4.4'de görülmektedir. Her üç tasarım da göstermiştir ki akım debileri arttıkça hava giriş debileri de artmaktadır. HAD-1 tasarımında en yüksek hava giriş katsayı 0.602 iken bu değer HAD-2 tasarımında 0.864'lik bir artış göstermiş olup bu değer HAD-3'te ise 1.210 ile maksimum değere ulaşmıştır. Orijinal tasarıma göre HAD-2 tasarımıyla yaklaşık %50, HAD-3 tasarımıyla ise yaklaşık ortalama %100 havalandırma performansının arttırıldığı görülmektedir. HAD-1, HAD-2 ve HAD-3 tasarımlarının hava giriş oranlarının boyutsuz su yüküne ve Hava giriş debisinin su debisine oranlarına göre değişimleri Şekil 4.26 (a) ve (b)'de ki grafiklerde verilmiştir. Bu grafiklerden tasarım değişikliklerinin havalandırma performansı üzerine etkileri çok daha net bir şekilde görülebilmektedir.

İkinci tasarımda hava galerisinin boyutlarının değiştirilmesi ve köşelerin yay gibi yuvarlatılması DSİ tarafından yapılan tasarıma göre daha fazla hava girişi sağlayıp ilk tasarıma göre oranlarda yükseliş göstermiştir. Üçüncü alternatifte hava giriş oranları en üst seviyede olup ilk iki alternatife göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu da gösteriyor ki hava galerisindeki dirseklerin kaldırılıp sistemin direk iki tüneli birbirine bağlanılarak yapılması daha uygun olduğu sayısal analizlerce test edilmiştir.



(a) (b)

Şekil.4.26.HAD analizlerinden elde edilen HAD-1,HAD-2 ve HAD-3 prototip oranlarının karşılaştırılması a) Hava giriş oranları, b) Hava debisi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ülkemizin en önemli enerji projelerinden biri olan Ilısu barajının dipsavak tasarımı üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak detaylı analizler yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir:

1. Çalışmada ilk olarak, DSİ tarafından verilen dipsavak projesine uygun olarak 1/40 ölçekli model ve prototip boyutlarında üç boyutlu sayısal modeli hazırlanmış ve Flow-3D yazılımı yardımıyla, çift fazlı (hava-su), türbülanslı akım modeli kullanılarak DSİ tarafından belirlenmiş işletme debilerine göre analizler yapılmıştır.
2. Literatürdeki bilgilere dayalı olarak, DSİ tarafından yapılan 1/40 ölçeğindeki fiziksel model deneylerinde, özellikle hava girişi bakımından, önemli ölçek etkileri bekleneceği tahmin edilmiştir.
3. Doğal olarak proje aşamasında prototip sonuçları mevcut olamayacağından bu tür çalışmaların prototip ölçeğindeki analizleri ancak sayısal simülasyon yöntemleriyle mümkün olmaktadır. Bu Tezin ilk aşamasında, HAD analizleri yardımıyla model ve prototip ölçeklerinde modeller analiz edilerek elde edilen sonuçlardan ölçek etkilerinin belirlenmesine çalışılmıştır.
4. Yapılan HAD analizleri DSİ tarafından gerçekleştirilen deneysel model çalışmalarıyla karşılaştırıldığında hava giriş oranı bakımından büyük debilerde oldukça iyi (%2 gibi) bir uyum elde edilirken düşük debilerde bu fark artmaktadır. Bunun nedenleri sayısal ve deneysel hatalara ek olarak türbülans modelindeki akımın tam türbülanslı kabul edilmesi, dolayısıyla sayısal modele kıyasla deneylerde düşük debilerde viskoz gerilmelerin prototipe oranla daha hakim olmasından kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanmıştır.
5. Prototip HAD sonuçları fiziksel model deneyleriyle karşılaştırıldığında ise; hava giriş oranlarının prototip analizlerinde daha da arttığı ve yine küçük debilerde bu farkın daha da fazlalaştığı görülmektedir ki bu durumun ölçek etkilerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Literatürde verilen bilgilere göre de büyük debilerde modelle prototip sonuçları daha iyi uyuştuğu küçük debiler de ise muhtemelen düşük Re sayılarından dolayı ölçek etkilerin daha belirgin olduğu belirtilmektedir. Dolayısıyla elde edilen bu bulgular literatürdeki açıklamalarla uyuşmaktadır.
6. Ölçek etkilerini daha iyi görebilmek için aynı akım şartları için model ve prototip boyutlarındaki HAD analizleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre, ölçek

etkilerinin %8.6 ila %23.5 arasında değişmekte olduğu ortalama ise %16 olarak tespit edilmiştir.

7. Reynolds sayılarına bakıldığında; model için $Re=1.6x10^5 \sim 3.2x10^5$ arasında, prototipte ise $Re=42x10^6 \sim 81x10^6$ aralığında olduğu görülmüştür. Elde edilen Re sayıları seçilen 1/40 ölçeğiyle birlikte değerlendirildiğinde; kullanılan model ölçeğinin (1/40) verilen limit ölçek değerlerinin oldukça altında kaldığından model deneylerinde ölçek etkilerinin bekleneceği aşikârdır. Bu da elde edilen ölçek etkileri değerlerini doğrulmaktadır.
8. Havalandırıcı galerisinin kesitleri üzerindeki prototip hız değerlerinin model karşılığındaki değerlerine (1/6.32 Froude hız ölçeğiyle) uymakla birlikte, kesit üzerindeki hız değişimleri modelinkinden biraz farklı olduğu gözlemlenmiştr. Kesit boyunca hava hızlarındaki sekonder etkiler prototip analizlerinde daha belirgin olup model analizlerinde gözlenemeyen çift gözlü çevrintili akımlar gözlemlenmiştir.
9. Havalandırma galerisinin boykesiti üzerindeki hız dağılımlarından ise; kesit üzerinde hızların oldukça düştüğü ölü bölgeler oluştuğu ve kesitin yeterince verimli çalışmadığı görülmüştür. Bu bakımdan tasarımda bazı revizyonlar yapılarak kesit boyunca daha üniform bir akım oluşması ve sekonder akımların azaltılması sağlanabilir. Böylelikle havalandırıcı daha verimli çalışabileceği düşünülmüştür.
10. Tezin ikinci aşamasında, havalandırıcı galerisinin daha verimli çalışmasını sağlayabilecek alternatif bazı tasarımlar geliştirilmiştir. Bunun için alternatif ikinci tasarımda; akımı rahatsız edici keskin köşe ve dar kıvrımlardan vazgeçilerek, üstten bağlanan galerinin kıvrım yarıçapları arttırılmak suretiyle galeri tasarımında değişikler yapılmıştır. Alternatif üçüncü tasarımda ise; havalandırıcı galerisi üstten dirseklerle bağlanmaktansa DT1 ve DT2 tünellerine doğrudan bağlanmak suretiyle tasarımın iyileştirilmesi öngörülmüştür.
11. Orijinal tasarımda, DSİ tarafından yapılan at nalı hava galerisinin tünellere birleştirmek için kullanılan bağlantılarda keskin dönüşler olduğundan hava akımının galeriden DT2 tüneline geçişi sırasında önemli enerji kayıpları meydana gelmekte ve böylece havalandırma performansının düştüğü görülmüştür. Bunu önlemek geliştirilen alternatif ikinci tasarımda hava akımı çizgilerinin daha yumuşak bir geçişle enerji kayıplarını azaltmak için at nalı kesitten vazgeçilerek 4.20x4.00 m boyutunda dikdörtgen bir kesit kullanılmış ve 6.00 m yarıçaplı kurplarla 90^o dirsekler yardımıyla ana tünellere (DT1 ve DT2) bağlanmıştır. Bu tasarımda orijinal tasarımdan farklı olarak sadece hava galerisinde değişimler yapılmıştır. Bu yeni tasarımın prototip ölçeğinde HAD analizleriyle havalandırma performansı test edilmiş ve orijinal tasarıma göre yaklaşık %50 havalandırma performansı artışı sağlanmıştır.

12. Farklı debiler için yapılan analizler sonucunda bu alternatifte hava galerisinin köşelerinin yay şeklinde yuvarlatılması ile sağ üst ve sol üst köşelerde durma noktaları oluşmayıp tam tersine yüksek hızların meydana geldiği görülmektedir. Bu da orijinal tasarıma göre dipsavak tüneline daha fazla hava girmesini sağlamış ve önemli ölçüde havalandırma verim artışı sağlanmıştır.
13. Diğer bir alternatif tasarım, DSİ tarafından kullanılan orijinal at nalı galeri kesiti korunarak ana tünellere üstten dirseklerle bağlanmak yerine DT1 ve DT2 tünellerini direkt bağlantı sağlandığı alternatif üçüncü tasarımdır. Bu tasarımın prototip HAD sonuçlarından, DT1 tünelinde galeriye girişten sonra hızların diğer alternatif tasarımlara göre oldukça yüksek ve üniform olduğu görülmüştür. Hava hızlarındaki bu dağılım tüm debiler için de geçerli olmakla birlikte su debisinin artmasıyla hava geçiş hızlarının da arttığı görülmektedir. Bu sonuçlardan, üçüncü alternatif tasarımın diğer tasarımlara göre daha yüksek hava sağladığı ve böylelikle havalandırma performansının oldukça iyileştirildiği görülmüştür.
14. Bu üç tasarım sonucu karşılaştırıldığında; ikinci alternatif sonuçlarına göre hava galerisin boyutlarının değiştirilmesi ve galeri köşelerinin yay gibi yuvarlatılması elde edilen prototip modelin sayısal analiz sonuçlarına göre ikinci alternatifin DSİ'nin orijinal tasarımına oranla ortalama % 47'lik daha fazla hava geçişi sağlayarak artış göstermiştir. Sadece dirseklerin kaldırılmasıyla ve doğrudan bağlantı şeklinde geliştirilen üçüncü alternatif tasarımda ise hava emme performansı bakımından ikinci alternatif tasarıma oranla yaklaşık %50, orijinal tasarıma oranla ise yaklaşık %100'lük bir verim artışı sağlanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda Ilısu dipsavak sisteminin havalandırılması bakımından üçüncü alternatif olarak adlandırılan tasarımın daha iyi verim sağladığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

Aydın MC, 2005. Dolusavak Havalandırıcılarının CFD Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Aydın MC, Öztürk M, 2009. Verification and validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD) Model for Air Entrainment at Spillway Aerators. Canadian Journal of Civil Engineering, 36: 826–836.

Aydın MC, Ulu AE, 2017. Model-Prototype Comparison of Sluice Gate Flow by One-Phase CFD Model. 8th International Advanced Technologies Symposium. October 19-21, Elaziğ, Turkey, s: 980-984.

Aydın MC, Ulu AE, Karaduman Ç, 2017. 3D Model-Prototype Comparison of Air Entrainment by Two-Phase CFD Model. 8th International Advanced Technologies Symposium. October 19-21, Elaziğ, Turkey, s: 59.

Aydın MC, Ulu AE, Karaduman Ç, 2018. CFD Analysis of Ilısu Dam Sluice Outlet, Turkish Journal of Science & Technology, 13(1): 119-124

Cengiz İnşaat, Şekil 3.2. Ilısu Barajı Dipsavak Yapısı. http://www.cengiz-insaat.com.tr/tr-tr/Projeler/Sayfalar/ilisu-Baraji-ve-HES.aspx (Erişim tarihi: 17.10.2017)

Chanson H, 1989. Flow Downstream of Aerator-Aerator Spacing, Journal of Hydraulic Research, 27(4): 519-536.

Chatila J, Tabbara M, 2004. Computational Modeling of Flow Over an Ogee Spillway. Computers and Amp; Structures, 82(22): 1805-1812.

DSİ 2013. Ilısu Barajı ve HES Projesi Dipsavak Tüneli Ek Hidrolik Çalışmaları (M-398). Fiziksel Model Deney Raporu, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Hidrolik Model Laboratuvarı Şube Müdürlüğü. Ankara. Rapor No: Hİ-1022, 119 s.

FLOW-3D 2016. User Manual, Theory Guide.

Freitas CJ, 1993. Journal of Fluids Engineering Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, 115(3): 339–340.

Hirt CW, Nichols BD, 1981. "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries." Journal of Computational Physics, 39(1): 201–225.

Ilısu Barajı ve HES Dipsavak Tüneli Ek Hidrolik Çalışmaları Model Raporu, Yayın no: 398, Mayıs 2013. Tablo 3.2. Ilısu Barajı ve HES Genel Proje Karakteristikleri.

Kells JA,Smith, CD, 1991. Reduction of Cavitation on Spillways by İnduced Air Entrainment, Canadian Journal of Civil Engineering, 18(3): 358-377.

Kokpinar MA, Gogus M, 2002. High-Speed Jet Flows Over Spillway Aerators. Canadian Journal of Civil Engineering, 29(6): 885-898.

Kramer K, Hager WH, 2005. Air Transport in Chute Flows. International Journal of Multiphase Flow, 31(10): 1181-1197.

Özturk M, Aydın MC, Aydın S, 2008. Damage Limitation- A New Spillway Aerator. International Water Power and Dam Construction. 60(5): 36-40.

Öksüz O, 2016 Şekil 3.1. Ilısu Barajı. http://aa.com.tr/tr/turkiye/ilisu-baraji-2017de-hizmete-alinacak/694028 (Erişim tarihi: 17.10.2017)

Pfister M, 2011. Chute Aerators: Steep Deflectors and Cavity Subpressure. Journal of Hydraulic Engineering, 137(10): 1208-1215.

Pfister M, Chanson H, 2014. Two-Phase Air-Water Flows: Scale Effects in Physical Modeling. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 26(2): 291-298.

Pfister M, Hager WH, 2010. Chute Aerators. I: Air transport Characteristics. Journal of Hydraulic Engineering, 136(6): 352-359.

Pfister M, Hager WH, 2010. Chute Aerators. II: Hydraulic design. Journal of Hydraulic Engineering, 136(6): 360-367.

Pinto NL de S, 1984. Model Evaluation of Aerators in Shooting Flow, Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, H. Kobus, ed., International Association of Hydraulic Researchers, 4.2-1 – 4.2-6.

Pinto NL de S, 1988. Cavitation and Aeration, in Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation. Edited by R.B. Jansen, Kluver Academic Publishers, 620-634.

Pinto NL de S, Neidert SH, 1982. Model Prototype Conformity in Spillway Flow. International Conference on Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Coventry, England, September 22-24, s: 273-284.

Tan TP, 1984. Model Studies of Aerators on Spillways. Research Report 84-6, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

Teng P, Yang J, 2016. CFD Modeling of Two-Phase Flow of a Spillway Chute Aerator of Large Width, Journal of Applied Water Engineering and Research, 4:2: 163-177.

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, Artick ID 4729128 Doi: 10.1155/2016/4729128, p11.

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

White F M, 2003. Dimensional Analysis and Similarity, Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill, p322.

Yakhot V., Orszag S.A, 1986. Renormalization Group Analysis of Turbulence I. Basic Theory. Journal Scientific Computing, 1(1):3–51.

Yakhot V., Smith L.M, 1992. The Renormalization Group, the E-Expansion and Derivation of Turbulence Models, Journal of Scientific Computing, 7(1):35–61.

Zhang JM, Chen JG, Xu WL, Wang YR, Li GJ, 2011. Three-Dimensional Numerical Simulation of Aerated Flows Downstream Sudden Fall Aerator Expansion-İn a Tunnel. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 23(1): 71-80.

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Diyarbakır'ın Ergani ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Diyarbakır'da tamamladıktan sonra 2012-2016 yılları arasında Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesini İnşaat Mühendisliği Bölümünü başarıyla tamamladı. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2016 yılının güz döneminde Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi'nin ortak yürüttüğü program kapsamında Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

Çimen KARADUMAN