

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

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LABİRENT KRETLİ ŞAFT TİPİ DOLUSAVAKLARIN SAYISAL ANALİZİ

Ali Emre ULU

EKİM 2019

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LABİRENT KRETLİ ŞAFT TİPİ DOLUSAVAKLARIN SAYISAL ANALİZİ

Hazırlayan

Ali Emre ULU

Danışman

Prof. Dr. M. Cihan AYDIN

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. M. Cihan AYDIN

Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK

Doç. Dr. Ercan IŞIK

EKİM 2019

ONAY

Ali Emre ULU tarafından hazırlanan “**Labirent Kretli Şaft Tipi Dolusavakların Sayısal Analizi**” adlı tez çalışması 07/10/2019 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

Prof. Dr. M. Cihan AYDIN

(Başkan)

Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK

(Üye)

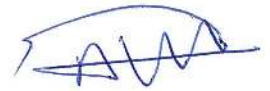
Doç. Dr. Ercan IŞIK

(Üye)

İmza



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 16/10/2019 gün ve 52/23 Sayılı kararı ile onaylanmıştır



Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

Enstitü Müdür V.

BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI

ETİK BEYANI

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Labirent Kretli Şaft Tipi Dolusavakların Sayısal Analizi**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 26/06/2019



Ali Emre ULU

ÖZET

LABİRENT KRETLİ ŞAFT TİPİ DOLUSAVAKLARIN SAYISAL ANALİZİ

Ali Emre ULU

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Cihan AYDIN

Ekim 2019, 80 sayfa

Barajların hidrolik açıdan en önemli elemanları olan dolusavaklar baraj tipine ve geçireceği debilere göre birçok farklı tipte tasarlanmaktadır. Bunlardan biri olan şaft tipi dolusavaklar özellikle baraj gövdesi üzerindeki yer darlığı, titreşim gibi nedenlerle tercih edilirler. Diğer bir dolusavak tipi olan labirent tipli savaklar ise aynı nap yüküyle daha fazla debi geçirirler. Bu tezde bu iki dolusavak tipinin birlikte kullanılmasıyla elde edilmiş melez bir dolusavak tipi olan yeni bir tip dolusavak elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylece her iki dolusavağın avantajlarının birlikte sunulduğu labirent kretli şaft tipi dolusavak tipi geliştirilmiştir. Bu amaçla, Diyarbakır ilinin Çermik İlçesinde Seyhan Çayı üzerinde yapımı devam eden Kale Barajı dolusavağı model alınmıştır. Öncelikle şaft tipli bu dolusavağın orijinal tasarımına göre sayısal modeli analiz edilmiştir. Sayısal modelin doğruluğunun testi için Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yürütülen fiziksel model test sonuçları kullanılmıştır. Daha sonra orijinal projedeki aynı geometrik ve hidrolik koşullar dikkate alınarak üç farklı trapez labirent savak kreti denenmiştir. Prototip ölçeğindeki sayısal analizlerde, bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan FLOW-3D programı kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalarda gerçek ve türbülanslı akımın dinamiği Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) hareket denklemlerinin çözümüyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, yeni geliştirilen labirent kretli şaft dolusavağın, geleneksel dairesel kretli şaft savaklara oranla çok daha iyi bir savaklama kapasitesine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Savak verimi açısından, düşük nap yüklerinde klasik tipe göre daha verimli çalışırken yüksek nap yüklerinde birim boydaki verimin düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte yüksek debiler geçiren küçük labirent tepe açlarına kavitasyon

açısından dikkat edilmesi gerekir. Bu tezden elde edilen sonuçlar ışığında, geliştirilen yeni tasarımın daha etkin bir hazne işletmesi sağlayarak baraj mühendisliği için iyi bir alternatif sunacağı, ayrıca kullanılan HAD yönteminin bu gibi hidrolik yapıların tasarımında oldukça etkili olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Kale Barajı, Şaft Dolusavak, Labirent Şaft Dolusavak, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Sayısal Analiz.



ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS OF LABYRINTH CRESTED SHAFT SPILLWAY

Ali Emre ULU

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineer

Supervisor: Prof. Dr. M. Cihan AYDIN

October 2019, 80 pages

The spillways, which are the most important hydraulic elements of the dams, are designed in many different types according to the dam type and flow rates. Shaft type spillways, which are one of them, are preferred especially for reasons such as space constraints on the dam body and vibration. Another spillway type, labyrinth type weirs, have more flow rate with the same nappe load. In this thesis, it is aimed to obtain a new type of spillway which is a hybrid spillway type obtained by using these two spillway types together. Thus, the labyrinth crest shaft type spillway type has been developed in which the advantages of both spillways are presented together. For this purpose, the spillway of Kale Dam, which is being constructed on Seyhan Stream in Cermik district of Diyarbakır, was taken as a model. First, the numerical model of this shaft type spillway was analyzed according to the original design. The physical model test results carried out by the State Hydraulic Works (DSİ) were used to test the accuracy of the numerical model. Then, considering the same geometrical and hydraulic conditions in the original project, three different trapezoidal labyrinth spillway crests were tested. FLOW-3D program, which is a Computational Fluid Dynamics (HAD) software, was used for numerical analysis on prototype scale. In numerical calculations, the dynamics of real and turbulent flow are realized by the solution of Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations of motion. As a result of the study, the newly developed labyrinth crest shaft spillway has a much better overflow capacity compared to traditional circular crest shaft spillways. In terms of spillway efficiency, it was found to be more efficient in low nappe loads compared to the classical type, while it was observed that the spillway per unit length decreased at high nappe loads. At the same time, small

labyrinth peak angles with high flow rates need to be considered for cavitation. In the light of the results obtained from this thesis, it can be said that the new design developed will provide a better alternative for dam engineering by providing a more efficient reservoir operation and also the HAD method used is very effective in the design of such hydraulic structures.

Keywords: Kale Dam, Shaft Spillway, Labyrinth Shaft Spillway, Computational Fluid, Dynamics (CFD), Numerical Analysis



TEŞEKKÜR

Tamamlamış olduğum bu yüksek lisans tez çalışmamın her evresinde değerli bilgi birikimini benden esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. M. Cihan AYDIN'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmamda kullanmış olduğum Akademik Lisanslı FLOW-3D program yazılımcılarına teşekkürlerimi sunarım.



ÖNSÖZ

İnsan için hayati öneme sahip olan su ve enerji kaynaklarının önemi, artan nüfus ile birlikte daha da belirginleşmektedir. Barajlar da bahsi geçen bu alanlardaki en önemli yapılardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. İnsanların su ve enerji ihtiyacının karşılanması için özellikle son yıllarda ülkemizde baraj ve baraj tesislerinin sayısında büyük bir artış gözlemlenmektedir. Bu tesislerin tasarımları da planlandıkları coğrafi ve fiziki konuma göre farklı dizayn, büyüklük ve işlevde olabilmektedir. Barajın tasarımı her nasıl olursa olsun, en önemli görevlerinden birisi memba bölgesinde bulunan suyu, güvenli bir biçimde mansap bölgesine taşımasıdır. Bu taşıma olayının en büyük aktörü de dolusavaklardır. Baraj için inşa edilen dolusavaklar farklı yapı ve tipte olabilmektedir. Bu tiplerden en dikkat çekici olanı kuşkusuz bu çalışmanın da konusu olan şaft, kuyu veya morning glory olarak da bilinen dolusavaklardır. Çalışma kapsamında daha önce dolusavak yapısı olarak kullanılmamış olan trapez kesitli labirent savaklar, klasik bir şaft dolusavak yapısına eklenerek göstereceği debi aktarım performansı ve şaft içi akım durumları, gelişmiş bir HAD yazılımı olan FLOW-3D tarafından sayısal ortamda belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ÖNSÖZ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER DİZİNİ	xii
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	7
2.1. Şaft Dolusavak Tasarım Özellikleri	7
2.2. Kale Barajı ve Dolusavağı	8
2.3. Fiziksel Model	10
2.4. Sayısal Model	14
2.4.1. Sayısal Model Geometrileri	17
2.4.2. Sayısal Model Ağ Yapısı ve Sınır Şartları	22
2.4.2.1. Orijinal Proje Durumu Ağ Yapısı ve Sınır Şartları	22
2.4.2.2. Yeni Tasarım Ağ Yapısı ve Sınır Şartları	24
3. BULGULAR	27
3.1. Orijinal Proje Durumu HAD Modeli Sonuçları	27
3.2. Ölçek Etkileri	35
3.3. Tasarlanan Proje Durumu HAD Modeli Sonuçları	36
3.3.1. Birinci Labirent Savak Tasarımı	36
3.3.2. İkinci Labirent Savak Tasarımı	45

3.3.3. Üçüncü Labirent Savak Tasarımı.....	52
3.3.4. Tasarımların Karşılaştırması	60
3.4. Kavitasyon Hesabı	64
3.4.1. Orijinal Durum Kavitasyon Hesabı.....	64
3.4.2. Tasarım I Kavitasyon Hesabı	68
3.4.3. Tasarım II Kavitasyon Hesabı.....	69
3.4.4. Tasarım III Kavitasyon Hesabı	71
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	74
5. KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Kale barajı dolusavağı karakteristikleri	10
2.2. Model ve prototip arasındaki benzeşim bağıntıları ve ölçek oranları	11
3.1. $D_{\text{ŞAFT}} = 5.00$ m için deneylerden ve HAD analizlerinden alınan savak su yükseklikleri ve ortalama debi değerleri	27
3.2. Orijinal durum deney ve HAD debi katsayısı tablosu.....	30
3.3. Orijinal ve Tasarım I'e ait savaklama uzunlukları ve oranları	38
3.4. Tasarım I'e ait su yüklerine göre debi değerleri.....	39
3.5. Orijinal ve Tasarım II'e ait savaklama uzunlukları ve oranları.....	47
3.6. Tasarım II'e ait su yüklerine göre debi değerleri	47
3.7. Orijinal ve Tasarım III'e ait savaklama uzunlukları ve oranları	54
3.8. Tasarım III'e ait su yüklerine göre debi değerleri	55
3.9. Orijinal durum ve tasarımlara ait su yüklerine göre debi değerleri.....	60
3.10. Orijinal Durum, Tasarım I, Tasarım II ve Tasarım III için Debi Katsayısı (C_d) değerleri	62
3.11. Şaft tüneline kaviteasyon indeksi hesap tablosu ($H = 2.02$ m)	67
3.12. Tasarım I için şaft tüneline kaviteasyon indeksi hesap tablosu ($H = 2.02$ m).....	69
3.13. Tasarım II için şaft tüneline kaviteasyon indeksi hesap tablosu ($H = 2.02$ m)	71
3.14. Tasarım III için Şaft tüneline kaviteasyon indeksi hesap tablosu ($H = 2.02$ m)	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çermik Kale Barajı İnşaatı	9
2.2. Kale Barajı derivasyon tüneli ve dolusavak enkesiti.....	9
2.3. Çermik Kale Barajı dolusavak modeli.....	13
2.4. Dolusavak şaft çapı $D_{Kret} = 11.00$ m için kesit şematik çizimi.....	13
2.5. Dolusavak yaklaşım kanalı ve şaftı	14
2.6. Orijinal proje durumu dolusavak geometrisi	18
2.7. Tasarım I (Trapez tepe açısı $\alpha = 30^\circ$)	18
2.8. Tasarım II (Trapez tepe açısı $\alpha = 22.5^\circ$).....	19
2.9. Tasarım III (Trapez tepe açısı $\alpha = 15^\circ$).....	20
2.10. Orijinal proje durumu sayısal model ‘FAVOR’ görüntüsü (0.15 m’lik kübik ağ).....	20
2.11. Tasarlanan sayısal model ‘FAVOR’ görüntüsü (0.45 m’lik temel ağ, 0.15 m’lik şaft ağı ve 0.125 m’lik ‘conform’ ağ).....	21
2.12. Kullanılan tasarım geometri ölçüleri (değerler metre cinsindendir)	22
2.13. Orijinal model ağ yapısı (ağ sayısı 13,824,868).....	23
2.14. Orijinal model sınır şartları (P: Specified Pressure; S: Symetry; O: Outflow)	23
2.15. Tasarım model sınır şartları (P: Specified Pressure; S: Symetry)	24
2.16. Tasarlanan I. model ağ yapısı (eleman sayısı: 4,998,675).....	25
2.17. Tasarlanan II. model ağ yapısı (eleman sayısı: 4,514,547)	25
2.18. Tasarlanan III. model ağ yapısı (eleman sayısı: 5,738,643).....	26
3.1. Orijinal durum deney ve HAD debi karşılaştırması	28
3.2. Orijinal durum deney ve HAD debi karşılaştırması (boyutsuz).....	29
3.3. Şaft ağzı akım koşullarının karşılaştırılması ($H=2.02$ m)	29
3.4. Orijinal durum deney ve HAD debi katsayısı (C_d) karşılaştırması	30
3.5. Orijinal durum deney ve HAD debi karşılaştırması	32
3.6. Orijinal model şaft çıkış (outflow) akım durumu	34
3.7. Tasarım I görüntüsü.....	37
3.8. Tasarım I’in sayısal simülasyondan bir görünüşü ($H = 2.02$ m)	37
3.9. Tasarım I ve orijinal durum HAD karşılaştırması	40
3.10. Şaft üzerinde akım kesiti alınan noktalar	40

3.11. Tasarım I şaft boyunca akım durumları ($H = 2.18$ m).....	41
3.12. Tasarım I şaft boyunca akım durumları ($H = 2.11$ m).....	42
3.13. Tasarım I şaft boyunca akım durumları ($H = 2.02$ m).....	43
3.14. Tasarım I şaft boyunca akım durumları ($H = 1.79$ m).....	44
3.15. Tasarım II görüntüsü	45
3.16. Tasarım II'in sayısal simülasyondan bir görünüşü ($H = 2.02$ m).....	46
3.17. Tasarım II ve orijinal durum HAD karşılaştırması.....	48
3.18. Tasarım II şaft boyunca akım durumları ($H = 2.18$ m)	49
3.19. Tasarım II şaft boyunca akım durumları ($H = 2.11$ m)	50
3.20. Tasarım II şaft boyunca akım durumları ($H = 2.02$ m)	51
3.21. Tasarım II şaft boyunca akım durumları ($H = 1.79$ m)	52
3.22. Tasarım III görüntüsü	53
3.23. Tasarım III'in sayısal simülasyondan bir görünüşü ($H = 2.02$ m)	54
3.24. Tasarım III ve orijinal durum HAD karşılaştırması	55
3.25. Tasarım III şaft boyunca akım durumları ($H = 2.18$ m)	56
3.26. Tasarım III şaft boyunca akım durumları ($H = 2.11$ m).....	57
3.27. Tasarım III şaft boyunca akım durumları ($H = 2.02$ m).....	58
3.28. Tasarım III şaft boyunca akım durumları ($H = 1.79$ m).....	59
3.29. Orijinal durum, Tasarım I, Tasarım II ve Tasarım III HAD karşılaştırması	61
3.30. Orijinal durum, Tasarım I, Tasarım II ve Tasarım III için Debi Katsayısı (C_d) karşılaştırması.....	63
3.31. $H = 2.02$ m'de orijinal durum şaft üzeri basınç değerleri.....	65
3.32. $H = 2.02$ m'de orijinal durum şaft üzeri hız değerleri.....	66
3.33. $H = 2.02$ m'de Tasarım I şaft üzeri hız değerleri	68
3.34. $H = 2.02$ m'de Tasarım II şaft üzeri hız değerleri	70
3.35. $H = 2.02$ m'de Tasarım II şaft üzeri basınç değerleri.....	70
3.36. $H = 2.02$ m'de Tasarım III şaft üzeri hız değerleri.....	72
3.37. $H = 2.02$ m'de orijinal durum şaft üzeri basınç değerleri.....	72

SİMGELER DİZİNİ

A_w	Akım kesit alanı
A_x, A_y, A_z	Sırasıyla x , y , ve z yönlerinde akıma açılan kısmi alanlar
C	H ve L ye göre belirlenen debi katsayısı
C_0	Savak yüksekliği (P), H ve R_s 'ye bağlı debi katsayısı
F	Froude sayısı
f_x, f_y, f_z	Viskoz ivmeleri
G	Kütle ivmesi
g	Yerçekimi ivmesi
G_x, G_y, G_z	Kütle ivmesi
H	Savak su yükü
k	Kinetik enerji
L	Uzunluk
N	Veri seti sayısı
P	Mutlak basınç
P_v	Buhar basıncı
Q	Akım debisi
R_{DIF}	Türbülans difüzyon terimi
Re	Reynolds sayısı
r_m	Düzenlenmiş referans yarıçapı
R_s	Savak giriş ağzı yarıçapı
R_{SOR}	Kütle kaynağı
T	Zaman
u, v, w	Sırasıyla x , y ve z yönlerindeki hız bileşenleri
V	Ortalama akım hızı
V_f	Akışkanın hacim oranı
W	Weber sayısı
Y_i	Debi katsayısı
α	Labirent savak açısı
ε	Türbülans yayılma oranı
λ	Geometrik ölçek oranı
ρ	Akışkanın yoğunluğu
ν	Kinematik viskozite

KISALTMALAR DİZİNİ

APE	Ortalama yüzde hata (Average Percent Error)
CFD	Computational Fluid Dynamics
DSİ	Devlet Su İşleri
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MAE	Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error)
RANS	Reynolds Avaraged Navier-Stokkes
RMSE	Karesel ortalama hata (Root Mean Square Error)
RNG	Renormalized Group Model
TAKK	Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol
VOF	Volume of Fluid

1. GİRİŞ

Dolusavaklar her ne amaçla inşa edilmiş olursa olsun bir barajın rezervuarına giren taşkın debilerinin tahliyesi ve hazne işletme amaçlı kullanılan hidrolik açıdan en önemli yapılarıdır. Barajlarda bulunan dolusavaklar, birçok farklı tasarıma, şekil ve büyüklüğe sahip olabilmektedir. Bu tasarımların her biri, yapımı planlanan baraja hem en güvenli ve hem de en ekonomik türden olması beklenmektedir. Dolusavak tipi belirlenirken rezervuara giren akımların hidrolojik karakteristikleri (maksimum taşkın debisi gibi) yanında baraj gövde tipi, yüksekliği, şut kanalının uzunluğu, yamaçların jeolojik ve morfolojik yapısı, maksimum hızlar ve kavitasyon durumu gibi birçok hususun göz önünde tutulması gerekir. Ayrıca baraj haznesinin debi ve seviye değişimleri ve hazne işletme politikaları göz önünde bulundurularak dolusavağın kontrollü (kapaklı) veya kontrolsüz (kapaksız) olmasına karar verilir. Örneğin beton ağırlık tipi yüksek bir barajda stabilite problemi olmayacağından genelde gövde üzerine açık kanal tipi ve kontrollü tip dolusavak tipi seçilirken, bir dolgu baraj üzerinde stabilite problemleri yaşanabileceğinden genelde jeolojik yapısına bakılarak sağ veya sol yamaç üzerinden dolusavaklar geçirilir. Dar ve yüksek barajlarda seviye değişimleri fazla olacağından genelde kontrollü tip dolusavaklar tercih edilirken geniş ve alçak barajlarda kontrolsüz dolusavaklar daha ekonomik olabilmektedir. Bununla birlikte çok dar ve yüksek vadilerde hem yer sorunu hem de yüksek düşününün oluşturacağı enerjinin kırılması sorunlarından tünel tipi dolusavaklar tercih edilebilmektedir (Ermenek barajı tünel dolusavakları gibi). Bazen de dolgu barajlarda gövde ve yamaç yapısının müsait olmaması ve ekonomik sebeplerden dolayı dolusavak yapısının yerleşiminin uygun bulunmaması durumunda dolusavağın giriş ağzı gövdeden uzak tutularak gövde altından geçirilebilir. Bu dolusavaklar kuyu (şaft) tipi dolusavaklar diye adlandırılmaktadır. Tezin konusunu oluşturan şaft tipi (*kuyu, morning glory veya shaft*) dolusavaklar, dairesel bir giriş yapısına sahip olup, genel olarak üç bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler: savak girişi, düşey şaft (kuyu) ve çıkış tünelidir. Şaft tipi dolusavaklar, genellikle vadinin dar ve barajın sağ veya sol kıyısında dolusavak yapımı elvermediği zaman tercih edilir. Mevcut derivasyon tünelleri kullanıldığı takdirde, şaft dolusavaklar, barajın sağ veya sol yanda ve gövde üstüne yerleştirilen klasik dolusavaklara kıyasla daha düşük maliyetle inşa edilebilmektedirler.

Şaft dolusavaklar genellikle baraj dipsavağına bir dirsek ile bağlanarak savaklanacak su yükünü güvenli bir şekilde mansap tarafına aktarırlar. Dairesel şekilli bu savaklarda, su, maksimum debiyi geçirecek şekilde tasarlanmış huniye benzer savak tepesi boyunca şafta akar.

Savak suya battığında, savak girişinde girdaplar oluşması muhtemeldir ve bu sebepten ötürü akım kararsız bir hale dönüşebilir. Bu kararsız akım, savakta yapısal titreşime ve hatta savağın suyu geri tepmesine neden olabilir. Bu olayı engellemek için bir takım önlemler ve ek yapılar tercih edilir. Akımın kararlı hale dönüştürülmesi amacıyla kullanılan en yaygın yöntemler: şaft giriş yapısının tasarımının değiştirilmesi veya şaft girişine perde duvarlar inşa edilmesi olarak uygulamada görülmektedir. Düşey şaft boyunca oluşması muhtemel kavitasyon hasarını önlemek için ise, şaftın dipsavağa bağlandığı dirsek noktasında bir havalandırıcı yerleştirilmesi bu tür dolusavaklarda yaygın bir uygulamadır. Şaft havalandırıcıları, kavitasyon riskinin olması beklenen alanlarda deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen veriler ışığında belirlenir. Konuyla ilgili olarak literatürde var olan çalışmalara baktığımızda, konunun güncelliği ve önemine dair bazı makaleler aşağıda sıralanmıştır.

Liu vd. (2018), kuyu tipi dolusavaklarda farklı bir giriş yapısı geliştirmiştir. Deneysel ve üç boyutlu sayısal olarak çalışılan kuyu dolusavakta, suyun kuyu yapısından dönerek düşmesini sağlamak amacıyla savak girişi vorteks oluşumunu sağlayacak şekilde, kret yüksekliğini de artırarak, dönme hareketi sağlayan bir giriş yapısı tasarlamıştır. Makalede, tasarlanan sütun savakta debi katsayısına etki eden faktörler: sütun savak sayısı, sütun savakların giriş ağzı ile yaptıkları açı, savak yükü ve sütun savak yüksekliği olarak belirtilmiştir. Çalışmada RNG k- ϵ ve standart k- ϵ türbülans modelleri ile analizler gerçekleştirilmiş ve deney verileri ile kıyaslanmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda RNG k- ϵ türbülans modelinin deney verilerine daha yakın ve uyumlu sonuçlar gösterdiği görülmüştür.

Zhao vd. (2006), düşük yükseklik-çap oranına sahip olan düşülerde vorteks (girdap) performansını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, yok denecek kadar bir eğime sahip yatay bir yaklaşım kanalı ile şaft birbirine bağlanmıştır. Çalışmada, duvar ve su jeti basınçlarının yanında, aynı zamanda su deşarj olurken çıkış tüneline meydana gelen hava sürüklenme oranı da ölçülmüştür. Sonuçta, elde edilen veriler analiz edildiğinde, hava sürüklenme oranı ile su jeti hızı arasında iyi bir uyum izlenmiştir. Buna ek olarak, bulunan hava sürüklenme oranının, su jetinin hızına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Chen vd. (2010), girdaplı düşüye sahip olan bir şaft tünelinin özelliklerini laboratuvar ortamında incelemiştir. L şeklinde modifiye edilmiş bir kanal ile birleştirilen şaft yapısı üzerinde birçok noktadan ölçümler alınmıştır. Akımla ilgili teorik bir analiz gerçekleştirilmiş ve teorik verilerden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla da uyumlu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bu tür düşülü yapılarda kavitasyon riskinin de göz önüne alınması gerektiğine atıf yapılan makalede, teorik analize göre deşarj arttığında kavitasyon riskinin de artacağı bildirildiğinden şaftlarda bu

riski azaltmak için havalandırmaların önemi vurgulanmış ve uygulamalarda dikkate alınması önerilmiştir.

Agiralioglu ve Müftüoğlu (1989), gerçekleştirdikleri çalışmada şaft tipi bir dolusavaklara, kapak tarzı bir başlık ekleyerek dolusavağın, sifon tarzı akım karakteristikleri göstermesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, şaft dolusavağın uzunluğu deneme yanılma yöntemi ile bir değer verilerek debi değeri hesaplanmıştır. Çalışmada ayrıca, debi deşarj katsayısına ek olarak kritik başlık ve şaft-kret basınçları için tasarım çizelgeleri de bu tarz bir sifon şaft dolusavağı için sunulmuştur.

Kabiri-Samani ve Borghei (2013), şaft tipi düşülerde meydana gelen vorteks oluşumu ve hava girişinin, özellikle güç kaybına ve kavitasyon hasarlarına sebep olduğu için, istenmeyen bir durum olduğunu belirtmiştir. İstenmeyen vorteks oluşumunu ve hava girişini engellemenin en etkili yöntemlerinden biri olarak da sisteme anti-vortekslerin uygulanması olduğu belirtilmiştir. Bu vortekslerin tek başlarına olduğu gibi; çift, dikey, açılı ve hatta yay şeklinde olabildiği çalışmada belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, şaft girişlerine yerleştirilen anti-vortekslerin su derinliğini azalttığı ve şafta giren suyun dönme yoğunluğu ve süresini azalttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda ayrıca, en uygun anti-vorteks sisteminin bulunması için başka tasarımlarında kullanılması gerektiği ve bunun için de daha fazla çalışma yapılması gerektiği yazarlar tarafından belirtilmiştir.

Enjilzadeh ve Nohani (2016), İran'da bulunan Alborz Barajı'nın şaft biçiminde tasarlanan dolusavak yapısını HAD analizi kullanarak boyutlandırmışlardır. Deneyler için kullanılan fiziksel modellerin hazırlanmasında yaşanan ve karşılaşılan problemlerin, sayısal analiz yazılımları kullanıldığında karşılaşılmayacağı vurgulanmıştır. Çalışmada, farklı özelliklere sahip sınır şartları, akım giriş koşulları ve ağ yapıları denenerek şaft dolusavakların akış durumlarını ve kontrol şartlarını incelemiştir.

Bu tezde kuyu tipi dolusavakların kretleri önceki çalışmalardan farklı olarak ilk kez labirent şeklinde tasarlanacağından planda labirent şekilli dolusavaklarla ilgili literatürdeki çalışmalara bakmakta fayda vardır. Tullis vd. (1995), labirent savaklarla ilgili kapsamlı bir çalışma yürütmüş, toplam özgül enerji, savak yüksekliği ve kalınlığı, kret şekli, tepe konfigürasyonu ve yan duvar açılarını gibi parametrelerin dikkate alındığı tasarım bir tasarım prosedürü geliştirmişlerdir. Daha sonra Crookston ve Tullis (2012a), Crookston ve Tullis (2012b), Khode vd. (2012), Crookston ve Tullis (2013), Dabbling vd. (2013), Bruce vd. (2016), Bilhan vd. (2016) gibi araştırmacılar labirent savaklarla ilgili çalışmalar yürütmüşlerdir. Aydın vd. (2019) labirent savaklarla ilgili yürüttükleri sayısal modelleme sonuçlarının deneysel verilerle çok iyi bir şekilde uyduğu göstermiş ve trapez labirent savakların debi katsayılarının

trapez yan duvar açısına göre değişimlerini sayısal modellerle incelemişlerdir. Trapez yan duvar açısı $15\sim 37^\circ$ arasında yürütülen analizler sonucunda trapez açısının azalmasıyla (kret uzunluğunun artmasıyla) savaklama miktarının artmasıyla birlikte nap sıkışması nedeniyle debi katsayısının azaldığı görülmüştür. Bu etkinin yüksek nap yüklerinde daha belirgin olduğu görülmektedir.

Emiroğlu vd. (2010), planda labirent şeklini ilk kez yan savaklara uygulamış toplamda 2830 laboratuvar test sonucuna bağlı olarak yürüttükleri kapsamlı çalışmada labirent yan savak diye adlandırdıkları bu savak tipinin geleneksel yan savaklara kıyasla oldukça yüksek bir savaklama verimine (1.5-4.5 kat) sahip olduğunu göstermişlerdir. Emiroğlu ve Kaya (2011), labirent yan savakların debi katsayısını belirlemek amacıyla; farklı Froude sayıları, farklı savak yükseklikleri, farklı savak açıları ve farklı savak uzunlukları kullanarak toplam 672 deney gerçekleştirmiştir. Çalışmadan elde edilen verilere ışığında, labirent yan savaklardan elde edilen debi katsayısının dikdörtgen kesitli yan savaklara kıyasla 1.5 ila 5.0 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, çalışmada 16° , 22.5° ve 30° 'lik açılarda farklı akım koşulları incelenmiş ve kıyaslamalar yapılmıştır. Yapılan kıyaslamalarda, debi katsayısının, boyutsuz bir parametre olan savak kret uzunluğunun ve Froude sayısının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Labirent yan savaklar daha sonra birçok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak çalışılmıştır (Emiroğlu ve Kaya (2011), Borghei ve Parvaneh (2011), Aydın (2012), Borghei vd. (2013), Aydın ve Emiroğlu (2013), Emiroğlu vd. (2014), Aydın ve Emiroğlu (2016)). Tüm bu çalışmalara dayalı olarak genel olarak söylenebilir ki planda labirent kret şekli karşıdan alışı ve yan savak tipi dolusavakların debi performanslarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Literatürde, labirent kretli kuyu tipi dolusavaklara daha önce rastlanmadığı görülmektedir.

Literatürdeki bu çalışmalar aynı zamanda, bu tür savakların modellenmesinde deneysel çalışmaların yanında son yıllarda sayısal modellemelerin de önemini ortaya koymaktadır. Aydın vd (2015), düzgün bir açık kanal üzerine yerleştirilmiş sifon tipli bir yan savağın sayısal modelini çalışmış ve FLUENT yazılımı ile yürütülen çalışma sonuçlarının deneysel ölçümlerle oldukça uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Zhang vd. (2011), hidroelektrik santrallerde yüksek basınçta akan akımın sonucunda görülebilen kavitasyon hasarının hava girişi yardımıyla ekonomik olarak çözülebileceğini ifade etmiştir. Kompleks bir akımı, realizeable $k-\epsilon$ türbülans modeli (Volume of Fluid (VOF)) ve Mixture türbülans model (hava-su karışım modeli) kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle analiz etmiştir. Eldeki veriler ile laboratuvardan elde edilen sonuçla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, iki farklı yöntemle elde edilen verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, hava-su karışımı modelinden elde edilen sonuçların, realizeable $k-\epsilon$ türbülans model sonuçlarına göre su derinliği

ve basınç dağılımı boyunca hava konsantrasyon değişiminde daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ölçekli modellerin oluşturacağı ölçek etkileridir. Bu konuda geçmişte birçok araştırmacı önemli tespitler yapmış olmakla birlikte son yıllarda Pfister ve Chanson (2014), iki fazlı akım var olan prototip verilerinin deneysel ortama aktarılırken belli bir ölçek oranında modellenmesi sonucu doğacak ölçek etkilerini belirtmiştir. Bu etkileri bertaraf etmek için kullanılan ve halen uygulanmakta olan yöntem ve faktörlere atıf yapılarak bunlara ek olarak da bazı yeni bazı faktör ve yöntemler de geliştirmek amaçlanmıştır. Makalede ayrıca iki fazlı akımların modellenmesinde Froude, Weber ve Reynolds sayılarının hem prototip hem de model deneylerinde aynı olması gerektiği belirtilmiştir. Bu bilgiye ilaveten, tam boyutlarda çalışılmadığında böyle bir olasılığın tam olarak uygulanamayacağı da belirtilmiştir. Bu sebeple Morton sayısının önemine ve hesaplamaların doğru olduğuna emin olunması gerektiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak çalışmada, deneysel araştırmaların sonuçlarının, ölçek etkilerini doğru hesaplamak için uygun kriterleri seçmenin kritik bir durum olduğu belirtilmiş ve kabarcık büyüklüğü ve türbülans ölçekleri gibi parametrelerin de, bazı laboratuvar modellerinde (2:1 ila 3:1) ölçek etkilerinden etkileneceği söylenmiştir.

Trapez labirent savakların performansının klasik tarzda tasarlanan savaklardan çok daha fazla olduğu literatürde bulunan çalışmalar tarafından ispat edilmiştir. Bu sebeple, trapez labirent şeklinde tasarlanacak bir şaft dolusavağın performansının ne olacağı, yan savak olarak denendiğinde elde edilen yüksek debi katsayısına bu tarz bir yapı ve şekilde de ulaşıp ulaşılamayacağı merak uyandırmıştır. Bu doğrultuda, öncelikle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve deney karşılaştırılması için Kale Barajı dolusavağı örneği çalışılmıştır. Örnek olarak alınan Kale Barajı şaft tipi dolusavak yapısının 1/1 prototip ölçeğinde fiziksel model deneylerine de uygun olarak tasarlanan üç boyutlu (3B) sayısal modeli hazırlanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar DSİ tarafından daha önce gerçekleştirilen model deney verileriyle karşılaştırılarak kıyaslanmıştır. Daha sonra ise aynı hidrolik koşullarda hazırlanan trapez şeklinde üç farklı geometride dolusavak giriş yapısı modellenmiş ve bu modeller arasındaki akım farkları tartışılmıştır.

Bu tezde, şaft tipi dolusavakların su giriş yapısı, geleneksel (dairesel) yöntemden farklı olarak labirent olarak tasarlanmıştır. Labirent savaklar, günümüzde açık kanallarda ve şaft tipinin dışında kalan yüzeysel akışlı dolusavaklarda yaygın bir şekilde su alma yapısı olarak kullanılmaktadır. Ancak, trapez labirent savaklar, bu tezde kullanıldığı şekliyle, şaft tipi dolusavaklarda daha önce kullanılmamıştır. Bu sebeple, tezde, en önemli baraj tesislerinden biri

olan dolusavak ve havalandırma yapılarının yaygın olarak kullanılan bir çeşidi olan şaft tipi dolusavakların, trapez labirent tasarım ve farklı hidrolik koşulları altında gerçekleşen akım performanslarını sayısal modelleme yöntemi ile belirlenmiş ve çözüm önerileri sunulmuştur. Bu tip dolusavak tasarımının aynı zamanda şaft içinde oluşabilecek vorteks etkilerini de zayıflatacağı beklenmektedir.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Şaft Dolusavak Tasarım Özellikleri

Şaft dolusavakların projelendirilmesi, şaft üzerinden düşen akışı klasik ogee tarz bir krete sahip dolusavaklarda var olan karakteristik özelliklere benzer şekilde yapılır. Bu iki savak arasındaki farka neden olan etken, dairesel bir krette debi katsayısının (C_0) bağlı olduğu değişkenlerdir. Dairesel krette, şaftın üzerinden geçen akım düşey doğrultuda, şaftın kenarlarına yapışarak akışını sürdürür. Kretin üzerinden geçen debi arttıkça, halka şeklindeki nap, daha kalın hale gelerek, nap akışı, dikey bir jet halini alarak birleşir. Halka şeklindeki su jetinin birleştiği bu noktaya çatal (crotch) adı verilir. Akımda bu tür bir jet oluşuktan sonra, ağ üzerinde bir kaynama bölgesi oluşmaya başlar. Kaynama denilen bu bölge yüksek debilerde ve ağ bölgesinin giriş ağzına yakın olduğu durumlarda kademeli olarak yükselir. Su napının yüksek olduğu durumlarda, ağ ve kaynama bölgesi taşabilir ve bu durumda su yüzeyinde sadece hafif bir çöküntü ve girdap gözlenir. Ağ ve kaynama formundan sonra, bu durum savağı etkilemeye başlar ve sonuçta kret boğulur. Eğer kret profili ve geçişi keskin tepeli dairesel bir savak üzerinden ağ durumu oluşmadan serbest olarak akıyorsa, kretin üzerindeki ve geçiş boyunca akış için debi hesabı aşağıdaki ifade kullanılarak bulunur (Blair and Rhone 2006).

$$Q = CLH^{3/2} \quad (2.1)$$

Burada:

H : nap yükü (dairese keskin tepeli savakların uç noktasına ölçülen yükseklik),

L : Kret uzunluğu (kretin üst tarafındaki çevre boyunca veya seçilen bazı başka referans çizgileri boyunca belirli bir ölçüm noktasıyla ilgili uzunluk),

C : H ve L ye göre belirlenen debi katsayısı.

Şaft dolusavakların dairesel bir krete sahip olduğu düşünüldüğünde yukarıdaki denklem şu hali alır:

$$Q = C_0(2\pi R_s)H_0^{3/2} \quad (2.2)$$

Burada:

R_s : Şaft giriş ağzı yarıçapı,

C_0 : Savak yüksekliği (P), H_0 ve R_s 'ye bağlı debi katsayısı.

2.2. Kale Barajı ve Dolusavağı

DSİ 10. Bölge Müdürlüğüne bağlı olarak Diyarbakır'ın Çermik ilçesinde yapımı süren Kale Barajı, Seyhan Çayı üzerinde sulama amacıyla inşa edilmektedir. Ön yüzü beton kaplı (ÖYBK) kaya dolgu olarak tasarlanan barajın;

- Dolgu kret kotu 809.00 m,
- Parapet üst kotu 811.00 m,
- Barajın talvegden yüksekliği 75.00 m ve
- Barajın temelden yüksekliği 77.00 m olarak belirlenmiştir.

Barajın dolusavağı sağ sahilde projelendirilmiştir. İnşa edilecek şaft mevcut derivasyon tüneline bir dirsek yapısı kullanılarak bağlanmıştır. Projede, olası en büyük taşkın debisi $Q_{OEBT}=189.70 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Dolusavak olarak kullanılacak olan şaftın çapı 5 m olarak belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak hesaplanan maksimum su yükü $H_{maks}=809.47 \text{ m}$ olarak hesaplanmıştır. Çermik Kale Barajı genel görünümü Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Dolusavağın projede yerleşim durumu ve derivasyon tüneline bağlantı enkesiti ise Şekil 2.2 de gösterilmiştir. Barajla ilgili verilen bilgilere ek olarak, Kale Barajı ve dolusavağı ile ilgili diğer bazı özellikler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.



Çizelge 2.1. Kale Barajı dolusavağı karakteristikleri (DSİ, 2016)

Yeri	Sağ sahil
Tipi	Kontrolsüz şaft dolusavak (morning glory)
Yaklaşım Kanalı Kotu	797.00 m
Eşik Kotu	807.25 m
Şaft Çapı	5.00 m (Dairesel beton kaplamalı)
Şaft Yüksekliği	56.91 m
Şaft Kesit Alanı	19.64 m ²
Tünel Çapı, Tipi	5.00 m (Ters U beton kaplamalı)
Tünel Uzunluğu	185.76 m
Tünel Kesit Alanı	22.32 m ²
Tasarım Debisi Q_{oebt} (Ötelenmiş)	189.70 m ³ /s
Maksimum Su Kotu	809.47 m
Maksimum Su Yüğü (H_o)	2.22 m

2.3. Fiziksel Model

Çermik Kale Barajı dolusavak modellemesi DSİ Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı'nın isteği doğrultusunda DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı, Hidrolik Model Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'nde 2016 yılı içerisinde gerçekleştirilmiştir (DSİ, 2016). Hidrolik model deneylerinde prototip ile model arasındaki dinamik benzeşimleri sağlamak bu tarz deneylerde en önemli noktalardan biridir. Bu benzeşimi elde etmek için de hazırlanacak model ile prototip geometrilerinin ve dinamik basınç oranlarının bir uyum içerisinde olması gerekmektedir. Bu benzeşimlerin sağlanması için Froude benzeşim kuralları göz önünde tutularak yapılan deneyde model ölçeği 1/20.83 olarak belirlenmiş ve akımın Froude koşullarını sağlaması için gereken hız, debi, zaman ve pürüzlülük kriterleri belirlenmiştir.

Çalışma için belirlenen bu oranlar Çizelge 2.2 de gösterilmiş olup, Kale Barajı için laboratuvarıda orijinal proje durumuna göre hazırlanan deney model çizimi ise Şekil 2.3'de sunulmuştur. Şekil 2.4' te $D_{Kret} = 11.00$ m için hazırlanan dolusavak kesitinin şematik çizimi ve Şekil 2.5' de ise laboratuvarıda hazırlanan dolusavak modelinin memba kısmından genel görünümü verilmiştir.

Çizelge 2.2. Model ve prototip arasındaki benzeşim bağıntıları ve ölçek oranları (DSİ, 2016)

Fiziksel Büyüklük	Birim	Benzeşim Bağıntısı	Ölçek
Uzunluk - L	m	$K_L=L_P/L_M$	20.833
Hız - U	m/s	$K_U=U_P/U_M=K_L^{1/2}$	4.564
Debi - Q	m ³ /s	$K_Q=Q_P/Q_M=K_L^{5/2}$	1981.057
Zaman - T	s	$K_T=T_P/T_M=K_L^{1/2}$	4.564
Pürüzlülük - n	s/m ^{1/3}	$K_n=n_P/n_M=K_L^{1/6}$	1.659

Prototip ölçülerinin modele uygulanması için literatürde belirtilen bazı ölçek bağıntıları bulunmaktadır. Bu bağıntılar, bizlere modelde kullanılacak Froude benzerlik ölçütlerini sağlamaktadır. White (2003), dinamik benzeşimin tam olarak sağlanabilmesi için model ve prototip için Reynolds ve Froude benzeşimlerinin aynı anda sağlanmasını gerektiğini aşağıdaki bağıntılarla göstermiştir.

$$Re_m = Re_p \gg \frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p} \quad (2.3)$$

$$Fr_m = Fr_p \gg \frac{V_m^2}{g L_m} = \frac{V_p^2}{g L_p} \quad (2.4)$$

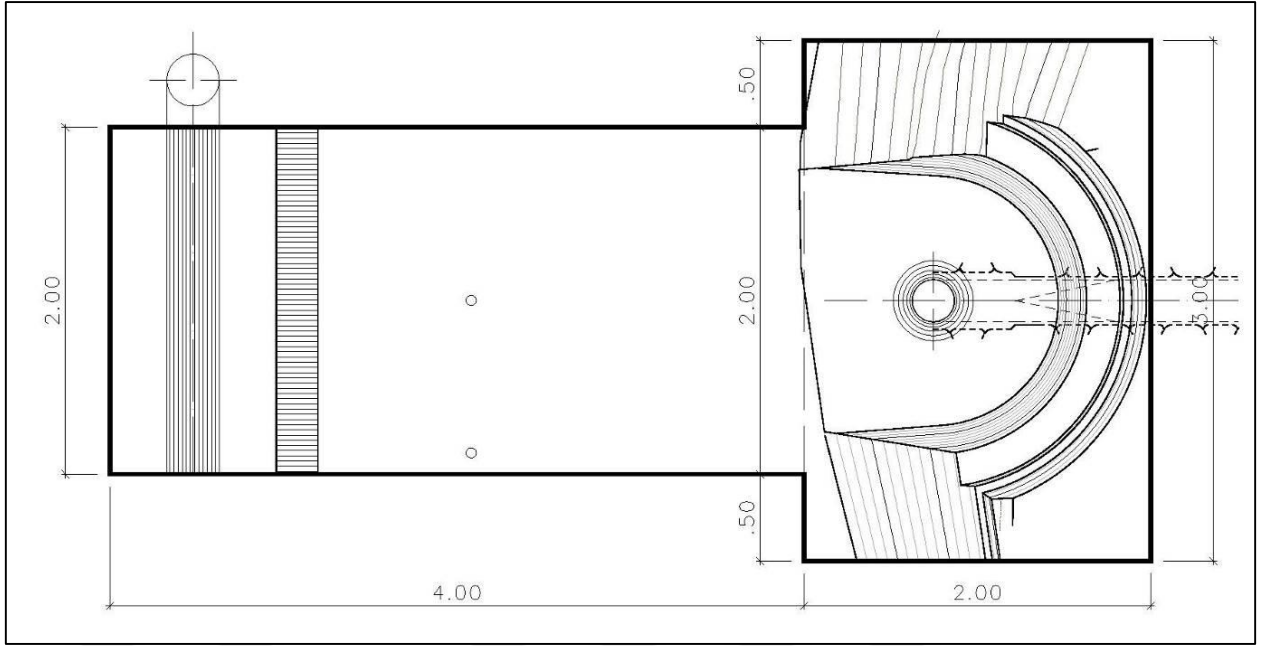
Bu eşitliğin sağlanabilmesi için kinematik viskozite oranı aşağıdaki gibi tekrar yazılması gerekmektedir:

$$\frac{\nu_m}{\nu_p} = \frac{L_m}{L_p} \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m}{L_p} \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^2 = L_r^{3/2} \quad (2.5)$$

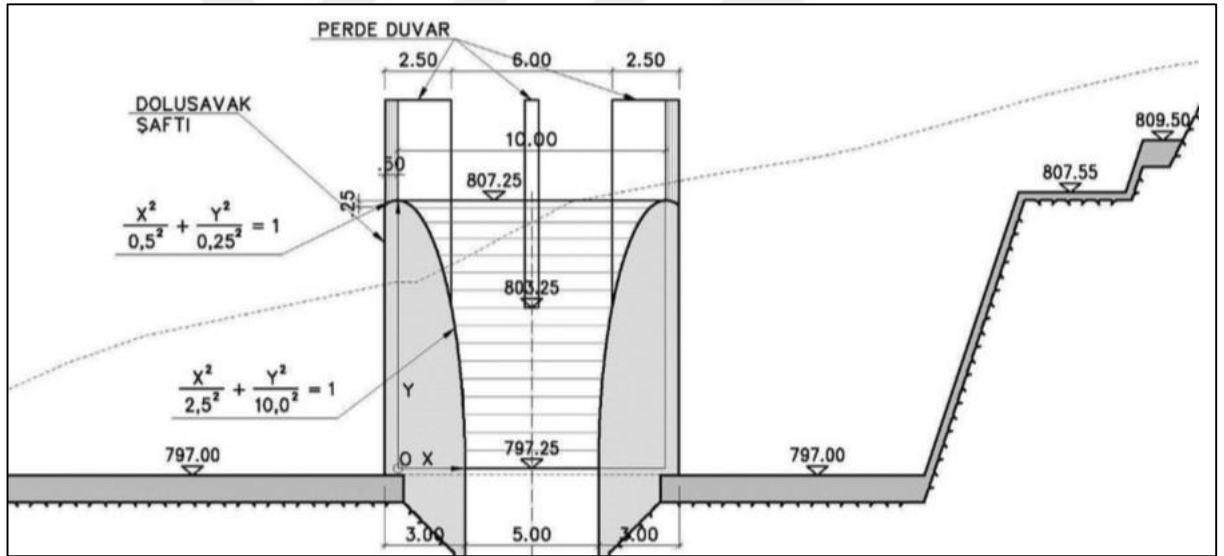
Tam dinamik benzeşimin sağlanabilmesi için Denklem (2.3)'ten anlaşılabacağı üzere model ve prototipteki akışkanların viskozitelerinin farklı olması gerektiği anlaşılmaktadır. Diğer bir değişle model deneylerinde viskozitesi suyunkinden daha yüksek bir akışkanın kullanılması gerekir. Ancak laboratuvar ortamında bunun yapılması ekonomik açıdan çok zor hatta imkansızdır. Bu nedenle, serbest yüzeyli akışların ön planda olduğu model deneylerinde genelde yerçekim ve atalet kuvvetlerinin hakim olduğu düşüncesiyle Froude modelleri kullanılır. Viskoz

etkilerinin ihmale edildiği bu modellerde özellikle yüksek hızlı ve türbülanslı akımlarda, hava-su karışımı gibi çok fazlı akımlarda ve viskozitenin alt tabaknın ekili olduğu kapalı (basınçlı) akımlarda önemli ölçek etkileri görülebilmektedir. Bu nedenle bu gibi akım modellerinde ölçek etkilerinden kaçınmak için model ölçeklerine veya bundan kaçınılamıyorsa oluşabilecek ölçek etkilerinin varlığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ölçek etkileri üzerinde literatürde birçok araştırma yapılmış olup ölçek etkilerinden kaçınmak için gerekli minimum ölçekler ve ölçek etkisi beklenmesi durumunda bu etkilerin miktarını veren birçok ampirik ifade elde edilmiştir. Bu tezde kullanılacak olan DSİ tarafından yürütölüş 1/20 ölçekli modelde ölçek etkilerinin oluşması kaçınılmazdır. Kullanılacak sayısal modelde ise 1/1 ölçeğı kullanılacağından sayısal modellerde ölçek etkileri söz konusu olmayacaktır. Bu ölçek etkileri de göz önünde bulundurularak yine de deneysel veriler sayısal modellerin doğrulamasında kullanılacaktır.

Kale Barajı dolusavağı kati projesinde dolusavak kret çapı 9.6 m olarak planlanmıştır. Proje model deneylerinin yapımı için laboratuvara gönderildiğinde, önce belirtilen bu 9.6 m'lik çapa göre ölçeklendirilmiş ve deneyler gerçekleştirilerek akım koşulları izlenmiştir. Belirlenen bu çapın 189.70 m³/s'lik maksimum debide rezervuar su seviyesinin 809.47 m olması gerektiğı hesaplanmıştır. Ancak deneyden elde edilen veriler kati projeden hesaplanan veriler ile uyuşmamış, rezervuar su seviyesi 809.72 m olarak gözlemlenmiştir. Bu değeri, hesaplanan değeri 25 cm daha yüksektir. Yapılan deneyler ışığında 9.6 m'lik kret çapı düşük debilerde yeterli olmasına rağmen, yüksek debilerde giriş ağzında akım kıvrılması ve havalandırma eksikliği sebebiyle rezervuar su seviyesinde şiddetli salınımlar gözlemlenmiştir. Oluşan bu salınımları bertaraf etmek için şaft yapısının üzerine vorteks önleyici perde duvarlar yerleştirilerek deneyler tekrarlanmıştır.



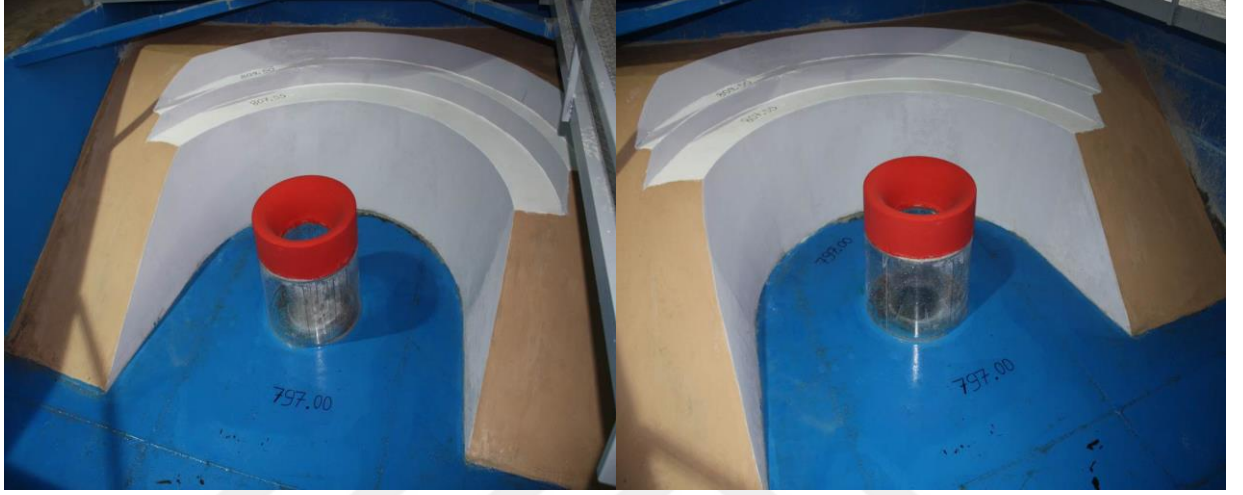
Şekil 2.3. Çermik Kale Barajı dolusavak modeli (DSİ, 2016)



Şekil 2.4. Dolusavak şaft çapı $D_{Kret} = 11,00$ m için kesit şematik çizimi (DSİ, 2016)

Ancak uygulanan bu teknik istenen sonuçları karşılamamış, şaft ağzında salınımlar ve boğulmalar tekrar gözlemlenmiştir. Şaft girişinde oluşan bu olumsuz ve istenmeyen durumun ve havalandırma probleminin, kati projede belirlenen 9.6 m'lik şaft giriş ağzının çapı arttırılarak çözülmesi yoluna gidilmiştir. Kati projede belirlenen savağın kret çapı 9.6 m olarak düşünüldüğünde savak kret yarıçapı $R_s = 4.8$ m olmaktadır. Savak yüksekliği (P) ise 10.25 m dir. Bu veriler altında maksimum P/R_s oranı düşünüldüğünde savak giriş ağzı çapının (kret çapı) maksimum 10.25 m olması gerekmektedir. Bu ise %6'lık bir artışa eşit olduğundan ve bu

büyükliğin de istenen verimi sağlamayacağı düşünüldüğünden, şaft giriş çapı 11.0 m, 11.5 m ve 14.0 m olan modeller denenmiştir (DSİ, 2016). 11.0 m ve 11.5 m’lik deneylerde bulunan sonuçlar birbirine çok yakın olduğu için 11.5 m’ye ait deney sonuçları raporda yer almamıştır. Yapılan deney sonunda 11.0 m ya da 14.0 m’lik şaft giriş ağzının projede tercih edilmesi gerektiği belirtilerek bu açıklığa ait deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu tezde de 11.0 m’lik giriş ağzı açıklığına ait veriler kullanılarak üç boyutlu model şekillendirilmiştir.



Şekil 2.5. Dolusavak yaklaşım kanalı ve şaftı (DSİ, 2016)

2.4. Sayısal Model

Bu tezde kullanılan yöntem Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)’dir. Gelişmiş bir teknik olan HAD yöntemi, sıkıştırılabilen ve sıkıştırılamayan akışkanların teorik ve yarı ampirik dinamik denklemlerine çeşitli sayısal yöntemler ve hesaplama araçları kullanılarak çözmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojilerinin son yıllarda HAD yönteminde de büyük bir gelişme göstermesi sayesinde karmaşık sistemlerin ve çok fazlı akımların hidrodinamiği de analiz edilebilmektedir. Diğer türde bulunan akım modellerine göre oldukça zor ve karmaşık bir hale sahip olan çok fazlı akışkan modelleri ve serbest yüzeyli akımların sayısal modellenmesi hacim oranları metotları gibi (VOF: Volume of Fluid) yöntemler sayesinde hava ve su arasındaki serbest yüzey net olarak belirlenebilmektedir. Ancak uygulamada sıklıkla karşılaşılabileceği üzere, dolusavak havalandırma uygulamaları için hava ve su karışımlarını ve fazlar arası oluşacak kayma gerilmelerini de dikkate alabilen daha karmaşık modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepten ötürü, ilk önce yöntem olarak Eulerian, karışım (mixture) gibi çok fazlı akım modellerinden sistem için en uygun olanı tespit edilerek kullanılması düşünülmüştür.

Ancak modeli deney sonuçlarına kalibre etme noktasında çok fazlı akımlar istenen sonuçları göstermemiştir. Modeli kalibre edebilmek için farklı sayıda farklı akım modelleri denenmiştir. Bu modeller: çift fazlı akım (two-phases) modeli ve hava sürüklenme (air entrainment) modelidir. Bu modeller denenirken sınır şartları da modellere göre ayarlanmıştır. Ancak, denen her iki model de deneylerden elde edilen debi değerlerine istenilen derecede yakınsamamıştır. Deneylere en fazla yakınsanan durum tek fazlı sabit su yüksekliği seçilerek elde edilen modelde gözlemlenmiştir. Bu sebeple, deney sonuçlarına en yakın değerler bulunan bu model, HAD analizlerinde kullanılmıştır.

Bu tezde, birçok hassas mühendislik alanlarında da oldukça yaygın olarak kullanılan FLOW-3D sayısal analiz yazılımı kullanılmıştır. Genel amaçla kullanılan bu yazılım, gelişmiş bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımıdır. FLOW-3D diğer HAD yazılımları gibi akışkan hareketini belirlemek için bir takım temel akışkan denklemini sayısal olarak çözmesiyle bilinmektedir. Akışkan hareketi, lineer olmayan bu tür denklemlerin çözümüyle yönetilir. Akışkan hareketinin temel denklemleri FLOW-3D gibi programlar yardımıyla sonlu elemanlar veya hacimler kullanılarak kolaylıkla modellenenbilmektedir. Bu amaçla, FLOW-3D’de kullanılan akışkanın temel denklemleri aşağıda verilmiştir (Flow Science 2014).

Kütle süreklilik denklemi:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho u A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \varepsilon \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2.6)$$

Burada:

V_f : Akışkanın hacim oranı,

ρ : Akışkanın yoğunluğu,

R_{DIF} : Türbülans difüzyon terimi,

R_{SOR} : Kütle kaynağıdır.

Bunlara ek olarak, FLOW-3D’de kullanılan koordinat sistemlerinde (x , y , z , veya r , R_{SOR} , z), hız bileşenleri (u , v , w)’dir. Denklemdaki A_x , x yönündeki fraksiyonel akış alanıdır, A_y ve A_z ise sırasıyla y ve z yönlerindeki akış için benzer alan fraksiyonlarıdır. Denklemdaki R katsayısı aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi koordinat sisteminin seçimine bağlıdır.

$$\frac{\partial}{\partial y} \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (2.7)$$

Bu denklemin son hali aşağıda ifade edilmiştir (Flow Science, 2014):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{r_m}{r} \frac{\partial}{\partial y} \quad (2.8)$$

Burada:

$$y = r_m \theta,$$

r_m : düzenlenmiş referans yarıçapı'dır.

Kütle süreklilik denkleminde ek olarak FLOW-3D'de akışkan hareketinin momentum denklemleri:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \varepsilon \frac{A_y v^2}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \varepsilon \frac{A_y u v}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2.9)$$

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 kayıpları,

$U_w = (u_w, v_w, w_w)$: Kütle kaynağının hızı,

$U_s = (u_s, v_s, w_s)$: Kütle kaynağının kendisine göre kaynağın yüzeyindeki akışkanın hızını ifade etmektedir. Bu değer her bir kontrol hacmi için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$U_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} n \quad (2.10)$$

Bu denklemde:

dQ : Toplam debi,

ρ_Q : akışkanın yoğunluğu,

dA : hücredeki kaynak yüzeyinin alanı,

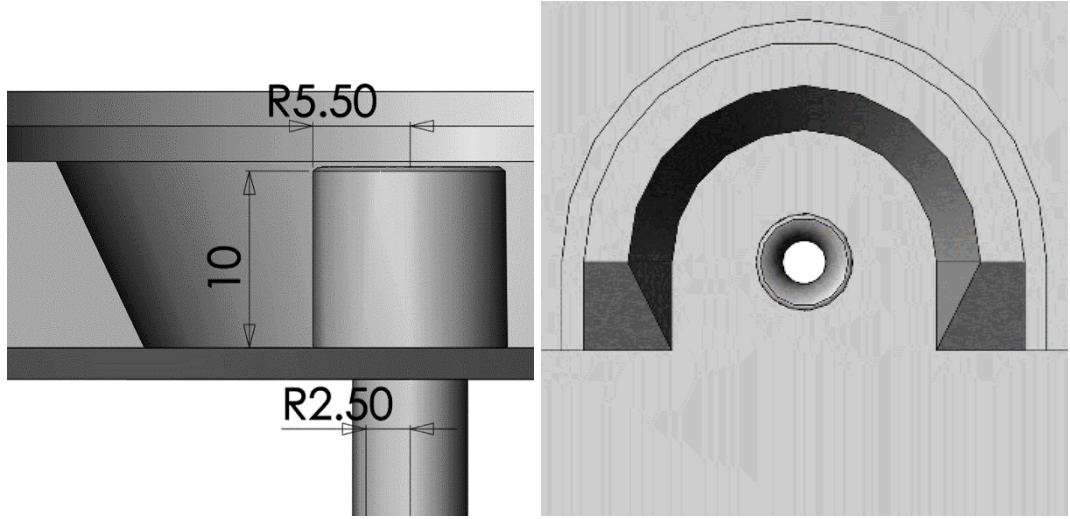
n : yüzeye dıştan normaldir.

Denklem (2.10)'da eğer $d = 0.0$ ise durgun basınç, $d = 1.0$ ise, kaynak statik basınç tipindedir. Durgun basınç durumunda akışkanın hızının 0 olduğu varsayılır. Statik basınç durumunda ise akışkan hızı, kütle akış hızı ve kaynağın yüzey alanı kullanılarak hesaplanır.

Sayısal model uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli noktalardan birisi de bazı serbest yüzeyli akımlarda, oluşması muhtemel türbülans veya akım koşullarından doğan yüzeyden hava girişi durumudur. Şaft dolusavaklarda akım şaft girişinde türbülans ve vorteksler oluşturarak aşağı düşmektedir. Bu sebeple, hava girişi durumu, şaft tipi dolusavaklarda yüksek olasılıkla karşılaşılabilen bir durumdur.

2.4.1. Sayısal Model Geometrileri

Sayısal modelin doğrulaması ve kalibrasyonunu yapmak için öncelikle Kale Barajı şaft tipi dolusavağın sayısal geometrisi orijinal projesindeki prototip boyutlarına göre üç boyutlu olarak hazırlanmıştır. Şekil 2.13'da orijinal proje durumuna göre hazırlanan bu model gösterilmektedir. Daha sonra bu dolusavağın dairesel kretine üç farklı boyutta labirent savak ekleyerek oluşturulmuş ve bu tezde ilk kez sunulmuş olan labirent şaft tipi savaklar prototip boyutlarında oluşturulmuştur (Şekil 2.14, Şekil 2.15 ve Şekil 2.16). Bu yeni savak modellerinin performanslarının orijinal şaft tipiyle karşılaştırılabilmesi için labirent savakların kret kotu, orijinal şaft dolusavağın kret kotuyla aynı alınarak ayarlanmıştır. Sayısal model çözümlerinde çözüm ağının kalitesi, verilerin doğru ve sağlıklı bir şekilde alınması açısından oldukça önemlidir. Diğer yandan model için kullanılacak çözüm ağının sıklığı işlem süresini önemli ölçüde artırabilmektedir. Gereğinden fazla yüksek çözünürlüklü ağ yapısı ise çözüm zamanını gereksiz yere uzatabileceği gibi sayısal hataların da artmasına neden olabilir. Bunun yanında çözüm ağının yetersiz çözünürlükte olması hazırlanan geometrinin HAD programı tarafından tam ve doğru olarak algılanamamasına sebebiyet verecektir. Bu nedenle en iyi sayısal ağ yapısı için bir optimum ağ boyutunun belirlenmesinde fayda vardır.

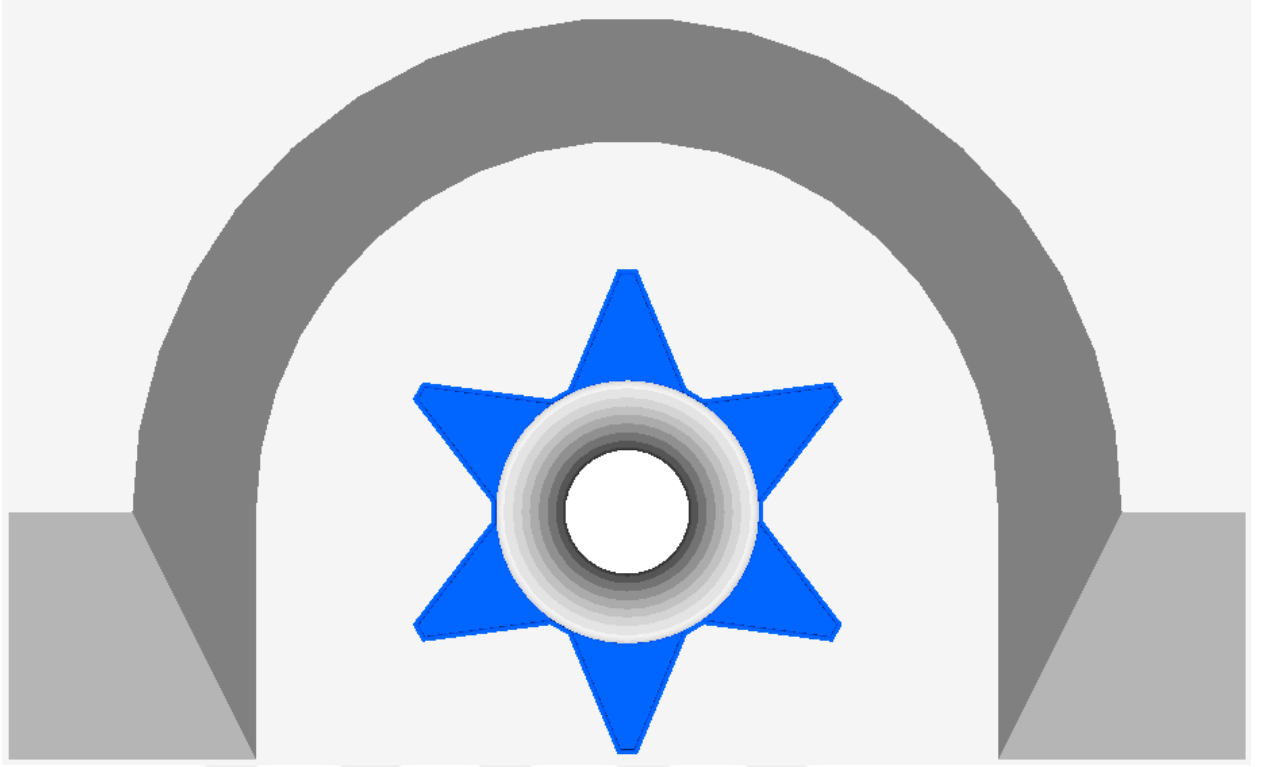


Şekil 2.6. Orijinal proje durumu dolusavak geometrisi

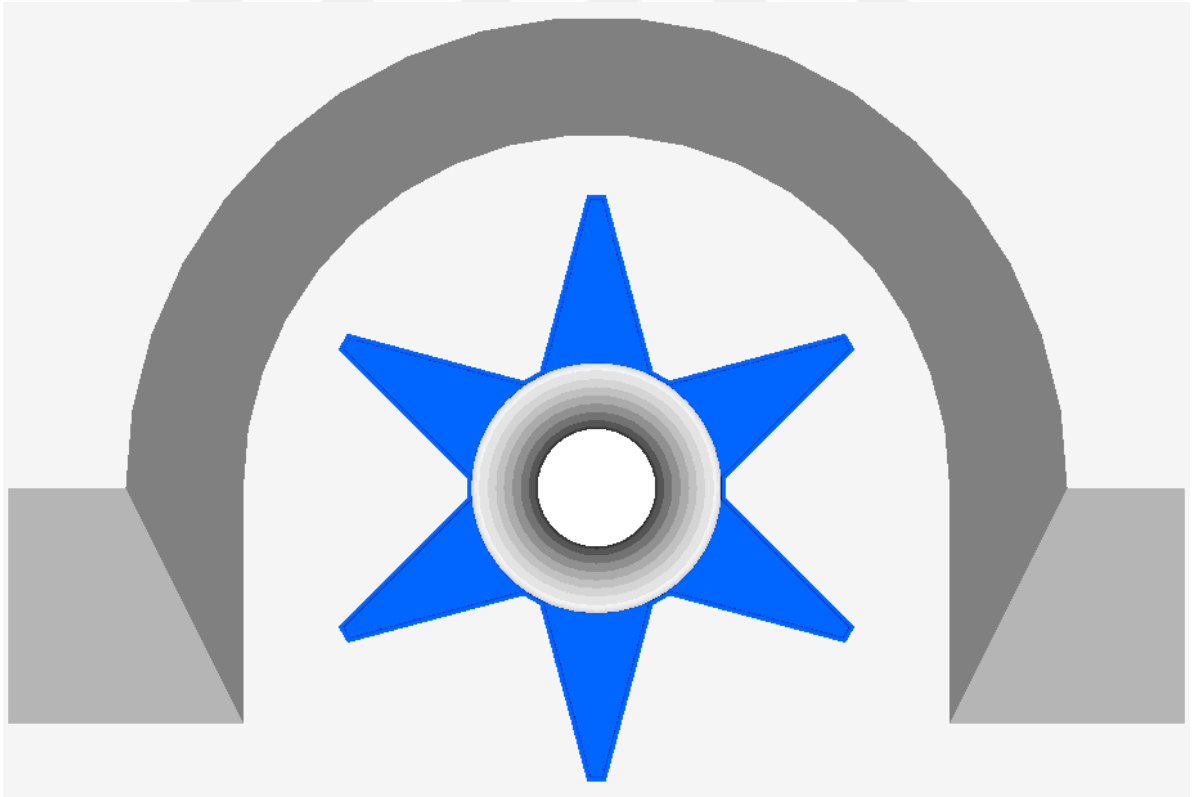
Uygulanan ağ çözünürlüğünün sayısal model geometrisi üzerindeki hassasiyetini göstermek için FLOW-3D'deki 'FAVOR' özelliği kullanılarak Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'daki görüntüler elde edilmiştir. Şekiller incelendiğinde çözümler için belirlenen meş kalitesinin oldukça yeterli olduğu gözlenebilmektedir.



Şekil 2.7. Tasarım I (Trapez tepe açısı $\alpha = 30^\circ$)



Şekil 2.8. Tasarım II (Trapez tepe açısı $\alpha = 22.5^\circ$)

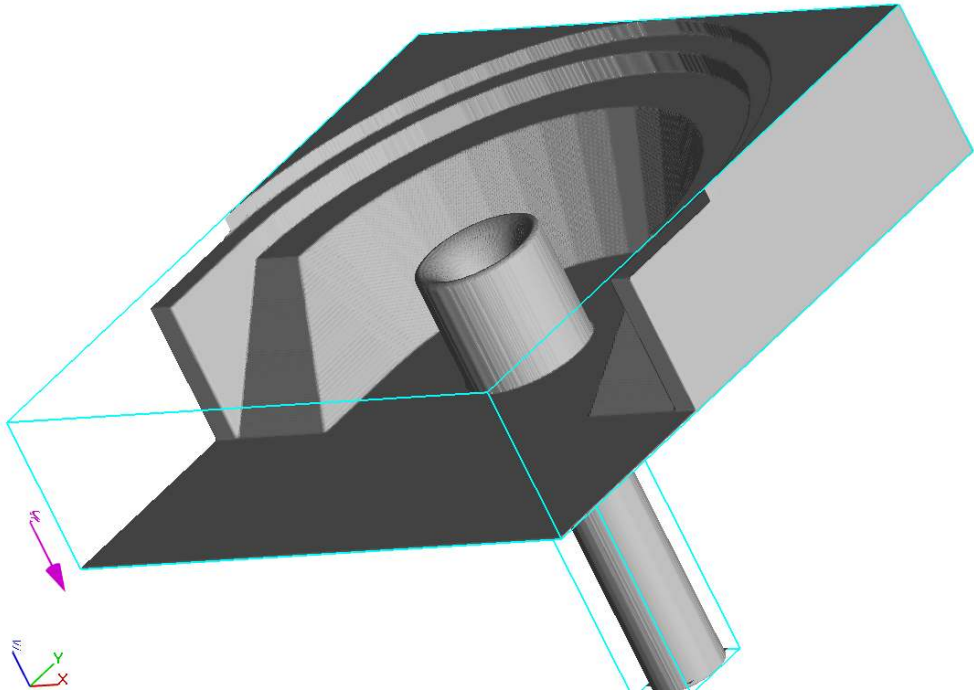


(a) Üstten görünüş ($\alpha = 22.5^\circ$)

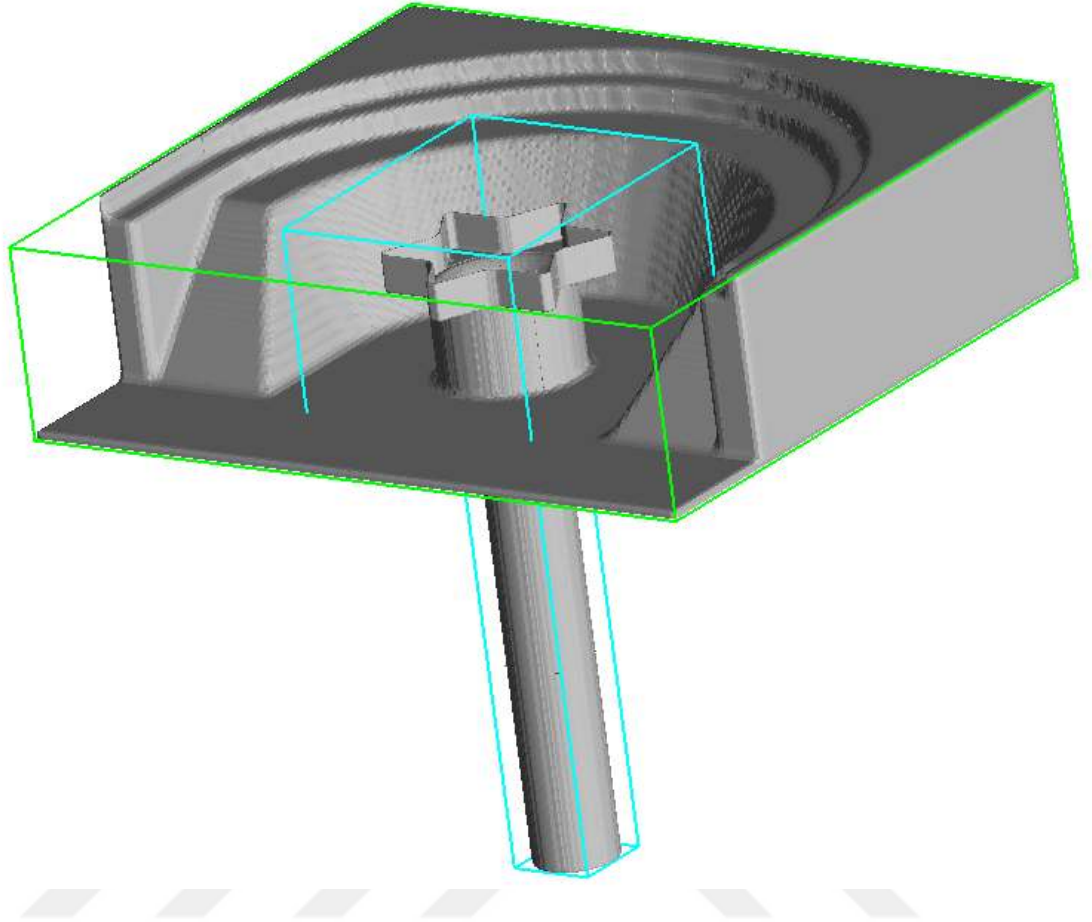


(b) Membadan görünüş

Şekil 2.9. Tasarım III (Trapez tepe açısı $\alpha = 22.5^\circ$)

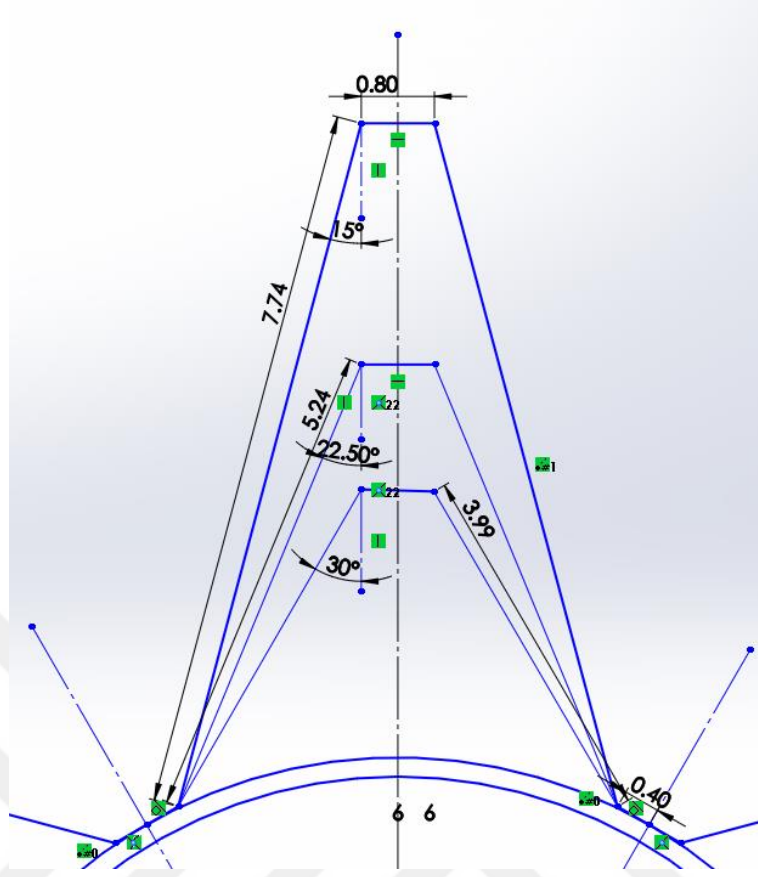


Şekil 2.10. Orijinal proje durumu sayısal model 'FAVOR' görüntüsü (0.15 m'lik kübik ağ)



Şekil 2.11. Tasarlanan sayısal model ‘FAVOR’ görüntüsü (0.45 m’lik temel ağı, 0.15 m’lik şaft ağı ve 0.125 m’lik ‘conform’ ağı)

Tezde kullanılmak üzere tasarlanan modeller, 6 adet trapez labirent gözün dairesel kret üzerinde birleştirilmesinden oluşmaktadır. Tasarlanan labirent savakların toplam savaklama uzunlukları sırasıyla $L_1 = 57.48$ m, $L_2 = 72.48$ m ve $L_3 = 102.48$ m’dir. Labirent savakların en önemli özelliklerinden birisi de, labirent yapısı sayesinde aynı açıklıkta olan klasik tip savaklardan daha fazla kret uzunluğuna sahip olmasıdır. Bu sayede savak uzunluğu artırılacağından savaklama kapasitesi de artmaktadır. Hazırlanan tasarımların boyutları Şekil 2.12’de gösterilmektedir.

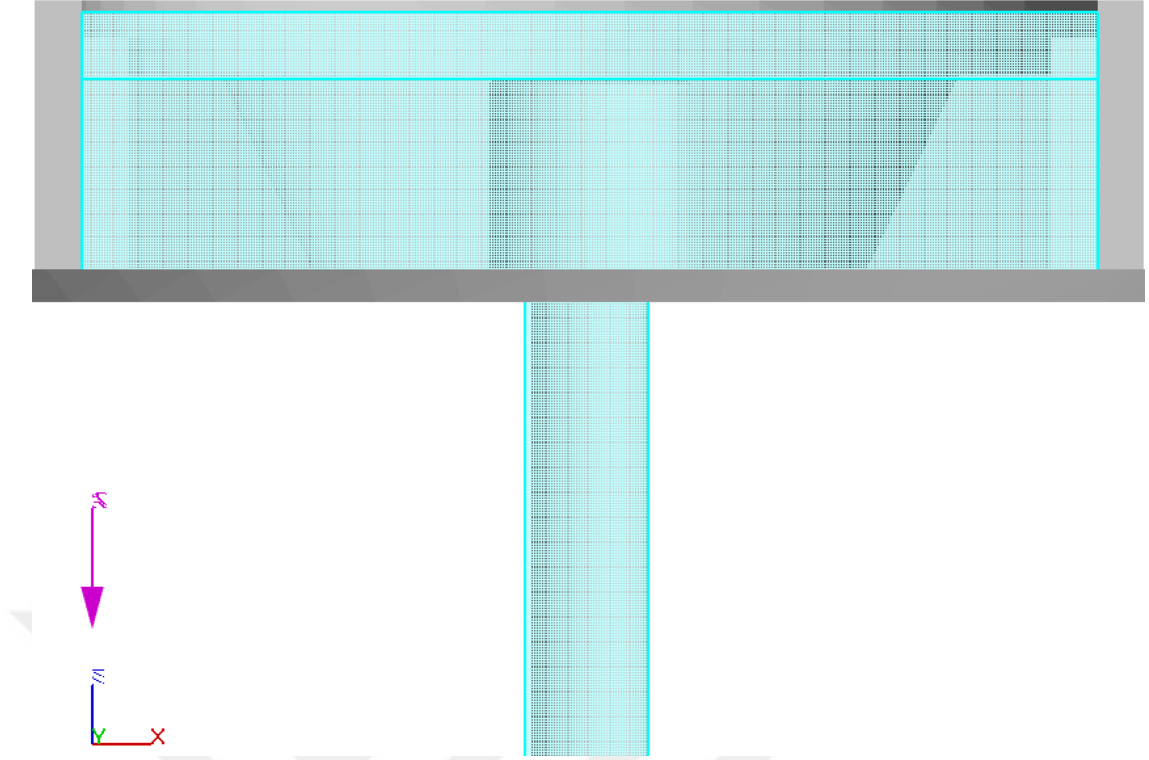


Şekil 2.12. Kullanılan tasarım geometri ölçüleri (değerler metre cinsindendir)

2.4.2. Sayısal Model Meş Yapısı ve Sınır Şartları

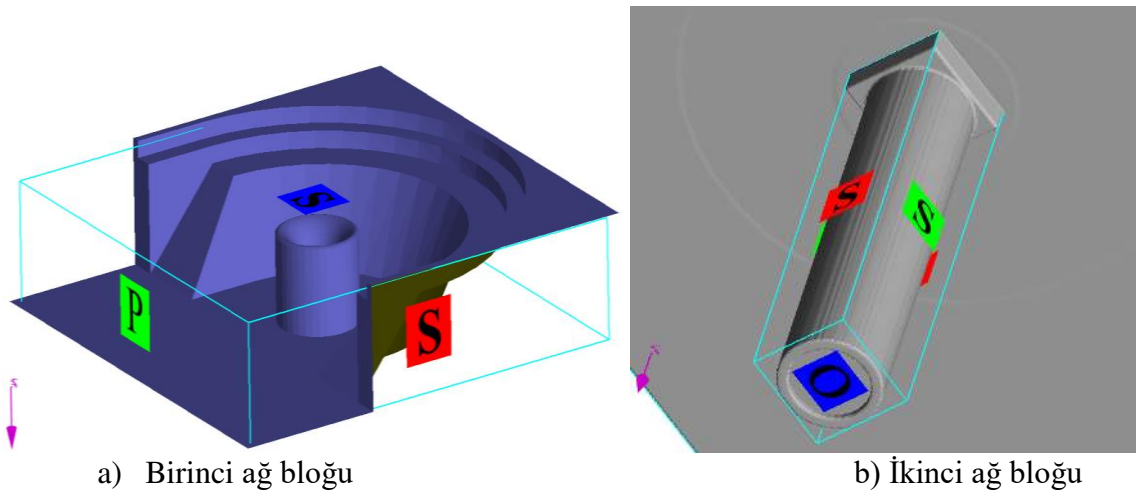
2.4.2.1. Orijinal Proje Durumu Meş Yapısı ve Sınır Şartları

FLOW-3D HAD yazılımı yapısal ağ (structured mesh) oluşturmaya izin vermektedir. Tezde hazırlanan orijinal ve tasarım dolusavak modelleri keskin kenarlar içerdiği için kübik yapısal ağın kullanılması tercih edilmiştir. Orijinal proje durumuna ait sayısal modelde iki ayrı 0.15 m boyutunda ağ bloğu kullanılmıştır. Birinci ağ bloğu, dolusavak giriş yapısını da kapsayacak şekilde dolusavak giriş yapısı boyunca z ekseninde bulunmaktadır. İkinci ağ bloğu ise dolusavak giriş ağız yapısının sonlanarak şafta bağlandığı noktadan başlayarak şaft boyunca 30 m devam etmektedir. Kullanılan bu ağ yapısına ek olarak, tasarımın savak başlangıç noktasına z ekseninde bir ağ tabakası (mesh plane) eklenmiştir. Eklenen bu tabaka sayesinde keskin kenar olarak nitelendirilen savak üst sınırının daha hassas çözünürlükle tanımlanması sağlanmıştır. Orijinal tasarım proje durumlarına göre hazırlanan sayısal modellerde 0.15 m'lik ağ yapısının uygun olacağı saptanmıştır. Orijinal proje durumundan oluşturulan ağ yapısında toplamda 13,824,868 adet kübik ağ kullanılmıştır. Modelin ağ yapısı Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Orijinal model ağ yapısı (Ağ sayısı 13,824,868)

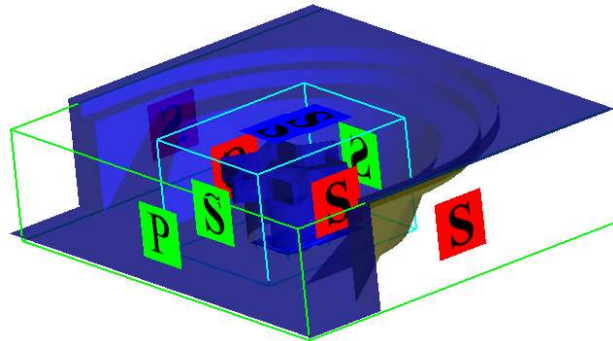
Daha öncede belirtildiği gibi Kale Barajı dolusavağı, barajın sağ sahiline yerleştirilmiştir. Dolusavağın bulunduğu yer incelendiğinde suyun dolusavağa giriş kanalı sadece tek yönden olduğu gözlemlenebilmektedir. Bu tasarıma bağlı kalınarak hazırlanan sayısal modelde, dolusavağın gerçekte çalıştığı gibi tek yönden su girişi (specified pressure) verilmiştir. Diğer kısımlardan herhangi bir akım girişi olmadığından bu alanlar simetri (Symetry) olarak tanımlanmıştır. Suyun şafttan çıkış yaptığı yer ise çıkış (outflow) olarak belirlenmiştir (Şekil 2.14).



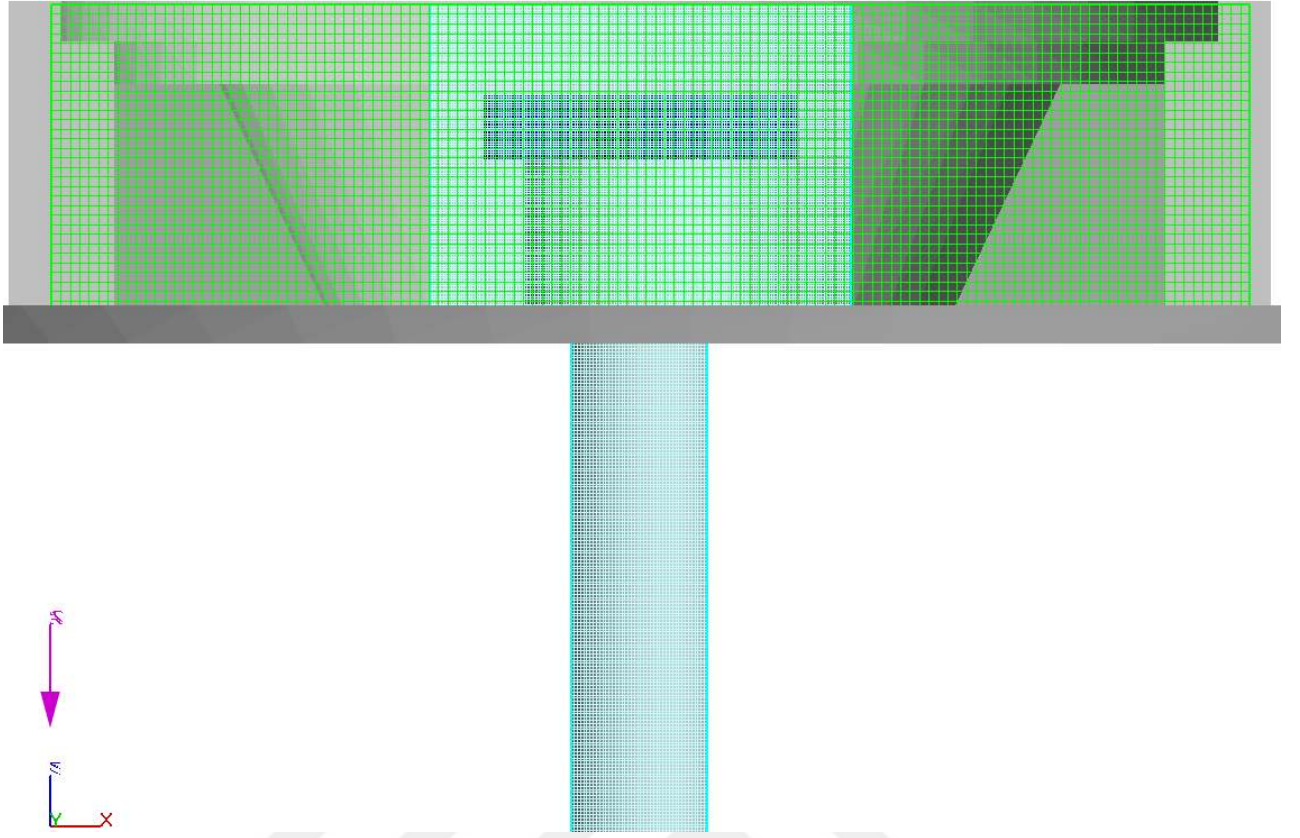
Şekil 2.14. Orijinal model sınır şartları (P: Specified Pressure; S: Symetry; O: Outflow)

2.4.2.2. Yeni Tasarım Ağ Yapısı ve Sınır Şartları

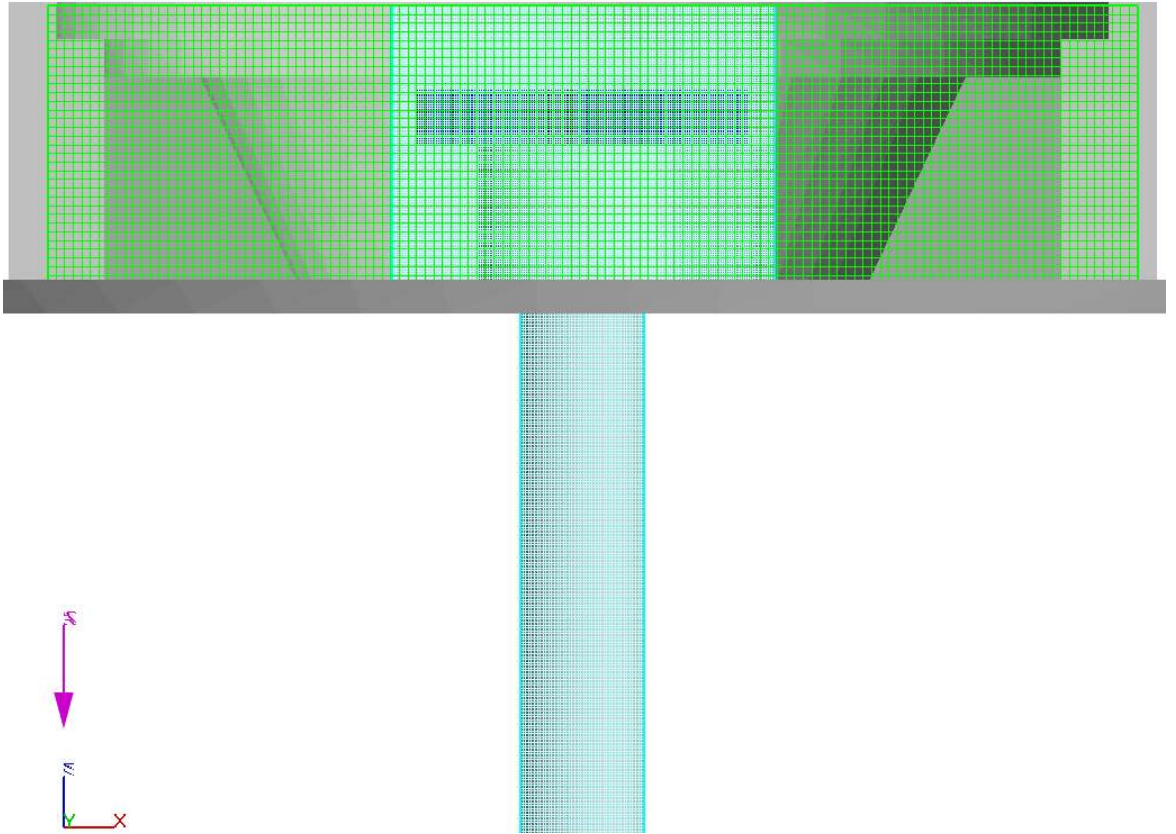
Projede kullanılacak olan orijinal model ile hidrolik koşulları kıyaslamak için üç adet farklı savak uzunluklarına sahip labirent kretli modeller tasarlanmıştır. Bu modellere ağ yapısı atama işleminde orijinal durumdan farklı olarak iki adet geometri kullanılmıştır. Şaft yapısını da içerisine alan 1. geometri her üç modelde de kullanılmıştır. 2. geometriler ise üç farklı tarzda tasarlanan trapez labirent savaklardır. Hazırlanan bu geometriler FLOW-3D içerisinde birleştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlarda kullanılan çözüm ağı da orijinal durumdan farklı olarak tasarlanmıştır. Bu ağ tasarımında üç adet ağ bloğu mevcuttur. Bu tasarımlarda da birinci ağ bloğu, dolusavak giriş yapısını da kapsayacak şekilde dolusavak giriş yapısı boyunca z ekseninde bulunmaktadır. İkinci ağ bloğu ise dolusavak giriş ağız yapısının sonlanarak şafta bağlandığı noktadan başlayarak şaft boyunca 37 m devam etmektedir. Bunlara ek olarak bir üçüncü ağ bloğu trapez dolusavağı ve şaft giriş ağızına uydurulmuştur. Bu tür çözüm ağı ‘conform mesh’ olarak adlandırılmaktadır. Bu tasarımlarda 1. 2. ve 3. Blokların eleman boyutları 0.45 m, 0.15 ve 0.125 m olarak belirlenmiştir. Tasarlanan 1. modelde bulunan toplam kübik eleman sayısı ise 4,998,675 ’tir. 2. modelde bu rakam 4,514,547 ve 3. model de ise 5,738,643’dür. Ağ blokları arasındaki fark ‘conform mesh’ leri trapez model geometrilerine uydurmak için yapılan değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Burada dikkate değer bir husus da, tasarımda var olan eleman sayılarının, orijinal durum ağ eleman sayısına kıyasla neredeyse 1/3 oranında azalmasıdır. Ağ sayısındaki bu azalmaya rağmen model geometrisi, ‘conform mesh’ sayesinde istenen kaliteyi sağlamaktadır. Bu hazırlanan modellerin ağ yapıları Şekil 2.16 Şekil 2.17 ve Şekil 2.18’de gösterilmektedir. Bu tasarımlara ait sayısal modellerde de, orijinal duruma benzer olarak dolusavağın gerçekte çalıştığı gibi tek yönden su girişi (specified pressure) verilmiştir. 3. ve diğer kısımlardan herhangi bir akış girişi olmadığından bu yüzeylerin sınır şartları simetri (Symetry) olarak tanımlanmıştır. Suyun şafttan çıkış yaptığı yerin sınır şartı ise, aynı şekilde, çıkış (outflow) olarak belirlenmiştir (Şekil 2.15).



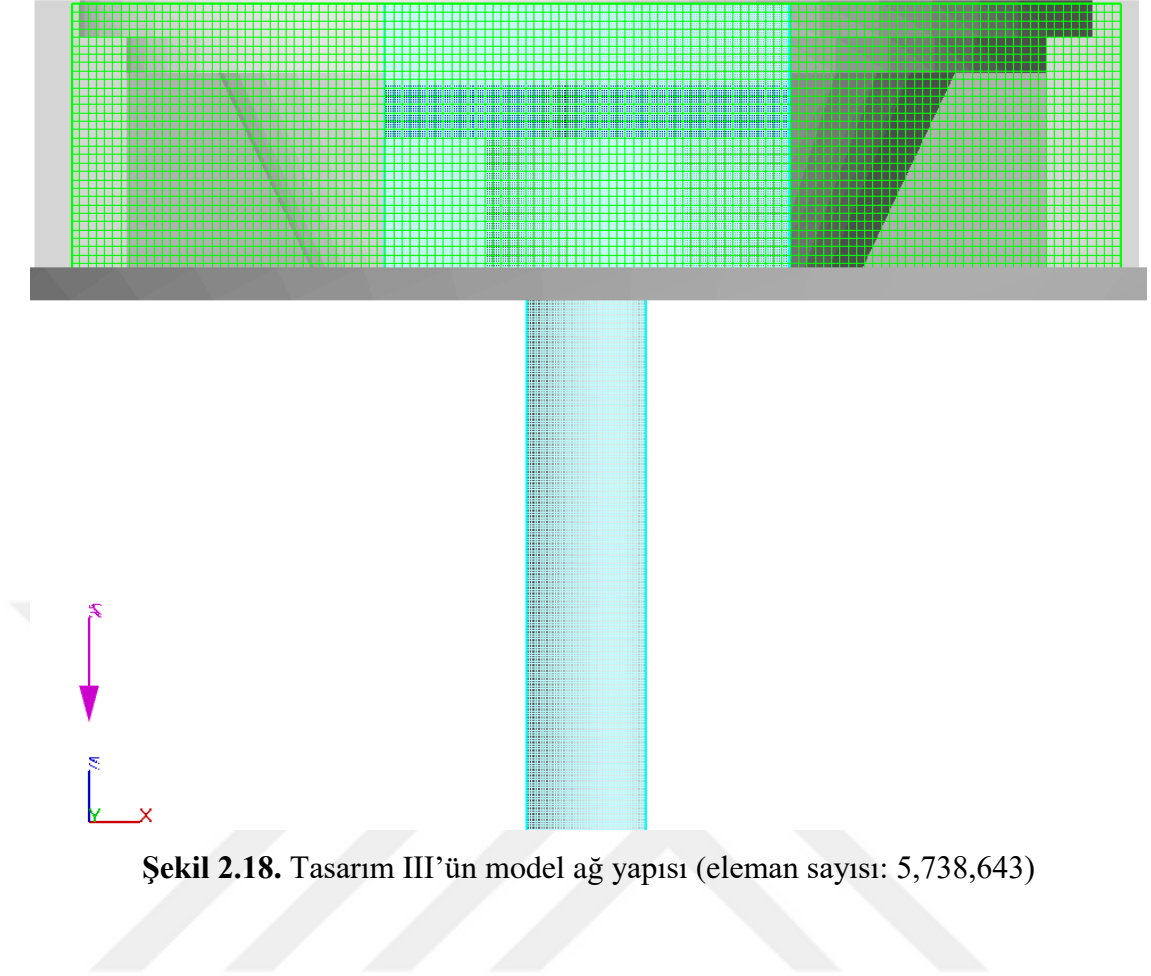
Şekil 2.15. Tasarım model sınır şartları (P: Specified Pressure; S: Symetry)



Şekil 2.16. Tasarım I'in model ağ yapısı (eleman sayısı: 4,998,675)



Şekil 2.17. Tasarım II'nin model ağ yapısı (eleman sayısı: 4,514,547)



3. BULGULAR

3.1. Orijinal Proje Durumu HAD Modeli Sonuçları

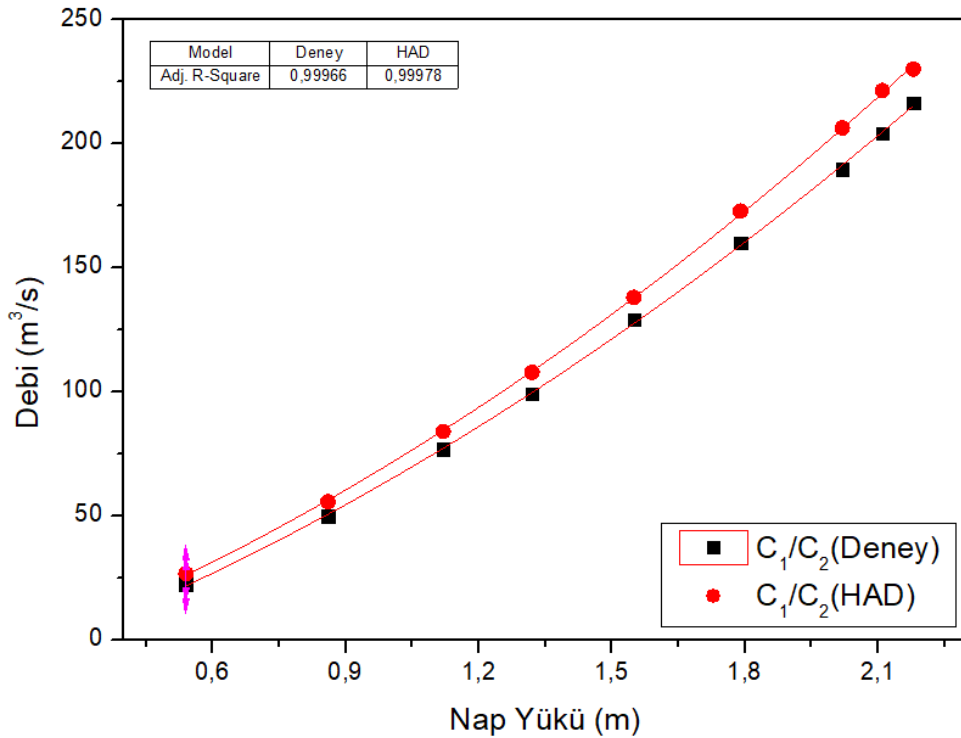
Orijinal proje durumuna göre tasarlanarak gerçekleştirilen HAD analizlerinde, şaft kret çapı $D_{Kret} = 11.00$ m için laboratuvarından elde edilen rezervuar su seviyeleri kullanılmıştır. Laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde 9 farklı debi karşılığında rezervuara ait 9 farklı minimum, maksimum ve ortalama su yükseklikleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları, mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırmak suretiyle sayısal model sonuçlarının doğrulaması ve kalibrasyon işlemleri yapılmaya çalışılmıştır. Kalibrasyon gerçekleştirilirken farklı sınır şartları ve çok fazlı akım koşulları da denenmiştir. Deney sonuçlarına en yakın değerlere ulaşılan analizlerle çözümler devam ettirilmiştir. Deney sonuçlarına en yakın değerlerin bulunduğu durum tek fazlı akım koşullarında gözlemlenmiştir. Orijinal proje durumu laboratuvar deney sonuçları ve HAD analizlerinden bulunan her bir rezervuar su yüküne karşılık gelen debi değerleri Çizelge 3.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. $D_{ŞAFT} = 5.00$ m için deneylerden ve HAD analizlerinden alınan savak su yükseklikleri ve ortalama debi değerleri (DSİ, 2016)

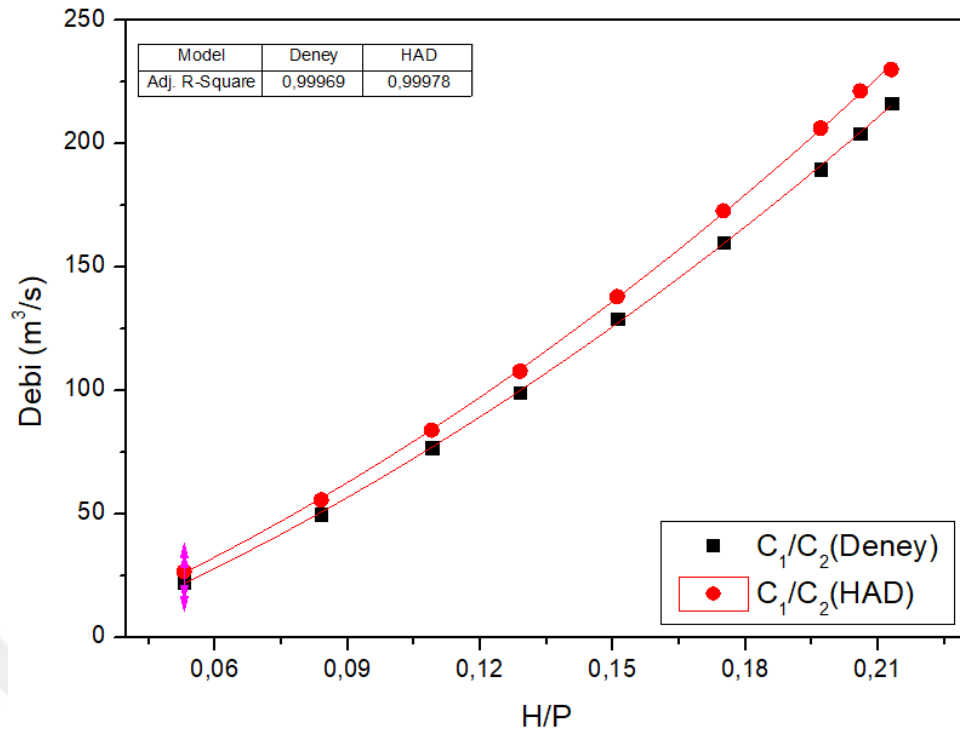
Ortalama Savak Yükü	P=10.25 m H/P	Debi (Deney)	Salınım (Deney)	Debi (HAD)	Fark
(m)	(boyutsuz)	(m³/s)	(m)	(m³/s)	(%)
0.54	0.053	22.30	0.01	26.66	20
0.86	0.084	49.76	0.02	55.60	12
1.12	0.109	76.66	0.03	83.92	9
1.32	0.129	99.10	0.02	107.81	9
1.55	0.151	129.20	0.03	137.99	7
1.79	0.175	159.98	0.03	172.86	8
2.02	0.197	189.71	0.04	206.41	9
2.11	0.206	204.21	0.04	221.49	8
2.18	0.213	216.43	0.05	230.12	6

Orijinal durum için yapılan HAD analizlerine akım kararlı hale gelene kadar devam edilmiştir. Orijinal duruma göre tasarlanan modellerde, düşük nap yüküne sahip durumlarda

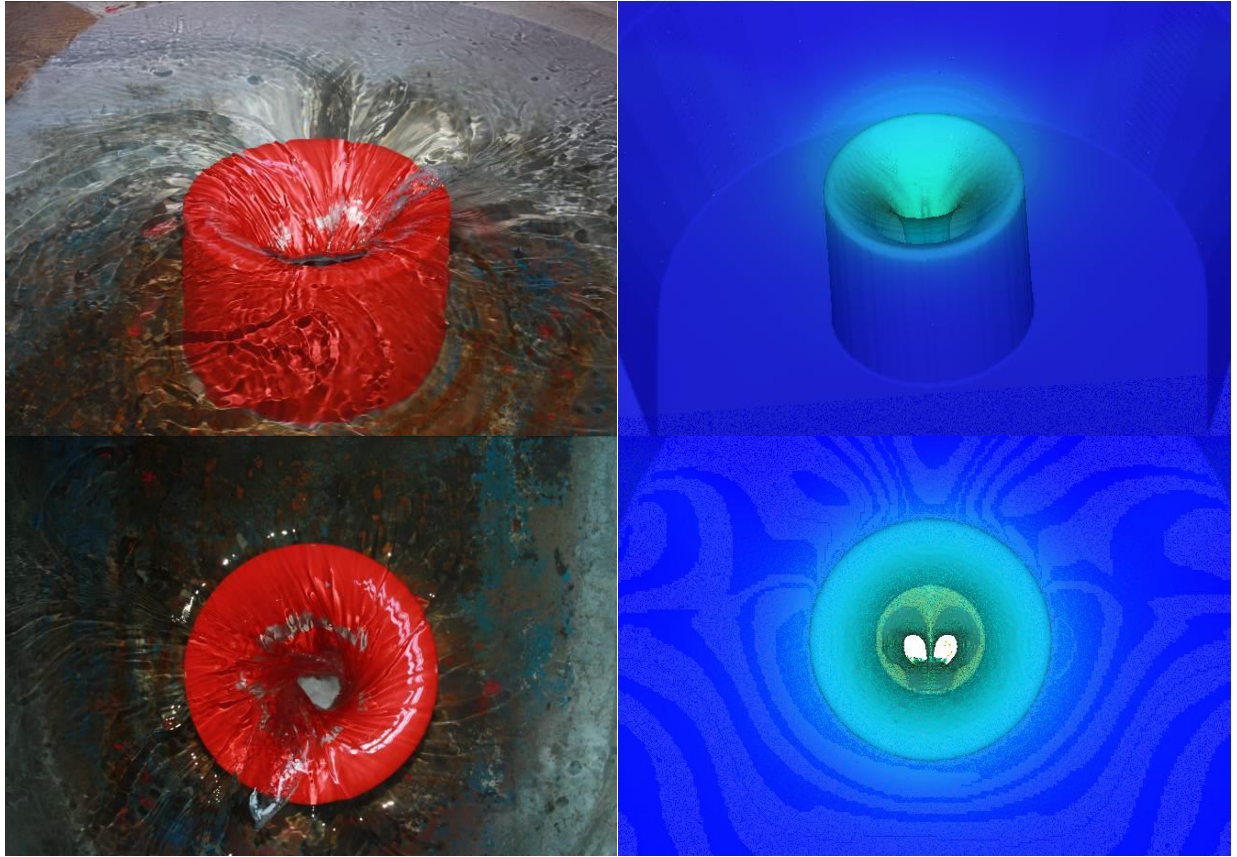
akımın kararlı hale gelmesi, yüksek nap yüklerine kıyasla daha uzun çözüm süresi gerektirdiği gözlemlenmiştir. Genel olarak, orijinal durum için çözümlerin, 75 s ile 120 s’de kararlı hale geldiği izlenmiştir. Çözüm oturmuş yani kararlı geldikten sonra analiz durdurulmuş ve diğer analize geçilmiştir. Şekil 3.1’de orijinal durum için deney raporundan ve HAD analizlerinden alınan değerler grafik üzerinde gösterilmektedir. Şekil 3.2 de ise nap yüklerinin savak yüksekliğine oranları kullanılarak boyutsuz nap yüküne karşılık gelen debi değerlerinin değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde HAD’dan alınan değerler ile deney raporundan alınan değerlerin aynı artış eğiliminde olduğu görülmektedir. HAD ile Deney arasındaki farkın maksimum olduğu durum su yükünün en düşük olduğu $H = 0.54$ m’lik durumda %20 olarak hesaplanmıştır. Düşük nap yüksekliklerinde bu hatanın nedeni, ağ çözünürlüklerinin nap yüküne oranla yetersiz kalmasından olabilir. Dolusavak verim ve kapasiteleri genelde yüksek nap yükleri ve maksimum kapasiteyle çalıştığında önem kazanacağından düşük nap yüklerindeki hataların çok da önemli olmadığı ancak yine de bu kısımlarda daha yüksek çözünürlüklü ağ kullanılması durumunda daha iyi sonuçlar alınabileceği açıktır. Aslında bu farkın bağlı olduğu mutlak hatanın ise daha yüksek nap yüklerine göre daha küçük olduğu Şekil 3.1’den görülebilmektedir. Savak su yükü arttıkça HAD ile Deney arasındaki fark azalarak %6 seviyelerine gerilemiştir. Şekil 3.3’de ise $H = 2.02$ m su yüküne sahip durumdaki deney ve HAD’dan alınan görseller paylaşılmıştır.



Şekil 3.1. Orijinal durum deney ve HAD debi karşılaştırması



Şekil 3.2. Orijinal durum deney ve HAD debi karşılaştırması (boyutsuz)



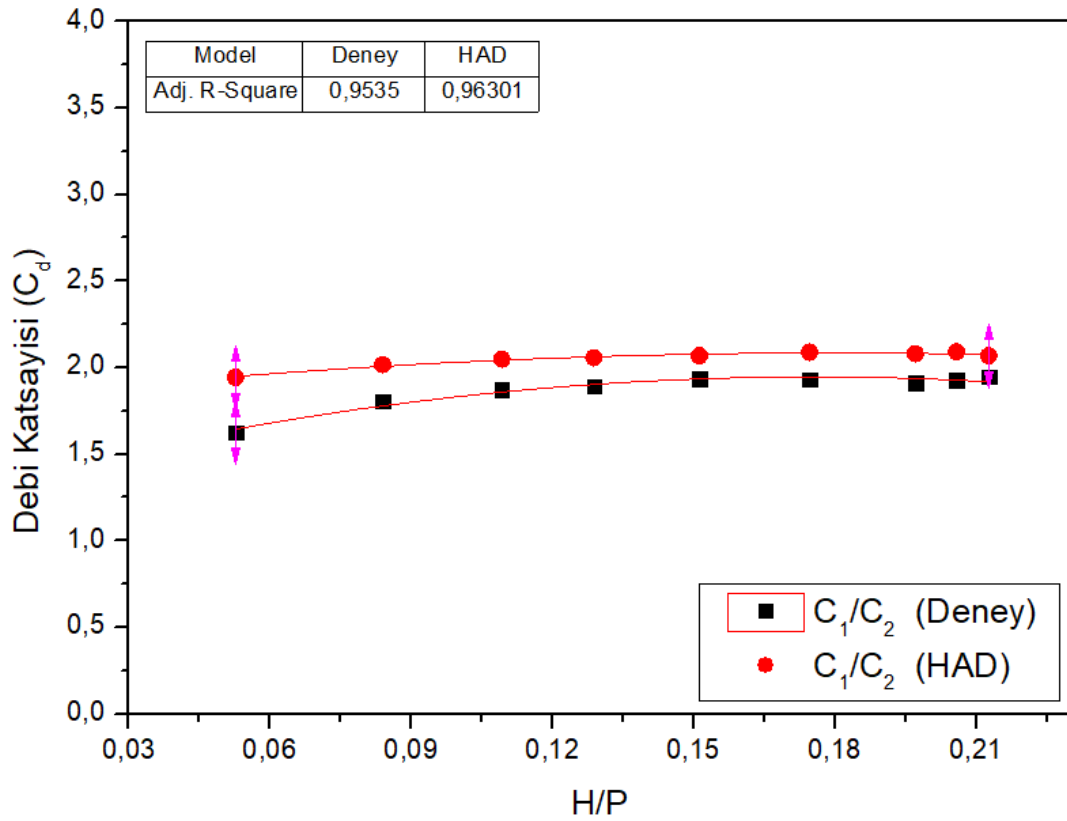
(a) Fiziksel Model

(b) Sayısal Model

Şekil 3.3. Şaft ağzı akım koşullarının karşılaştırılması ($H=2.02$ m)

Çizelge 3.2. Orijinal durum deney ve HAD debi katsayısı tablosu

H/P	Debi Katsayısı (C_d) (Deney)	Debi Katsayısı (C_d) (HAD)
0.053	1.63	1.94
0.084	1.81	2.02
0.109	1.87	2.05
0.129	1.89	2.06
0.151	1.94	2.07
0.175	1.93	2.09
0.197	1.91	2.08
0.206	1.93	2.09
0.213	1.95	2.07



Şekil 3.4. Orijinal durum deney ve HAD debi katsayısı (C_d) karşılaştırması

HAD analiz programları kullanılarak elde edilen verilerin ve doğrusal olmayan denklemlerin ne oranda doğru olduğunu belirlemek için, ortalama hata kareleri kökü (Root Mean Square Error, RMSE), ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE) ve korelasyon

katsayısı (R) kriterleri kullanılmaktadır. İki değişkenin doğrusal olarak ne kadar ilişkili olduğu dereceyi Korelasyon Katsayısı (R) gösterir. RMSE, MAE ve APE ise doğrusal olmayan denklemlerin başarısını değerlendirmek için hata büyüklüğünü görmeye yardımcı olan önemli büyüklüklerdir. Bu iki hata ölçme yöntemlerinden, RMSE, yüksek debi katsayısı değerleriyle ilişkili uyumun niteliğini göstermektedir. MAE ise debi değerlerinin arasındaki uyumun derecesini göstermektedir (Karunanithi, Grenney, Whitley ve Bovee 1994). Denklem (3.5) ve (3.6) ve (3.7) sırasıyla RMSE, MAE ve APE'yi tanımlamaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{i_{gözlenen}} - Y_{i_{tahmin\ edilen}})^2} \quad (3.5)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{i_{gözlenen}} - Y_{i_{tahmin\ edilen}}| \quad (3.6)$$

$$APE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_{i_{(gözlenen)}} - Y_{i_{(tahmin\ edilen)}}}{Y_{i_{(gözlenen)}}} \right| \quad (3.7)$$

Burada;

RMSE: Karesel ortalama hata (Root Mean Square Error)

MAE: Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error)

APE: Ortalama yüzde hata (Average Percent Error)

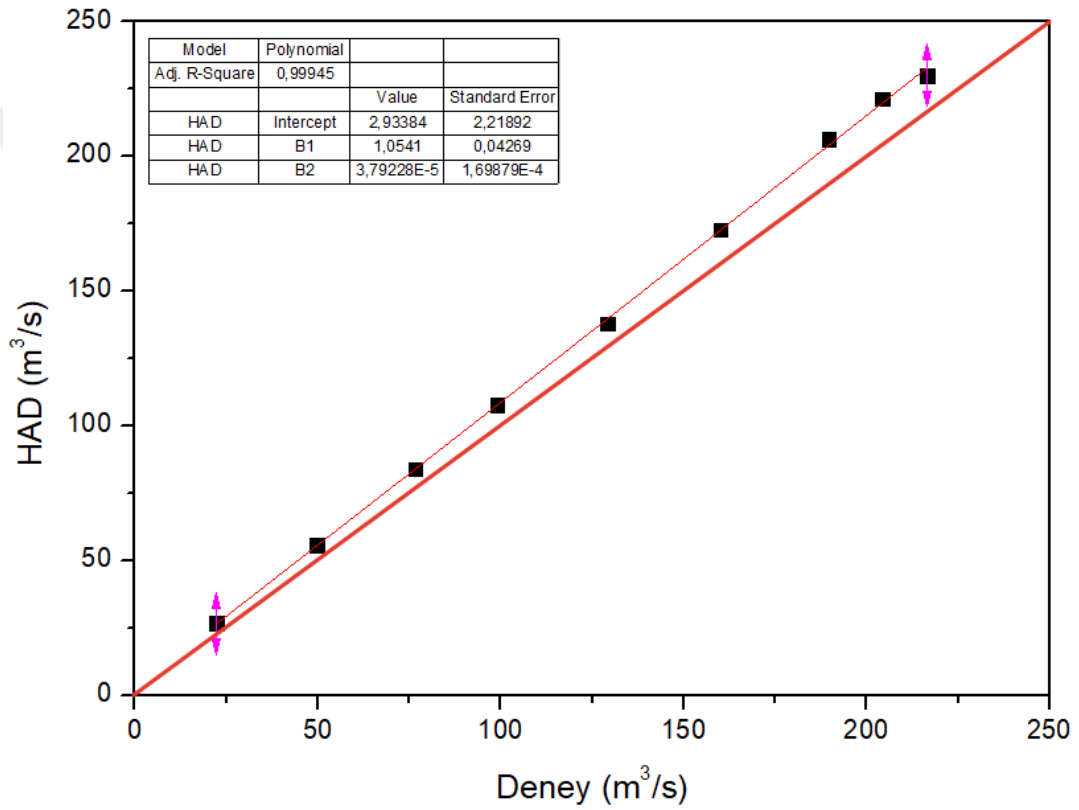
N: Veri seti sayısı,

Y_i : Debi katsayısıdır.

Bunlara ek olarak belirginlik katsayısı olarak adlandırdığımız R^2 (Determination Coefficient) yapılan tahminlerin bütünlüğünü ve ne oranda yakınsadığını gösterir. 0 ile 1 arasında değişen bu katsayı, kullanılan değişkenlerin varyasyon yüzdesidir. Değerin, 1'e yaklaşması, modelin yanıt verilerinin ortalamaları üzerindeki değişkenliğinin güçlülüğünü gösterir. Denklem (3.8) belirginlik katsayısının nasıl hesaplandığını ifade eder.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i_{gözlenen}} - Y_{i_{tahmin\ edilen}})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{i_{gözlenen}} - Y_{i_{ortalama\ gözlenen}})^2} \quad (3.8)$$

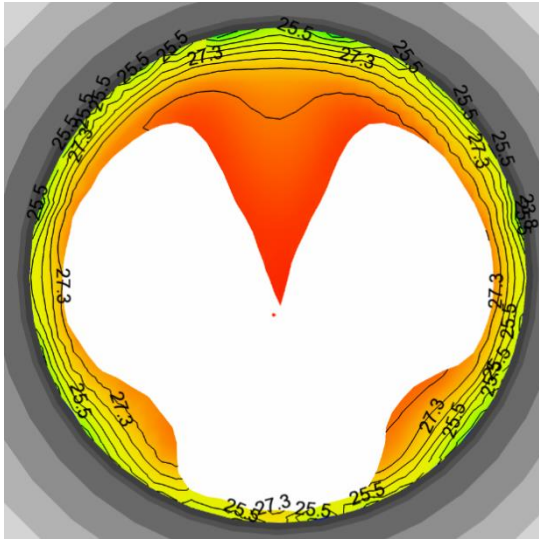
Şekil 3.4'te verilen deney ve HAD analiz sonuçlarından alınan debi katsayılarına uygulanan belirginlik katsayısı değerleri incelendiğinde, HAD analizleri sonucu ortaya çıkan R^2 değeri 0.962'ün deney verileri kullanılarak ulaşılan 0.952 değerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Buradan, orijinal durum için HAD verileri deney verilerinden daha fazla belirlilik gösterdiği söylenebilir. Deney ve sayısal sonuçlar arasındaki hata oranlarına bakıldığında MAE = 0.179, RMSE = 0.186 ve APE = 0.097 olarak elde edilmiştir. Diğer bir değişle deneysel ve sayısal debi katsayılarının arasında ortalama %9.7 oranında bir hata tespit edilmiştir ki bu, ölçek etkileri, sayısal ve deneysel hatalar da göz önünde bulundurulduğunda, kabul edilebilir bir hata oranıdır (<%10). Dolayısıyla sayısal sonuçların yeterince doğru sonuç verdiği söylenebilir.



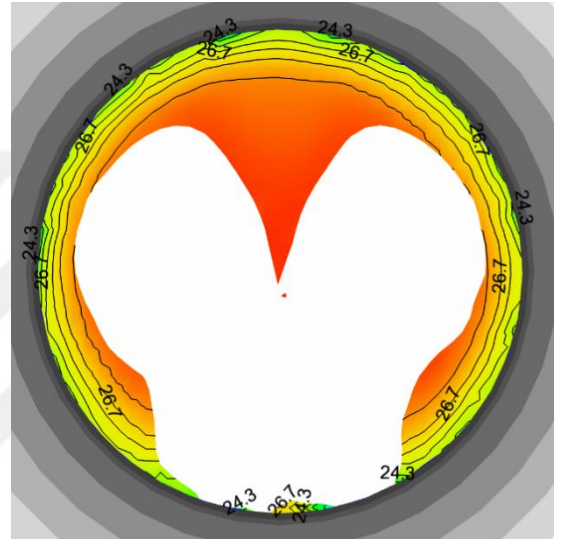
Şekil 3.5. Orijinal durum deney ve HAD debi karşılaştırması

Orijinal durum için gerçekleştirilen HAD analizlerinden su yüklerine göre alınan şaft içi akım durumu ve hız değerleri Şekil 3.6.'de sunulmuştur. Görseller incelendiğinde, dairesel bir giriş ağzına sahip savakta şaft içerisindeki akımın oldukça düzgün ve Y eksenine göre simetrik olduğu gözlemlenmiştir. Orijinal projenin şaft içi akım durumu deney raporunda yer almadığı için, bu görseller, deney sonuçlarıyla kıyaslanamamıştır. Şekillerdeki hız dağılımları incelendiğinde en yüksek hız değerinin $V = 29.0$ m/s ile $H = 2.18$ m, $H = 2.11$ m, $H = 2.02$ m, $H = 1.79$ m ve $H = 1.55$ m su yüküne sahip durumlarda gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu

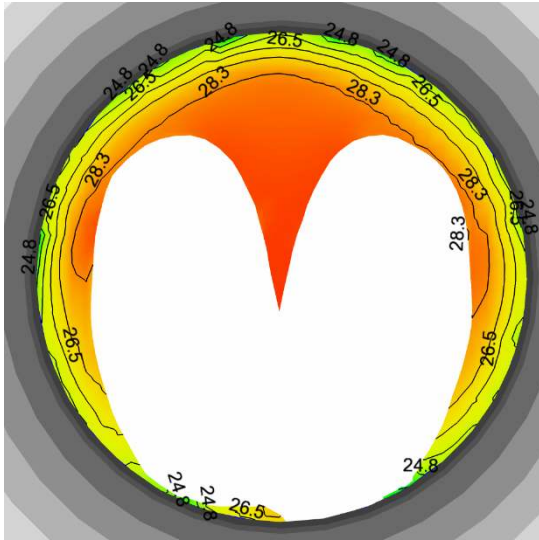
maksimum hız değeri Y eksenı doğrutusunda yani kesitin ortasında oluşmuştur. Bütün su yüklerinde şaftın duvarında oluşan hız konturları incelendiğinde ise akım hızının duvar kenarlarında $V = 20.0$ m/s ile $V = 25.6$ m/s arasında değıştiğı gözlemlenmiştir. Oluşan en yüksek hız değeri $H = 2.18$ m'lik su yüküne sahip durumda gözlenirken, şaft duvarında oluşan en küçük hız değeri de en küçük su yüküne sahip değerde, yani $H = 0.54$ m'de oluşmuştur. Oluşan bu hız değeri, şaft giriş ağzından 37 m düşey doğrutuda ölçülmüştür. Elde edilen veriler kullanılarak Bölüm 3.4.1.'de orijinal durum şaft duvarı için kavitasyon indeksi hesaplamaları yapılmıştır.



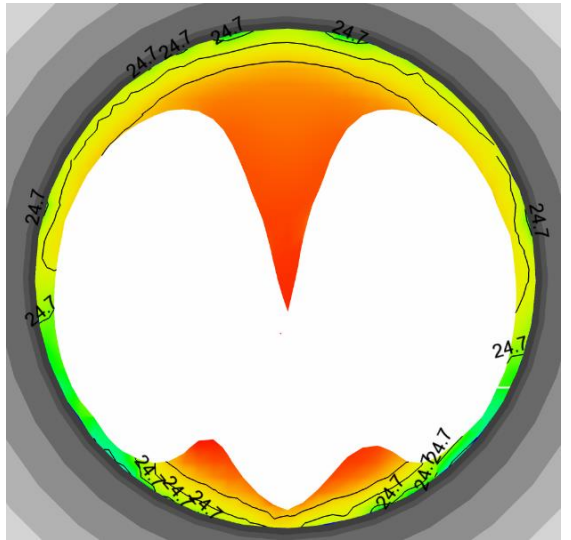
H = 2.18 m



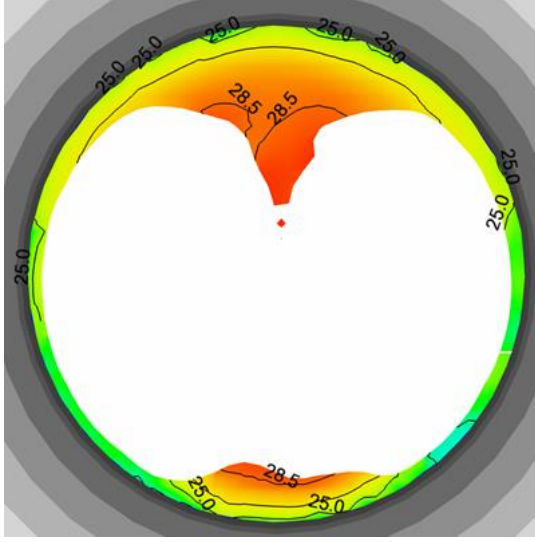
H = 2.11 m



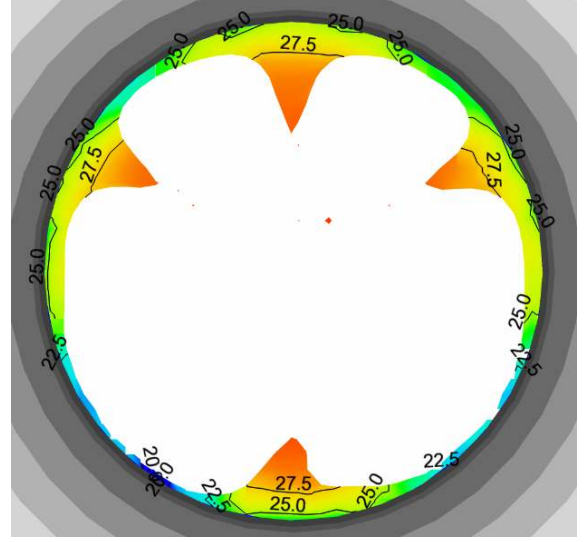
H = 2.02 m



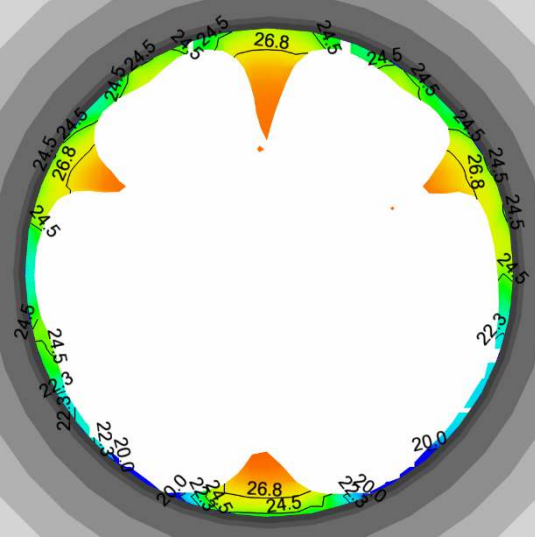
H = 1.79 m



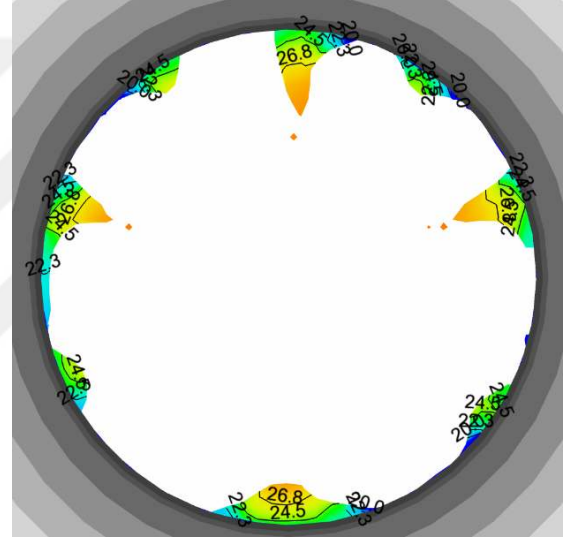
H = 1.55 m



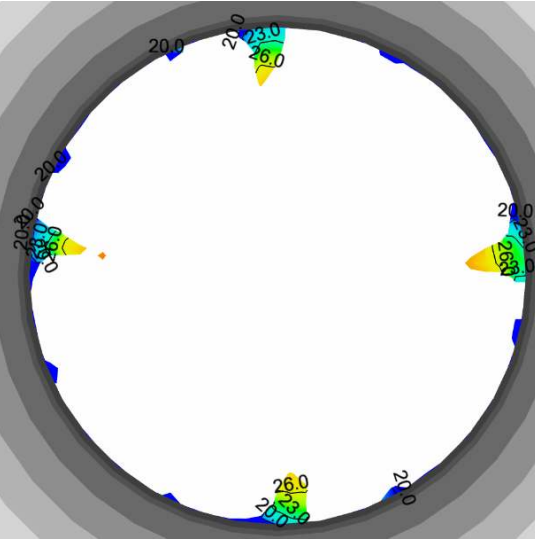
H = 1.32 m



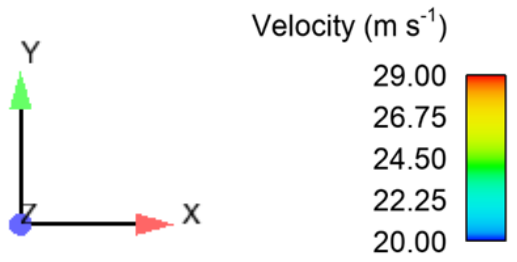
H = 1.12 m



H = 0.86 m



H = 0.54 m



Şekil 3.6. Orijinal model şaft çıkış (*outflow*) akım durumu

3.2. Ölçek Etkileri

Fiziksel laboratuvar modellerinde ölçek etkilerinden tam olarak kaçınabilmek için, normal şartlarda uygulanması mümkün olmayan prototip boyutları kullanılmalıdır. Çok büyük projelerde prototip boyutunda modellerin üretilmesi imkansız olduğu için, bir ölçeğe kadar küçültülmüş modeller, deneylerde kullanılır. Belirli bir ölçeğe kadar küçültülen bu modellerde, mekanik benzerlik dediğimiz; geometrik benzerlik, kinematik benzerlik ve dinamik benzerlik, ölçek etkilerinin azaltmak açısından model ve prototip arasında mutlaka sağlanmalıdır (Heller 2011).

Hughes (1993), Novak ve Cabelka (1981) tarafından aşağıda ifade edildiği şekliyle ölçek etkileri, ölçek oranı veya ölçek faktörü ile artar.

$$\lambda = \frac{L_P}{L_M} \quad (3.9)$$

Burada:

L_P : Gerçek prototipte karakteristik bir uzunluk,

L_M : Modelde karşılık gelen uzunluktur.

Denklemin tersi olan $1/\lambda$, ölçek olarak tanımlanan değerdir. Bu değer küçüldükçe ölçek etkileri artar.

Prototip boyutları kullanılarak bir projeyi test etmenin imkânsız olması sebebiyle kanal akışlarının fiziksel hidrolik modelleri genellikle Bölüm 2.3’ de belirtildiği gibi Froude’nin benzerlik kurallarına göre yapılır. Froude’un benzerlik kuralları, çoğu zaman açık kanal akımlarında kullanılır. Froude benzerlik kuralları uygulanırken kullanılan; Froude Sayısı (F_r) (Denklem (2.4)), Reynolds Sayısı (Re), (Denklem (2.3)), Weber Sayısı (W), (Denklem (3.10)), Cauchy Sayısı (C), (Denklem (3.11)) ve Euler Sayısı (Denklem (3.12)), model ve prototip arasında akışkan karakteristikleri açısından aynı olamaz. Bunun sonucu olarak herhangi bir ölçeğe göre ayarlanmış bir modelde göz ardı edilemeyecek ölçek etkileri ortaya çıkmaktadır.

$$W = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (3.10)$$

$$C = \frac{\rho V^2}{E} \quad (3.11)$$

$$E = \frac{p}{\rho V^2} \quad (3.12)$$

Bu denklemlerde:

L : Model ve prototipte bulunan uzunluklar,

V : Hız,

σ : Hava ve su arasındaki yüzey gerilmesi,

ρ : Yoğunluk,

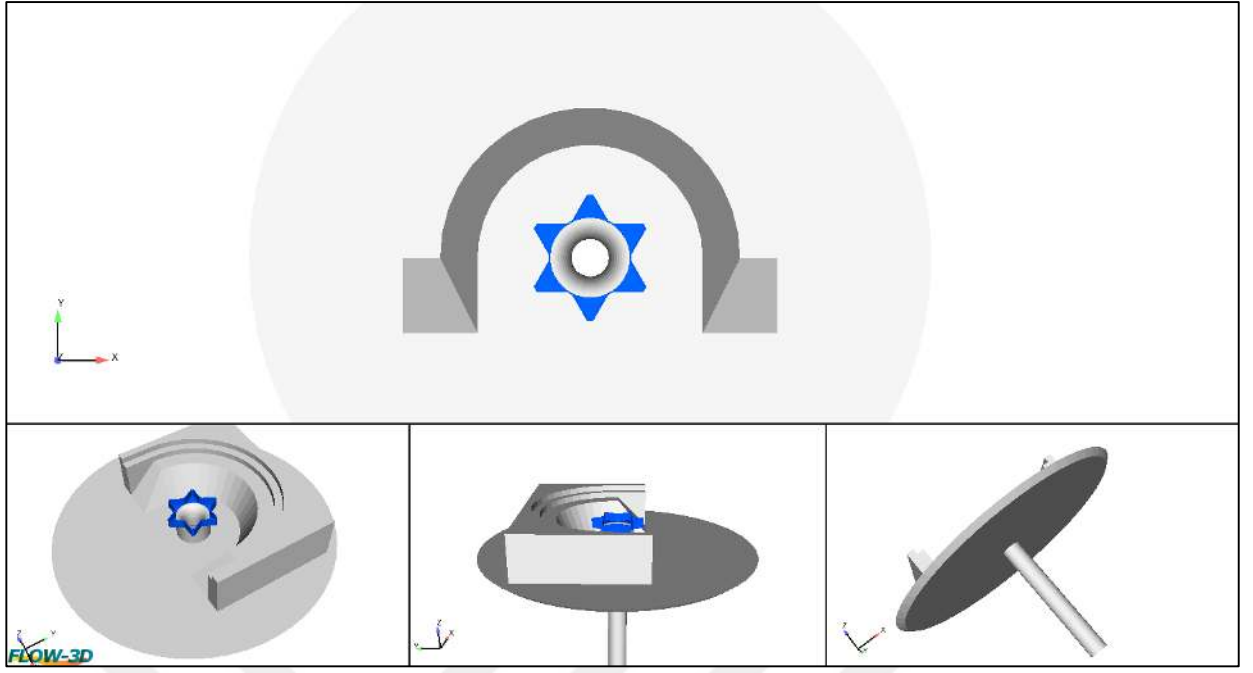
p : Basıncıdır.

Viskoz, yüzey gerilimi gibi etkiler ihmal edildiğinden, Reynolds Sayısı (Re) prototipinden küçük olduğunda özellikle küçük ölçekli modellerde önemli ölçek etkileri ortaya çıkar. Bunun en temel nedeni, ölçek modeli ile prototip arasında bulunan kuvvet oranlarının sabit kalmamasından kaynaklanmaktadır (Heller (2011), Hughes (1993), Yalın, (1971)).

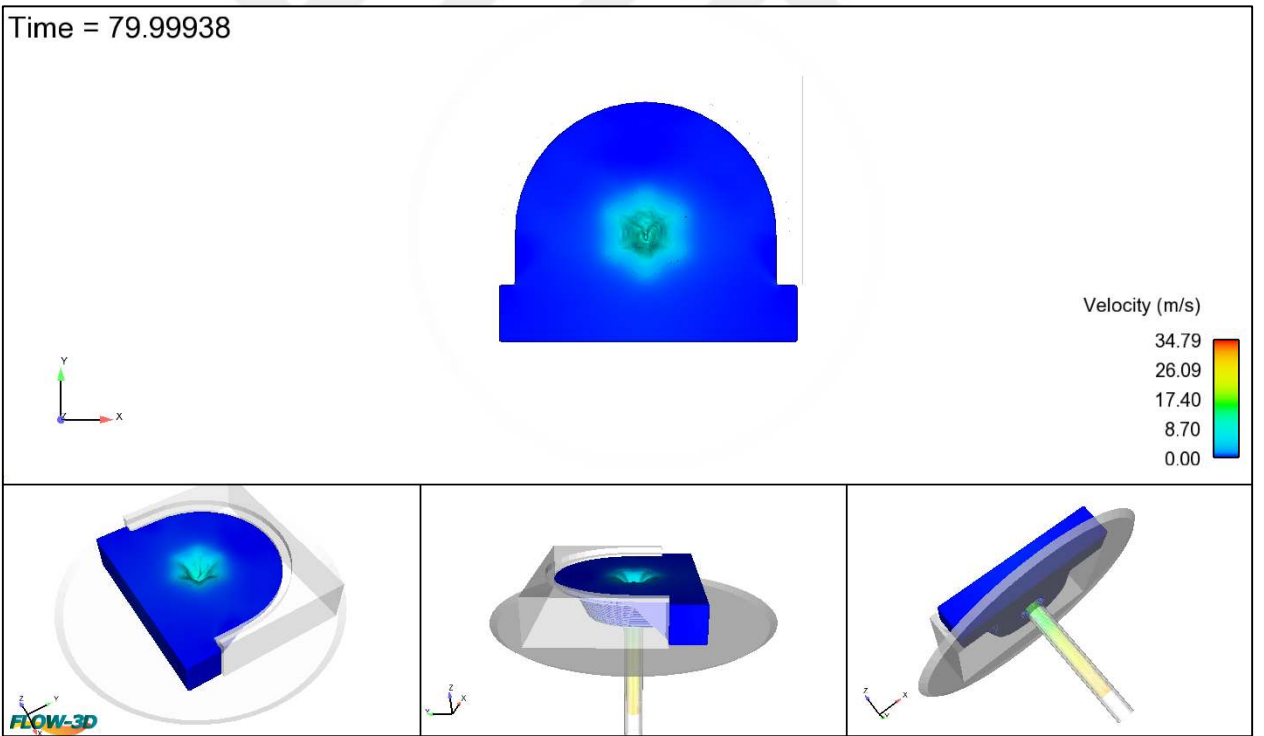
3.3. Tasarlanan Proje Durumu HAD Modeli Sonuçları

3.3.1. Birinci Labirent Savak Tasarımı

Orijinal projede kullanılan dairesel olarak planlanan şaft dolusavak giriş ağız performansı, Bölüm 2.1.'de açıklandığı gibi giriş yapısının açıklığına doğrudan bağlıdır. Bu tarz bir giriş yapısı, yüksek nap yükü yani yüksek debilerde giriş ağızında bozulma ve boğulmalara sebep olabilmektedir. Literatürden edindiğimiz veriler, trapez labirent olarak tasarlanan yan savaklar, eşit su alma uzunluğunda, düz (klasik) savak yapılarına oranla 3 ile 4.5 kat arasında verim sağladığını göstermektedir. Orijinal durum akım şartlarına bağlı kalınarak hazırlanan bu modelde de, trapez labirent savakların bu tarz bir dairesel su alma yapısında nasıl bir performans göstereceği izlenmiştir. 'Tasarım I' olarak adlandırdığımız bu yeni tasarım ve Tasarım I'in sayısal simülasyondan bir görünüşü Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Tasarım I görüntüsü



Şekil 3.8. Tasarım I'in sayısal simülasyondan bir görünüşü ($H = 2.02$ m)

Tasarım I de kullanılan labirent trapez savak giriş ağzının çevre (savaklama) uzunluğu $L_1 = 57.48$ m'dir. Savak açısı, bu (birinci) tasarım için $\alpha = 30^\circ$ olarak belirlenmiştir. Tasarım ana geometrisi orijinal durum ile aynıdır. Trapez labirent savakların oluşturduğu yapının yüksekliği

3.0 m olup toplam savak yüksekliği orijinal durumla eşit olarak $P= 10.25$ m'dir. Tasarlanan her üç labirent savakların duvar et kalınlıkları 0.20 m olarak düşünülmüştür. Tezin ana konusunu, labirent savaklardan sağlanacak olan debi miktarı olduğundan şaft uzunluğu savak giriş ağzından itibaren, tasarım çözümleri için, 47.0 m olarak belirlenmiştir. Şaft giriş ağzından 37.0 m aşağıya da bir düzlem (flux surface) eklenmiştir. Bu düzlem, şaft boyunca geçen akımın çözüm devam ederken kararlı hale gelip gelmediği ve bu noktadan geçen bazı akım karakteristiklerini (akışkanın kesit içerisinde kapladığı alan, kesitten geçen akımın debisi, akımın ortalama hızı ve kesitten geçen toplam debi miktarı) okumak için kullanılmıştır.

Literatürde, şaft savaklara ait hidrolik tablo, kesit ve çizelgelerde genellikle boyutsuz büyüklüklerin kullanılmaktadır (Blair ve Rhone, 2006). Bundaki amaç, benzer tarzda her türlü boyut ve büyüklüğe sahip tasarım ve çalışmalarda kolaylıkla araştırmacılar tarafından kullanılabilinmeleridir. Bu durum bilindiği için, elde var olan su yükü ve savak yüksekliği gibi tasarımlarda değişebilen parametrelerin boyutsuz değerleri elde edilmiştir. Çizelge 3.3'de Tasarım I ve orijinal duruma ait savak uzunluklarını ve bunların birbirleri arasındaki oranla bulunan boyutsuz büyüklükler verilmiştir.

Çizelge 3.3. Orijinal ve Tasarım I'e ait savaklama uzunlukları ve oranları

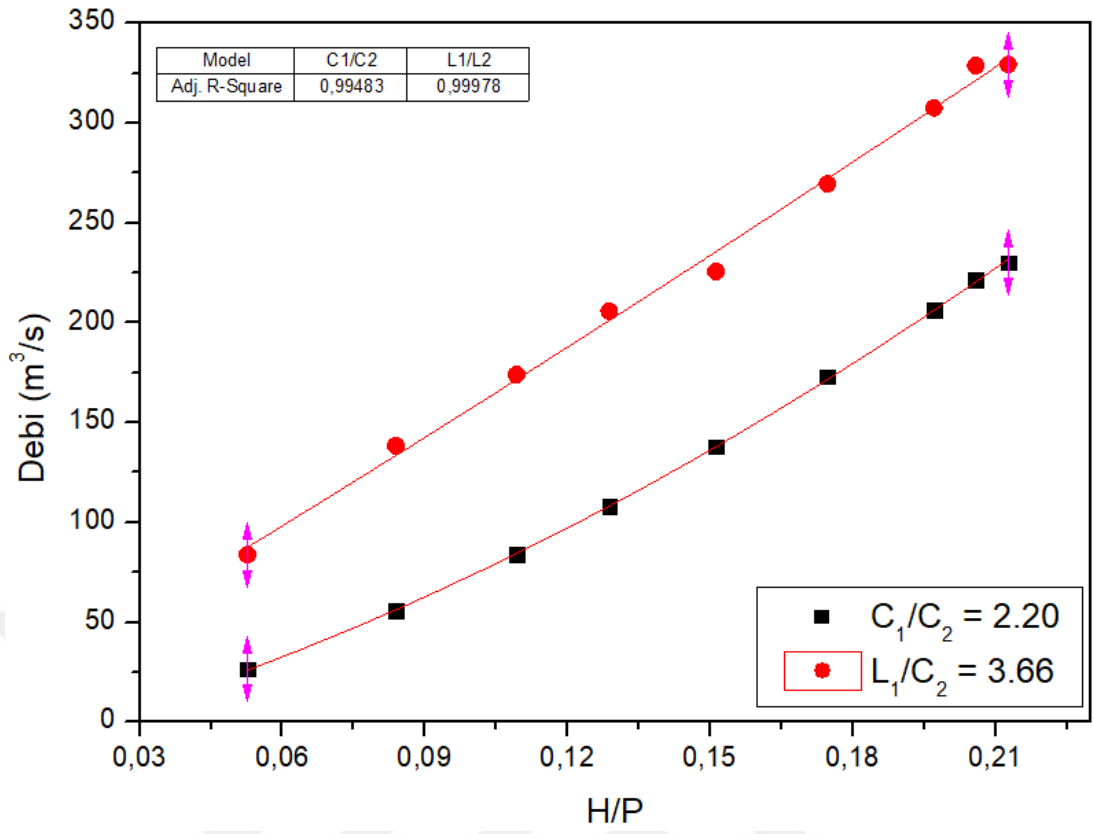
Savak Özellikleri	Değer
Orijinal proje şaft giriş ağzı çevre uzunluğu (ζ_1)	34.56 m
Orijinal proje şaft kesit çevre uzunluğu (ζ_2)	15.71 m
Tasarlanan I. labirent trapez model savak uzunluğu (L_1)	57.48 m
L_1/ζ_1	1.66
L_1/ζ_2	3.66
ζ_1/ζ_2	2.20

Çizelge 3.4'de ise nap yükü (H) ve savak yüksekliği (P)' ne bağlı H/P boyutsuz büyüklüğe karşı gelen Tasarım I HAD analizlerinden elde edilen debi karşılıkları verilmiştir. Bu çizelgenin grafiğe aktarılmış hali ise Şekil 3.9'da sunulmuştur. Bu çizelgeye göre, aynı boğaz ve kret çevresin (çapına) sahip dairesel kretli (orijinal) şaft dolusavak ile trapez kretli şaft dolusavak karşılaştırıldığında; aynı savak yükünde trapez kretli Tasarım I'in orijinal duruma göre minimum seviye için %214, maksimum seviye için ise %43 daha fazla debi savakladığı görülmektedir. Bu oran tüm savak yükleri için %91 artış olarak elde edilmiştir. Diğer bir değişle trapez kretli tasarım orijinal dairesel kesitli savaklara göre baraj haznelerinde aynı savaklama debisi için daha az seviye değişimi sağlayacaktır. Seviye değişimlerinin minimuma indirilmesi barajlardaki enerji

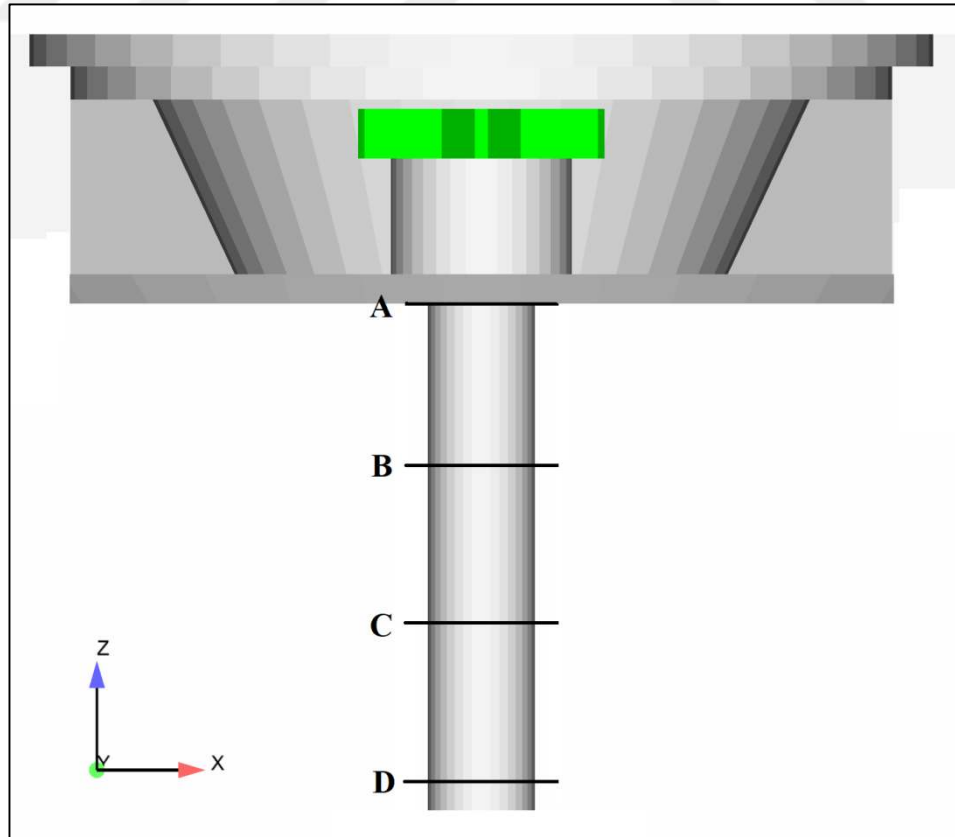
verimliliğini arttıracak gibi, daha iyi bir taşkın kontrolü sağlayacaktır. Ayrıca Şekil 3.9'daki grafikler incelendiğinde $H = 2.11$ m ve $H = 2.18$ m su yüküne sahip analizlerden elde edilen debilerin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenebilmektedir. Bu verilere dayanarak Tasarım I için üretilen $\alpha = 30^\circ$ 'lik labirent savaktan alınabilecek maksimum debinin $Q_{T1maks} = 329.26$ m³/s olduğu söylenebilir. Maksimum nap yükü olan $H = 2.18$ m'de hala debinin lineer artmaya devam ettiği bu da henüz şaftın tam kapasiteye ulaşmadığı yani henüz boğulmanın olmadığı anlamına gelmektedir. Daha yüksek nap yüklerinde veya daha büyük kret uzunluklu diğer tasarımlar için boğulmanın olup olmayacağı aşağıda incelenmiştir. Düşey şaft üzerinde bulunan dört noktadan tüm tasarımlara ait şaft içi akım durum görselleri alınmıştır. Şekil 3. 10'da, bu noktaların yerleri gösterilmektedir. A, B, C ve D olarak şekil üzerinde gösterilen noktaların arasında 10 m'lik bir mesafe vardır. Şekil 3.11, 3.12, 3.13 ve 3.14 sırasıyla en büyük dört nap yüküne ait bu noktalardan alınan akım hızlarını göstermektedir.

Çizelge 3.4. Tasarım I'e ait su yüklerine göre debi değerleri

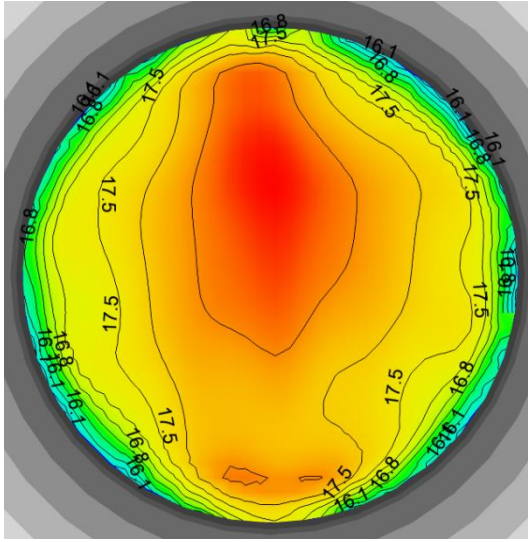
$\alpha = 30^\circ$; $L_1/\zeta_2 = 3.66$				
$L_1 = 57.48$ m	$P = 10.25$ m	ζ_1/ζ_2	$\zeta_2 = 15.71$ m	Artış
H (m)	H/P	Q (m ³ /s)	Q ₁ (m ³ /s)	%
0.54	0.053	26.66	83.74	214
0.86	0.084	55.60	138.36	149
1.12	0.109	83.92	174.07	107
1.32	0.129	107.81	205.82	91
1.55	0.151	137.99	225.63	64
1.79	0.175	172.86	269.57	56
2.02	0.197	206.41	307.64	49
2.11	0.206	221.49	328.76	48
2.18	0.213	230.12	329.26	43



Şekil 3.9. Tasarım I ve orijinal durum HAD karşılaştırması

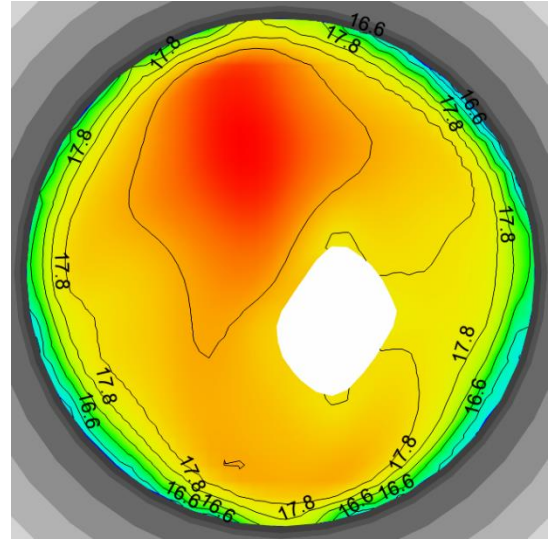
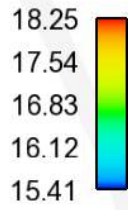
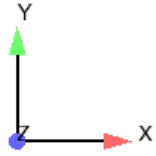


Şekil 3.10. Şaft üzerinde akım kesiti alınan noktalar



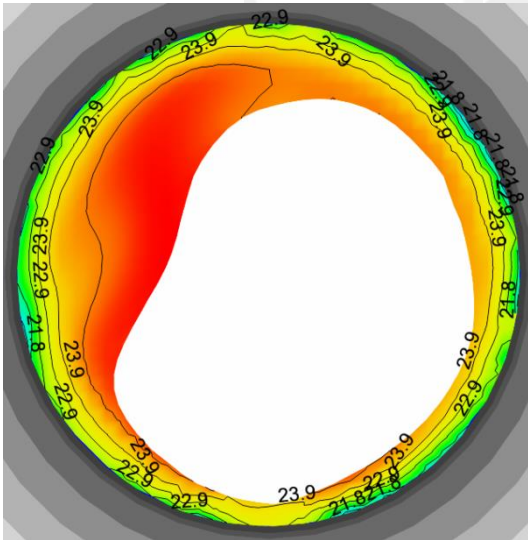
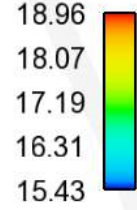
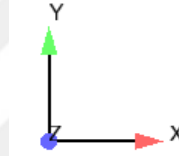
(A)

Velocity (m/s)



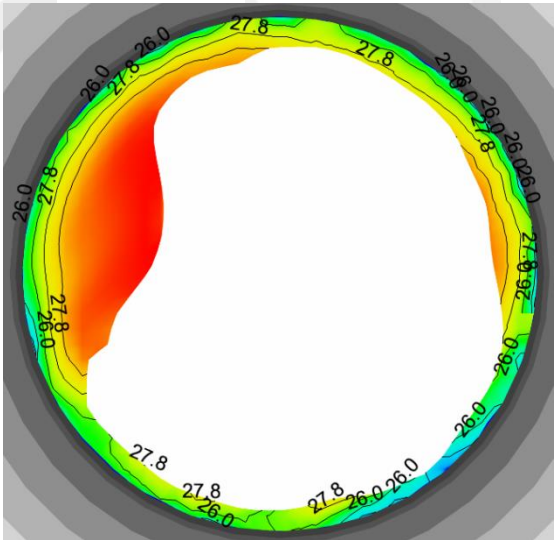
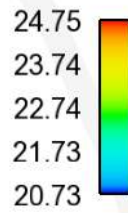
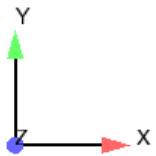
(B)

Velocity (m/s)



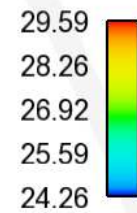
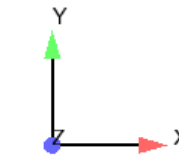
(C)

Velocity (m/s)

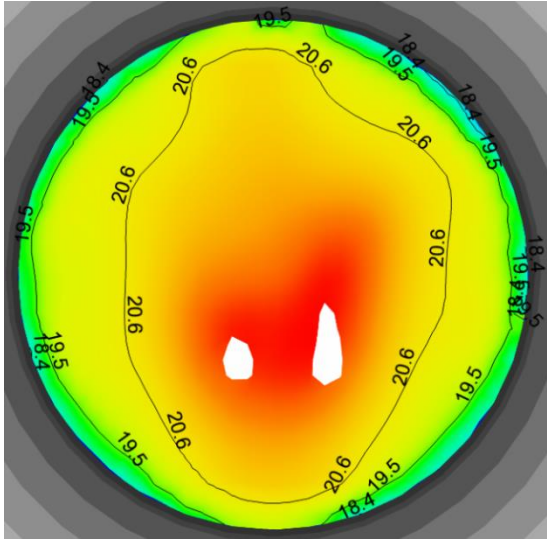


(D)

Velocity (m/s)

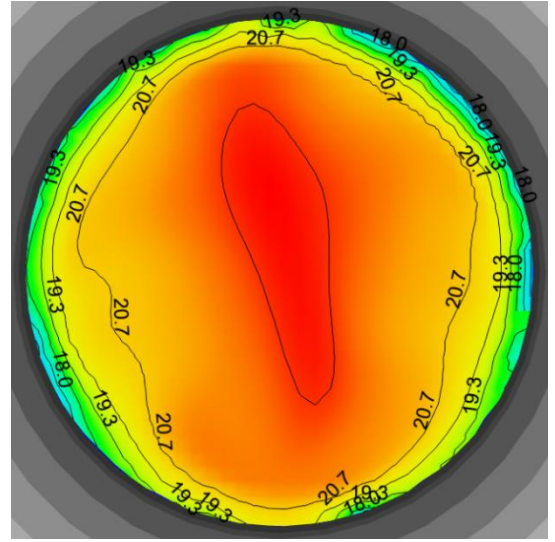
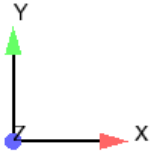
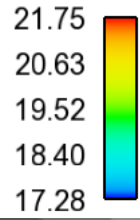


Şekil 3.11. Tasarım I şaft boyunca akım durumları (H =2.18 m)



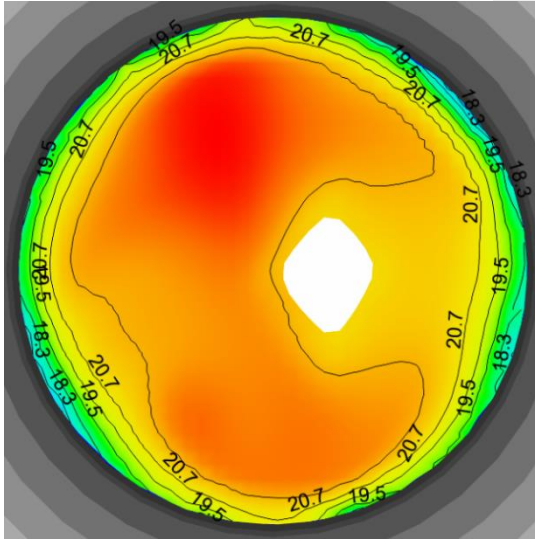
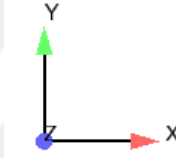
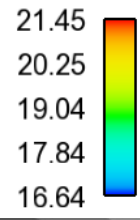
(A)

Velocity (m/s)



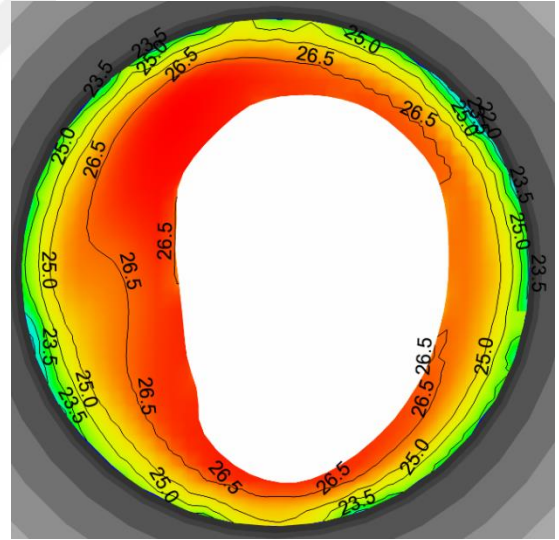
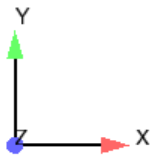
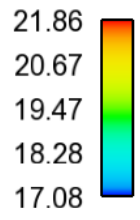
(B)

Velocity (m/s)



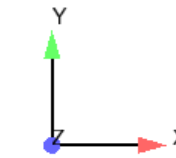
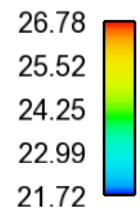
(C)

Velocity (m/s)

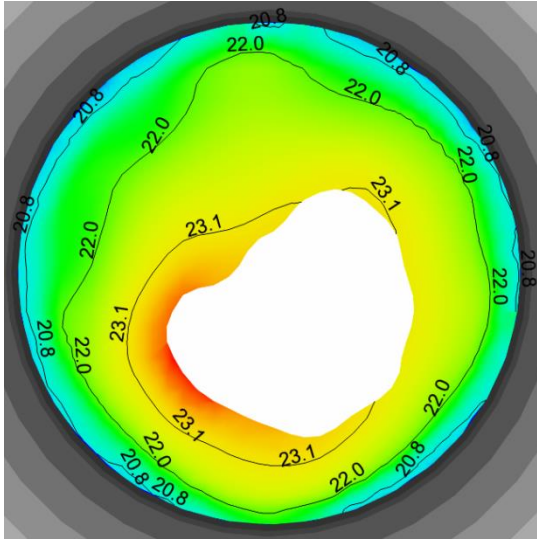


(D)

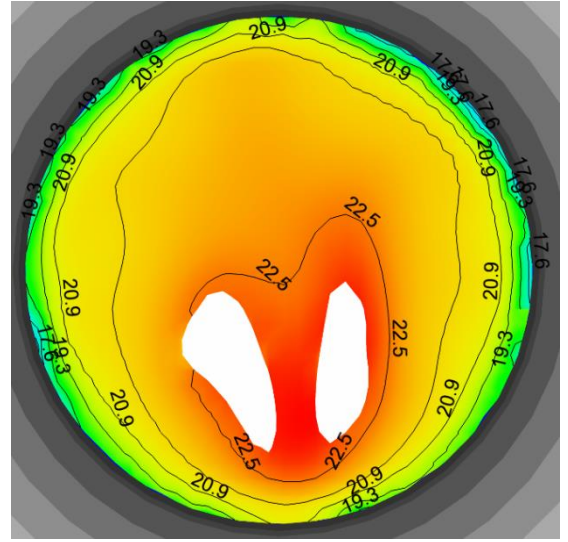
Velocity (m/s)



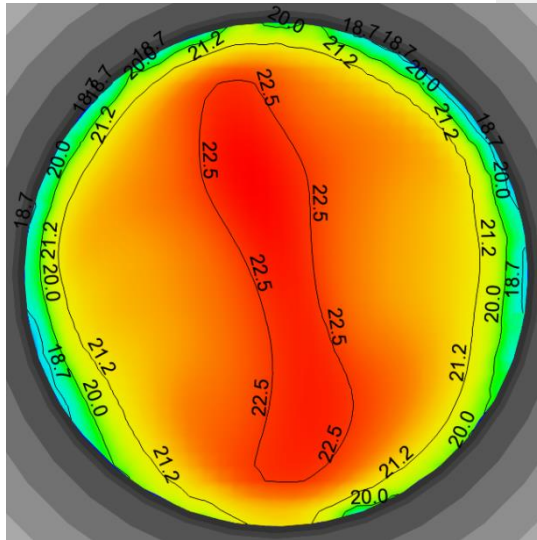
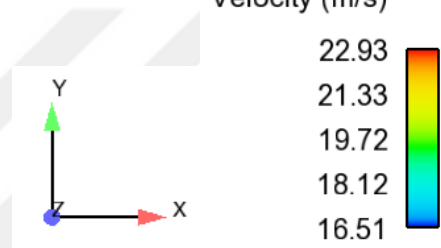
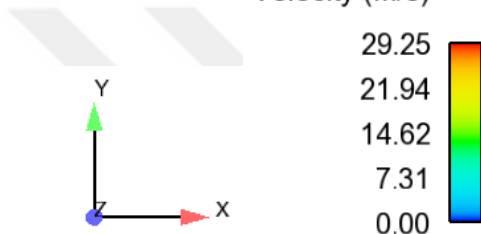
Şekil 3.12. Tasarım I şaft boyunca akım durumları ($H = 2.11$ m)



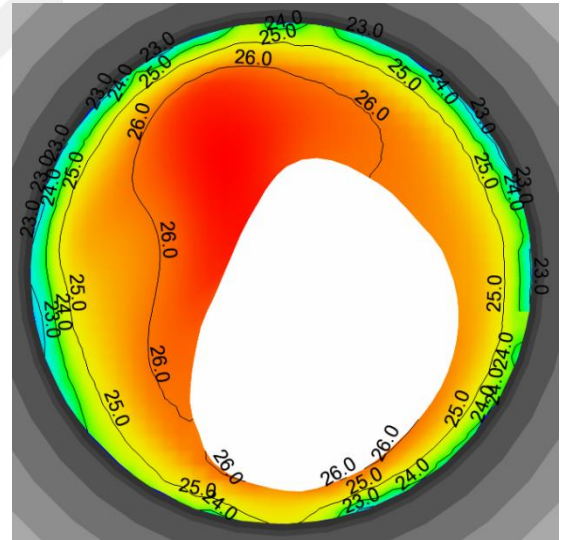
(A)
Velocity (m/s)



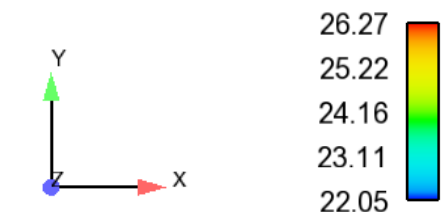
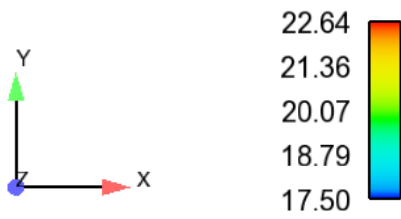
(B)
Velocity (m/s)



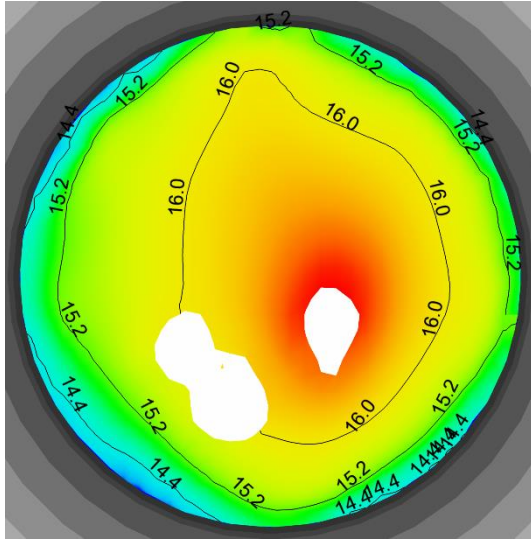
(C)
Velocity (m/s)



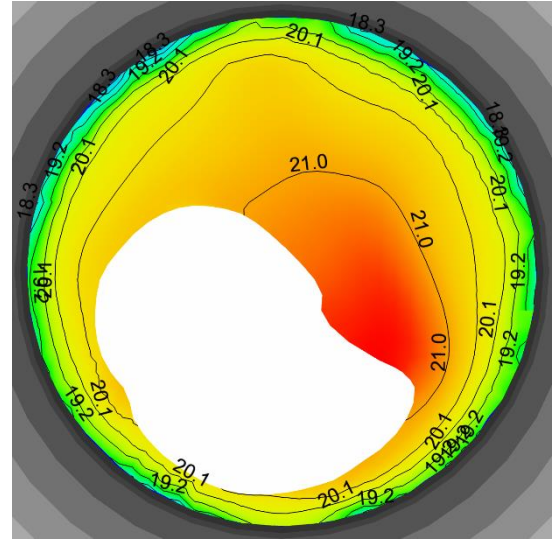
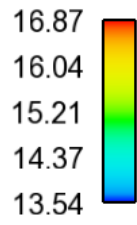
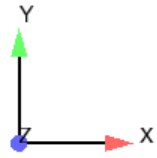
(D)
Velocity (m/s)



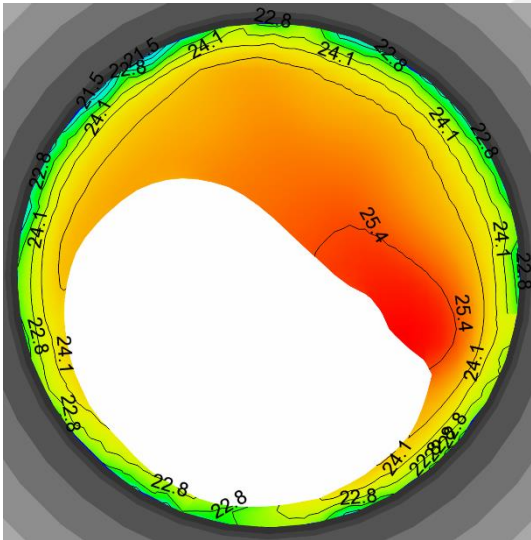
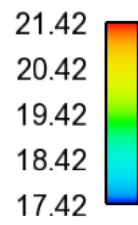
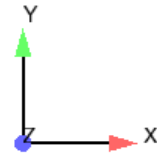
Şekil 3.13. Tasarım I şaft boyunca akım durumları ($H = 2.02$ m)



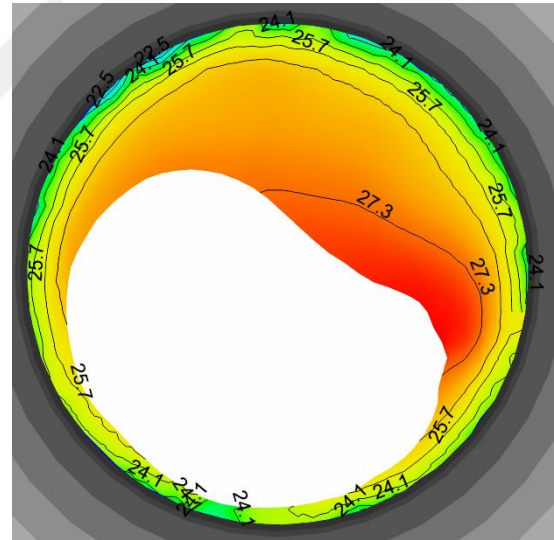
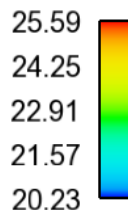
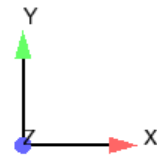
(A)
Velocity (m/s)



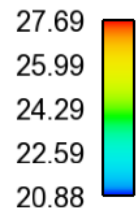
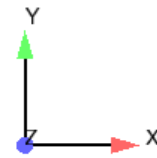
(B)
Velocity (m/s)



(C)
Velocity (m/s)



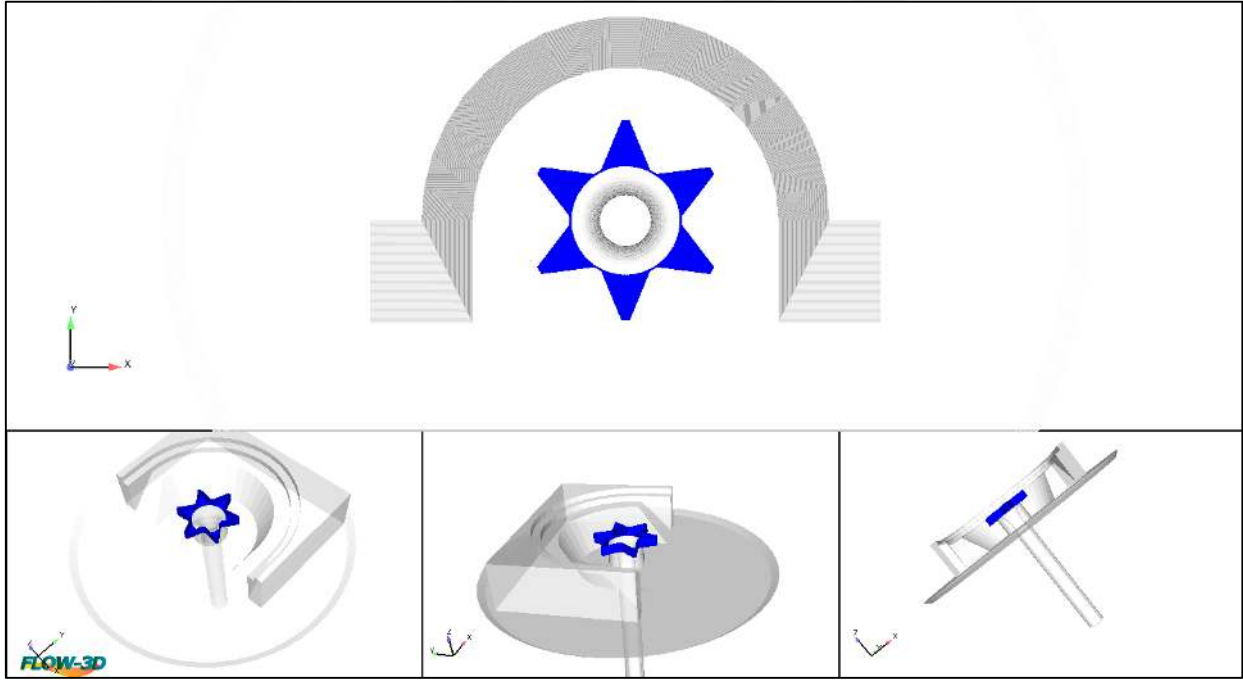
(D)
Velocity (m/s)



Şekil 3.14. Tasarım I şaft boyunca akım durumları ($H=1.79$ m)

3.3.2. İkinci Labirent Savak Tasarımı

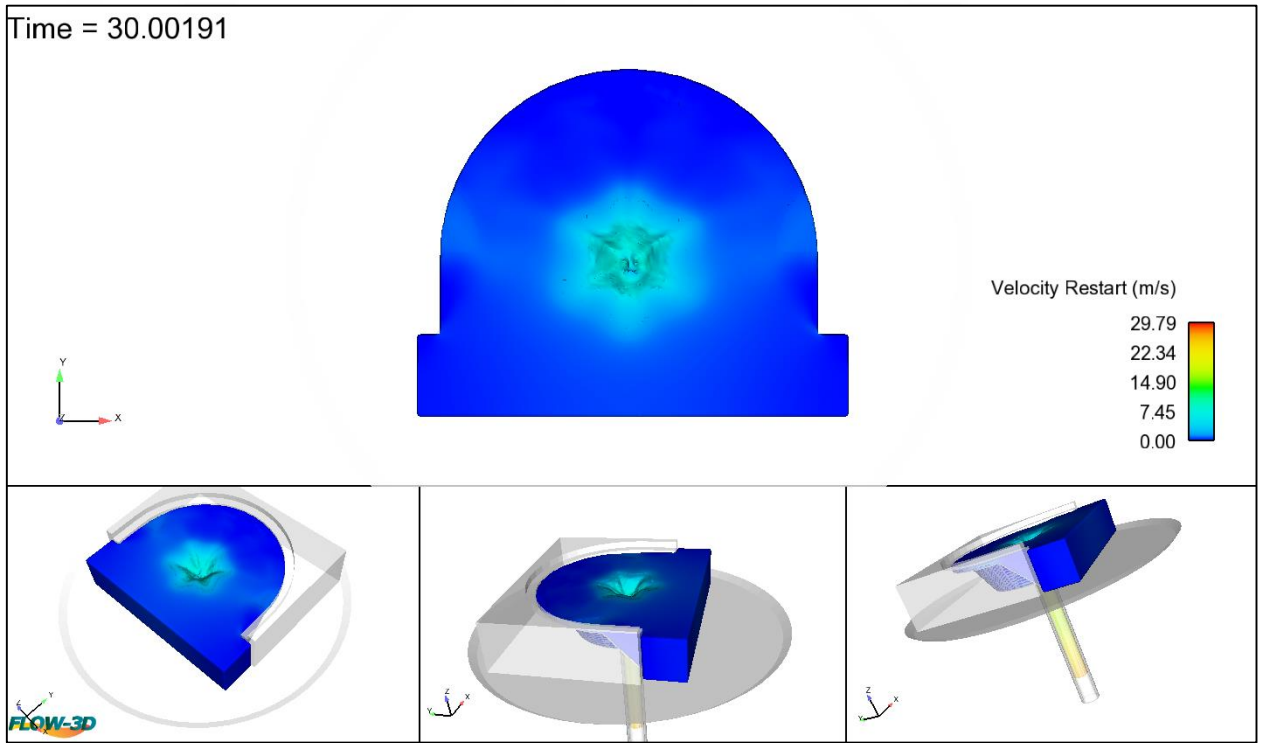
‘Tasarım II’ olarak adlandırılan ikinci labirent savak tasarımı, birinci tasarımdan farklı olarak savak açısı $\alpha = 22.5^\circ$ olarak tasarlanmıştır. Savak açısında meydana gelen bu değişim sonucunda, labirent savak kret uzunluğu $L_2 = 72.48$ m olmuştur. Tasarım II’ye ait çizim geometrisi ve HAD analizinden elde edilen şekiller sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’de gösterilmiştir. Savak açısı değişiminin dışında ikinci tasarımda birinci tasarımla aynı hidrolik koşullar altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tasarıma ait savak özellikleri ve boyutsuz olarak elde edilen değerler Çizelge 3.5’de gösterilmektedir. Birinci tasarımda ortaya çıkan $L_1/\zeta_2 = 3.66$ boyutsuz oranı, bu ikinci labirent savak tasarımında $L_2/\zeta_2 = 4.61$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer, orijinal savak durumunun $L_2/\zeta_1 = 2.10$, birinci labirent savaktan elde edilen değer ise $L_2/L_1 = 1.26$ katıdır.



Şekil 3.15. Tasarım II görüntüsü

Tasarlanan bu ikinci tasarımdan geçen debi miktarı Çizelge 3.6’da gösterilmektedir. Çizelge incelendiğinde bu tasarımın geçirdiği maksimum debi $Q_{T2maks} = 353.40$ m³/s’lik değerle $H = 2.11$ m su yükünden elde edilmiştir. Bu çizelgeye göre, aynı boğaz ve kret çevresin (çapına) sahip dairesel kretli (orijinal) şaft dolusavak ile trapez kretli şaft dolusavak karşılaştırıldığında; aynı savak yükünde trapez kretli Tasarım II’in orijinal duruma göre minimum seviye için %231, maksimum seviye için ise %53 daha fazla debi savakladığı görülmektedir. Bu oran tüm savak yükleri için %105 artış olarak elde edilmiştir. Diğer bir değişle, Tasarım I’de olduğu gibi bu

tasarımda da trapez kretli tasarım orijinal dairesel kesitli savaklara göre baraj haznelerinde aynı savaklama debisi için daha az seviye değişimi sağlayacaktır. Seviye değişimlerinin minimuma indirilmesi barajlardaki enerji verimliliğini arttıracak gibi, daha iyi bir taşkın kontrolü sağlayacaktır. Şekil 3.17, Tasarım II'den geçen debi değerlerini boyutsuz H/P oranına bağlı olarak göstermektedir. Grafik incelendiğinde, grafiğin, Tasarım I kadar olmasa da lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 yukarıdaki bölümde tanımlanan A, B, C ve D noktalarından alınan şaft içi hız büyüklüklerini göstermektedir. En yüksek dört su yüküne ($H = 2.18$ m, $H = 2.11$ m, $H = 2.02$ m, $H = 1.79$ m) ait olan bu görseller incelendiğinde kesitlerdeki hız değerlerinin ve şekillerin birbirinden çok farklı olmadığı anlaşılmaktadır.



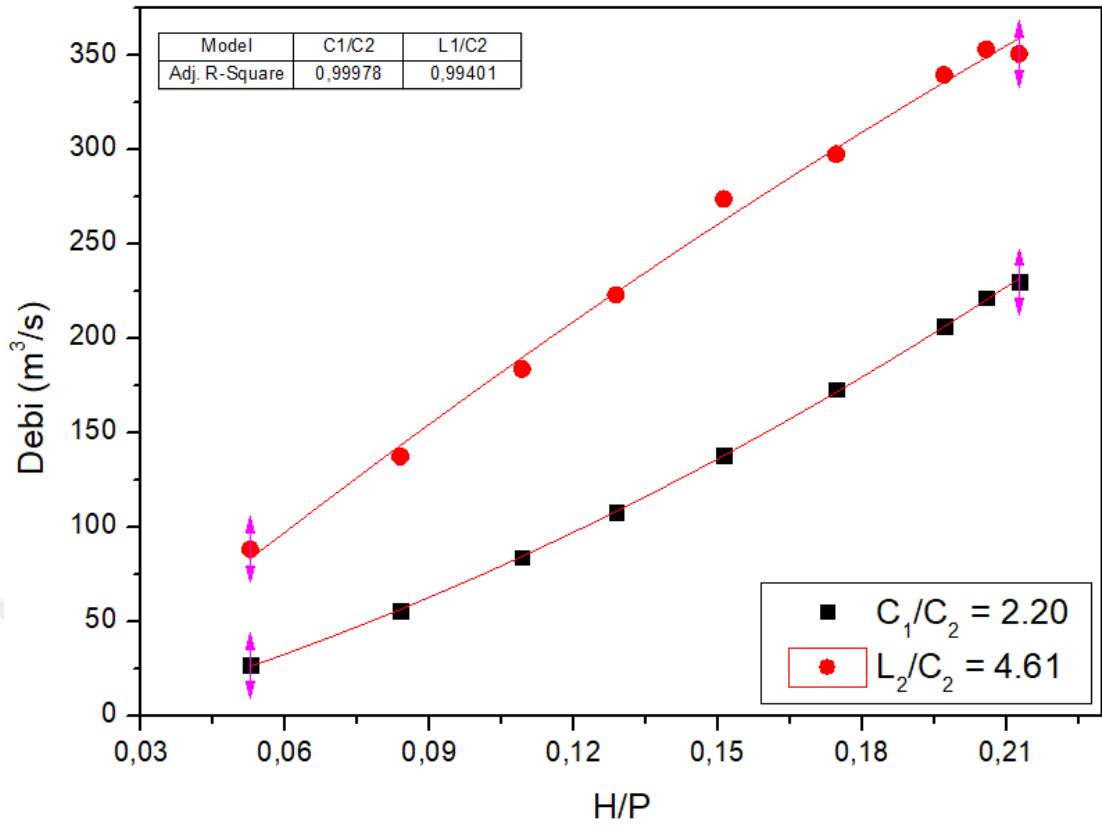
Şekil 3.16. Tasarım II'in sayısal simülasyondan bir görünüşü ($H = 2.02$ m)

Çizelge 3.5. Orijinal ve Tasarım II'e ait savaklama uzunlukları ve oranları

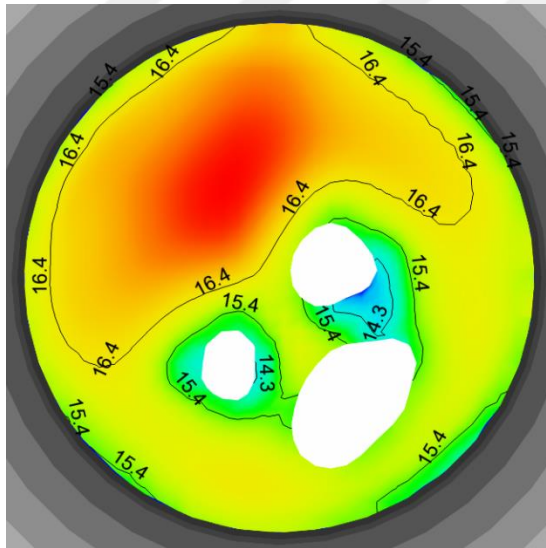
Savak Özellikleri	Değer
Orijinal proje şaft giriş ağzı çevre uzunluğu (ζ_1)	34.56 m
Orijinal proje şaft kesit çevre uzunluğu (ζ_2)	15.71 m
Tasarlanan II. labirent trapez model savak uzunluğu (L_2)	72.48 m
L_2/ζ_1	2.10
L_2/ζ_2	4.61
ζ_1/ζ_2	2.20

Çizelge 3.6. Tasarım II'e ait su yüklerine göre debi değerleri

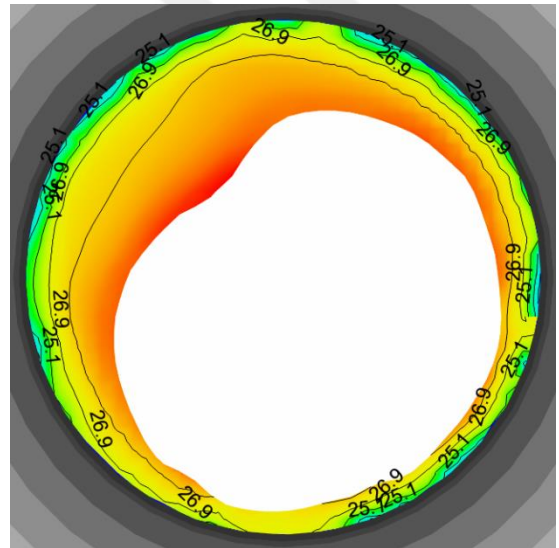
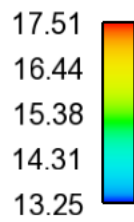
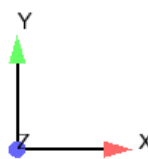
$\alpha = 22.5^\circ; L_2/\zeta_2 = 4.61$				
$L_2 = 72.48$ m	$P = 10.25$ m	ζ_1/ζ_2	$\zeta_2 = 15.71$ m	Artış
H (m)	H/P	Q (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	%
0.54	0.053	26.66	88.13	231
0.86	0.084	55.60	137.40	147
1.12	0.109	83.92	183.74	119
1.32	0.129	107.81	223.10	107
1.55	0.151	137.99	273.97	99
1.79	0.175	172.86	297.75	72
2.02	0.197	206.41	339.83	65
2.11	0.206	221.49	353.40	60
2.18	0.213	230.12	350.96	53



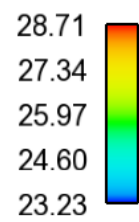
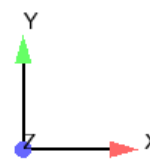
Şekil 3.17. Tasarım II ve Orjinal Durum HAD karşılaştırması

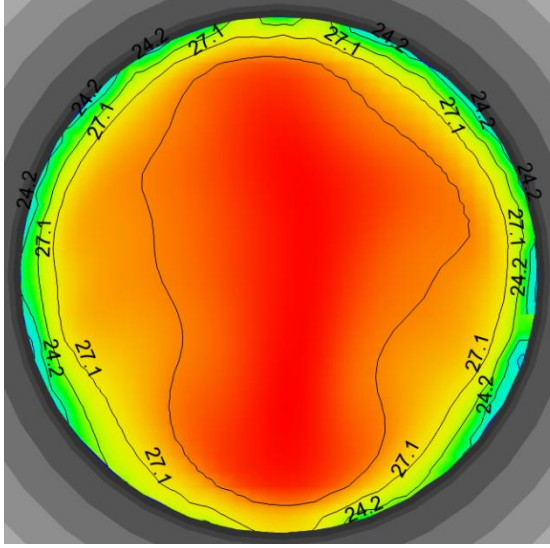


Velocity (m/s)

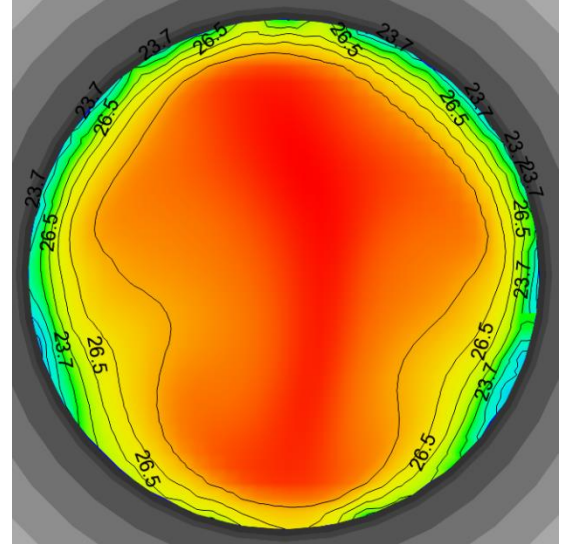
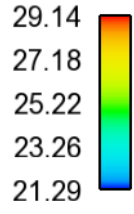
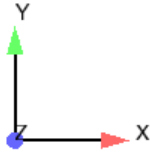


Velocity (m/s)

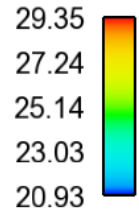
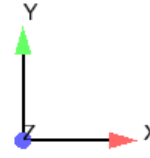




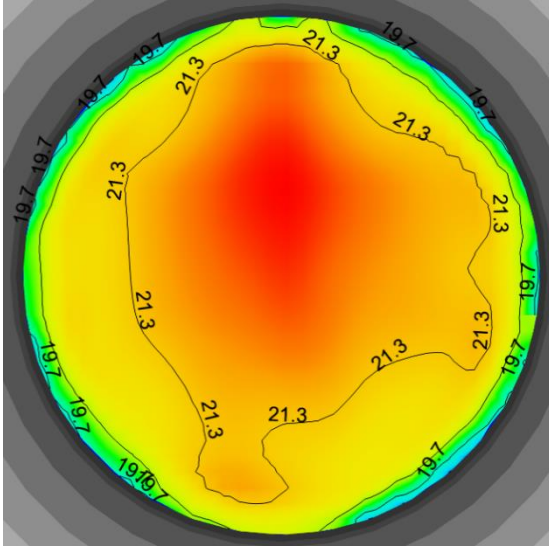
(C)
Velocity (m/s)



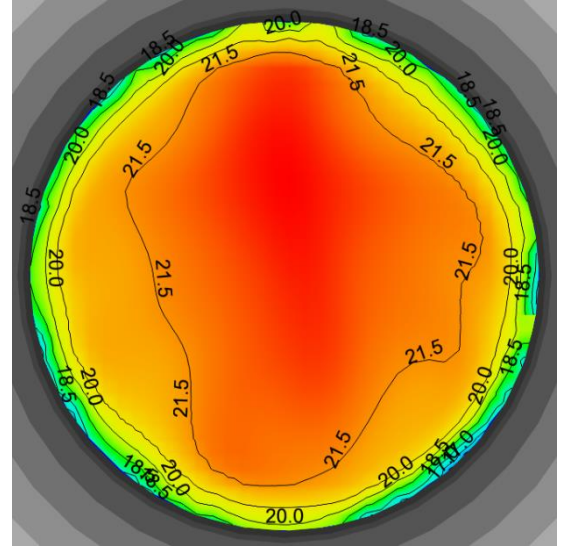
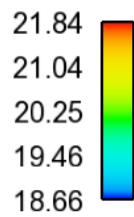
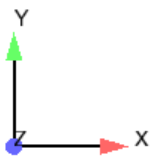
(D)
Velocity (m/s)



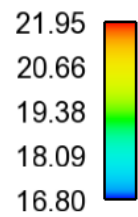
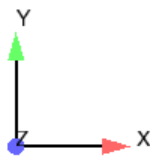
Şekil 3.18. Tasarım II şaft boyunca akım durumları ($H=2.18$ m)

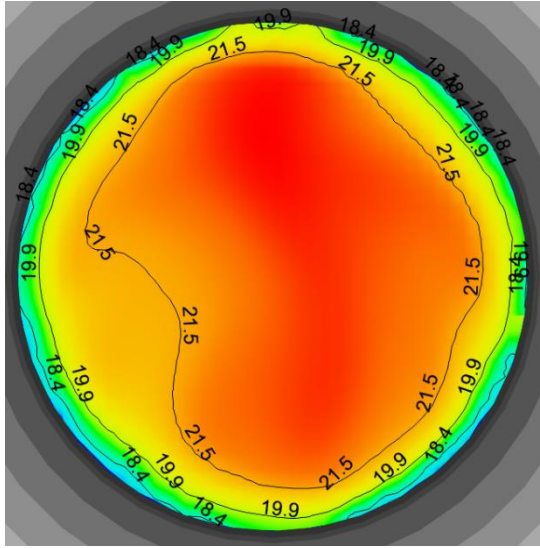


(A)
Velocity (m/s)



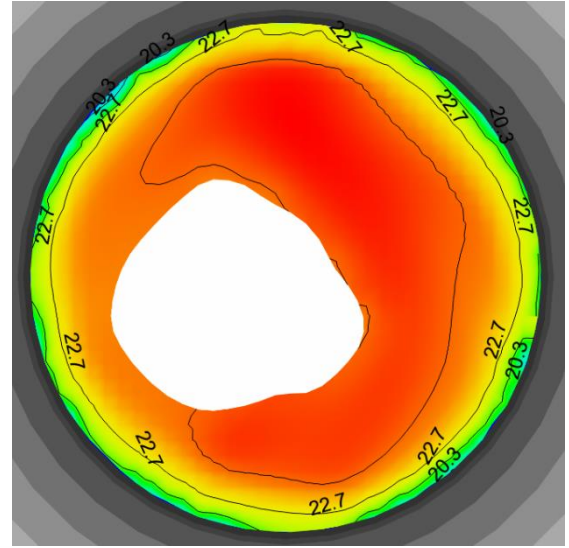
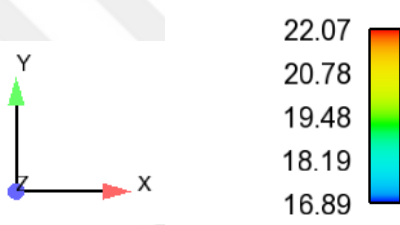
(B)
Velocity (m/s)





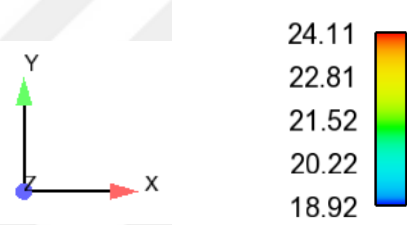
(C)

Velocity (m/s)

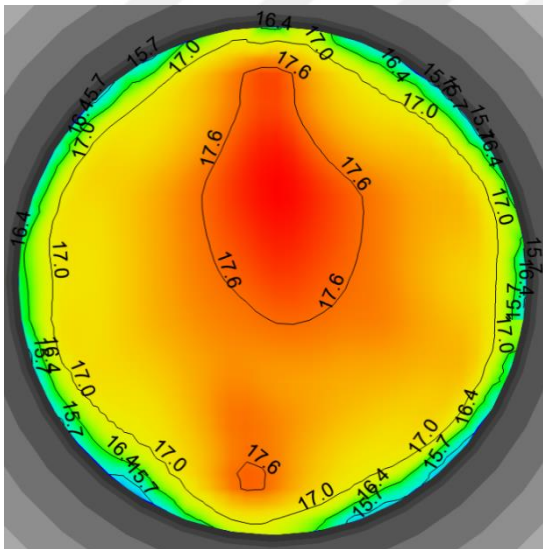


(D)

Velocity (m/s)

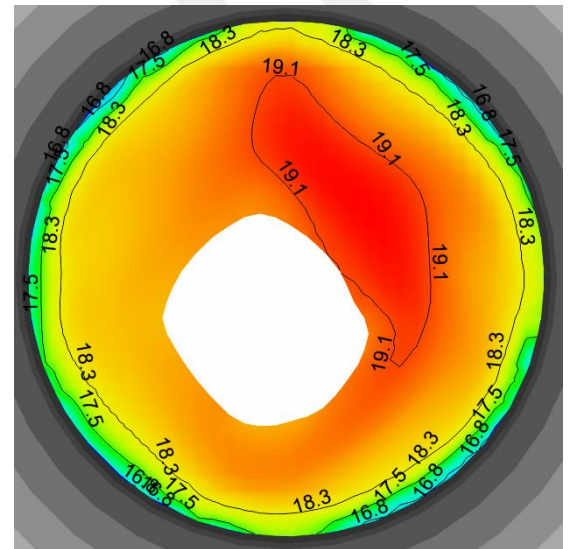
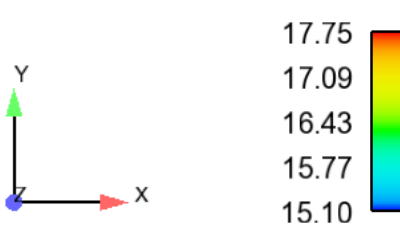


Şekil 3.19. Tasarım II şaft boyunca akım durumları ($H=2.11$ m)



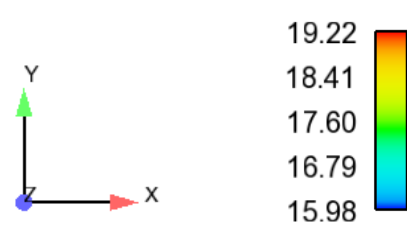
(A)

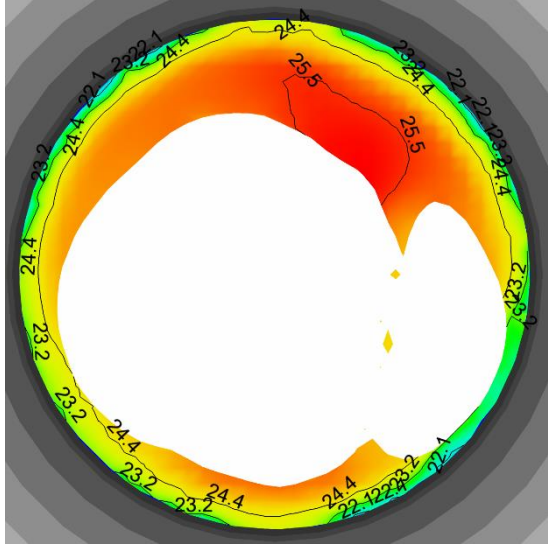
Velocity (m/s)



(B)

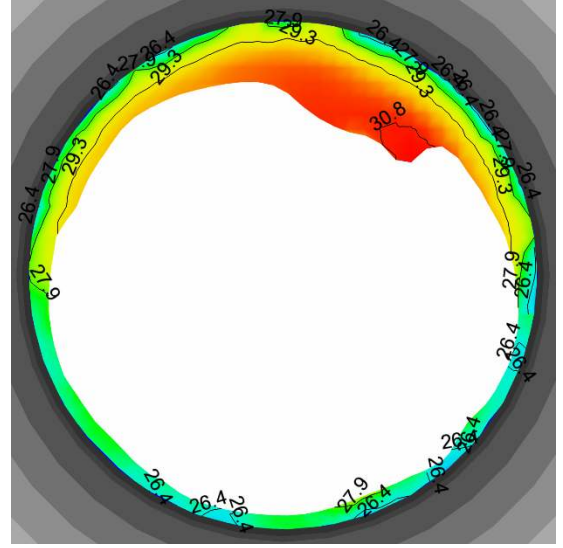
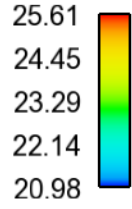
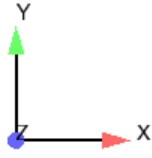
Velocity (m/s)





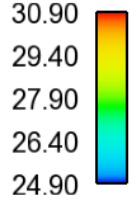
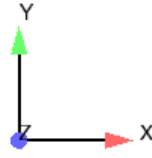
(C)

Velocity (m/s)

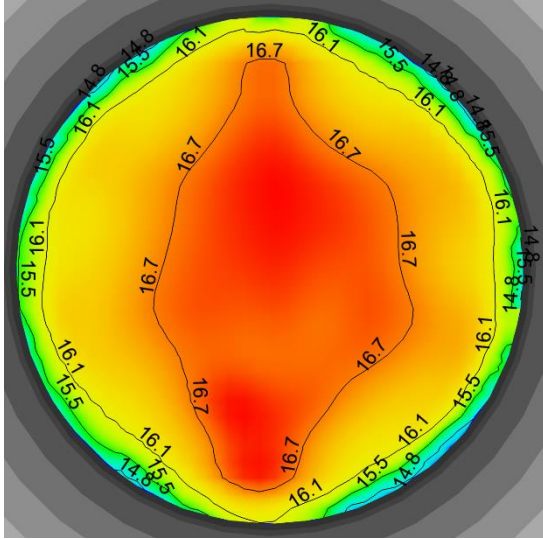


(D)

Velocity (m/s)

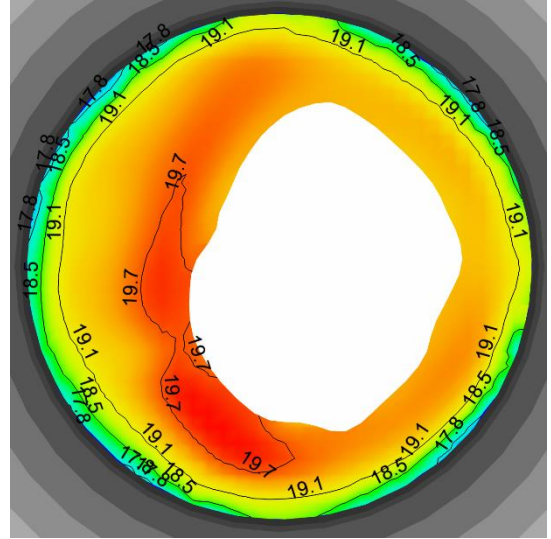
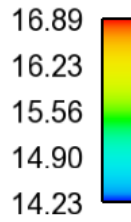
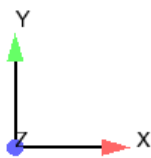


Şekil 3.20. Tasarım II şaft boyunca akım durumları (H = 2.02 m)



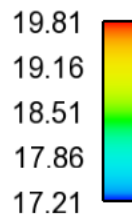
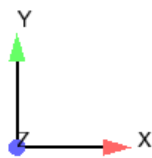
(A)

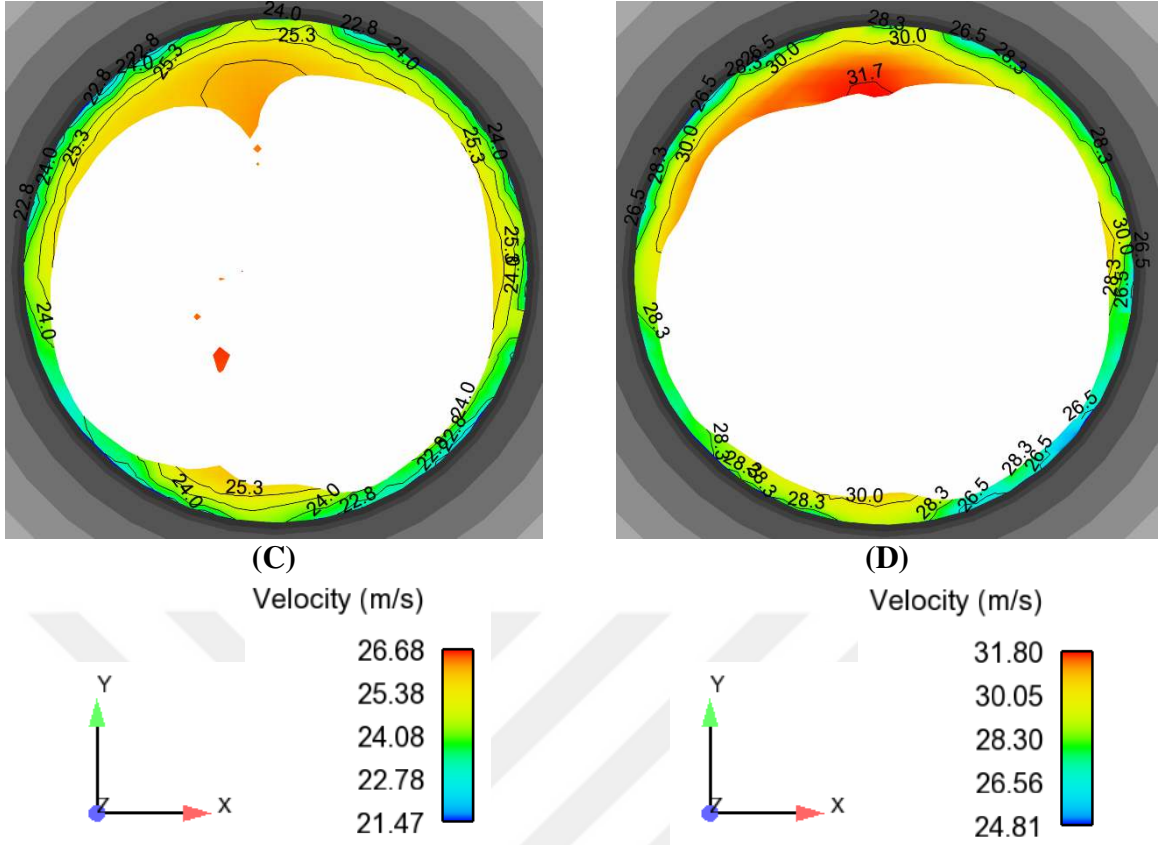
Velocity (m/s)



(B)

Velocity (m/s)



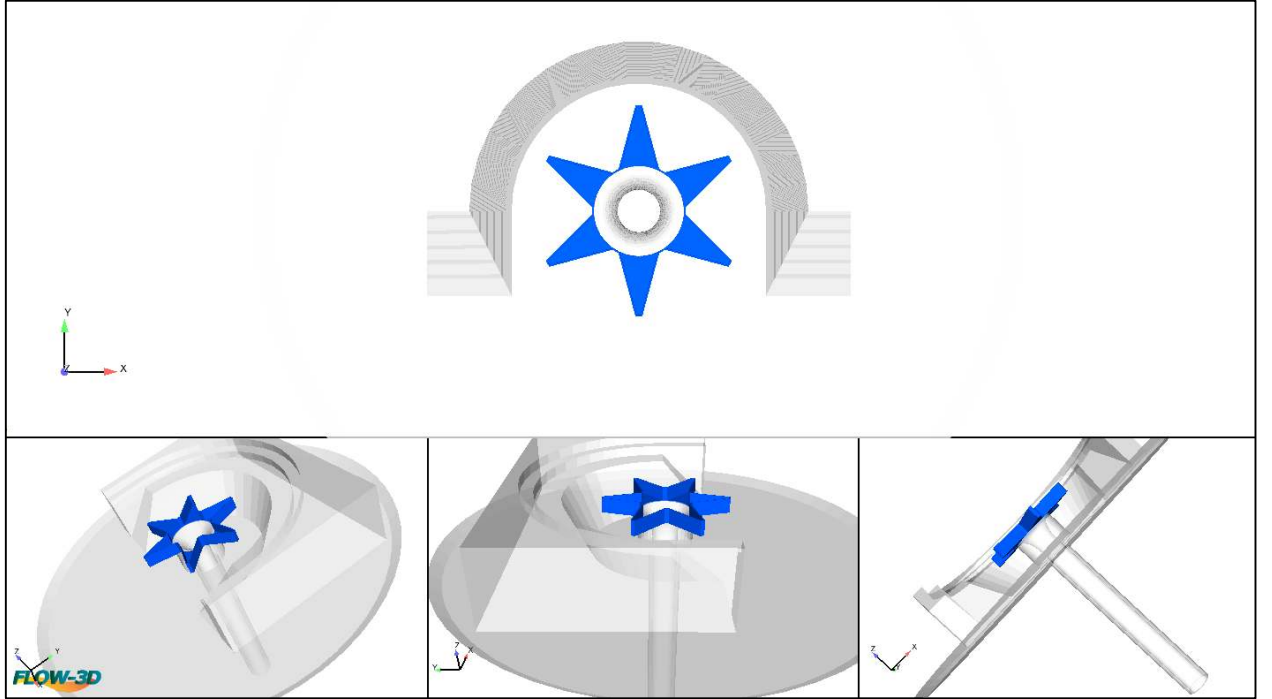


Şekil 3.21. Tasarım II şaft boyunca akım durumları (H = 1.79 m)

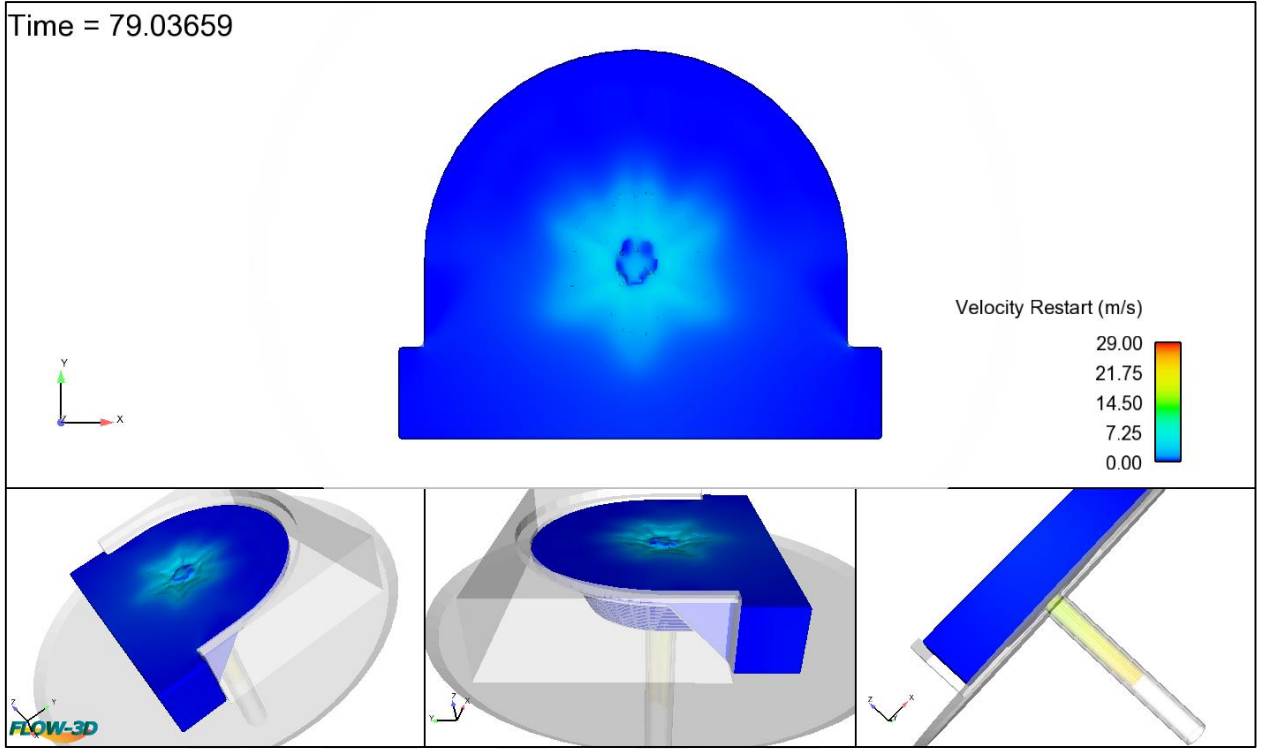
3.3.3. Üçüncü Trapez Labirent Tasarımı

Hazırlanan tez için üretilen üçüncü trapez labirent savak tasarımının kret uzunluğu $L_3 = 102.48$ m'dir. En büyük savaklama uzunluğuna sahip bu tasarımda labirent savak açısı $\alpha = 15^\circ$ olarak belirlenmiştir. Tasarım III'e ait savak görüntüsü Şekil 3.22'de ve bu tasarımın HAD analizinden alınan görseli ise Şekil 3.23'de verilmiştir. Savak açısı ve savak uzunluğu dışında bütün diğer hidrolik ve geometrik şartların aynı olduğu Tasarım III'e ait savak özellikleri ve boyutsuz değerler tablosu ise Çizelge 3.7'de sunulmuştur. Tasarım III'e ait su yüklerinin orijinal duruma göre debi artış ortalaması ise %148 olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan bu savakta savak uzunluğunun dairesel şaft çevre uzunluna oranı $L_3/\zeta_2 = 6.52$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, orijinal tasarım büyüklüğünün $L_3/\zeta_1 = 2.96$, Tasarım I'in $L_3/L_1 = 1.78$ ve Tasarım II'nin ise $L_3/L_2 = 1.41$ katıdır. Tasarım III'den elde edilen debi değerleri Çizelge 3.8'de verilmiştir. Bu çizelge kullanılarak elde edilen grafik ise Şekil 3.22'de gösterilmektedir. Çizelge ve grafik incelendiğinde Tasarım III'den geçen maksimum debi $Q_{T3maks} = 351.47$ m³/s olduğu görülmüştür. Bu çizelgeye göre, aynı boğaz ve kret çevresin (çapına) sahip dairesel kretli (orijinal) şaft dolusavak ile trapez kretli şaft dolusavak karşılaştırıldığında; aynı savak yükünde

trapez kretli Tasarım II'in orijinal duruma göre minimum seviye için %328, maksimum seviye için ise %53 daha fazla debi savakladığı görülmektedir. Bu oran tüm savak yükleri için %148 artış olarak elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, Tasarım III diğer tasarımlarda olduğu gibi bu tasarımda da trapez kretli tasarım orijinal dairesel kesitli savaklara göre baraj haznelerinde aynı savaklama debisi için daha az seviye değişimi sağlayacaktır. Seviye değişimlerinin minimuma indirilmesi barajlardaki enerji verimliliğini arttıracak gibi, daha iyi bir taşkın kontrolü sağlayacaktır. Bu grafik incelendiğinde en büyük dört debi değerlerinin ($H = 2.18$ m, $H = 2.11$ m, $H = 2.02$ m ve $H = 1.79$ m) birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. H/P oranı 0.175'e eşit olduğu değerden sonra alınan debi değerlerinin birbirlerine çok yakın oldukları görülmektedir. Bu grafik, diğer tasarımlardan elde edilen grafiklerin aksine bombeli bir şekle sahiptir.



Şekil 3.22. Tasarım III görüntüsü



Şekil 3.23. Tasarım III'in sayısal simülasyondan bir görünüşü ($H = 2.02$ m)

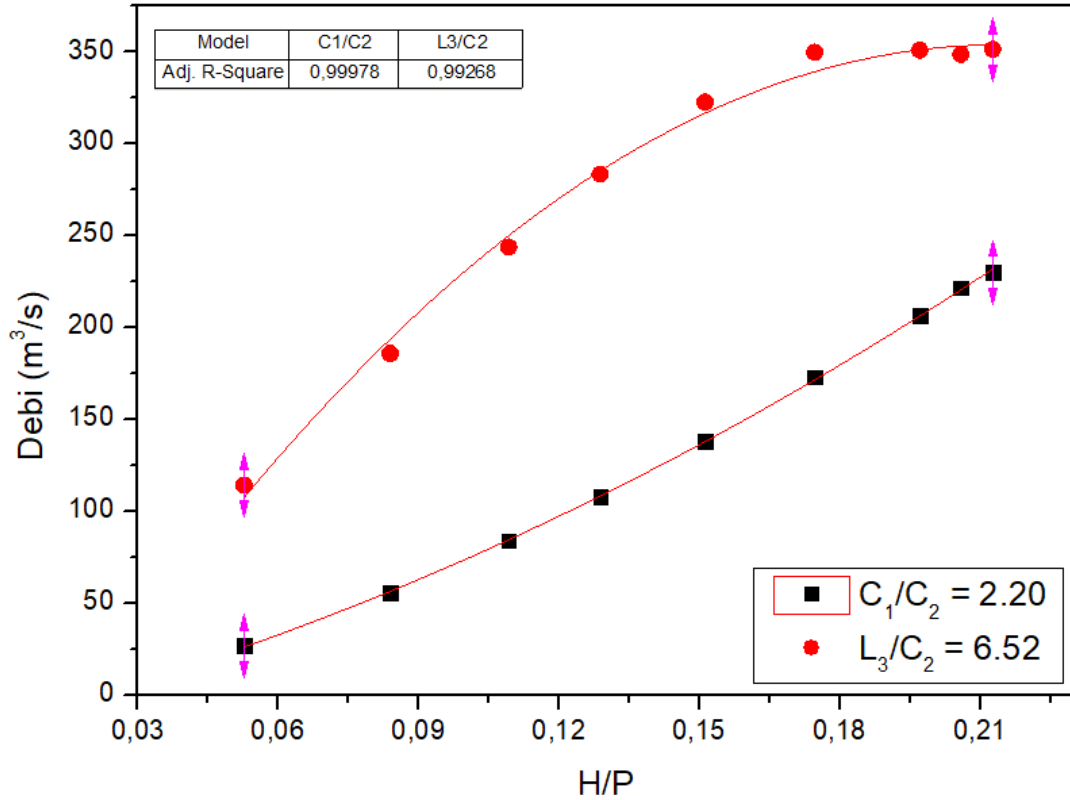
Çizelge 3.7. Orijinal ve Tasarım III'e ait savaklama uzunlukları ve oranları

Savak Özellikleri	Değer
Orijinal proje şaft giriş ağızı çevre uzunluğu ($\Ç_1$)	34.56 m
Orijinal proje şaft kesit çevre uzunluğu ($\Ç_2$)	15.71 m
Tasarlanan III. labirent trapez model savak uzunluğu (L_3)	102.48 m
$L_3/\Ç_1$	2.97
$L_3/\Ç_2$	6.52
$\Ç_1/\Ç_2$	2.20

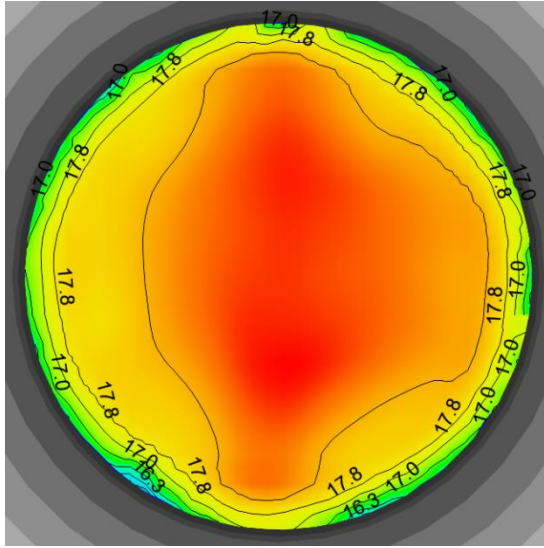
Buradan, Tasarım III'ün, $H = 1.79$ m'lik su yükünde, hemen hemen, maksimum debi geçirim değerine ulaştığı sonucu çıkarılabilir. Buna ek olarak, Tasarım II'den geçen maksimum debi de, Tasarım III'den geçen maksimum debi değerine yakın olduğu da gözlemlenmiştir. Tasarım III' ait bu veriler göz önüne alındığında 5.0 m'lik çapa sahip şaft tünelinin geçirebileceği maksimum debinin ortalama olarak bu tasarımda $350.30 \text{ m}^3/\text{s}$ olacağı söylenebilir.

Çizelge 3.8. Tasarım III'e ait su yüklerine göre debi değerleri

$\alpha = 15^\circ ; L_3/C_2 = 6.52$				
$L_2 = 102.48 \text{ m}$	$P = 10.25 \text{ m}$	C_1/C_2	$C_2 = 15.71 \text{ m}$	Artış
H (m)	H/P	Q (m ³ /s)	Q ₃ (m ³ /s)	%
0.54	0.053	26.66	114.14	328
0.86	0.084	55.60	185.88	234
1.12	0.109	83.92	243.80	191
1.32	0.129	107.81	283.49	163
1.55	0.151	137.99	322.79	134
1.79	0.175	172.86	349.91	102
2.02	0.197	206.41	351.05	70
2.11	0.206	221.49	348.76	57
2.18	0.213	230.12	351.47	53

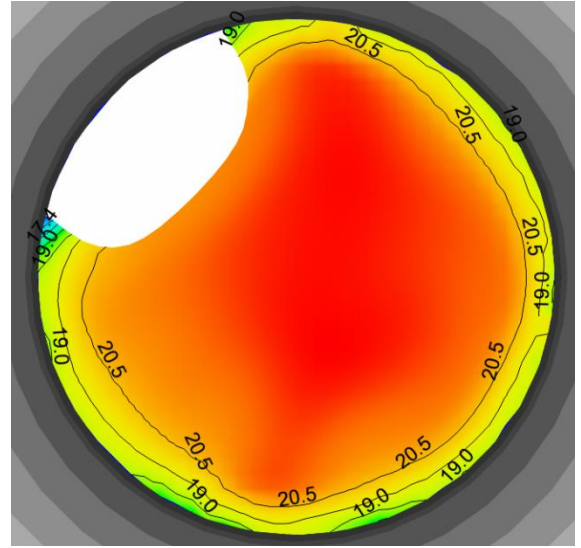
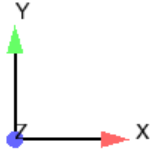
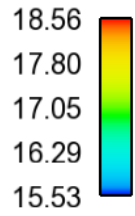


Şekil 3.24. Tasarım III ve orijinal durum HAD karşılaştırması



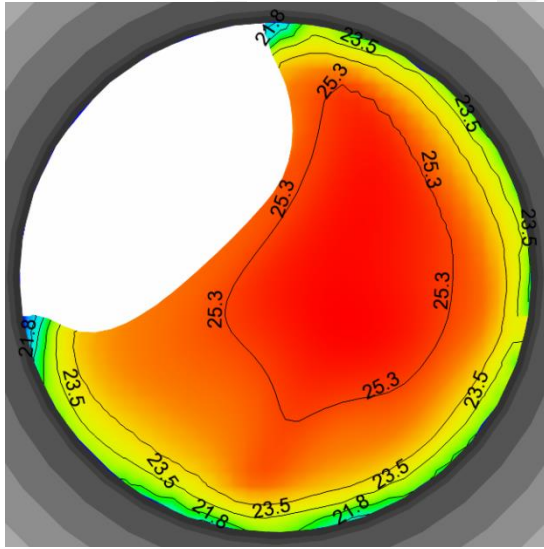
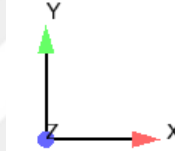
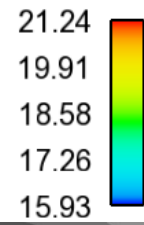
(A)

Velocity (m/s)



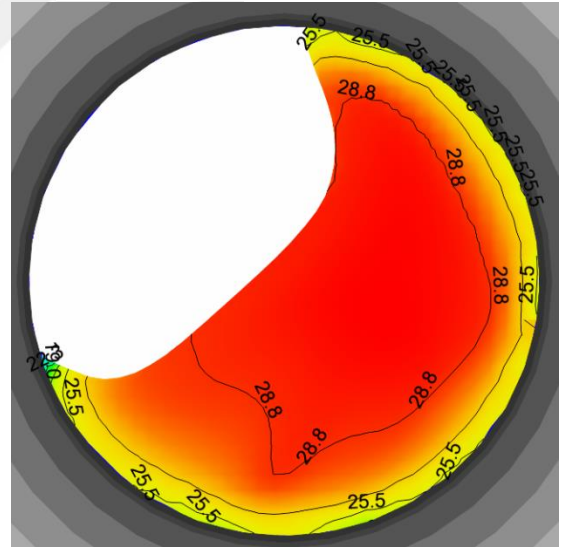
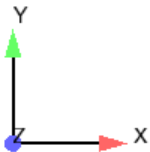
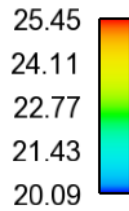
(B)

Velocity (m/s)



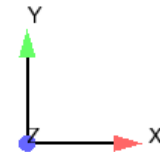
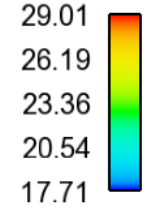
(C)

Velocity (m/s)

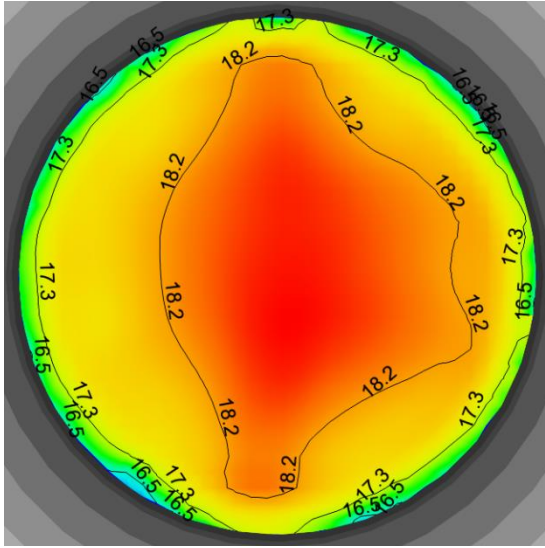


(D)

Velocity (m/s)

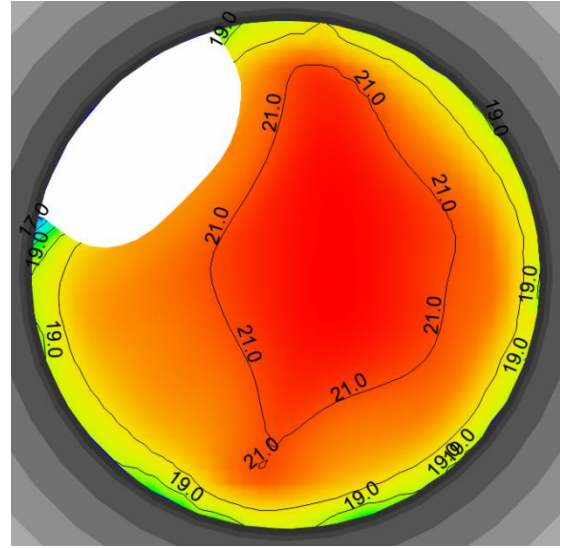
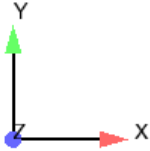
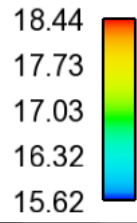


Şekil 3.25. Tasarım III şaft boyunca akım durumları (H =2.18 m)



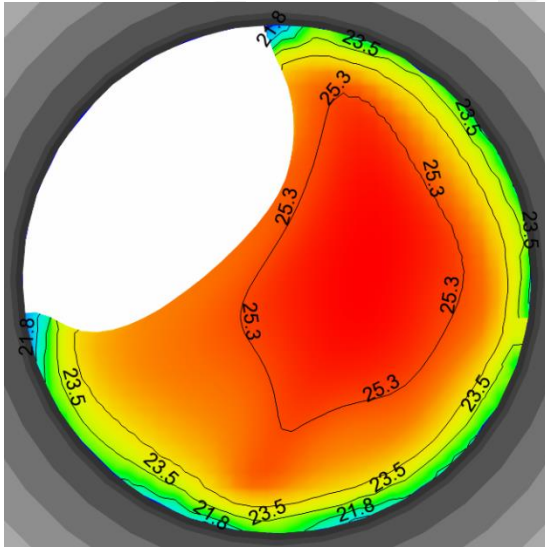
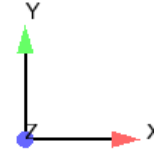
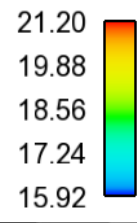
(A)

Velocity (m/s)



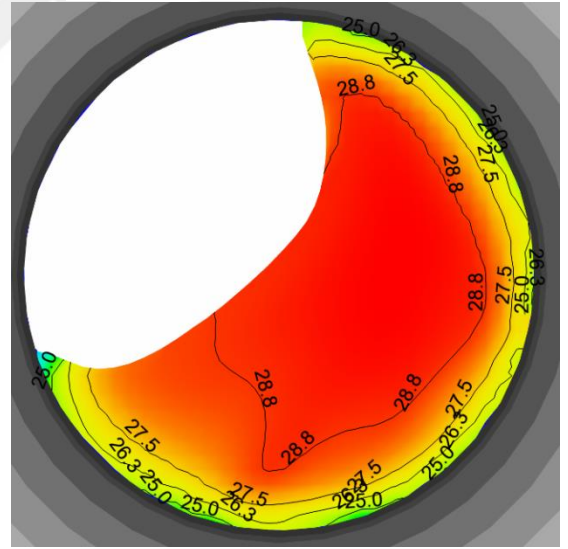
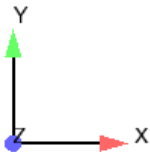
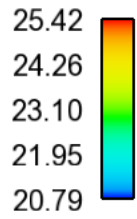
(B)

Velocity (m/s)



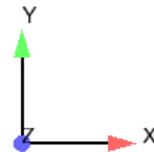
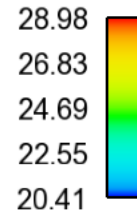
(C)

Velocity (m/s)

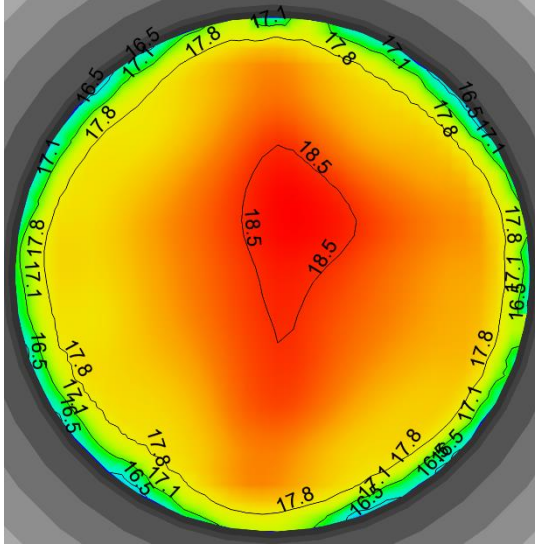


(D)

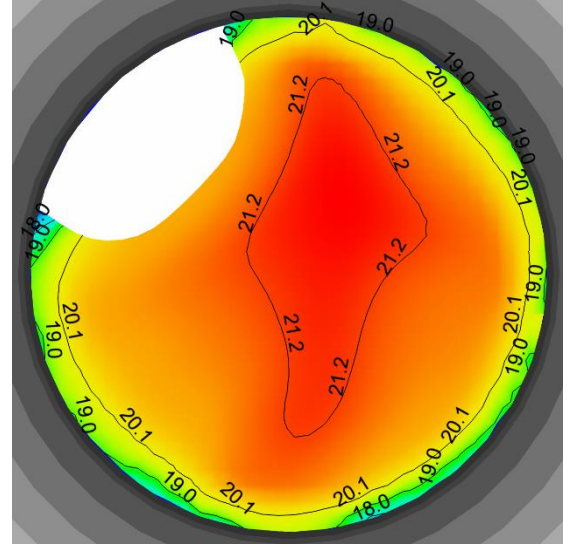
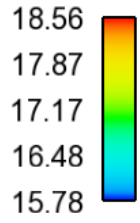
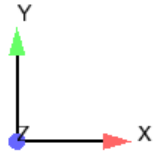
Velocity (m/s)



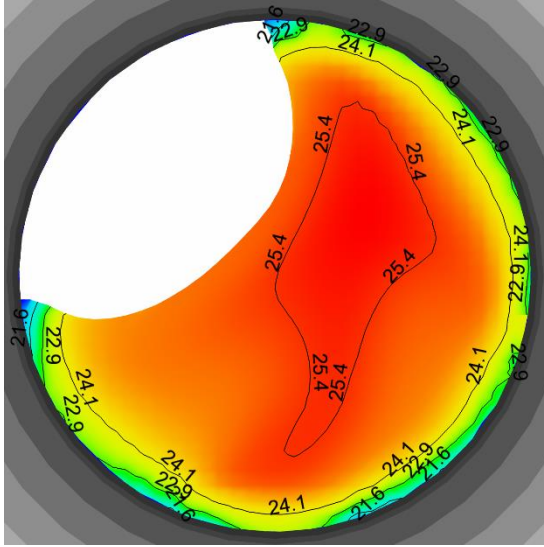
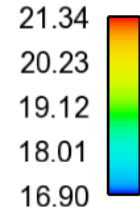
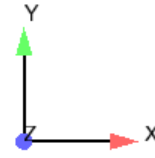
Şekil 3.26. Tasarım III şaft boyunca akım durumları (H = 2.11 m)



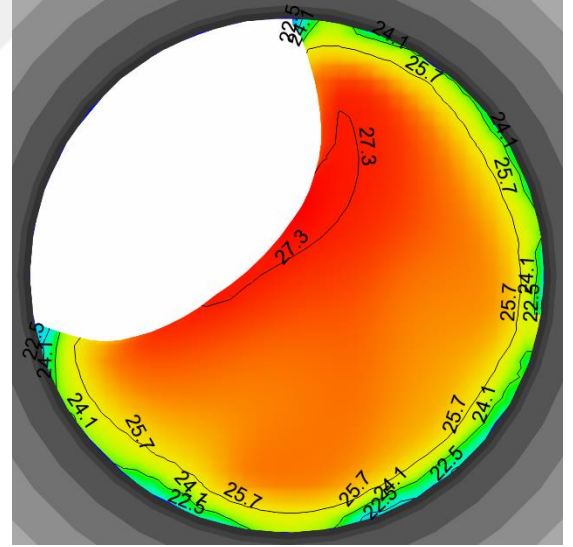
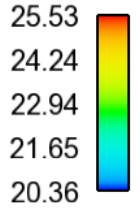
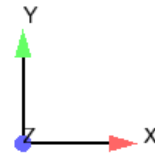
(A)
Velocity (m/s)



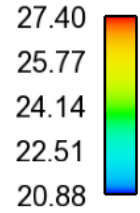
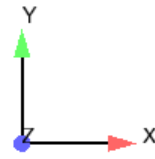
(B)
Velocity (m/s)



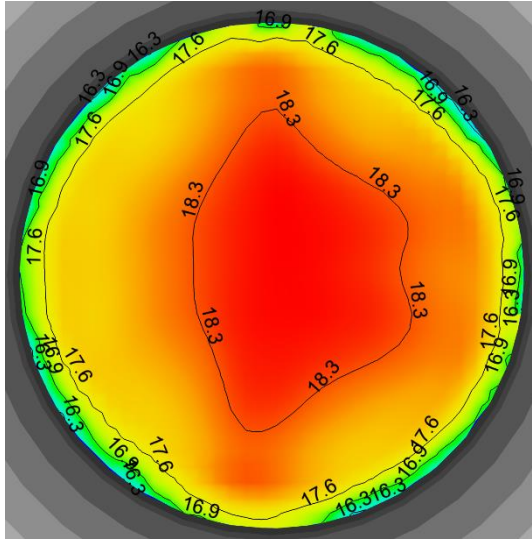
(C)
Velocity (m/s)



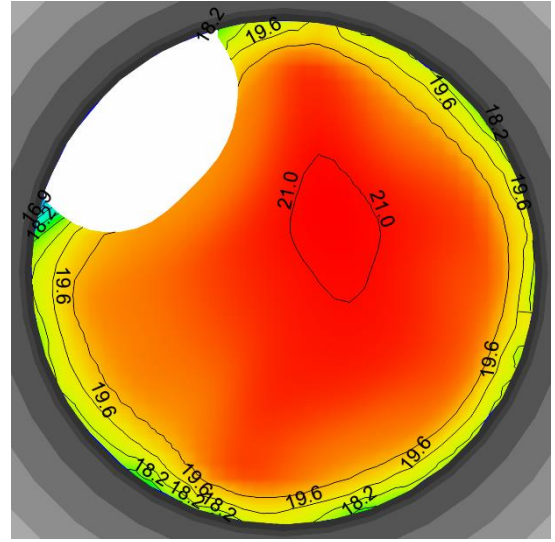
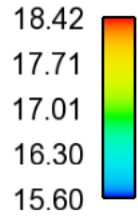
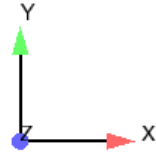
(D)
Velocity (m/s)



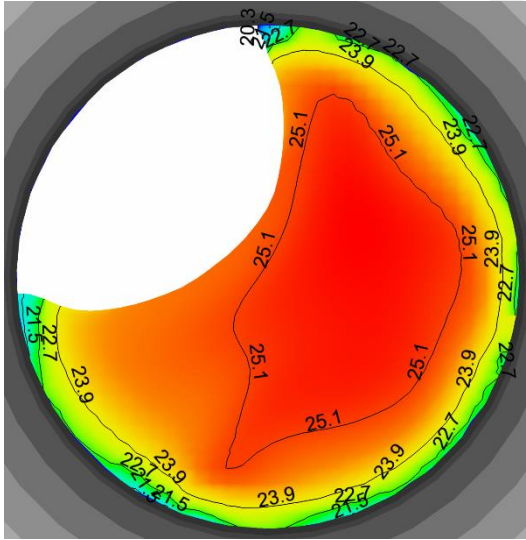
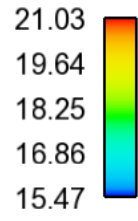
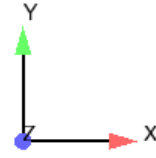
Şekil 3.27. Tasarım III şaft boyunca akım durumları (H = 2.02 m)



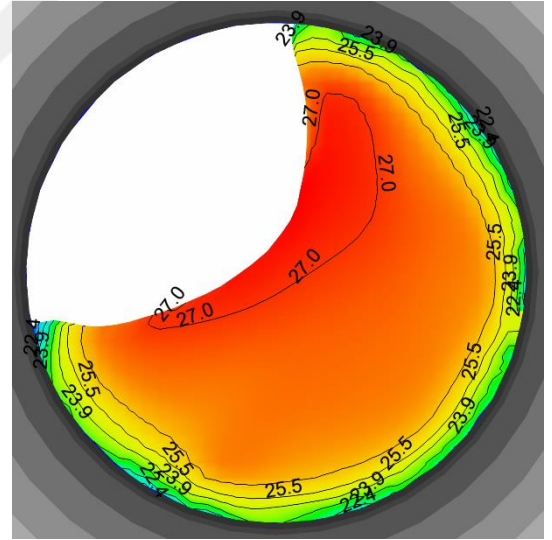
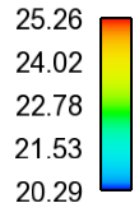
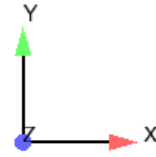
(A)
Velocity (m/s)



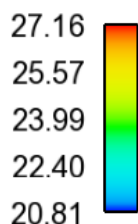
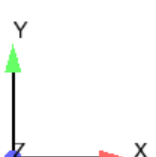
(B)
Velocity (m/s)



(C)
Velocity (m/s)



(D)
Velocity (m/s)



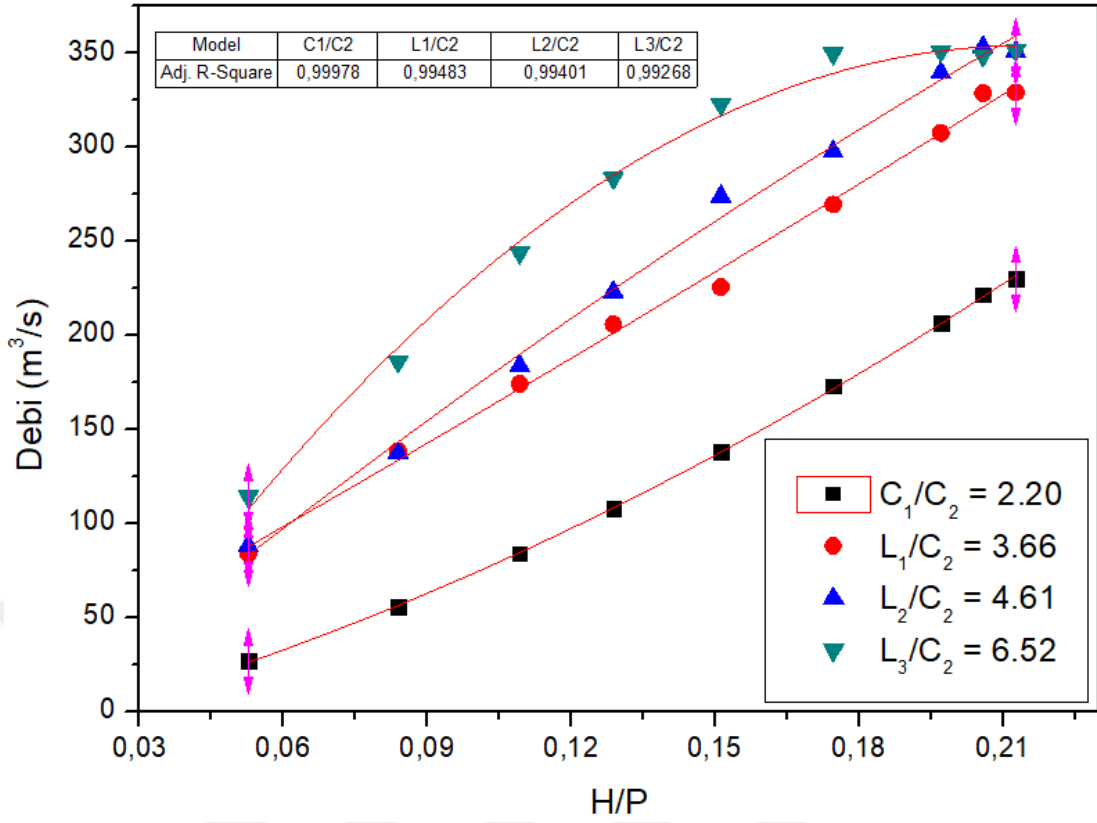
Şekil 3.28. Tasarım III şaft boyunca akım durumları ($H = 1.79$ m)

3.3.4. Tasarımların Karşılaştırması

Yukarıdaki bölümlerde orijinal durum ve orijinal duruma alternatif olarak tasarlanan üç yeni tasarım ayrı ayrı incelenmiştir. Bu bölümde, yukarıda incelen durumlar bir araya getirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Çizelge 3.9’da boyutsuz H/P oranına karşılığında elde edilen debi değerleri gösterilmektedir. Çizelge incelendiğinde her su yükü (H) değeri karşısında geçirilen debilerin soldan sağa doğru gittikçe, yani her yeni tasarımda arttığı görülmektedir. Elde edilen veriler, Tasarım III’ün en fazla debiyi geçirdiğini göstermiştir. Kale Barajı dolusavağı planında maksimum geçirilmesi istenen olası en büyük taşkın debisinin $Q_{OEBT} = 189.71 \text{ m}^3/\text{s}$ olduğu bilinmektedir. Orijinal tasarıma bağlı kalınarak tasarlanan durumda bu debiye karşılık gelen, HAD analizlerinden elde edilen, debi %9’luk bir farkla $206.49 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Bu debi $H = 2.02 \text{ m}$ ’lik su yüküne karşılık gelen değerdir. Çizelge incelendiğinde, $H = 2.02 \text{ m}$ su yüküne karşılık gelen bu debi değeri, sırasıyla Tasarım I’de $H = 1.55 \text{ m}$ ’lik, Tasarım II’de $H = 1.32 \text{ m}$ ’lik, ve Tasarım III’de ise $H = 1.12 \text{ m}$ ’lik su yüklerinde fazlasıyla geçildiği gözlenmiştir. Bunlara ek olarak, orijinal tasarımda $H = 2.18 \text{ m}$ ’de geçirilen maksimum debi, Tasarım I’de 1.79 m ’de, Tasarım II’de 1.55 m ’de ve Tasarım III’de $H = 1.12 \text{ m}$ ’de geçilmiştir. Çizelgenin grafiğe aktarılmış hali Şekil 3.29’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Orijinal durum ve tasarımlara ait su yüklerine göre debi değerleri

		Tasarım I		Tasarım II	Tasarım III
	Savak yük.	Ç ₁ =34.56 m	L ₁ = 57.48 m	L ₂ = 72.48 m	L ₃ = 102.48 m
Su yükü	P = 10.25 m	Ç ₂ =15.71 m	α = 30°	α = 22.5°	α = 15°
H	H/P	Ç ₁ /Ç ₂	L ₁ /Ç ₂	L ₂ /Ç ₂	L ₃ /Ç ₂
(m)	(m)	Q (m ³ /s)	Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q ₃ (m ³ /s)
0.54	0.053	26.66	83.74	88.13	114.14
0.86	0.084	55.60	138.36	137.40	185.88
1.12	0.109	83.92	174.07	183.74	243.8
1.32	0.129	107.81	205.82	223.11	283.49
1.55	0.151	137.99	225.63	273.97	322.79
1.79	0.175	172.86	269.57	297.75	349.91
2.02	0.197	206.41	307.64	339.83	351.05
2.11	0.206	221.49	328.76	353.40	348.76
2.18	0.213	230.12	329.26	350.96	351.47



Şekil 3.29. Orijinal durum, Tasarım I, Tasarım II ve Tasarım III HAD karşılaştırması

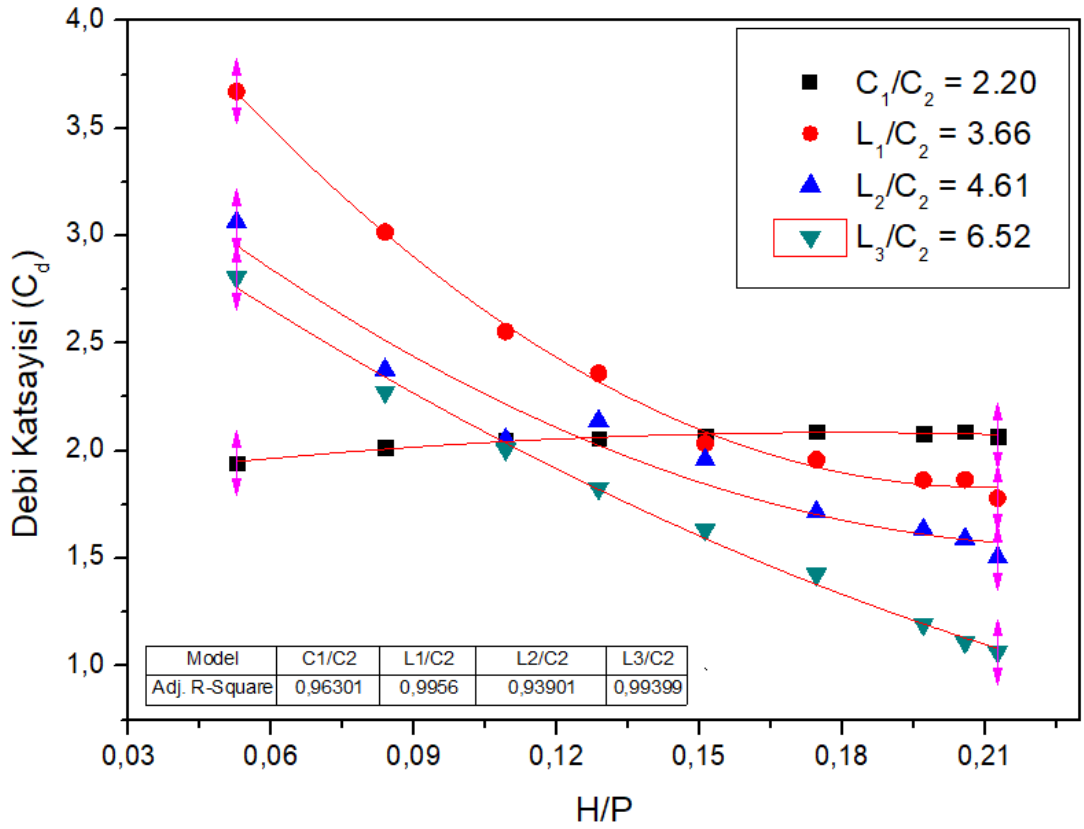
Şekil 3.29 incelendiğinde, yeni tasarımların geçirdiği debi değerlerinin, orijinal duruma göre oldukça yüksek olduğu gözlemlenebilmektedir. Şekilde görülen bir diğer husus da, yeni tasarımlara ait yüksek su yüklerinden elde edilen debi değerlerinin bir alanda yoğunlaştığıdır. Tasarım II ve Tasarım III'de $H = 2.11$ m ve $H = 2.18$ m'lik su yüklerinden elde edilen debi değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Bu iki su yükü değerinde gözlemlenen veriler incelendiğinde ortalama geçen debinin $351.15 \text{ m}^3/\text{s}$ olduğu hesaplanmıştır. Buna ek olarak, farklı tasarımların aynı su yükünde geçen debi değerlerinin birbirlerine bu denli yakın olması $D = 5$ m çapa sahip olan şafttan geçebilecek maksimum ortalama debinin $Q_{\text{maks}} = 351.15 \text{ m}^3/\text{s}$ olacağı söylenebilir. Bu ortalama değerden daha fazla debinin geçmesinin istendiği durumlarda şaft çapında bir artışa gidilmesi gerekmektedir. Özellikle Tasarım III'den elde edilen verilerden anlaşılabileceği üzere, bu noktadan sonra yapılacak savak tasarımlarının da en fazla bu ortalama debiyi ileteceği sonucu ortaya çıkmıştır. Şekil 3.29'da Tasarım III ($L_3/C_2 = 6.52$) eğrisinin yatayda asimptota gitmesi tam kapasiteye ulaştığını gösterir.

Orijinal ve yeni tasarımların HAD analizlerinden elde edilen verilerin debi karşılaştırmasının yanında tüm durumlara ait debi katsayısı (C_d) değerleri de hesaplanmıştır. Denklem (2.2) kullanılarak hesaplanan bu değerler Çizelge 3.10'da sunulmuştur. Çizelgedeki

değerlerin grafiğe aktarılmış hali ise Şekil 3.30'de gösterilmiştir. Şekildeki grafikler incelendiğinde, orijinal durumda debi katsayılarının boyutsuz nap yüküyle neredeyse hiç değişmediği görülmektedir. Yeni tasarımlarda ise bu katsayının su yükü arttıkça düşme eyleminde olduğu görülmektedir. Tasarımlar arasında debi katsayısı olarak ortalaması en yüksek tasarım 2.35'lik değerle Tasarım I'e ait olduğu ortaya çıkmıştır. Bu değeri sırasıyla orijinal durum, Tasarım II ve Tasarım III izlemiştir. En fazla debinin geçirildiği Tasarım III'e ait su yüklerinin debi katsayısı değerleri tüm durumlar içerisinde en düşük rakamlara sahiptir. Tüm yeni tasarımların, su yükü arttıkça sabit bir rakamda düzelme eğiliminde oldukları da söylenebilir. Bu durum Tasarım I ve Tasarım II'de daha net bir şekilde gözlemlenmektedir.

Çizelge 3.10. Orijinal durum, Tasarım I, Tasarım II ve Tasarım III için Debi Katsayısı (C_d) değerleri

	C_d	C_{d1}	C_{d2}	C_{d3}
H/P	ζ_1/ζ_2	L_1/ζ_2	L_2/ζ_2	L_3/ζ_2
0.053	1.94	3.67	3.06	2.81
0.084	2.02	3.02	2.38	2.27
0.109	2.05	2.55	2.14	2.01
0.129	2.06	2.36	2.03	1.82
0.151	2.07	2.03	1.96	1.63
0.175	2.09	1.96	1.72	1.43
0.197	2.08	1.86	1.63	1.19
0.206	2.09	1.87	1.59	1.11
0.213	2.07	1.78	1.50	1.07
Ortalama	2.05	2.35	2.00	1.70



Şekil 3.30. Orijinal durum, Tasarım I, Tasarım II ve Tasarım III için Debi Katsayısı (C_d) karşılaştırması

İncelenen durumlar için debi katsayısının boyutsuz nap yüküne göre değişimleri verilen Şekil 3.30'da, aynı zamanda grafiklerden de anlaşılabileceği gibi, labirent kretli Tasarım I, II ve III küçük nap yüklerinde orijinal dairesel kretli tasarıma göre daha verimli çalışırken büyük nap yüklerinde ise bu durum tam tersi gerçekleşmektedir. Labirent tasarımlarda gözler arasında meydana gelen nap girişleri savaklama verimini düşürür. Bu etki nap yükünün artması ve labirent yan duvar açısının küçülmesi (Etkili kret uzunluğunun artması) ile artar yani debi katsayısında azalma meydana gelir. Fakat bu azalmalar savaklama miktarının azaldığı anlamına gelmez sadece birim kret uzunluğundaki verimdeki azalma anlamındadır. Su seviyesindeki değişimin minimize edilmesi nedeniyle elde edilen fayda düşünüldüğünde debi katsayısındaki bu azalma mühendislik açısından ikinci planda değerlendirilebilir.

3.4. Kaviteasyon Hesabı

3.4.1. Orijinal Durum Kaviteasyon Hesabı

Akım hızının (25-30) m/s'den fazla olduğu durumlarda dolusavaklar üzerinde kaviteasyon oluşma riski gözlemlenebilmektedir. Bunun sebebi, akım içerisinde bulunan basıncın, buhar basınç değerine kadar düşmesi sonucu akım içerisinde betona hasar verebilecek buhar kabarcıkları oluşmasıdır. Oluşan bu kabarcıklar yüksek hızlarda beton yüzeyine çarparak yoğunlaşır ve aşınmaya neden olur. Başlarda küçük boyutlarda olan bu aşınma hasarı, zamanla artar ve büyük boyutlara ulaşır. Bu da yapı üzerinde ciddi riskler oluşmasına sebep olur. Yapıda bu şekilde meydana gelen hasar çeşidine kaviteasyon hasarı denir. Dolusavak üzerinde bu sebeple oluşan hasar durumu, boyutsuz olarak hesaplanan 'kaviteasyon indeksi' ile hesaplanır. Bu hesaplama yönteminde kanal boyunca belli noktalardan alınan basınç (P) ve ortalama hız (U) değerleri kullanılır. Falvey (1990), hesaplanan bu boyutsuz kaviteasyon indeks değerinin 0.20 den düşük olduğu durumlarda, kaviteasyon hasarı oluşmasının kuvvetle muhtemel olduğunu belirtmiştir. Akımın bir noktasında, kaviteasyon indeksi aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P_T - P_V}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (3.13)$$

Burada;

σ = Kaviteasyon indeksi (-)

P_T = Atmosferik basıncın dâhil olduğu mutlak basınç (Pa)

P_V = Buhar basıncı (Pa)

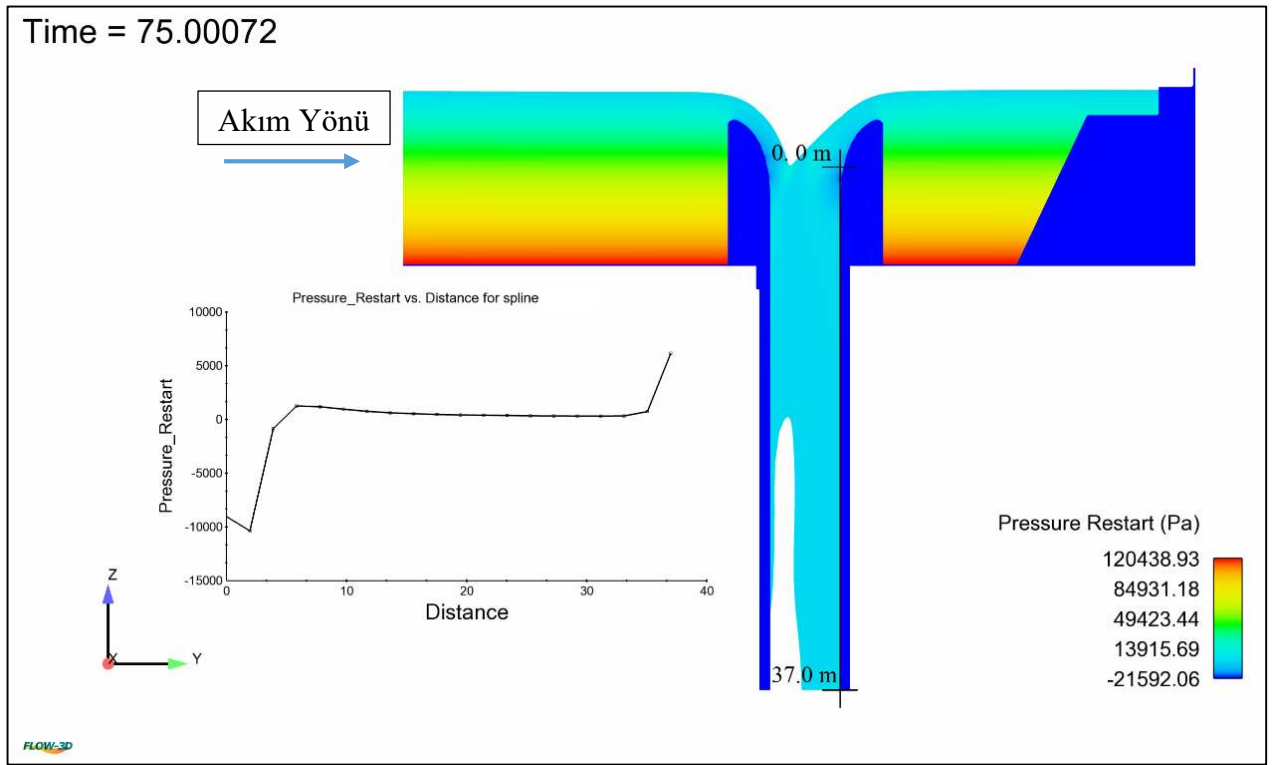
ρ = Suyun yoğunluğu (kg/m³)

u = Suyun ortalama akım hızı (m/s)

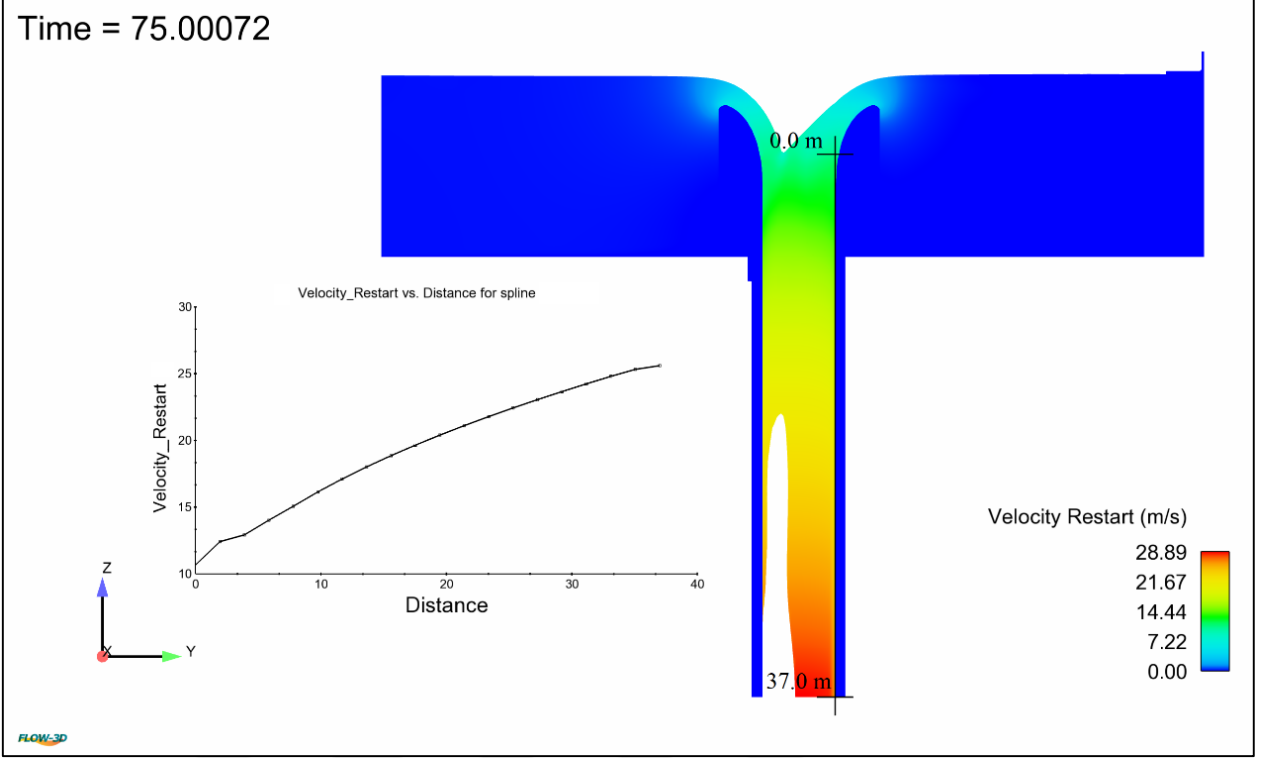
Orijinal durum için 37 m'lik düşey şaft boyunca alınan 20 ölçüm noktasında H = 2.02 m'lik su yükünde oluşan basınç ve ortalama hız değerleri sırasıyla Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de gösterilmiştir. H = 2.02 m değerinin alınmasının sebebi, Kale Barajı dolusavak raporunda geçirilmesi planlanan en büyük olası debinin bu su yükünde aşılmasıdır. Hesaplanan kaviteasyon indeksleri Çizelge 3.11'de sunulmuştur. Hesaplamalar yapılırken, ortalama sıcaklığın 20 °C

olduğu düşünülerek, buhar basıncı (P_v) değeri 2338 Pa ve atmosfer basıncı (P_{atm}) 92801 Pa alınmıştır (DSİ, 2016; Vennard ve Street 1954).

Orijinal proje raporunda düşey şaft boyunca hesaplanmış kavitasyon indeks değerleri mevcut bulunmamaktadır. Raporda yalnızca düşey şaftın bir dirsekle bağlandığı dipsavak yapısı üzerinde kavitasyon hesabı gerçekleştirilmiştir. Kavitasyon hesaplarının yapıldığı değerlerin alındığı şaft yüzü, akım yönüne uzak olan $-Z$ eksenidir. Değerlerin buradan alınmasının temel sebebi Şekil 3.31’den de anlaşılabileceği üzere, akımın bu kesim üzerinde daha uzun mesafe kat etmesi ve Şekil 3.32’den gözlemlendiği üzere akım hızının bu 37 m sonunda en yüksek değere ulaşmasıdır.



Şekil 3.31. $H = 2.02$ m’de orijinal durum şaft üzeri basınç değerleri



Şekil 3.32. $H = 2.02$ m’de orijinal durum şaft üzeri hız değerleri

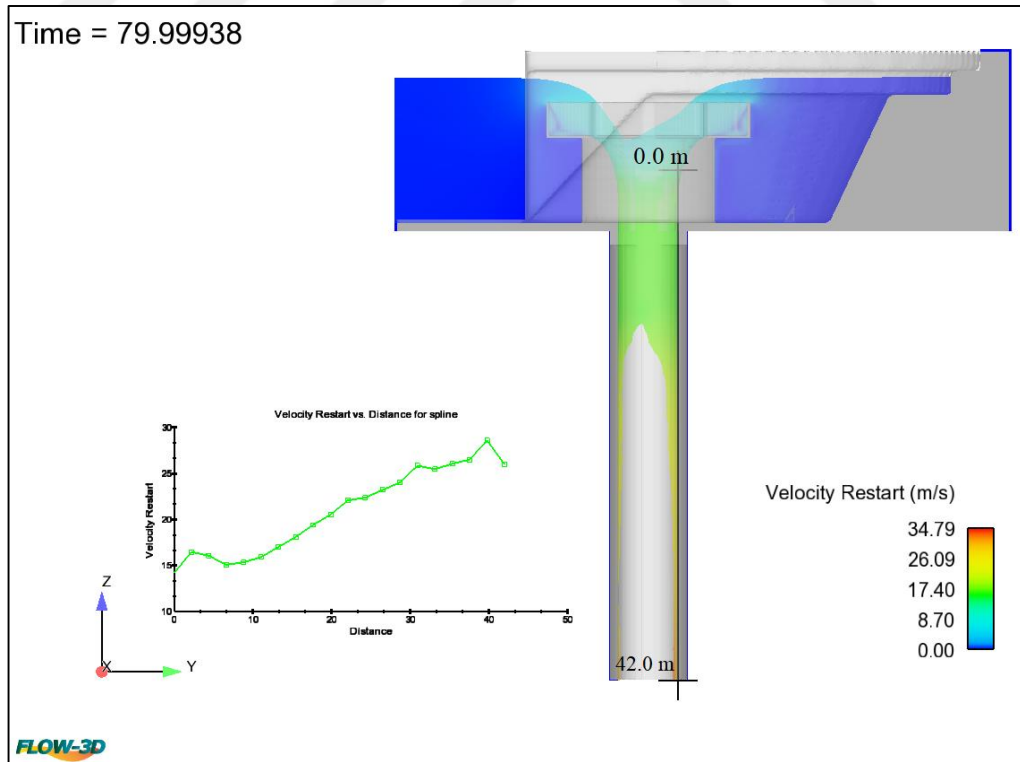
Çizelge 3.11. Şaft tüneline kaviteyasyon indeksi hesap tablosu (H = 2.02 m)

P_{atm} = 92801 Pa		P_v = 2338 Pa		ρ_{su} = 998 kg/m³	
g = 9.81 m/s²		H = 2.02 m		T = 20 C°	
Kesit Yeri	Kesit Noktası (m)	P_{Basınç} (Pa)	P_{Toplam} (Pa)	Hız – (U) (m/s)	Kaviteyasyon İndeksi - σ
1	0.00	-8878.94	83922.06	10.81	1.40
2	1.95	-1017.58	91783.42	12.44	1.16
3	3.89	-726.78	92074.22	13.03	1.06
4	5.84	1269.49	94070.49	14.18	0.91
5	7.79	1183.12	93984.12	15.07	0.81
6	9.74	957.91	93758.91	16.13	0.70
7	11.68	759.16	93560.16	17.11	0.62
8	13.63	618.59	93419.59	18.02	0.56
9	15.58	536.11	93337.11	18.86	0.51
10	17.53	464.35	93265.35	19.65	0.47
11	19.47	419.99	93220.99	20.40	0.44
12	21.42	393.12	93194.12	21.11	0.41
13	23.37	372.54	93173.54	21.79	0.38
14	25.32	339.95	93140.95	22.43	0.36
15	27.26	323.78	93124.78	23.06	0.34
16	29.21	316.71	93117.71	23.66	0.33
17	31.16	309.68	93110.68	24.24	0.31
18	33.11	328.45	93129.45	24.80	0.30
19	35.05	736.53	93537.53	25.32	0.28
20	37.00	6166.59	98967.59	25.60	0.30

Hesaba katılan noktalarda yapılan kaviteyasyon indeksi hesabına göre bulunan bütün değerler 0.20'nin üzerinde olduğundan, HAD analizlerinden elde edilen orijinal dolusavak şaft yapısında 37 m boyunca kaviteyasyon hasarı oluşma riski bulunmamaktadır.

3.4.2. Tasarım I Kaviteasyon Hesabı

Orijinal durum için gerçekleştirilen kaviteasyon hesabı aynı şekilde yeni tasarlanan üç durum içinde gerçekleştirilmiştir. Yine aynı formül kullanılarak hesaplanan kaviteasyon indeksleri için, aynı noktalar üzerinden HAD analizlerinden şaftta üzerinde oluşan maksimum basınç ve hız değerlerinin meydana geldiği zaman dilimleri kullanılmıştır. Şekil 3.33’de $H = 2.02$ m’lik su yükünde Tasarım I’e ait şaft üzeri hız değerleri gösterilmiştir. Tasarıma ait kaviteasyon hesap tablosu ise Çizelge 3.12’de sunulmuştur. Çizelge incelendiğinde yalnızca ikinci kesitin olduğu noktada kaviteasyon indeksinin 0.20 değerinin altında olduğu görülmektedir. Bu nokta, çalkantıların çok fazla olduğu akımın giriş ağzına oldukça yakın bir noktadır. Burada değerin 0.20’nin altında kalmasının sebebi çok yüksek akım hızı olduğu için değil, kesitte oluşan negatif basınç değerinin büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. Akımın girişine yakın bir noktada oluşan bu kaviteasyon değeri, giriş ağzında sürekli değişebilen akım koşullarından dolayı sürekli aynı değerde kalmayacak ve değişecektir. Bu sebeple, bu noktada özellikle de akım hızından dolayı oluşmayan, basınca bağlı olarak elde edilen bu olumsuz değer, dolusavak için (özellikle bu kesitte) bir kaviteasyon riski oluşturmayacaktır.



Şekil 3.33. $H = 2.02$ m’de Tasarım I şaft üzeri hız değerleri

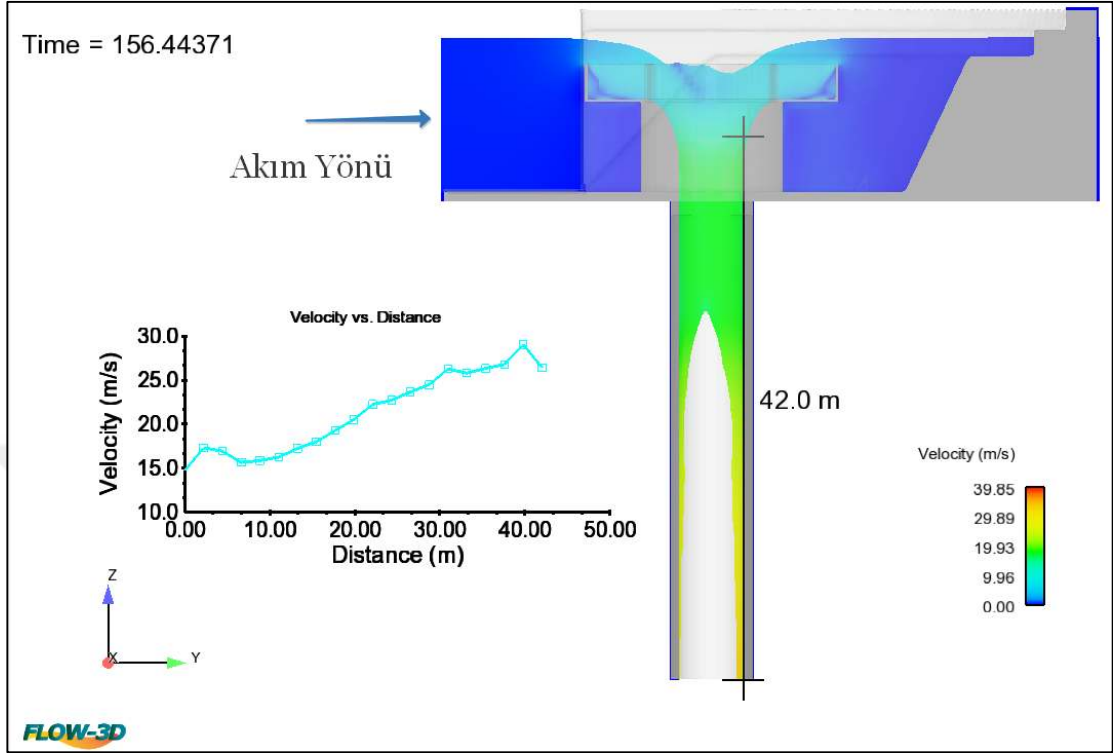
Çizelge 3.12. Tasarım I için şaft tüneline kaviteyasyon indeksi hesap tablosu (H = 2.02 m)

$P_{atm} = 92801 \text{ Pa}$ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$		$P_v = 2338 \text{ Pa}$ $H = 2.02 \text{ m}$		$\rho_{su} = 998 \text{ kg/m}^3$ $T = 20 \text{ C}^\circ$	
Kesit Yeri	Kesit Noktası (m)	P _{Basınç} (Pa)	P _{Toplam} (Pa)	Hız – (U) (m/s)	Kaviteyasyon İndeksi - σ
1	0.00	-39296.86	53504.14	14.16	0.51
2	2.21	-70681.37	22119.63	16.48	0.15
3	4.42	-55072.46	37728.54	16.07	0.27
4	6.63	-39995.95	52805.05	15.07	0.45
5	8.84	-24953.09	67847.91	15.35	0.56
6	11.05	-11164.35	81636.65	15.91	0.63
7	13.26	-2041.21	90759.79	17.01	0.61
8	15.47	1157.00	93958.00	18.11	0.56
9	17.68	1010.10	93811.10	19.42	0.49
10	19.89	693.40	93494.40	20.54	0.43
11	22.11	440.70	93241.70	22.10	0.37
12	24.32	350.40	93151.40	22.38	0.36
13	26.53	228.70	93029.70	23.23	0.34
14	28.74	199.10	93000.10	24.05	0.31
15	30.95	130.30	92931.30	25.86	0.27
16	33.16	122.80	92923.80	25.48	0.28
17	35.37	115.20	92916.20	26.07	0.27
18	37.58	108.00	92909.00	26.52	0.26
19	39.79	156.20	92957.20	28.62	0.22
20	42.00	6203.60	99004.60	26.01	0.29

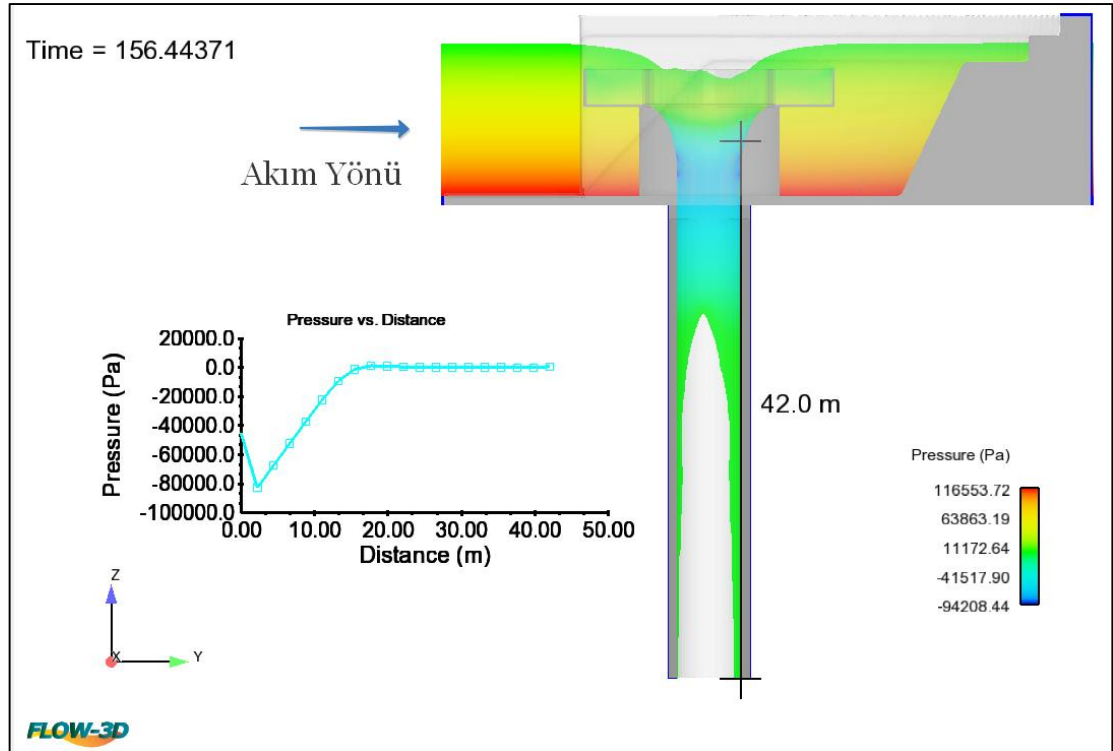
3.4.3. Tasarım II Kaviteyasyon Hesabı

Tasarım II için hesaplanan kaviteyasyon indeksleri de tıpkı yukarıdaki durumlar için de kullanılan Denklem (3.5) yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 3.34 tasarıma ait şaft üzeri hız büyüklüklerini ve grafiğini, Şekil 3.35 ise şaft yüzeyinden ölçülen basınç değerlerini ve bu değerlerin grafik görüntüsü sunulmuştur. Çizelgeye bakıldığında, sadece kesit 2 ve 3 de kaviteyasyon indeksinin sınır değer olan 0.20'nin altında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin

oluşmasının sebebi Tasarım II’de belirtilen durumla aynıdır. Burada oluşan kavitasyon durumu oluşan akım hızı nedeniyle değil, kesitlerde oluşan negatif basınç sebebiyledir.



Şekil 3.34. H = 2.02 m’de Tasarım II şaft üzeri hız değerleri



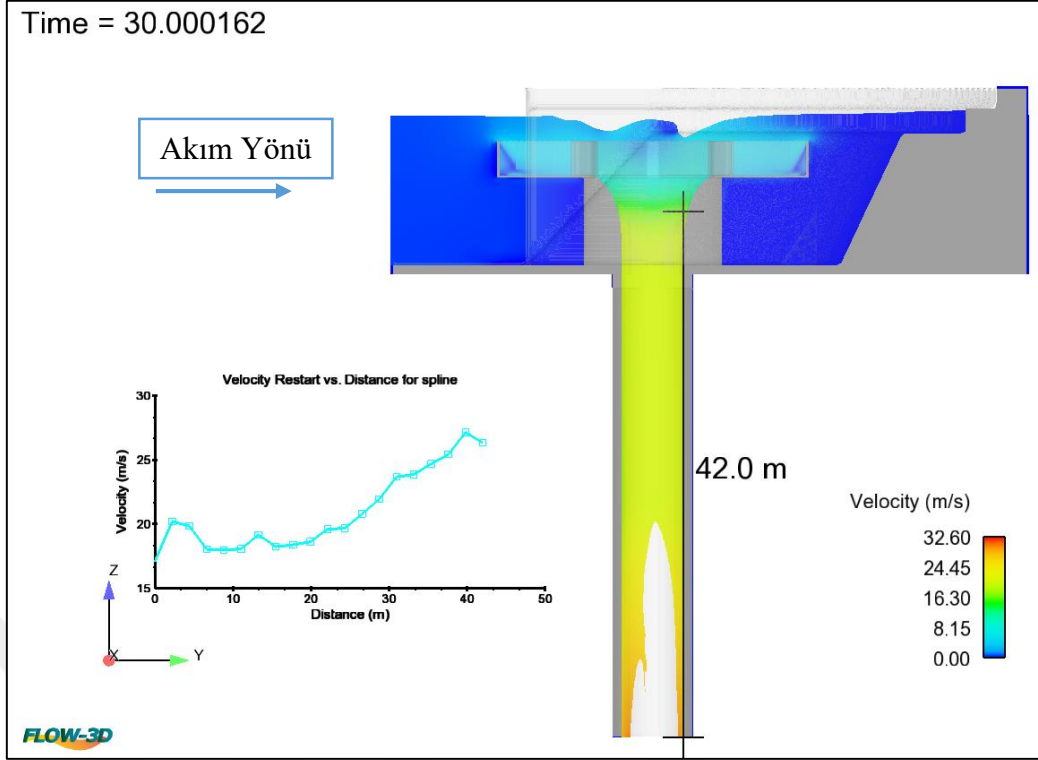
Şekil 3.35. H = 2.02 m’de Tasarım II şaft üzeri basınç değerleri

Çizelge 3.13. Tasarım II için şaft tüneline kaviteyasyon indeksi hesap tablosu (H = 2.02 m)

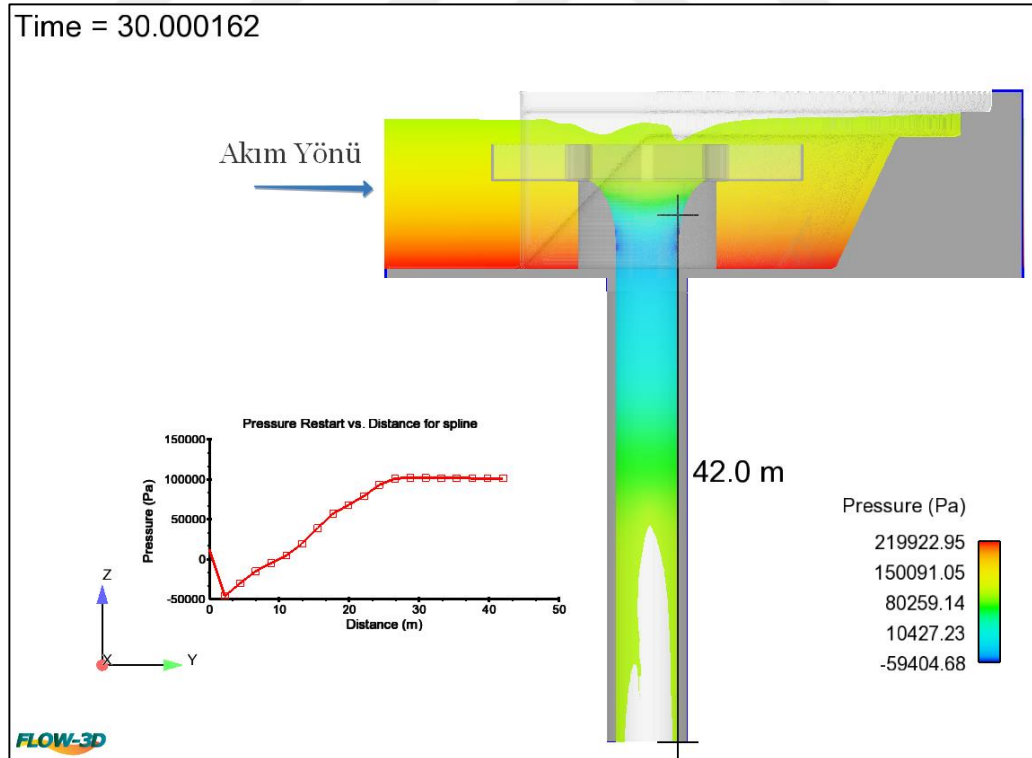
$P_{atm} = 92801 \text{ Pa}$ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$		$P_v = 2338 \text{ Pa}$ $H = 2.02 \text{ m}$		$\rho_{su} = 998 \text{ kg/m}^3$ $T = 20 \text{ C}^\circ$	
Kesit Yeri	Kesit Noktası (m)	$P_{Basinç}$ (Pa)	P_{Toplam} (Pa)	Hız – (U) (m/s)	Kaviteyasyon İndeksi - σ
1	0.00	-45128.49	47672.51	14.74	0.42
2	2.21	-82939.65	9861.35	17.31	0.05
3	4.42	-67480.48	25320.52	16.93	0.16
4	6.63	-52232.92	40568.08	15.66	0.31
5	8.84	-37065.16	55735.84	15.87	0.43
6	11.05	-22122.44	70678.56	16.26	0.52
7	13.26	-9024.48	83776.52	17.25	0.55
8	15.47	-1086.07	91714.94	18.01	0.55
9	17.68	1349.23	94150.23	19.27	0.50
10	19.89	1074.97	93875.97	20.54	0.43
11	22.11	494.64	93295.64	22.26	0.37
12	24.32	363.54	93164.54	22.72	0.35
13	26.53	318.42	93119.42	23.67	0.32
14	28.74	246.20	93047.20	24.48	0.30
15	30.95	167.98	92968.98	26.28	0.26
16	33.16	129.85	92930.85	25.81	0.27
17	35.37	115.64	92916.64	26.35	0.26
18	37.58	93.85	92894.85	26.79	0.25
19	39.79	97.91	92898.91	29.06	0.21
20	42.00	745.00	93546.00	26.44	0.26

3.4.4. Tasarım III Kaviteyasyon Hesabı

Benzer şekilde, Tasarım III içinde hesaplamalar yapılmış ve bu tasarıma ait hız ve basınç görselleri Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de verilmiştir. Çizelge 3.14 ise, kaviteyasyon indeksi için yapılan hesaplama tablosunu göstermektedir.



Şekil 3.36. $H = 2.02$ m’de Tasarım III şaft üzeri hız değerleri



Şekil 3.37. $H = 2.02$ m’de orijinal durum şaft üzeri basınç değerleri

Şekil 3.37’de verilen basınç değerleri Atmosfer Basıncını (P_{atm}) da içeren mutlak basınçlardır. Bu değerleri Rölatif Basınca dönüştürmek için HAD programının otomatik olarak atadığı $P_{atm} = 101,325$ Pa değeri, ölçülen basınç değerlerinden çıkarılmıştır. Elde edilen bu Rölatif Basınçlar aşağıdaki Çizelge 3.14’de ‘ $P_{Basınc}$ ’ olarak verilmiştir. Kaviteasyon hesapları içerisinde yalnızca Tasarım III’de gözlemlenen bu durumun nedeni analizler gerçekleştirilirken HAD analiz programına gelen güncellemedir.

Çizelge 3.14. Tasarım III için Şaft tüneline kaviteasyon indeksi hesap tablosu ($H = 2.02$ m)

$P_{atm} = 92801$ Pa $g = 9.81$ m/s ²		$P_v = 2338$ Pa $H = 2.02$ m		$\rho_{su} = 998$ kg/m ³ $T = 20$ C°	
Kesit Yeri	Kesit Noktası (m)	$P_{Basınc}$ (Pa)	P_{Toplam} (Pa)	Hız – (U) (m/s)	Kaviteasyon İndeksi - σ
1	0.00	-88637.41	4163.59	17.09	0.01
2	2.21	-147532.28	-54731.28	20.22	-0.28
3	4.42	-131119.69	-38318.69	19.86	-0.21
4	6.63	-116128.09	-23327.09	18.04	-0.16
5	8.84	-105939.14	-13138.14	17.99	-0.10
6	11.05	-96465.12	-3664.12	18.07	-0.04
7	13.26	-81784.78	11016.22	19.17	0.05
8	15.47	-62204.74	30596.26	18.24	0.17
9	17.68	-44148.04	48652.96	18.39	0.27
10	19.89	-33279.76	59521.24	18.62	0.33
11	22.11	-22175.50	70625.50	19.61	0.36
12	24.32	-8099.99	84701.01	19.67	0.43
13	26.53	-212.10	92588.90	20.79	0.42
14	28.74	903.40	93704.40	21.94	0.38
15	30.95	592.30	93393.30	23.68	0.33
16	33.16	365.50	93166.50	23.86	0.32
17	35.37	256.30	93057.30	24.70	0.30
18	37.58	165.00	92966.00	25.43	0.28
19	39.79	115.40	92916.40	27.15	0.25
20	42.00	7.50	92808.50	26.33	0.26

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, Diyarbakır'da inşası süren Kale Barajı şaft tipi dolusavağının DSİ TAKK dairesi tarafından gerçekleştirilen laboratuvar sonuçlarından faydalanılarak, şaft dolusavaklarda daha önce kullanılmamış trapez kesitli labirent savak yapısının şaft dolusavak giriş yapısı olarak kullanıldığında göstereceği performansı, gelişmiş bir HAD programı vasıtasıyla incelenmiştir. Kullanılan sayısal yöntem DSİ tarafından yürütülen fiziksel model sonuçlarıyla test edilmiş ve daha sonra bu sayısal yöntem yardımıyla, ilk kez bu tezde sunulan labirent tipli şaft dolusavakların performansları ve hidrodinamik özelliklerini belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Sayısal model sonuçlarının fiziksel modelle karşılaştırılması sonucu ortalama %9.7 bir fark tespit edilmiş olup, deneylerdeki ölçek etkileri, ölçüm hataları, sayısal modeldeki bazı kabuller ve diğer sayısal hatalar dikkate alındığında oluşan bu farkın makul kabul edilebilir. Dolayısıyla sayısal modellerin yeterince başarılı ve gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür.
2. Yeni geliştirilen, farklı tipteki labirent kretli şaft dolusavaklar dairesel kretli geleneksel şaft dolusavaklar göre aynı nap yüklerinde %43'den %328' kadar daha fazla debi geçirdiği görülmüştür. Orijinal projesinde olası en büyük taşkın debisi yaklaşık 190 m³/s verilmesine rağmen geliştirilen yeni tasarımın en büyük savaklama debisi yaklaşık 350 m³/s'ye ulaşmıştır. Oldukça belirgin olan bu kapasite artışları sayesinde baraj hanelerinde daha iyi bir taşkın kontrolü sağlanabileceği gibi su seviye değişimleri azalacağından daha stabil hidroelektrik üretimi de sağlanması mümkündür.
3. Yeni tasarımların labirent tepe açısı küçüldükçe (yani etkili kret uzunluğu arttıkça) savaklama kapasitesinin arttığı görülmüştür. Fakat debi katsayıları için tersi durum söz konusudur. Labirent tepe açısı düştükçe debi katsayısı yani birim savaklama veriminin düştüğü görülmüştür. Klasik şaft savaklarla karşılaştırıldığında ise; düşük nap yüklerinde labirent kretli şaft savakların daha verimli çalışırken büyük nap yüklerinde ise verim düşmektedir. Diğer bir değişle her ne kadar labirent kretli şaft savaklar daha yüksek debi geçirse de labirent tepe açısının azalması ve nap yüklerinin artmasıyla verimleri düşmektedir. Bunun sebebi büyük nap yükleri ve küçük labirent tepe açılarında nap çarpışmaları ve sıkışmalarıdır.
4. Düşük labirent tepe açılarında geçirilen yüksek debiler şaftın yukarı bölgelerinde düşük basınçlara neden olmakta ve bu da kavitasyon riskini arttırdığı görülmektedir. Bu nedenle

yüksek debi geçiren ve düşük verimli olan çok düşük tepe açılı savaklar (büyük kret uzunluğu) tercih edilmemelidir.

Bu sonuçlar ışığında, labirent kretli şaft dolusavakların tasarımcılar için iyi bir alternatif olabileceği ve yeni baraj planlamalarında bu tip dolusavakların denenebileceği önerilmektedir. Bununla birlikte yapılacak yeni tasarımların hidrolik performanslarının kati proje öncesi yine de fiziksel model deneyleriyle test edilmesinde fayda vardır. Bu tip dolusavaklar yüksek kapasiteleri sayesinde daha etkin ve ekonomik bir hazne işletmesi sağlayabilir.

Ayrıca bu tezde kullanılan HAD analizlerinin hidrolik mühendisleri ve bilim insanları için oldukça etkili bir yöntem olduğu görülmüştür. Gelişen hesaplama yöntemleri ve bilgisayarlar yardımıyla iyi tasarlanmış ve doğrulanmış sayısal modeller deneysel modellerle birlikte oldukça etki bir araştırma ve inceleme yöntemi oluşturmaktadır.

5. KAYNAKLAR

- Agiralioglu N, Müftüoğlu RF, 1989. Hood characteristics for siphon-shaft spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115 (5): 636–649.
- Aydın MC, Öztürk M, Yücel A, 2015. Experimental and numerical investigation of self-priming siphon side weir on a straight open channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45:140–150.
- Aydın MC, 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir, *Advances in Engineering Software*, 45: 159-166.
- Aydın MC, Bilhan Ö, Emiroğlu ME, 2019. Trapez Labirent Savakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Kullanılarak Analizi. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 10:2 :731-742.
- Aydın MC, Emiroglu ME, 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29: 1-8.
- Aydın MC, Emiroğlu ME, 2016. Numerical analysis of subcritical flow over two-cycle trapezoidal labyrinth side weir, *Flow Measurement and Instrumentation*, 48 (1): 20-28.
- Bilhan O, Emiroglu ME, Miller CJ, 2016. Experimental Investigation of Discharge Capacity of Labyrinth Weirs with and without Nappe Breakers. *World Journal of Mechanics*, 6: 207-221.
- Blair HK, Rhone TJ, 2006. Design of small dams. A Water Resources Technical Publication, U.S. Department of the Interior, B. of R. Chapter, 9: 904.
- Borghei SM, Parvaneh A, 2011. Discharge characteristics of a modified oblique sideweir in subcritical flow, *Flow Measur. Instrum.* 22 (5): 370–376.
- Borghei SM, Nekooie MA, Sadeghian H, Ghazizadeh MRJ, 2013. Triangular labyrinth side weirs with one and two cycles, *Proc. Inst. Civil Eng. – Water Manag.* 166 (1): 27–42.
- Bruce M, Savage BM, Brian M, Crookston BM, Paxson GS, 2016. Physical and Numerical Modeling of Large Headwater Ratios for a 15° Labyrinth Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142 (11): 1-7.

- Chen HY, Xu WL, Deng J, Niu ZP, Liu SJ, Wang W, 2010. Theoretical and experimental studies of hydraulic characteristics of discharge tunnel with vortex drop. *Journal of Hydrodynamics*, 22 (4): 582–589. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60091-3](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60091-3).
- Crookston BM, Paxson GS, Savage BM, 2012. Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs for High Headwater Ratios. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February 2012, Porto, Portugal.
- Crookston BM, Tullis BP, 2012a. Arced Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138 (6): 555-562.
- Crookston BM, Tullis BP, 2012b. Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138 (8): 757-765.
- Crookston BM, Tullis BP, 2013. Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (5): 363-370.
- Dabbling MR, Tullis BP, Crookston BM, 2013. Staged Labyrinth Weir Hydraulics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (11): 955-960.
- DSİ 2016. Kale Barajı Dolusavak Model Çalışması Nihai Raporu (1049 No. 415). Ankara.
- DSİ 2017. Diyarbakır'ın Hasretle Beklediği Kale Barajı'nda Çalışmalar Bütün Hızıyla Devam Ediyor. Retrieved December 25, 2018, from <http://www.dsi.gov.tr/haberler/2017/11/20/diyarbakir-in-hasretle-beklediği-kale-barajı-nda-çalışmalar-bütün-hızıyla-devam-ediyor->
- Emiroglu ME, Kaya N, 2011. Discharge Coefficient for Trapezoidal Labyrinth Side Weir in Subcritical Flow. *Water Resources Management*, 25 (3): 1037–1058. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9740-7>
- Emiroglu ME, Aydin MC, Kaya N, 2014. Discharge characteristics of a trapezoidal labyrinth side weir with one and two cycles in subcritical flow, *J. Irrig. Drain. Eng.* 140 (5): 1–13.
- Emiroglu ME, Kaya N, Agaccioglu H, 2010. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel, *ASCE J. Irrig. Drain. Eng.* 136 (1): 37–46.
- Enjilzadeh MR, Nohani E, 2016. Numerical Modeling of Flow Field in Morning Glory Spillways and Determining Rating Curve at Different Flow Rates. *Civil Engineering Journal*, 2 (9): 448–457. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2015.05.003>

- Falvey HT, 1990. Cavitation in shutes and spillways. USBR, Monograph No: 42.
- Flow Science, I. 2014. FLOW-3D User Manual, (11.0.3): 817.
- Heller V, 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.578914>
- Hughes SA, 1993. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Vol. 7). World Scientific.
- Kabiri-Samani AR, Borghei SM, 2013. Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex. *Scientia Iranica*, 20 (2): 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.10.041>.
- Karunanithi N, Grenney WJ, Whitley D, Bovee K, 1994. Neural networks for river flow prediction. *J Comp. Civil Engng. ASCE* 8 (2): 201–220.
- Khode BV, Tembhurkar AR, Porey PD, Ingle RN, 2012. Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138 (6): 548-552.
- Liu ZP, Guo XL, Xia QF, Fu H, Wang T, Dong XL, 2018. Experimental and Numerical Investigation of Flow in a Newly Developed Vortex Drop Shaft Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144 (5): 04018014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001444).
- Novak P, Cabelka J, 1981. *Models in Hydraulic Engineering; physical principles and design applications*. Pitman, Boston.
- Paxon G, Savage B, 2006. *Labyrinth Spillways: Comparison of Two Popular U.S.A. Design Methods and Consideration of Non-Standard Approach Conditions and Geometries*. International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, J. Matos and H. Chanson (Eds), Report CH61/06, Division of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Pfister M, Chanson H, 2014. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. *Journal of Hydrodynamics*, 26 (2): 291–298. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60032-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60032-9).
- Tullis JP, Amanian N, Waldron D, 1995. Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121 (3): 247-255.

- Vennardi, Street, 1954. Fundamentals of Engineering. Council of Examiners for Engineering and Surveying.
- White FM, 2003. Fluid Mechanics (5th ed.). Boston: McGraw-Hill Book Company.
- Yalin MS, 1971. Theory of hydraulic models. Macmillan, London. London: Macmillan.
- Zhang JM, Chen JG, Xu WL, Wang YR, Li GJ, 2011. Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel. Journal of Hydrodynamics, 23 (1), 71–80. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60090-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60090-X)
- Zhao CH, Zhu DZ, Sun SK, Liu ZP, 2006. Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft. Journal of Hydraulic Engineering, 132 (1): 61–68. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:1\(61\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:1(61))

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Ankara’da doğdum. İlköğretimi Timur İlköğretim Okulu’nda, ortaokulu Yeşiltepe İlköğretim Okulu’nda ve liseyi Ankara Gazi Lisesi’nde tamamladım. 2006 yılında kazandığım Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında mezun oldum. 2017’de Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisansa başladım. Eylül 2019’da yüksek lisansımı tamamladım. Yabancı dilim İngilizce’dir.

Ali Emre Ulu

