

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SU TÜRBİNLERİ İÇİN DİRSEK TİPİ EMME BORUSUNUN HAD TABANLI
TASARIMI VE ENİYİLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem DEMİREL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selin ARADAĞ

AĞUSTOS 2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131511044 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gizem DEMİREL**'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**SU TÜRBİNLERİ İÇİN DİRSEK TİPİ EMME BORUSUNUN HAD TABANLI TASARIMI VE ENİYİLEMESİ**" başlıklı tezi **11,08,2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Selin ARADAĞ**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Erdem ACAR**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd.Doç.Dr. Özgür BAYER (Başkan)**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU
TOBB ETÜ Hidro Su Türbini Test Merkezi
Koordinatörü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Gizem DEMIREL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SU TÜRBİNLERİ İÇİN DİRSEK TİPİ EMME BORUSUNUN HAD TABANLI

TASARIMI VE ENİYİLEMESİ

Gizem DEMİREL

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Tarih: Ağustos 2016

Tepki tipi hidrolik türbinlerin en önemli parçalarından olan emme borusu tasarımında sadece emme borusu performansını ve verimliliğini değerlendirmekte kullanılan maksimum basınç geri kazanım katsayısı ve minimum düşü kaybı değil aynı zamanda kurulum maliyetlerini de dikkate almak gerekmektedir. Bu çelişen gereksinimleri karşılayan optimum tasarımı elde etmek amacıyla eniyileme tasarım süreci izlenmektedir. Bu çalışmada dirsek tipi emme borusu, meta-model tabanlı çok amaçlı tasarım eniyilemesi metodu kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımıyla elde edilmiştir. Bu amaçla öncelikle emme borusunun geometrisini tanımlayan değişkenler eniyileme yönteminde girdi parametreleri olarak tanımlanmakta ve basınç geri kazanım katsayısıyla düşü kaybı ise çıktı parametreleri olarak tanımlanmaktadır. Latin Hiperküp Örnekleme (LHÖ) metoduyla oluşturulan deney tasarımı kullanılarak dört farklı meta-model (İkinci Dereceden Polinom Standart Yanıt Yüzey, Kriging, Parametrik olmayan Regresyon ve Sinir Ağları) oluşturulmuştur. Oluşturulan bu meta-modeller üzerinde basınç geri kazanım katsayısını maksimize eden ve düşü kaybını minimize eden tasarım iki farklı arama

metodu kullanılarak (Screening ve Çok Amaçlı Genetik Algoritma) elde edilmiştir. Elde edilen eniyilenmiş tasarım başlangıç tasarımına oranla basınç geri kazanımında %4,3 ve düşü kaybında %20 iyileşme sağlanmıştır. Eniyilenmiş tasarım Latin hiperküp örnekleme metoduyla oluşturulan ikinci dereceden polinom standart yanıt yüzey üzerinde çok amaçlı genetik algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca dirsek tipi emme borularında literatürden yararlanarak elde edilen geçerlilik sınırları dahilinde boyutsuz ve birbirlerinden bağımsız parametreler cinsinden basınç geri kazanım katsayısı için ikinci dereceden polinomsal regresyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model doğrulama yapılarak hata oranları hesaplanmış ve modelin yaklaşık % 8 hata ile sonuçları doğru tahmin ettiği görülmüştür. Ayrıca oluşturulan model üzerinde genetik algoritma kullanılarak örnek bir eniyileme gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan regresyon modelinin tahmini ile HAD analizinin sonucu karşılaştırılmış ve modelin % 7,2 hata ile basınç geri kazanım katsayısını tahmin ettiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Dirsek tipi emme borusu, Meta-model tabanlı tasarım eniyilemesi, Regresyon.

ABSTRACT

Master of Science

CFD-BASED DESIGN AND OPTIMIZATION OF AN ELBOW TYPE DRAFT TUBE FOR HYDRAULIC TURBINES

Gizem DEMİREL

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selin ARADAĞ

Date: August 2016

Draft tube is an essential part of Francis type turbines. Its design is based not only on performance and efficiency (maximizing the recovery of the kinetic energy into the static head at the turbine runner exit with a minimum head loss), but also on other considerations, such as excavation depth and concreting. Optimization design process is used in order to obtain an optimum design which satisfy these conflicting requirements. In this work, a CFD-driven surrogate-based design optimization study is performed to optimize an elbow type draft tube. The geometric variables that specify the shape of the draft tube are chosen as input variables for surrogate models and the pressure recovery factor and the head loss are selected as output responses. Latin Hypercube Sampling method is used to construct four different types of surrogate models (standard second order polynomial response surface, Kriging, nonparametric regression and neural network). Two different multi-objective search algorithms (screening and multi-objective genetic algorithm) are utilized to find an optimized solution which maximizes the pressure recovery factor and minimizes the head loss. It is found that, pressure recovery factor can be increased by 4.3%, and head loss can be reduced by %20 reduction compared to the initial CFD aided

design. Latin Hypercube Sampling design of experiment, standard second order polynomial response surface surrogate model and MOGA optimization algorithms are found to be the most suitable choices for an accurate CFD-driven surrogate-based design of the draft tube. A second order polynomial regression model is obtained for pressure recovery factor of elbow type draft tubes in terms of undimensional and independent parameters in specified limits. The model is verified and it can predict the pressure recovery factor with an error of 8%. A genetic optimization example is performed using this model. The regression model can predict the pressure recovery factor with an error of 7.2% when compared to CFD.

Keywords: Computational fluid dynamics, Elbow type draft tube, Surrogate based design optimization, Regression.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Doç. Dr. Selin ARADAĞ'a, Doç Dr. Erdem ACAR'a ve Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez jürisi üyeleri sayın hocalarım Yrd.Doç.Dr. Özgür Bayer'e, Yrd.Doç.Dr. Ayşegül Altın Kayhan'a zaman ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve jürimde buldukları için teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmalarım bana yardımını hiçbir zaman esirgemeyen Eyüp Mert Gayur'a ve Ece Aylı'ya teşekkür ederim. Sevgili arkadaşım Alper Kaplan'a tez yazma sürecimdeki sabrı ve yardımları için teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde bana destek olan ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim. Bu tezi sevgili aileme adıyorum.

Tez kapsamındaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları için TOBB ETÜ Su Türbini Tasarım ve Test merkezi (ETÜ Hidro) altyapısı kullanılmıştır. Merkez altyapısının oluşturulmasındaki maddi desteği sebebiyle, Kalkınma Bakanlığı'na teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında sağladığı burs için TOBB ETÜ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca, lisansüstü eğitimim boyunca TÜBİTAK-BİDEB tarafından maddi destek sağlanmıştır. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	1
1.1.1 Hidrolik türbinler	1
1.1.2 Francis tipi türbinler	1
1.1.2.1 Emme borusu tipleri	2
1.1.3 Hesaplmalı akışkanlar dinamiği uygulamaları	4
1.1.4 Geometri eniyilemesi	5
1.1.4.1 Dirsek tipi emme borusu eniyilemesi	8
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı	9
1.3 Tez Planı	10
2. SAYISAL YÖNTEMLER	13
2.1 Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi	13
2.1.1 Korunum denklemleri	13
2.1.2 Türbülans modellemesi	14
2.1.3 Sayısal ayrıklaştırma	15
2.1.4 Çözüm ağı oluşturma	15
2.1.5 Sınır koşulları	16
2.2 Meta-model Tabanlı Tasarım Eniyilemesi (MTTE) Yöntemi	17
2.2.1 Deney tasarımı (dt) oluşturulması	18
2.2.2 Meta-model oluşturulması	19
2.2.3 Çok amaçlı arama metotları	20
2.3 Eğri uydurma yöntemleri	20
3. EMME BORUSUNUN SAYISAL YÖNTEMLER İLE META-MODEL TABANLI TASARIM ENİYİLEMESİ	23
3.1 Problem Tanımı ve Eniyileme Çalışmasının Amacı	23
3.2 Eniyileme Yöntemi ve Emme Borusu Eniyilemesi Çalışmaları	25
3.2.1 Hesaplmalı akışkanlar dinamiği (had) çalışmaları	27
3.2.2 Parametre seti oluşturma	30
3.2.3 Emme borusu tasarım eniyilemesi	30
3.3 Tasarım eniyilemesi sonuçları	32
3.3 Tasarım eniyilemesi sonuçlarının değerlendirilmesi	39
4. BASINÇ GERİ KAZANIM KATSAYISININ REGRESYON DENKLEMİYLE İFADE EDİLMESİ	47
4.1 Basınç Farkına Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi	47

4.2 Boyut Analizi.....	48
4.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Çalışmaları.....	49
4.4 Regresyon Denklemine Elde Edilmesi.....	50
4.5 Regresyon Denklemine Doğrulanması.....	55
4.6 Regresyon Denklemi Kullanılarak Eniyileme Yapılması	57
5. DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	61
5.1 Sonuç	61
5.2 Gelecek Çalışmalar	61
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ	85



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Francis tipi türbin parçalarının gösterimi.....	2
Şekil 1.2 : Emme borusu tasarımları (a) Düz tip emme borusu, (b) Dirsek tipi emme borusu ([14]'ten uyarlanmıştır).....	3
Şekil 1.3 : Dirsek tipi emme borusu ([7]'den uyarlanmıştır).	4
Şekil 1.4 : Tasarım süreçleri (a) Geleneksel tasarım süreci, (b) eniyileme tasarım süreci ([34]'ten uyarlanmıştır).	6
Şekil 2.1 : Emme borusu açısından bağımsızlaştırma çalışmaları ([45]'ten uyarlanmıştır).	16
Şekil 2.2 : Emme borusu sınır koşulları.....	17
Şekil 2.3 : Meta-model tabanlı tasarım eniyilemesi (MTTE) aşamaları.	18
Şekil 2.4 : LHÖ ile oluşturulan deney tasarımları; a) 6 tasarım noktalı, b) 10 tasarım noktalı.....	19
Şekil 2.5 : Çoklu regresyon modelleri ([57]'den uyarlanmıştır).	21
Şekil 3.1 : Emme borusu eniyileme problemi geometri parametreleri.	24
Şekil 3.2 : Yapılan çalışmada izlenen eniyileme yöntemi ([10]'dan uyarlanmıştır).	26
Şekil 3.3 : Çözüm ağı oluşturulmuş emme borusu geometrisi.....	29
Şekil 3.4 : Emme borusu simetri düzlemindeki basınç dağılımı.	35
Şekil 3.5 : Emme borusu boyunca basınç dağılımı.....	35
Şekil 3.6 : Emme borusu simetri düzlemindeki hız dağılımı ve vektörleri.....	36
Şekil 3.7 : Emme borusu boyunca akış çizgileri.	37
Şekil 3.8 : Emme borusu basınç geri kazanım katsayısına tasarım parametrelerinin duyarlılığı.....	38
Şekil 3.9 : Emme borusu düşü farkına tasarım parametrelerinin duyarlılığı.	38
Şekil 3.10 : Basınç geri kazanım katsayısının difüzör ve koniklik açısıyla değişimi.	40
Şekil 3.11 : Düşü Kaybının difüzör ve koniklik açısıyla değişimi.	40
Şekil 3.12 : Konik kısmın uzunluğunun basınç geri kazanım katsayısına etkisi.	41
Şekil 3.13 : Difüzör kısmın uzunluğunun basınç geri kazanım katsayısına etkisi.	42
Şekil 3.14 : Dirsek yarıçapının basınç geri kazanım katsayısına etkisi.	42
Şekil 3.15 : Konik kısmın uzunluğunun düşü kaybına etkisi.....	43
Şekil 3.16 : Difüzör kısmın uzunluğunun düşü kaybına etkisi.	43
Şekil 3.18 : Dirsek yarıçapının düşü kaybına etkisi.....	44
Şekil 3.19 : Amaç fonksiyonları arasındaki Pareto sınırı.	44
Şekil 4.1 : Regresyon modeli 1 ve 2 kullanılarak veri noktalarında tahminlenen ile HAD analizi sonucu elde edilen basınç geri kazanım katsayılarının karşılaştırılması.	56
Şekil 4.2 : Regresyon modeli 1 ve 2 kullanılarak doğrulama noktalarında tahminlenen ile HAD analizi sonucu elde edilen basınç geri kazanım katsayılarının karşılaştırılması.	57

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Korelasyon değerleri limitleri [59].....	22
Çizelge 3.1 : Emme borusu başlangıç tasarımı ölçüleri.....	27
Çizelge 3.2 : Vekil modellerin hata oranları.....	32
Çizelge 3.3 : Aday optimum tasarımlar.....	33
Çizelge 3.4 : Eniyilenmiş tasarım ve başlangıç tasarımın karşılaştırılması.....	34
Çizelge 4.1 : Emme borusundaki basınç farkına etki eden değişkenler.....	48
Çizelge 4.2 : Oluşturulacak modelin geçerlilik sınırları.....	50
Çizelge 4.3 : Boyutsuz parametrelerin gösterim indisleri.....	52
Çizelge 4.4 : Regresyon modellerinin hata oranları.....	56
Çizelge 4.5 : Genetik algortima komutunun fonksiyonu ve kullanılan argümanların açıklaması.....	58
Çizelge 4.6 : Eniyileme sonucu elde edilen tasarım parametreleri ve basınç geri kazanım katsayısı.....	60
Çizelge 5.1 : Beşinci bölümde örnek çizelge.....	16
Çizelge Ek 1.1 : Latin Hiperküp örnekleme ile oluşturulan deney tasarımı noktaları ve sonuçları.....	69
Çizelge Ek 1.2 : Oluşturulan doğrulama noktaları ve sonuçları.....	72
Çizelge Ek 2.1 : Regresyon modeli için belirlenen bağımsız parametrelerin korelasyon analizi sonuçları.....	73
Çizelge Ek 2.2 : Regresyon denklemi için oluşturulan veri seti.....	74
Çizelge Ek 2.3 : Regresyon denklemini doğrulamak için oluşturulan veri seti.....	77

KISALTMALAR

DT	: Deneş Tasarımı (Design of Experiment)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HES	: Hidroelektrik Santral
LHÖ	: Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling)
MAE	: Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MKT	: Merkezi Karma Tasarım
MTTE	: Meta-Model Tabanlı Tasarım Eniyilemesi
MOGA	: Çok Amaçlı Genetik Algoritma (Multiobjective Genetic Algorithm)
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier – Stokes (Reynolds Averaged Navier - Stokes)
RMSE	: Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (Root Mean Square Error)
1B	: Bir Boyutlu
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
C_p	Emme Borusu Geri Kazanım Katsayısı
D_2	Çark çıkış çapı
F	Kuvvet
g	Yerçekimi ivmesi
H	Düşü
H_1	Konik kısmın uzunluğu
H_2	Difüzör kısmın uzunluğu
k	Türbülans kinetik enerji
L	Uzunluk
N	Doğrulama noktası sayısı
$P_{in,s}$	Emme borusu girişindeki statik basınç
$P_{in,t}$	Emme borusu girişindeki toplam basınç
$P_{out,s}$	Emme borusu çıkışındaki statik basınç
$P_{out,t}$	Emme borusu çıkışındaki toplam basınç
R	Dirsek yarıçapı
Re	Reynolds Sayısı
V, V_{in}	Emme borusu girişindeki bileşke hız vektörü
y_i	i. doğrulama noktasındaki HAD analizi sonucu
\hat{y}_i	i. doğrulama noktasındaki meta-model tahmini
ΔH	Düşü Kaybı
ρ	Yoğunluk
θ_1	Koniklik açısı
θ_2	Difüzör açısı
ε	Türbülanslı enerji yitimi, yüzey pürüzlülüğü
ϵ	Tahmin hata değeri
μ	Dinamik Viskozite
β	Regresyon katsayısı

1. GİRİŞ

1.1 Literatür Taraması

1.1.1 Hidrolik türbinler

Enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan hidroelektrik güç santralleri iki temel parçadan; hidrolik türbin ve jeneratörden oluşmaktadır. Hidrolik türbini oluşturan yapılar ise enerji üretiminin gerçekleştirildiği çark, çarka su iletimini sağlayan bileşenler ve çarktan su tahliyesini gerçekleştiren yapılar olmak üzere üç başlık altında gruplandırılmaktadır.

Hidrolik türbinleri birçok şekilde sınıflandırmak mümkündür. Hidrolik türbinler çalışma prensiplerine göre itki tipi ve tepki tipi olmak üzere sınıflandırılmaktadır. İtki tipi türbinler, açık havada bulunan çark kanatlarına suyun (su jeti formunda) çarpmasıyla oluşan etkiyi üreterek enerji yaratmakta kullanılmaktadırlar. En yaygın olarak kullanılan itki tipi türbinler debinin düşük olduğu durumlarda kullanılan Pelton tipi türbinlerdir. Tepki tipi türbinlerde ise çark tamamıyla su ile çevrili olup basınçlandırılmış su, çark kanatlarını döndürerek enerji üretilmesini sağlamaktadır. Bu tip türbinlere en iyi örnekler ise Francis ve Kaplan tipi türbinlerdir [1-4].

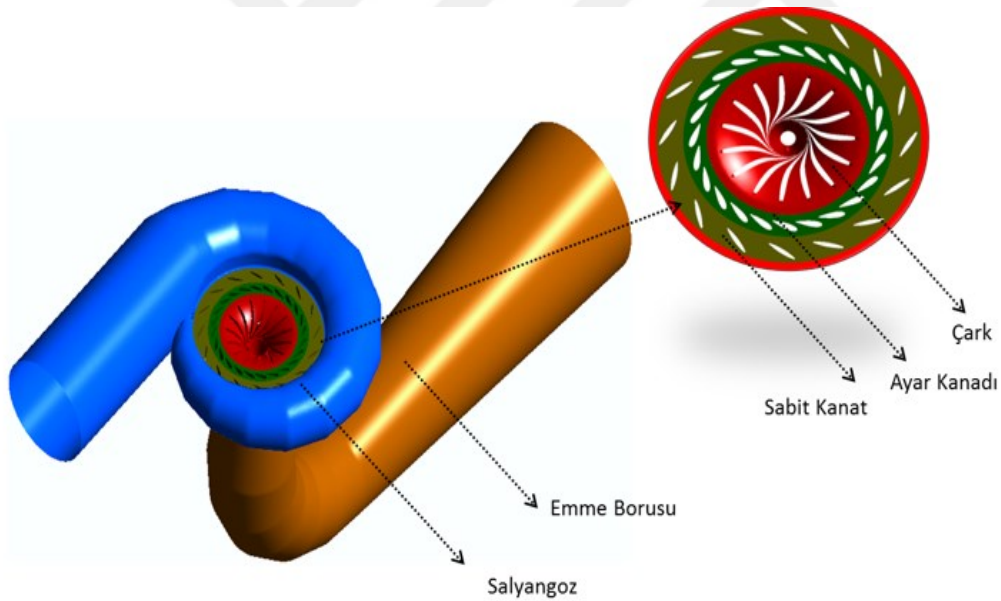
Türbinler çalışma aralıklarına göre; Francis tipi türbinler 64-700 m düşü ve 51-300 rpm özgül hız aralığında, Pelton tipi türbinler 350-1800 m düşü ve 7-26 rpm özgül hız aralığında ve Kaplan tipi türbinler 5-60 m düşü ve 240-920 rpm özgül hız şeklinde sınıflandırılabilir. Buna göre Francis tipi türbinler geniş kullanım aralığına sahip olduklarından ötürü tercih edilmektedirler [2, 5, 6].

1.1.2 Francis tipi türbinler

Francis tipi türbinler aynı zamanda radyal-eksenel türbinler olarak da adlandırılmaktadır. Bunun nedeni akışın çarka radyal olarak girmesi ve eksenel olarak çıkmasıdır. Türbine gelen suyun hızını ve yönünü ayarlayarak çarka iletiminden sorumlu üç temel parça: Salyangoz, sabit kanatlar ve ayar kanatlarıdır. Öncelikle akış salyangozdan hız dağılımı aynı olacak şekilde sabit kanatlara yönlendirilmektedir. Hız

dağılımının aynı olmasını sağlamak için salyangoz kesit alanı giderek daraltılmaktadır. Daha sonra sabit kanatlar ve ayar kanatları yardımıyla akışa yön verilerek çark kanatlarına suyun tasarlanan akış açısıyla çarpması sağlanmaktadır. Ayrıca ayar kanatları türbini istenilen yükleme durumunda çalıştırmak için de kullanılmaktadır [2, 7, 8, 9].

Francis tipi türbinlerde enerji üretimi çark bileşeninde gerçekleşmektedir. Çarka gelen suyun açısal momentumu kullanılarak çarkta su hızlandırılıp elde edilen güç türbin shaftı aracılığıyla jeneratöre iletilmektedir. Çark çıkışındaki suyun basıncı kuyruk suyu basıncına göre daha düşük olmaktadır. Hem çark çıkışındaki bu düşük basıncı vakum etkisi yaratarak atmosfer basıncına çıkarmak hem de suyu tahliye etmek için emme borusu kullanılmaktadır. Çark çıkışındaki suyun kinetik enerjisini azaltmak ve maksimum basınç geri kazanımını sağlamak amacıyla emme borusu kesit alanı akış boyunca giderek arttırılmaktadır [10-13]. Şekil 1.1'de Francis tipi türbin parçaları gösterilmiştir.

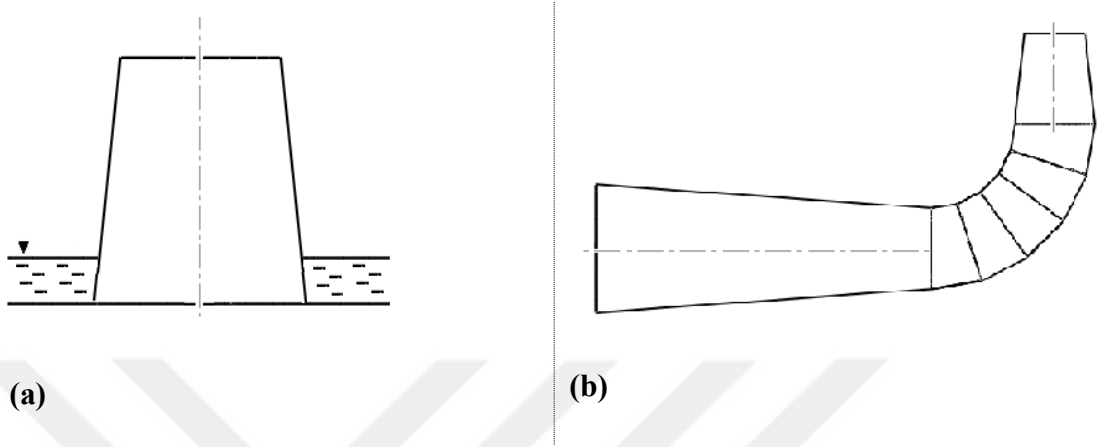


Şekil 1.1. Francis tipi türbin parçalarının gösterimi.

1.1.2.1 Emme borusu tipleri

Emme borusu tasarımları uygulamalara göre çeşitlilik gösterebilmektedir. Çark çıkış çapı ve çark çıkışındaki suyun kinetik enerjisinin toplam enerjiye oranı uygulamada tercih edilecek emme borusu tasarımını belirlemektedir. Çark çıkışındaki suyun kinetik enerjisi arttıkça daha uzun emme borusu kullanılması gerekmektedir. Aynı

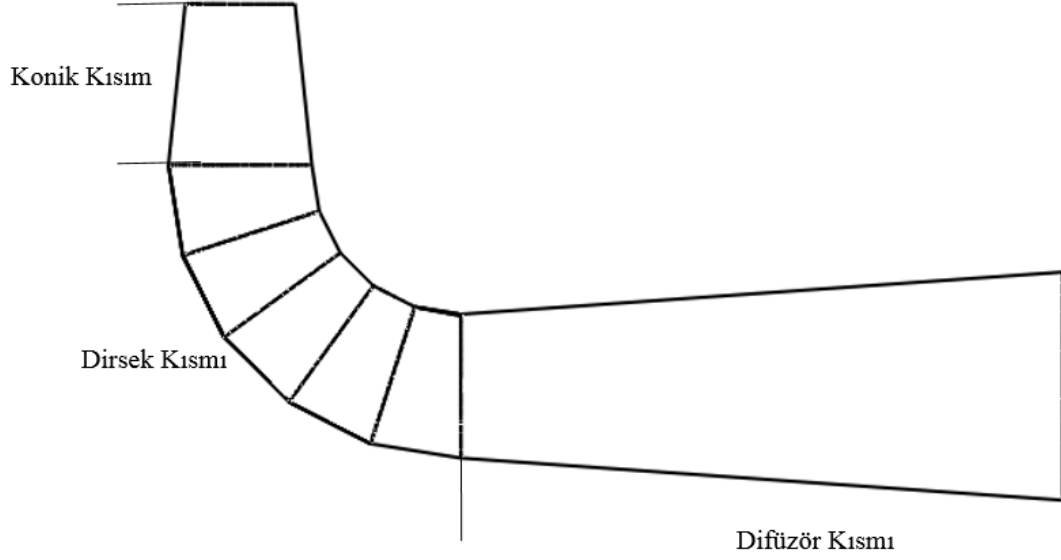
zamanda emme borusu tasarımı, kullanım sahasındaki yapısal kısıtlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu iki kısıtı aynı anda gerçekleştirmek için emme borusu geometrisinin çok iyi tasarlanması gerekmektedir. Şekil 1.2’de kesitleri verilen düz ve dirsek tipi emme boruları yaygın olarak kullanılan tasarımlardır [14].



Şekil 1.2 : Emme borusu tasarımları (a) Düz tip emme borusu, (b) Dirsek tipi emme borusu ([14]’ten uyarlanmıştır).

Düz tip emme boruları hem daha fazla üretim maliyeti gerektirdiğinden hem de dirsek tipi emme borularının sağladığı performansı sağlayamadığından ötürü günümüzde kullanılmamaktadır [5,15].

Francis tipi türbinlerde sıklıkla kullanılmakta olan dirsek tipi emme borusunun üç temel parçası olan konik kısım, dirsek kısmı ve difüzör kısmı Şekil 1.3’de gösterilmektedir. Basınç geri kazanımını arttırmak amacıyla konik ve difüzör kısımlarının kesit alanları akış boyunca artırılarak hızın düzgün bir profil ile azalması sağlanmaktadır. Dirsek kısmında ise sabit yarıçaplı kesitlerden tasarlanarak kayıplar en aza indirilmeye çalışılmaktadır [7, 14, 16].



Şekil 1.3 : Dirsek tipi emme borusu ([7]'den uyarlanmıştır).

1.1.3 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulamaları

Hidrolik türbinlerin tasarlanmasında kullanılan geleneksel tasarım süreci, tecrübeye dayalı olmakla birlikte deneme-yanılma tabanlıdır. Bunun yanı sıra tasarımın model testlerle doğrulanmasına gereksinim duyulduğundan maliyetli olmaktadır [17-19]. Türbin tasarım sürecine, daha doğru bir tasarım ile yola çıkmak adına deneysel çalışmalar ile elde edilmiş olan bilgiler, teknik diyagramlar ve amprik formülasyonlar ile başlanmaktadır [20, 21].

Hidrolik türbin tasarımlarında turbomakine içerisindeki akışı sayısal olarak çözmekte kullanılan bilgisayar kodları bilgisayarların gücündeki artış da göz önüne alınarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı araçlar birçok önemli fiziksel olguyu (türbin içerisindeki akış) yüksek kesinlikte etkili bir şekilde çözebilmektedir. Böylelikle hem yeni tasarım projelerinde hem de iyileştirme projelerinde harcanan zaman ve maliyet minimize edilerek elde edilen verim arttırılmaktadır. Ayrıca model-prototip test ve deneylerinde performans kayıplarının sebepleri çok zor saptanırken, HAD tabanlı çözümlerde performans kayıplarının nedenleri kolaylıkla saptanabilmektedir [8,22,23].

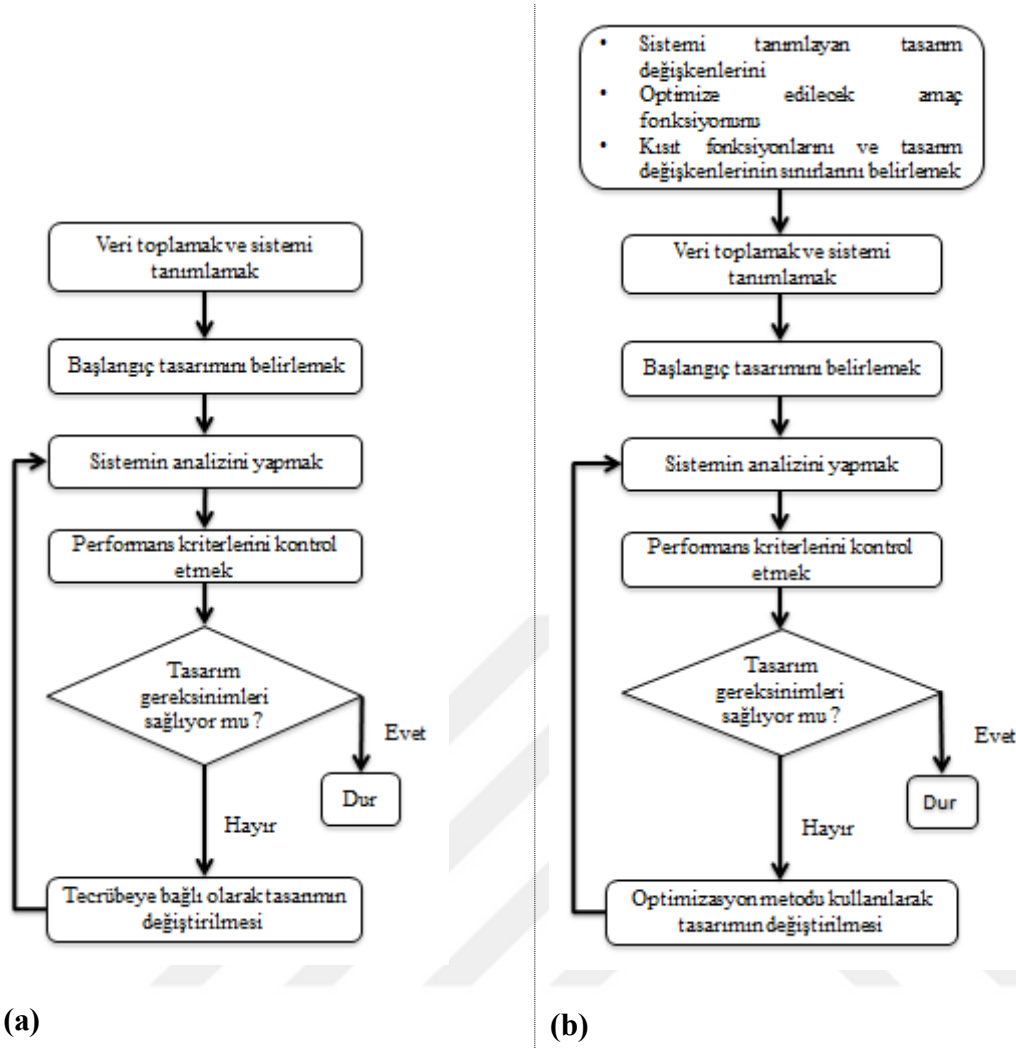
Emme borularındaki akışta oluşan türbülans, ikincil akışlar, girdap yapıları ve akış ayrılmalarından ötürü HAD tabanlı tahminler zorlayıcı ve zaman alıcı olmaktadır. Her ne kadar üç boyutlu (3B) Navier-Stokes kodları iyi bir yaklaşım sunsa çözüm ağı

oluşturma, türbülans modellerinin denenmesi, tanımlanan sınır koşullarına duyarlılığın araştırılması gibi zaman alıcı işlemler gerektirmektedir. Bu yüzden iyi bir tasarım ile başlamak önem arz etmektedir. Birçok basitleştirilmiş yaklaşımdan biri olan bir boyutlu (1B) akış çözücüleri ile analizler yapılarak tasarım parametrelerinin değerlerinin performansı nasıl etkilediği gözlemlenebilmektedir [24-26].

Son yıllarda, hidrolik türbinlerde akışın HAD tabanlı çözümlenmesi zerine Drtina ve Sallaberger [8], Marjavaara [27-28], Eisinger ve Ruprecht [29] gibi birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır. Yapılan bu çalışmalardan Drtina ve Sallaberger [8] türbin özellikle de çark analizlerinde, Marjavaara [27] ise dirsek tipi emme borusu analizlerinde Reynolds ortalamaalı Navier-Stokes denklemi ve k- ϵ türbülans modeli kullanarak akışın karakterini ve ikincil akışları tespit etmişlerdir. Ayrıca Marjavaara [28] HAD ile elde ettiği sonuçları, Dahkback'ın [30] model ve prototip testlerinden elde ettiği deneysel verileri ile kıyaslamıştır. Carija [31] ise HPP Rijeka T2 türbini için tasarım noktasında ve çalışma aralığında ölçülen değerlerle analizlerin sonucunda elde edilen değerler arasında çalışma aralığında %2, türbin optimum noktasında ise %0,5 hata ile kullandıkları HAD yöntemini (RANS denklemi ve k- ϵ türbülans modeli) doğrulamışlardır. Yapılan kıyaslamalarda HAD yazılımlarının yeterince iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [32-33].

1.1.4 Geometri eniyilemesi

Mühendislikte tasarım aşamasında izlenen iki tip tasarım süreci (geleneksel tasarım süreci ve eniyileme tasarım süreci) Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Geleneksel tasarım süreçleri daha fazla zaman, tecrübe, kaynak, maliyet gerektirdiğinden ve eniyilenmiş bir tasarımı garantileyemediğinden günümüzde eniyileme tasarım süreci kullanılmaya başlanmıştır [34].



Şekil 1.4 : Tasarım süreçleri (a) Geleneksel tasarım süreci, (b) eniyileme tasarım süreci ([34]'ten uyarlanmıştır).

Sadece tasarım değil üretim gibi aşamalarda da en çok faydanın sağlanması veya en az çaba ile sürecin tamamlanması gibi çeşitli amaçları, sınırlayıcı koşullar altında gerçekleştirmek için takip edilen sistematik süreç eniyileme (optimizasyon) olarak adlandırılmaktadır.

Eniyileme süreci boyunca tasarım değişkenleri, sınırlayıcı koşullar göz önünde bulundurularak değiştirilir ve sistem yanıtları gözlemlenir. Bu amaçla, eldeki eniyileme probleminin öncelikli olarak Denklem 1.1'de verilen standart formülasyonda matematiksel fonksiyonlarla ifade edilmesi gerekmektedir. Bu formülasyonda enküçüklenen veya enbüyüklenen sistem yanıtları, tasarım değişkenleri cinsinden fonksiyonlarla gösterilmekte ve amaç fonksiyonları olarak

adlandırılmaktadır. Sınırlayıcı koşullar da tasarım değişkenleri cinsinden yazılmakta ve kısıt fonksiyonları olarak isimlendirilmektedir [35,36].

$$\begin{array}{llll}
 \text{Find} & x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T & & \text{Tasarım Değişkenleri} \\
 \text{Min} & f_i(x) & i = 1, \dots, n_f & \text{Amaç Fonksiyonları} \\
 \text{S.t.} & h_j(x) = 0 & j = 1, \dots, n_e & \text{Eşitlik Kısıtları} \\
 & g_k(x) \leq 0 & k = 1, \dots, n_g & \text{Eşitsizlik Kısıtları}
 \end{array} \tag{1.1}$$

$$x^{alt} \leq x \leq x^{üst}$$

Yukarıdaki standart gösterimde $f_i(x)$ amaç fonksiyonlarını, $h_j(x)$ eşitlik kısıtlarını, $g_k(x)$ eşitsizlik kısıtlarını ve n_f amaç fonksiyonu sayısını, n_e eşitlik kısıt sayısını, n_g ise eşitsizlik kısıt sayısını ifade etmektedir. Alt ve üst limitler (x^{alt} , $x^{üst}$) doğrultusunda belirlenen tasarım değişkeni değerlerinin bütün kısıtları sağlaması halinde ilgili tasarım olurlu bölgede, yoksa olursuz bölgede yer almaktadır. Olurlu ve olursuz bölgelerdeki tasarım değişkeni değerleri belirlendikten sonra olurlu bölgede amaç fonksiyonu doğrultusunda yapılan aramada her bir tasarım değişkeninin optimum değeri elde edilmektedir.

Literatürde eniyileme problemleri çeşitli kriterler temel alınarak sınıflandırılmaktadır. Bu kriterler; kısıt fonksiyonlarının mevcut olup olmaması (kısıtlı veya kısıtsız eniyileme), tasarım değişkenlerinin yapısı (kesikli, sürekli veya karışık değişkenler), amaç fonksiyonu sayısı (tek amaçlı veya çok amaçlı), problemdeki fonksiyonların yapısı (doğrusal veya doğrusal olmayan fonksiyonlar) olarak özetlenebilmektedir [36]. Ayrıca tasarım değişkeni sayısına göre yapılacak eniyileme için; sadece iki değişken varsa grafiksel yaklaşım ve ikiden fazla fakat az sayıda değişken varsa analitik yaklaşım kullanılmaktadır; diğer yandan eğer çok sayıda değişkene sahip karmaşık bir sistem varsa amaç fonksiyonunun ve kısıt fonksiyonlarının karmaşıklığından dolayı analitik yöntemler yerine sayısal yöntemler tercih edilmektedir.

Geçmiş yıllarda hidrolik türbinlerin hem tasarım hem de rehabilitasyon süreçlerinde hidrolik türbin bileşenlerinin optimum tasarımını belirlemek amacıyla HAD ile birlikte

kesikli algoritmalar, evrimsel algoritmalar ve arama yönü tabanlı algoritmalar (türev tabanlı yerel veya genel aramalar) kullanılmaya başlanmıştır. Her ne kadar kullanılan algoritmalar sürekli geliştirilmekte olsa da literatürde hangi algoritmanın daha iyi sonuç verdiği tam olarak net değildir. Bu amaçla her bir sistem için farklı algoritmalar denenmektedir. Tüm bu işlemler oldukça fazla zaman ve efor gerektirdiğinden hızlı bir şekilde eniyelenmiş tasarımı elde etmek amacıyla otomatik eniyileme yöntemleri kullanılmalıdır [37-42].

1.1.4.1 Dirsek tipi emme borusu eniyilemesi

Dirsek tipi emme borularında Eisinger ve Ruprecht [29], Prasad [11], McNabb [38] ve Marjavaara [27] eniyileme çalışmaları yaparak yüksek performansa sahip bir tasarım elde etmeye çalışmışlardır. Son zamanlarda yapılan eniyileme çalışmaları HAD tabanlı olup simülasyona dayanmaktadır. Fakat Yang ve Xiao [42] gibi araştırmacılar yaptıkları eniyilemeleri deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla kıyaslayıp oluşturdukları eniyileme modellerini doğrulamışlardır.

Eisinger ve Ruprecht [29] çalışmalarında hidrolik türbin bileşenleri için HAD tabanlı otomatik geometri eniyilemesi yapmışlardır. Bu çalışmada [41]'de oluşturdukları eniyileme metodolojisini matematiksel eniyileme algoritmaları kullanarak geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, arama yönüne göre EXTREM Metodu, Simplex tipi metot ve genetik metotlar olmak üzere üç farklı eniyileme algoritmasını incelemişlerdir. Bu metotları örnek olarak aksel simetrik bir yayıcının ve GAMM-Workshop'dan alınan dirsek tipi emme borusunun eniyilemesinde kullanmışlardır. En hızlı sonucu EXTREM metodunun verdiği fakat lokal optimum noktasına takılmaması için iyi bir başlangıç tasarımının seçilmesi gerektiği söylenmiştir. Ayrıca genetik algoritmasının da yeterince iyi bir sonuç verdiği fakat çok fazla eniyileme döngüsüne ve zamana gerek duyduğunu belirtmişlerdir.

Prasad ve diğerleri [11], farklı giriş debi sınır koşulları ve farklı geometrik konfigürasyonların reaksiyon tipi türbinlerin dirsek tipi emme borularının hidrolik performansını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Çalışmada, emme borusu uzunlukları çark çıkış çapına (D) oranlanarak uzunluklar boyutsuzlaştırılmıştır. Emme borusu yüksekliğinin çark çıkış çapına oranı (L/D) 1,54'den 3'e kadar dört değer ile, emme borusu uzunluğunun giriş çapına oranı (H/D) için 4'den 6'ya kadar beş farklı değer ve üç farklı debi ile denenmiştir. Emme borusu performansını; hidrolik verime, geri

kazanıma ve hidrolik kayıplara göre değerlendirmişlerdir. Emme borusu yüksekliğinin çark çıkış çapına oranı arttıkça bir noktaya kadar verim artıp kayıplar azalırken kritik bir noktadan sonra verim azalmaya ve kayıplar artmaya başlamıştır. Bir diğer incelenen parametre emme borusu uzunluğunun çark çıkış çapına oranıdır ve bu parametre arttıkça verim artmakta, hidrolik kayıplar azalmaktadır. Son parametre giriş sınır koşulu olarak tanımlanan debinin emme borusu karakteristiğini ve performansını çok az etkilediği görülmektedir. En iyi sonuçlara $L/D = 6$ ve $H/D = 2,24$ iken ulaşıldığı iddia edilmektedir.

McNabb ve diğerleri [40] ise çalışmalarında, dirsek tipi emme borularını hidrolik kayıplar ve yapısal maliyetlerden oluşturdukları amaç fonksiyonu doğrultusunda optimize etmek için meta-model tabanlı rassal eniyileme metodu kullanmışlardır. Optimizasyonda öncelikle emme borusu yüzeyi, geometrisini tanımlayan değişkenlerin oransal B-spline geometri modelleme metodunda kullanılarak tanımlanmıştır. Daha sonra elde edilen bu geometri için otomatik ağ yapısı oluşturulmuş ve 3B viskoz etkiler de göz önüne alınarak zamandan bağımsız olarak HAD analizleri yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Tepki tipi hidrolik türbinlerin en önemli parçalarından olan emme borusu, tam ve kısmi yükleme türbin verimliliğini ve performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, emme borusu tasarımında Hidroelektrik Santral (HES) kurulum maliyetleri ve kurulacak alan kısıtları da önemli parametrelerdir. Günümüzde performans ve verimliliği yükseltecek, kurulum maliyetlerini azaltacak bir tasarım elde etmek için geleneksel tasarım süreci yerine eniyileme tasarım süreçleri kullanılmaktadır. Eniyilenme tasarım süreci diğer bileşenlerde olduğu gibi emme borusu tasarımında da ana parametrelerin ve değerlerinin belirlenmesiyle başlamaktadır. Bu amaçla öncelikle emme borusu geometrisini ve performansını tanımlayan değişkenler belirlenmektedir. Ele alınan sistem çok fazla değişkene sahip karmaşık bir sistem olduğundan optimum tasarım geometrisini bulmak için eniyileme tasarım sürecinde defalarca analiz yapılması gerekmektedir. Ancak deney tasarımı metotları kullanılarak gereken analiz sayısı azaltılabilmektedir. Böylelikle oluşturulan deney tasarımı doğrultusunda

yapılan HAD sonuçlarıyla oluşturulan meta-modeller kullanılarak eniyilenmiş tasarım elde edilmektedir.

Bu tezin amacı, dirsek tipi emme borusunun meta-model tabanlı tasarım eniyilemesi (MTTE) süreci kullanılarak istenen çalışma koşullarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri vasıtasıyla tasarımını yapmaktır. Böylelikle emme borusu performansını belirleyen basınç geri kazanım katsayısının maksimize edildiği ve hidrolik kayıpların minimize edildiği bir tasarım elde edilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca bir diğer amaç da dirsek tipi emme boruları için literatürden yararlanılarak elde edilen geçerlilik sınırları dahilinde emme borusu performansını belirleyen basınç geri kazanım katsayısını bağımsız değişkenler cinsinden ifade eden regresyon modelini oluşturmaktır.

Bu kapsamda, başlangıç tasarımında bir dirsek tipi emme borusunun meta-model tabanlı eniyileme yöntemi oluşturulmuş ve bu yöntem izlenerek daha iyi performansa sahip bir tasarım elde edilmiştir. Ayrıca yapılan eniyileme çalışmasından elde edilen bilgiler doğrultusunda emme borusu basınç geri kazanım katsayısı, boyutsuzlaştırılmış tasarım parametreleri cinsinden tahmin edilerek elde edilen bu model doğrulanmıştır.

1.3 Tez Planı

Bu tez beş ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de Francis tipi türbin parçalarından, özellikle bu tezin konusu olan dirsek tipi emme borusundan ve geometri eniyilemesinden bahsedilmektedir.

Bölüm 2’de kullanılan sayısal yöntemlerden detaylıca bahsedilmektedir. Analizlerde kullanılan çözüm ağı oluşturma, sınır koşulları ve çözümlenen korunum ve türbülans denklemleri açıklanmaktadır. Ayrıca meta-model tabanlı eniyileme yöntemi kapsamında kullanılan deney tasarımı ve meta-model oluşturulması, oluşturulan meta-model üzerinde eniyilenmiş tasarımın elde edilmesinden bahsedilmiştir.

Bölüm 3’te, bir dirsek tipi emme borusunun Bölüm 2’de belirtilen sayısal yöntemler kullanılarak eniyilenmesi ve bu alanda yapılan eniyileme çalışmalarından elde edilen sonuçlar ele alınmaktadır.

Bölüm 4 ise emme borusu performansını değerlendirmek için kullanılan geri dönüşüm katsayısının HAD analizleri yardımıyla boyutsuz parametreler cinsinden irdelenmesini ve elde edilen HAD tabanlı regresyon denkleminin doğrulanmasını içermektedir.

Son olarak Bölüm 5, tez kapsamında yapılan çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesini, bu çalışmanın sağladığı katkıları ve gelecekte gerçekleştirilebilecek çalışmaları içermektedir.





2. SAYISAL YÖNTEMLER

2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi

Üç boyutlu, türbülanslı ve Reynolds sayısının yüksek olduğu karmaşık problemlerde HAD kullanılarak sayısal çözüm elde etmek hem zaman hem de maliyet açısından çok avantajlıdır. Emme borusu, geometrisi ve akışından dolayı karmaşık bir problem olarak nitelendirilebileceğinden, bu problem için yapılan analizlerde Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri, sıkıştırılmaz akışlar için k-ε türbülans modeliyle birlikte ANSYS CFX [43] çözümleyici modülü kullanılarak çözümlenmektedir [44].

Aşağıda korunum denklemleri, türbülans modelleri, çözüm ağı oluşturulması ve sınır koşullarından kısaca bahsedilmektedir. Bu çalışmada izlenen HAD metodolojisi TOBB ETÜ Hidro grubu tarafından oluşturulmuş, geliştirilmiş ve bu metodolojiyle bir çok Hidroelektrik Santral (HES) için türbin tasarımı gerçekleştirilmiştir [7,10,45,46,47].

2.1.1 Korunum denklemleri

Öncelikle kontrol hacmindeki bir akış elemanı, boyutları dx, dy ve dz olan, ele alınırsa bu eleman için kütle korunumu denklemi tensör notasyonunda Denklem 2.1'de verildiği gibi elde edilmektedir. Ele alınan akış elemanı içindeki kütle net değişiminin elemanın sınırlarından geçen net kütle akısına eşit olması, kütle korunum denkleminin fiziksel olarak açıklamasıdır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1,2,3 \quad (2.1)$$

Kütle korunum denkleminde zamandan bağımsız ve sıkıştırılmaz akış varsayımı yapılırsa Denklem 2.2 elde edilmektedir.

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1,2,3 \quad (2.2)$$

Akış elemanının birim kütlesindeki momentum değişiminin ele alınan elemana etki eden kuvvetlerin (basınç farkı, viskoz kuvvetler, gövde kuvvetleri ve diğer tüm kuvvetler) toplamına eşit olması gerekmektedir. Böylelikle Navier-stokes denklemlerinin en genel hali tensör notasyonu kullanılarak toplam türev şeklinde sıkıştırılmaz akış için Denklem 2.3'te verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\frac{D(u_i)}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{F_i}{\rho}, \quad i,j = 1,2,3 \quad (2.3)$$

Türbülanslı akışlarda her bir değişken ortalama ve çalkantı terimlerine ayrılarak korunum denklemlerinde yerlerine yazılıp zamana göre ortalaması alınarsa Denklem 2.4'te verildiği gibi Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) elde edilmektedir. Burada dış kuvvetler yok sayılmıştır.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i,j = 1,2,3 \quad (2.4)$$

2.1.2 Türbülans modellemesi

1877'de Boussinesq'in türbülanslı gerilmelerin matematiksel ifadesi için ortaya attığı eddy viskozitesinden sonra Reynolds, Prandtl ve Kolmogorov gibi araştırmacılar da türbülans ve türbülansın nasıl modellenebileceği hakkında birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir [16,48]. Türbülansı modellemede için cebirsel, bir denklemlilik, iki denklemlilik gibi birçok model elde edilmiştir [49].

Cebirsel denklemlerde ek denklemler kullanılmaksızın direk akış değişkenleri kullanılarak çözüm elde edilir. Baldwin-Lomax ve Cebeci-Smith cebirsel modellerden en yaygın olanlarıdır. Bir denklemlilik modellerde sadece türbülans kinetik enerjisini ifade eden "k" terimi modele dahil edilir. Baldwin-Barth ve Spalart-Allmaras bir

denklemliler modellere 6rnek verilebilir. Cebirsel yada bir denklemliler modellerle t6rb6lansın 66z6lemediği durumlarda iki denklemliler modeller kullanılır.

Emme borusu i6in yapılan HAD analizlerinde t6rb6lanslı modellemek i6in k-ε modeli kullanılmıştır. “k” t6rb6lans kinetik enerjisini ifade etmekte “ε” ise bu enerjinin yitim oranını ifade etmektedir ve bu t6rb6lans modeli ile modellenen turbomakina problemleri i6in kabul edilebilir sonu6lar elde edilmektedir [7, 10, 13, 29]. Bu modelde RANS denklemlilerinde t6rb6lanslı ifade eden terim iki taşınım denklemliler yardımıyla modellenmektedir [7,25].

2.1.3 Sayısal ayrıklıştırma

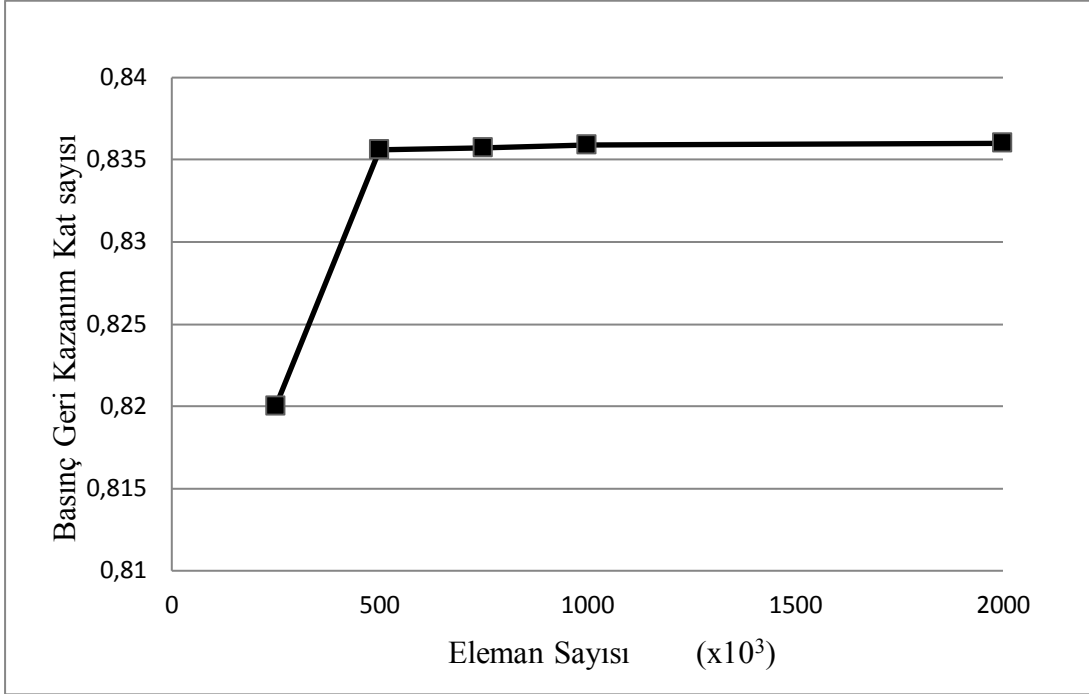
Emme borusu i6erisindeki akış alanı sonlu hacimler metodu kullanılarak ayrıklıştırılmaktadır. Akış alanında oluşturulan her bir eleman i6in şekil fonksiyonları kullanılarak (shape functions) momentum denklemliler 66z6lerek hız verileri iteratif 66z6c6 tarafından yapılan d6zeltmelerle elde edilmektedir. Yapılan d6zeltmelerden sonra elde edilen veri ile bir 6nceki iterasyondan elde edilen veri kıyaslanarak yakınsama kontrol6 sağlanır. İteratif s6re6te yakınsama kriteri 10^{-5} olarak se6ilmiştir ve iteratif s6re6 yakınsama kriteri sağlanana kadar devam eder.[25,43].

2.1.4 66z6m ağı oluşturma

HAD analizleri sonu6larının yakınsak ve 66z6m ağından bağımsızlaşmış olması 66z6m6n s6rekli olmasını ve kullanılan ayrıklıştırma sonucu oluşan hataların azaltılmasını sağlamaktadır. Bunun i6in oluşturulacak 66z6m ağının sıklıştırılması ve eleman boyutlarının k666lt6lmesi gerekmektedir. Bu ama6la oluşturulan 66z6m ağlarında eleman sayısı ve b6y6kl6ę6n6 doğrudan etkileyen minimum eleman b6y6kl6ę6, minimum eleman y6z b6y6kl6ę6 ve maksimum eleman b6y6kl6ę6 tanımlanmaktadır.

Emme borusu i6in bu fakt6rleri belirlemede daha 6nceki akış analizi 66z6m ağı 6alışmalarından yararlanılmıştır. Aylı ve diğerleri [45] tarafından yapılan 6alışmada oluşturulan farklı eleman sayıları i6in 66z6m ağından bağımsızlaştırma analizleri ANSYS Mesh [50] mod6l6 kullanılarak yapılmış ve uygun olanına karar verilmiştir. Ayrıca yapılan 6alışmada emme borusu i6in oluşturulan 66z6m ağının eleman sayısına g6re basın6 geri kazanımının değişimi verilen şekil 2.1’de g6zlenmektedir. Bu

şekilden de anlaşıldığı üzere eleman sayısı 1×10^6 olduktan sonra eleman sayısının artmasıyla basınç geri kazanım katsayısı değişmemektedir. Güvenli bölgede kalmak adına $3-4 \times 10^6$ eleman sayısı ile çalışmalara devam edilmiştir.

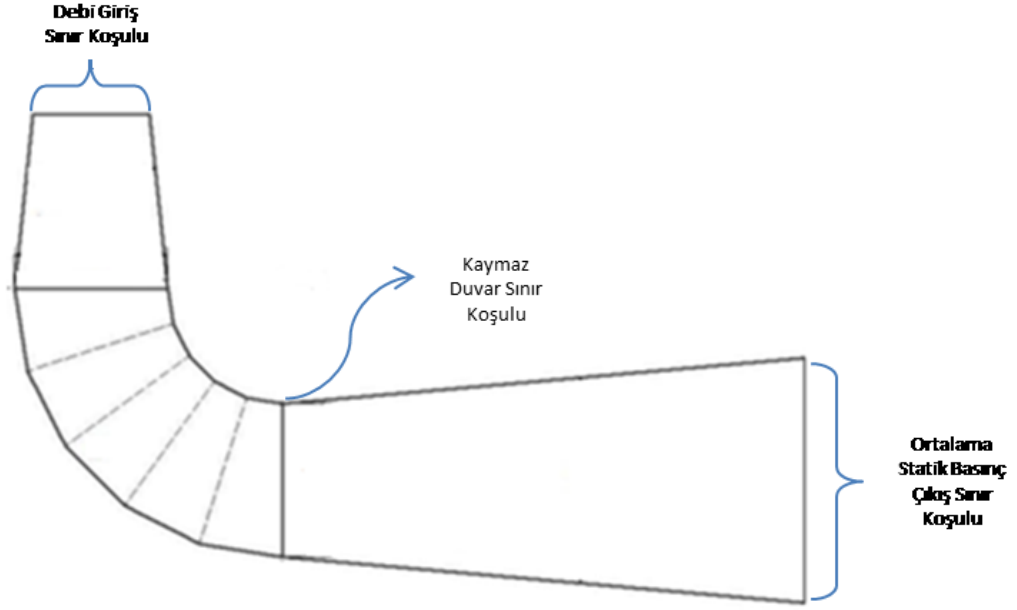


Şekil 2.1 : Emme borusu açısından bağımsızlaştırma çalışmaları ([45]'ten uyarlanmıştır).

2.1.5 Sınır koşulları

Akış analizini gerçekleştirmek amacıyla öncelikle emme borusu sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Emme borusunun türbin çarkından çıkan suyu tahliye eden bileşen emme borusuna; girişte çarktan sağlanan bilgi olan debi değeri, çıkışta ise ortalama statik basınç değeri Şekil 2.2 'de verildiği gibi tanımlanmaktadır. Emme borusu duvarları içinse kaymaz duvar sınır koşulu kullanılmaktadır. Bölüm 3'te yapılan çalışmalarda duvarın yüzey pürüzlülüğünün verime etkisi yok sayılarak duvar pürüzsüz olarak kabul edilmektedir. Fakat Bölüm 4'teki çalışmalarda yüzey pürüzlülüğü basınç geri kazanımını etkileyen parametrelere dahil edilmiştir.

Yapılan analizlerde çarktan çıkan suyun çevresel hızının 0 m/sn olduğu yani tüm akış enerjisinin çarkta bırakıldığı optimum tasarımda, sadece aksenal hızının olduğunu varsayarak suyun emme borusuna dik bir açıyla girdiği kabul edilmektedir.



Şekil 2.2 : Emme borusu sınır koşulları.

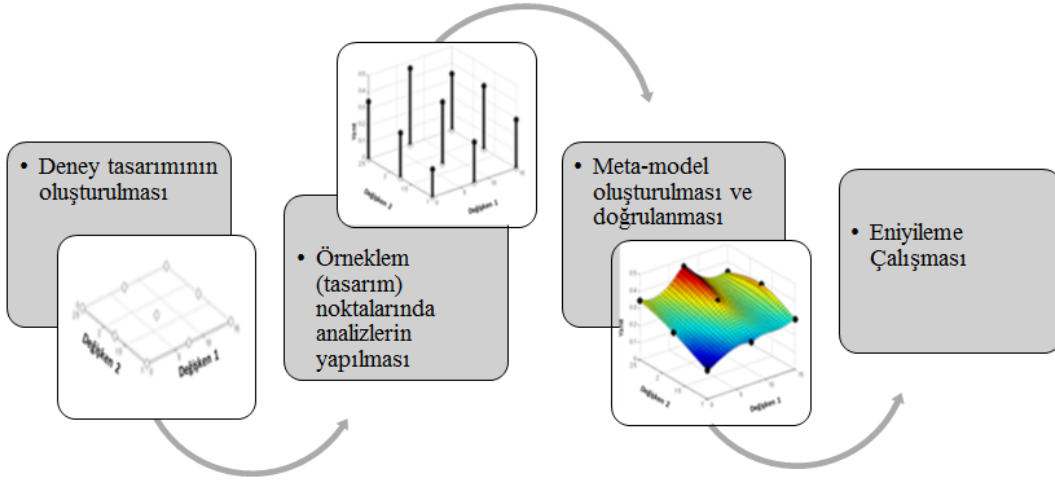
Tüm analizlerde RANS denklemleri ve k-ε türbülans denklemleriyle birlikte çözümlenmiştir ve yakınsama kriteri olarak 10^{-5} seçilmiştir.

Sınır koşulları ve çözüm metodu belirlendikten sonra CFX çözüm modülünde akış analizi yapılmakta ve elde edilen sonuçlar emme borusu performans ölçütlerince değerlendirilmektedir.

2.2 Meta-model Tabanlı Tasarım Eniyilemesi (Mtte) Yöntemi

Meta-model tabanlı tasarım eniyilemesi (MTTE); uygun bir deney tasarımı yöntemi kullanılarak oluşturulan örneklem noktalarında yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla tasarım değişkenleri arasında matematiksel ilişki kurulması (yani meta-model oluşturulması) ve oluşturulan matematiksel modelin bir eniyileme süreci dahilinde kullanılmasına dayanmaktadır.

Şekil 2.3'te basitçe gösterildiği üzere MTTE dört aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle, tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırları belirlenmekte ve uygun bir deney tasarımı yöntemi kullanılarak bu sınırlar dahilinde örneklem noktaları oluşturulmaktadır. Ardından oluşturulan bu noktalarda analizler gerçekleştirilmekte ve analiz sonuçları ile tasarım değişkenleri arasında meta-modeller oluşturulmaktadır. Daha sonrasında, oluşturulan model doğrulanmakta ve eniyileme çalışması gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.3 : Meta-model tabanlı tasarım eniyilemesi (MTTE) aşamaları.

2.2.1 Deneysel tasarım (DT) oluşturulması

Deneysel tasarımda (DT) tasarım değişkenleri için belirlenen sınırlar dahilinde analizlerin gerçekleştirileceği örneklem (tasarım) noktaları oluşturulmakta ve böylelikle optimizasyon süreci başlamaktadır. Belirlenecek örneklem noktalarının yerleri meta-modelin doğruluğunu direkt olarak etkilediğinden, etkili bir deneysel tasarımı oluşturmak büyük önem arz etmektedir. Literatürde Merkezi Karma Tasarım (MKT), Optimal Boşluk Doldurma (Optimal Space Filling), Box-Behnken Tasarımı, Seyrek Ağ Hazırlama (Sparse Grid Initialization), Latin Hiperküp Örneklem (LHÖ) ile kullanıcı tanımlı deneysel tasarım metotları bulunmaktadır [10,50].

Bölüm 3'te yapılan çalışmada LHÖ metodu kullanılmıştır. Latin Hiperküp Örneklem (LHÖ), çok boyutlu örneklemde parametre değerlerinin oluşturulup rasgele dağılması esasına dayanan istatistiksel bir metottur. Oluşturulan tasarım noktaları aynı değeri almayacak şekilde dağıtılmaktadır. Fakat bu metotla oluşturulan dağılımda bazı noktalar uç değerlerde yer aldığından, bu noktaların değerleriyle oluşturulan meta-modeller kaliteli sonuç vermeyebilir. İki boyutta farklı sayıda örneklem noktası ile oluşturulan örneklem Şekil 2.4'te verilmektedir.

x					
				x	
	x				
			x		
		x			
					x

(a)

								x	
									x
	x								
			x						
				x					
						x			
		x							
								x	
x									
					x				

(b)

Şekil 2.4 : LHÖ ile oluşturulan deney tasarımları; a) 6 tasarım noktalı, b) 10 tasarım noktalı.

2.2.2 Meta-model oluşturulması

Deney tasarımı oluşturulup belirlenen noktalarda analizler yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlarla kullandığımız tasarım değişkenleri arasında matematiksel ilişkiyi kurabilmek için meta-model oluşturma metotlarından yararlanılmaktadır. Tasarım eniyilemesinde meta-modellerin kullanılması hem gereken simülasyon sayısını azaltmakta hem de değişkenlerin birbirlerine olan etkilerini daha kolay anlaşılabilir hale getirdiğinden avantajlı olmaktadır [10].

Literatürde en sık kullanılan meta-model yöntemlerinden birkaçı; standart yanıt yüzey, Kriging, parametrik olmayan regresyon ve sinir ağları olarak belirtilebilir [51]. Kullanılacak meta-modellerden Kriging interpolasyon yöntemi global optimumu bulabilmek için lokal değişimlerin etkisi hesaba katılmakta ve iyileştirilmiş bir yanıt yüzey sunmaktadır. Ayrıca deney tasarımından elde edilen verilere göre ağırlık ataması yaparak çıktı parametrelerinin hızlı değişimlerine uygun bir yüzey oluşturmaktadır. İkinci dereceden standart yanıt yüzey metodu ise polinom tabanlı olup en küçük kareler yöntemiyle oluşturulan bir regresyon denklemi olmaktadır. Parametrik olmayan regresyonda iyi tanımlanmış yüzey için diğer meta-modellerden daha fazla veriye ihtiyaç duymaktadır. Son olarak sinir ağları metodu insan beynindeki sinir hücrelerinden örnek alınarak oluşturulmuştur. Girdi ve çıktı parametreleri arasında saklı fonksiyonlar ağırlık fonksiyonlarıyla ilişkilendirilmekte ve

interpolasyon hatasının istenen seviyeye düşmesi üzerine oluşturulmuştur [51,52]. Eldeki bir problem için bu metotlardan hangisinin daha doğru yanıt vereceği önceden bilinmediğinden Bölüm 3'te bu metotların hepsi kullanılmaktadır. Ayrıca Acar vd. [53] yaptıkları çalışmalarda eniyileme sürecinde doğruluğu en yüksek olan meta-model kullanılarak elde edilen optimumun, diğer meta-modeller kullanılarak elde edilen optimumlardan her zaman için daha iyi performans sergileyebileceğini göstermiştir.

2.2.3 Çok amaçlı arama metotları

Optimizasyon probleminin çözümünde tasarım değişkenlerinin amaç fonksiyonlarını minimize (maksimize) eden değerlerinin bulunması istenmektedir. Bu amaçla meta-model kullanılarak yapılan optimizasyon probleminde oluşturulan modeli minimize (maksimize) eden tasarım değişkenleri aranmaktadır.

Emme borusu tasarımında iki adet amaç fonksiyonu olduğundan çok amaçlı arama metotlarından 'screening' ve 'çok amaçlı genetik algoritma (MOGA)' metotları kullanılmıştır. Bu arama metotlarından Screening, Hammersley algoritması tabanlı oluşturduğu yarı-rassal numaralarla direk olarak örneklemi oluştururken; MOGA bunun aksine daha iyi tanımlanmış bir yaklaşımla iteratif bir süreç izlemektedir [51].

2.3 Eğri Uydurma Yöntemleri

Değişkenler arasındaki etkileşimler analitik yollarla ifade edilemediği zaman istatistiksel teknikler kullanılmaktadır. Hiçbir faktörden etkilenmeyen değişkenler (bağımsız) ile bu faktörlerin değişiminden etkilenen (bağımlı) değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamak için kullanılan istatistiksel tekniğe eğri uydurma denmektedir. Regresyon ve interpolasyon, eğri uydurmak için kullanılan yaklaşımlardır. Bunlardan hangisinin ilgilenilen sisteme uygulanacağı hata oranlarına göre belirlenmektedir.

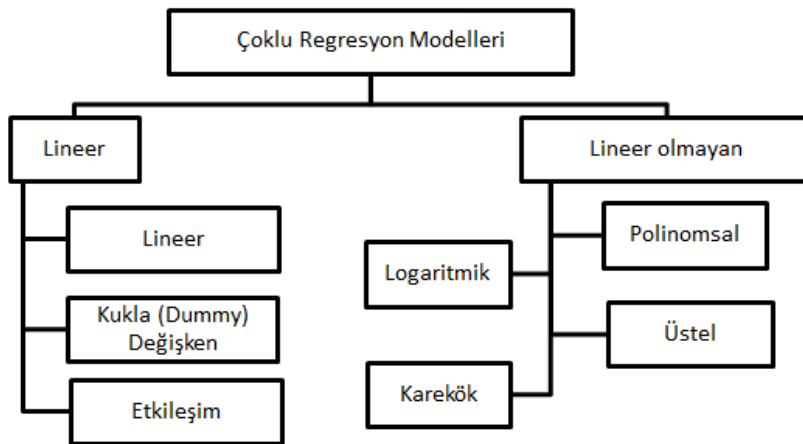
Regresyon yaklaşımı, veri değerlerinin hata oranı büyükse ve oluşturulacak eğri her bir veri noktasından geçmeyecek sadece verilerin genel eğilimine göre oluşturulacaksa kullanılmaktadır. Eğer veri değerlerinin hata oranları küçükse ve oluşturulacak eğrinin her bir veri noktasından geçmesi planlanıyorsa interpolasyon yaklaşımı kullanılmaktadır [54].

Regresyon yöntemi bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilmesidir. Bu yöntemle elde edilen veri setini modelleyen bir fonksiyon elde edilmektedir. Eldeki veri setine tamamiyle uyan bir fonksiyon elde etmek çok zor olduğundan en iyi uyan fonksiyon belirlenmektedir. Bu fonksiyonu bulmak için regresyon analizi yapılmaktadır. Kullanılacak regresyon modeli belirlendikten sonra elde edilen verilerle regresyon katsayıları hesaplanmaktadır.

Regresyon katsayılarını bulmak için kullanılan yöntemlerden biri en küçük kareler yöntemidir. En küçük kareler yönteminde elde edilen fonksiyonun tahmini ile gerçek değer arasındaki farkın yani hatanın en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Hataların karelerinin toplamını minimum yapacak fonksiyon katsayıları, bu değerlerin türevlerinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilen matristen bulunmaktadır. Bu yöntem lineer, üstel eğri uydurmada ve polinom eğrilerinde kullanılabilir.

Genellikle en basit regresyon modeli olduğundan elde edilen veriye lineer regresyon modelleri denenmektedir. Fakat bazı verilerin düz doğrularla ifade edilmesi mümkün olmadığından polinomlarla ifade etmek daha doğru sonuçlar vermektedir [55,56].

Regresyon analizinde öncelikle bağımsız değişken sayısına göre sınıflandırma yapılmaktadır. Bağımsız değişken sayısına göre; eğer tek bağımsız değişken varsa basit regresyon, iki veya daha fazla değişken varsa çoklu regresyon analizi uygulanmaktadır. Bu tezde yapılan çalışmalarda ikiden fazla bağımsız değişken olduğu için çoklu regresyon analizi üzerine çalışılacaktır. Çoklu Regresyon modellemesi Şekil 2.5'te görüldüğü gibi gruplandırılabilir [57].



Şekil 2.5 : Çoklu regresyon modelleri ([57]'den uyarlanmıştır).

Veri setindeki parametrelerin tiplerine: (bağımlı ya da bağımsız olduklarına) ya da bu parametrelerin regresyon setinde birlikte ele alınıp alınmayacağına karar verirken korelasyon analizi kullanılmaktadır. Oluşturulacak eğrinin birbirlerinden bağımsız değişkenlerin bir yaklaşık fonksiyonu olması gerektiğinden değişkenler arasında ilişki olup olmadığı çok önemlidir. Değişkenler arasındaki ilişkinin yönü ve derecesi için her bir değişkenin diğeriyle olan korelasyonuna bakılmalıdır yani korelasyon katsayısı (r) hesaplanmalıdır. Korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değerler almaktadır. Eğer iki değişken arasındaki korelasyon değeri sıfıra yakınsa korelasyon yok, değişkenlerden birinin artışına göre diğeri de artıyorsa pozitif ilişki (r = +1 mükemmel pozitif ilişki), bir değişkenin değeri artarken diğeri azalıyorsa da negatif ilişki (r = -1 mükemmel negatif ilişki) var anlamına gelmektedir [58].

Çizelge 2.1 : Korelasyon değerleri limitleri [59].

Korelasyon Aralığı	Anlamı
0,8 ve üzeri	Çok güçlü ilişki (very strong)
0,6 ile 0,8 arası	Güçlü ilişki (moderately strong)
0,3 ile 0,6 arası	Normal ilişki (fair)
0,3 ve altı	Zayıf ilişki (poor)

Korelasyon ilişkilerinin derecesine bakmak için değişkenler arasındaki ilişkiyi sınıflandırmakta kullanılan limitler Çizelge 2.1’de görülmektedir. Eğer korelasyon katsayısının değeri 0,3 ve altındaysa değişkenleri birlikte ele almaya gerek olmamaktadır. Aksi durumda ise değişkenlerin bir arada kullanılması regresyon denkleminin doğruluğunu arttırmaktadır [59].

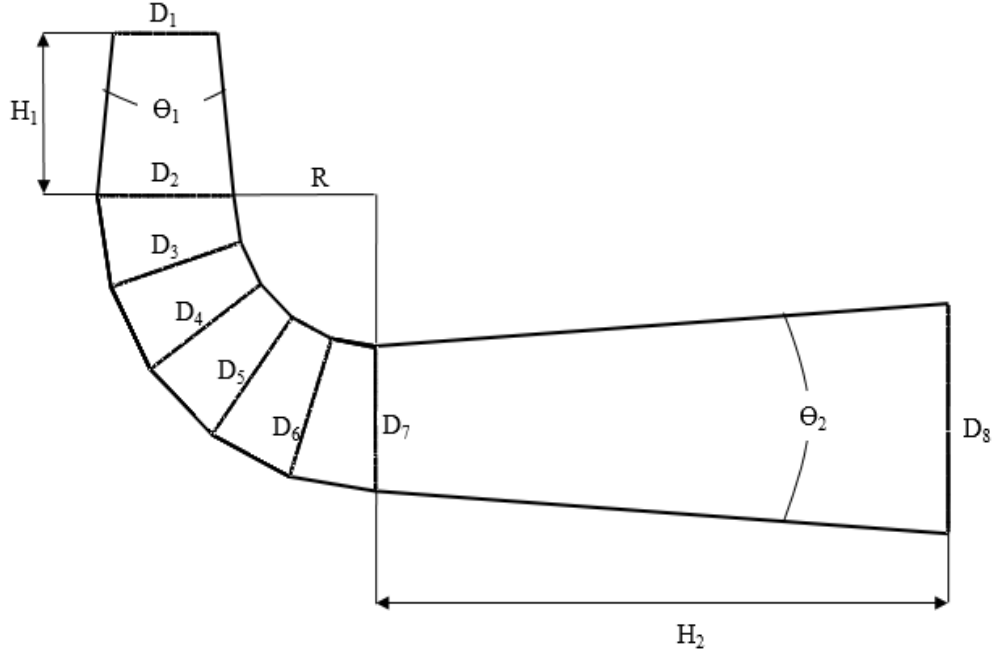
3. EMME BORUSUNUN SAYISAL YÖNTEMLER İLE META-MODEL TABANLI TASARIM ENİYİLEMESİ

Emme boruları daha önce de belirtildiği gibi farklı debi değerleri ve çark çıkışında oluşacak düşük basınçlar için farklı geometrilere sahip olabilmektedirler. Bunları sağlarken emme borusunun performansı yüksek, hidrolik kaybının ve yapı maliyetlerinin düşük bir diğer deyişle boyutlarının küçük olması istenmektedir. Fakat bu amaçlar birbirleriyle çelişmekte olduğundan en doğru geometri için sadece tecrübeye bağlı bir tasarım yerine meta-model tabanlı eniyileme ile tasarım yapmak daha avantajlı olmaktadır. Böylelikle her bir projede sıfırdan başlamak yerine uygulanacak yöntem doğrultusunda çok daha hızlı ve daha az maliyetle performansı yüksek bir tasarım elde edilebilmektedir.

3.1 Problem Tanımı ve Eniyileme Çalışmasının Amacı

Bu çalışmada hidrolik türbinlerde kullanılan dirsek tipi emme borusunun girişi ile çıkışı arasındaki basınç geri kazanımını maksimize edecek, düşü farkını ise minimize edecek emme borusu tasarımı MTTE yöntemiyle elde edilmek istenmektedir. Bu amaçla öncelikle emme borusunun geometrisini tanımlamak için kullanılan parametreler belirlenmekte ve bunlardan bağımsız olanlar tasarım değişkenleri olarak seçilmektedir. Şekil 3.1’de gösterilen koniklik açısı (θ_1), difüzör açısı (θ_2), konik kısım uzunluğu (H_1), difüzör uzunluğu (H_2) ve dirsek yarıçapı (R) tasarım değişkenleri olarak kullanılmaktadır.

Emme borusunda basınç geri kazanımı c_p ile gösterilmektedir ve emme borusunun performansı bu değer ile ifade edilmektedir. Boyutsuz basınç farkı olarak da belirtilen geri kazanım katsayısı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmaktadır [10,14].



Şekil 3.1 : Emme borusu eniyileme problemi geometri parametreleri.

$$c_p = \frac{P_{out,s} - P_{in,s}}{\frac{1}{2}\rho V_{in}^2} \quad (3.1)$$

Literatürde geri kazanım katsayısı %80 – 85 civarında olan emme boruları iyi tasarlanmış olarak kabul edilmektedir [7].

Emme borusundaki düşü kaybı; girişi ve çıkışı arasındaki basınç farkı kullanılarak Denklem 3.2'deki gibi hesaplanmaktadır [10,14].

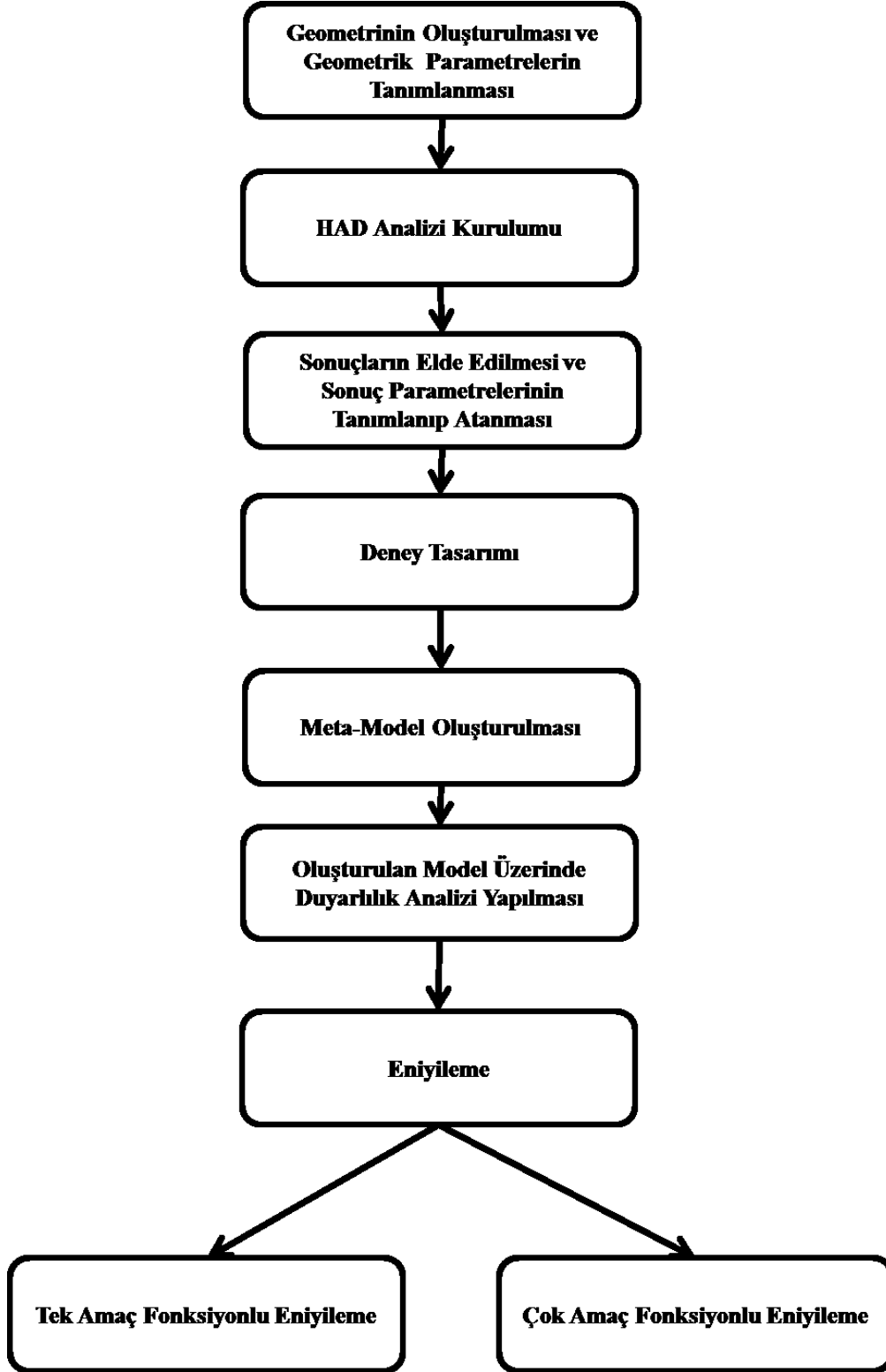
$$\Delta H = \frac{P_{out,t} - P_{in,t}}{\rho g} \quad (3.2)$$

Bu çalışma emme borusunun giriş ve çıkışı arasındaki basınç geri kazanımının % 80'den büyük olması koşulu eniyileme problemine kısıt fonksiyonu olarak eklenmektedir. Yapılan çalışmadaki eniyileme probleminin standart formülasyonla gösterimi Denklem 3.3'te verilmiştir.

Tasarım Değişkenleri	$\theta_1, \theta_2, H_1, H_2, R$	
Enküçükle	$-C_p, \Delta H$	
Kısıtlar	$0,8-C_p \leq 0$	
	$5^\circ \leq \theta_1 \leq 15^\circ$	
	$720 \text{ mm} \leq H_1 \leq 1000 \text{ mm}$	(3.3)
	$990 \text{ mm} \leq R \leq 1400 \text{ mm}$	
	$5^\circ \leq \theta_2 \leq 15^\circ$	
	$2700 \text{ mm} \leq H_2 \leq 3500 \text{ mm}$	

3.2 Eniyileme Yöntemi ve Emme Borusu Eniyilemesi Çalışmaları

Francis tipi türbin emme borusu eniyilemesi için yapılan çalışma Şekil 3.2'de gösterilen yöntemle gerçekleştirilmektedir. HAD analizi, parametre seti oluşturulması ve eniyileme olarak bu yöntem üç ana kısımda incelenmektedir. İlk olarak emme borusunun geometrisi oluşturulmakta ve oluşturulan ilk geometri üzerinde başlangıç akış analizi yapılmaktadır. İkinci aşamada eniyileme problemi için girdi ve çıktı değişkenlerinin tanımlandığı parametre seti oluşturulmakta ve son olarak eniyileme çalışmaları tamamlanmaktadır.



Şekil 3.2 : Yapılan çalışmada izlenen eniyileme yöntemi ([10]'dan uyarlanmıştır).

3.2.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmaları

Akış analizi geometrinin oluşturulması, çözüm ağı oluşturma ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak analizlerin gerçekleştirilmesi olmak üzere üç başlık altında incelenmektedir. Grubumuzca (ETU HİDRO ekibi) oluşturulan ve geliştirilen HAD yöntemi doğrultusunda analizler ANSYS yazılımında Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleriyle k-ε türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir [43].

Öncelikli olarak başlangıç tasarımı üç boyutlu ve parametrik olarak modellenmektedir. Halihazırda kullanılmakta olan Francis tipi türbin için hazırlanan emme borusu bu çalışmada başlangıç modelini oluşturmaktadır ve başlangıç geometrisinin boyutları Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Emme borusu başlangıç tasarımı ölçüleri.

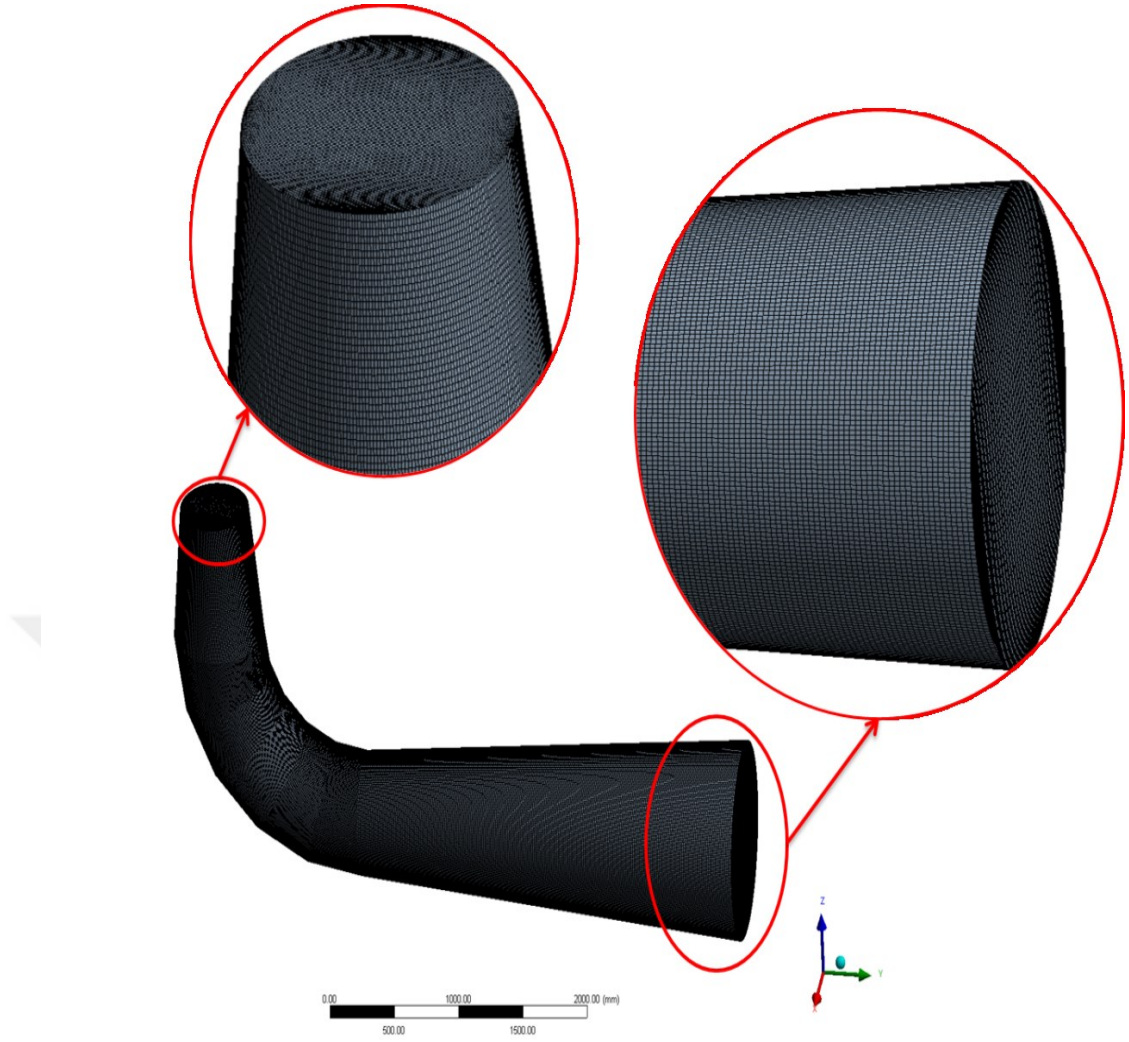
Geometri Değişkenleri	Boyut [mm]	Değişken Tipi
D1 (mm)	530	Bağımsız
D2 (mm)	698,1	Bağımlı $D2 = D1 + 2 * DS_H1 * \tan\left(\frac{DS_Teta1}{2}\right)$
D3 (mm)	698,1	Bağımlı [D2] $D3 = D2$
D4 (mm)	698,1	Bağımlı [D2] $D4 = D2$
D5 (mm)	698,1	Bağımlı [D2] $D5 = D2$
D6 (mm)	698,1	Bağımlı [D2] $D6 = D2$
D7 (mm)	698,1	Bağımlı [D2] $D7 = D2$

Çizelge 3.1 : Emme borusu başlangıç tasarımı ölçüleri(devam).

Geometri Değişkenleri	Boyut [mm]	Değişken Tipi
D8 (mm)	1117,7	Bağımlı $D8 = D2 + 2 * DS_H2 * \tan\left(\frac{DS_Teta2}{2}\right)$
DS_H1 (mm)	800	Bağımsız
DS_H2 (mm)	3000	Bağımsız
DS_R1 (mm)	1100	Bağımsız
DS_Teta1 (deg)	12	Bağımsız
DS_Teta2 (deg)	8	Bağımsız
Acı1 (deg)	18	18 [Sabit]

Çizelge 3.1’de sunulan diğer değişkenler tasarım değişkenleri cinsinden ifade edilmektedir. Bağımsız tasarım değişkenlerini akış analizinde ve eniyileme probleminde parametre olarak kullanabilmek amacıyla modelleme aşamasında parametre ismi “DS_”(Direct Search) ön eki ile tanımlanmaktadır. Bu ön ek geometrilerin içe aktarma işlemi esnasında parametreleri seçebilmesi için kullanılan ön tanımlı bir anahtardır.

Katı modellemesi tamamlanan emme borusu ANSYS çalışma alanında “DesignXplorer” [51] modülüne aktarılmakta ve burada tasarım değişkenleri sisteme tanıtılmaktadır. Sonraki aşamada model üzerinde çözüm ağının oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla Bölüm 2’de bahsedilen çözüm ağı oluşturma metodu kullanılarak emme borusu modeli için yaklaşık $3,5 \times 10^6$ yapısal eleman ile Şekil 3.3’te verildiği gibi çözüm ağı oluşturulmuştur.



Şekil 3.3 : Çözüm ağı oluşturulmuş emme borusu geometrisi.

Tasarımı tamamlanan emme borusunun akış analizi CFX modülünde gerçekleştirilmektedir. Akış analizini gerçekleştirmek için emme borusu girişinde ve çıkışında sınır koşulları tanımlanmaktadır. Emme borusu, giriş sınır koşulu olarak çark çıkışındaki suyun sabit debisi $2 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak tanımlanmaktadır. Çıkış sınır koşulu olarak ise ortalama statik basınç verilmektedir. Emme borusunun çıkışı çalışma koşullarında atmosfere açıldığı için 1 atm ortalama statik basınç sınır koşulu olarak (referans basınç 0 alınarak) kullanılmaktadır. Ayrıca emme borusu duvarları için kaymaz duvar sınır koşulu uygulanmıştır. Sınır koşulları ve çözüm metodu seçildikten sonra çözüm ağı topolojisi, akış ve çözücü özellikleri tüm analizler için aynı alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Parametre seti oluşturma

Bir tasarımın parametrik olarak tanımlanması onun tasarımının değiştirilmesinde, ağ yapısı oluşturulmasında, akış analizlerinin yapılmasında ve analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Yukarıda da bahsedildiği üzere emme borusu geometrisini tanımlamak için beş adet girdi parametresi (tasarım değişkenleri) ve emme borusunun performansını değerlendirmek için iki adet çıktı parametresi seçilmiştir. Ayrıca problem tanımladığımız parametreler cinsinden standart formülasyonda gösterilmiştir (bkz. Denklem 3.3).

Eniyileme probleminde kullanılan tasarım değişkenleri ANSYS DesignXplorer [51] modülünde girdi parametreleri olarak, akış analizinden elde edilen basınç geri dönüşüm katsayısı (c_p) ve düşü farkı (ΔH) ise CFX [43] modülünde çıktı parametreleri olarak Denklem 3.1 ve 3.2’de ifade edildiği gibi tanımlanmaktadır. Tanımlanan girdi ve çıktı parametreleri parametre setinde tutularak eniyilemede kullanılmıştır.

3.2.3 Emme borusu tasarım eniyilemesi

Eniyileme probleminin çözümü için öncelikli olarak standart formülasyon kullanılarak tasarım değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonları belirlenmektedir. Sonrasında bir başlangıç modeli oluşturularak gereken akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan başlangıç modeli, belirlenen örneklem noktalarının değerleri kullanılarak revize edilmiş ve akış analizleri yapılmıştır. Her bir örneklem noktası için geri dönüşüm katsayısı (c_p) ve düşü farkı (ΔH) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak eniyileme gerçekleştirilmiştir.

ANSYS yazılımı üzerinde eniyileme süreci üç adımda gerçekleştirilmektedir. Bu adımlar sırasıyla deney tasarımı (DT) oluşturulması, meta-model oluşturulması ve oluşturulan meta-model üzerinde arama metotları kullanılarak eniyilenmiş tasarımın bulunmasıdır.

Deney tasarımı, örneklem noktaları kümesinin oluşturulmasını ifade etmektedir. Kullanılan metoda göre program veya kullanıcı tanımlı örneklem noktaları oluşturulmaktadır. Bu çalışmada örneklem noktalarına uydurulacak meta-modelin probleme daha doğru yanıt verebilmesi için tasarım değişkeni sayısının 10 katı sayıda tasarım noktası ile deney tasarımı oluşturulması tercih edilmektedir [10].

Latin Hiperküp Örnekleme (LHÖ) metodu kullanılarak yapılan çalışmada deney tasarımı 50 adet tasarım noktasıyla elde edilmiştir. Oluşturulan tasarım noktaları Ek 1.1'de verilmektedir.

Bu metodun kullanılması hem örneklem noktası sayısının istenildiği gibi seçilmesine olanak sağlarken hem de sonuçlardan sağlanan meta-modelin daha rassal dağılması ve tahmin kalitesinin daha iyi olması sağlamaktadır. Oluşturulan örneklem noktaları için program tarafından akış analizleri gerçekleştirilmektedir.

Eniyileme sürecinin ikinci aşaması deney tasarımının kullanılarak meta-modelin oluşturulmasıdır. Literatürde emme borusu eniyilemesi için hangi meta-model metodunun daha doğru yanıt verdiğiyle ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle ikinci dereceden standart polinom yanıt yüzey, Kriging, parametrik olmayan regresyon ve sinir ağları metotları ile her bir deney tasarımı için vekil modeller oluşturulmuş ve her bir meta-modelin doğruluğu karşılaştırılmıştır. Meta-modeller için yapılan doğrulama çalışmasında hata oranları aşağıdaki denklemde verildiği üzere hataların ortalama karelerinin kareköklerine bakılarak elde edilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2} \quad i = 1, \dots, N \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'te N doğrulama noktası sayısını, y_i i. doğrulama noktasındaki HAD analizi sonucunu ve \hat{y}_i ise i. doğrulama noktasındaki meta-model tahminini belirtmektedir. Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere meta-model hataların ortalama karelerinin karekökleri (RMSE) % 5'in altındadır. Bu durumda kurulan yanıt yüzeylerin iyi bir tahmine sahip olduğu söylenebilir ve karşılaştırmaya bakıldığında içlerinde düşü kaybı için en az hataya sahip olanın ikinci dereceden standart polinom yanıt yüzey ve basınç geri kazanım katsayısı için en az hataya sahip olanın Kriging olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2 : Vekil modellerin hata oranları.

Meta-Model	Hata oranı [RMSE (%)]	
	Cp	ΔH
İkinci dereceden standart polinom yanıt yüzey	0,07	0,45
Kriging	0,06	0,50
Parametrik olmayan regresyon	0,56	4,86
Sinir Ağları	0,11	0,75

Meta-model oluşturulduktan sonra, eniyilenmiş tasarımın aranması için Denklem 3.3'te standart formülasyonda ifade edilen eniyileme problemi (basınç geri kazanım katsayısının enbüyükleme, düşü kaybının enküçüklenmesi ve basınç geri kazanım katsayısının % 80'den fazla olması) Response Surface Optimization modülünde tanımlanmıştır. Sonrasında her bir meta-model için aday optimum çözümün bulunması amacıyla 'screening' ve 'çok amaçlı genetik algoritma (MOGA)' arama metotları uygulanmış ve sekiz aday optimum noktası elde edilmiştir. Elde edilen aday optimum noktalarının doğrulaması yapılmıştır.

Tasarım değişkenlerinin her bir çıktı parametresi üzerinde ne kadar etkiye sahip olduklarını incelemek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

3.3 Tasarım Eniyilemesi Sonuçları

Emme borusu eniyilenmesinde ANSYS çalışma ortamındaki CFX ve Response Surface Optimization modülleri kullanılarak başlangıç tasarımından daha iyi bir tasarım elde edilmiştir. Tasarım değişkenleri ve çıktı parametreleri parametre setinde tutulmuştur. Dört vekil model ve iki arama metodu kullanılarak sekiz aday optimum noktası elde edilmiştir. Elde edilen aday optimumlar için doğrulama yapılmıştır. Doğrulaması yapılan bu aday optimum noktalarının, tasarım parametrelerinin ve çıktı parametrelerinin değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çizelgede parantez içerisinde belirtilen değerler kullanılan meta-model ve arama metodu için tahmin edilen değerlerdir.

Çizelge 3.3 : Aday optimum tasarımlar.

#	Meta-model	Arama Metodu	Tasarım Parametreleri					Yanıtlar	
			$\theta 1$ [°]	$\theta 2$ [°]	H1 [mm]	H2 [mm]	R [mm]	Cp	ΔH [m]
1	KR*	MOGA	10,86	7,37	954	3277	1377	0,841 (0,843)	0,451 (0,449)
2	KR	Screening	11,27	7,52	998	3324	1340	0,839 (0,845)	0,481 (0,461)
3	NPR*	MOGA	11,36	7,81	931	3144	1326	0,840 (0,841)	0,473 (0,472)
4	NPR	Screening	11,26	7,92	928	3173	1233	0,838 (0,840)	0,480 (0,480)
5	NN*	MOGA	10,97	7,24	980	3176	1361	0,841 (0,843)	0,479 (0,451)
6	NN	Screening	11,27	7,52	998	3324	1340	0,832 (0,845)	0,485 (0,464)
7	RS*	MOGA	10,8	7,27	994	3455	1399	0,848 (0,850)	0,448 (0,441)
8	RS	Screening	10,8	8,81	983	3300	1397	0,844 (0,853)	0,450 (0,462)

* KR: Kriging, NPR: Parametrik olmayan regresyon, NN: Sınır ağları, RS: İkinci dereceden standard polinom standart yanıt yüzey

** Parantez içerisindeki değerler aday optimumların tahmin değerleridir

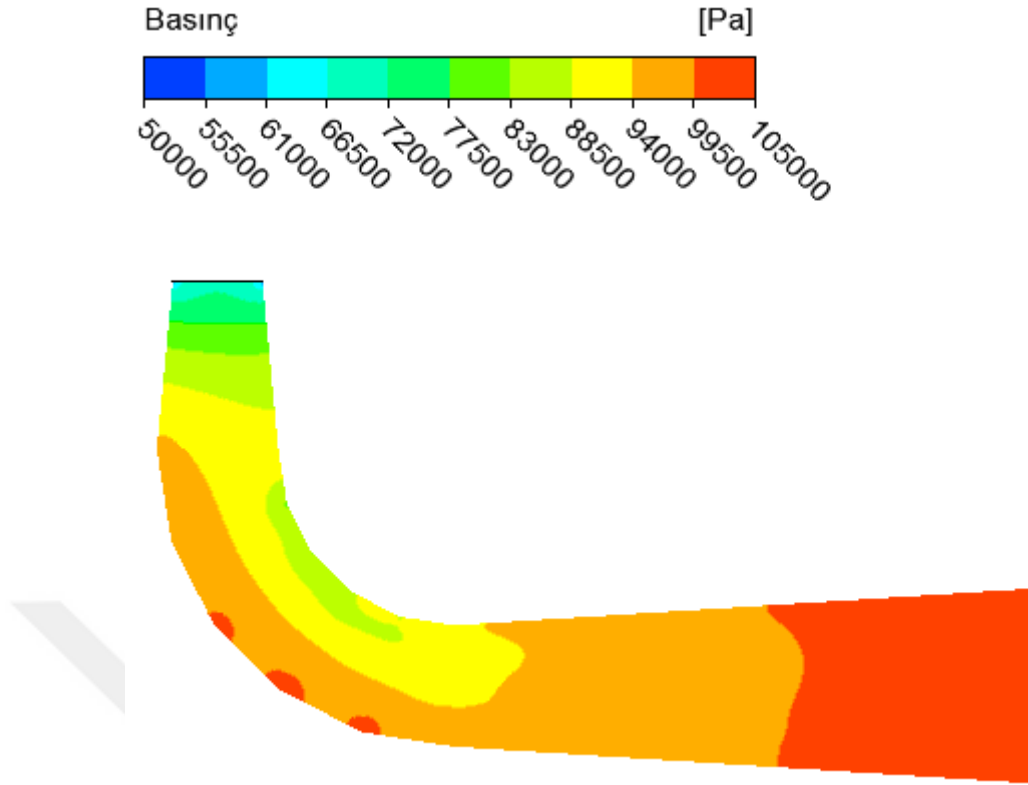
Doğrulamaları yapıldıktan sonra içlerinden amaç fonksiyonunda en çok iyileşmeyi sağlayan yani en iyi sonucu veren aday optimum en iyilenmiş tasarım olarak seçilmiştir. Seçilen eniyilenmiş tasarım, LHÖ deney tasarımı, ikinci dereceden standart polinom yanıt yüzey meta-modeli üzerinde yapılan çok amaçlı genetik algoritmayla elde edilmiştir.

Çizelge 3.4'te en iyilenmiş tasarım ile başlangıç tasarımı için elde edilen tasarım parametrelerinin değerleri ve çıktı parametrelerinin değerleri verilmektedir. En iyilenmiş tasarımın basınç geri kazanım katsayısı 0,848 (%84,8) ve düşü kaybı (hidrolik kayıplar) 0,448 m olarak elde edilmiştir.

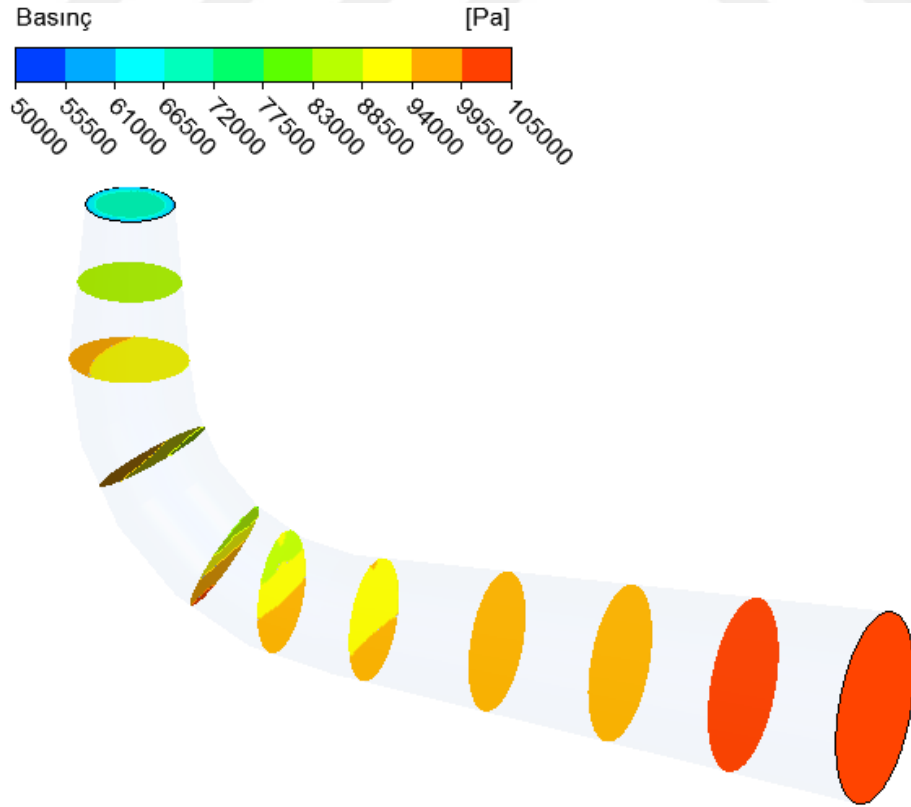
Çizelge 3.4 : Eniyilenmiş tasarım ve başlangıç tasarımının karşılaştırılması.

	Başlangıç Tasarımı	Eniyilenmiş Tasarım
Koniklik Açısı, Q_L [°]	12,00	10.80
Konik Kısımın Uzunluğu, H_1 [mm]	800	994
Dirsek Yarıçapı, R_1 [mm]	1100	1399
Difüzör Açısı, Q_2 [°]	8,00	7,27
Difüzör Uzunluğu, H_2 [mm]	3000	3455
Basınç Geri Dönüşüm Katsayısı, C_p	0,813	0,848
Düşü Kaybı [m]	0,560	0,448

Eniyilenmiş tasarımın akış analizi sonucunda elde edilen basınç ve hız dağılımları Şekil 3.4 – 3.7'de görülmektedir. Şekil 3.4'te simetri düzlemi boyunca ve 3.5'te akış doğrultusu boyunca alınan kesitler, emme borusu üzerindeki basınç dağılımını göstermektedir. Şekiller incelendiğinde statik basıncın akış doğrultusunda arttığı ve emme borusu çıkışında atmosfer basıncına ulaştığı görülmektedir.

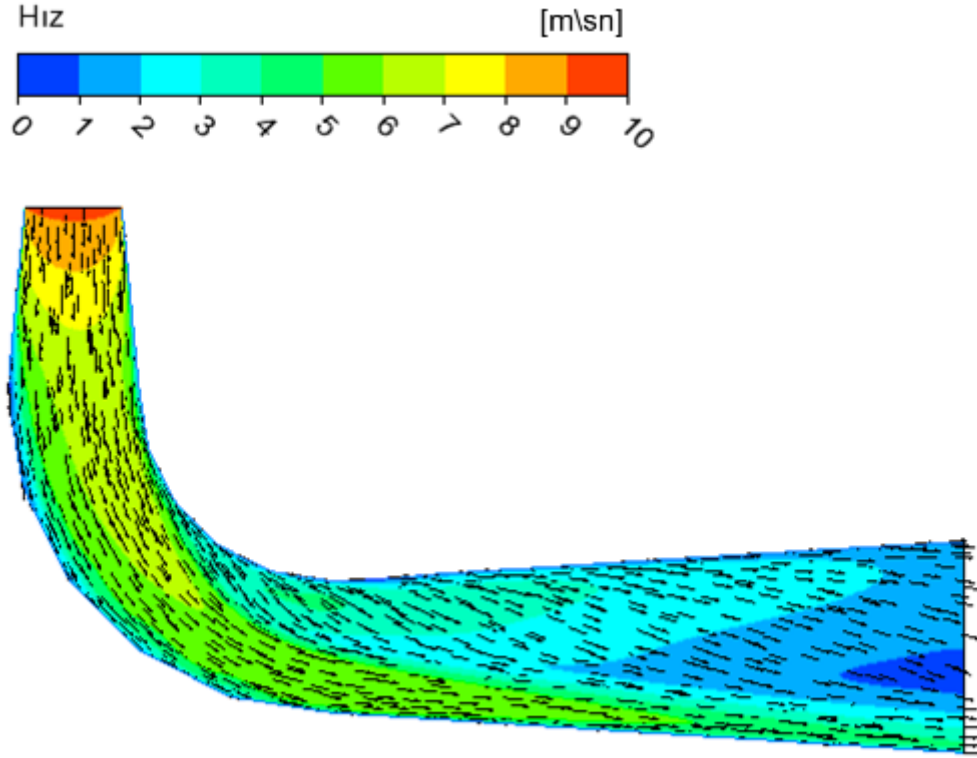


Şekil 3.4 : Emme borusu simetri düzlemindeki basınç dağılımı.



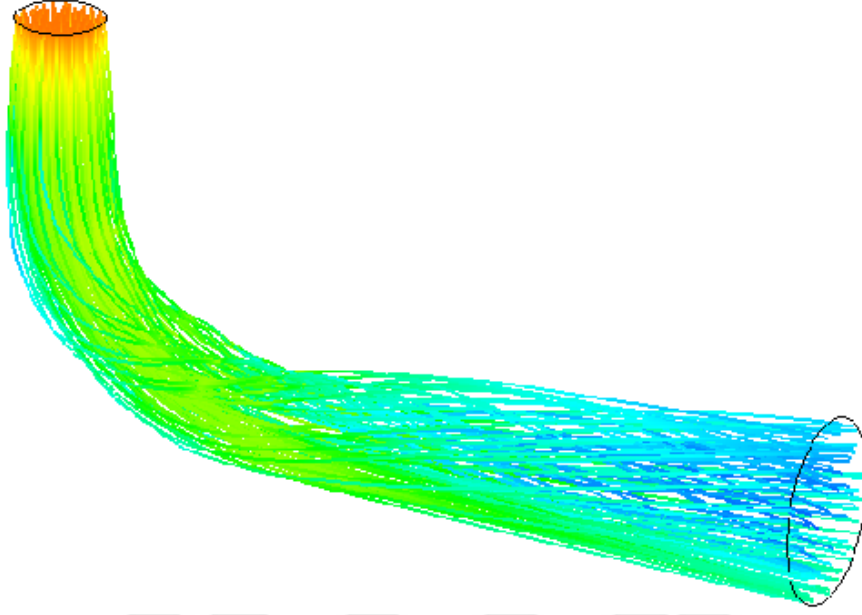
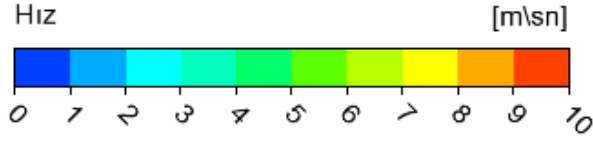
Şekil 3.5 : Emme borusu boyunca basınç dağılımı.

Şekil 3.6'da verilen akış çizgileri incelendiğinde akış hızının dolayısıyla kinetik enerjisinin emme borusu boyunca azaldığı ve akışın duvarları tam olarak sardığı görülmektedir.



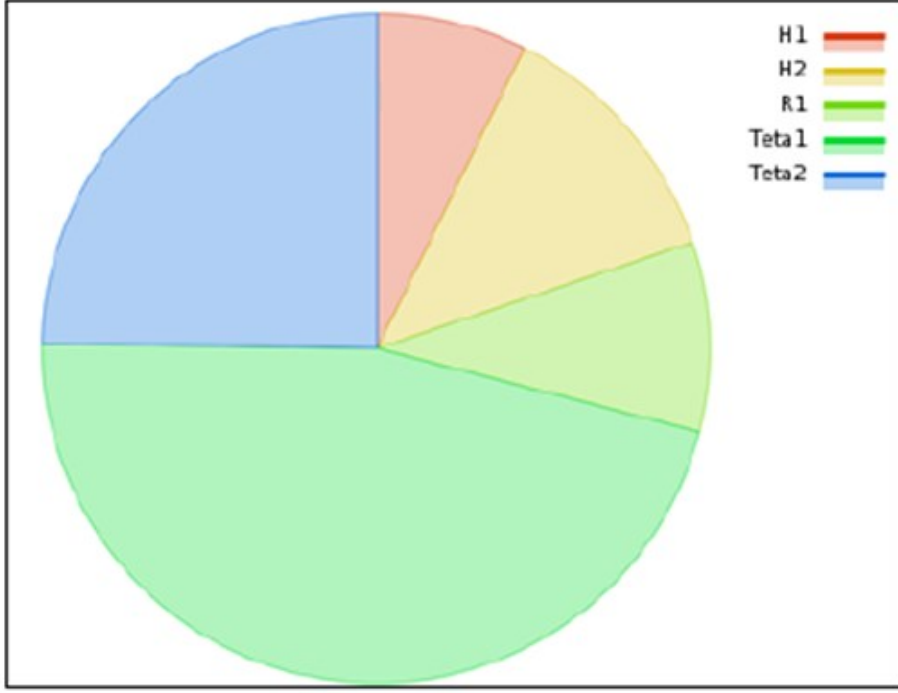
Şekil 3.6 : Emme borusu simetri düzlemindeki hız dağılımı ve vektörleri.

Emme borusu içerisinde oluşan üç boyutlu akış Şekil 3.7'de verilmiştir. Girişte akışın emme borusuna dik olarak girdiği ve dirsek kısmından sonra çevrıntili bir akış oluşturarak duvarlara yapıştığı böylelikle sınır tabaka ayrılmaları ve akışta geri dönüşlerin oluşmadığı görülmektedir.

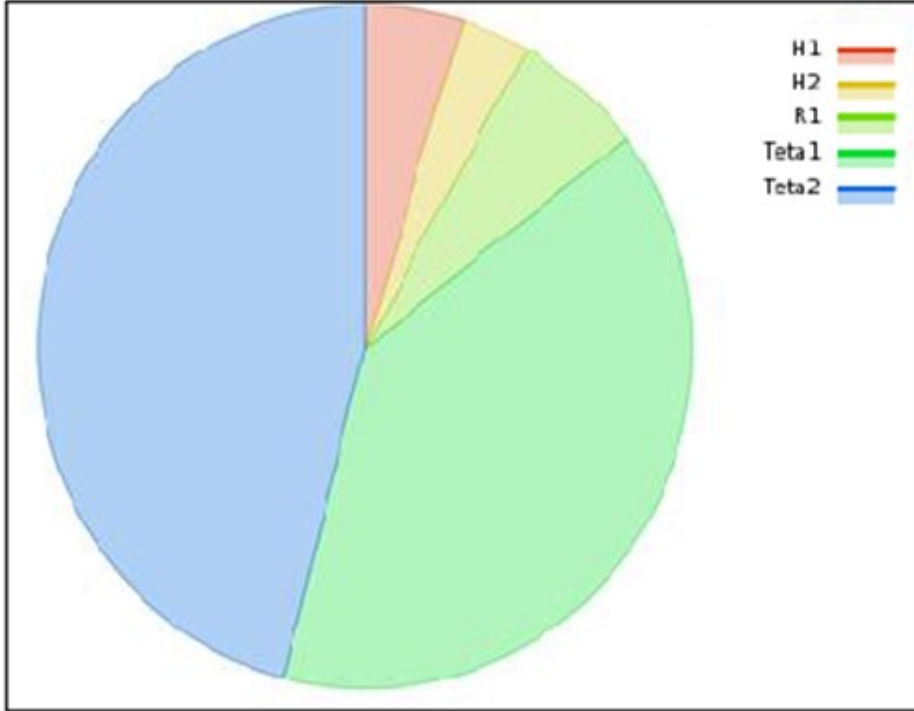


Şekil 3.7 : Emme borusu boyunca akış çizgileri.

Bu çalışmada son olarak hem basınç geri kazanım katsayısına hem de düşü kaybına tasarım parametrelerinin etkileri gözlemlemek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. En iyi sonucu veren yöntem için duyarlılık analizi sonuçları yuvarlak diyagram olarak Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görülmektedir. Şekiller incelendiğinde koniklik açısının (θ_1) hem düşü farkına hem de basınç geri dönüşüm katsayısına en çok etki eden parametre ve difüzör açısının (θ_2) ise ikinci en etkili parametre olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8 : Emme borusu basınç geri kazanım katsayısına tasarım parametrelerinin duyarlılığı.



Şekil 3.9 : Emme borusu düşü farkına tasarım parametrelerinin duyarlılığı.

3.4 Tasarım Eniyilemesi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

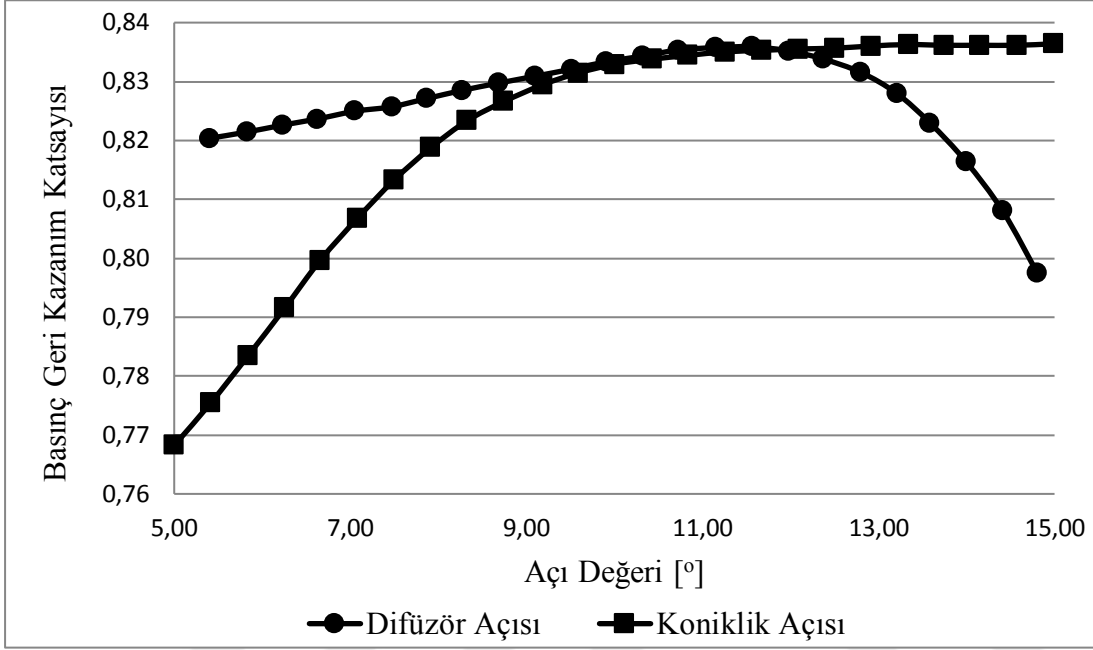
Bu çalışmada basınç geri kazanım oranı (c_p) 0,813 olan iyi bir tasarım olarak nitelendirilen başlangıç tasarımı için yapılan eniyileme çalışmasında basınç geri dönüşüm katsayısında % 4,3 ve düşü kaybında ise % 20 eniyileme gerçekleşmiştir.

Eniyilenmiş tasarımın akış analizi sonuçları incelendiğinde; emme borusu boyunca statik basınç atmosferik basınca yükseltilmiş, akış hızı ve kinetik enerji emme borusu boyunca azaltılmış ve çıkışta neredeyse sıfır olarak elde edilmiştir. Bu durum eğer potansiyel enerji değişimini yoksayarsak Bernoulli denkleminde de uygun olduğu görülmektedir (Şekil 3.4 - 3.7). Emme borusunda özellikle dirsek kısmında, akış çok fazla yavaşladığından dolayı ayrılmalar meydana gelmektedir. Bu durum genellikle emme borusunun giriş kısmı ve dirsek kısmında akışın teğetsel bileşeninden dolayı oluşmakta ve oluşan akış ayrılmaları ve geri dönüşler bu kısımlarda ve daha ileri bölgelerde girdapların oluşmasına sebep olmaktadır. Fakat Şekil 3.6 ve 3.7'den de görüldüğü gibi en iyilenmiş tasarımda akış ayrılmaları bulunmamaktadır. Bu konfigürasyonun, emme borusu gereksinimlerini sağladığını göstermektedir.

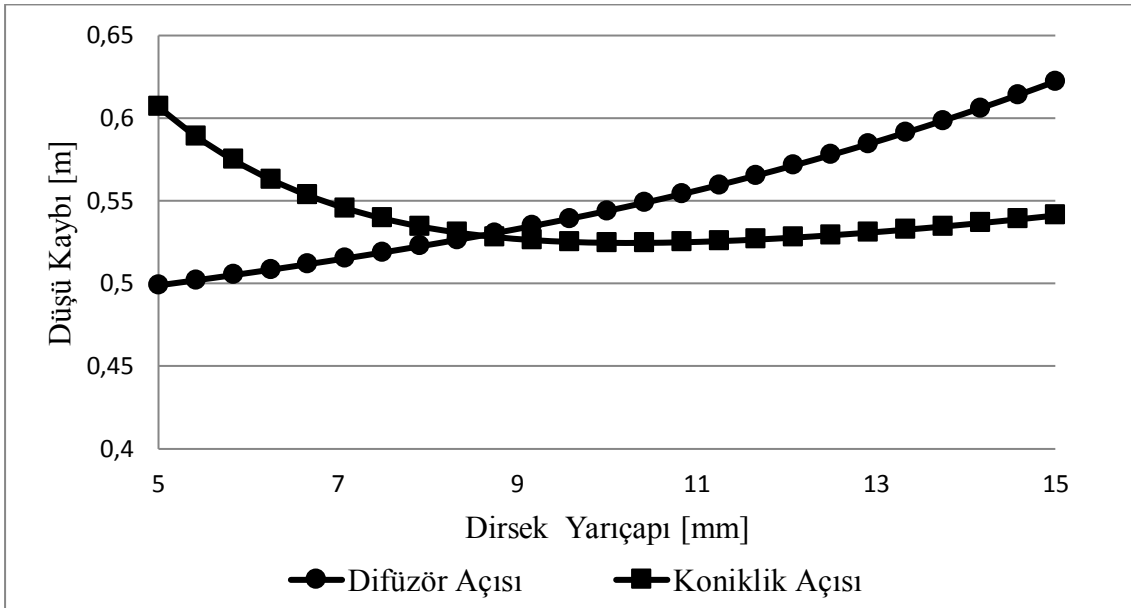
Tasarım parametrelerindeki değişimler incelendiğinde difüzör açısında (θ_2) önemli bir değişim olmadığı görülmektedir. Eniyileme sonucunda koniklik açısı (θ_1) % 10 azalırken konik kısmın uzunluğunun (H_1), difüzör uzunluğunun (H_2) ve dirsek yarıçapının (R) arttığı görülmektedir. Emme borusunun büyümesine rağmen düşü farkı azalmıştır.

Tasarım parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 3.10-3.17 görülmektedir. Emme borusu konik kısmının ve difüzör kısmın açısı ayarlanarak akış ayrılmaları ve girdap oluşumları engellenebilmektedir. Konik kısmın açısı kritik bir açı olup çok arttırıldığı takdirde ters basınç gradyanları oluşurken, açı olması gerektiğinden az olduğunsa ise akışın hızı yeterince yavaşlatılamamakta ve akış dirsek kısma yüksek hızlarla girmektedir ki bu da sürtünme kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Dolayısı ile bu açının her bir tasarımda optimum değerini belirlemek önem arz etmektedir. Şekil 3.10 ve 3.11 incelendiğinde basınç geri kazanım katsayısı için bu kritik açının yaklaşık 11° olduğu ve düşü kaybı içinse yaklaşık 9° olduğu gözlemlenmektedir.

Difüzör açısının (θ_2) değişimin basınç geri kazanım katsayısına (c_p) ve düşü kaybına (ΔH) etkisi (Şekil 3.10 ve 3.11) incelenirse; difüzör açısının artmasıyla yine yaklaşık 11° 'ye kadar basınç geri kazanımı artmakta ancak daha yüksek açılarda akış ayrılmalarının artmasıyla basınç geri kazanımında hızlı bir düşüş olmaktadır. Düşü kaybında ise difüzör açısının artması düşü kaybını arttırmaktadır.

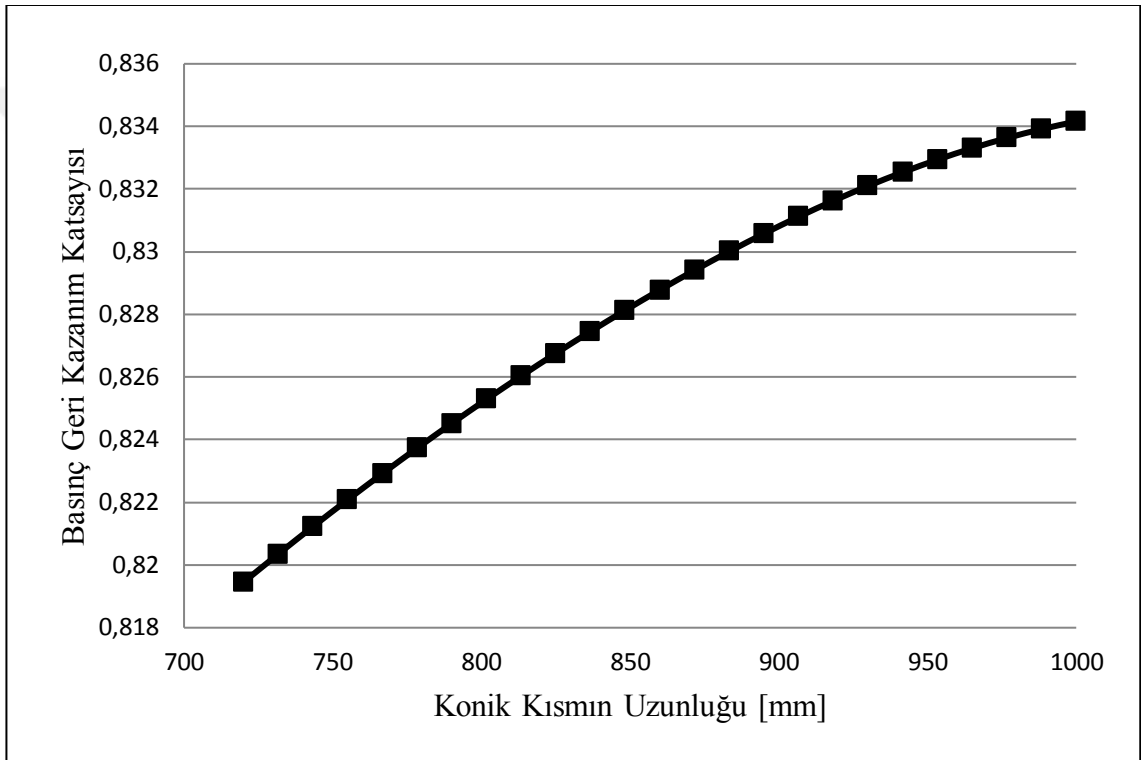


Şekil 3.10 : Basınç geri kazanım katsayısının difüzör ve koniklik açısıyla değişimi.

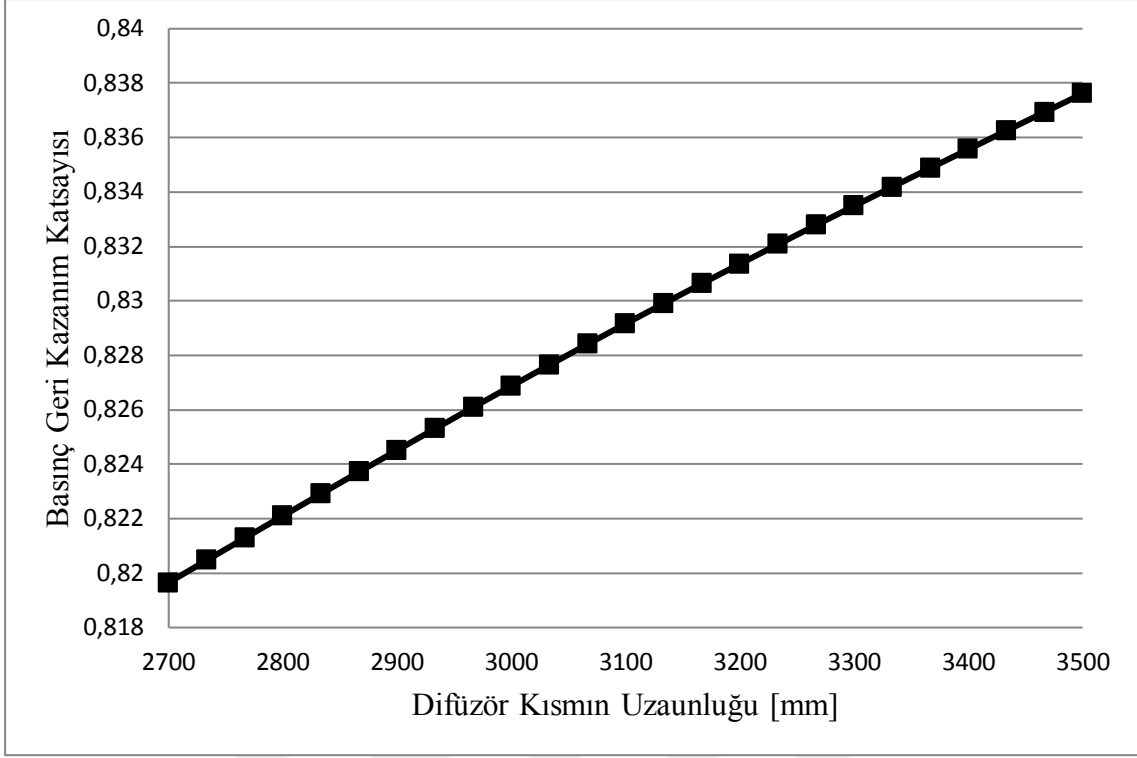


Şekil 3.11 : Düşü Kaybının difüzör ve koniklik açısıyla değişimi.

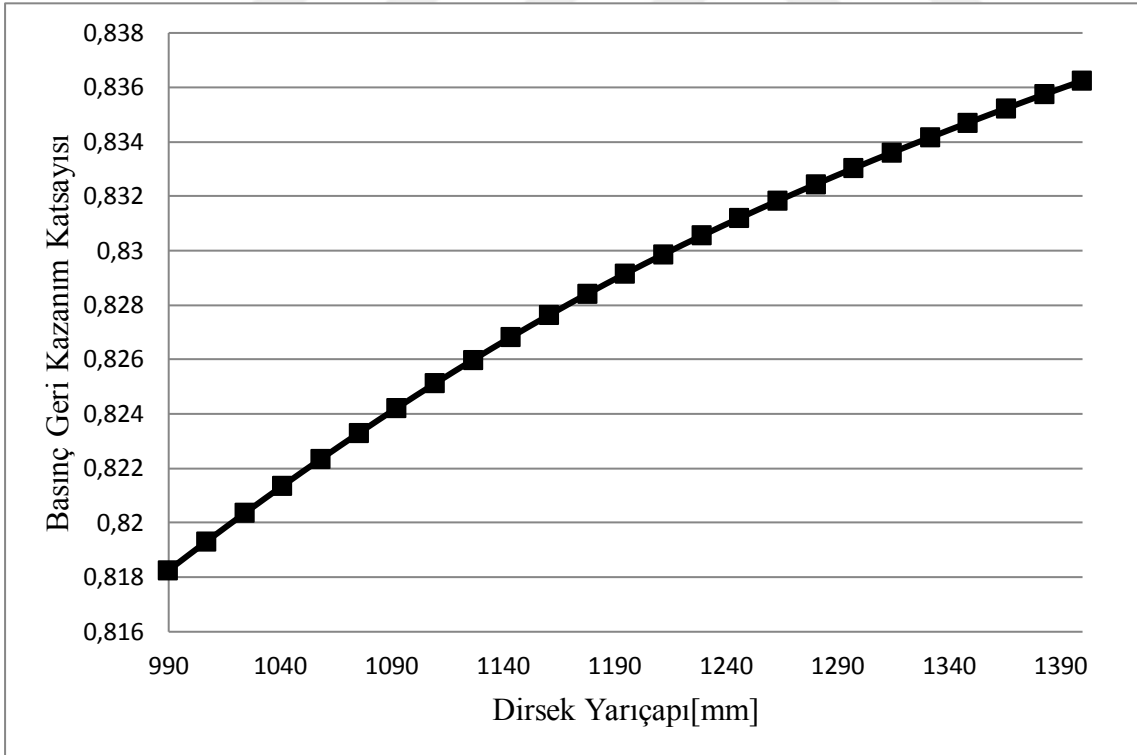
Emme borusundaki uzunlukları değiştiren konik kısım uzunluğu (H_1), difüzör kısım uzunluğu (H_2) ve dirsek yarıçapı (R) parametrelerindeki artışın basınç geri kazanımını da artırdığı Şekil 3.12, 3.13 ve 3.14'te verilen grafiklerde görölmektedir. Emme borusundaki boyutların artmasının akışın alacağı yolu uzatmasını böylelikle de çark çıkışındaki hızın daha çok azalmasını mümkün kılmaktadır. Emme borusunun girişi ile çıkışı arasındaki basınç farkı artmakta dolayısıyla basınç geri kazanım oranı da artmaktadır. Fakat dirsek kısmının köşelerinde ani oluşan hız değişimlerinin sürtünme kayıplarını arttırdığı görölmektedir. Yani emme borusu kesit alanının artırılması ve bu artışlar arasındaki geçişin düzgün olmasına önem vermek gerekmektedir.



Şekil 3.12 : Konik kısım uzunluğunun basınç geri kazanım katsayısına etkisi.

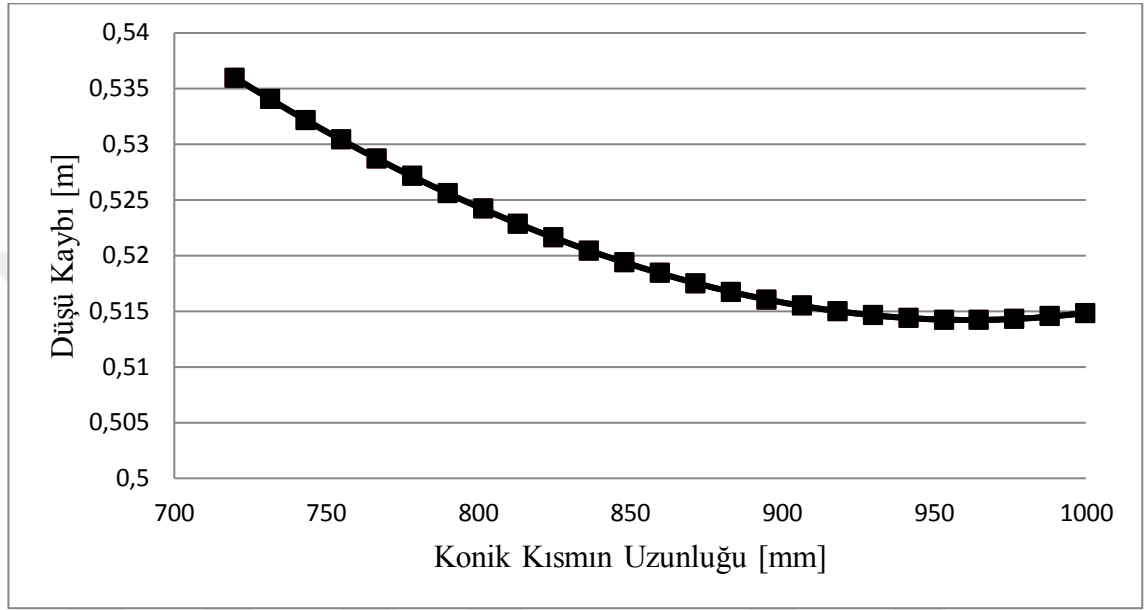


Şekil 3.13 : Difüzör kısmın uzunluğunun basınç geri kazanım katsayısına etkisi.

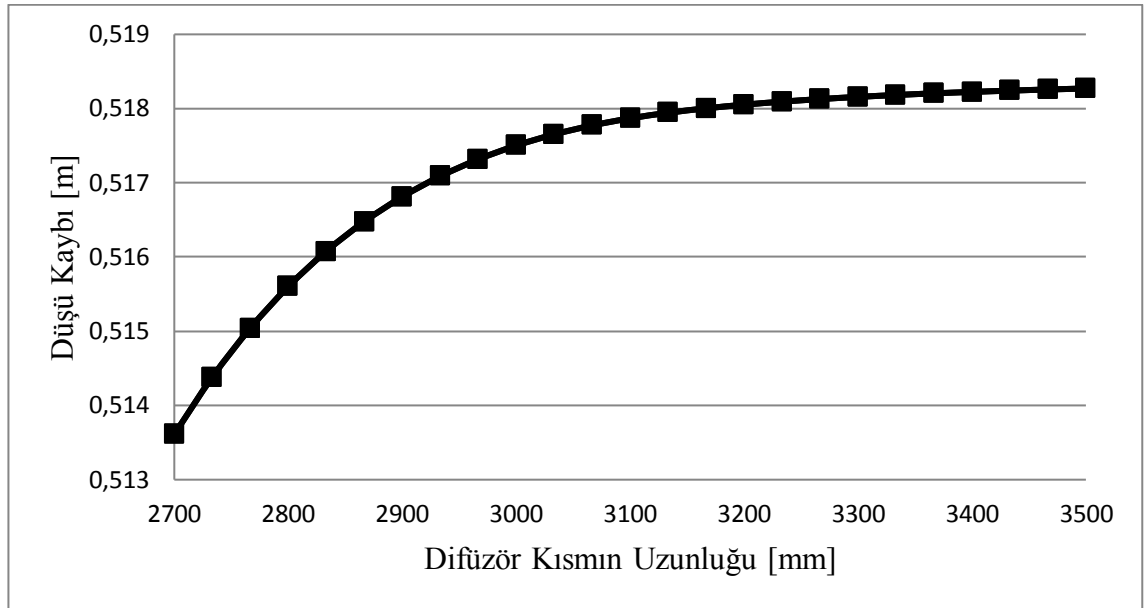


Şekil 3.14 : Dirsek yarıçapının basınç geri kazanım katsayısına etkisi.

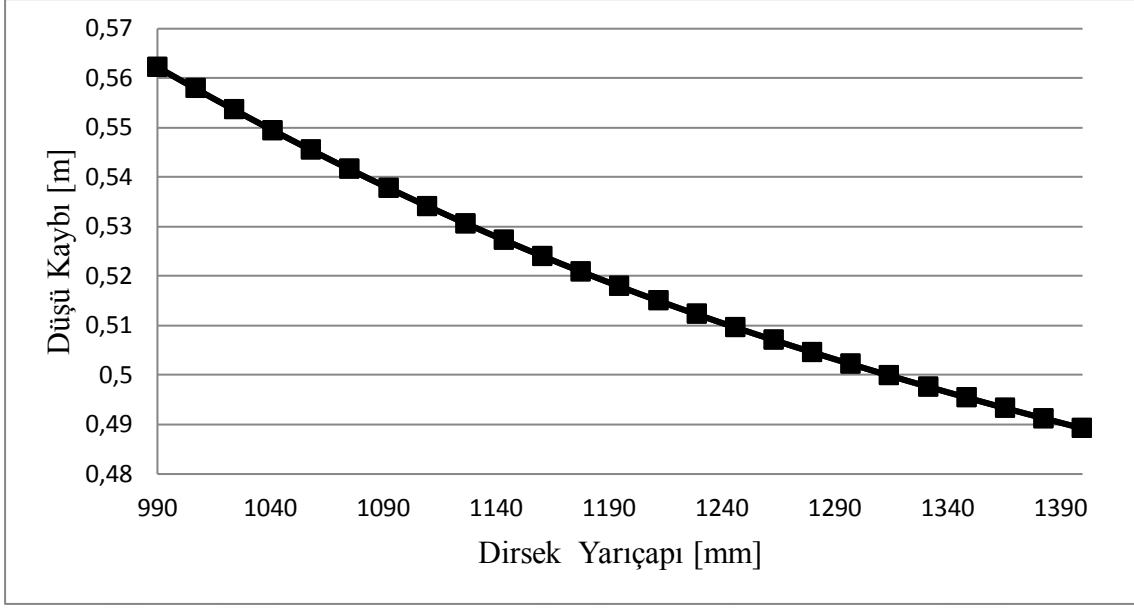
Emme borusundaki uzunlukların (H_1 , H_2 ve R) değişiminin dūşü kaybına etkisi Şekil 3.16, 3.17 ve 3.18’de verilen grafiklerde görülmektedir. Konik kısmın uzunluğunun artması dūşü kaybını bir noktaya kadar azaltırken daha sonra uzunluk artsa da kayıpta değişiklik olmamaktadır. Difüzör uzunluğunun artması ile kayıplar önce arttırmakta daha sonra sabit kalmaktadır. Dirsek yarıçapının arttırılması ise kayıpları azaltmaktadır.



Şekil 3.15 : Konik kısmın uzunluğunun dūşü kaybına etkisi.

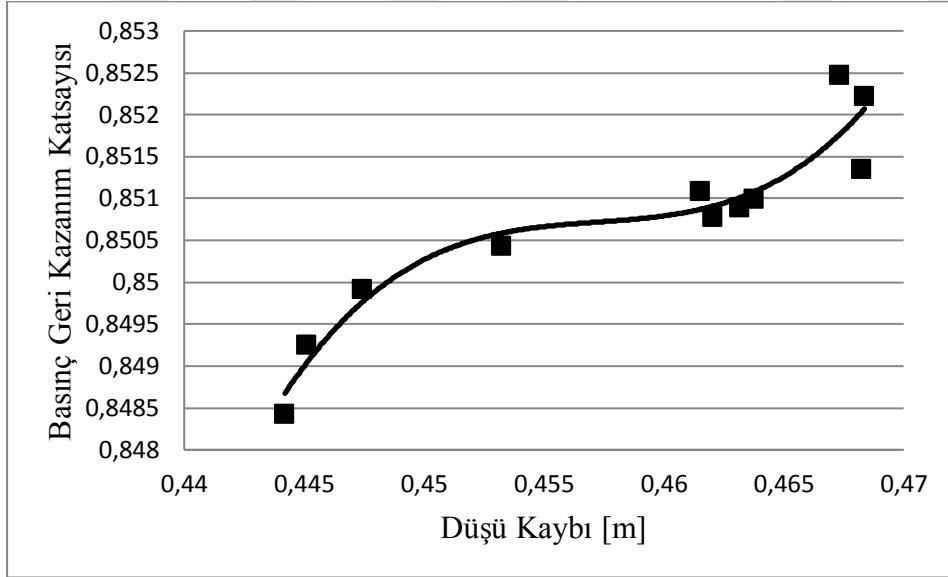


Şekil 3.16 : Difüzör kısmın uzunluğunun dūşü kaybına etkisi.



Şekil 3.17 : Dirsek yarıçapının düşü kaybına etkisi.

Hothersall [12] çalışmasında suyun emme borusundan çıktığı yüzeyi arttırmak ve kinetik enerji kayıplarını azaltmak için difüzör kısmın uzunluğunu arttırmaktadır. Fakat bu uzunluğun artırılması Şekil 3.16’da da görüldüğü üzere beklenenin aksine akışta ayrılmalara ve daha çok kayıplara yol açmaktadır.



Şekil 3.19 : Amaç fonksiyonları arasındaki Pareto sınırı.

Eniyileme problemindeki amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşmeyi gösteren Pareto sınırı Şekil 3.19’da verilmektedir. Buradan da görüldüğü üzere basınç geri kazanım katsayısının artmasıyla düşü farkının da arttığı gözlenmektedir. Pareto sınırı incelendiğinde düşü farkından ödün verilerek basınç geri kazanım oranının

artırılabilceği görülmektedir. Son olarak, yapılan duyarlılık analizi çalışmasında amaç fonksiyonlarına en çok etki eden iki parametredeki (koniklik açısı ve difüzör açısı) değişimin çok fazla olmaması başlangıç tasarımındaki eniyilemenin az olmasının nedeni olarak yorumlanabilir.





4. BASINÇ GERİ KAZANIM KATSAYISININ REGRESYON DENKLEMİYLE İFADE EDİLMESİ

Emme borusunda oluşan basınç farkına etki eden parametreler bir önceki bölümün de yardımıyla belirlenerek belirli sınırlar çerçevesinde HAD tabanlı bir regresyon modeli oluşturulabilmektedir. Çoğu gerçek uygulamada olduğu gibi gerçek yanıt fonksiyonu tam anlamıyla bilinmediğinden dolayı regresyon modelleme sayesinde yaklaşık bir yanıt fonksiyonu elde edilebilir ve bu yanıt fonksiyonu üzerinden eniyileme metotları uygulanabilir.

Bunun için öncelikle parametreler seçilip boyut analizi yapılarak boyutsuzlaştırmakta ve parametrelerin birbirleriyle bağımlı olmadıklarından emin olmak içinde korelasyon analizi yapılmaktadır. Daha sonra boyutsuz parametrelerin alt ve üst sınırları belirlenmekte ve sınırlar dahilinde veri seti oluşturulmaktadır. Oluşturulan veri seti kullanılarak çok değişkenli regresyon modelleri kurulmakta ve bu modellerin doğrulukları hata oranlarına bakılarak karşılaştırılmaktadır. Son olarak elde edilen model üzerinde Matlab [60] kullanılarak bir optimizasyon kodu hazırlanmıştır.

4.1 Basınç Farkına Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi

Yapılan eniyileme çalışması da göz önüne alınarak emme borusunun performansını belirten basınç geri kazanımı katsayısına etki eden parametreler; geometri parametreleri, emme borusuna giren suyun hızı, akış parametreleri ve yüzey pürüzlülüğü olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelerden geometri parametreleri, girişteki suyun hızı, akış parametreleri ve yüzey pürüzlülüğü bağımsız değişken olarak seçilirken basınç geri kazanım katsayısı bağımlı değişken olarak belirlenmiştir. Parametreler belirlendikten sonra boyutsuz hale getirilerek regresyon modeli oluşturulmuştur.

4.2 Boyut Analizi

Boyutsal analiz birçok farklı sistemde özellikle hidrolik alanında tahminleme için kullanılan matematiksel modellerin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Herhangi bir fiziksel sistemi etkileyen değişkenler bağımlı veya bağımsız olarak gruplandırıldıktan sonra boyutsuz terimlere (π terimlerine) indirgenir böylelikle tüm değişkenler birimsiz hale getirilir. Bağımlı terimlerin bağımsız terimler cinsinden ifade edilmesi boyutsal analiz yapıldıktan sonra daha kolaylaşır [3].

Boyutsal analiz yöntemi kullanılarak birim uzunluktaki basınç farkını boyutsuz parametreler cinsinden ifade edebilmektedir. Boyutsal analiz yapılırken Buckingham Pi Teoreminden yararlanılmaktadır. Bu teoreme öncelikle Çizelge 4.1’de verildiği gibi değişkenler belirlenmelidir.

Çizelge 4.1 : Emme borusundaki basınç farkına etki eden değişkenler.

Değişken Tipi	Sembol	Değişken Tanımı	Boyut	Birim
Bağımlı	ΔP	Basınç Farkı	FL^2	$[Nm^2]$
Bağımsız	D_2	Emme Borusu Girişi Çapı	L	[m]
	H_1	Konik Kısımın Uzunluğu	L	[m]
	θ_1	Koniklik Açısı	-	$[^\circ]$
	H_2	Difüzör Uzunluğu	L	[m]
	θ_2	Difüzör Açısı	-	$[^\circ]$
	R	Dirsek Yarıçapı	L	[m]
	V	Emme Borusu Girişindeki Akışın Hızı	LT^{-1}	$[ms^{-1}]$
	μ	Dinamik Viskozite	$FL^{-2}T$	$[Nm^{-2}s]$
	ρ	Suyun Yoğunluğu	$FL^{-4}T^2$	$[Nm^{-4}s^2]$
ε	Yüzey Pürüzlülüğü	L	[m]	

Çizelge 4.1’den görüldüğü üzere sistemi tanımlamak için toplam onbir adet değişken seçilmiştir ve bu değişkenlerin boyut ve birimleri belirtilmiştir. Boyut analizi

yapabilmek için bu değişkenlerden her bir boyutu temsilen üç referans değişken seçilecektir. Siervo ve Leva'nın [19] çalışmasından yararlanarak çark girişindeki hızı ve çark giriş çapını referans değişken olarak seçilmiştir. Diğer değişken ise akış özelliklerinden belirlenmiştir. Aşağıda seçilen değişkenler basınç farkının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

$$\Delta p = f(D_2, H_1, \theta_1, H_2, \theta_2, R, V, \mu, \rho, \varepsilon)$$

Her bir parametre bir boyutu temsil edecek şekilde referans değişkenler; D_1 [L], V [LT^{-1}] ve ρ [$FL^{-4}T^2$] olarak seçildikten sonra boyutsuz π terimleri aşağıda verildiği gibi elde edilmektedir.

$$C_p = \frac{P_{out} - P_{in}}{\frac{1}{2}\rho V^2} = f\left(\frac{H_1}{D_2}, \frac{H_2}{D_2}, \frac{R}{D_2}, \theta_1, \theta_2, Re, \frac{\varepsilon}{D_2}\right)$$

Boyut analizinden sonra bağımsız değişkenler arasındaki ilişki olup olmadığını görmek için korelasyon analizi EXCEL [61] yardımıyla yapılmıştır. 70 adet veri üzerinde yapılan korelasyon analizi sonuçları Ek 2.1'deki gibi elde edilmiştir. Bu çizelgeden de görüldüğü üzere korelasyon katsayısı değerleri sıfıra oldukça yakındır. Sıfıra yakın oldukları için değişkenlerin birbirleriyle ilişkisi yok denebilmektedir, yani değişkenler birbirlerinden bağımsızdır ve regresyon denklemi oluşturulurken ayrıca birleştirilmesine gerek yoktur.

4.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Çalışmaları

Tüm değişkenler tanımlanıp boyutsuzlaştırıldıktan sonra HAD tabanlı bir veri seti oluşturulmak istenmektedir. Öncelikle veri setinin limitleri yani oluşturulacak regresyon modelin geçerlilik sınırları belirlenmelidir. Bu amaçla Gubin [14] ve Prasad'ın [11] çalışmalarından yararlanılarak oluşturulacak modelin geçerlilik sınırları Çizelge 4.3'de verildiği gibi seçilmiştir.

Çizelge 4.2 : Oluşturulacak modelin geçerlilik sınırları.

Boyutsuz Parametreler	Alt Limit	Üst Limit
$\frac{H_1}{D_2}$	0,8	2,5
$\frac{H_2}{D_2}$	3	9,5
$\frac{R}{D_2}$	1	3,5
θ_1	5	15
θ_2	5	15
Re	10^6	10^7
$\frac{\varepsilon}{D_2}$	10^{-5}	10^{-4}

Bu sınırlar dahilinde bir önceki bölümden de yararlanarak Latin Hiperküp Örneklem metoduyla yine değişken sayısının 10 katı sayıda Ek 2.2’de verildiği gibi 70 adet tasarım noktası oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setindeki tüm noktalarda yapılan analizlerde yine bir önceki bölümde kullanılan çözüm ağı topolojisi, akış ve çözücü özellikleri kullanılmıştır.

4.4 Regresyon Denkleminin Elde Edilmesi

Regresyon denklemleri genellikle düşük dereceli polinomlarla ifade edilebilirler ve birçok durumda 1. ya da 2. dereceden modeller kullanılmaktadır. Özellikle 2. dereceden polinomsal regresyon modeli esnek, kolay ve parametreleri tahminlemesi iyi olduğundan tercih edilmektedir. Basınç geri kazanımını matematiksel olarak ifade etmek için bir önceki bölümden de yararlanarak sadece ikinci dereceden polinom yaklaşımı kullanılmıştır. Oluşturulacak model MATLAB [60] regresyon modeli oluşturma yardımıyla elde edilmiştir.

$$y = \hat{y} + \epsilon \quad (4.1)$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^N \sum_{j=1}^N \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^N \beta_{ii} X_i X_i, \quad i, j = 1, \dots, N \quad (4.2)$$

Denklem 4.1’de tahmin ile gerçek değer arasında ϵ kadar bir hata olmaktadır. Bu hata yanıtı etkileyen fakat yanıt fonksiyonu içerisinde değerlendirilmeyen değişkenlik kaynaklarını, hata terimleri, etkisi bilinmeyen parametreleri, sistemin veya sürecin içsel değişkenliklerini temsil etmektedir. Denklem 4.2’de ise regresyon (tahmin) modeli olarak kullanılacak ikinci dereceden polinomsal regresyon modeli verilmektedir. Bu modelde y gerçek değeri, \hat{y} tahmin edilen değeri, β değerleri regresyon katsayılarını, X_i terimleri ise bağımsız değişkenleri temsil etmektedir.

Regresyon modeli oluşturmadan önce Ek 2.2’de verilen veriler Matlab’a aktarılmış ve tanıtılmıştır. Daha sonra Ek 3’de verilen kısa kod yardımıyla regresyon katsayıları, hata oranları, doğrulama noktaları ve doğrulama sonucu oluşan hatalar elde edilmiştir.

Oluşturulacak regresyon modelinde kullanılan verilerden Re ve $\frac{\epsilon}{D_2}$ için olan değerlerin diğer parametrelerin değerlerinden 5-6 merteye farklı olduğu Ek 2.2’de görülmektedir. Bundan dolayı bu parametrelerin regresyon katsayılarının da diğer katsayılardan merteye olarak çok farklı olacağı tahmin edilmektedir. Bunu önlemek, regresyonun doğruluk derecesini arttırmak ve hataları daha aza indirmek için ilk regresyon modeline ek olarak Re ve $\frac{\epsilon}{D_2}$ için veri dönüştürme kullanılmıştır. Logaritmik dönüşüm, karekök, kare, $1/y$ ve logit dönüşümleri veri dönüştürmede kullanılan bazı basit metotlardandır [62]. Bu çalışmada logaritmik dönüşüm yaklaşımı ile ilk modelin revize edilmesi gerekmektedir. Logaritmik dönüşümde, veriler 10 tabanına göre yapılmıştır.

Böylelikle Re ve $\frac{\varepsilon}{D_2}$ parametrelerinin logaritması alınarak oluşturulacak yeni veri seti üzerinde ikinci dereceden polinomsal regresyon denklemini, basınç geri kazanımını ifade etmek için kullanmak daha doğru olacaktır. Bu iki parametrenin logaritmik olarak kullanılmadığı model, regresyon modeli 1 olarak tanımlanırken, logaritmik olarak kullanıldığı regresyon modeli ise regresyon modeli 2 olarak tanımlanmıştır. Bu iki modelde kullanılacak ve Denklem 4.2’de yer alacak parametreler için kullanılan gösterim indisleri Çizelge 4.3’te yer almaktadır.

Çizelge 4.3 : Boyutsuz parametrelerin gösterim indisleri.

Gösterim indisleri	X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
Boyutsuz Parametreler	Regresyon modeli 1	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	Re	$\frac{\varepsilon}{D_2}$
	Regresyon modeli 2	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	$\log(Re)$	$\log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right)$

Çizelge 4.3’teki parametreler kullanılarak basınç geri kazanım katsayısını ifade etmek için oluşturulan regresyon denklemlerinden model 1 Denklem 4.3’te ve logaritmik dönüşüm uygulanarak elde edilen model 2 Denklem 4.4’te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
C_p = & -2,64804 * 10^{-1} + 2,59210 * 10^{-1} * \frac{H_1}{D_2} + 6,08059 * 10^{-2} * \frac{H_2}{D_2} \quad (4.3) \\
& + 1,81588 * 10^{-1} * \frac{R}{D_2} + 6,52905 * 10^{-2} * \theta_1 - 6,94084 \\
& * 10^{-4} * \theta_2 + 7,85441 * 10^{-9} * Re - 1,40116 * 10^{+3} \\
& * \frac{\varepsilon}{D_2} + 7,91587 * 10^{-4} * \frac{H_1 H_2}{D_2 D_2} - 1,22405 * 10^{-2} * \frac{H_1 R}{D_2 D_2} \\
& - 1,33463 * 10^{-2} * \frac{H_1}{D_2} \theta_1 + 9,67152 * 10^{-3} * \frac{H_1}{D_2} \theta_2 \\
& + 3,63762 * 10^{-9} * \frac{H_1}{D_2} Re + 2,58107 * 10^{+1} * \frac{H_1 \varepsilon}{D_2 D_2} \\
& - 2,40994 * 10^{-3} * \frac{H_2 R}{D_2 D_2} - 1,73122 * 10^{-3} * \frac{H_2}{D_2} \theta_1 \\
& - 2,81949 * 10^{-3} * \frac{H_2}{D_2} \theta_2 - 5,99250 * 10^{-10} * \frac{H_2}{D_2} Re \\
& + 2,73720 * 10^{+1} * \frac{H_2 \varepsilon}{D_2 D_2} - 2,79582 * 10^{-3} * \frac{R}{D_2} \theta_1 \\
& + 6,08363 * 10^{-3} * \frac{R}{D_2} \theta_2 + 2,62219 * 10^{-9} * \frac{R}{D_2} Re \\
& - 2,42891 * \frac{R \varepsilon}{D_2 D_2} + 2,66191 * 10^{-3} * \theta_1 \theta_2 - 6,50755 \\
& * 10^{-10} * \theta_1 Re + 1,14566 * 10^{+1} * \theta_1 \frac{\varepsilon}{D_2} - 4,14693 \\
& * 10^{-10} * \theta_2 Re - 5,93925 * 10^{+1} * \theta_2 \frac{\varepsilon}{D_2} + 3,39593 \\
& * 10^{-5} * Re \frac{\varepsilon}{D_2} - 4,44130 * 10^{-2} * \left(\frac{H_1}{D_2}\right)^2 + 4,69054 \\
& * 10^{-5} * \left(\frac{H_2}{D_2}\right)^2 - 3,27520 * 10^{-2} * \left(\frac{R}{D_2}\right)^2 - 1,89007 \\
& * 10^{-3} * (\theta_1)^2 - 1,99237 * 10^{-3} * (\theta_2)^2 - 5,01090 \\
& * 10^{-16} * (Re)^2 + 9,78194 * 10^{+6} * \left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right)^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_p = & -4,34644 + 1,13194 * 10^{-1} * \frac{H_1}{D_2} + 1,32560 * 10^{-1} * \frac{H_2}{D_2} & (4.4) \\
& - 1,45048 * 10^{-3} * \frac{R}{D_2} + 9,47621 * 10^{-2} * \theta_1 + 2,65946 \\
& * 10^{-2} * \theta_2 + 1,25141 * \log(\text{Re}) + 1,96984 * 10^{-1} \\
& * \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) + 1,97427 * 10^{-3} * \frac{H_1 H_2}{D_2 D_2} - 3,38909 * 10^{-3} \\
& * \frac{H_1 R}{D_2 D_2} - 1,30213 * 10^{-2} * \frac{H_1}{D_2} \theta_1 + 1,04984 * 10^{-2} \\
& * \frac{H_1}{D_2} \theta_2 + 1,84386 * 10^{-2} * \frac{H_1}{D_2} \log(\text{Re}) - 4,69650 * 10^{-3} \\
& * \frac{H_1}{D_2} \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) - 2,40159 * 10^{-3} * \frac{H_2 R}{D_2 D_2} - 2,14739 \\
& * 10^{-3} * \frac{H_2}{D_2} \theta_1 - 2,86829 * 10^{-3} * \frac{H_2}{D_2} \theta_2 - 6,75587 \\
& * 10^{-3} * \frac{H_2}{D_2} \log(\text{Re}) + 7,28020 * 10^{-3} * \frac{H_2}{D_2} \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) \\
& - 3,10765 * 10^{-3} * \frac{R}{D_2} \theta_1 + 6,25780 * 10^{-3} * \frac{R}{D_2} \theta_2 \\
& + 2,78799 * 10^{-2} * \frac{R}{D_2} \log(\text{Re}) - 4,28271 * 10^{-3} \\
& * \frac{R}{D_2} \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) + 2,72284 * 10^{-3} * \theta_1 \theta_2 - 4,84578 * 10^{-3} \\
& * \theta_1 \log(\text{Re}) - 9,02891 * 10^{-3} * \theta_1 \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) - 1,05095 \\
& * 10^{-2} * \theta_2 \log(\text{Re}) - 8,86108 * 10^{-3} * \theta_2 \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) \\
& + 2,71011 * 10^{-2} * \log(\text{Re}) \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) - 4,87378 * 10^{-2} \\
& * \left(\frac{H_1}{D_2}\right)^2 - 9,02891 * 10^{-4} * \left(\frac{H_2}{D_2}\right)^2 - 1,05095 * 10^{-2} \\
& * \left(\frac{R}{D_2}\right)^2 - 8,86108 * 10^{-3} * (\theta_1)^2 + 2,71011 * 10^{-2} \\
& * (\theta_2)^2 - 4,87378 * 10^{-2} * (\log(\text{Re}))^2 + 4,80682 * 10^{-4} \\
& * \left(\log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right)\right)^2
\end{aligned}$$

4.5 Regresyon Denkleminin Doğrulanması

Elde edilen matematiksel modelin ne kadar iyi yanıt verdiğini görmek amacıyla doğrulama çalışması gerçekleştirilmektedir. Doğrulama çalışması için öncelikle modeli oluşturmak için kullanılan HAD analiz noktaları dışında modelin geçerlilik sınırları dahilinde rasgele olarak oluşturulan 30 tane veri noktası Ek 2.3'te verilmiştir. Oluşturulan bu veri noktalarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Modelin doğruluğunu kontrol etmek için hem doğrulama noktalarında hem de veri noktalarında modelin tahminiyle HAD analizi sonucu arasındaki normalleştirilmiş hata oranları hesaplanmıştır. Normalleştirilen hatalar, aşağıda verilen ortalama karesel hatanın karekökü (RMSE), ortalama mutlak hatanın (MAE) yüzde maksimum mutlak hata denklemlerinde kullanılarak hata oranları hesaplanmıştır.

$$\text{Yüzde Maksimum Mutlak Hata} = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} * 100 \right\} \quad (4.5)$$

$$RMSE_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2}, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.6)$$

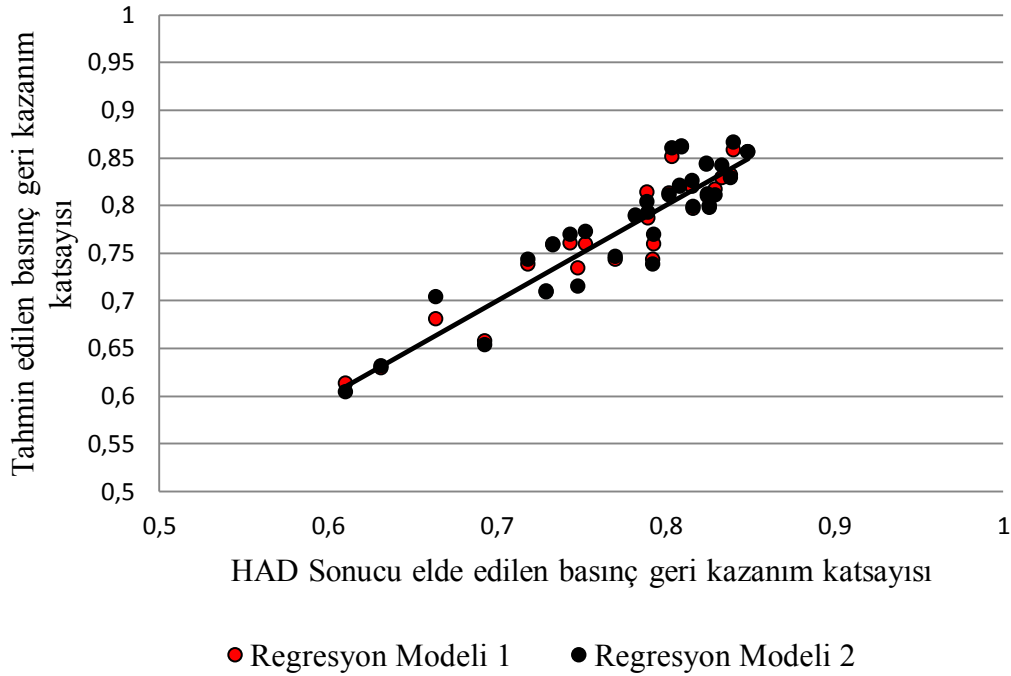
$$MAE_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.7)$$

N doğrulama noktası sayısını, y_i i. doğrulama noktasındaki HAD analizi sonucunu ve \hat{y}_i ise i. doğrulama noktasındaki regresyon modelinin tahminini belirtmektedir. Yukarıdaki denklemlere göre hata oranları EK 3'te bulunan kısa kod yardımıyla hesaplanmıştır ve Çizelge 4.4'te verilmektedir.

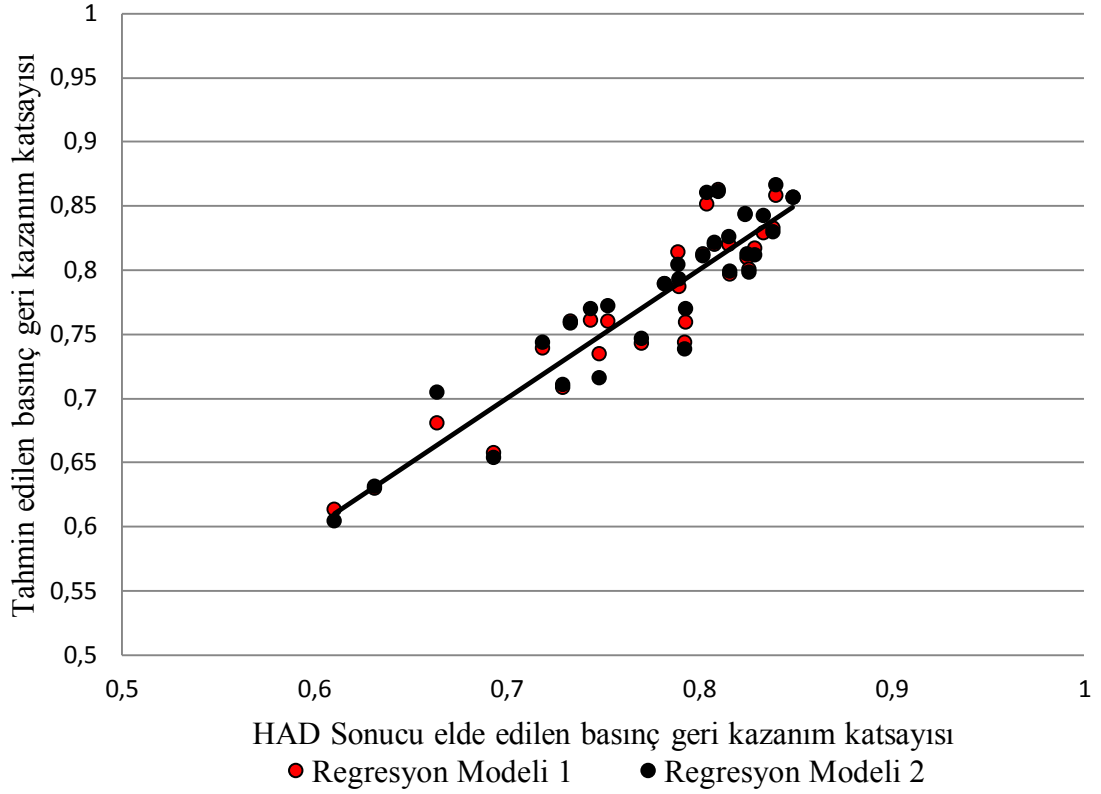
Çizelge 4.4 : Regresyon modellerinin hata oranları.

	Regresyon modeli 1		Regresyon modeli 2	
	Veri Noktalarında	Doğrulama Noktalarında	Veri Noktalarında	Doğrulama Noktalarında
Mak. Mutlak Hata [%]	7,9	6,6	7,9	7,0
RMSE	0,025	0,039	0,025	0,038
MAE	0,019	0,044	0,019	0,044

Çizelge 4.4'teki hata oranları gözlemlendiğinde oluşturulan model 1 ve 2'nin arasında çok fazla fark olmadığı görülmektedir. Bundan dolayı regresyon katsayılarının dereceleri birbirine yakın olduğundan 2. regresyon modelini kullanmak daha doğru olacaktır. Doğrulama ve veri noktaları için Şekil 4.1 ve 4.2'de, oluşturulan modellerin tahminleri ile HAD analizi sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 4.1 : Regresyon modeli 1 ve 2 kullanılarak veri noktalarında tahminlenen ile HAD analizi sonucu elde edilen basınç geri kazanım katsayılarının karşılaştırılması.



Şekil 4.2 : Regresyon modeli 1 ve 2 kullanılarak doğrulama noktalarında tahminlenen ile HAD analizi sonucu elde edilen basınç geri kazanım katsayılarının karşılaştırılması.

Bu şekilden de görüldüğü üzere ikinci dereceden polinomsal regresyon modelinin verdiği sonuçlar HAD sonuçlarına oldukça yakındır. Yani basınç geri kazanım katsayısının tahminlemesinde kullanılmak için geliştirilen matematiksel model, Çizelge 4.3’de verilen sınırlar çerçevesinde ve Çizelge 4.4’de bulunan tahmin hatalarıyla kullanılabilir. Elde edilen bu model sayesinde yeni emme borusu tasarımları ve eniyilemeleri çok daha hızlı bir şekilde yapılabilir.

4.6 Regresyon Denklemi Kullanılarak Eniyileme Yapılması

Bölüm 3’te elde edilen eniyilenmiş tasarımın genetik algoritma kullanılarak bulunduğu göz önüne alınarak MATLAB [60] optimizasyon aracında bulunan genetik algoritma ile eniyileme yapılmıştır. Oluşturulan regresyon modeli 2 ile elde edilen regresyon denklemi üzerinden tek amaçlı kısıtlayıcı fonksiyonlu lineer olmayan çok değişkenli bir eniyileme yapmak amacıyla, genetik algoritma ile optimizasyonda kullanılan “ga()” komutu kullanılmıştır. Bu komutun fonksiyonu ve fonksiyonu

tanımlamada kullanılan argümanlar Çizelge 4.7’de verilmiştir. Genetik algoritma komutunun genel kullanım şekli ise Ek 4’de kısaca verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Genetik algoritma komutunun fonksiyonu ve kullanılan argümanların açıklaması.

Argüman	Tanımı
ObjectiveFunction (@fitnessfcn)	Amaç Fonksiyonu
nvars	Değişken Sayısı (Number of Variables)
A[]	Eşitsizlik Fonksiyonu Katsayıları
b[]	Eşitsizlik Fonksiyonu Değerleri (sağ taraf)
Aeq[]	Eşitlik Fonksiyonu Katsayıları
beq[]	Eşitlik Fonksiyonu Değerleri (sağ taraf)
LB	Tasarım Değişkenlerinin Alt Sınırı (Lower Bound)
UB	Tasarım Değişkenlerinin Üst Sınırı (Upper Bound)
Options	Genetik Algoritma Parametreleri
X	Eniyilenmiş Tasarım Değişkenlerinin Değerlerinin Atandığı Vektör
Fval	Eniyilenmiş Tasarımda Amaç Fonksiyonunun Alacağı Değer

Yapılan çalışmada için aşağıda verilen örnek problemin standart formülasyonu ile genetik algoritma kullanılarak eniyileme kısa kodu yazılmıştır. Burada Reynolds sayısı ve yüzey pürüzlülüğü bilindiği varsayılarak eşitlik kısıtları yazılmıştır. Diğer parametrelerin değerleri ise alt ve üst sınırlarla sınırlandırılmıştır. Reynold sayısı 4×10^6 , yüzey pürüzlülüğü değeri ise 5×10^{-5} olarak alınmıştır.

Tasarım Parametreleri $\frac{H_1}{D_2}, \frac{H_2}{D_2}, \frac{R}{D_2}, \theta_1, \theta_2, \log(\text{Re}), \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right)$

Enküçüle

$-C_p$

Amaç
Fonksiyonu

Kısıtlar

$\log(\text{Re}) = 6,602$

Eşitlik

Kısıtları

$\log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) = -4,301$

$5 \leq \theta_1 \leq 15$

(4.8)

$5 \leq \theta_2 \leq 15$

$0,8 \leq \frac{H_1}{D_2} \leq 2,5$

$1 \leq \frac{R}{D_2} \leq 3,5$

Alt ve Üst
Sınırlar

$3 \leq \frac{H_2}{D_2} \leq 9,5$

$6 \leq \log(\text{Re}) \leq 7$

$-5 \leq \log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right) \leq -4$

Boyutlar için eşitsizlik kısıtları Hidroelektirik santralının yapısına göre, yüzey pürüzlülüğü emme borusu için kullanılacak malzemeye göre ve Reynolds sayısı ise çark çıkışındaki suyun hızına göre değiştirilebilir. Elde edilen kod ve yukarıdaki örnek çıktısı Ek 4'te yer almaktadır. Yapılan eniyileme sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu ve tasarım parametrelerinin değerleri Çizelge 4.6'da yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : Eniyileme sonucu elde edilen tasarım parametreleri ve basınç geri kazanım katsayısı.

Tasarım Parametreleri							Yanıt	
$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	$\log(\text{Re})$	$\log\left(\frac{\varepsilon}{D_2}\right)$	$C_{p,Tahmin}$	$C_{p,Analiz}$
2,49	9,49	2,55	5,72	6,17	6,60	-4,30	0,917	0,855

Regresyon modeli 2 kullanılarak yapılan eniyileme sonucunda basınç geri kazanım katsayısı %7,25 hata ile tahmin edilmiştir. Hatanın fazla olması eniyileme sonucunda elde edilen uzunluk değerlerinin (konik kısmın uzunluğu ve difüzör kısmın uzunluğu) modelin geçerlilik sınırlarına çok yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

5. DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR

5.1 Sonuç

Bu tez çalışması kapsamında var olan Francis tipi emme borusu üzerinde geometri eniyilemesi yapılarak basınç geri kazanım oranı (c_p) 0,848; emme borusu girişi ve çıkışı arasındaki düşü farkı (ΔH) 0,448 m olan eniyilenmiş bir tasarım elde edilmiştir. Eniyilenmiş tasarım, Latin Hiperküp örnekleme metodu ile oluşturulan ikinci dereceden standart polinom yanıt yüzey meta-modeli üzerinde çok amaçlı genetik algoritmayla yapılan arama sonucunda elde edilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca basınç geri kazanım katsayısı için gerçek yanıt fonksiyonu bilinmediğinden ötürü yaklaşık olanı bulmak amacıyla HAD tabanlı ikinci dereceden polinomsal regresyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinden iki değişken için logaritmik dönüşüm yapılmıştır. Oluşturulan iki model için aynı doğrulama noktaları kullanılmış ve modellerin hata oranlarının birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Regresyon katsayılarının mertebeleri birbirlerine yakın olduğundan model 2 tercih edilmiştir. Regresyon modeli 2'nin basınç geri kazanım katsayısını geçerlilik sınırları içerisinde yaklaşık %8 hata oranıyla tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi üzerinde genetik algoritma kullanılarak örnek bir eniyileme yapılmıştır. Yapılan eniyileme sonucunda modelin tahmin ettiği basınç geri kazanım katsayısı ile yapılan HAD analizi sonucunda elde edilen basınç geri kazanım katsayısı arasında % 7,25'lik hata olduğu görülmektedir.

5.2 Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında emme borusu basınç geri kazanımını ifade eden denklemin geçerlilik sınırları arttırılması ve diğer çoklu regresyon modellerinin (logaritmik, üssel, karekök ve diğer polinomsal modeller) denenmesi iyi bir gelecek çalışması olabilir. Bunun yanı sıra, geliştirilen eniyileme metodu başka tip emme borularına ve hidrolik türbin diğer bileşenlerine uygulanabilir. Ayrıca emme borusununa akışın giriş açısı eniyileme probleminde ek bir parametre olarak kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Fay, J.A., Golomb, D.S.**, *Energy and the Environment*, Oxford University Press, New York, (2002).
- [2] **Krivchenko, G.I.**, *Hydraulic Machines: Turbines and Pumps*, Mir Publishers, Moscow, (1986).
- [3] **Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., Huebsch, W.W.**, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Wiley Publishing, (2010).
- [4] **Okyay, G.**, (2010). Utilization of CFD Tools in the Design Process of a Francis Turbine, *Yüksek Lisans Tezi*, O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] **Raabe, J.**, *Hydropower: The Design, Use, and Function of Hydromechanical, Hydraulic and Electrical Equipment*, VDI-Verlag, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, (1985).
- [6] **Ayancik, F., Aradag, U., Ozkaya, E., Celebioglu, K., Unver, O., Aradag, S.**, (2013). Hydroturbine Runner Design and Manufacturing, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 1(2), 162-165.
- [7] **Akın, H.**, (2014). Su Türbini Tasarımı Amaçlı Sayısal Yöntemler Geliştirmesi ve Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [8] **Drtina, P., Sallaberger, M.**, (1999). Hydraulic Turbines—Basic Principles and State-of-the Art Computational Fluid Dynamics Applications, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 213(C), 85-102.
- [9] **Patel, K., Desai, J., Chauhan, V., Charnia, S.**, (2011). Development of Francis Turbine Using Computational Fluid Dynamics, *11st Asian International Conference on Fluid Machinery and 3rd Fluid Power Technology Exhibition*, 1-3, India.
- [10] **Ayancık, F.**, (2014). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yardımıyla Su Türbini Çarkı Tasarımı ve Eniyilemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [11] **Prasad, V., Khare, R., Chincholikar, A.**, (2010). Hydraulic Performance of elbow draft tube for different geometric configurations using CFD, *IGHEM-2010*, Ahmednagar, IIT, Roorkee, India.

- [12] **Hothersall, R. J.** (1988). Assessing the design of draft tubes, *International Water Power and Dam Construction IWPCDM* Vol. 40 4 55-57.
- [13] **Akın H., Aytaç, Z., Ayancık, F., Ozkaya, E., Arıöz, E., Çelebioğlu, K., Aradağ, S.,** (2013), A CFD aided hydraulic turbine design methodology applied to Francis turbines, *4. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 694-699, Istanbul, Turkey.
- [14] **Gubin, M.F.,** *Draft Tubes of Hydroelectric Stations*, Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd. , New Delhi
- [15] **Nechleba, M.,** (1957). *Hydraulic Turbines-Their Design and Equipment*, ARTIA Prague.
- [16] **Dönmez, A. H.** (2013). Francis Türbini Yayıncısındaki Akışın Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Ueda T.,** (1982). “Improvement of Hydraulic Turbine Efficiency” , *Fuji Electric Review*, Vol. 28, Nr. 2, pp. 33-40
- [18] **Bovet T.,** (1961). Contribution to the study of Francis turbine runner design, *American Soc. of Mechanical Engineers (ASME)*, Paper 61 – WA- 155.
- [19] **De Leva F., De Servio F.,** (1976). Modern design trends in selecting and designing Francis turbines, *Water Power and Construction*, 8, 28 – 35.
- [20] **Schweiger F., Gregori J.,** (1989). Developments in the design of water turbines, *Water Power & Dam Construction (IWPCDM)*, Vol. 41(5) pp. 23-26.
- [21] **Lugaressi A., Massa A.,** (1987). Designing Francis turbine: trends in the last decade, *Water Power & Dam Construction (IWPCDM)*, Vol. 39(11), pp. 23-26.
- [22] **Casey M., Innotec, S.,** (2003). Best practice advice for CFD in Turbomachinery design, *QNET-CFD Network Newsletter, in a Thematic Network Quality and Trust in the Industrial Application of CFD*, Vol. 2(3), pp. 35-37
- [23] **Keck H., Sick, M.,** (2008). Thirty years of numerical flow simulation in hydraulic turbomachines, *Acta Mech* 201, 211-229.
- [24] **e Albuquerque R. B. D. F., de Oliveira, W.** (2011). Conceptual design optimization of francis turbines. In *Proc. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*.
- [25] **Hellström, J. G. I., Marjavaara, B. D., Lundström, T. S.,** (2007). Parallel CFD simulations of an original and redesigned hydraulic turbine draft tube, *Advances in Engineering Software*, Vol. 38(5), 338-344.

- [26] **Cervantes, M. J.**, (2003). Effects of boundary conditions and unsteadiness on draft tube flow, Doktora Tezi, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering/Fluid Mechanics.
- [27] **Marjavaara, D.**, (2006). CFD Driven Optimization of Hydraulic Turbine Draft Tubes Using Surrogate Models, Doktora Tezi, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Porsön
- [28] **Marjavaara, D.**, (2004). Parameterisation and Flow Design Optimization of Hydraulic Turbine Draft Tubes, Yüksek Lisans Tezi, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Porsön
- [29] **Eisinger, R., Ruprect, A.**, (2002). Automatic shape optimization of hydro turbine components based on CFD. *TASK Q*, Vol. 6(1), 101-111.
- [30] **Dahlback N.**, (1996). Redesign of sharp hell draft tube-Results from tests in model and prototypa. In Cabrera E., Espert V., Martines F., editors, Proceedings of XVIII IAHR symposium on haydraulic machinery and cavitation, Vol. 2, p. 985-93.
- [31] **Carija, Z., Mrsa, Z., Fucak, S.**, (2008). Validation of Francis water turbine CFD simulations, *Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu*, Vol. 50(1), 5-14.
- [32] **Patel, K., Desai, J., Chauhan, V., Charnia, S.**, (2011). Evaluation of Francis turbine using computational fluid dynamics, In *11. Asian International Conference on Fluid Machinery and The 3rd Fluid Power Technology Exhibition*, Chennai, India.
- [33] **Muntean, S., Susan Resiga, R., Anton, I.**, (2002). 3D flow analysis of the GAMM Francis turbine for variable discharge, *Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21st IAHR Symposium*, Lausanne, Sweden.
- [34] **Aurora, J.S.**, (2004). *Introduction to Optimum Design*, 2nd Edition, Elsevier, Academic Press
- [35] **Haftka, R.T., Gürdal, Z.**, (1992). *Elements of Structural Optimization*, Vol. 11. Springer Science & Business Media.
- [36] **Rao, S.S.**, (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley & Sons.
- [37] **Wu, J., Shimmei, K., Tani, K., Nikura, K., Sato, J.**, (2007). CFD-based Design Optimization for Hydro Turbines, *Journal of Fluid Engineering*, vol. 129, 159-168.

- [38] **McNabb, J., Devals, C., Kyriacou, S. A., Murry, N., Mullins, B. F.,** (2014) CFD based draft tube hydraulic design optimization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 22, No. 1, p. 012023.
- [39] **Georgopoulouş C., Kyriacouş S., Giannakoglouş K., Grafenbergerş P., Parkinson, E.,** (2008). Constrained multi-objective design optimization of hydraulic components using a hierarchical metamodel-assisted evolutionary algorithm. Part 1: Theory, *24th IAHR, Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Foz do Iguassu, Brazil.
- [40] **Grafenberger, P., Parkinson, E., Georgopoulou, C., Kyriacou, S., Giannakoglou, K.,** (2008). Constrained multi-objective design optimization of hydraulic components using a hierarchical metamodel-assisted evolutionary algorithm. Part 2: Applications, *24th IAHR, Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Foz do Iguassu, Brazil.
- [41] **dos Santos, M. A. R., Manzanares Filho, N., de Oliveira, W.,** (2009). Optimization of pump-turbine using sequential quadratic programming and genetic algorithms, *20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado, RS, Brazil.
- [42] **Yang, W., Xiao, R.,** (2013). Multiobjective Optimization Design of a Pump-Turbine Impeller Based on an Inverse Design Using a Combination Optimization Strategy, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136(1), 014501.
- [43] ANSYS CFX , Sürüm 15.0, Kullanım Kılavuzu.
- [44] **de Souza, L.C.E.O., de Moura, M.C., Junior, A.C.P.B., Nilsson, H.,** (2003). Assessment of turbulence modelling for CFD simulations into hydroturbines: Spiral casings, *17th International Mechanical Engineering Congress COBEM 2003*, São Paulo, Brazil.
- [45] **Aylı E., Kaplan A., Çetintürk H., Kavurmacı B., Demirel G., Çelebioğlu K., Aradağ S.,** (2015). CFD Analysis of 3D Flow For 1,4 MW Francis Turbine and Model Turbine Manufacturing, *ASME IDETC/CIE 2015, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers & Information in Engineering Conference*.
- [46] **Aytaç F., Z.,** (2014). Su türbini ayar kanadı tasarım sistemi geliştirilmesi ve çeşitli Francis tipi türbinler için uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [47] **Çetintürk H.,** (2016). Boru içerisinde Francis tipi Türbin Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [48] **Güleç M.**, (1993), Francis türbinli tesislerde dönen vorteks çekirdeğinin geçici rejimlere etkisinin etüdü
- [49] **Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., Engin, T.**, (2008). *Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları*, Güven Bilimsel.
- [50] ANSYS Mesh, Sürüm 15.0, Kullanım Kılavuzu
- [51] ANSYS DesignXplorer, Sürüm 15.0, Kullanım Kılavuzu
- [52] **Ayancik, F., Acar, E., Celebioglu, K., Aradag, S.**, (2016). Simulation-based design and optimization of Francis turbine runners by using multiple types of metamodels. Proceedings of the *Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 0954406216658078.
- [53] **Acar, E., Guler, M.A., Gerceker, B., Cerit, M., Karakaya, E.**, (2011). Multi-Objective Crashworthiness Optimization of Tapered Thin-Walled Tubes with Axisymmetric Indentations, *Thin-Walled Structures*, Vol. 49(1), 94-105.
- [54] Regresyon ve İnterpolasyon, Öğr. Gör. Rıdvan Yakut, Kafkas Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, erişim adresi: [http://muhendis.kafkas.edu.tr/doc/personel-dosyalari/6egri-uydurma-ve-
interpolasyon-3872.pdf](http://muhendis.kafkas.edu.tr/doc/personel-dosyalari/6egri-uydurma-ve-interpolasyon-3872.pdf) , alındığı tarih: 24.06.2016.
- [55] **Bingham, N. H., Fry, J.M.**, (2010). *Regression: Linear Models in Statistics*, Springer Undergraduate Mathematics Series, Springer Science and Business Media.
- [56] **Draper, N.R., Smith, H.**, (1998). *Applied Regression Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics, Third Edition, John Wiley & Sons.
- [57] Çoklu Regresyon (Multiple Regression), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Yrd. Doç. Dr. Hamit Aydın, INS729 Mühendislikte İstatistiksel Metotlar, 7. Hafta Sunusu, erişim adresi: http://maden.beun.edu.tr/hocalar/hamitaydin/Sunu_7ci_hafta.pdf , alındığı tarih: 24.06.2016.
- [58] Korelasyon ve Regresyon Analizi, Yard. Doç. Dr. Kenan kose, erişim adresi: [http://file.toraks.org.tr/TORAKSFD23NJKL4NJ4H3BG3JH/mse-ppt-
pdf/Kenan_KOSE3.pdf](http://file.toraks.org.tr/TORAKSFD23NJKL4NJ4H3BG3JH/mse-ppt-pdf/Kenan_KOSE3.pdf) , alındığı tarih: 24.06.2016.
- [59] Correlation (Pearson / Spearman) & Linear Regression, Azmi Mohd Tamil , erişim adresi: [http://www.slideshare.net/drtamil/pearson-correlation-spearman-
correlation-linear-regression](http://www.slideshare.net/drtamil/pearson-correlation-spearman-correlation-linear-regression) , alındığı tarih: 24.06.2016.
- [60] MatLab, Sürüm R13, Kullanım Kılavuzu.
- [61] Microsoft EXCEL 2013, Kullanım Kılavuzu.

[62] Veri Dönüştürme, Atatürk Üniversitesi, erişim adresi:
https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewjkqZH36u3NAhUoEpoKHZzICG4QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Ffaile.atauni.edu.tr%2Fogrenciler%2Fdersnotu%2F2009_2010%2Fatauni-tip09_10donem1istatistik12veridonusturme.doc&usg=AFQjCNFMAYpAGuGqrDxhi883O_bsCNlkIw&bvm=bv.126993452,d.bGs&cad=rja , alındığı tarih:
12.07.2016.



EKLER

EK 1: Emme borusu eniyilemesi için oluşturulan deney tasarımı (DT)

Bu tez kapsamında Latin Hiperküp Örnekleme ile deney tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımı ve elde edilen sonuçlar Çizelge Ek 1.1’de ve doğrulama noktaları ve sonuçları Çizelge Ek 1.2 ‘de verilmiştir.

Çizelge Ek 1.1 : Latin Hiperküp örnekleme ile oluşturulan deney tasarımı noktaları ve sonuçları.

#	Tasarım Değişkenleri					Yanıtlar	
	H ₁	H ₂	R	θ ₁	θ ₂	ΔH	C _p
1	750.80	2740.12	1084.83	12.60	7.41	0.540	0.804
2	918.80	2836.00	1035.28	12.02	8.30	0.556	0.818
3	885.20	2772.01	1273.14	12.41	8.21	0.516	0.825
4	745.20	3173.01	1027.40	12.50	7.98	0.575	0.814
5	806.80	2788.00	1060.20	11.26	8.46	0.551	0.813
6	795.60	2931.98	1379.89	11.11	7.22	0.467	0.823
7	974.80	2916.00	1133.74	11.98	7.76	0.522	0.825
8	913.20	3140.00	1077.00	12.89	8.18	0.568	0.823
9	739.60	3396.00	1166.37	12.84	8.50	0.564	0.826
10	952.40	2868.00	1298.44	13.13	8.75	0.547	0.829
11	798.40	3162.00	1137.67	5.50	9.50	0.638	0.775
12	840.40	3012.00	1223.90	12.07	8.43	0.528	0.828
13	991.60	3300.07	1175.03	11.93	8.40	0.525	0.838
14	762.00	3076.00	1314.52	12.36	8.59	0.534	0.827
15	902.00	3492.00	1290.11	12.26	8.56	0.520	0.842
16	862.80	2724.02	1010.62	12.22	7.79	0.556	0.808
17	773.20	3268.00	1355.51	13.18	7.89	0.523	0.830
18	728.40	2852.00	1346.97	11.06	8.53	0.522	0.819
19	924.40	3284.00	1142.67	12.31	8.11	0.537	0.832

Çizelge Ek 1.1 : Latin Hiperküp örnekleme ile oluşturulan deney tasarımı noktaları ve sonuçları (devam).

#	Tasarım Değişkenleri					Yanıtlar	
	H ₁	H ₂	R	θ ₁	θ ₂	ΔH	C _p
20	763.20	2874.52	1199.68	6.30	5.10	0.443	0.754
21	756.40	2756.00	1249.17	12.79	7.44	0.514	0.813
22	907.60	3188.00	1093.34	13.08	7.82	0.564	0.823
23	986.00	2980.21	995.09	11.83	8.62	0.575	0.821
24	935.60	2804.00	1281.16	12.65	7.38	0.506	0.824
25	958.00	3236.00	1256.71	12.74	7.34	0.511	0.833
26	852.06	2726.68	1015.74	5.63	14.13	1.502	0.606
27	879.60	2996.00	1396.07	12.17	8.27	0.497	0.835
28	778.80	3364.00	1231.96	13.03	7.54	0.530	0.827
29	846.00	3380.00	1330.33	11.64	7.47	0.482	0.838
30	829.20	2948.00	1125.30	11.21	8.37	0.533	0.822
31	812.40	3476.00	1044.02	11.02	7.86	0.536	0.828
32	792.00	3210.00	1173.05	8.50	6.70	0.500	0.807
33	790.00	3412.00	1109.41	11.69	7.60	0.525	0.827
34	874.00	3428.00	1118.10	11.88	8.34	0.540	0.834
35	868.40	3252.00	1068.07	11.78	7.28	0.519	0.825
36	767.60	3060.00	1191.57	10.87	7.31	0.501	0.818
37	963.60	3092.00	1240.89	12.70	7.57	0.518	0.831
38	823.60	2900.00	1002.79	11.30	7.95	0.547	0.813
39	734.00	3124.00	1101.52	11.74	8.14	0.552	0.817
40	877.29	3266.09	1185.89	14.63	14.93	0.724	0.813
41	801.20	2884.00	1199.56	11.16	8.02	0.511	0.821
42	930.00	2708.00	1338.73	10.82	7.70	0.461	0.828
43	946.80	3348.00	1363.65	11.35	8.24	0.483	0.846
44	890.80	3460.00	1018.75	11.40	8.05	0.544	0.830
45	849.60	3186.00	1190.43	7.30	11.50	0.635	0.795
46	980.40	3044.00	1215.63	10.97	7.66	0.479	0.835
47	875.20	3150.00	1089.91	9.70	12.50	0.638	0.824
48	722.80	3220.00	1183.52	12.94	8.72	0.570	0.822

Çizelge Ek 1.1 : Latin Hiperküp örnekleme ile oluşturulan deney tasarımı noktaları ve sonuçları (devam).

#	Tasarım Değişkenleri					Yanıtlar	
	H ₁	H ₂	R	θ ₁	θ ₂	ΔH	C _p
49	784.40	3332.00	1372.14	11.45	7.73	0.493	0.834
50	818.00	3108.00	1150.21	12.98	7.50	0.538	0.821

Çizelge Ek 1.2 : Oluşturulan doğrulama noktaları ve sonuçları.

#	Tasarım Değişkenleri					Yanıtlar	
	H1	H2	R	θ1	θ2	ΔH	Cp
1	939.0	2874.0	1375.0	12.3	8.0	0.493	0.834
2	763.2	2874.0	1199.0	6.3	5.1	0.443	0.754
3	814.4	2754.0	1141.8	11.7	11.3	0.607	0.820
4	966.0	3373.0	1108.0	10.9	7.3	0.487	0.836
5	827.2	3066.0	1045.0	14.5	8.9	0.633	0.811
6	872.0	2910.0	992.2	9.3	13.9	0.817	0.782
7	820.8	2790.0	1159.4	11.9	14.1	0.659	0.820
8	873.0	3062.0	1021.0	12.6	8.2	0.580	0.817
9	832.0	3318.0	1079.0	11.3	7.5	0.520	0.826
10	860.0	3100.0	1195.0	12.0	8.0	0.519	0.829
11	899.0	3443.0	1038.0	13.1	8.1	0.585	0.824
12	836.8	3138.0	1071.4	11.3	10.7	0.618	0.821
13	829.0	2847.0	1147.0	11.3	7.3	0.498	0.816
14	868.8	2958.0	1111.0	5.7	7.9	0.541	0.798
15	795.0	2990.0	1019.0	12.7	8.7	0.597	0.813

EK 2: Regresyon denklemi için oluşturulan veri seti noktaları

Çizelge Ek 2.1 : Regresyon modeli için belirlenen bağımsız parametrelerin korelasyon analizi sonuçları.

	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	Re	$\frac{\varepsilon}{D_2}$
$\frac{H_1}{D_2}$	1.000						
$\frac{H_2}{D_2}$	-0.014	1.000					
$\frac{R}{D_2}$	-0.007	-0.003	1.000				
θ_1	-0.010	-0.015	-0.006	1.000			
θ_2	0.002	0.007	0.003	-0.002	1.000		
Re	-0.028	0.019	0.003	0.017	0.021	1.000	
$\frac{\varepsilon}{D_2}$	-0.003	-0.011	-0.025	0.009	-0.050	0.009	1.000

Çizelge Ek 2.2 : Regresyon denklemi için oluşturulan veri seti.

#	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	Re	$\frac{\varepsilon}{D_2}$	C_p
1	1.346	7.318	1.554	7.36	5.36	5.32E+06	7.36E-05	0.770
2	1.686	4.439	1.804	12.64	5.79	4.28E+06	1.19E-05	0.757
3	0.836	9.082	1.304	13.36	7.36	2.87E+06	6.85E-05	0.776
4	1.492	3.975	2.839	9.50	10.93	1.97E+06	6.59E-05	0.756
5	0.909	6.854	3.232	6.50	5.50	5.70E+06	6.34E-05	0.709
6	2.342	6.018	3.482	7.21	8.07	4.93E+06	3.51E-05	0.827
7	1.419	5.739	1.661	10.64	7.07	5.06E+06	6.46E-05	0.763
8	2.318	4.346	1.161	13.21	11.07	4.15E+06	7.49E-05	0.737
9	1.079	5.925	3.089	6.21	8.64	9.18E+06	8.01E-05	0.727
10	0.982	8.154	2.232	7.07	7.93	7.38E+06	3.38E-05	0.788
11	1.176	8.896	1.125	8.21	13.93	8.79E+06	3.76E-05	0.472
12	0.958	8.339	1.446	10.36	12.21	7.50E+06	6.21E-05	0.622
13	1.274	6.204	2.196	5.50	5.64	3.00E+06	5.44E-05	0.724
14	1.784	7.968	3.304	6.64	12.36	8.67E+06	5.56E-05	0.782
15	1.152	8.432	2.625	11.50	14.36	2.22E+06	2.22E-05	0.783
16	2.099	3.418	1.196	10.93	9.64	4.54E+06	5.95E-05	0.723
17	2.026	7.132	2.161	12.50	6.36	3.38E+06	5.82E-05	0.824
18	1.638	5.368	2.411	14.79	5.21	6.73E+06	1.84E-05	0.783
19	0.934	3.139	2.339	8.07	10.36	2.48E+06	6.98E-05	0.634
20	0.885	9.175	2.375	10.79	9.36	8.02E+06	9.81E-05	0.787
21	1.249	5.182	1.625	13.79	14.64	5.57E+06	3.12E-05	0.752
22	2.124	8.989	1.375	8.50	7.50	1.84E+06	5.69E-05	0.823
23	2.415	4.161	1.911	10.21	12.07	7.63E+06	4.66E-05	0.802
24	1.031	4.904	2.661	12.79	13.79	1.71E+06	8.91E-05	0.750
25	1.856	4.811	2.946	11.21	9.50	1.58E+06	2.35E-05	0.807
26	1.614	7.782	2.018	12.21	9.93	5.96E+06	9.29E-05	0.816
27	2.002	3.882	1.232	11.93	11.36	4.03E+06	4.79E-05	0.736

Çizelge Ek 2.2 : Regresyon denklemi için oluşturulan veri seti (devam).

#	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	Re	$\frac{\varepsilon}{D_2}$	C_p
28	1.759	6.482	2.911	13.93	13.50	9.82E+06	4.15E-05	0.824
29	2.464	7.596	1.589	5.79	12.64	3.51E+06	2.86E-05	0.739
30	1.201	6.668	2.768	5.64	14.79	3.77E+06	2.74E-05	0.523
31	1.929	8.804	3.196	7.93	13.36	9.70E+06	2.48E-05	0.833
32	2.051	5.646	3.446	13.07	8.50	2.09E+06	1.96E-05	0.829
33	1.371	3.511	2.732	5.36	7.79	6.61E+06	4.92E-05	0.660
34	2.148	9.361	1.732	11.07	12.50	5.83E+06	9.42E-05	0.824
35	1.225	3.696	3.375	14.50	6.07	6.21E+06	4.28E-05	0.741
36	1.104	6.946	2.054	14.07	13.21	1.06E+06	2.61E-05	0.783
37	2.269	9.268	2.125	7.50	7.21	1.32E+06	8.26E-05	0.837
38	2.221	3.046	2.804	7.64	9.79	2.61E+06	9.68E-05	0.759
39	1.565	4.718	3.161	9.93	13.64	4.41E+06	3.64E-05	0.796
40	2.488	4.254	1.696	9.07	10.07	3.13E+06	4.02E-05	0.788
41	1.541	3.325	3.054	5.07	11.64	6.09E+06	8.39E-05	0.649
42	1.395	5.554	1.089	10.50	11.50	9.31E+06	5.05E-05	0.688
43	1.808	4.996	1.946	6.79	13.07	8.28E+06	1.71E-05	0.736
44	1.055	5.832	1.054	6.93	11.93	6.99E+06	7.75E-05	0.437
45	1.978	9.454	3.339	9.79	6.64	4.80E+06	4.41E-05	0.858
46	1.832	8.711	2.268	8.36	10.50	6.35E+06	2.09E-05	0.842
47	2.172	4.532	1.768	10.07	5.93	9.95E+06	4.54E-05	0.774
48	1.735	8.618	3.125	14.93	12.79	2.35E+06	8.65E-05	0.819
49	1.128	6.296	3.018	9.36	14.93	2.74E+06	3.89E-05	0.704
50	0.812	7.689	2.589	12.93	6.21	7.11E+06	7.11E-05	0.762
51	1.006	6.111	1.982	13.50	10.79	7.76E+06	9.04E-05	0.777
52	1.954	7.875	1.518	7.79	6.79	3.64E+06	7.62E-05	0.813
53	2.196	8.246	2.482	9.21	8.79	1.45E+06	9.55E-05	0.843
54	1.881	5.089	1.839	8.79	8.36	9.44E+06	8.52E-05	0.779
55	1.322	4.068	2.446	12.07	14.21	8.53E+06	9.94E-05	0.764

Çizelge Ek 2.2 : Regresyon denklemi için oluşturulan veri seti (devam).

#	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	Re	$\frac{\varepsilon}{D_2}$	C_p
56	1.468	6.389	3.268	11.79	6.93	4.67E+06	8.78E-05	0.801
57	2.075	7.411	2.304	12.36	10.21	9.56E+06	6.08E-05	0.833
58	1.905	4.625	3.411	9.64	11.21	8.15E+06	7.24E-05	0.814
59	1.444	3.232	1.339	5.21	14.50	1.19E+06	5.18E-05	0.404
60	2.439	6.761	2.554	14.21	9.21	6.47E+06	7.88E-05	0.814
61	0.861	5.275	1.268	11.36	6.50	3.25E+06	1.06E-05	0.726
62	1.662	3.604	1.018	11.64	9.07	9.05E+06	9.16E-05	0.689
63	1.589	7.039	2.089	8.64	11.79	5.19E+06	3.25E-05	0.804
64	2.294	8.525	1.482	14.64	12.93	7.88E+06	1.58E-05	0.785
65	1.298	7.225	2.518	8.93	7.64	8.92E+06	1.45E-05	0.806
66	2.245	3.789	2.982	14.36	8.21	8.40E+06	6.72E-05	0.796
67	1.711	6.575	2.696	13.64	10.64	5.44E+06	2.99E-05	0.820
68	2.366	7.504	1.411	6.07	8.93	3.90E+06	8.14E-05	0.778
69	1.516	5.461	1.875	6.36	5.07	6.86E+06	1.32E-05	0.737
70	2.391	8.061	2.875	5.93	14.07	7.25E+06	5.31E-05	0.758

Çizelge Ek 2.3 : Regresyon denklemini doğrulamak için oluşturulan veri seti.

#	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	Re	$\frac{\varepsilon}{D_2}$	C_p
1	1.657	4.863	3.074	12.57	9.50	4.51E+06	2.05E-05	0.804
2	1.900	8.205	3.123	9.17	7.06	5.49E+06	8.33E-05	0.840
3	1.323	8.825	1.931	14.72	14.00	7.26E+06	3.92E-05	0.792
4	1.036	6.884	2.483	14.88	12.63	8.52E+06	3.22E-05	0.782
5	1.608	8.746	3.181	13.64	13.82	6.49E+06	4.08E-05	0.829
6	1.416	9.134	3.334	8.89	7.85	6.18E+06	4.38E-05	0.824
7	2.140	6.570	2.671	9.55	11.73	3.94E+06	5.92E-05	0.833
8	2.127	7.735	1.517	7.47	11.64	5.12E+06	6.06E-05	0.770
9	1.936	6.749	2.635	12.84	6.23	7.43E+06	4.56E-05	0.825
10	1.027	3.168	1.180	13.83	9.07	8.97E+06	4.58E-05	0.663
11	0.837	5.902	2.017	14.14	7.75	7.49E+06	5.64E-05	0.743
12	1.752	7.201	2.667	10.58	12.17	1.17E+06	6.92E-05	0.826
13	1.311	6.388	3.334	10.99	7.83	7.08E+06	9.56E-05	0.789
14	2.397	5.420	3.027	6.49	13.96	4.96E+06	7.50E-05	0.793
15	2.468	9.091	2.211	14.00	13.27	4.94E+06	4.60E-05	0.815
16	2.391	7.956	2.331	12.27	6.52	6.79E+06	8.73E-05	0.838
17	2.192	6.744	1.698	8.74	8.97	3.00E+06	9.20E-05	0.816
18	2.038	7.860	3.366	10.82	8.75	8.55E+06	7.30E-05	0.849
19	1.099	7.196	3.266	6.16	6.31	9.76E+06	7.53E-05	0.733
20	1.413	3.801	1.982	5.58	9.35	8.64E+06	3.07E-05	0.693
21	1.121	6.279	1.062	14.80	5.92	5.56E+06	6.18E-05	0.729
22	0.802	5.257	2.679	7.85	11.15	3.52E+06	8.30E-05	0.631
23	1.338	3.599	3.093	10.95	5.11	7.73E+06	4.63E-05	0.719
24	1.989	3.961	3.429	14.62	10.73	3.13E+06	9.90E-05	0.802
25	1.863	4.288	1.142	6.86	12.90	9.64E+06	1.81E-05	0.610
26	1.723	7.370	2.126	6.93	7.35	6.60E+06	3.89E-05	0.808
27	1.546	5.805	2.456	8.42	9.48	6.41E+06	5.60E-05	0.789
28	1.289	7.514	2.717	14.33	10.69	2.55E+06	1.55E-05	0.810

Çizelge Ek 2.3 : Regresyon denklemini doğrulamak için oluşturulan veri seti (devamı).

#	$\frac{H_1}{D_2}$	$\frac{H_2}{D_2}$	$\frac{R}{D_2}$	θ_1	θ_2	Re	$\frac{\varepsilon}{D_2}$	C_p
29	1.653	4.669	2.799	8.91	5.61	1.82E+06	7.53E-05	0.748
30	2.095	3.063	2.625	7.73	9.96	3.30E+06	6.01E-05	0.752



EK 3: Regresyon modeli için MATLAB kısa kodu

Öncelikle bu kısımda HAD ile elde edilen veriler koda tanıtılmış ve ikinci dereceden polinomsal regresyon modeli oluşturulmuştur. Regresyon katsayıları $b[]$ vektöründe tutulmaktadır. İlk olarak regresyon modeli 1 için daha sonra ise regresyon modeli 2 için oluşturulan kısa kod verilmiştir.

Regresyon Modeli 1	Regresyon Modeli 2
Veri Seti Tanımlanması	
<pre>clc clear all format long e xn = zeros(70,7); filename = 'tez.xlsx'; sheet = 1; x1range = 'B5:B74'; x2range = 'C5:C74'; x3range = 'D5:D74'; x4range = 'E5:E74'; x5range = 'F5:F74'; x6range = 'K5:K74'; x7range = 'H5:H74'; Cprange = 'I5:I74'; x1 = xlsread(filename,sheet,x1range); x2 = xlsread(filename,sheet,x2range); x3 = xlsread(filename,sheet,x3range); x4 = xlsread(filename,sheet,x4range); x5 = xlsread(filename,sheet,x5range); x6 = xlsread(filename,sheet,x6range); x7 = xlsread(filename,sheet,x7range); Cp = xlsread(filename,sheet,Cprange); %% Veri seti tanıtılması xn(:,1)= x1(:,1); xn(:,2)= x2(:,1); xn(:,3)= x3(:,1); xn(:,4)= x4(:,1);</pre>	<pre>clc clear all format long e xn = zeros(70,7); filename = 'tez.xlsx'; sheet = 1; x1range = 'B5:B74'; x2range = 'C5:C74'; x3range = 'D5:D74'; x4range = 'E5:E74'; x5range = 'F5:F74'; x6range = 'K5:K74'; x7range = 'H5:H74'; Cprange = 'I5:I74'; x1 = xlsread(filename,sheet,x1range); x2 = xlsread(filename,sheet,x2range); x3 = xlsread(filename,sheet,x3range); x4 = xlsread(filename,sheet,x4range); x5 = xlsread(filename,sheet,x5range); x6_normal = xlsread(filename,sheet,x6range); x7_normal = xlsread(filename,sheet,x7range); x6 = zeros(70,1); x7 = zeros(70,1); for a=1:1:70 x6(a,1) = log10(x6_normal(a,1)); x7(a,1) = log10(x7_normal(a,1)); end</pre>

```
xn(:,5)= x5(:,1);
xn(:,6)= x6(:,1);
xn(:,7)= x7(:,1);
```

```
Cp = xlsread(filename,sheet,Cprange);
%% Veri seti tanıtılması
xn(:,1)= x1(:,1);
xn(:,2)= x2(:,1);
xn(:,3)= x3(:,1);
xn(:,4)= x4(:,1);
xn(:,5)= x5(:,1);
xn(:,6)= x6(:,1);
xn(:,7)= x7(:,1);
```

Regresyon Katsayılarının Elde Edilmesi ve Hata Oranlarının Hesaplanması

```
stats=regstats(Cp,xn,'quadratic')
```

```
b=stats.beta;
```

```
Cp_tahmin = zeros(70,1);
```

```
for i =1:1:70
```

```
    Cp_tahmin(i,1) = b(1)+ b(2)*x1(i,1)+ b(3)*x2(i,1)+ b(4)*x3(i,1)+ b(5)*x4(i,1)+ ...
    b(6)*x5(i,1)+ b(7)*x6(i,1)+ b(8)*x7(i,1)+ b(9)*x1(i,1)*x2(i,1)+b(10)*x1(i,1)*x3(i,1)+ ...
    b(11)*x1(i,1)*x4(i,1)+b(12)*x1(i,1)*x5(i,1)+b(13)*x1(i,1)*x6(i,1)+b(14)*x1(i,1)*x7(i,1)+ ...
    b(15)*x2(i,1)*x3(i,1)+b(16)*x2(i,1)*x4(i,1)+b(17)*x2(i,1)*x5(i,1)+b(18)*x2(i,1)*x6(i,1)+ ...
    b(19)*x2(i,1)*x7(i,1)+b(20)*x3(i,1)*x4(i,1)+b(21)*x3(i,1)*x5(i,1)+b(22)*x3(i,1)*x6(i,1)+ ...
    b(23)*x3(i,1)*x7(i,1)+b(24)*x4(i,1)*x5(i,1)+b(25)*x4(i,1)*x6(i,1)+b(26)*x4(i,1)*x7(i,1)+ ...
    b(27)*x5(i,1)*x6(i,1)+b(28)*x5(i,1)*x7(i,1)+b(29)*x6(i,1)*x7(i,1)+b(30)*x1(i,1)*x1(i,1)+ ...
    b(31)*x2(i,1)*x2(i,1)+b(32)*x3(i,1)*x3(i,1)+b(33)*x4(i,1)*x4(i,1)+b(34)*x5(i,1)*x5(i,1)+ ...
    b(35)*x6(i,1)*x6(i,1)+b(36)*x7(i,1)*x7(i,1);
```

```
end
```

```
error = zeros(70,1);
```

```
error_mutlak = zeros(70,1);
```

```
error_kare = zeros(70,1);
```

```
for j=1:1:70
```

```
    error(j,1) = ((Cp(j,1) - Cp_tahmin(j,1))*100)/Cp(j,1); % yüzde hata
```

```
    error_kare(j,1) = ((Cp(j,1) - Cp_tahmin(j,1))/Cp(j,1))^2;
```

```
    error_mutlak(j,1) = abs((Cp(j,1) - Cp_tahmin(j,1))/Cp(j,1));
```

```
end
```

```
Max_error = max(error);
```

```
Min_error = min(error);
```

```
rms = sqrt((1/70)*sum(error_kare));
```

```
mae = (1/70)*sum(error_mutlak);
```

Elde edilen regresyon modelinin Doğrulaması

<pre> filename1 = 'dogrulama.xlsx'; sheet1 = 1; x1ran = 'B2:B31'; x2ran = 'C2:C31'; x3ran = 'D2:D31'; x4ran = 'E2:E31'; x5ran = 'F2:F31'; x6ran = 'J2:J31'; x7ran = 'H2:H31'; Cpran = 'I2:I31'; x_1 = xlsread(filename1,sheet1,x1ran); x_2 = xlsread(filename1,sheet1,x2ran); x_3 = xlsread(filename1,sheet1,x3ran); x_4 = xlsread(filename1,sheet1,x4ran); x_5 = xlsread(filename1,sheet1,x5ran); x_6 = xlsread(filename1,sheet1,x6ran); x_7 = xlsread(filename1,sheet1,x7ran); Cp_analiz = xlsread(filename1,sheet1,Cpran); Cp_tah = zeros(30,1); </pre>	<pre> filename1 = 'dogrulama.xlsx'; sheet1 = 1; x1ran = 'B2:B31'; x2ran = 'C2:C31'; x3ran = 'D2:D31'; x4ran = 'E2:E31'; x5ran = 'F2:F31'; x6ran = 'J2:J31'; x7ran = 'H2:H31'; Cpran = 'I2:I31'; x_1 = xlsread(filename1,sheet1,x1ran); x_2 = xlsread(filename1,sheet1,x2ran); x_3 = xlsread(filename1,sheet1,x3ran); x_4 = xlsread(filename1,sheet1,x4ran); x_5 = xlsread(filename1,sheet1,x5ran); x_6_normal = xlsread(filename1,sheet1,x6ran); x_7_normal = xlsread(filename1,sheet1,x7ran); x_6 = zeros(30,1); x_7 = zeros(30,1); for c=1:1:30 x_6(c,1) = log10(x_6_normal(c,1)); x_7(c,1) = log10(x_7_normal(c,1)); end Cp_analiz = xlsread(filename1,sheet1,Cpran); Cp_tah = zeros(30,1); </pre>
---	--

```

for k = 1:1:30
    Cp_tah(k,1) = b(1)+ b(2)*x_1(k,1)+ b(3)*x_2(k,1)+ b(4)*x_3(k,1)+ b(5)*x_4(k,1)+ ...
    b(6)*x_5(k,1)+ b(7)*x_6(k,1)+ b(8)*x_7(k,1)+ b(9)*x_1(k,1)*x_2(k,1)+...
    b(10)*x_1(k,1)*x_3(k,1)+b(11)*x_1(k,1)*x_4(k,1)+b(12)*x_1(k,1)*x_5(k,1)+...
    b(13)*x_1(k,1)*x_6(k,1)+b(14)*x_1(k,1)*x_7(k,1)+b(15)*x_2(k,1)*x_3(k,1)+...
    b(16)*x_2(k,1)*x_4(k,1)+b(17)*x_2(k,1)*x_5(k,1)+b(18)*x_2(k,1)*x_6(k,1)+ ...
    b(19)*x_2(k,1)*x_7(k,1)+b(20)*x_3(k,1)*x_4(k,1)+b(21)*x_3(k,1)*x_5(k,1)+...
    b(22)*x_3(k,1)*x_6(k,1)+b(23)*x_3(k,1)*x_7(k,1)+b(24)*x_4(k,1)*x_5(k,1)+...
    b(25)*x_4(k,1)*x_6(k,1)+b(26)*x_4(k,1)*x_7(k,1)+b(27)*x_5(k,1)*x_6(k,1)+...
    b(28)*x_5(k,1)*x_7(k,1)+b(29)*x_6(k,1)*x_7(k,1)+b(30)*x_1(k,1)*x_1(k,1)+ ...
    b(31)*x_2(k,1)*x_2(k,1)+b(32)*x_3(k,1)*x_3(k,1)+b(33)*x_4(k,1)*x_4(k,1)+...
    b(34)*x_5(k,1)*x_5(k,1)+b(35)*x_6(k,1)*x_6(k,1)+b(36)*x_7(k,1)*x_7(k,1);

```

```
end
error1 = zeros(30,1);
error_mutlak1 = zeros(30,1);
error_kare1 = zeros(30,1);
for l=1:1:30
    error1(l,1) = ((Cp_analiz(l,1) - Cp_tah(l,1))*100)/Cp_analiz(l,1); % yüzde hata
    error_kare1(l,1) = ((Cp_analiz(l,1) - Cp_tah(l,1))/Cp_analiz(l,1))^2;
    error_mutlak1(l,1) = abs((Cp_analiz(l,1) - Cp_tah(l,1))/Cp_analiz(l,1));
end
Max_error1 = max(error1);
Min_error1 = min(error1);

rms1 = sqrt((1/30)*sum(error_kare1));
mae1 = (1/30)*sum(error_mutlak1);
```


EK 4: Oluşturulan regresyon modelinde eniyileme yapmak için MATLAB kısa kodu

Genetik algoritma komutunun genel kullanım şekli aşağıda kısaca verilmiştir.

```
[x,fval,exitflag] = ga(ObjectiveFunction,nvars,[],[],Aeq,beq,LB,UB,[],options)
```

Yukarıda belirtilen genel kullanımda eniyileme metodunun kontrolü amacıyla “options” kullanılmaktadır. Eniyileme metodunun algoritma parametreleri, Matlab tarafından atanan değerler yerine kullanıcı tarafından “gaoptimset” komutu yardımıyla değiştirilebilmektedir. Böylelikle algoritmanın yakınsamasına ve eniyilenmiş tasarımı aramaya kullanıcı müdahale edebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan seçenekler aşağıda verilmiştir.

```
options = gaoptimset('display', 'iter', 'PopulationSize', 200, 'CrossoverFraction',  
0.9,'Generations', 10000, 'TolFun', 1e-5, 'CrossoverFcn',  
@crossoverheuristic, 'MutationFcn', @mutationadaptfeasible)
```

Öncelikle kullanılan amaç fonksiyonu fitnessfcn(x) içine aşağıda verildiği gibi yazılır.

```
function f = fitnessfcn(x)
```

```
f = -(-4.34643840503120+ 0.113193994430332*x(1)+ 0.132560467764573*x(2) +...  
-0.00145048070345296*x(3)+ 0.0947621086554548*x(4)+0.0265946434347832*x(5)+...  
+1.25141099492702*x(6)+0.196983702226640*x(7)+0.00197426867738875*x(1)*x(2)+...  
-0.00338908585460732*x(1)*x(3)-0.0130212814838512*x(1)*x(4)+...  
+0.0104984059727573*x(1)*x(5)+0.0184386099647694*x(1)*x(6)+...  
-0.00469649538788484*x(1)*x(7)-0.00240159109583045*x(2)*x(3)+...  
-0.00214738970880228*x(2)*x(4)-0.00286828539046472*x(2)*x(5)+...  
-0.00675586752630500*x(2)*x(6)+0.00728020421706546*x(2)*x(7)+ ...  
-0.00310765354274199*x(3)*x(4)+0.00625780351737866*x(3)*x(5)+...  
+0.0278798647779248*x(3)*x(6)-0.00428271301547854*x(3)*x(7)+ ...  
+0.00272283664663296*x(4)*x(5)-0.00484577641327457*x(4)*x(6)+...  
-0.000902891402887668*x(4)*x(7)-0.0105095080841818*x(5)*x(6)+...  
-0.00886108158310928*x(5)*x(7)+0.0271010623062233*x(6)*x(7)+...  
-0.0487378272619558*x(1)*x(1)+ 0.000480681911074649*x(2)*x(2)+...  
-0.0372976917476566*x(3)*x(3)-0.00197377552190959*x(4)*x(4)+...  
-0.00209489097003346*x(5)*x(5)-0.0763700136324381*x(6)*x(6)+...  
+0.0404104819723614*x(7)*x(7));
```

Amaç fonksiyonu tanımlandıktan sonra genetik algoritmanın parametreleri ve kısıt fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılarak eniyileme gerçekleştirilir.

```
function ga_dt
```

```

ObjectiveFunction = @fitnessfcn;
nvars = 7; % Number of Variables
Re_gir = 4e6; % Reynolds degerini giriniz
eps_gir = 5e-5; % yuzey puruzlulugu degerini giriniz
LogRe = log10(Re_gir);
LogEps = log10(eps_gir);
beq = [LogRe; LogEps]; % esitlik katsayilari
Aeq = [0 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 0 1]; % esitlik sag tarafi
LB = [0.8 3 1 5 5 6 -5]; % Lower Bounds
UB = [2.5 9.5 3.5 15 15 7 -4]; % Upper Bounds
options = gaoptimset('display', 'iter', 'PopulationSize', 200, 'CrossoverFraction', 0.9, 'Generations',
    10000, 'TolFun', 1e-5, 'CrossoverFcn', @crossoverheuristic, 'MutationFcn',
    @mutationadaptfeasible)
[x,fval,exitflag] = ga(ObjectiveFunction,nvars,[],[],Aeq,beq,UB,UB,[],options)

```

Basınç geri kazanım katsayısının standart formülasyonda eksi alındığı göz önüne alınarak değerlendirilir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gizem DEMİREL
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 14.09.1991 – Aydın
E-posta : gizemdemirel13@gmail.com;
gizemdemirel@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2014, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
: 2014, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü (Çift Anadal)
- Yükseklisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016 –	Roketsan Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş.	Mühendis
2014 – 2016	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Su Türbinleri Tasarım ve Test Merkezi	Özel Başarı Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2013	Türk Traktör Ve Ziraat Makineleri A.Ş.	Stajyer
2013	TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi	Stajyer
2012	TAI- Türk Havacılık Ve Uzay Sanayi A.Ş.	Stajyer

YABANCI DİL: İngilizce (İleri düzeyde), Almanca (Temel düzeyde)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Demirel, G.**, Çelebioğlu K., Aradağ S., (2016). CFD-Driven Surrogate-Based Multi-Objective Shape Optimization Of An Elbow Type Draft Tube, *European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES)*, 28-31 August, 2016

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Ayli, U. E., Kaplan, A., Cetinturk, H., Kavurmaci, B., **Demirel, G.**, Celebioglu, K., & Aradag, S. (2015, August). CFD Analysis of 3D Flow for 1.4 MW Francis Turbine and Model Turbine Manufacturing. In *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. V01AT02A002-V01AT02A002). American Society of Mechanical Engineers, 2-5 August 2015.
- **Demirel, G.**, Ayli, E., Celebioglu, K., Tascioglu, Y., & Aradag, S. (2015). Experimental Determination of Cavitation Characteristics of Hydraulic Turbines. *IAENG ICME 2015 The 2015 International Conference of Mechanical Engineering*.(Vol. 2), 1-3 Haziran 2015.,
- Ayancik, F., **Demirel, G.**, Celebioglu, K., Acar, E., & Aradag, S. (2014). CFD Aided Design and Optimization of Francis Turbine Runners. *Bulletin of the American Physical Society*, 59, Kasım 2014.