

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FRANCİS TİPİ TÜRBİN ÇARKININ TERSİNE MÜHENDİSLİK İLE
TASARIMI VE REHABİLİTASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper KAPLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selin ARADAĞ

NİSAN 2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilim Dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 121511145 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Alper KAPLAN** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“FRANCİS TİPİ TÜRBİN ÇARKININ TERSİNE MÜHENDİSLİK İLE TASARIMI VE REHABİLİTASYONU”** başlıklı tezi **06.04.2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

Eş Danışman : **Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kahraman ALBAYRAK (Başkan)**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

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.



Alper Kaplan

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FRANCİS TİPİ TÜRBİN ÇARKININ TERSİNE MÜHENDİSLİK İLE TASARIMI VE REHABİLİTASYONU

Alper Kaplan

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

Danışmanlar: Doç. Dr. Selin Aradağ

Dr. Kutay Çelebioğlu

Tarih: Nisan 2016

Francis tipi su türbini çarkları karmaşık yapıya sahip kanatlar ile donatılmıştır ve özel tasarım programları ile iteratif süreçle tasarlanırlar. Çark kanatları gelen akışı yönlendirebilmek ve performans değerini sağlayabilmek adına dönüşlü ve değişken üç boyutlu profile sahiptir. Bu sebeple çark kanatları için teknik çizim verisi elde etmek imkânsızdır. Özellikle hidroelektrik santral rehabilitasyon çalışmaları için varolan çarkın yeniden tasarımı için tersine mühendislik tasarım yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel tersine mühendislik sürecinin yanı sıra analiz edilebilir bir kanat geometrisi elde edebilmek adına kanat tasarım değişkenlerinin katı model üzerinden belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Francis tipi türbin çarkı için tersine mühendislik tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Geleneksel tersine mühendislik aşamaları özgül hızları farklı iki çark için uygulanmıştır. Geliştirilen tasarım yöntemi tasarımı tarafımızdan (Etü Hidro ekibi) gerçekleştirilen BUSKİ HES çarkına uygulanarak doğrulanmıştır ve kurulu gücün %70'ini sağlayan Kahta HES çarkı için uygulanarak performansa etki eden faktörler üzerinden rehabilitasyon çalışmaları

yürütülmüştür. Rehabilitasyon çalışmaları sonucunda 3539,6 kW güce ve %96,5 verime sahip yeni çark geometrisi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tersine mühendislik, Francis tipi su türbinleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.



ABSTRACT

Master of Science

REVERSE ENGINEERING DESIGN AND REHABILITATION OF A FRANCIS

TURBINE RUNNER

Alper Kaplan

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

Supervisors: Associate Professor Dr. Selin Aradağ

Dr. Kutay Çelebioğlu

Date: April 2016

Francis type hydraulic turbine runners are equipped with complex shaped blades and their blades are iteratively designed with special design programs. Runner blades have rotational and variant three dimensional profiles, in order to direct incoming flow and provide performance values, so it is impossible to obtain technical drawing data. A reverse engineering design methodology is necessary for the redesign of an existing runner geometry especially in the hydroelectric power plant rehabilitation studies. In addition to traditional reverse engineering process, blade design parameters should be determined to obtain an analyzable blade geometry from the solid model. In this study, a reverse engineering design methodology is developed for Francis type hydraulic turbine runners. Traditional reverse engineering steps are applied to two different runners that have different specific speeds. The developed design methodology is verified by applying to BUSKI HEPP runner which is designed by our group (ETÜ Hidro). The verified methodology is utilized for Kahta HEPP which provides 70% of the installed capacity in order to find out the reasons of the lack of performance and

rehabilitation studies are carried out. As a result of rehabilitation studies, a new runner geometry is obtained with power of 3539,6 kW and efficiency of 96,5%.

Keywords: Reverse engineering, Francis type hydraulic turbine, Computational Fluid Dynamics.



TEŞEKKÜR

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

Tez jürisi üyeleri Prof. Dr. Kahraman ALBAYRAK'a, Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU'ya ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER'e zaman ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve jürimde buldukları için teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmalarım bana yardımını hiçbir zaman esirgemeyen Hüseyin ÇETİNTÜRK'e ve yüksek lisans sürecimde her türlü yardımı ve desteği için Ece AYLI'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde bana destek olan ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak beni büyüten sevgili annem Ayşe Ufuk KAPLAN, babam Ahmet Atilla KAPLAN ve ağabeyim Mustafa Can KAPLAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

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 sırasındaki burs için TOBB ETÜ'ye ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.2.1 Tersine Mühendislik	2
1.2.2 Tersine Mühendislik Uygulamaları	4
1.2.3 Francis Tipi Hidrolik Türbinler.....	6
1.3 Tez Planı.....	8
2. TASARIM YÖNTEMİ	11
2.1 Üç Boyutlu Sayısallaştırma	12
2.2 Meridyonel Profil	14
2.3 Kanat Açılı ve Kanat Kalınlığı.....	16
2.4 Türbin Çalışma Prensipleri.....	22
3. HAD YÖNTEMİ	25
3.1 Korunum Denklemleri.....	25
3.2 Türbülans Modeli	26
3.3 Ayırıklaştırma Yöntemi ve Adveksiyon Şemaları	26
3.4 Sınır Koşulları	27
3.5 Sayısal Çözüm Ağı.....	28
4. UYGULAMA	31
4.1 Tarama Uygulaması	31
4.2 Tasarım Uygulaması	35
5. SONUÇLAR	41
5.1 Geometrik Sonuçlar.....	41
5.2 HAD Sonuçları	46
5.2.1 BUSKİ HES	46
5.2.2 Kahta HES.....	49
6. DEĞERLENDİRME	57
KAYNAKLAR	59
EKLER	63
ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tarama tekniklerinin sınıflandırılması.	2
Şekil 1.2 : Francis tipi türbinin temel bileşenleri.	7
Şekil 1.3 : Çarkı oluşturan elemanlar.	8
Şekil 2.1 : Tasarım yöntemi şeması.	11
Şekil 2.2 : Lazer tarama mekanizması.	13
Şekil 2.3 : Yüzey üzerinde lazer çizgisi.	13
Şekil 2.4 : Çark kanadı meridyonel profili.	14
Şekil 2.5 : Özgül hıza bağlı meridyonel profil değişimi [29].	15
Şekil 2.6 : Kesit düzlem üzerinde meridyonel profil.	16
Şekil 2.7 : Orta kesitte kanat eğiklik hattı.	17
Şekil 2.8 : Eğiklik hattı üzerinde kanat açılarının gösterimi.	17
Şekil 2.9 : Konum açısı.	19
Şekil 2.10 : Açık korur dönüşüm görüntü planı.	20
Şekil 2.11 : Hücum ve kuyruk kenarı hız uçgenleri ve akış açıları.	21
Şekil 2.12 : Kanat hücum ve kuyruk kenarı üzerinde açısal momentum hız bileşenleri.	22
Şekil 3.1 : Kanat geometrisi için periyodik ara yüzler.	27
Şekil 3.2 : Çark kanadı çözüm ağı.	29
Şekil 3.3 : Çözüm ağı bağımsızlığı.	29
Şekil 3.4 : (a) 20×10^3 , (b) 100×10^3 , (c) 250×10^3 ve (d) 500×10^3 eleman sayısı için y^+ dağılımları.	30
Şekil 4.1 : Tarama verilerinin emme ve basınç yüzeylerinde karşılaştırılması.	32
Şekil 4.2 : Dönme eksen referans yüzeyleri ve koordinat sistemi.	33
Şekil 4.3 : Düzlemlere yansıtılmış kanat profilleri.	34
Şekil 4.4 : Nokta bulutu ile katı model arasındaki sapma.	35
Şekil 4.5 : BUSKİ HES çarkı meridyonel profili.	36
Şekil 4.6 : Referans kanat üzerinde kesit eğrileri.	36
Şekil 4.7 : BUSKİ HES kanat sarma açısı dağılımı.	38
Şekil 4.8 : BUSKİ HES açık korur dönüşüm görüntü planı.	39
Şekil 4.9 : BUSKİ HES kanat metal açısı dağılımı.	39
Şekil 4.10 : BUSKİ HES kanat kalınlık dağılımı.	40
Şekil 5.1 : BUSKİ HES geometrilerin örtüştürülmesi.	43
Şekil 5.2 : Kahta HES geometrilerin örtüştürülmesi.	43
Şekil 5.3 : BUSKİ HES kuyruk kenarı taç profili düzeltmesi.	44
Şekil 5.4 : Kahta HES kuyruk kenarı düzeltmesi.	44
Şekil 5.5 : BUSKİ HES bilezik kesitinde sarma açısı dağılımı.	45
Şekil 5.6 : BUSKİ HES Kesit 25'te metal açısı dağılımı.	45
Şekil 5.7 : (a) Taç, (b) orta kesit ve (c) bilezikte basınç yüklemeleri.	47
Şekil 5.8 : (a) BUSKİ HES mevcut çark (b) TM çark hız dağılımları ve vektörleri.	48
Şekil 5.9 : (a) BUSKİ HES mevcut çark (b) TM çark statik basınç dağılımları.	48
Şekil 5.10 : 16 derece giriş açısı hız dağılımı.	50

Şekil 5.11 : 16 derece giriş açısı basınç dağılımı.	50
Şekil 5.12 : 16 derece giriş açısı basınç yüklemeleri.	51
Şekil 5.13 : 20 derece giriş açısı hız dağılımı.	51
Şekil 5.14 : 20 derece giriş açısı basınç dağılımı.	52
Şekil 5.15 : 20 derece giriş açısı basınç yüklemeleri.	52
Şekil 5.16 : Kanat üzerindeki basınç yüklemesi.	55
Şekil 5.17 : Kanat orta kesitinde hız dağılımı ve vektörleri.	56
Şekil 5.18 : Kanat orta kesitinde statik basınç dağılımı	56
Şekil Ek 1.1 :Tarama verilerinin emme ve basınç yüzeylerinde karşılaştırılması.	63
Şekil Ek 1.2 :Dönme eksenini referans yüzeyleri ve koordinat sistemi.	64
Şekil Ek 1.3 :Emme ve basınç yüzeylerinde dokunmatik probun taranan bölgeleri.	64
Şekil Ek 1.4 :Emme ve basınç yüzeylerinin tamamlanmış nokta bulutu verileri.	65
Şekil Ek 1.5 :Düzlemlere yansıtılmış kanat profilleri.	65
Şekil Ek 1.6 :Nokta bulutu ile katı model arasındaki sapma.	66
Şekil Ek 2.1 :Kahta HES çarkı meridyonel profili.	67
Şekil Ek 2.2 :Kahta HES çarkı Bladegen meridyonel profili.	68
Şekil Ek 2.3 :Kahta HES kanat sarma açısı dağılımı.	71
Şekil Ek 2.4 :Kahta HES açısı korur dönüşüm görüntü planı.	72
Şekil Ek 2.5 :Kahta HES kanat metal açısı dağılımı.	72
Şekil Ek 2.6 :Kahta HES kalınlık dağılımı.	73
Şekil Ek 3.1 :BUSKİ HES taç profili sarma açısı karşılaştırması.	74
Şekil Ek 3.2 : BUSKİ HES Kesit 25 profili sarma açısı karşılaştırması.	74
Şekil Ek 3.3 : BUSKİ HES orta kesit profili sarma açısı karşılaştırması.	75
Şekil Ek 3.4 : BUSKİ HES Kesit 75 profili sarma açısı karşılaştırması.	75
Şekil Ek 3.5 : BUSKİ HES taç profili metal açısı karşılaştırması.	76
Şekil Ek 3.6 : BUSKİ HES orta kesit profili sarma açısı karşılaştırması.	76
Şekil Ek 3.7 : BUSKİ HES Kesit 75 profili sarma açısı karşılaştırması.	77
Şekil Ek 3.8 : BUSKİ HES bilezik profili sarma açısı karşılaştırması.	77

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : BUSKİ HES kanat profili meridyonel uzunlukları.....	37
Çizelge 4.2 : BUSKİ HES kanat profili aç ı korur meridyonel uzunlukları.	38
Çizelge 5.1 : Kahta HES için farklı kanat geometrilerinin performans değ erleri.....	41
Çizelge 5.2 : Hacimsel karşılaştırma.....	42
Çizelge 5.3 : BUSKİ HES performans değ erleri ve karşılaştırması.	46
Çizelge 5.4 : Kahta HES çarkı performans değ erleri.....	49
Çizelge 5.5 : Kahta HES çark rehabilitasyonu.....	53
Çizelge Ek 2.1: Kahta HES 3 kontrol eğ rili tasarım kanat profili meridyonel uzunlukları.	68
Çizelge Ek 2.2: Kahta HES 7 kontrol eğ rili tasarım kanat profili meridyonel uzunlukları.	69
Çizelge Ek 2.3: Kahta HES 11 kontrol eğ rili tasarım kanat profili meridyonel uzunlukları.	69
Çizelge Ek 2.4: Kahta HES 15 kontrol eğ rili tasarım kanat profili meridyonel uzunlukları.	70
Çizelge Ek 2.5: Kahta HES kanat profili aç ı korur meridyonel uzunlukları.	71

KISALTMALAR

CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HES	: Hidroelektrik Santral
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier – Stokes (Reynolds Averaged Navier - Stokes)
TM	: Tersine Mühendislik



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

A_i	Açı korur meridyonel uzunluk
$C_{\text{lazer çizgisi}}$	Lazer çizgisi uzunluğu
\hat{D}_l	Nokta vektörü
D_1	Çark giriş çapı
D_2	Çark çıkış çapı
EH_i	Eğiklik hattı üzerindeki noktanın konumu
g	Yerçekimi ivmesi
H_d	Türbin düşüsü
L	Prob ile yüzey arası mesafe
M_0	Kesit mutlak sıfır noktası
M_L	Kesit meridyonel uzunluğu
M_i	Eğiklik hattı üzerindeki noktanın meridyonel uzunluğu
M_s	Kesit kuyruk kenarı
M_0	Dönme merkezi etrafındaki momentum
N_r	Mekanik güç
n_s	Özgül hız
O_s	Kesit hücum kenarı
n_{senkron}	Senkron hız
P_d	Türbin gücü
R_i^{eh}	Eğiklik hattı üzerindeki noktanın yarıçapı
r	Çark dönme eksenine radyal uzaklık
Q	Türbin debisi
u_i	Teğetsel hız
V	Akış hız vektörü
V_u	Çevresel hız vektörü
x_i^{eh}	Eğiklik hattı üzerindeki noktanın x- koordinatı
x_i^b	Basınç yüzeyi üzerindeki noktanın x- koordinatı
x_i^e	Emme yüzeyi üzerindeki noktanın x- koordinatı
y_i^{eh}	Eğiklik hattı üzerindeki noktanın y- koordinatı
y_i^b	Basınç yüzeyi üzerindeki noktanın y- koordinatı
y_i^e	Emme yüzeyi üzerindeki noktanın y- koordinatı
z_i^{eh}	Eğiklik hattı üzerindeki noktanın z- koordinatı
z_i^b	Basınç yüzeyi üzerindeki noktanın z- koordinatı

z_i^e	Emme yüzeyi üzerindeki noktanın z- koordinatı
w	Dönel koordinat sisteminde akış hız vektörü
α_1	Su giriş açısı
α_2	Su çıkış açısı
β_i	Eğiklik hattı üzerindeki noktanın metal açısı
β_1	Hücum kenarı metal açısı
β_2	Kuyruk kenarı metal açısı
θ_i	Sarma açısı
δ	Görüntüleme açısı
η	Hidrolik verimi
η_{D_i}	Yüzey vektörü
ρ	Yoğunluk
Γ_1	Çark giriş sirkülasyon
Γ_2	Çark çıkış sirkülasyon
ω	Açısal hız



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Francis tipi türbinlerin en önemli parçası çarktır ve karmaşık şekle sahip kanatlar ile donatılmıştır. Bu tip türbinlerin çark kanatları suyu yönlendirebilmek ve istenen performansı sağlayabilmek adına dönüşlü ve değişken üç boyutlu profile sahiptir. Çark kanatlarının karmaşık yapısından dolayı özel tasarım programları ile iteratif süreçle tasarlanırlar.

Çark kanatlarının karmaşık yapıya sahip olmasından dolayı kanat yapısı için teknik resim verisi elde etmek imkânsızdır. Bu sebeple çoğunlukla HES rehabilitasyon çalışmaları için varolan bir çarkın yeniden tasarlanması gerektiğinde tersine mühendisliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, geometrik tersine mühendislik aşamalarının yanı sıra, bu yöntem ile elde edilen geometri üzerinden kanat tasarım değişkenleri olan kanat meridyonel görünümünün, kanat açılarının dağılımlarının ve kanat kalınlık dağılımının elde edilmesi gereklidir. Tasarım parametrelerinin hesaplanması ile oluşan kanat yapısı için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile doğrulama analizleri yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında amaç; Francis tipi türbin çarklarının tersine mühendislik ile tasarımı için kanat tasarım parametrelerinin çark katı modeli üzerinden elde edilerek HAD yöntemi ile analiz edilebilir kanat geometrisine ulaşılabilecek bir yöntem oluşturmaktır.

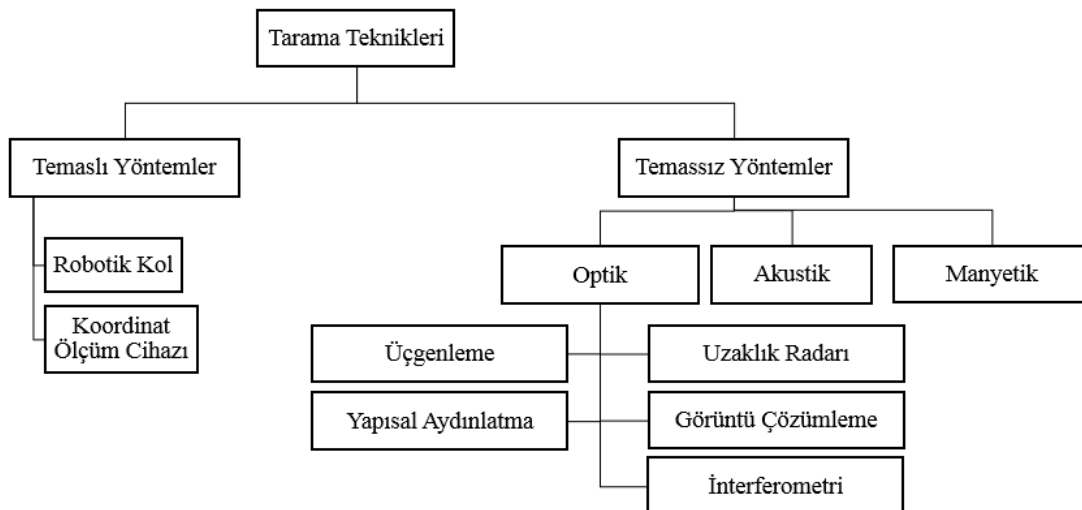
Tez kapsamında, özgül hızları farklı olan iki çark için geometrik tersine mühendislik uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarımı tarafımızdan (ETÜ Hidro ekibi) gerçekleştirilen BUSKİ HES çarkının katı modeli üzerinden analiz edilebilir kanat yapısı elde edilerek geliştirilen tasarım yönteminin doğrulaması yapılmıştır. Tasarım yöntemi doğrulamasından sonra kurulu gücünün %70'ini sağlayan Kahta HES çarkının taranmış geometrisi için yöntem uygulaması yapılarak performansa etki eden sebepler incelenerek rehabilitasyon çalışmaları yapılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Tersine Mühendislik

En genel haliyle, geleneksel mühendislikte, mühendislik modelinden üretilen parçaya geçiş yapılırken, tersine mühendislikte, varolan parçadan mühendislik tasarımı elde edilir. Kumpas mikrometre gibi klasik ölçüm aletleri ile ölçülerinin elde edilmesi imkân dâhilinde olmayan ürünlerin, taranarak bilgisayar ortamında üç boyutlu modellerine ulaşılması tersine mühendislik ile sağlanır. Bir parçanın tasarım bilgileri elde edilerek, parça geliştirilebilir veya üretilebilir hale getirilir. Tersine mühendislik ile elde edilen tasarımın, parçanın kalitesini veya parça verimliliğini arttırmak adına yeniden üretim ve analiz safhaları ile geliştirme çalışmaları yürütülebilir. Genel olarak herhangi bir teknik verisi veya çizimi bulunmayan bir parçanın üretimi için tersine mühendislik kullanılmaktadır [1,2].

Geometrik tersine mühendislik süreci temel olarak üç boyutlu sayısallaştırma yani tarama, tarama verilerinin düzenlenmesi ve katı modelin oluşturulması olmak üzere üç aşamadan oluşur. Yeniden tasarım sürecinin en önemli kısmı parçanın taranmasıdır. Sayısallaştırma işlemi parça yüzeyindeki nokta koordinatlarının elde edilmesi işlemidir. Parça tarama teknikleri temaslı ve temassız olmak üzere ikiye ayrılır. Taranacak geometrinin karmaşıklığına göre hangi yöntemin kullanılacağına karar verilir. Şekil 1.1’de tarama tekniklerinin sınıflandırılması sunulmaktadır [3].



Şekil 1.1 : Tarama tekniklerinin sınıflandırılması.

Temaslı tarama yöntemlerinde mekanik bir kol ucuna yerleştirilen prob yüzeye dokunarak farklı bölgelerden nokta koordinat bilgisi elde edilir. Yüzeye dokunma

zorunluluğundan kaynaklı olarak tarama geometrisi karmaşıklıktıkça temaslı yöntemler verimliliğini yitirmektedir. Bunun yanı sıra temaslı ölçümlerde yarıçap telafisi yapılması gereklidir [4].

Temassız yöntemlerde ışık, ses veya manyetik dalgalar kullanılır. Ölçüm yapılacak bölgeye gönderilen ışınların gidiş dönüş zamanına göre bölge koordinat bilgisi elde edilir. Bu yöntemde taranacak bölgenin yüzey parlaklığı arttıkça veri elde etmek zorlaşır ve alınan verinin doğruluğu azalır. Temassız yöntemler yüzeyle herhangi bir etkileşim olmadığından telafi hesapları gerekmemektedir. Ancak verimli ölçüm alınabilmesi adına tarama işlemi öncesinde tarama derinliği, görüş alanı ve yerleşimden kaynaklanabilecek kapanmalar hesaplanmalıdır. Bazı temassız yöntemler yüksek enerji limitlerinden kaynaklı tıp alanında yapılan tersine mühendislik çalışmalarında kullanılamamaktadır. En yaygın olarak kullanılan temassız tarama yöntemi lazer tarama yöntemidir. Tarama cihazı tarafından yüzeye gönderilen lazer ışınları yüzeyden yansıması kamera tarafından algılanır ve lazer çizgisi üzerindeki noktaların koordinat bilgileri elde edilir [5,6].

Her iki tarama tekniği karşılaştırıldığında temaslı yöntemlerin doğruluk mertebesi daha yüksektir ancak nokta koordinat bilgisi okumalarından dolayı temassız yöntemlere göre daha yavaş yüzey bilgisine ulaşırlar. İki tarama yönteminin de doğası gereği keskin köşelerde elde ettiği sonuçlar yeteri kadar güvenilir değildir bu sebeple keskin köşe taramaları veri düzenleme esnasında dikkatle incelenmelidir. Tarama esnasında karşılaşılabilecek başlıca problemler; kalibrasyon ve tutarlılık, erişilebilirlik, kapatılma, çoklu görüntüleme, gürültü, eksik veri ve pürüzlülük olarak sıralanabilir. Bu problemleri engellemek adına tarama sırasında veya sonrasında gürültü filtreleme, nokta sayısını seyreltme veya yüzey düzeltme gibi işlemler yapılır [1,7].

Tarama işleminden elde edilen nokta bulutunun katı modele geçiş yapılabilmesi için serbest formlu yüzeyler haline getirilmesi gerekmektedir. Genel olarak yüzey ve doğru yöntemi olmak üzere iki farklı yüzey yaklaşım yöntemi bulunmaktadır. Eğer temaslı yöntem kullanılmış ise yarıçap telafisi yüzey yaklaşım yöntemleri uygulanmadan önce ham nokta bulutu verisine uygulanmalıdır. Doğru yönteminde tarama verisinden yapı eğrileri elde edilerek oluşturulan ağ yapısı üzerinden yüzeye geçiş yapılır. Yüzey yönteminde ise komşu noktaların birleştirilmesi ile elde edilen ağ yapısı ile yüzey tanımlanır [8,9]. En çok kullanılan yüzey yaklaşım algoritmalarını sıralamak

gerekirse, sınırlayan küpler algoritması, yüzey normalleri, kübik eğri interpolasyonu, parçalı kübik interpolasyon, B-spline yüzey yerleştirme, NURBS ve rasyonel Bezier ve B-spline eğrileridir. Oluşturulacak yüzeyin karmaşıklığına göre yüzey oluşturmada kullanılacak algoritma seçilir [10,11].

Yüzey tamamlama yöntemleri varolan parçaların eksiklerinin giderilmesi için de oldukça önemlidir. Tarama ile elde edilen nokta bulutu verisinde parçanın orijinal halinde bulunan eksikliklerin giderilmesi için yüzey tamamlama algoritmaları kullanılır. Bu amaçla kullanılan en yaygın yöntem eksik bölgeye geometrik olarak yakın bölgelerin ölçülerinin belirlenerek, eksik bölümlere benzer bir yapı kazandırılmasıdır. Dönüştürülebilir ve kesin profillerde ise yüzey uzatma veya yüzey kesiştirme yöntemleri kullanılarak eksik veriler tamamlanır. Elde edilen serbest formlu yüzey bilgisi ile katı model programları kullanılarak var olan parçanın üç boyutlu katı modeli elde edilir. Ulaşılan model üzerinden üretime geçilebilir veya gerekli ise iyileştirme çalışmaları yürütülebilir [12,13].

1.2.2 Tersine Mühendislik Uygulamaları

Sansoni ve Docchio [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmanın amacı geniş yüzeylerde yapılan tersine mühendislik çalışmaları için optik tarayıcı sistemlerin uygulama kolaylığını göstermek ve üçgen ağ yapısı ile oluşturulan yüzeylerin kalitesini test etmektir. Bu amaçla geniş yüzeylere örnek olması amacıyla tarihi yarış otomobilinin gövdesi üzerinde çalışılmıştır. İşlem sürecinde yarı otomatik ve taşınabilir optik tarayıcı kullanılmıştır. Tarama sonucu elde edilen nokta bulutu verisi otomobil gövdesinin detaylarının en güvenilir şekilde elde edilebilmesi adına üçgen ağ yapısında yüzey formları olarak birleştirilmiştir. Belirlenen yüzey formu üzerinden katı modele iki aşamada geçiş yapılmıştır. Öncelikli olarak araştırmacı tarafından belirlenen parametreler ile kullanılan program tarafından otomatik katı model oluşturulmuştur. Oluşturulan otomatik yüzey üzerinden yüzey yamaları ile katı modelin son hali verilmiştir ve 1:10 ölçekli kopya model otomobil elde edilmiştir.

Lin ve diğerleri [15], özelleştirmiş yapay eklem bağlantısı yapımı ihtiyacını karşılayabilmek ve üretim döngüsünün süresinin azaltılması için örnek bir protezden bilgisayar modeli elde edebilmek adına tersine mühendislik yöntemine başvurmuştur. Koordinat ölçüm cihazı ile elde edilen nokta bulutu verisi tersine mühendislik programı kullanılarak serbest formlu yüzey haline getirilmiştir. Oluşturulan serbest

formlu yüzeyler kesiştirilerek veya uzatılarak katı modele geçiş yapılmıştır. Bu sayede farklı yapıya sahip protezlerin bağlantıları için bir veri tabanı oluşturulması sağlanmıştır ve üretim süreci kısaltılmıştır.

Chen ve Lin [16] çalışmalarında buhar üretmekte kullanılan nükleer santral türbin kanadı için tersine mühendislik tasarım yöntemini kullanmıştır. Türbin kanadı serbest formlu kanat yapısı ve uçayaklı kanat kökünden oluşmaktadır, çalışmada serbest formlu kanat yapısı üzerinde durulmuştur. Nokta bulutu verisinden yüzeye geçiş için sırası ile vizyon destekli yüzey üçgenleme ve model bazlı adaptif sayısallaştırma işlemleri uygulandıktan sonra oluşturulan yüzeyler birleştirilerek katı model elde edilmiştir. Serbest formlu kanat yüzeyi çıkıntılı yüzeylerin katı modele dâhil edilmemesi için on farklı bölüme ayrılmıştır ve bu bölümler integral yaklaşımı kullanılarak birleştirilmiştir.

Quintero ve diğerleri [17] çalışmalarında, Kolombiya'da kurulu bir küçük ebatlı Francis tipi su türbininin beş ana parçasının yeniden tasarımı için tersine mühendislik yöntemine başvurmuşlardır. Geometrik modelleme teknikleri yerine, tersine mühendislik aşaması olan sayısallaştırma yöntemi kullanılarak teknik çizimlerde eksik olan bölümler tamamlanmıştır. Elde edilen geometriler yardımı ile öncelikli olarak HAD analizi doğrulaması yapılmıştır, daha sonrasında iyileştirme çalışmalarının yürütüleceği HAD analizlerine başlanmıştır ve bu analizler yardımı ile parçaların kalan ömürlerinin hesaplanması yapılmıştır.

Asvapoositkul ve Amphonkiat [18] tarafından gerçekleştirilen çalışmada üç boyutlu bilgisayar destekli tersine yöntem, 0,78 m çaplı tek kademeli aksenal akışlı kompresör için kullanılmıştır. Geometrik parametrelere göre belirlenen kanat geometrisi gözlenen girdap dağılımına göre yeniden düzenlenmiştir. Yapılan bu düzenleme ile kanat profili boyunca akışın kanat yapısı ile uyum göstermesi sağlanması amaçlanmaktadır. Sonuç olarak elde edilen kanat geometrisi ile çalışma noktasında orta yüklemeli kanat yapısı elde edilmiştir ve analitik yöntem ile elde edilen sonuçlarla neredeyse birebir örtüşen sonuçlar elde edilmiştir.

Zangeneth ve diğerleri [19], çalışmalarında kanat açılarını kullanmak yerine, akıştaki girdapların yarattığı sirkülasyonlar ve akış doğrultusu boyunca kanat kalınlık değişimi yardımı ile kanat eğiklik hattını hesaplamışlardır. Sirkülasyon dağılımı yardımı ile aksenal ve karışık akışlı rotor için oluşturulan geometri sonucunda ikincil akışların

etkileri azalmıştır ve rotor çıkışında üniform bir çıkış alanı elde edilmiştir. Aynı yöntem köşelerdeki akış ayrılmalarını önlemek amacı ile vanalı yayıcı için uygulanmıştır ve basınç geri kazanımında %33'lük iyileştirmeye ulaşılmıştır.

Yin ve diğerleri [20] tarafından gerçekleştirilen çalışmada tersine mühendislik ile varolan bir pompa türbinin basınç yüklemeleri elde edilerek yeni tasarımda benzer basınç dağılımı kullanılması amaçlanmaktadır. 200 m düşüye sahip çark üzerinde çalışılarak hesaplanan basınç yüklemeleri ve meridyonel dağılım, 500 m düşüye sahip yeni çark için ön tasarım olarak kullanılmıştır. Yeni tasarım için HAD analizleri yardımı ile doğrulama yapılmıştır. Üretilen prototip üzerinden test çalışmaları yürütülerek tepe diyagramı ile çalışma eğrileri elde edilmiştir.

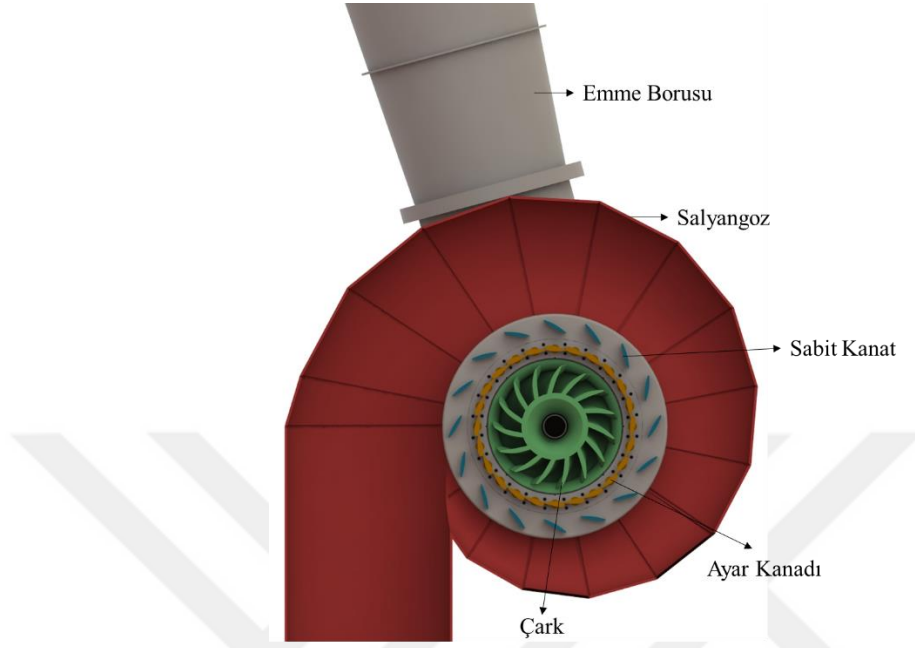
Goto ve diğerleri [21], pompaların hidrolik kısımları olan rotoru, yayıcısı, salyangozu ve dönüş kanalı için bilgisayar destekli tasarım (CAD) yöntemi geliştirmişlerdir. Bu amaçla üç boyutlu geometrik modelleme, otomatik ağ yapısı oluşturma, HAD analizleri ve üç boyutlu tersine tasarım yöntemleri kullanılmıştır. Kanat yapısının tasarlandığı kanat tasarım sistemi ve akış alanlarının tasarlandığı kanal tasarım sistemi olmak üzere yöntem ikiye ayrılmaktadır. Kanat tasarım yönteminde kanat meridyonel profili belirlendikten sonra sirkülasyon tabanlı üç boyutlu tersine tasarım yöntemi kullanılarak kanat kalınlık dağılımı, kanat sayısı ve kanat açısı dağılımları elde edilmiştir. Tasarımın bu ayağında HAD analizleri için yarı otomatik ağ yapısı oluşturularak HAD yöntemi ile kanat geometrisi iyileştirme çalışmaları yürütülmüştür.

1.2.3 Francis Tipi Hidrolik Türbinler

Hidrolik güç kullanılarak üretilen enerjiye hidroelektrik enerji adı verilir ve enerji üretimi hidroelektrik santraller yardımı ile yapılır. Hidroelektrik santraller ile dünyanın elektrik ihtiyacının yaklaşık olarak %17'si karşılanmaktadır. Hidroelektrik santrallerdeki enerji dönüşümünü hidrolik türbinler sağlamaktadır [22, 23].

Hidrolik türbinler çalışma prensiplerine göre itki tipi ve tepki tipi olmak üzere ikiye ayrılır. Francis tipi türbinler geniş çalışma aralığında yüksek verimlere sahip olmalarından dolayı en çok tercih edilen tepki tipi türbinlerdir. Her türlü düşü ve özgül hız değerine uyum sağlayabilmelerinden dolayı sıklıkla kullanılmaktadırlar. Francis tipi türbinler genel olarak dikey eksenli olarak kullanılırsalar da, bazı durumlarda yatay eksenli olarak tercih edilebilirler [24,25].

Francis tipi türbinlerin salyangoz, sabit kanat, ayar kanatları, çark ve emme borusu olmak üzere beş temel parçası bulunmaktadır. Şekil 1.2’de Francis tipi türbinlerin temel bileşenleri gösterilmektedir.



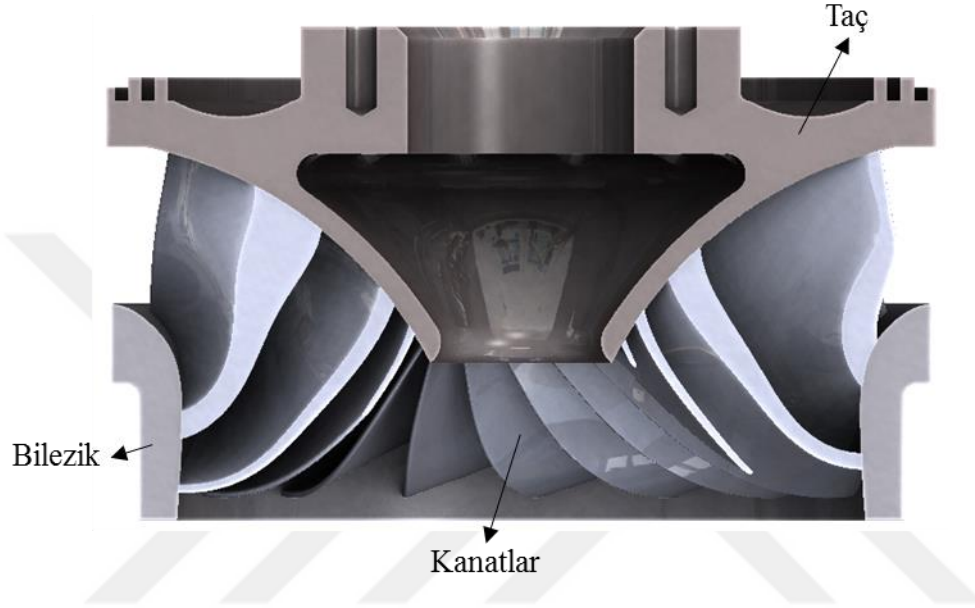
Şekil 1.2 : Francis tipi türbinin temel bileşenleri.

Salyangoz suyun türbine ilk girdiği parçadır ve çarkı çevreleyen yapıya sahiptir. Salyangozun görevi, akışı sabit kanatların girişinde çevresel hız dağılımları aynı olacak şekilde yönlendirmektir, bu sebeple salyangoz kesit alanı akış doğrultusunda azalmaktadır. Salyangozu terk eden su sabit kanatlara ulaşır. Sabit kanatların görevi, salyangozdan gelen akışı yönlendirerek en az hidrolik kayıpla ayar kanatlarına uygun açıyla girmesini sağlamaktır. Bunun yanı sıra salyangozda ve türbin kapaklarında meydana gelen basınç yükleri sabit kanatlar tarafından taşınır. Ayar kanatları kendi eksenleri etrafında dönerek akış alanını değiştirerek debiyi dolayısı ile türbinde üretilen gücü kontrol ederler. Akışın uygun açı değeri ile çarka ulaşması ayar kanatları ile sağlanır [26].

Ayar kanatlarını terk eden su çarka ulaşır. Çarka radyal olarak giren akış çarkı eksenel olarak terk eder. Suyun yönlendirilebilmesi amacı ile çark karmaşık yapıda kanatlar ile donatılmıştır ve kanatlar üzerinde akış üç boyutlu ve dönüşlü yapıya sahiptir. Kanadın kesit görüntüsü ince kanat yapısındadır. Bu durumda su kanatlar üzerinden akarken bir tarafta yüksek basınç bölgesi diğer tarafta ise düşük basınç bölgesi oluşacaktır ve kaldırma kuvveti olarak sonuçlanacaktır. Buna ek olarak çark çıkışında

kepçeye benzer yapı su çarptığı zaman itki kuvvetine sebep olacaktır. Kanatlar üzerinde oluşturan kaldırma ve itki kuvvetleri çarkın dönmesini sağlayacaktır [26, 27].

Çark; taç, bilezik ve kanatlar olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Taç, çarkın jeneratör şaftına bağlandığı, bilezik ise; akış içerisinde girdap oluşumunu önlemek için kanat çıkışlarında yer alan kısımdır. Şekil 1.3'te çarkı oluşturan elemanlar görülmektedir.



Şekil 1.3 : Çarkı oluşturan elemanlar.

Francis tipi türbinler özgül hızlarına göre düşük, orta ve hızlı olmak üzere üçe ayrılırlar. Özgül hızdaki değişime göre çark kanatlarının yapısı farklılık göstermektedir. Yüksek özgül hızlarda radyal olarak giren akışın aksenal olarak yönlenebilmesi için daha uzun ve dar kanat yapısı görülürken, özgül hız düştükçe kanat yapısı daha kısa ve geniş bir hal almaktadır [28].

Çarktan çıkan su emme borusuna girer. Giderek artan kesit alanıyla, çarktan minimum enerjiyle çıkan suyun basıncının, kuyruk suyuna gelene kadar artması, yani maksimum geri kazanım sağlanır. Emme borusu girişinde basınç atmosferik basıncın altına düşürülerek verimliliğin artması sağlanır [29].

1.3 Tez Planı

Bu çalışmada, Francis tipi türbinlerin en önemli parçası olan çark için varolan çark geometrisinden analiz edilebilir kanat geometrisinin elde edilebilmesi için tersine mühendislik uygulaması anlatılmıştır.

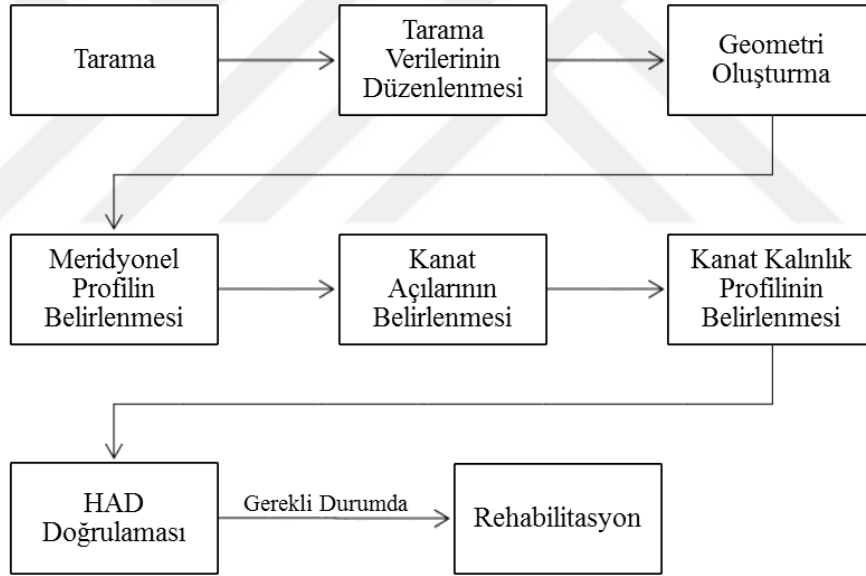
1. bölümde, geleneksel tersine mühendislik, turbo makineler için tersine mühendislik ve Francis tipi türbinler için kısa literatür özeti verilmiştir. 2. bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan tasarım yönteminin basamakları ve temel tasarım parametreleri ile türbin çalışma prensibi açıklanmıştır. 3. bölümde HAD analizlerinde kullanılan denklemler, türbülans modeli, ayırıklaştırma yöntemi, adveksiyon şemaları, sınır koşulları ve sayısal çözüm ağları anlatılmıştır. 4. bölümde tarama ve geliştirilen tasarım yöntemi için uygulama projeleri anlatılmıştır. 5. bölümde tasarım yönteminin uygulandığı projelerde geometrik ve HAD analizleri sonuçları verilmiştir. 6. bölümde tez kapsamında yapılan çalışmaların özeti ile literatüre katkısı sunulmuştur.





2. TASARIM YÖNTEMİ

Francis tipi türbin çarkları, üzerindeki akışın üç boyutlu ve dönüşlü olması ve radyal yönde gelen akışı aksenal olarak iletmeleri sebebi ile karmaşık yapıya sahip geometrilerdir [26]. Bu tip türbin çarklarının kanatları özel tasarım programları ile yenilemeli süreçle tasarlanırlar. Kanat geometrisinin karmaşık yapıda olmasından dolayı varolan geometrinin yeniden yapılandırılabilmesi için tersine mühendisliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak tasarım sürecinin tamamlanabilmesi için bu yöntem ile elde edilen geometri üzerinden tasarım parametreleri elde edilerek tasarım programına aktarılması gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 2.1’de verilen tasarım yöntemi geliştirilmiştir.



Şekil 2.1 : Tasarım yöntemi şeması.

Tasarım yönteminin ilk adımı çark kanadının taranmasıdır. Varolan çarkın katı modelinin elde edilebilmesi için öncelikli olarak kanat geometrisinin nokta bulutu elde edilmelidir. Nokta bulutunun elde edilmesinde, kanat geometrisinin karmaşıklığı ve kanatların yerleşimi sebebiyle temaslı ve temassız yöntemlere birarada ihtiyaç duyulmaktadır.

İkinci aşamada, elde edilen nokta bulutu verisi üzerinden katı modele geçiş yapmak için tarama verilerinin düzenlenmesi gerekmektedir. Katı modele geçiş yapabilmek için tarama verisinden gürültü kaynaklı problemler giderilmelidir ve elde edilen

verideki nokta sayısı azaltılmalıdır. Yüzey elde etmek için nokta bulutu verisinden üçgen ağ yapısı şeklinde yüzey formu oluşturulur. Elde edilen serbest formlu yüzeylerden katı model elde etmek için farklı kesitlere kanat profili yansıtılır ve bu profiller birleştirilerek katı modele geçiş yapılır. Nokta bulutunda filtreleme işlemleri ve katı model oluşturma çalışmaları tersine mühendislik programı Geomagic Design X [30] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yeniden tasarım sürecinin tamamlanabilmesi için tasarım parametrelerinin oluşturulan katı model üzerinden belirlenmesi gereklidir. Kanadın, tasarım programına aktarılabilmesi için kanat meridyonel profili, kanat açıları ve kanat kalınlık dağılımı belirlenmelidir. Kanadın yeniden tasarım sürecinde turbomakine kanat tasarımı için özelleşmiş ANSYS Bladegen [31] modülü kullanılmıştır.

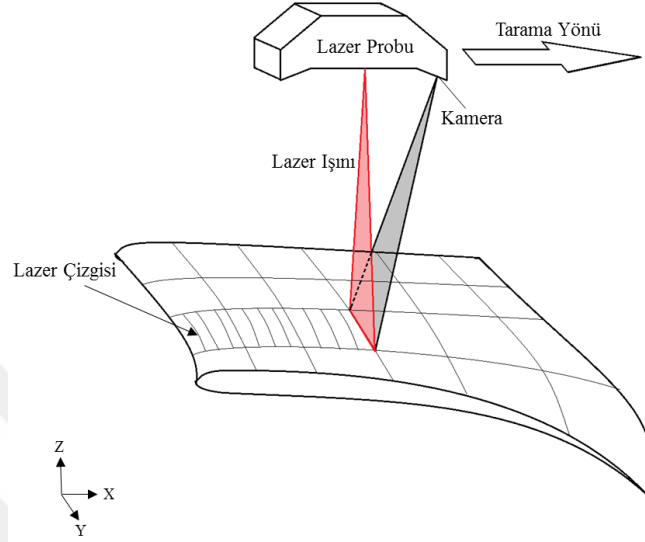
Elde edilen geometrinin uygunluğunun araştırılması için HAD analizleri ile doğrulama yapılmalıdır. Yapılan doğrulama analizleri sonucunda, elde edilen yeni kanat geometrisinin debi, düşü, verim ve güç değerlerinin çarkın performans verileri ile örtüşmesi gereklidir. Doğrulama analizlerinden sonra taranmış kanat geometrisi ile elde edilen yeni kanat geometrisi ile hacimsel kıyaslama yapılarak tasarım süreci sonlandırılır. Yapılan doğrulama adımlarından sonra çarkın performansını iyileştirmek için rehabilitasyon çalışmaları yürütülebilir.

2.1 Üç Boyutlu Sayısallaştırma

Geleneksel mühendislikte süreç parça tasarımı ile başlarken, geometrik tersine mühendislikte süreç var olan parçanın şeklinin bilgisayar ortamına aktarılması ile başlar. Özellikle serbest formlu yüzeylere sahip parçaların şekilleri tersine mühendislik ile elde edilir. Fiziksel bir parçanın üç boyutlu sayısallaştırılması geometrik tersine mühendislik sürecinin esas unsurudur. Türbin çarkları karmaşık yapıda ve bilgisayar modeline geçiş yapmaya yeterli teknik verileri olmayan parçalar olmaları sebebiyle üç boyutlu sayısallaştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Üç boyutlu sayısallaştırma işlemi parçanın taranması ve verilerin düzenlenmesidir.

Bir parçanın üç boyutlu sayısallaştırılmasının ilk adımı taramadır. Çark geometrisinin karmaşıklığı ve boyutlar sebebi ile ağırlıklı olarak temassız yöntemler kullanılmaktadır. Ancak kanat sayısına ve kanat yapısına bağlı olarak temassız ve temaslı yöntemlerin bir arada kullanıldığı durumlar olmaktadır.

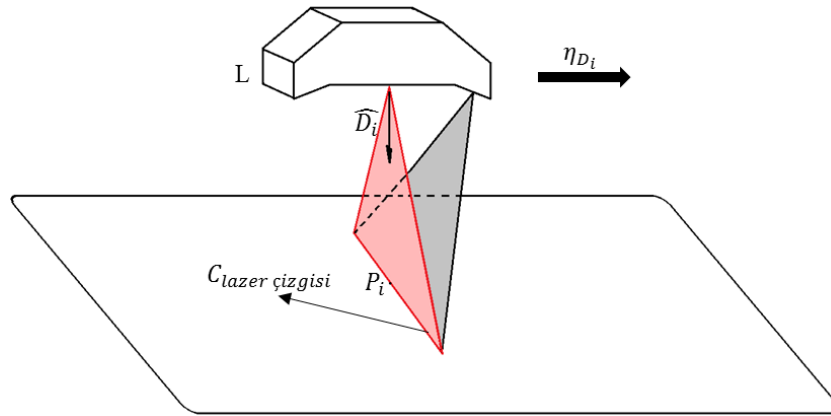
Temassız yöntem olarak kullanılan üç boyutlu lazer tarama işleminde, lazer çizgisi yüzeye gönderilir ve yüzeyden yansıyan ışın kamera ile algılanır. Görüntü işleme ve optik üçgenleme ile lazer çizgisi üzerindeki her bir noktanın üç boyutlu koordinatları elde edilir. Şekil 2.2’de çark kanadı üzerinde lazer tarama mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Lazer tarama mekanizması.

Şekil 2.3’te görüldüğü üzere lazer çizgisi uzunluğu; görüntüleme açısının, prob ile yüzey arasındaki mesafenin, lazer ışının ölçüm alınacak noktaya vektörünün ve probun yüzeye paralel vektörünün bir fonksiyonudur [5].

$$C_{lazer\ çizgisi} = F(L, \delta, \widehat{D}_i, \eta_{D_i}) \quad (2.1)$$



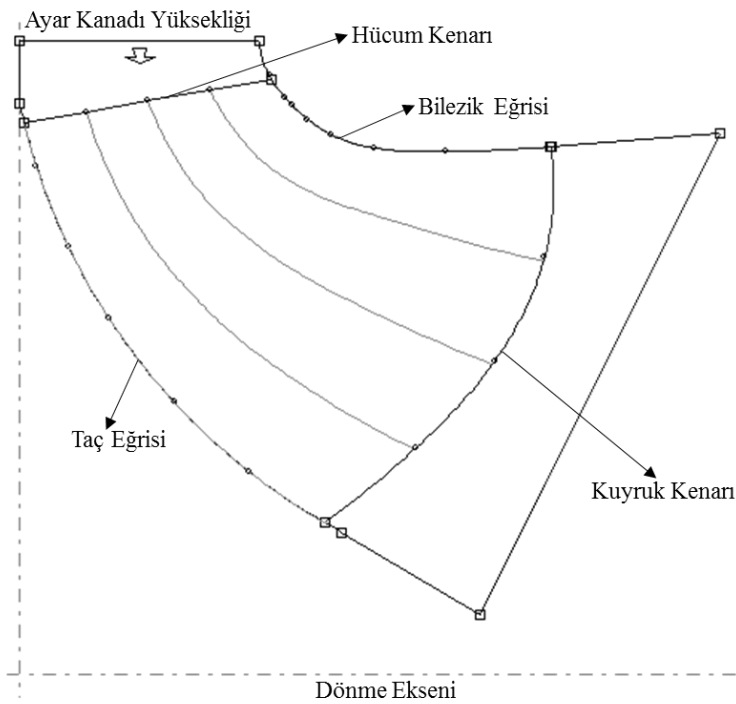
Şekil 2.3 : Yüzey üzerinde lazer çizgisi.

Geometrik duruma bağlı olarak temaslı yöntem kullanılması gerektiğinde, dokunmatik prob merkezine göre ölçüm yaptığından her iki yöntemden gelen verilerin aynı düzlemde olması için yarıçap telafisi gereklidir.

Tarama işleminden elde edilen nokta bulutundan yüzey elde edilebilmesi için tarama verilerinin düzenlenmesi gereklidir. Bunun nedeni, tarama esnasında alınabilecek olan tekrar eden noktaların ve yansıma nedeni ile meydana gelen gürültülerin önüne geçilmelidir. Bu amaçla nokta bulutundaki noktalar filtrelenerek eş mesafeli noktalar ile yüzeye geçiş yapılır. Tanımlanan eş mesafeli noktalar yardımı ile komşu noktalar birleştirilerek üçgen ağ yapısı şeklinde serbest formlu yüzey oluşturulur. Yüzey formundan katı modele ulaşmak için, kanat yüzeyini kesen eşit mesafeli düzlemlere kanat profili yansıtılır, bu profillerin birleştirilmesi ile katı modele geçiş yapılır. Elde edilen katı model üzerinden kanat tasarımı için gerekli parametreler elde edilmelidir.

2.2 Meridyonel Profil

Çark kanadının geometrik özelliklerini ve akış alanı sınırlarını tanımlamada kullanılan, çark kanat profilinin radyal düzleme olan iz düşümü meridyonel profil olarak tanımlanır. Geometrik tanımlamaları içermesinden kaynaklı çark tasarımı ve türbin performansı için önemli bir tasarım parametresidir [32]. Bu tanımlama; çark giriş ve çıkış çaplarını ve hücum kenarı, kuyruk kenarı, taç ve bilezik eğrileri ile birlikte taç ve bilezik eğrileri arasında yer alan açı tanımlamada kullanılan yardımcı eğrileri içerir. Şekil 2.4'te üç kontrol eğrili meridyonel profilin içerdiği geometrik tanımlamalar gösterilmektedir.



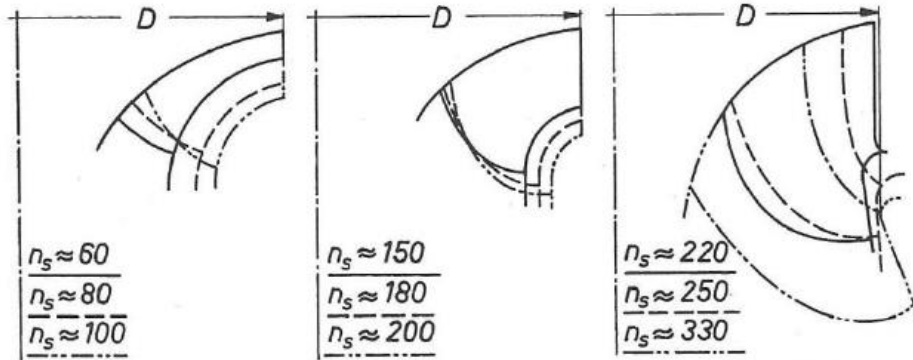
Şekil 2.4 : Çark kanadı meridyonel profili.

Meridyonel profil tanımlaması özgül hıza bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Özgül hız, n_s , turbo makineleri nitelendirmede kullanılan sayıdır ve bir türbinin birim düşüye karşılık üretebileceği birim güce gerekli çark dönüş hızı olarak tanımlanır. Denklem 2.2’de özgül hız denklemi verilmiştir.

$$n_s = n_{senkron} \frac{P_d^{0.5}}{H_d^{1.25}} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de yer alan $n_{senkron}$ çarkın rpm cinsinden dönüş hızını, P_d kilovat cinsinden türbin gücünü ve H_d metre cinsinden türbin düşüsünü ifade etmektedir.

Çarkın görevi olan radyal olarak gelen akışın aksel yönlendirilmesi için özgül hız arttıkça taç kısmından bilezik kısmına doğru kanat uzayacaktır. Özgül hızın azaldığı durumlarda, kanat hücum kenarından kanat kuyruk kenarına doğru genişleme görülecektir [26, 28]. Farklı özgül hızlar için meridyonel kesit değişimi Şekil 2.5’te verilmiştir.

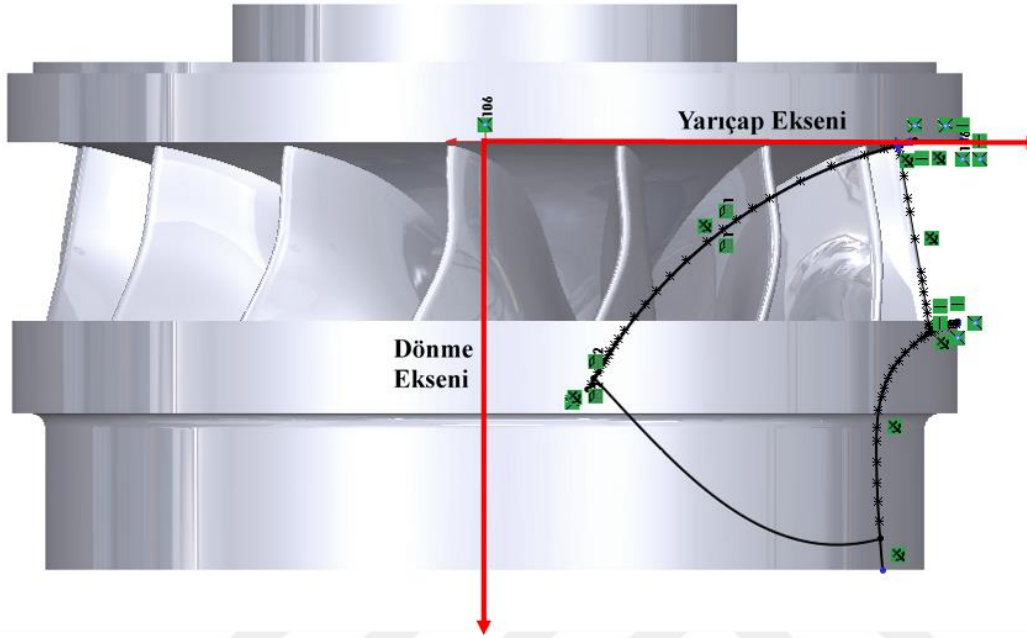


Şekil 2.5 : Özgül hıza bağlı meridyonel profil değişimi [33].

Meridyonel profildeki özgül hıza bağlı değişim üç boyutlu sayısallaştırma işlemi de doğrudan etkilemektedir. Yüksek özgül hıza sahip çark kanatları, kanat hücum kenarından kanat kuyruk kenarına doğru daha kısa olmasından ve kanat boyunun uzun olmasından dolayı lazer tarama işleminde eksik veri olma ihtimali azalmaktadır. Özgül hız düştükçe kanat girişten çıkışa doğru uzadığından ve aksenelliği sağlamak için değişken profile sahip olmasından ötürü lazer tarama işleminde eksik veri olma ihtimali artmaktadır. Bu durumda temaslı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Tarama verisinden elde edilen katı model üzerinden, çark dönme eksenine paralel kesit alınarak meridyonel profil belirlenir. Kanat hücum ve kuyruk kenarlarının eğrilerinin elde edilebilmesi için bu kenarları kesen düzlemler üzerine eğrilerin yansıtılması

gerekmektedir. Aynı ayrı elde edilen eğriler tek bir düzlemde birleştirilerek ve bu düzleme taç ve bilezik eğrileri de yansıtılarak meridyonel görünüm elde edilir. Katı model üzerinde meridyonel profilin kesite yansıtılmış hali Şekil 2.6’da gösterilmektedir.

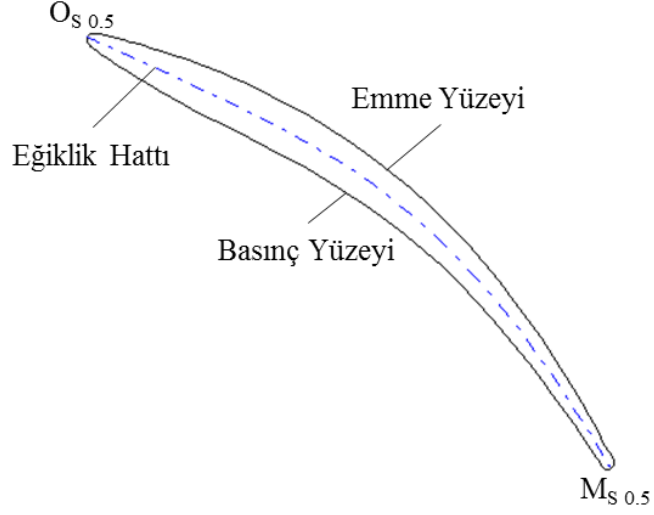


Şekil 2.6 : Kesit düzlem üzerinde meridyonel profil.

Meridyonel profilin bileşen eğrileri nokta bulutu olarak tasarım programı Ansys BladeGen’ e aktarılır. Bu nedenle, katı model üzerinde tasarım programındaki benzer bir koordinat sistemi tanımlanmalıdır. Taç ve bilezik eğrileri arasında açı tanımlamada kullanılan yardımcı eğriler tanımlanır. Taç, bilezik ve bu kontrol eğrileri üzerinden kanat hücum kenarından kanat kuyruk kenarına doğru kanat açıları tanımlanır. Bu eğrilerin profilleri çark geometrisi üzerine yansıtılarak kanat açılarının belirleneceği kesitler elde edilir.

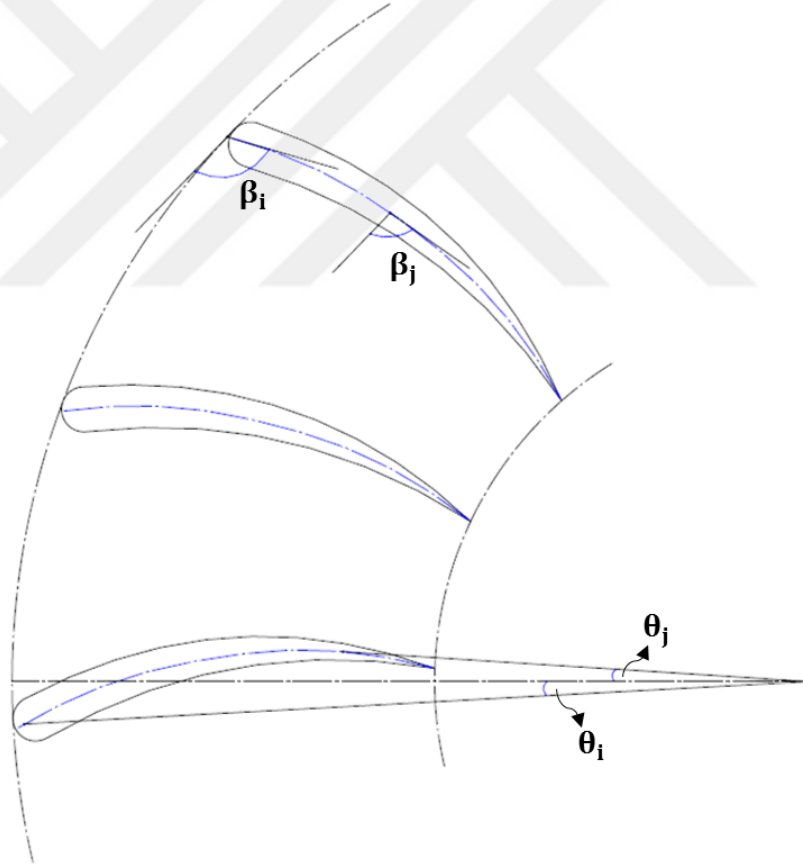
2.3 Kanat Açılı ve Kanat Kalınlığı

Çark kanatlarının, suyu yönlendirebilmek için dönüşlü ve değişken yapıya sahip olmalarından dolayı, bu yapıyı kazandırmak için iki farklı açı tanımlaması vardır. Sarma açısı (teta), silindirik koordinat sistemindeki konum açısı tanıımıdır. Metal açısı (beta) ise kanadın şekil açısı veya büküm açısıdır. Her iki açı da kanadın eğiklik hattı üzerinden belirlenmektedir. Şekil 2.7’de gösterilen orta kesit kanat eğiklik hattı üzerinde; “ $O_{S 0,5}$ ” orta kesit kanat hücum kenarını, “ $M_{S 0,5}$ ” ise orta kesit kanat kuyruk kenarını göstermektedir.



Şekil 2.7 : Orta kesitte kanat eğiklik hattı.

Kanat eğiklik hattı üzerinde kanat açılarının gösterimi Şekil 2.8’de yer almaktadır.



Şekil 2.8 : Eğiklik hattı üzerinde kanat açılarının gösterimi.

Kanat açılarının belirlenebilmesi için kanat eğiklik hattının uzunluğunun belirlenmesi gereklidir. Eğiklik hattı üzerindeki noktaların konumu, kanat hücum kenarından kanat kuyruk kenarına, kanadın basınç ve emme tarafından birbirine karşılık gelen noktaların koordinatlarının ortalaması alınarak aşağıdaki gibi belirlenir.

$$x_i^{eh} = \frac{x_i^b + x_i^e}{2} \quad (2.3)$$

$$y_i^{eh} = \frac{y_i^b + y_i^e}{2} \quad (2.4)$$

$$z_i^{eh} = \frac{z_i^b + z_i^e}{2} \quad (2.5)$$

$$EH_i = \sqrt{(x_i^{eh})^2 + (y_i^{eh})^2 + (z_i^{eh})^2} \quad (2.6)$$

$$R_i^{eh} = \sqrt{(x_i^{eh})^2 + (y_i^{eh})^2} \quad (2.7)$$

Kanat kesitinin meridyonel uzunluğu, M_L , kanat hücum kenarı ile kanat kuyruk kenarı arasındaki mesafedir ve kanat kuyruk kenarı uzunluğuna eşittir. Meridyonel uzunluk, kanadın dönüşlü ve üç boyutlu değişken profile sahip olmasından dolayı her kesit için farklılık gösterir. Her kesit için kanat hücum kenarı, M_O , mutlak sıfır olarak kabul edilir ve eğiklik hattı üzerindeki noktaların meridyonel uzunlukları mutlak sıfıra göre hesaplanır.

$$M_{i+1} = M_i + \sqrt{(EH_{i+1})^2 + (EH_i)^2} \quad (2.8)$$

$$M_O = 0$$

$$M_L = M_{L-1} + \sqrt{(EH_L)^2 + (EH_{L-1})^2} \quad (2.9)$$

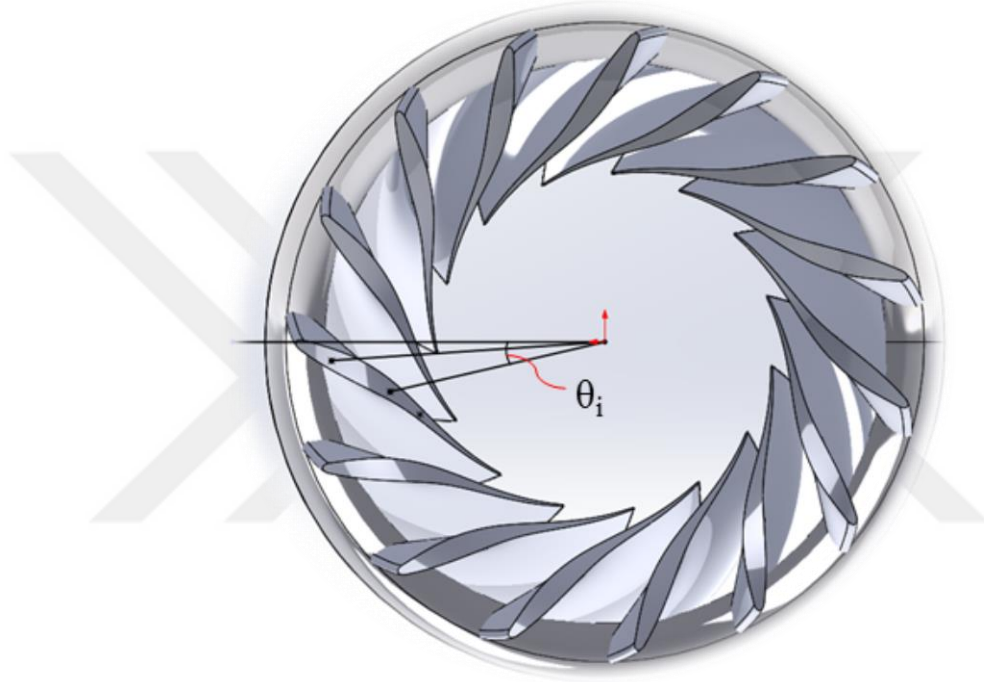
Açı tanımlamasındaki sapmaları engellemek ve farklı kesitlerde aynı meridyonel tanımı kullanabilmek adına kesit meridyonel uzunluğunun boyutsuzlaştırılması gereklidir. Bu amaçla kanat kesiti boyunca eğiklik hattı; kanat hücum kenarı sıfır ve kanat kuyruk kenarı yüz olacak şekilde yüzdelik parçalara ayrılarak yüzde meridyonel uzunluk belirlenmelidir.

$$\%M_i = \frac{M_i}{M_L} * 100 \quad (2.10)$$

$$\%M_O = 0$$

$$\%M_L = 100$$

Kanat eğiklik hattı boyunca eşit mesafeli noktalar tanımlanarak kesit boyunca kanat sarma açıları belirlenmelidir. Meridyonel profil tanımından gelen taç, bilezik ve kontrol eğrileri yardımı ile katı model üzerinden kesitler alınarak konum açılarının belirleneceği kanat kesiti elde edilmelidir. Kanat sarma açısı, eğiklik hattı üzerindeki noktaların taç tarafından bakıldığında yarıçap eksenine ile yaptığı açıdır. Şekil 2.9'da orta kesitte eğiklik hattı üzerinde bir noktanın konum açısı gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Konum açısı.

Katı model üzerinden sarma açıları, her noktanın dönme eksenine olan uzaklığı (x-koordinat) ve yarıçap eksenine olan uzaklığı (y-koordinat) kullanılarak Denklem 2.11 ile hesaplanır.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_i}{x_i} \right) \quad (2.11)$$

Metal açısının hesaplanması için üç boyutlu kesitin açı korur dönüşüm ile iki boyutlu düzleme aktarılması gerekmektedir. Bu amaçla, eğiklik hattı üzerindeki noktalar iki boyutlu düzleme taşınırken dönüşlü profili kaybetmemek için iki nokta arası mesafe hesaplanırken sarma açısının etkisi göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır. Açı korur dönüşüm yapılırken her kesit için kanat hücum kenarı, A_0 , mutlak sıfır olarak

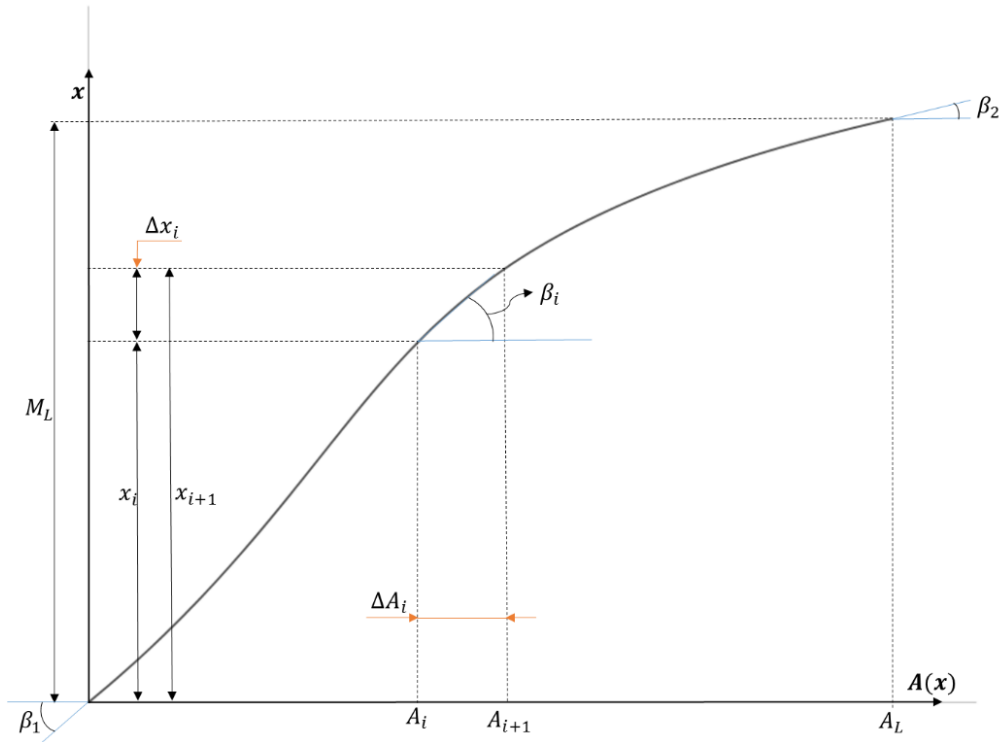
kabul edilir. Denklem 2.12 ile eğiklik hattı üzerindeki noktaların açı korur dönüşüm mesafeleri belirlenerek eğiklik hattı açı korur meridyonel uzunluk, A_L , hesaplanır [34, 35].

$$\Delta A_i = \Delta \theta_i * \left(\frac{R_i + R_{i+1}}{2} \right) \quad (2.12)$$

$$A_0 = 0$$

$$A_L = (\theta_L - \theta_{L-1}) * \left(\frac{R_L + R_{L-1}}{2} \right) \quad (2.13)$$

Şekil 2.10'da açı korur dönüşüm görüntü planında görüldüğü üzere meridyonel uzunluk ve eğiklik hattının açı korur dönüşüm uzunluğu yardımı ile kanat metal açıları elde edilir.



Şekil 2.10 : Açı korur dönüşüm görüntü planı.

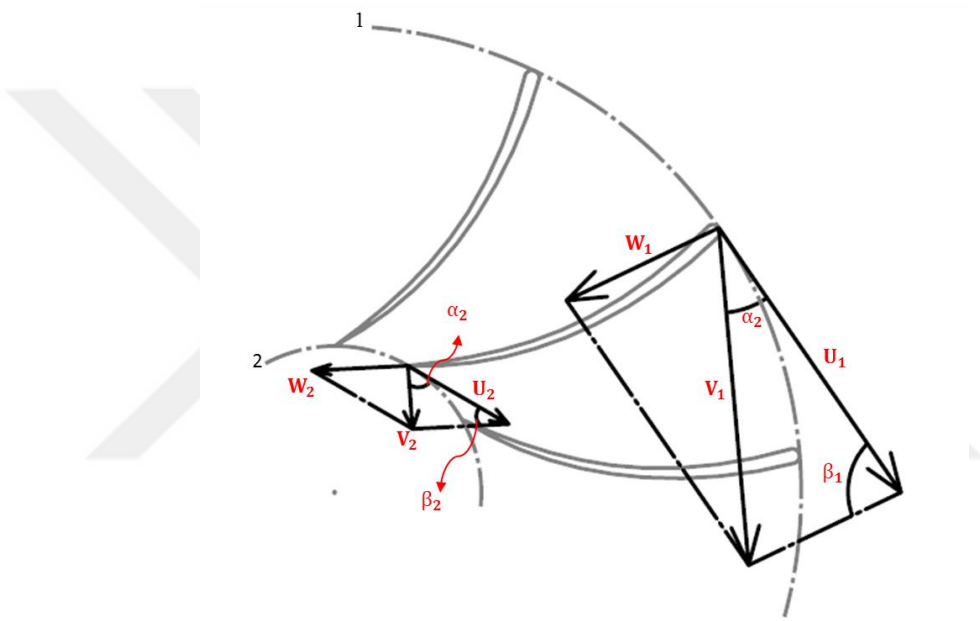
Şekilde β_1 kanat hücum kenarı, β_2 kanat kuyruk kenarı ve β_i görüntü planı üzerindeki herhangi bir noktanın metal açısını temsil etmektedir ve kanat metal açıları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\tan \beta_1 = \left. \frac{dA(x)}{dx} \right|_{M_0} \quad (2.14)$$

$$\tan \beta_2 = \frac{dA(x)}{dx} \Big|_{M_L} \quad (2.15)$$

$$\tan \beta_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta A_i} \quad (2.16)$$

Metal açısının bir başka tanımlaması, çevresel hız vektörü (U) ile dönel koordinat sistemindeki akış hız vektörü (W) arasındaki açıdır. Şekil 2.11’de çark kanadı hücum kenarı (1) ve kuyruk kenarı (2) üzerindeki hız üçgenleri ve açılar gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Hücüm ve kuyruk kenarı hız üçgenleri ve akış açıları.

Tasarım sürecinde kanat giriş ve çıkışındaki beta açıları hız üçgenleri ile elde edilir. Kanat hücum ve kuyruk kenarlarında şok veya akış ayrılması olayları meydana gelmemesi için kanat beta açısı ile akış beta açısı birbiri ile örtüşmelidir. Bu nedenle yeniden tasarım sürecinde kanat hücum ve kuyruk kenarlarının beta açılarının doğrulanması için HAD analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Kanat kalınlığının belirlenmesi de kanat açısı tanımında olduğu gibi model geometri üzerinden taç, bilezik ve yardımcı eğrilerle kesit alınmasıyla gerçekleştirilir. Kesit üzerinde emme ve basınç yüzeylerinde birbirine karşılık gelen noktaların arasındaki mesafe bulunduğu bölgenin kalınlığını tanımlar. Çark kanatlarında simetrik NACA kalınlık profili kullanıldığından dolayı emme veya basınç yüzeylerinden birinin eğiklik hattına olan mesafesi tanımlanarak kanat kalınlığı elde edilir. Her kanat

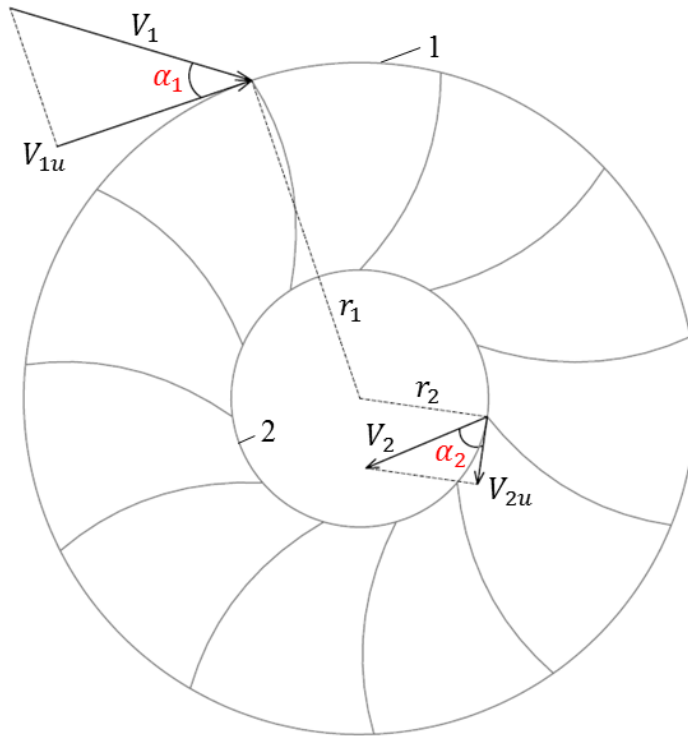
kesitinde kanat meridyonel uzunluğu değiştiğinden ötürü bütün kesitlerde kanat kalınlığı hesaplanmalıdır.

$$\text{Kanat Kalınlığı} = 2 * \sqrt{(EH_i)^2 - (B_i)^2} \quad (2.17)$$

Kanat kalınlık dağılımlı kanat hücum ve kuyruk kenarları dışında bütün bölgeler için yukarıdaki formül ile elde edilir, bu bölgeler için kanadın yapısına uygun eliptik oran seçilir. Kanat kalınlığı çark performansını ve kavitasyon karakteristiğini etkileyen bir parametre olduğundan yeniden tasarım sürecinde ultrasonik kalınlık ölçüm cihazı ile doğrulama yapılması gereklidir.

2.4 Türbin alışma Prensibi

Türbin arkının g üretim karakteristiği, kanat hücum ve kuyruk kenarları için açısal momentum denklemleri kullanılarak elde edilir. Şekil 2.12’de çark kesiti ve bu kesit üzerinde kanat hücum kenarı (1) ve kuyruk kenarı (2) zerinde açısal momentumu sağlayan hız bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.12 : Kanat hücum ve kuyruk kenarı üzerinde açısal momentum hız bileşenleri.

Şekil 2.12’de yer alan V sabit koordinat sistemindeki akışkan hızını, V_u çevresel hız bileşenini ve r çarkın dönme eksenine olan radyal uzaklığı temsil etmektedir. Zamana bağlı olmayan akış için çark dönme merkezinde oluşan açısız momentum Denklem 2.18’deki gibi ifade edilir.

$$\sum M_0 = \rho Q (V_{2u} r_2 - V_{1u} r_1) \quad (2.18)$$

Çark dönme eksenini etrafında dış kuvvetlerin oluşturduğu moment, akışkan tarafından çark kanatları üzerinde oluşan momente eşit olacaktır. Denklem 2.18’de yer alan V_{1u} ve V_{2u} terimleri açıldığında moment denklemi aşağıdaki halini alır.

$$M = \rho Q (0.5 D_1 V_1 \cos \alpha_1 - 0.5 D_2 V_2 \cos \alpha_2) \quad (2.19)$$

Çark girişinde ve çıkışında ortalama sirkülasyon terimleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Gamma_1 = \pi D_1 V_1 \cos \alpha_1 \quad (2.20)$$

$$\Gamma_2 = \pi D_2 V_2 \cos \alpha_2 \quad (2.21)$$

Denklem 2.22’de çarkın momentinin giriş ve çıkıştaki ortalama sirkülasyon farklı ile ifadesi yer almaktadır.

$$M = \frac{\rho Q}{2\pi} (\Gamma_1 - \Gamma_2) \quad (2.22)$$

Çarkta üretilen mekanik gücü moment ve açısız hız ile hesaplamak mümkündür.

$$N_r = M \omega \quad (2.23)$$

Denklemde yer alan M Newton metre cinsinden momenti, ω rad/s cinsinden açısız hızı ve N_r watt cinsinden gücü ifade eder. Çarkta mevcut toplam güç Denklem 2.24 ile hesaplanır.

$$N_r = \rho g Q H \eta \quad (2.24)$$

Denklem 2.23 ve Denklem 2.24’den aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$M \omega = \rho g Q H \eta \quad (2.25)$$

Bu denkleme Denklem 2.19'daki M terimi yazılırsa, $u_1 = \omega 0.5D_1$ ve $u_2 = \omega 0.5D_2$ eşitlikleri kullanılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$H\eta = \frac{1}{g} (u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2) \quad (2.26)$$

Denklem 2.27 giriş ve çıkış ortalama sirkülasyon denklemleri ile edilebilir.

$$H\eta = \frac{\omega}{g2\pi} (\Gamma_1 - \Gamma_2) \quad (2.27)$$

Denklem 2.26 ve Denklem 2.27'nin sol tarafında yer alan $H\eta$, birim Newton ile genişletildiğinde çark kanatlarından geçen akışın çarka aktardığı Joule cinsinden enerjiyi ifade etmektedir ve sağ tarafı çarkın kinematik parametrelerini içermektedir. Temel enerji denklemi güç üretimi ile kinematik parametreler arasındaki ilişkiyi gösterir. Türbin enerji denkleminde, çark giriş ve çıkışındaki akışın yapısı türbin enerji karakteristiğine etki eden en önemli faktördür. Hidrolik verimin en yüksek olması için çark çıkışındaki sirkülasyon değeri sıfıra çok yakın olması gereklidir [27].

3. HAD YÖNTEMİ

Francis tipi türbin çarkları karmaşık yapıya sahip kanatlarla donatılmıştır ve kanatlar üzerinde oluşan akış yüksek Reynolds sayısına sahip düzensiz akışa örnektir. Çalışmada yapılan üç boyutlu sıkıştırılamaz akış için HAD analizlerinde Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri ve k-ε türbülans modeli kullanılmıştır ve simülasyonlar ANSYS CFX v.15 [36] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1 Korunum Denklemleri

Boyutları dx, dy, ve dz olan bir akış parçacığı için kütle korunumu Denklem 3.1’de verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Zamandan bağımsız ve sıkıştırılamaz akış kabulleri yapıldığı için kütle korunum denklemleri Denklem 3.2’deki halini alır.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

Akış içerisinde bir kontrol hacmi için momentum değişimi; basınç değişimlerinin, viskoz kuvvetlerin ve dış kuvvetlerin toplamına eşittir. Genel haliyle Navier-Stokes denklemleri Denklem 3.3’deki gibi ifade edilir.

$$\rho \frac{D(u_i)}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (3.3)$$

Çalışmada yürütülen HAD analizlerinde çark içerisindeki türbülanslı akış RANS denklemleri kullanılarak çözülmüştür. Navier – Stokes denklemlerindeki değişkenlere Reynolds ayrıştırması uygulanarak ortalama ve çalkantılı kısımlar olmak üzere bileşenlerine ayrılır ve değişkenlerin zamana göre ortalamalarının alınmasıyla Denklem 3.4’te verilen RANS denklemleri elde edilir.

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (3.4)$$

3.2 Türbülans Modeli

Türbülans akışta meydana gelen, akışın hızına ve zamana göre değişkenlik gösteren rastgele çalkantılar anlamına gelmektedir. Türbülans, karmaşık akış hareketleri içerdiğinden çözümlemesi oldukça zordur bu sebeple modellenmesi gerekmektedir. Türbülans modelleri cebirsel, bir denklemlilik ve iki denklemlilik modeller olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Türbin tasarımında iki denklemlilik türbülans modeli olan k-ε türbülans modelinin akış hesaplamaları için yeterli görülmektedir [37].

k-ε türbülans modeli, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisi yitim oranı için taşınım denklemlerini çözmektedir. Yüksek Reynolds sayılarında geçerlidir ve sınır tabaka üzerinde girdap içeren dış bölgede, serbest kesme katmanında en iyi sonuçlarını vermektedir. Bunun sebebi, bu modelin yüksek Reynolds sayılarında çalışıyor olması, onun sınır tabaka gibi düşük Reynolds sayılı bölgelerde etkisinin az olmasıdır [38].

3.3 Ayırıklaştırma Yöntemi ve Adveksiyon Şemaları

HAD analizlerinde kullanılan CFX korunum denklemlerini lineerleştirmek ve cebirsel denklemlere çevirip sayısal olarak çözümlenebilir hale getirmek için kontrol hacim yaklaşımını kullanmaktadır. Bu teknik, her kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integre edilmesini temel alır. Kontrol hacimlerinin merkezlerinde ayırıklaştırılmış değişken değerlerinin hesaplandığı sayısal düğümler bulunur. Hücre merkezlerinde bulunan sayısal düğümler interpolasyonu ile yüzey değerleri üzerinden değişken değerler ifade edilir. Sonuç olarak her kontrol hacmi için cebirsel denklem elde edilir. Bu amaçla adveksiyon şemaları kullanılmaktadır [39].

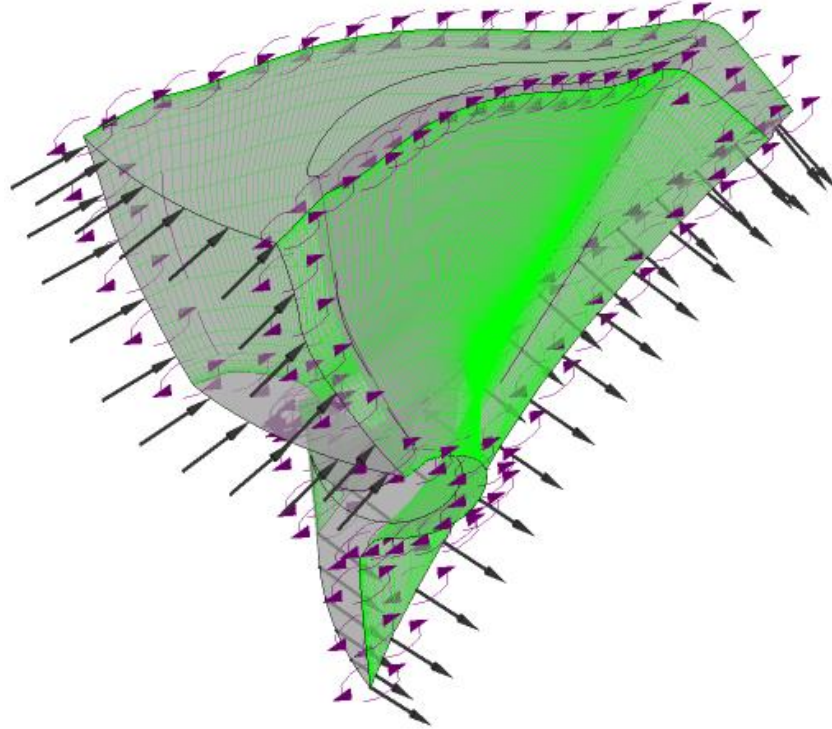
Denklemlerin ayırıklaştırılmasında doğruluk mertebesine göre upwind veya yüksek çözünürlük adveksiyon şemaları kullanılmaktadır. Birinci mertebeli doğruluk için kullanılan upwind şemasında hücre merkezi değişken değeri hücre ortalama değeri olarak kabul edilir. Yüksek çözünürlük şemasında ise hücre merkezinde yapılan Taylor serisi açılımı ile hücre yüzeylerinde yüksek mertebeli doğruluk elde edilir.

Yüksek çözünürlük şemasında yüzey değişken değerleri elde edilirken yüzeylerde gerçekleşen difüzyon ve taşınım değerleri hesaplanmaktadır.

Yapılan çalışmalarda her iki adveksiyon şeması da kullanılmıştır. Ön tasarım sürecinde, tasarım sürecinin kısaltılması amacı ile upwind adveksiyon şeması, tasarım sürecinde ise akış ayrılmalarını gözlemlemek amacıyla yüksek çözünürlükte adveksiyon şeması kullanılmıştır.

3.4 Sınır Koşulları

Çalışma sürecinde gerçekleştirilen analizlerde maliyeti ve analiz süresini azaltmak adına, tek çark kanadı modellenerek çalışmalar yürütülmüştür. Kanat için akış alanı girişi sınır koşulu olarak toplam basınç, çıkışta ise tek kanada düşen kütleli debi sınır koşulu kullanılmaktadır. Giriş koşulu olarak tanımlanan toplam basınç, net düşü değerinin basınç olarak hesaplanması ile elde edilir. Referans basıncı sıfır olarak alındığından atmosfer basıncı giriş koşulu olarak tanımlanan toplam basınç değerine eklenmektedir. Kanat geometrisinin yan yüzeyleri dairesel periyodik olarak akışkan-akışkan tipinde ara yüz sınır koşulu olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1’de kanat geometrisi üzerinde tanımlanan periyodik ara yüzler verilmiştir. Sınır koşullarının yanı sıra çark kanadı için çarkın dönüş hızı ve dönüş yönü tanımlanmaktadır.

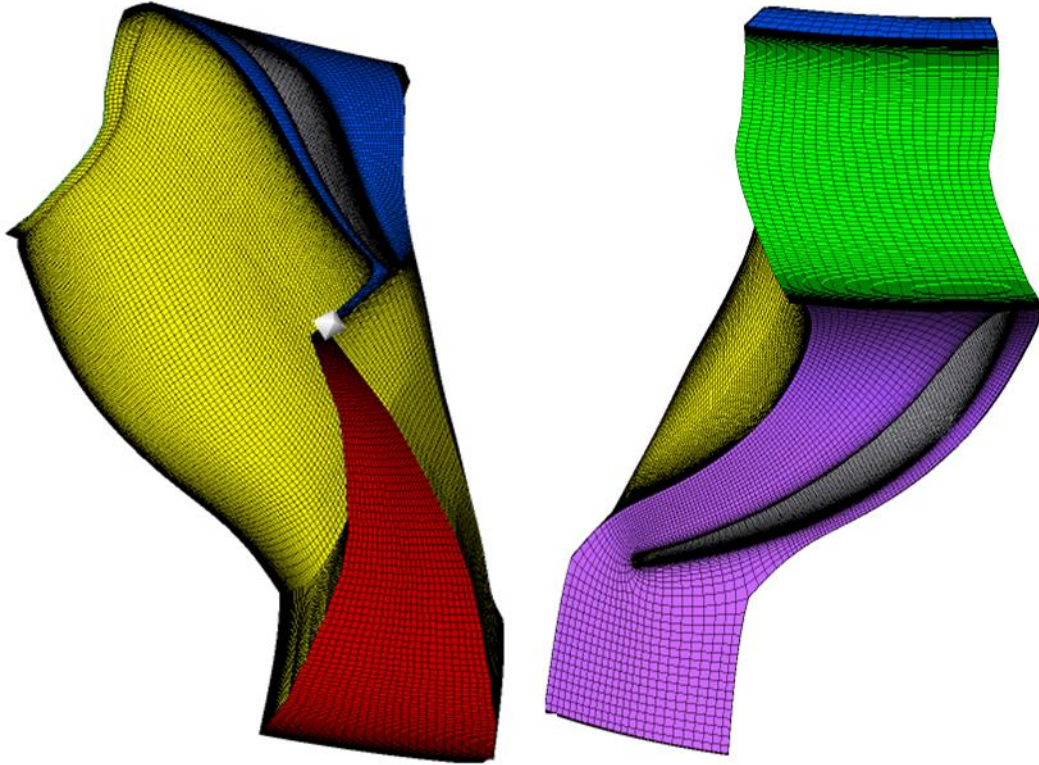


Şekil 3.1 : Kanat geometrisi için periyodik ara yüzler.

3.5 Sayısal Çözüm Ağı

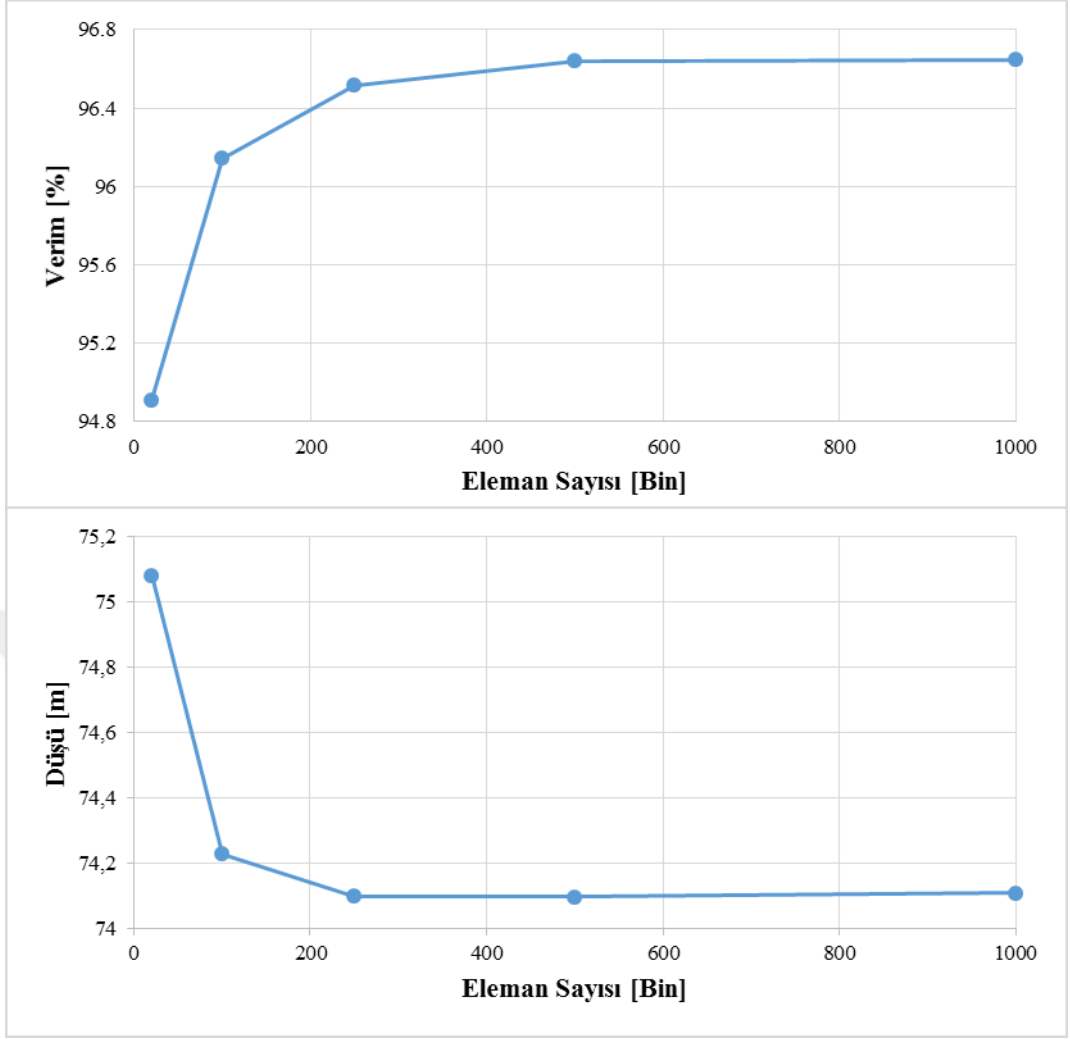
Çözüm ağı yapısı HAD analizlerinde sonuçlar üzerinde büyük etkiye sahip etkenlerden biridir. Sonuçların ağ yapısından bağımsız hale gelmesi ve kaliteli ağ yapısı kullanılması, akış karakteristiğinin gözlemlenebilmesini, akış analizlerinin daha hızlı yakınsamasını ve sürekli çözüme ulaşılmasını sağlamaktadır.

Çark kanadı ağ yapısı ANSYS Turbogrid [40] kullanılarak yapısal olmayan otomatik ağ yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. Kanat çevresinde çözümlenin daha iyi yapılabilmesi amacı ile bu bölgedeki ağ yapısının sık olmasına önem verilmiştir. Akış alanının diğer bölümlerinde de olabildiğince sık ağ yapısı tercih edilmiştir. Çark kanadı için oluşturulan çözüm ağı yapısı Şekil 3.2’de verilmiştir.



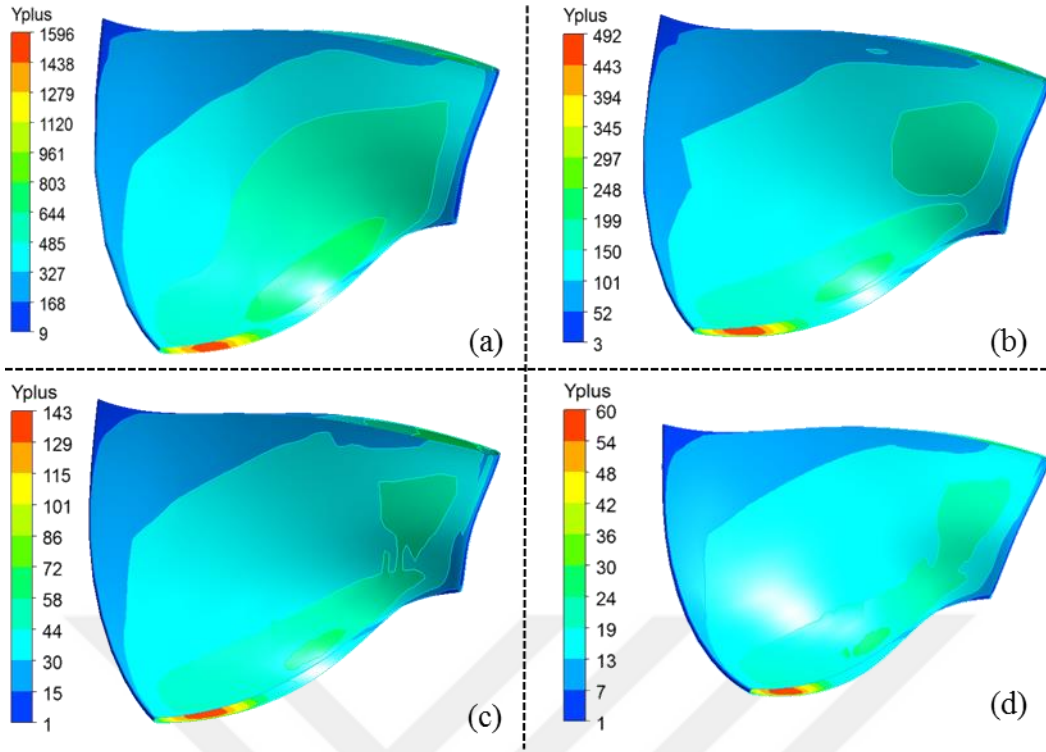
Şekil 3.2 : Çark kanadı çözüm ağı.

HAD analiz sonuçlarının ağ yapısına bağlı olarak değişiklik göstermemesi için ağ yapısından bağımsız hale getirilmesi gerekmektedir. Çözüm ağı bağımsızlığı çalışmasında hidrolik verim ve net düşü değeri değişken olarak alınmıştır. Şekil 3.3’te çark için çözüm ağı eleman sayısına karşılık değişkenlerin grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Çözüm ağı bağımsızlığı.

Performans değişkenlerinin yanı sıra çözüm ağı bağımsızlığı çalışmasında farklı eleman sayıları için y^+ dağılımları da incelenmiştir. Şekil 3.4'te eleman y^+ dağılımları sunulmaktadır.



Şekil 3.4 : (a) 20×10^3 , (b) 100×10^3 , (c) 250×10^3 ve (d) 500×10^3 eleman sayısı için y^+ dağılımları

Bağımsızlık çalışmasıyla ilgili değişkenler ve y^+ dağılımları incelendiğinde 500×10^3 eleman sayısından sonra sonuçlar çözüm ağından bağımsız hale gelmiştir ve yürütülen HAD analizi çalışmalarında bu eleman sayısı kullanılmıştır.

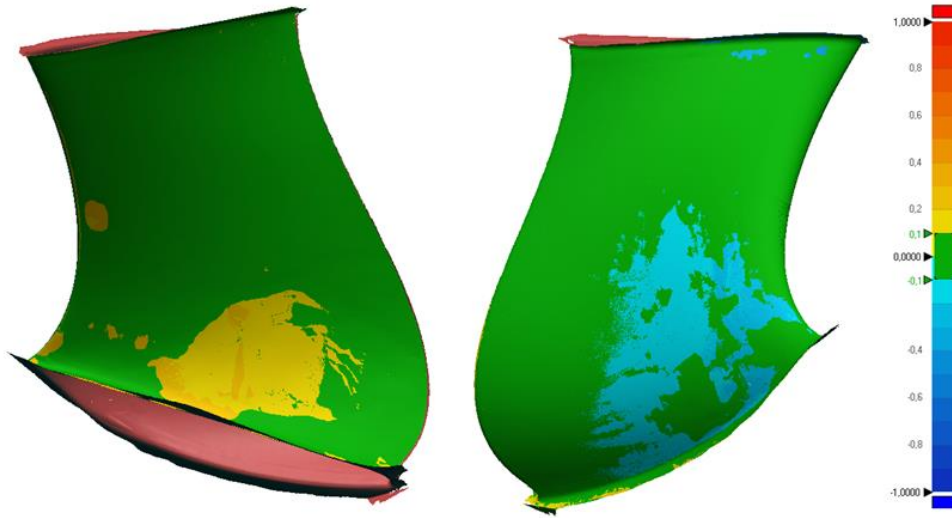
4. UYGULAMA

4.1 Tarama Uygulaması

Tarama uygulaması olarak özgül hızları 327,14 ve 268,64 ve çapları sırası ile 1542 mm ve 967 iki farklı çark taranmıştır. Her iki çark için de tarama cihazı olarak hem lazer tarayıcılı hem de dokunmatik problu Romer Absolute Arm 7330 serisi kullanılmıştır. Kullanılan cihazın nokta tekrarlanabilirliği 0,059 mm ve hacimsel hassasiyeti $\pm 0,075$ mm'dir.

Her iki çark için de iki kanat taranmıştır ve tarama verileri kıyaslanarak kullanılacak tarama verisine karar verilmiştir. Her iki çarkın toplam kanat sayısı 13'tür; ancak özgül hızlardaki farklılıktan dolayı tarama işlemi farklılık göstermiştir. Özgül hızı yüksek olan çarkta, kanat yapısı taçtan bileziğe doğru daha uzun ve kanatlar arası akış hacimlerinin geniş olmasından dolayı lazer tarama ile kanadın bütün yüzeyleri ölçülmüştür. Özgül hızı düşük olan çarkta ise kanat yapısı hücum kenarından kuyruk kenarına doğru daha uzun ve kanatlar arası akış hacimlerinin dar olmasından dolayı kanat basınç yüzeylerinin çıkış kenarına doğru lazer tarama ile veri alınamayan bölgeler bulunmaktadır. Bu nedenle düşük özgül hızlı çarkın basınç yüzeylerinin çıkış kısmı ve çıkışa yakın bölgeler dokunmatik prob ile ölçülmüştür. Her iki çark için kanat kuyruk kenarı keskin hatta sahip olmasından dolayı, tasarım programı Geomagic DesignX' in yüzey oluşturma fonksiyonları ile tamamlanmıştır. Özgül hızı düşük olan çark için yapılan tarama işlemleri Ek 1'de sunulmuştur.

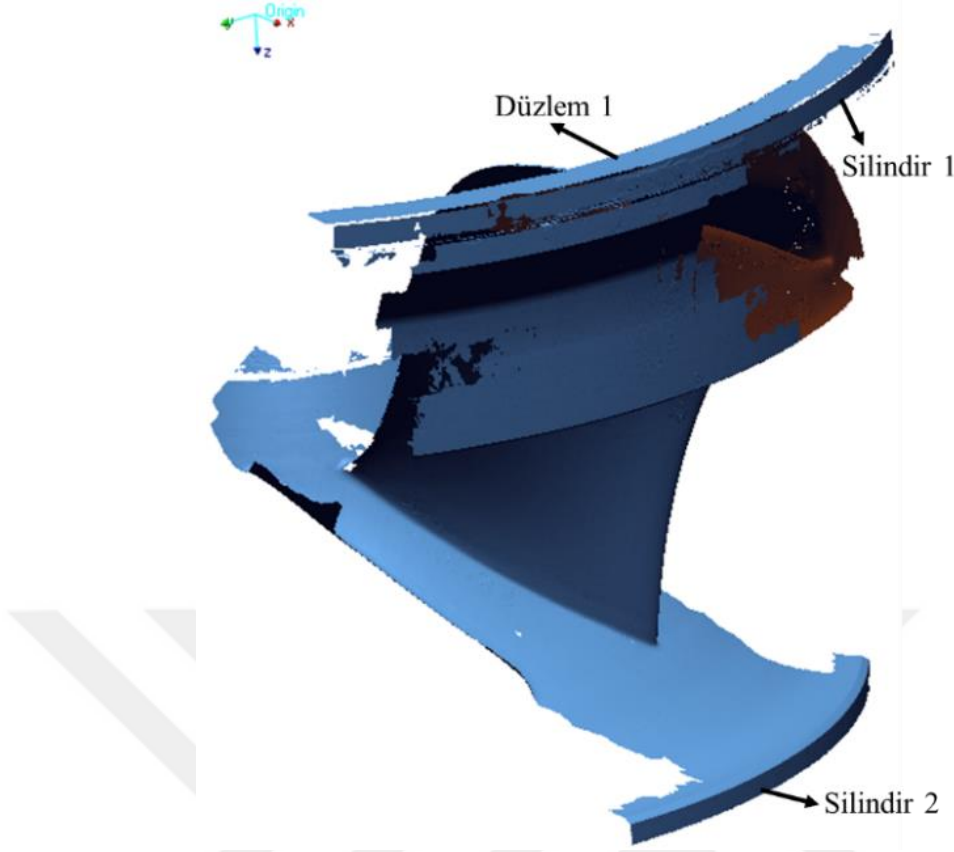
Özgül hızı yüksek olan çarkın iki farklı tarama verisi birbiri ile örtüştürülmüş ve Kanat 1 ile Kanat 7 için yapılan taramalarındaki farklılıklara bakılmıştır. Şekil 4.1'de özgül hızı yüksek olan çarkın iki kanadı için tarama verilerinin emme ve basınç yüzeylerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 4.1 : Tarama verilerinin emme ve basınç yüzeylerinde karşılaştırılması.

Yapılan karşılaştırma sonucunda iki kanat verisi arasındaki en büyük fark $\pm 0,2$ mm civarında; basınç yüzeyinde kanadın bilezik bölgesine yakın bölgelerde, emme yüzeyinde kanadın ortalarında ve bilezik bölgesine yakın bölgelerde olduğu görülmüştür. Her iki tarama verisi birbiri ile küçük farklarla örtüşmekte, ancak Kanat 1’de Kanat 7’ye göre yardımcı eğrileri ve dönme eksenini tanımlamak için daha fazla yüzey bulunduğu için tasarım geometrisi olarak kanat 1 seçilmiştir.

Çarkın dönme eksenini tanımlamak için, oluşturulan yüzey formları gruplara ayrılmış ve referanslamada kullanılacak yüzeyler belirlenmiştir. Şekil 4.2’de gösterilen çark dış bağlantı silindirleri ve yüzeyleri dönme eksenini tanımlamada kullanılmıştır. Şekil 4.2’de; Silindir 1 bilezik bağlantı silindiri, Silindir 2 taç bağlantı silindiri ve Düzlem 1 bilezik bağlantı yüzeyidir. Oluşturulan geometri için dönme eksenini silindirlerin merkezinden ve düzlemden geçecek şekilde belirlenmiştir.

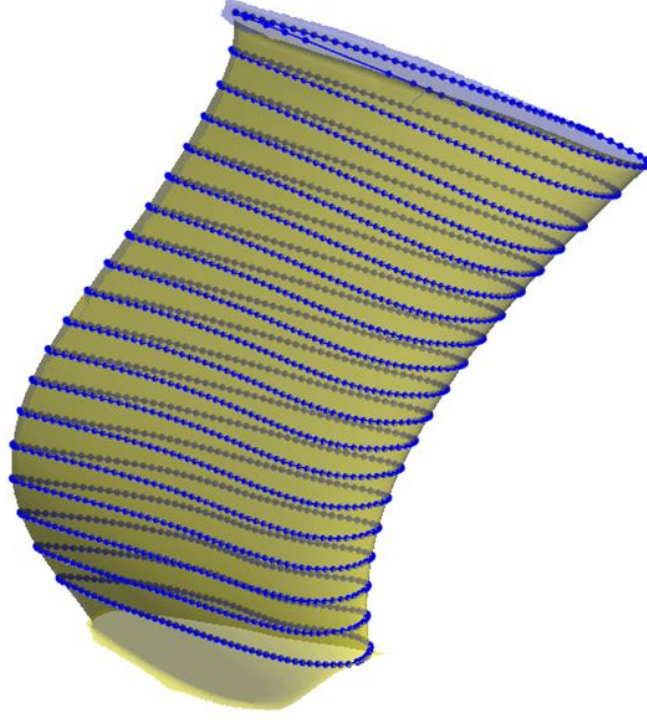


Şekil 4.2 : Dönme eksenini referans yüzeyleri ve koordinat sistemi.

Kanat 1'in ham tarama verisinde yaklaşık olarak 40 milyon nokta bulunmaktadır. Hem gürültü kaynaklı problemlerden kurtulmak hem de maliyeti azaltmak adına nokta sayısında filtreleme yapılmıştır ve nokta bulutu seyreltilerek 400.000 noktaya kadar düşürülmüştür.

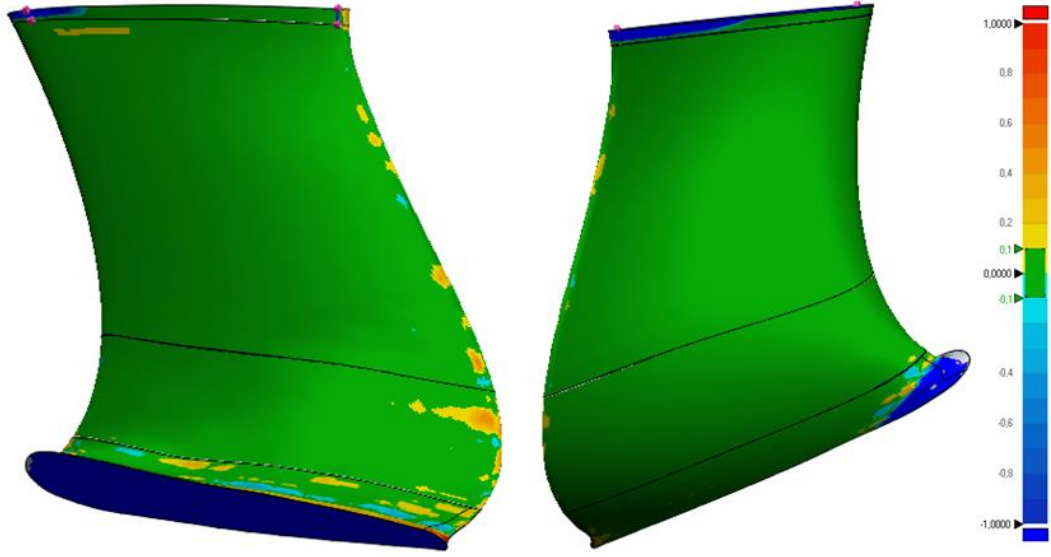
Seyreltilen nokta bulutundan üçgen ağ yapısına geçilmiş ve yüzey formları elde edilmiştir. Elde edilen yüzey formları üzerinden tarama esnasında eksik kalan veriler Geomagic DesignX' in yüzey tamamlama fonksiyonları ile tamamlanmıştır. Kanat basınç yüzeyi üzerinde, bilezik kısmı ile kuyruk kenarının birleştiği bölgede lazer ışının yansımaya açısı cihaz sınırları dışında kaldığından taramada gürültü kaynaklı problemler meydana gelmiştir. Bu tarz problemler katı modele geçiş esnasında yüzeyde sapmalara yol açacağından, gürültünün etkisinden kurtulmak adına bu bölgedeki tarama verileri program fonksiyonları ile tamamlanmıştır.

Elde edilen yüzeyden katı modele geçiş yapmak için kanat yüzeyini kesen düzlemler kullanılmıştır. Bu düzlemlere yansıtılan kanat profilleri birleştirilerek katı modele geçiş yapılmıştır. Şekil 4.3'te katı modele geçişte kullanılan düzlemlere yansıtılmış kanat profilleri gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : Düzlemlere yansıtılmış kanat profilleri.

Taranan kanatların kuyruk kenarları üretim sırasında taşlandığından keskin köşeli geometridir ve tarama yöntemlerinin keskin köşelerde verdiği sonuçlar yeteri kadar güvenilir değildir. Bunun yanı sıra çark kanatları tasarlanırken hücum ve kuyruk kenarları eliptik olarak tasarlanırlar. Bu nedenle bütün yansıtılan profillerde kanat kuyruk kenarına eliptik şekil verilmiştir. Kuyruk kenarında kesikliğin başladığı kısım ultrasonik kalınlık ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve cihazdan elde edilen değerlerle hesaplanan kalınlık değerleri karşılaştırılarak eliptiklik başlangıcına karar verilmiştir. Tarama sonucunda kanat kuyruk kenarı eliptiklik başlangıcı için ortalama kalınlık değeri 4,97 milimetre, kalınlık ölçüm cihazı ile ölçülen değerlerin ortalaması 4,93 milimetre olarak ölçülmüştür ve bu verilere göre eliptiklik başlangıcına 5 milimetre olarak karar verilmiştir. Şekil 4.4'te nokta bulutu ile oluşturulan geometri arasındaki sapma gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Nokta bulutu ile katı model arasındaki sapma.

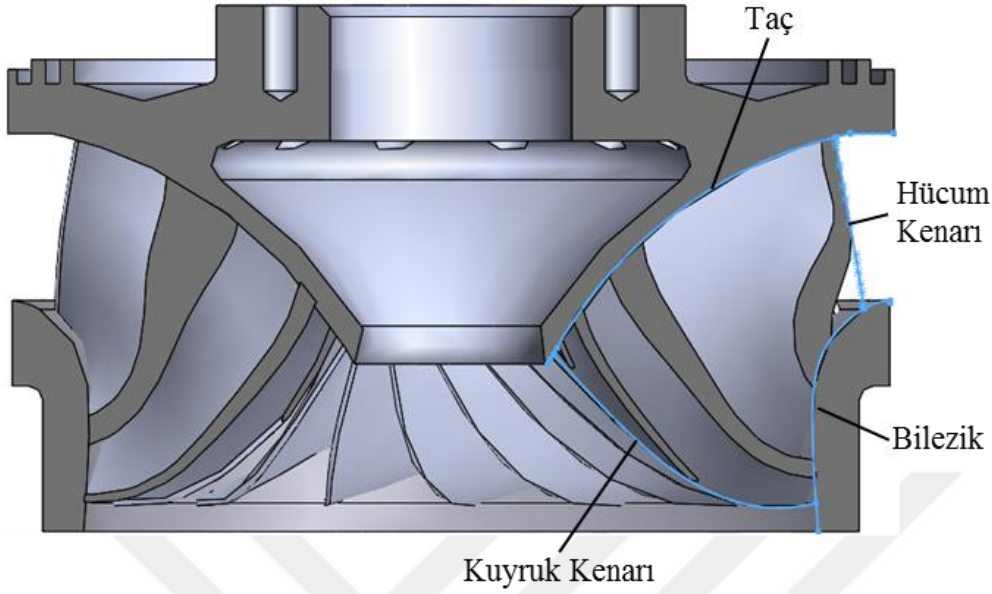
Ham nokta bulutu ile oluşturulan katı model arasındaki en büyük sapma kanat kuyruk kenarına yakın bölgelerde 0,65 milimetre civarındadır. Bunun sebebi kanat kuyruk kenarındaki kesikliğin eliptik olarak değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır.

4.2 Tasarım Uygulaması

Geliştirilen tasarım yöntemi iki farklı Francis tipi türbin çarkı için uygulanmıştır. Öncelikli olarak tasarımı Etü Hidro tarafından yapılan; tasarım düşüsü 78 m, debisi 2 m³/s ve kurulu gücü 1400 kW olan BUSKİ HES için tasarım yöntemi doğrulaması yapılmıştır. Daha sonrasında kurulu gücün %70'ini sağlayan, tasarım düşüsü 125 m, debisi 3,25 m³/s ve kurulu gücü 3500 kW olan Kahta HES için tasarım yöntemi uygulanmıştır ve performansa etki eden sebepler araştırılmıştır. BUSKİ santrali çarkı için katı modeli üzerinden, Kahta santrali için taranmış çark geometrisi üzerinden tasarım yöntemi uygulanmıştır. Kahta HES için tasarım yöntemi uygulaması Ek 2'de sunulmuştur.

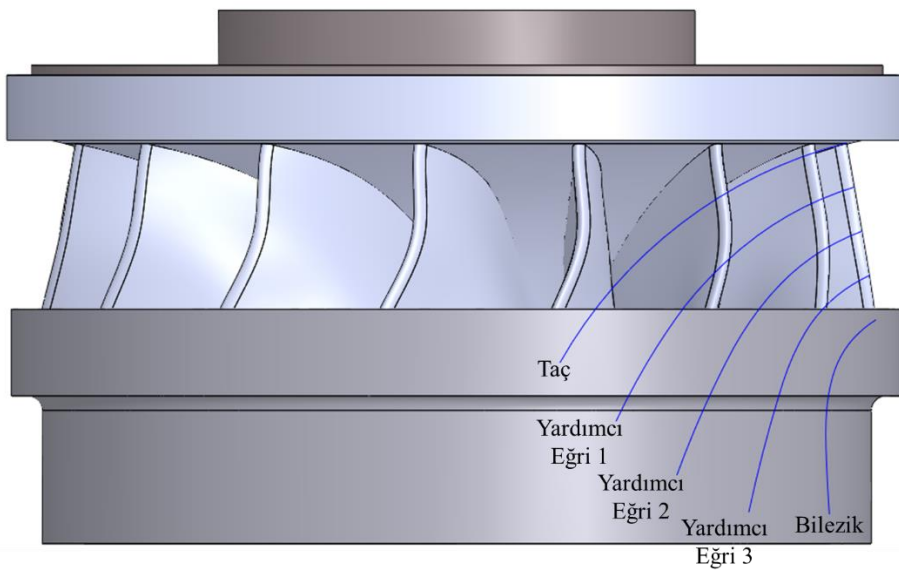
BUSKİ HES çarkın katı modeli üzerinden yeniden tasarım sürecinin ilk adımı olan meridyonel profil belirleme çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla çark geometrisinin dönme ekseninden geçen düzlemlerle kesit alınmıştır ve referans olarak seçilen kanat geometrisi kesite yansıtılarak meridyonel görünüm elde edilmiştir. Meridyonel profil elde edilirken kanat hücum ve kuyruk kenarlarını kesen düzlemler kullanılmıştır ve elde edilen eğriler tek bir düzlemde birleştirilmiştir. Belirlenen taç, bilezik, hücum kenarı ve kuyruk kenarı eğrileri için nokta bulutları oluşturulmuştur ve turbo makine

tasarım programı ANSYS Bladegen'e aktarılmıştır. Şekil 4.5'te katı model üzerinde elde edilen meridyonel profil gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : BUSKİ HES çarkı meridyonel profili.

Kanat açılarının ve kalınlık profillerinin belirlenmesi için taç, bilezik ve Bladegen tarafından tanımlanan yardımcı eğriler kullanılmıştır. Tasarımda üç tane yardımcı eğri kullanıldığından tersine mühendislik sürecinde de üç adet yardımcı eğri ile tanımlamalar yapılmıştır. Yardımcı eğrilerin tersine mühendislik sürecine etkisini araştırmak için Kahta HES için dört farklı kesit sayısı için tasarım yapılmıştır. Şekil 4.6'da çark katı modeli üzerinde taç, bilezik ve yardımcı eğriler gösterilmiştir.



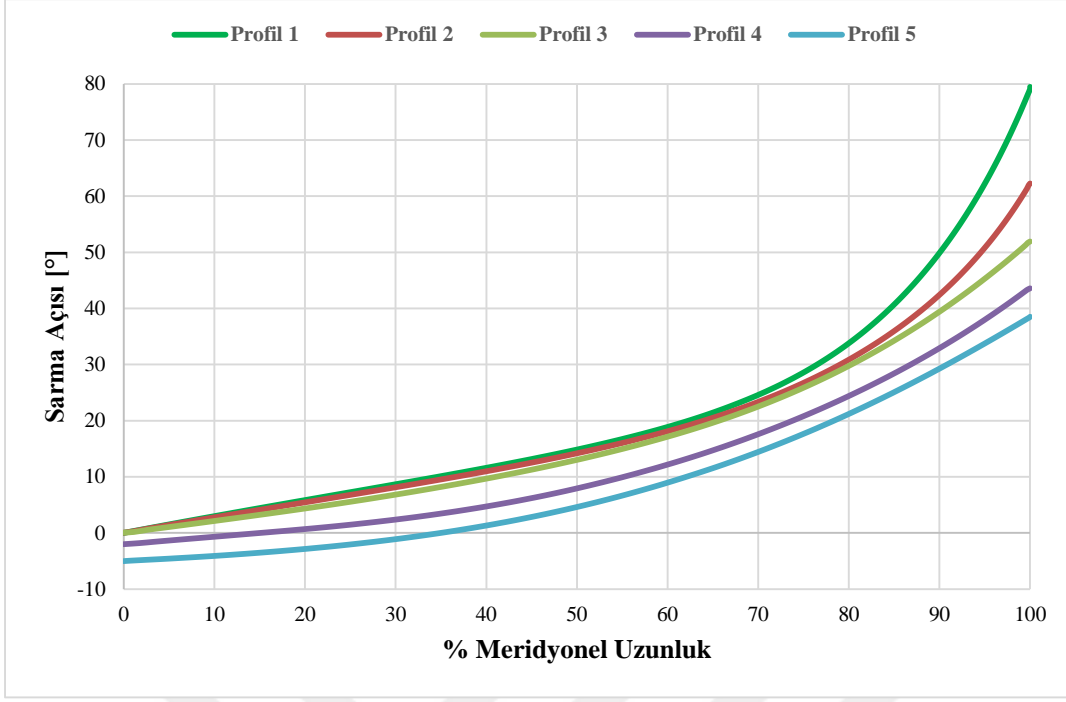
Şekil 4.6 : Referans kanat üzerinde kesit eğrileri.

Taç bilezik ve yardımcı eğriler ile çark modelinden kesitler alınmıştır ve her kesitteki profilin eğiklik hattını hesaplamak adına referans kanadın emme ve basınç yüzeylerine eş mesafeli noktalar tanımlanmıştır. Her iki yüzeyde birbirine karşılık gelen noktalar ile Denklem 2.5'e göre eğiklik hattı üzerindeki noktaların konumu ve kanat kesit profili meridyonel uzunluğu tanımlanmıştır. Çizelge 4.1'de beş kesit için hesaplanan profil meridyonel uzunlukları verilmiştir. Profil 1 taç eğrisi ile elde edilen kesit için, Profil 5 bilezik eğrisi ile elde edilen kesit için elde edilen kanat profilidir.

Çizelge 4.1 : BUSKİ HES kanat profili meridyonel uzunlukları.

Kesit Profili	Meridyonel Uzunluk [mm]
Profil 1	251,37
Profil 2	237,41
Profil 3	219,07
Profil 4	190,36
Profil 5	148,78

Eğiklik hattı üzerindeki noktaların konumları yardımcı ile kanat sarma açıları Denklem 2.11 ile belirlenmiştir. Sarma açılarının tasarım programına aktarılması için kesit profillerinin meridyonel uzunlukları Denklem 2.10 kullanılarak yüzde meridyonel uzunluklar hesaplanmıştır. Bütün kesitlerde sarma açısı yüzde meridyonel uzunluğa göre dağılımı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



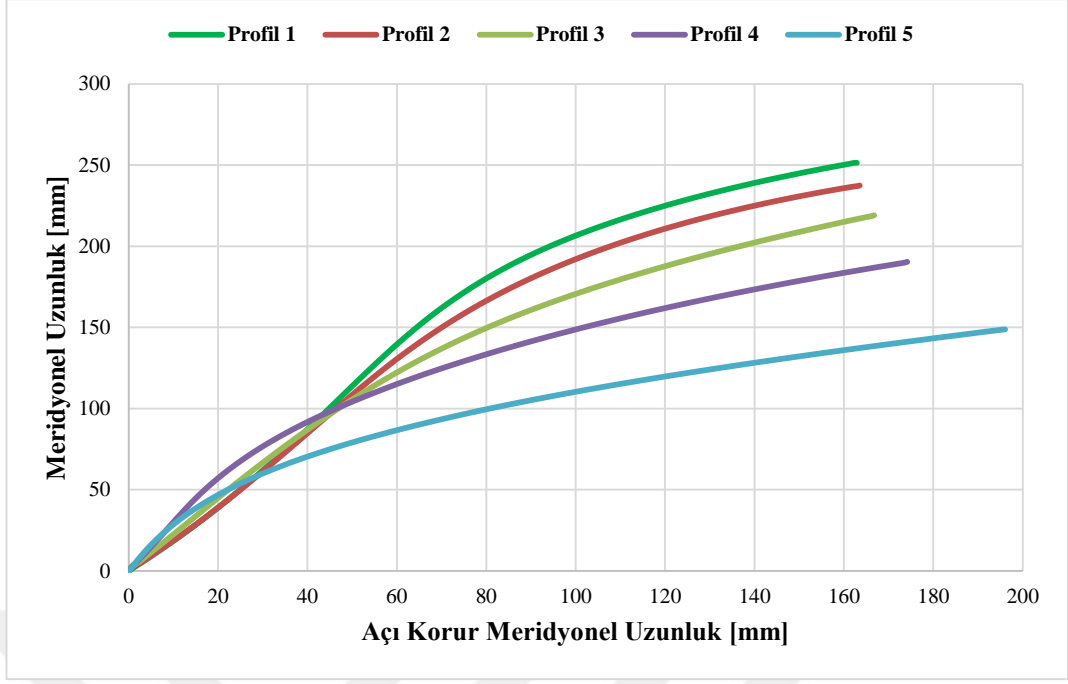
Şekil 4.7 : BUSKİ HES kanat sarma açısı dağılımı.

Kanat metal açılarının hesaplanması için her kesit için açı korur meridyonel konumlar ve uzunluklar Denklem 2.12'ye göre hesaplanmıştır. Çizelge 4.2'de beş kesit için hesaplanan açı korur meridyonel uzunluklar verilmiştir.

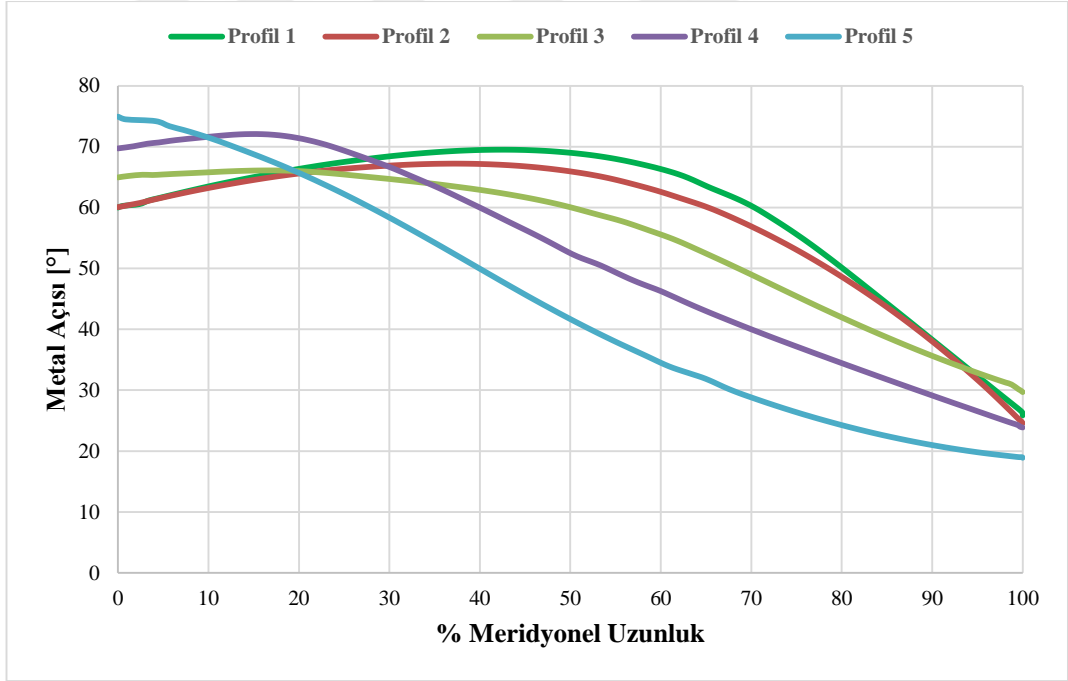
Çizelge 4.2 : BUSKİ HES kanat profili açı korur meridyonel uzunlukları.

Kesit Profili	Açı Korur Meridyonel Uzunluk [mm]
Profil 1	162,90
Profil 2	163,55
Profil 3	166,78
Profil 4	174,17
Profil 5	196,07

Metal açılarının elde edilmesi için bütün kesitlerde açı korur meridyonel uzunluğa karşılık meridyonel uzunluk eğrileri elde edilmiştir ve Denklem 2.16 ile eğri üzerindeki noktaların açıları belirlenmiştir. Bütün kesitlerde açı korur dönüşüm görüntü planı Şekil 4.8'de ve metal açısı yüzde meridyonel uzunluğa göre dağılımı Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

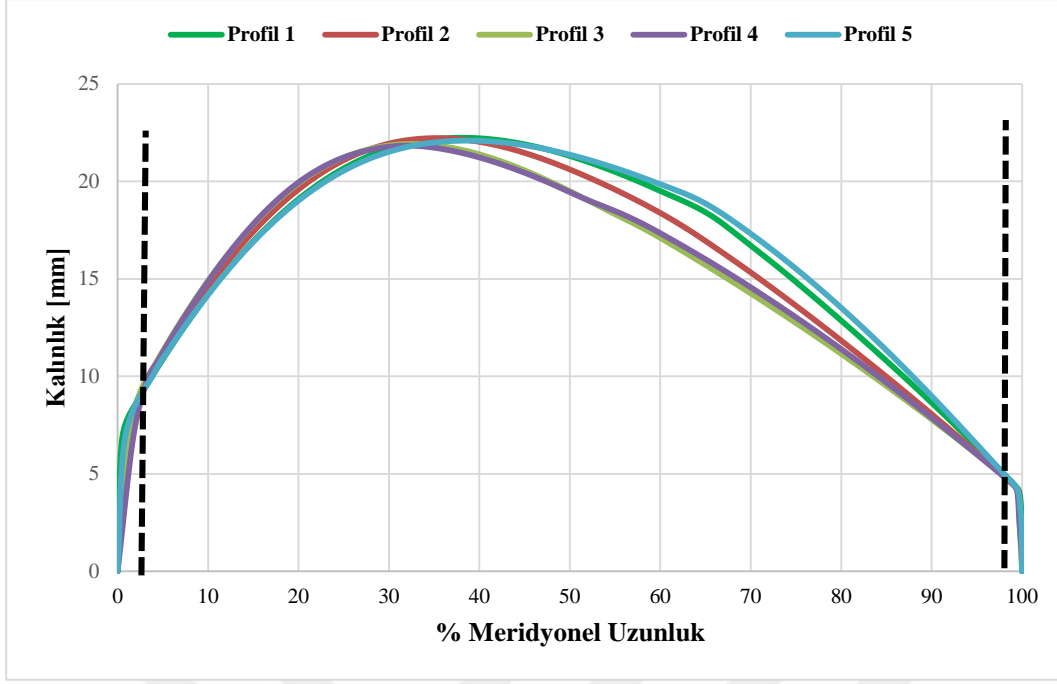


Şekil 4.8 : BUSKİ HES açı korur dönüşüm görüntü planı.



Şekil 4.9 : BUSKİ HES kanat metal açısı dağılımı.

Kanat kalınlığının hesaplanması için Denklem 2.17'deki gibi basınç yüzeyi üzerindeki noktalarla eğiklik hattı üzerindeki noktaların farkından faydalanılmıştır. Şekil 4.10'da bütün kesitler için kalınlık dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.10 : BUSKİ HES kalınlık dağılımı.

Tasarım programı hücum ve kuyruk kenarlarındaki eliptikliği kendisi parametre olarak tanımladığından kalınlık dağılımı için nokta bulutu oluşturulurken eliptik kısım için alınan kalınlık ölçümleri dikkate alınmamıştır. Şekil 5.10'da görülen kesik çizgiler eliptiklik başlangıç bölgelerini temsil etmektedir. Eliptik bölge başlangıçlarına aynı değer tanımlamak için bütün profillerdeki başlangıç değerlerinin ortalaması alınmıştır ve nokta bulutu verisi hesaplanan değerlere göre oluşturulmuştur.

5. SONUÇLAR

Geliştirilen tasarım yöntemi ile BUSKİ HES ve Kahta HES için türbin çarklarının tersine mühendislik ile tasarımı gerçekleştirilmiştir. BUSKİ HES ile yöntemin doğrulaması yapılmıştır ve Kahta HES için bu metod kullanılarak türbin performansında düşüşe yol açan faktörler araştırılmıştır. Her iki çark geometrisi için hem geometrik kıyaslama hem de HAD doğrulaması yapılmıştır.

Bu başlık altında tersine mühendislik ile elde edilen kanat geometrilerinin var olan katı modellerle kıyaslanması ve HAD analizleri sonuçları verilmiştir.

5.1 Geometrik Sonuçlar

Öncelikli olarak her iki türbin çarkı için tersine mühendislik ile elde edilen geometriler ile katı modellerdeki tek kanat geometrileri arasında hacimsel kıyaslama yapılmıştır. Hacimsel kıyaslama öncesinde Kahta HES çarkı için elde edilen dört farklı tersine mühendislik tasarımından uygun olan tasarıma karar verilmelidir. Bu amaçla farklı kesit sayılarındaki kanat geometrilerine HAD analizi kıyaslaması yapılmıştır. Bütün tasarımlarda çark performans değerlerine ve suyun çarka hücum açısı bilinmediğinden dolayı 19 derece giriş açısına göre HAD analizleri yürütülmüştür. Elde edilen güç, verim ve düşü değerleri kıyaslanarak en uygun kanat geometrisi seçilmiştir. Çizelge 5.1’de dört tasarım için elde edilen performans değerleri yer almaktadır.

Çizelge 5.1 : Kahta HES için farklı kanat geometrilerinin performans değerleri.

	Düşü [m]	Güç [kW]	Verim [%]
3 Kontrol Eğrili Tasarım	87,58	2706,13	96,95
7 Kontrol Eğrili Tasarım	86,98	2684,66	96,72
11 Kontrol Eğrili Tasarım	86,96	2684,81	96,72
15 Kontrol Eğrili Tasarım	87,09	2684,16	96,71

dört farklı tasarım için performans değerleri incelendiğinde en fazla bağıl fark üç yardımcı eğrili tasarım ile 15 yardımcı eğrili tasarım arasında düşü değeri içindir ve bu bağıl fark %0,81'dir. Bağıl fark değerleri ve tasarım süreci düşünüldüğünde yedi yardımcı eğrili tasarım en uygun tasarım olarak seçilmiştir. Bu sonuçlara göre her iki çark için yapılan hacimsel kıyaslama sonuçları Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2 : Hacimsel karşılaştırma.

Geometri	Hacim [mm ³]	Geometri	Hacim [mm ³]
BUSKİ HES Orijinal	656582,64	Kahta HES Orijinal	616432,38
BUSKİ HES TM	652997,70	Kahta HES TM	585376,90

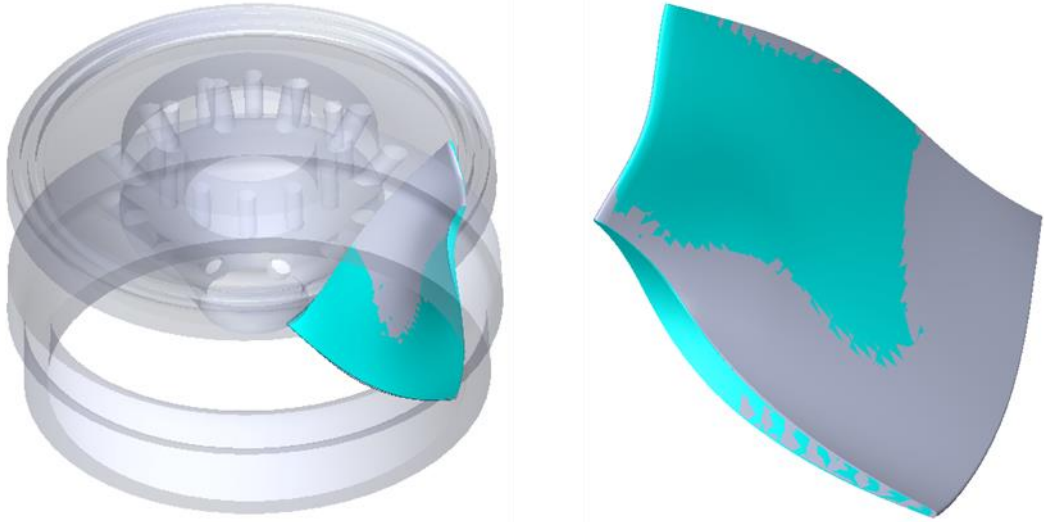
Hacimler arasındaki bağıl hata aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\% \text{ Hacimsel Bağıl Hata} = \frac{V_o - V_{re}}{V_o} * 100 \quad (5.1)$$

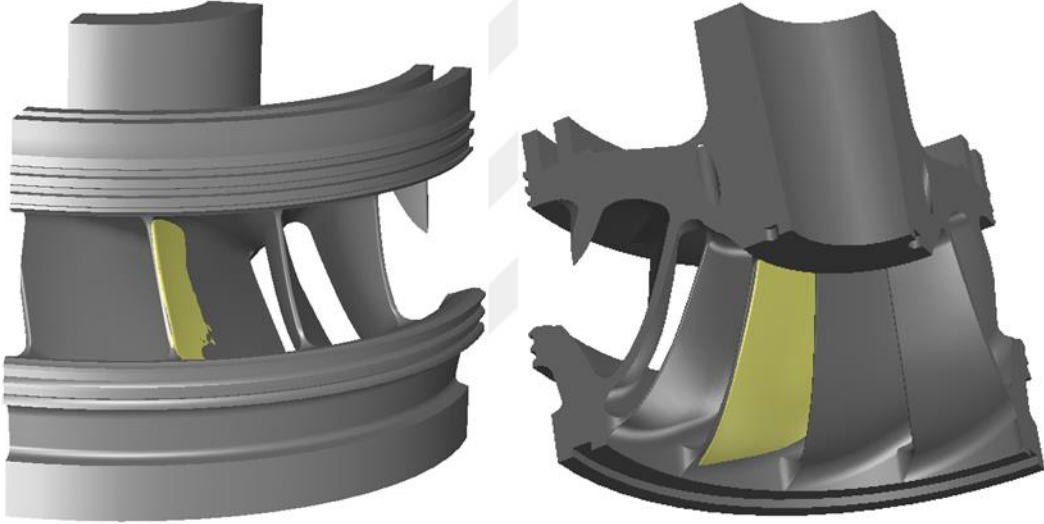
Denklem 5.1'e göre BUSKİ HES için hacimsel bağıl hata %0,55, Kahta HES için %5,04'tür. Bağıl hatanın Kahta HES'te daha yüksek çıkması, çalışılan geometrinin tarama verisinden elde edilmesidir. Üretimde taç ve bilezik ile kanadın birleştiği bölümlerde kaynak bölgesinin olmasından kaynaklanmaktadır.

BUSKİ HES için 581,72 mm olan hücum kenarı çapı uygulanan yöntemle 581,84 mm, 515,93 mm olan kuyruk kenarı çapı 515,79 olarak hesaplanmıştır. Kahta HES için tarama geometrisinde 708 mm olan hücum kenarı çapı 708,004 mm ve 686 mm olan kuyruk kenarı çapı 686,04 mm olarak elde edilmiştir.

Tersine mühendislik ile elde edilen yeni kanat geometrilerinin uygunluğunun araştırılabilmesi için tek başına hacimsel kıyaslama yeterli gelmemektedir. Yeni geometriler, var olan katı modeller ile örtüştürülerek kanat yüzeylerinin birbirini takip eden yapıda olduğu araştırılmalıdır. Bu amaçla iki çark içinde geometriler üst üste yerleştirilmiştir; Şekil 5.1'de BUSKİ HES için geometrilerin örtüştürülmüş hali, Şekil 5.2'de Kahta HES için geometrilerin örtüştürülmesi gösterilmiştir.

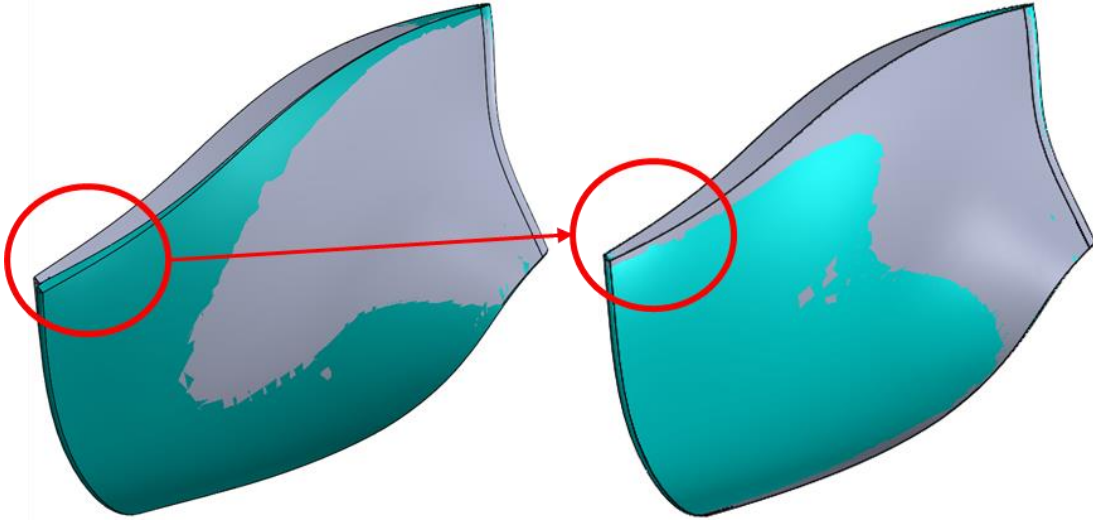


Şekil 5.1 : BUSKİ HES geometrilerinin örtüştürülmesi.



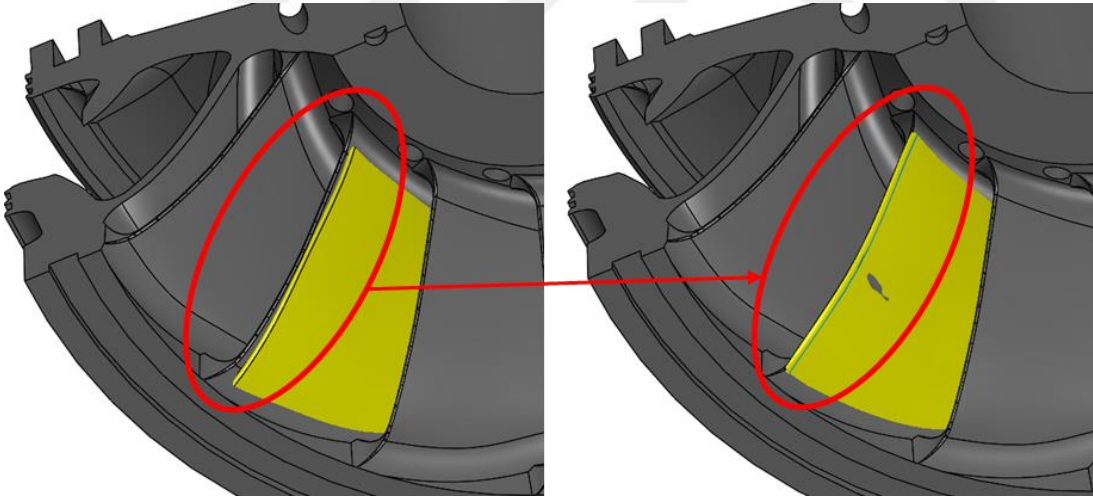
Şekil 5.2 : Kahta HES geometrilerinin örtüştürülmesi.

Geometrilerin üstüste örtüştürülmesi sonucunda kanat geometrilerinin birbirini takip eden yapıda olduğu görülmüştür. Ancak BUSKİ HES için kanat kuyruk kenarında taç profiline yakın bölgelerde iki geometri arasında bazı kopmalar görülmüştür. Kopmaları gidermek amacı ile kuyruk kenarı için sarma açıları ve Profil 1 için meridyonel uzunluk tekrardan hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda meridyonel profil taç eğrisi kısaltılmıştır. Şekil 5.3'te kanat kuyruk kenarının taç profil bölgesinin düzeltme yapılmış hali sunulmuştur.



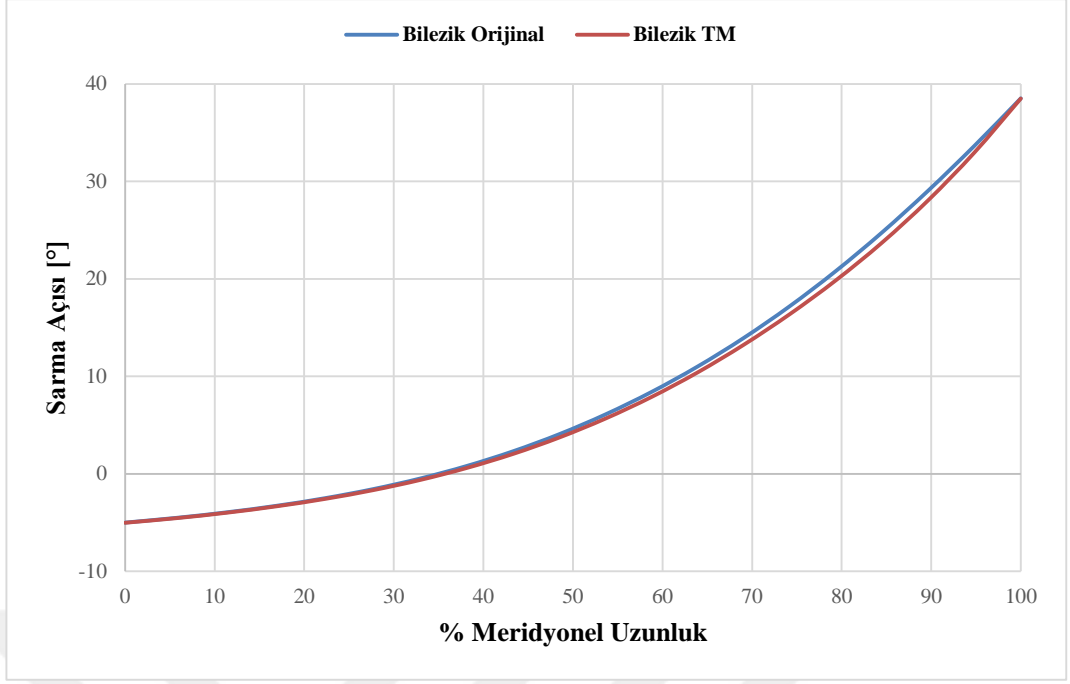
Şekil 5.3 : BUSKİ HES Kuyruk kenarı taç profili düzeltmesi.

Kahta HES için elde edilen geometri kanat yüzeylerini takip etmekte fakat kuyruk kenarında eliptik oran bilinmediğinden 3 milimetrelilik bir fark olduğu gözlenmiştir. Tasarım programında kanat kuyruk kenarı için eliptiklik oranı değiştirilerek bu bölgenin katı model ile örtüşmesi sağlanmıştır. Şekil 5.4'te kanat kuyruk kenarında yapılan değişiklik gösterilmektedir.



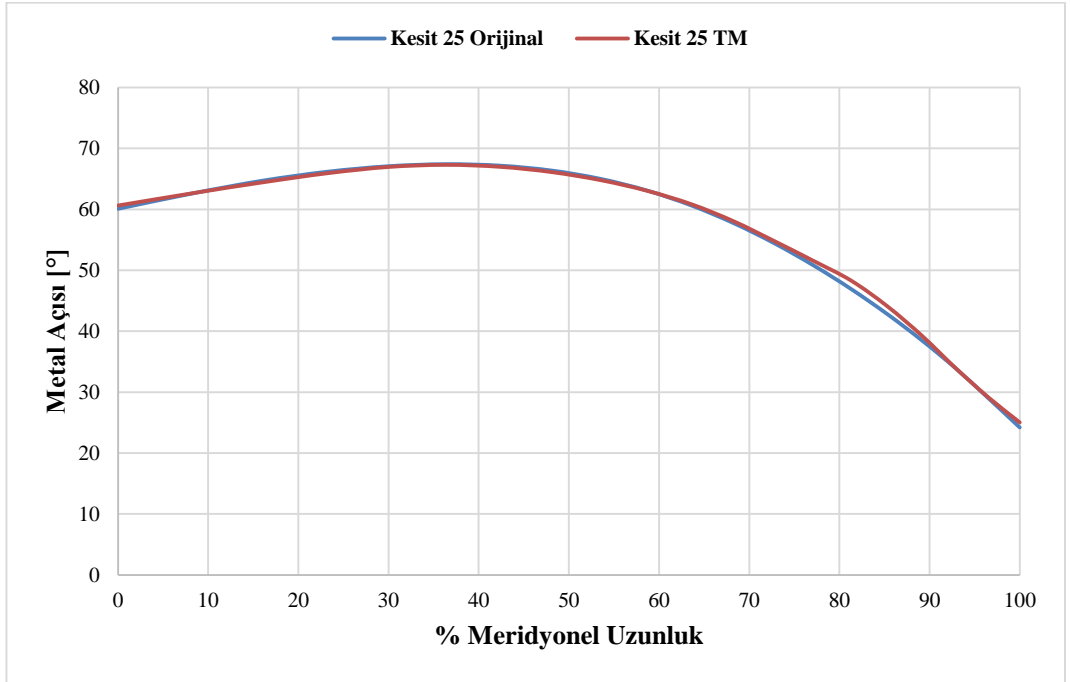
Şekil 5.4 : Kahta HES kuyruk kenarı düzeltmesi.

BUSKİ HES için tersine mühendislik ile hesaplanan açı değerleri tasarım açı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.5'te kanat sarma açısı için en fazla farkın olduğu bilezik kesitinde yüzde meridyonel uzunluğa karşılık açı dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 5.5 : BUSKİ HES bilezik kesitinde sarma açısı dağılımı.

Meridyonel uzunluğun %40'lık kısmından itibaren açı değerleri arasında sapmalar başlamaktadır ve sarma açıları arasında en yüksek fark 1 derecedir. Ancak tersine mühendislikle elde edilen açı dağılımı orijinal açı dağılımını takip ettiğinden bu durum metal açısına yansımamıştır. Şekil 5.6'da kanat metal açısı için en fazla farkın olduğu Kesit 25'te yüzde meridyonel uzunluğa karşılık açı dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 5.6 : BUSKİ HES Kesit 25'te metal açısı dağılımı.

Kanat çıkışına doğru %10'luk bir bölgede tersine mühendislikle elde edilen açı dağılımında sapma olduğu gözlenmiştir. Bu bölgede en yüksek açı farkı 1,4 dereceye kadar çıkmıştır. Açı dağılımındaki bölgesel bozukluklar eğiklik hattı üzerindeki noktaların konumları belirlenirken oluşan varsayımlardan kaynaklanmaktadır. Emme ve basınç yüzeyine yerleştirilen noktaların, profilin üç boyutlu olması sebebi ile birbirine tam olarak karşılık gelmediği bölgeler bulunmaktadır. Açı dağılımlarındaki sapmaların akışa etkisi HAD analizleri sonucunda incelenecektir. BUSKİ HES için diğer kesitlerdeki açı dağılımlarının karşılaştırılması Ek 3'te sunulmuştur.

5.2 HAD Sonuçları

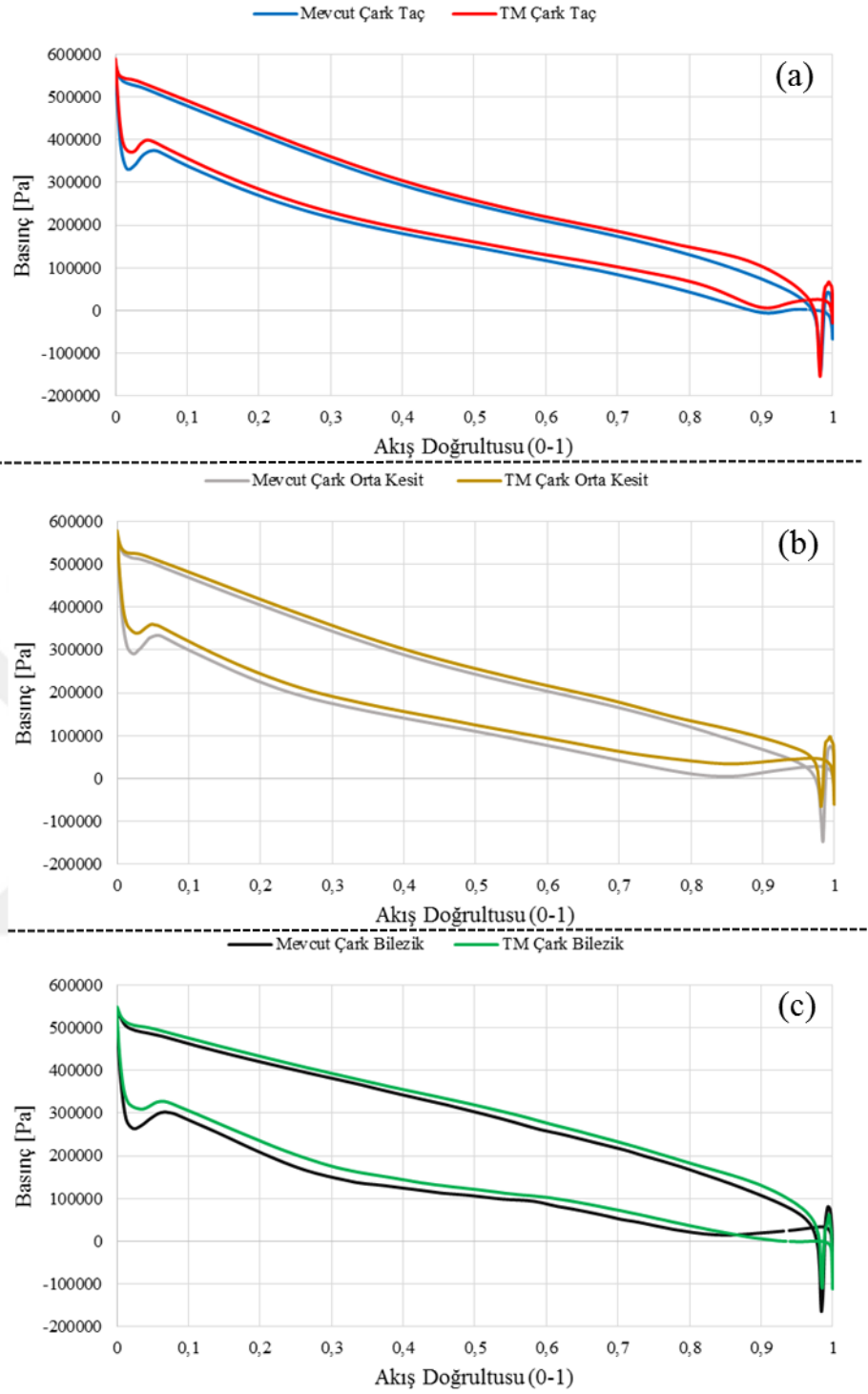
5.2.1 BUSKİ HES

Yapılan geometrik kıyaslamalar sonucunda, tersine mühendislik ile elde edilen kanadın uygunluğuna karar verildikten sonra HAD analizleri ile doğrulama yapılmıştır. Çizelge 5.3'te BUSKİ HES çarkının performans değerleri, tasarım yöntemi ile ulaşılan kanat geometrisi için yapılan doğrulama analizlerinden elde edilen performans değerleri ve yüzde farklar verilmiştir.

Çizelge 5.3 : BUSKİ HES performans değerleri ve karşılaştırması.

	Mevcut Çark	TM Çark	Fark [%]
Debi [m³/s]	2,0	2,0	-
Düşü [m]	74,36	74,19	0,23
Güç [kW]	1404,65	1405,91	0,09
Verim [%]	96,32	96,61	0,30

Yapılan karşılaştırma sonucunda elde edilen kanat geometrisi ile mevcut çarkın performans değerleri en fazla fark %0,30 olacak şekilde uyumaktadır. Performans değerlerinin yanı sıra taç, orta kesit ve bilezikte kanat üzerindeki basınç yüklemeleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.7'de iki çark için üç farklı kesitte kanat basınç yüklemeleri gösterilmiştir.

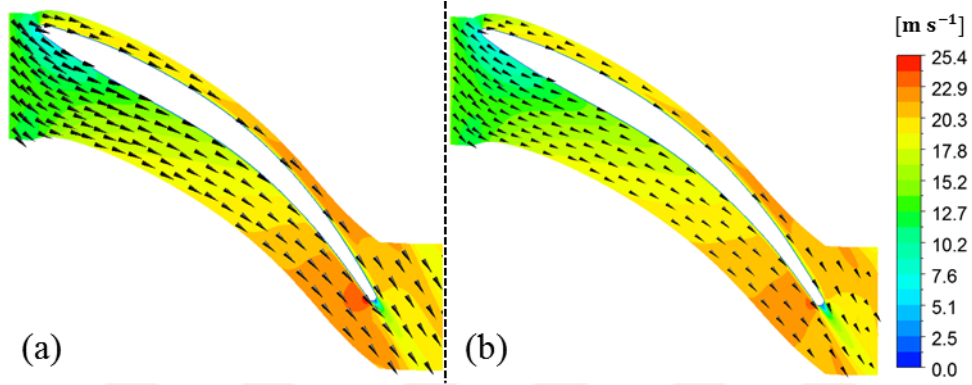


Şekil 5.7 : (a) Taç, (b) orta kesit ve (c) bilezikte basınç yüklemeleri.

Basınç yüklemeleri incelendiğinde, bütün kesitlerde basınç yüklemeleri birbirini takip eden yapıdadır. Bütün kesitlerde tersine mühendislik ile elde edilen kanatta basınç yüklemeleri basınç ve emme yüzeylerinde mevcut çarka göre 3 kPa yukarı ötelendiği görülmektedir. Bu duruma, kanat açısı dağılımlarındaki sapmalar ve kanat çıkışındaki akış alanlarındaki farklılıklar sebep olmaktadır. Ancak basınç yüzeyleri arasında kalan

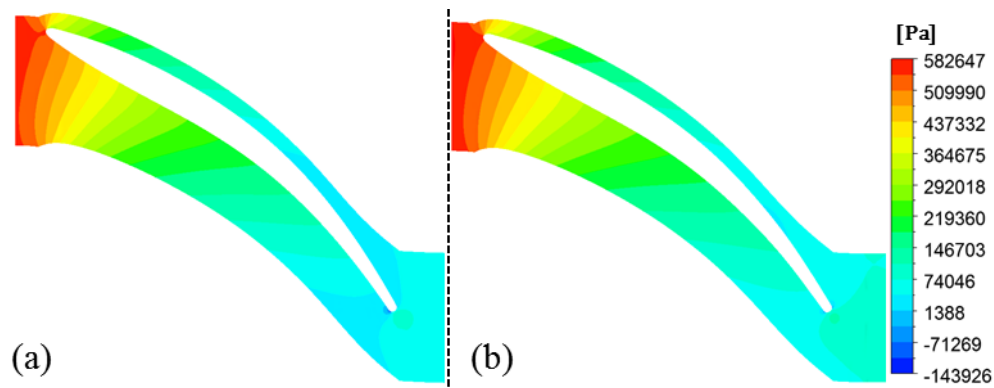
alan her iki çark geometrisinde de aynı olduğundan bu durumun güce etkisi minimal seviyede olmuştur.

Şekil 5.8’de iki kanat yapısı için orta kesitte hız dağılımı ve vektörleri gösterilmiştir. Tasarım yöntemi ile elde edilen kanatta, mevcut çarkta olduğu gibi akış ayrılması veya sapma gözlenmemiştir.



Şekil 5.8 : (a) BUSKİ HES mevcut çark (b) TM çark hız dağılımları ve vektörleri.

Şekil 5.9’da iki kanat yapısı için orta kesitte statik basınç dağılımları gösterilmiştir. Tasarım yöntemi ile elde edilen kanatta, mevcut çarkta olduğu gibi hücum kenarından kuyruk kenarına doğru kanat boyunca statik basıncın kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Elde edilen kanat geometrisinde hız ve basınç dağılımları lokal bölgelerde oluşan farklılıklar haricinde mevcut çark ile aynı karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9 : (a) BUSKİ HES mevcut çark (b) TM çark statik basınç dağılımları.

Yapılan geometrik kıyaslamalar ve HAD analizleri sonucunda tasarım yönteminin doğruluğuna karar verilmiştir.

5.2.2 Kahta HES

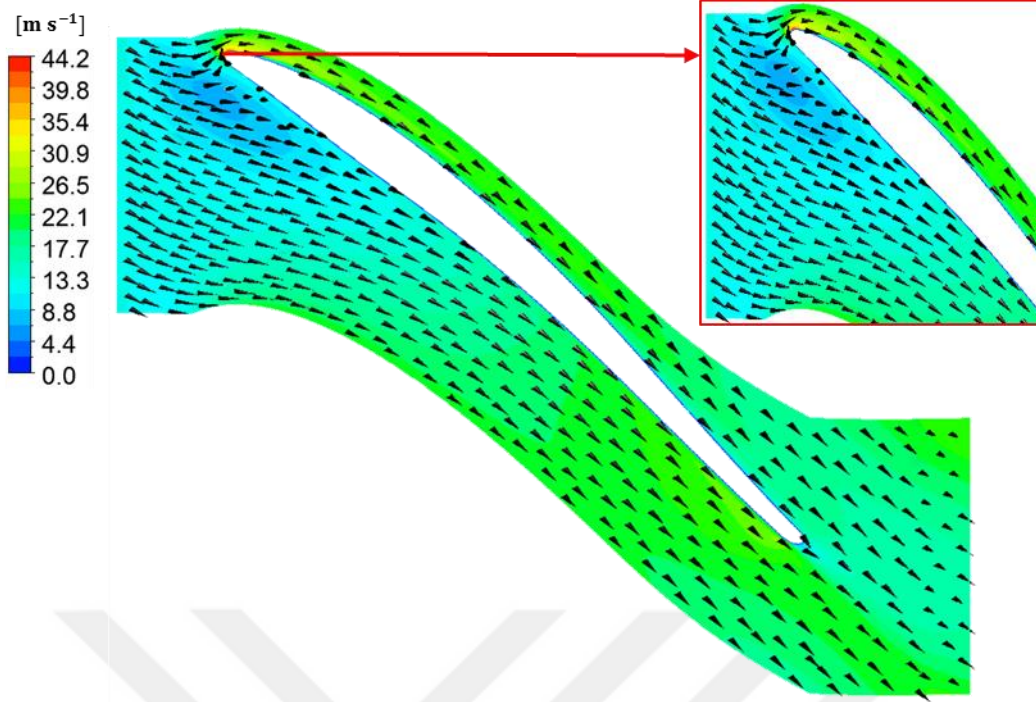
Geometrik kıyaslama sonucunda kanat yapısının uygululuğuna karar verildikten sonra HAD analizleri yürütülmüştür ve Çizelge 5.4'te Kahta HES çark performans değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Kahta HES çarkı performans değerleri.

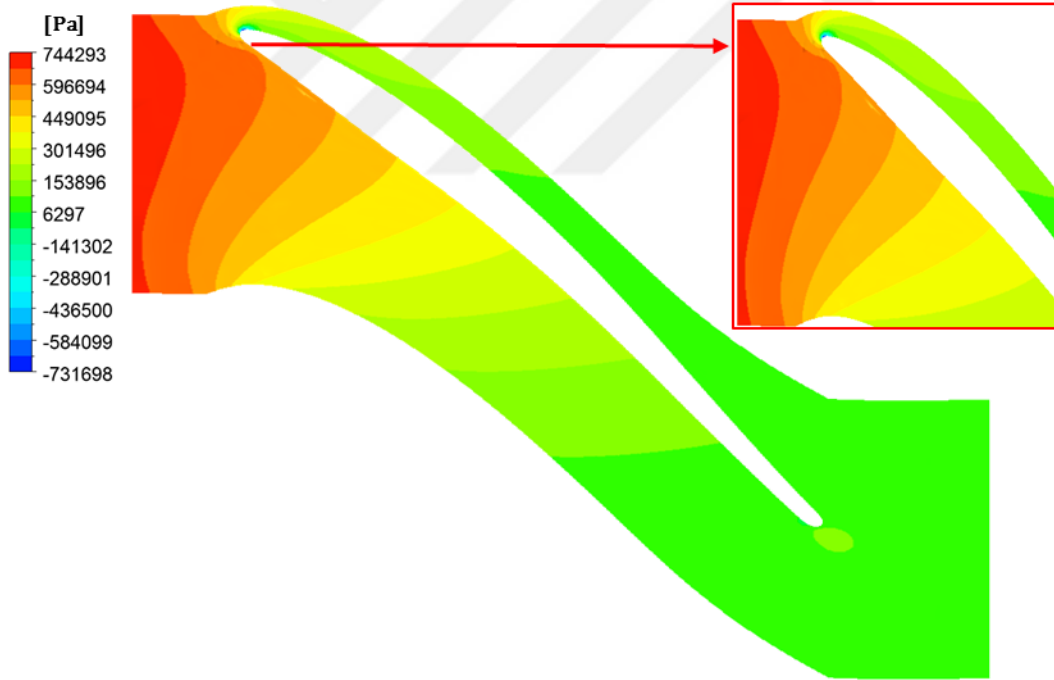
Debi [m ³ /s]	3,25
Düşü [m]	122
Güç [kW]	3500

HAD analizlerinin yapılabilmesi için çark performans değerlerinin yanı sıra suyun çarka giriş açısının bilinmesi gerekmektedir. Türbin enerji denkleminde çark giriş açısı hesaplanabilir, ancak denkleminde yer alan hız teriminin belirlenmesi için ayar kanadı çıkışındaki çevresel hızın ve ayar kanadı çıkış çapının bilinmesi gereklidir. Proje kapsamında sadece taranmış çark geometrisi ve türbin performans değerleri mevcut olduğundan, çark giriş açısının belirlenmesi için 12 derece ile 24 derece arasında değişen açılar için HAD analizleri yürütülmüştür.

Yapılan analizler sonucunda çark performans değerlerini sağlayan giriş açısı 16 derece olarak elde edilmiştir. Bu giriş açısı için 120,6 m düşü ve 3485,4 kW güç elde edilmiştir. Ancak su çarka bu açı ile hücum ettiği zaman, kanat hücum kenarı yerine kanadın basınç yüzeyine çarpmaktadır. Şekil 5.10'da hız dağılımı ve vektörlerinde görüldüğü üzere kanadın basınç tarafında geri dönüşler, emme tarafında ise akış ayrılmaları görülmektedir. Şekil 5.11'de basınç dağılımında görüldüğü üzere hücum kenarı ortasında olması gereken durma noktası kanadın basınç tarafına kaymıştır.

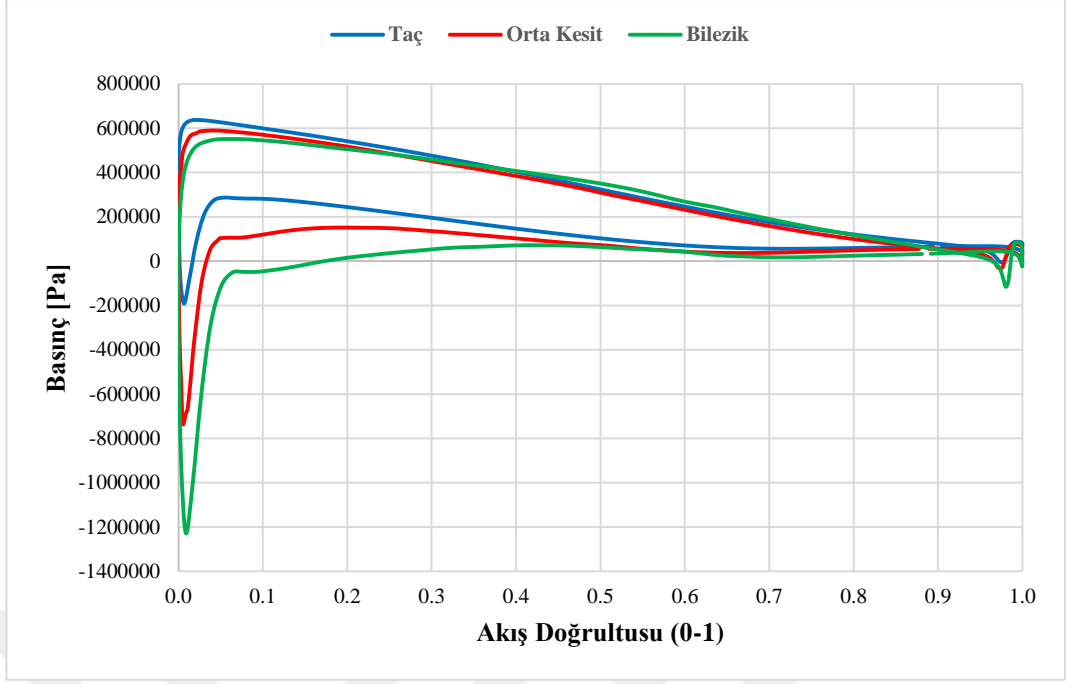


Şekil 5.10 : 16 derece giriş açısı hız dağılımı.



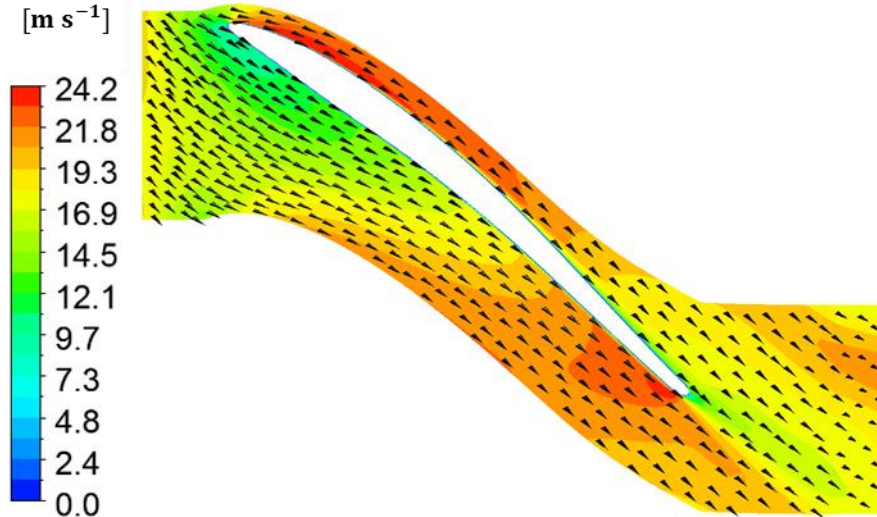
Şekil 5.11 : 16 derece giriş açısı basınç dağılımı.

Şekil 5.1 : Durma noktasının kanat basınç yüzeyine kayması ve akıştaki kopmalar kanat girişinde kaviteasyona yol açmaktadır. Kanat girişinde, basınç yüzeyinde geri dönüşlerden kaynaklı ve emme yüzeyinde akış ayrılmaları sebebi ile Şekil 5.12’de basınç yüklemelerinde görüldüğü gibi negatif basınç bölgeleri oluşmaktadır.

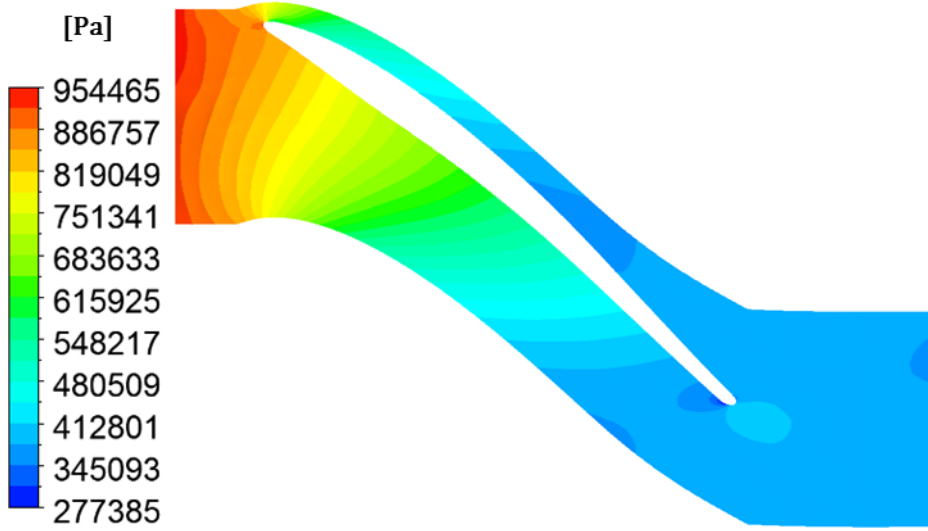


Şekil 5.12 : 16 derece giriş açısı basınç yüklemeleri.

Bu durumda 16 derece hücum açısı çark için uygun değildir. Çarkın kurulu gücün %70'ini sağladığı bilindiğinden, 2450 kW gücü üreten giriş açısı uygun giriş açısıdır. 20 derece giriş açısı için 81,14 m düşü ve 2453,48 kW güç elde edilmiştir. Şekil 5.13'te hız dağılımları incelendiğinde herhangi bir akış ayrılması veya akışta geri dönüş gözlenmektedir. Şekil 5.14'te basınç dağılımında durma noktasının hücum kenarı ortasında meydana geldiği görülmektedir.

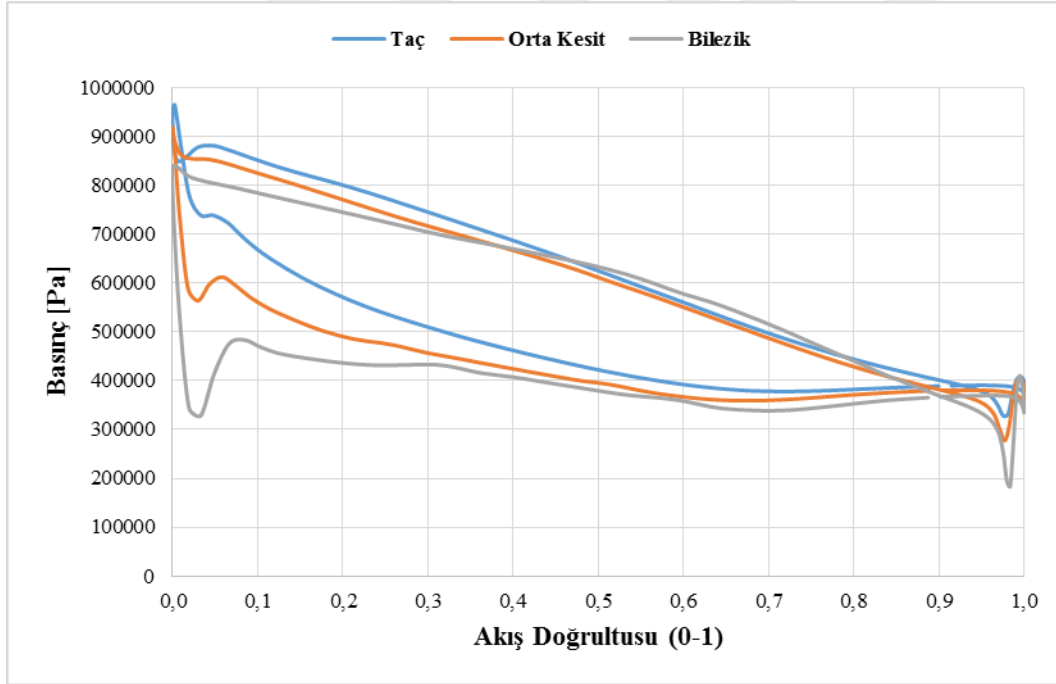


Şekil 5.13 : 20 derece giriş açısı hız dağılımı.



Şekil 5.14 : 20 derece giriş açısı basınç dağılımı.

Analiz sonucunda elde edilen performans değerlerine bakıldığında 20 derece hücum açısında çark tarafından kullanılmayan yaklaşık olarak 40 m düşü bulunmaktadır. Şekil 5.15’de basınç yüklemelerinde de görüldüğü üzere çark tarafından enerjiye çevrilemeyen ortalama 350 kPa’lık basınç mevcuttur.



Şekil 5.15 : 20 derece giriş açısı basınç yüklemeleri.

Enerjiye çevrilemeyen düşünün sebebini araştırmak için HAD analizi sonuçları incelendiğinde, su 42 derecelik açıyla çarkı terk etmektedir. Temel enerji denklemine göre suyun bütün enerjisini çarkta bırakabilmesi için çıkış sirkülasyonunun sıfıra eşit veya yakın olması yani çıkış açısının mümkün olduğunca 90 dereceye yakın olması

gereklidir. Uygun giriş açısını bulabilmek için yürütülen bütün HAD analizleri sonuçları incelendiğinde, tasarım debisi ve düşüsünde suyun çarkı 41 ile 44 derece arasında terk ettiği görülmüştür. Bu durum suyun enerjisinin tamamını çarkta bırakamamasına dolayısı ile istenilen güce ulaşılmasına neden olmaktadır.

Uygun giriş açısı olarak belirlenen 20 derece için temel enerji denklemi, analiz sonucunda elde edilen çıkış açısı 42 derece ile çözüldüğünde elde edilen düşü 78,56 m'dir. Suyun çarkı 90 derecelik açıyla terk ettiği düşünülüğünde elde edilen düşü değeri 113,53 m'dir ve bu durumda da kullanılmayan düşü bulunmaktadır. Suyun çarkı açılı şekilde terk etmesi performansta düşüğe yol açmaktadır.

Rehabilitasyon çalışmalarının temeli kanat çıkışındaki sirkülasyonu sıfırlamaktır. Bu amaçla öncelikli olarak kanat açılarını değiştirerek suyun çarkı 90 derece veya yakın bir açıyla terk etmesini sağlanması planlanmaktadır. Bunun yanı sıra, kanat kalınlık profili değiştirilerek kullanılmayan yaklaşık 10 metre düşünün de enerjiye çevrilmesi planlanmaktadır.

Öncelikli olarak kanat açıları değiştirilerek kademeli olarak kuyruk kenarındaki suyun çıkış açısı 90 dereceye yaklaştırılmıştır. Bu amaçla yapılan değişiklikler Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.5 : Kahta HES çark rahabilitasyonu.

Rehabilitasyon	Değişiklik	Amaç	Sonuç	Düşü [m]	Güç [kW]	Verim [%]	Su Çıkış Açısı [°]
R0	Tasarım yöntemi ile analiz edilebilir bir kanat geometrisi elde edildi.			81.2	2453.5	96.3	42.1
R1	R0'daki bütün kesitlerde hücum kenarı metal açıları 55 dereceye geritildi.	Giriş koşullarını iyileştirmek.	Düşü ve güç değerleri arttı. Ancak kanat kuyruk kenarına doğru akış kopmalarından kaynaklı emme tarafında daha yüksek basınç dağılımı görülmekte dolayısı ile kavitezyon problemi bulunmaktadır.	95.5	2883.2	94.8	72.4
R2	R1 üzerinden bütün kesitlerde kuyruk kenarı metal açıları 4 derece düşürüldü.	Kanat kuyruk kenarında meydana gelen akış kopmalarını engellemek ve su çıkış açısını iyileştirmek.	Çıkış bölgesindeki akış kopmaları azaldı ve basınç dağılımında iyileşme kaydedildi.	101.1	3053.7	94.8	81.5
R3	R2 üzerinden bütün kesitlerde kanat kuyruk kenarı 2 derece azaltıldı.	Çıkış basınç dağılımlarını iyileştirmek.	Basınç dağılımlarında oluşan ters dönme kuyruk kenarına doğru ötelendi.	105.1	3171.7	94.7	87.1

Çizelge 5.5 : Kahta HES çark rehabilitasyonu (devam)

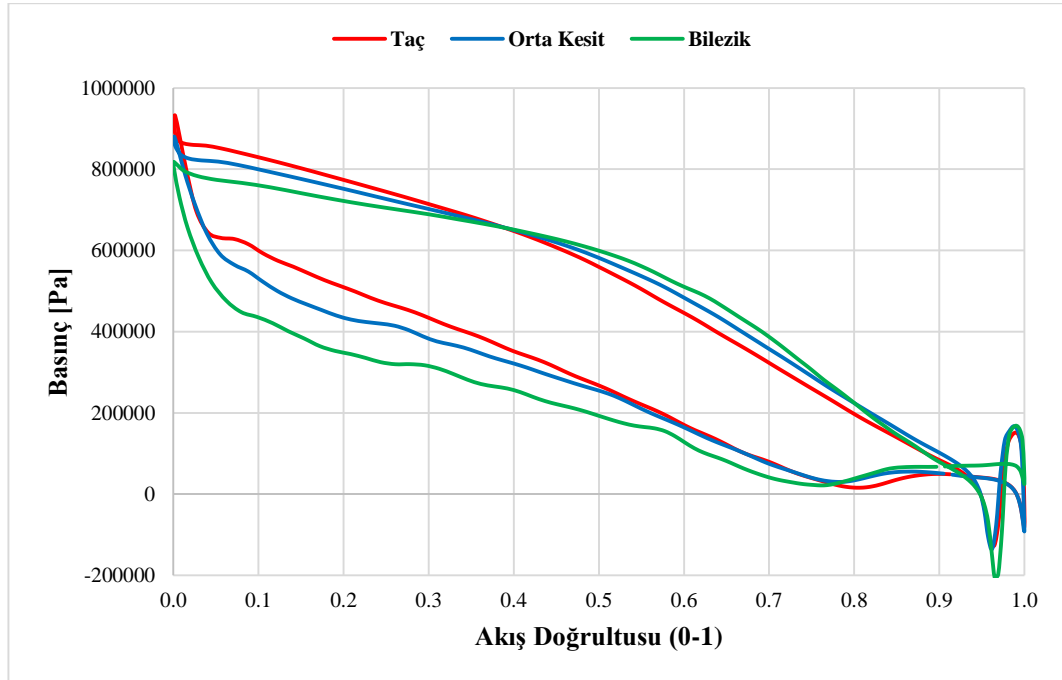
Rehabilitasyon	Değişiklik	Amaç	Sonuç	Düşü [m]	Güç [kW]	Verim [%]	Su Çıkış Açısı [°]
R4	R3 üzerinden kuyuk kenarı bölgesinde metal açısı dağılımları yumuşatıldı.	Daha düzgün hız dağılımı elde etmek.	Basınç ve hız dağılımları iyileşti.	106.3	3206.6	94.6	89.6
R5	R4 üzerinden taç ve bilezik kesitleri hariç diğer bütün kesitlerde hücum kenarı metal açıları düzenlendi.	Emme tarafına kayan durma noktasını hücum kenarına kaydırarak giriş basınç dağılımlarını düzeltmek.	2 kesitte istenen sonuç elde edildi, diğer kesitte durma noktası hücum kenarına yaklaştı.	107.4	3242.2	94.7	89.7
R6	R5 üzerinden bütün kesitlerde kanat girişindeki kamburluk azaltıldı.	Akış alanını daraltarak performansı arttırmak.	Kanat girişindeki basınç dağılımları bozuldu. Güç arttı ancak kavitasyon gözlemlendi ve su çıkış açısı idealden saptı. Verim %0,7 azaldı.	119.4	3578.5	94.0	72.2
R7	R6 üzerinden orta kesit ve bilezik kesitinde kanat çıkışına yakın bölgelerdeki metal açıları düzenlendi.	Akış alanını genişleterek kavitasyon performansını iyileştirmek ve bozulan su çıkış açısını düzenlemek.	Kavitasyon bölgesi azaldı, ancak verim ve su çıkış açısında beklenenden az değişim oldu.	116.9	3504.9	94.1	73.2
R8	R7 üzerinden bütün kesitlerde çıkış metal açısı dağılımları düzeleştirilerek kesit profili çıkışları uzatıldı.	Çıkış basınç dağılımlarını iyileştirmek ve basınç dağılımlarındaki ters dönmeyi iyileştirmek.	Basınç dağılımlarında az da olsa iyileşme görüldü, ancak dağılımlardaki ters dönmeye değişim olmadı.	115.4	3496.3	95.0	87.5
R9	R5 dikkate alınarak, bütün kesitlerde metal açısı dağılımları daha düz hale getirildi ve su giriş açısı 19 dereceye çekildi.	Giriş basınç dağılımlarını düzeltmek.	Giriş basınç dağılımları düzeldi, fakat çıkıştaki basınç dağılımlarındaki ters dönmeye etkisi olmadı. Verim azaldı.	120.1	3606.9	94.3	88.6
R10	R5 dikkate alınarak, kanat kalınlığı 5 mm artırıldı, buna uygun olarak metal açısı dağılımları düzeleştirilerek dağılımların eğimi artırıldı.	Kullanılmayan düşüğü enerjiye çevirmek, kavitasyon karakteristiğini değiştirmek	Kanat çıkışındaki basınç dağılımındaki dönme ötelendi ancak düşü ve güç kazanımı beklenenden az gerçekleşti. Verim %1 arttı.	110.9	3377.6	95.5	87.6
R11	R10 üzerinden bilezik bölgesi metal açısı dağılımlarının eğimi azaltıldı.	Kesit profil boyunu uzatarak düşüğü kullanmak.	Kanat çıkışı basınç eğrileri bozuldu, kavitasyon meydana geldi.	122.6	3716.3	95.1	88.3
R12	Bilezik bölgesi metal açısı dağılımları eğimi R10 ve R11'in ortalaması olacak şekilde artırıldı. Orta kesitte çıkış metal açısı dağılımı daha düz hale getirildi.	Kesit profillerinin kamburluğunu ve su çıkış açısını arttırmak.	Kavitasyon karakteristiği iyileşti.	121.3	3681.9	95.2	89
R13	R12 üzerinden taç kesiti bölgesinde giriş metal açıları 5 derece düşürüldü.	Kesit çevresinin basınç dağılımını düzeltmek	Giriş basınç dağılımlarında az miktarda iyileşme, kanat çıkışındaki kavitasyon bölgesi arttı.	121.7	3700.0	95.4	89.6
R14	R13 üzerinden bütün kesitlerde giriş açıları 10 derece ve dağılımların eğimleri azaltıldı.	Kanat çıkışlarındaki mesafeler artırılarak kavitasyonu önlemek.	R13'e göre daha iyi kavitasyon karakteristiği elde edildi.	120.7	3668.4	95.5	89.3

Çizelge 5.5 : Kahta HES çark rehabilitasyonu (devam)

Rehabilitasyon	Değişiklik	Amaç	Sonuç	Düşü [m]	Güç [kW]	Verim [%]	Su Çıkış Açısı [°]
R15	R14 üzerinden bütün kesitlerde kanat profillerine hafif kamburluk kazandırıldı.	Verimi ve kavitasyon performansını iyileştirmek.	Kanat çıkışındaki kavitasyon giderildi. Kanat çıkışında akış ayrılmaları gözlemlendi.	121.2	3575.8	96.2	86.9
R16	R15 üzerinden bilezik kesiti bölgesinde kamburluk azaltıldı.	Kesit profilleri kısaltılarak akış kopmalarını engellemek.	Kanat boyunca akış takip eden yapıda ancak düşü kaybı yaşandı.	118.2	3471.4	96.4	89.5
R17	R16 üzerinden taç kesiti ile orta kesit arasındaki bölgenin kamburluğu azaltıldı.	Düşü kaybını engellemek.	Kavitasyonsuz performans değerlerini sağlayan tasarım elde edildi.	121.2	3539.6	96.5	89.6

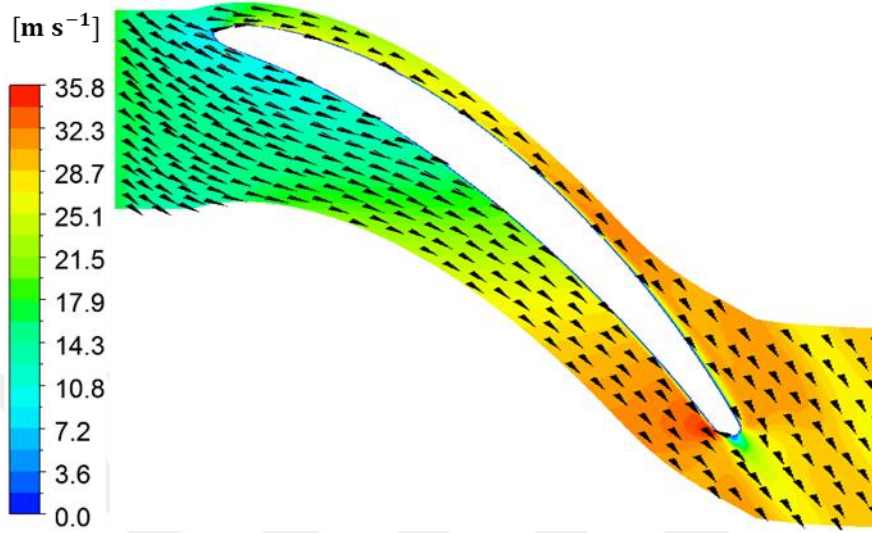
Değiştirilen kanat açıları sonucunda 107,4 m düşü ve 3242,2 kW güç elde edilmiştir. Kullanılmayan düşüyü de enerjiye çevirebilmek için kanat kalınlık dağılımı değiştirilmiştir ve son olarak 121,2 m düşüye ile 3539,6 kW güce %96,5 verimle ulaşılmıştır.

Şekil 5.16'da yeni kanat üzerinde akış doğrultusu boyunca taç, orta kesit ve bilezik kesitlerinde basınç yüklemeleri gösterilmektedir. Kanat çıkışı haricinde negatif basınç bölgesi görülmemektedir ve bütün kesitlerde üniform basınç dağılımı elde edilmiştir.

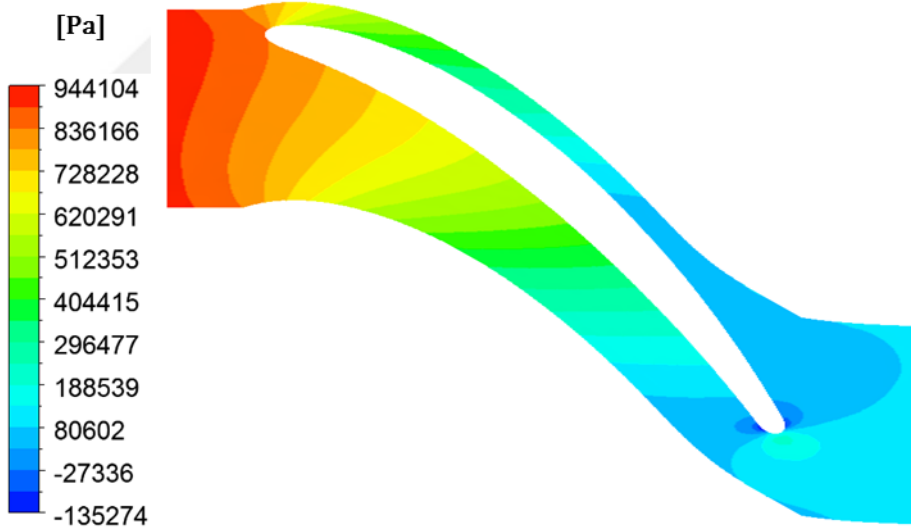


Şekil 5.16 : Kanat üzerindeki basınç yüklemesi.

Şekil 5.17’de kanat orta kesiti hız dağılımı ve vektörlerinde görüldüğü üzere akışın kanat yüzeyini takip ettiği ve herhangi bir akış ayrılması veya geri dönüşün olmadığı görülmektedir. Şekil 5.18’de orta kesitte statik basınç dağılımı incelendiğinde hücum kenarından kuyruk kenarına doğru basıncın giderek azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.17 : Kanat orta kesitinde hız dağılımı ve vektörleri.



Şekil 5.18 : Kanat orta kesitinde statik basınç dağılımı.

Hem hız dağılımında hem de basınç dağılımında görüldüğü üzere durma noktası hücum kenarında meydana gelmektedir. Her iki dağılımdan da yeni kanat geometrisinin akışı doğru giriş ve çıkış açıları ile düzgün yönlendiren geometri olduğu anlaşılmaktadır.

6. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında varolan Francis tipi su türbini çarkı için tersine mühendislik ile analiz edilebilir çark kanadına ulaşan tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Geometrik tersine mühendislik aşamaları özgül hızları farklı iki çark için uygulanmıştır. Geliştirilen yöntem BUSKİ HES çarkı için doğrulanmıştır, sonrasında kurulu gücün %70'ini sağlayan Kahta HES için uygulanarak performansa etki eden sebepler araştırılmıştır.

Tersine mühendislik sürecinin başlangıcı yüzey bilgilerinin elde edilebilmesidir. Bu amaçla üç boyutlu katı modele geçiş için var olan parçanın taranması gerekmektedir. Tarama ile elde edilen nokta bulutu verisinden katı modele geçiş yapılabilmesi için yüzey yaklaşım yöntemleri kullanılmaktadır. Katı model üzerinden analiz edilebilir kanat geometrisine ulaşmak için kanat tasarım parametrelerinin belirlenip tasarım programına aktarılmalıdır. Öncelikli olarak kanadın fiziksel sınırlarının belirlendiği üç boyutlu kanat geometrisinin radyal kesite izdüşümü olan kanat meridyonel profili belirlenir. Belirlenen profilin bileşen eğrileri ve tasarım programının belirlediği yardımcı eğriler yardımı ile kanat açılarının hesaplanacağı kanat kesit profilleri elde edilir. Açılarının hesaplanabilmesi için kesit profillerinin meridyonel uzunlukları ile açı korur görüntü planı hesaplanmalıdır. Kanat kalınlık dağılımı da kanat açılarının belirlendiği profillerden basınç yüzeyleri ile emme yüzeyleri arasında kalan mesafe yardımı ile elde edilir. Bütün tasarım parametreleri belirlendikten sonra elde edilen kanat geometrisi ile katı model arasında geometrik kıyaslama yapılmalıdır. Geometrik kıyaslama sonrasında HAD analizleri ile performans değerlerinin gerçek veriler ile örtüşmesi gerektiğinden doğrulama analizi yapılır.

Tarama uygulamasında özgül hızı farklı iki çark taranarak özgül hızın sayısallaştırma işlemine olan etkisi araştırılmıştır. Özgül hıza bağlı olarak kanat yapısında gerçekleşen yapısal değişiklikler tarama işlemini doğrudan etkilemektedir. Özgül hız arttıkça kanat hücum kenarından kanat kuyruk kenarına olan mesafenin azalması doğru açıyla eksiksiz tarama yapılmasını sağlamaktadır. Özgül hızın düşmesiyle birlikte hücum kenarı ile kuyruk kenarı arasındaki mesafenin artması ve kanatların birbirlerine yaklaşması sebebi ile tarama açısı bozulmaktadır. Bozulan açı gönderilen ışınlarda

sapmalara ve gürültü kaynaklı problemlerin artmasına dolayısı ile taramada elde edilen veri kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır.

BUSKİ HES çarkı için tasarım yöntemi uygulama çalışmaları sonucunda yapılan geometrik kıyaslamada yeni kanat geometrisinin uygun olduğuna karar verilmiştir ve HAD analizleri yardımı ile doğrulama yapılmıştır. Yapılan doğrulama analizleri sonucunda çark performans değerleri ile karşılaştırma yapılmıştır ve en yüksek farkın %0,3 olduğu görülmüştür. Karşılaştırma verilerinden yola çıkarak tasarım yönteminin doğruluğuna karar verilmiştir. Kahta HES için tasarım yöntemi uygulaması sonucunda yapılan geometrik kıyaslamada kanat geometrileri arası hacimsel fark tarama verisinde bulunan kaynak bölgeleri nedeni ile yüksektir. Ancak her iki geometri örtüştürüldüğünde elde edilen kanat geometrisi katı modelle birbirini takip eder yapıdadır. HAD analizlerinin yürütülebilmesi için suyun çarka hücum açısı farklı açılar için analizler yürütülerek 20 derece olarak tespit edilmiştir. Fakat bu durumda çark tarafından enerjiye dönüştürülemeyen yaklaşık olarak 40 m düşü bulunmaktadır. Performanstaki bu düşüşü araştırmak adına analiz sonuçları incelendiğinde suyun çarkı açılı bir şekilde terk ettiği dolayısı ile çarkı terk ederken hala enerjisi olduğu anlaşılmıştır. Rehabilitasyon çalışmalarının temeli suyun çarkı 90 derece ile çıkmasını sağlamaktır. Kanat açılarında yapılan değişikliklerle suyun çarkı 90 dereceye yakın bir açıyla çıkması sağlanmıştır fakat bu durumda da kullanılmayan düşü bulunmaktadır. Kalan düşünün de enerjiye çevrilmesi için kanat kalınlığında değişiklik yapılmıştır.

Sonuç olarak geliştirilen tasarım yöntemi ile kurulu gücünün %70'ini sağlayabilen çark için analiz edilebilir kanat geometrisi elde edilerek performansta düşüşün sebepleri bulunarak rehabilite edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen yeni kanat geometrisi ile %96,5 verime, 121,2 m düşüye ve 3539,6 kW güce ulaşılmıştır.

Bu tez kapsamında geliştirilen Francis tipi türbin çarkı tersine mühendislik tasarım yöntemi BUSKİ HES için uygulanmıştır. Uygulama sonucunda tersine mühendislik ile elde edilen çark kanadı geometrisi performansı en fazla %0,3 farklarla orijinali ile uyumludur. Dolayısıyla örnek çalışma sonuçlarına bağlı olarak, tez kapsamında geliştirilmiş olan Francis tipi türbin çarkı için tersine mühendislik tasarım yöntemi tüm Francis tipi türbin çarklarına uygulanabilir olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Varady, T., Martin, R. R., Coxt, J.,** (1997). Reverse Engineering of Geometric Models-An Introduction, *Computer Aided Design Vol. 29*, 255-268.
- [2] **Raja, V., Fernandes, K. J.,** (2007). Reverse Engineering An Industrial Perspective, Vinesh Raja, Kiran J. Fernandes, Springer.
- [3] **Motavalli, S.,** (1998). Review of Reverse Engineering Approaches, *Computers ind. Engng Vol. 35*, 25-28.
- [4] **Peng, Q., Loftus, M.,** (1998). A New Approach to Reverse Engineering Based on Vision Information, *International Journal of Machine Tools & Manufacture 38*, 881-899.
- [5] **Lee, K.H., Park, H.P.,** (2000) Automated Inspection Planning of Free-Form Shape Parts by Laser Scanning, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing 16*, 201-210.
- [6] **Son, S., Park, H.P., Lee, K.H.,** (2002). Automated Laser Scanning System for Reverse Engineering and Inspection, *International Journal of Machine Tools & Manufacture 42*, 889-897.
- [7] **Balta, C., Öztürk, S.,** Tersine Mühendislikte Lazer Tarama Nokta Bulutundan Örme Yüzey Elde Edilmesi.
- [8] **Farin, G.,** (1997). Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design a Practical Guide, 4th ed., Academic Press.
- [9] **Zhang, Y.,** (2003). Research into the Engineering Application of Reverse Engineering Technology, *Journal of Materials Procceisng Technology 139*, 472-475.
- [10] **Fischer, A., Manor, A.,** (1999). Utilizing Image Processing Techniques for 3D Reconsruction of Laser-Scanned Data, *Annals of the CIRP vol. 48*.
- [11] **Werner, A., Skalski, K., Piszczatowski, S., Swieszkowski, W., Lechnaik, Z.,** (1998). Reverse Engineering of Free-Form Surfaces, *Journal of Materials Proccesing Technology 79*, 128-132.
- [12] **Bagci, E.,** (2009). Reverse Engineering Applications For Recovery of Broken or Worn Parts and Re-Manufacturing: Three Case Studies, *Advances in Engineering Software 40*, 407-418.
- [13] **Gao, j., Chen, X., Zheng, D., Yilmaz, O., Gindy, N.,** (2006). Adaptive Restoration of Complex Geometry Parts through Reverse Engineering Application, *Advances in Engineering Software 37*, 592-600.
- [14] **Sansoni, G., Docchio, F.,** (2004). Three-dimensional Optical Measurements and Reverse Engineering for Automotive Applications, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 20*, 359-367.

- [15] **Lin, Y.P., Wang, C. T., Dai, K. R.**, (2005). Reverse Engineering in CAD Model Reconstruction of Customized Artificial Joint, *Medical & Physics* 27, 189-193.
- [16] **Chen, L. C., Lin, G. C. I.**, (2000). Reverse Engineering in the Design of Turbine Blades – A Case Study in Applying the MAMDP, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 16.
- [17] **Garcia R., M. J., Boulanger, P., Barbosa P., J., Betancur M., J., Quintero A., B., Castaneda, L. F., Betancur G., G. R.**, (2006). Application of the Reverse Engineer in the Modelling of a Francis Turbine in a Hydroelectric Minipower Station, Betancur G., G. R., *23rd ISPE International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*.
- [18] **Asvapoositkul, W., Amphonkiat, T.**, Three-Dimensional Turbomachinery Inverse Blade Design: An Application to Axial Flow Compressor.
- [19] **Zangeneh, M., Goto, A., Harada, H.**, (1999). On the Role of Three-Dimensional Inverse Design Methods in Turbomachinery Shape Optimization, *Proc. Instn Mech Engrs Vol 213 Part C*.
- [20] **Yin, J., Li, J., Wang, D., Wei, X.**, (2014). A Simple Inverse Design Method for Pump Turbine, *7th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*.
- [21] **Goto, A., Nohmi, M., Sakurai, T., Sogowa, Y.**, (2002). Hydrodynamic Design System for Pumps Based on 3D CAD, CFD and Inverse Design Method, *ASME Journal of Fluids Engineering Vol. 124*.
- [22] **Paish, O.**, (2002). Small Hydro Power: Technology and Current Status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 537-556.
- [23] “World Energy Resources Charting the Upsurge in Hydropower Development 2015” Erişim adresi: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2015/05/World-Energy-Resources_Charting-the-Upsurge-in-Hydropower-Development_2015_Report2.pdf, erişim tarihi: 13.02.2016.
- [24] **Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., Huebsch, W.W.** *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Wiley Publishing, (2010).
- [25] **Dixon, S.L.**, *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*, Fifth edition, Elsevier Butterworth–Heinemann, (2005).
- [26] **Drtna, 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.
- [27] **Krivchenko, G.I.**, *Hydraulic Machines: Turbines and Pumps*, Mir Publishers, Moscow, (1986).
- [28] **Alexander, K.V., Giddens, E.P., Fuller, A.M.**, (2009). Axial-flow Turbines for Low Head Microhydro Systems, *Renewable Energy* 34(1), 35-47.

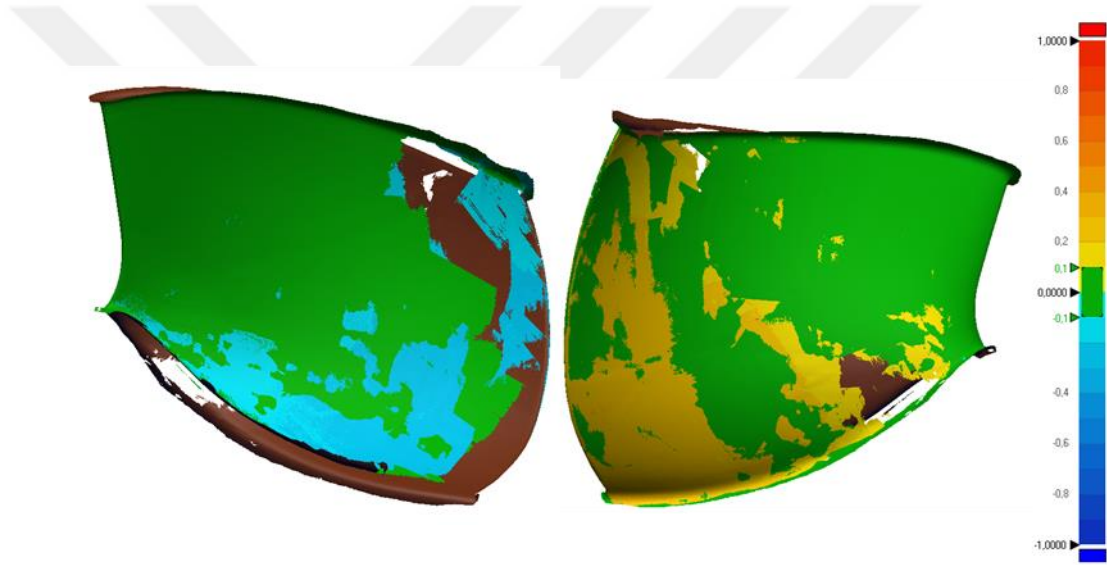
- [29] **Okyay, G.**, (2010). Utilization of CFD Tools in the Design Process of a Francis Turbine, *Yüksek Lisans Tezi*, O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [30] Geomagic Design X, Sürüm 16.0 Help.
- [31] ANSYS Bladegen, Sürüm 15.0, User Manuel.
- [32] **Wu, J., Shimmei, K., Tani, K., Nikura, K., Sato, J.**, (2007). CFD-based Design Optimization for Hydro Turbines, *Journal of Fluid Engineering*, vol. 129, 159-168.
- [33] **Raabe J.**, *Hydropower: The Design, Use, and Function of Hydromechanical, Hydraulic and Electrical Equipment*, VDI-Verlag, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, (1985).
- [34] **Milos, T., Barglazan, M.**, (2004). CAD Technique Used to Optimize Francis Runner Design, *The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara*, Romania.
- [35] **Nourbakhsh, A., Razavi, O. S., Khodabakhsh, H., Mehrabadi, A.**, (2007). New Approach for Hydraulic Design of Francis Runner Based on Empirical Correlation, *International Conference on Small Hydropower – Hydro Sri Lanka*.
- [36] ANSYS CFX, Sürüm 15.0, User Manuel.
- [37] **Akın, H.**, (2014). Su Türbini Tasarımı Amaçlı Sayısal Yöntemler Geliştirilmesi ve Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [38] **Ayancık, F.**, (2014). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yardımıyla Su Türbini Çarkı Tasarımı ve Eniyilemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [39] **Aylı, Ü. E.**, (2012). Süpersonik Kavitelerdeki Akışın Sayısal Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [40].ANSYS Turbogrid, Sürüm 15.0, User Manuel.



EKLER

EK 1: 268,64 özgül hıza sahip çark tarama işlemleri

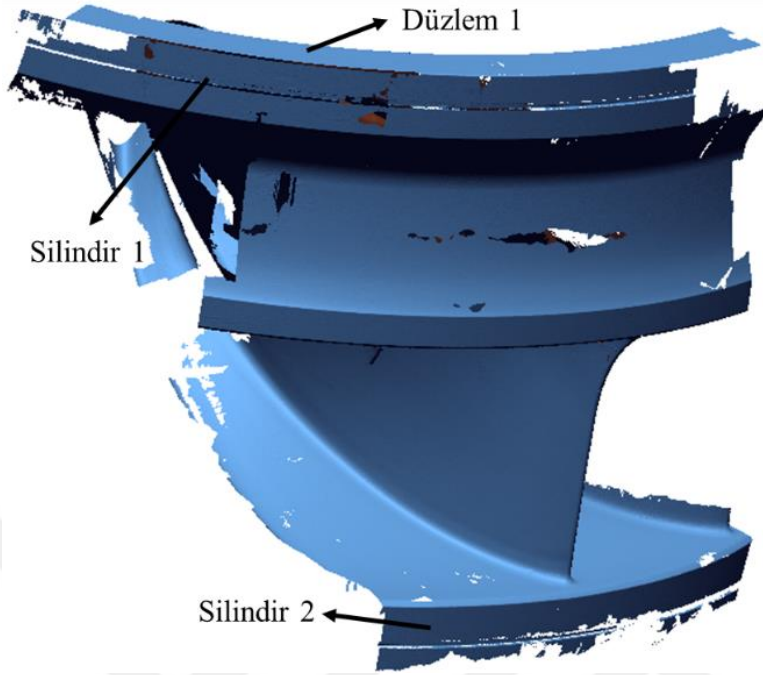
Özgül hızı düşük olan çarkın iki farklı lazer tarama verisi birbiri ile örtüştürülmüş ve kanat 4 ile kanat 11 için yapılan taramalarındaki farklılıklara bakılmıştır. Şekil Ek 1.1'de özgül hızı düşük olan çarkın iki kanadı için lazer tarama verilerinin emme ve basınç yüzeylerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil Ek 1.1 : Tarama verilerinin emme ve basınç yüzeylerinin karşılaştırılması.

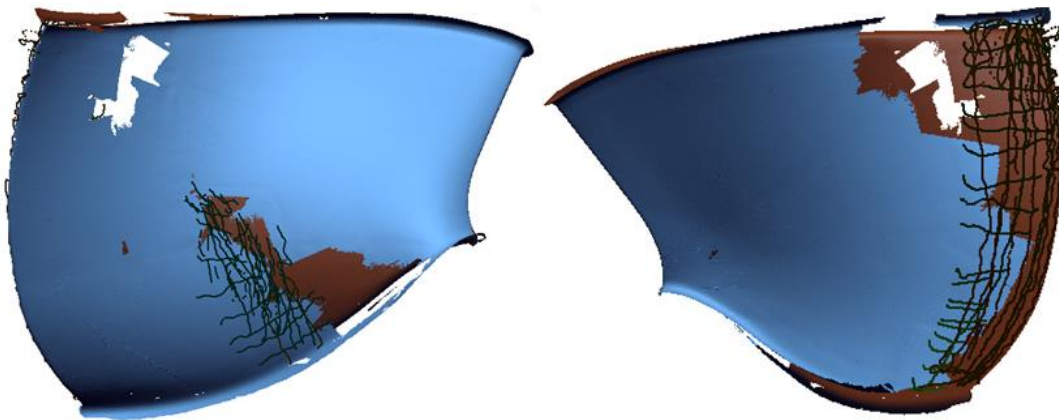
Yapılan karşılaştırma sonucunda iki kanat verisi arasındaki en büyük fark $\pm 0,35$ mm civarında; basınç yüzeyinde kanadın bilezik bölgesine ve kuyruk kenarına yakın bölgelerde, emme yüzeyinde kanadın kuyruk kenarına yakın bölgelerde olduğu görülmüştür. Her iki tarama verisi birbiri ile küçük farklarla örtüşmekte, ancak kanat dörtte kanat onbire göre yardımcı eğrileri ve dönme eksenini tanımlamak için daha fazla yüzey bulunduğu için tasarım geometrisi olarak kanat dört seçilmiştir. Çarkın dönme eksenini tanımlamak için, oluşturulan yüzey formları gruplara ayrılmış ve referanslamada kullanılacak yüzeyler belirlenmiştir. Şekil Ek 1.2'de gösterilen çark dış bağlantı silindirlere ve yüzeyleri dönme eksenini tanımlamada kullanılmıştır. Şekil Ek.1.2'de; Silindir 1 bilezik bağlantı silindiri, Silindir 2 taç bağlantı silindiri ve

Düzlem 1 bilezik bağlantı yüzeyidir. Oluşturulan geometri için dönme eksenini silindirin merkezinden ve düzlemden geçecek şekilde belirlenmiştir.

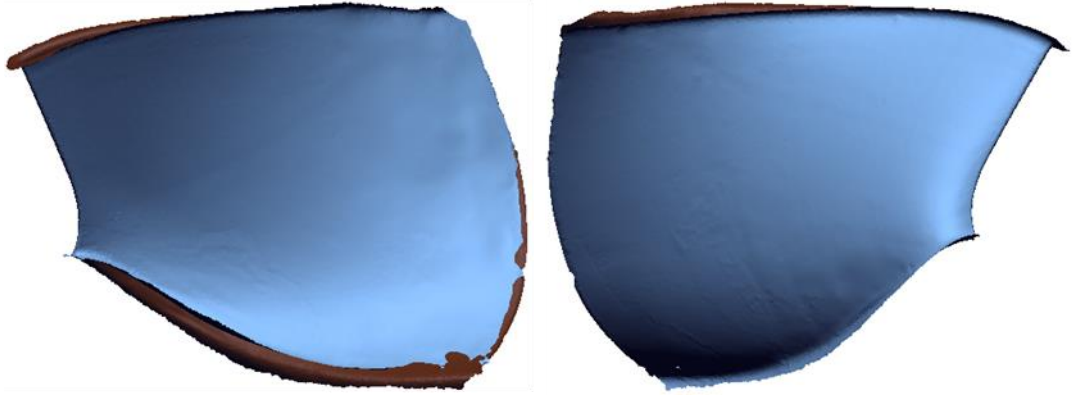


Şekil Ek 1.2 : Dönme eksenini referans yüzeyleri ve koordinat sistemi.

Yapılan tarama işleminde kanat yapısından ve yerleşiminden kaynaklı kanat kuyruk kenarına yakın bölgeler lazer tarama ile taranamamıştır ve dokunmatik prob ile yüzey oluşturmaya yeterli sayıda nokta alınmıştır. Bazı bölgeler direkt olarak dokunmatik prob ile alınan nokta verileri ile bazı bölgeler ise tasarım programının yüzey tamamlama fonksiyonları kullanılarak tamamlanmıştır. Şekil Ek 1.3'te dokunmatik prob ile taranmış bölgeler, Şekil Ek 1.4'te yüzeylerin tamamlanması ile elde edilen kanat nokta bulutu verisi gösterilmektedir.

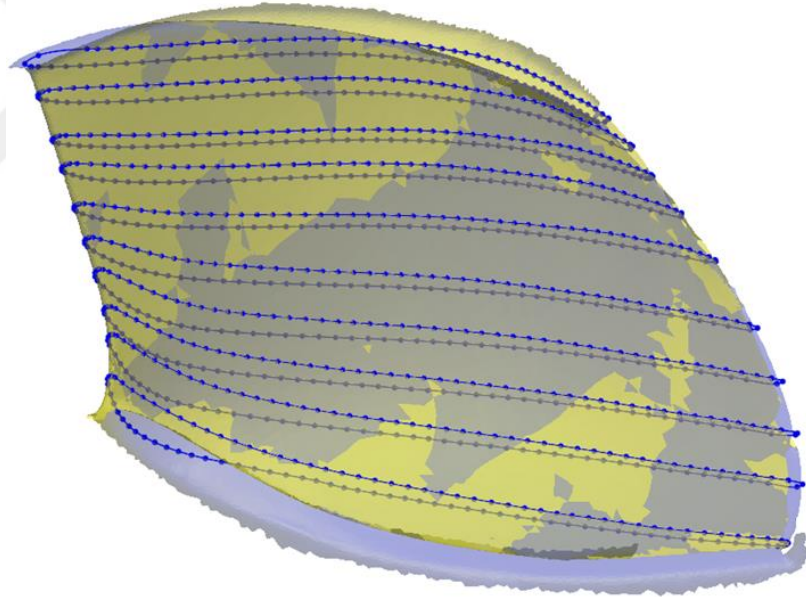


Şekil Ek 1.3 : Emme ve basınç yüzeylerinde dokunmatik prob ile taranan bölgeler.



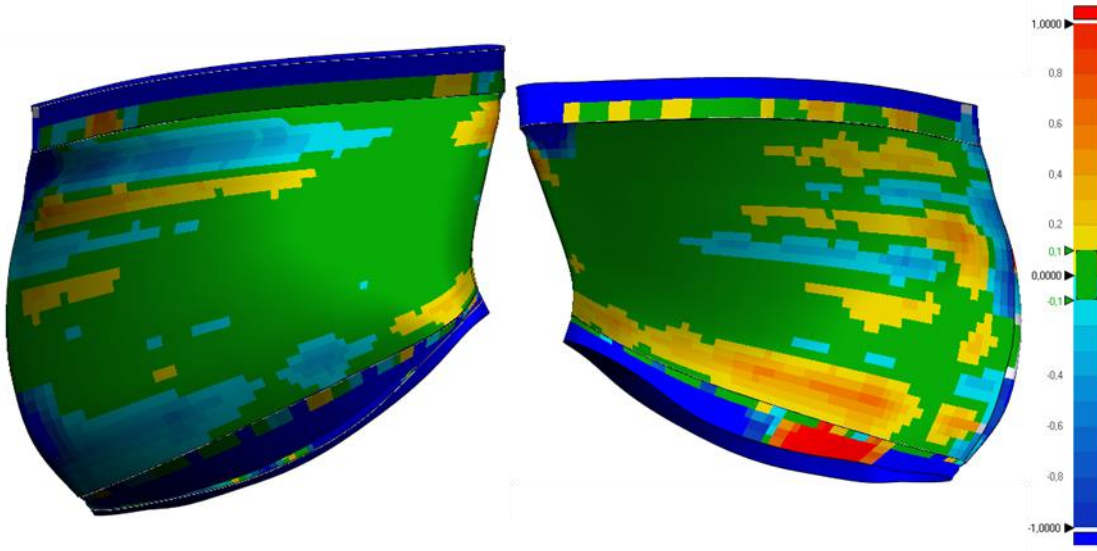
Şekil Ek 1.4 : Emme ve basınç yüzeylerinin tamamlanmış nokta bulutu verileri

Tamamlanan nokta bulutundan üçgen ağ yapısında yüzey formu elde edilmiştir. Yüzey formundan katı modele geçiş yapılması için özgül hızı yüksek olan çarkta olduğu gibi kanat yüzeyini kesen düzlemlere kanat profilleri yansıtılmıştır. Şekil Ek 1.5’de katı modele geçişte kullanılan düzlemlere yansıtılmış kanat profilleri gösterilmektedir.



Şekil Ek 1.5 : Düzlemlere yansıtılmış kanat profilleri.

Kanat kuyruk kenarının eliptiklik başlangıcına bu bölümde tarama verisinin eksik olmasından dolayı ultrasonik kalınlık ölçüm cihazı kullanılarak karar verilmiştir. Ölçüm değerlerinin ortalaması alındığında eliptik bölge kalınlık başlangıcı olarak beş mm uygun görülmüştür ve buna göre kanat kuyruk kenarı tamamlanmıştır ve yansıtılan profiller birleştirilerek kanat katı modeli oluşturulmuştur. Şekil Ek 1.6’da elde edilen katı model ile nokta bulutu arasındaki sapma gösterilmektedir.

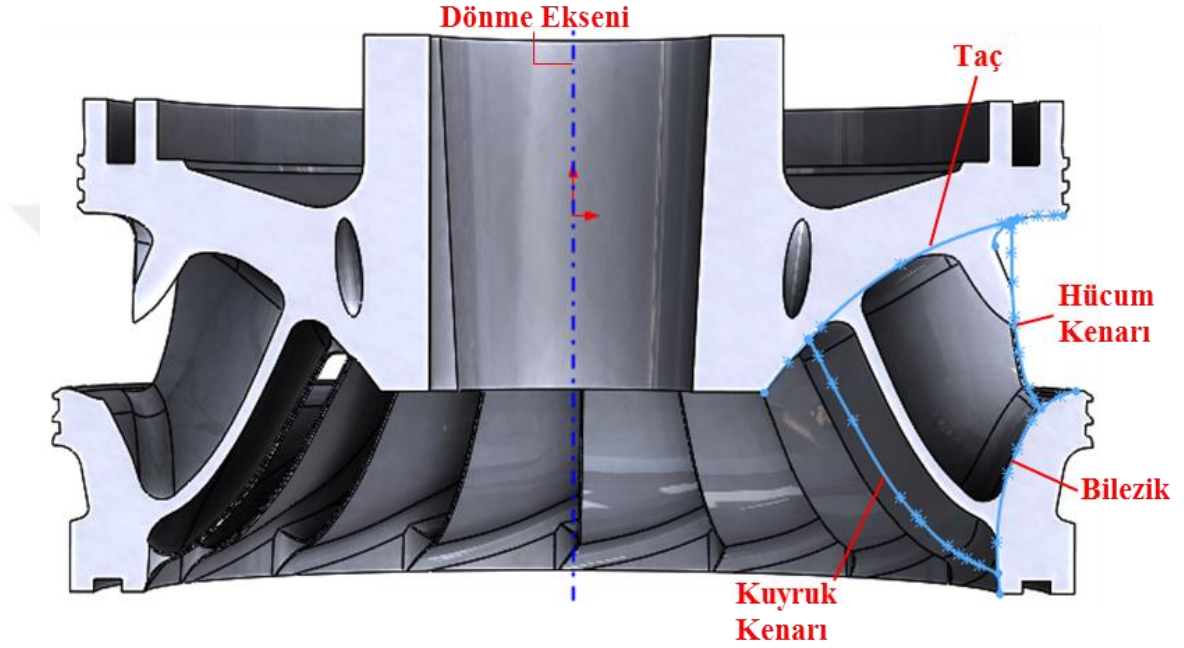


Şekil Ek 1.6 : Nokta bulutu ile katı model arasındaki sapma.

Nokta bulutu ile oluşturulan katı model genel olarak en fazla bir mm fark ile örtüşmektedir. Ancak kanat kuyruk kenarı bölgesinde fark bazı bölümlerde 2,8 mm'ye kadar çıkmıştır. Bu bölgelerde lazer tarama verisinin az olması, dokunmatik prob ile yapılan ölçümlerde yarıçap telafisi yapılması ve eliptik bölgenin sonradan tanımlanması bu bölgedeki farkın artmasına sebep olmaktadır.

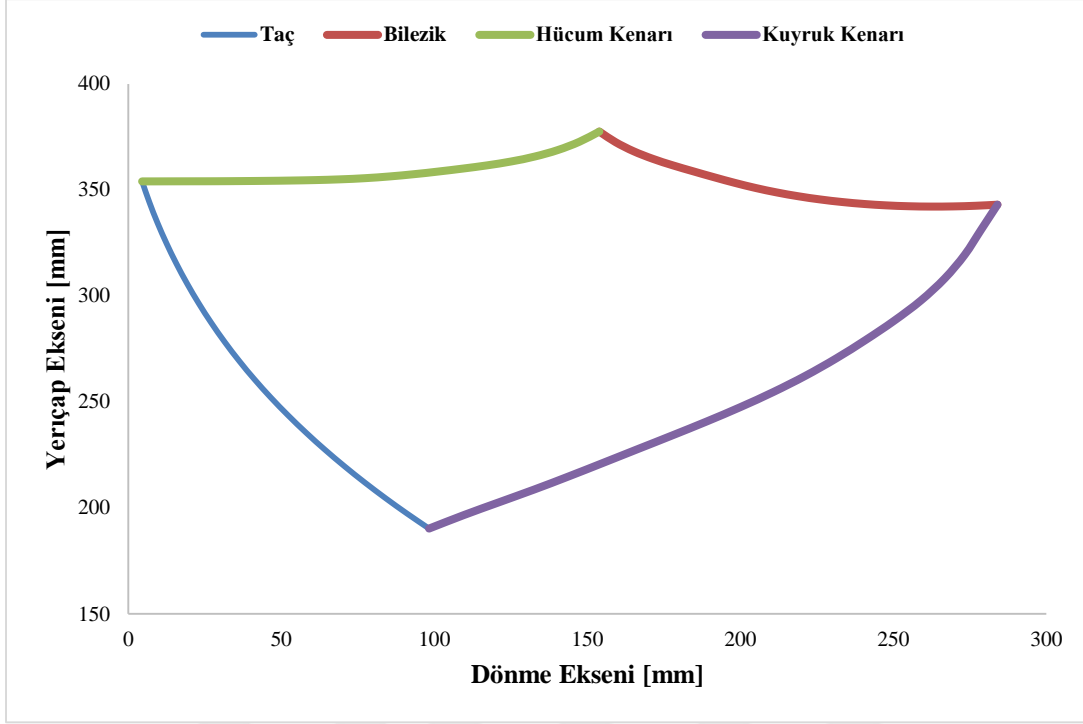
EK 2: Kahta HES tasarım yöntemi uygulaması

Kahta HES çarkının tarama verisinden elde edilen katı modeli üzerinden meridyonel profil belirlenmiştir. Farklı kesit sayılarında yapılan tasarımların hepsinde aynı meridyonel profil kullanılmıştır. Çarkın dönme ekseninden geçen bir düzlem ile kesit alınmıştır ve meridyonel profilin bileşen eğrileri olan hücum kenarı, kuyruk kenarı, taç ve bilezik eğrileri bu düzleme yansıtılmıştır.



Şekil Ek 2.1 : Kahta HES çarkı meridyonel profili.

Elde edilen bileşen eğrileri için nokta bulutu oluşturularak tasarım programı Bladegen'e aktarılmıştır.



Şekil Ek 2.2 : Kahta HES çarkı Bladegen meridyonal profili.

Kanat açılarının ve kalınlık dağılımının belirlendiği yardımcı eğrilerin TM sürecine etkisini araştırmak amacı ile farklı sayılarda yardımcı eğrilerle tasarım yapılmıştır. Farklı tasarımlar için katı modelden kesitler alınarak kanat açılarının ve kanat kalınlık profillerinin belirleneceği profiller elde edilmiştir. Farklı tasarımlar için açılar belirleneceği eğiklik hattı belirlenmiştir ve eğiklik hattı üzerine yerleştirilen eş mesafeli noktalar yardımı ile her kesitin meridyonal uzunluğu hesaplanmıştır.

Çizelge Ek 2.1 : Kahta HES 3 kontrol eğrili tasarım kanat profili meridyonal uzunlukları.

Kesit Profili	Meridyonal Uzunluk [mm]
Profil 1	191,61
Profil 2	176,37
Profil 3	165,38
Profil 4	154,33
Profil 5	137,81

Çizelge Ek 2.2 : Kahta HES 7 kontrol eğrili tasarım kanat profili meridyonel uzunlukları.

Kesit Profili	Meridyonel Uzunluk [mm]
Profil 1	191,32
Profil 2	183,15
Profil 3	175,72
Profil 4	169,18
Profil 5	163,86
Profil 6	158,55
Profil 7	152,38
Profil 8	144,86
Profil 9	137,42

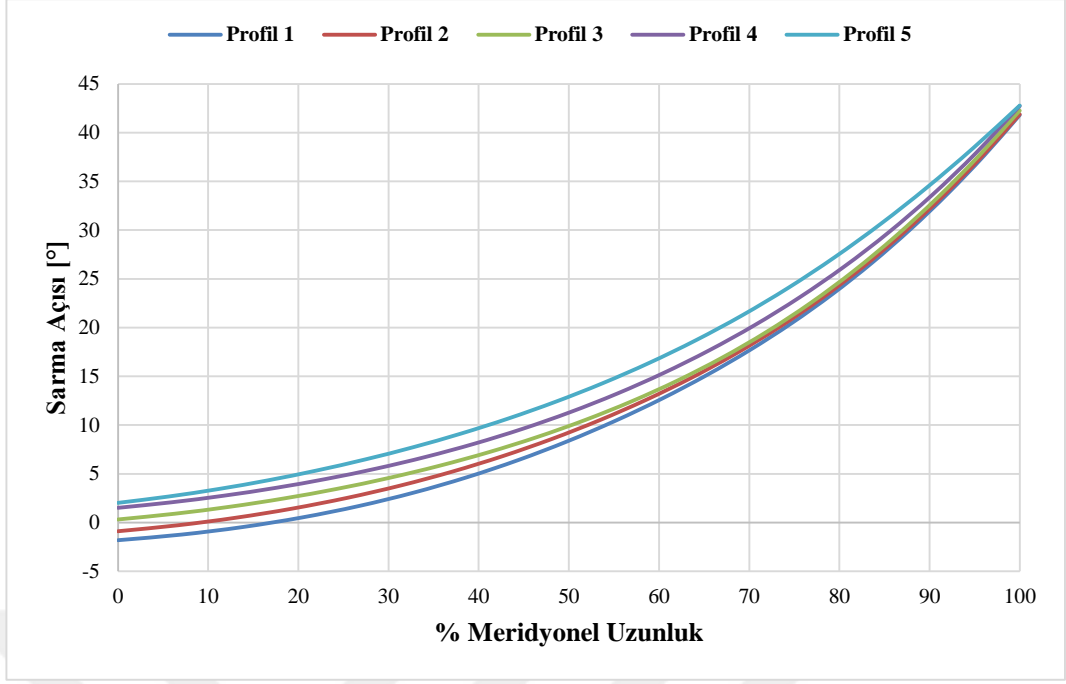
Çizelge Ek 2.3 : Kahta HES 11 kontrol eğrili tasarım kanat profili meridyonel uzunlukları.

Kesit Profili	Meridyonel Uzunluk [mm]
Profil 1	191,61
Profil 2	185,95
Profil 3	180,95
Profil 4	175,96
Profil 5	171,41
Profil 6	167,51
Profil 7	164,04
Profil 8	160,61
Profil 9	156,68
Profil 10	152,55
Profil 11	147,84
Profil 12	142,13
Profil 13	137,83

Çizelge Ek.2.4 : Kahta HES 15 kontrol eğrili tasarım kanat profili meridyonel uzunlukları.

Kesit Profili	Meridyonel Uzunluk [mm]
Profil 1	191,60
Profil 2	187,28
Profil 3	183,51
Profil 4	179,93
Profil 5	176,38
Profil 6	173,11
Profil 7	170,27
Profil 8	167,74
Profil 9	165,38
Profil 10	163,01
Profil 11	160,34
Profil 12	157,37
Profil 13	154,34
Profil 14	150,92
Profil 15	146,71
Profil 16	141,87
Profil 17	137,85

Meridyonel uzunluk hesaplamaları ile boyutsuz meridyonel uzunluk hesaplamaları yapılmıştır ve eğiklik hattı üzerindeki noktaların konumları ile Denklem 2.11'e göre her profil için kanat sarma açısı dağılımları hesaplanmıştır. Şekil Ek 2.3'te üç yardımcı eğrili tasarım için sarma açısı dağılımı sunulmaktadır. Profil 1 taç eğrisi ile elde edilen kesit için, Profil 5 bilezik eğrisi ile elde edilen kesit için elde edilen kanat profilidir.



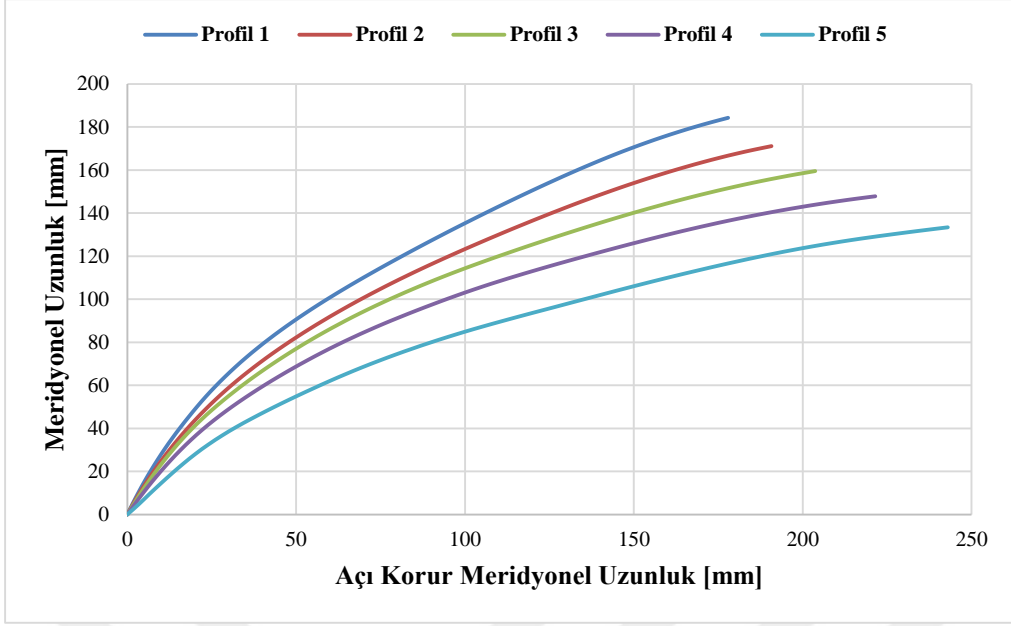
Şekil Ek 2.3 : Kahta HES kanat sarma açısı dağılımı.

Kanat metal açılarının hesaplanması için her kesit için açı korur meridyonel konumlar ve uzunluklar Denklem 2.12'ye göre hesaplanmıştır. Çizelge Ek 2.5'te üç yardımcı eğrili tasarım için hesaplanan açı korur meridyonel uzunluklar verilmiştir.

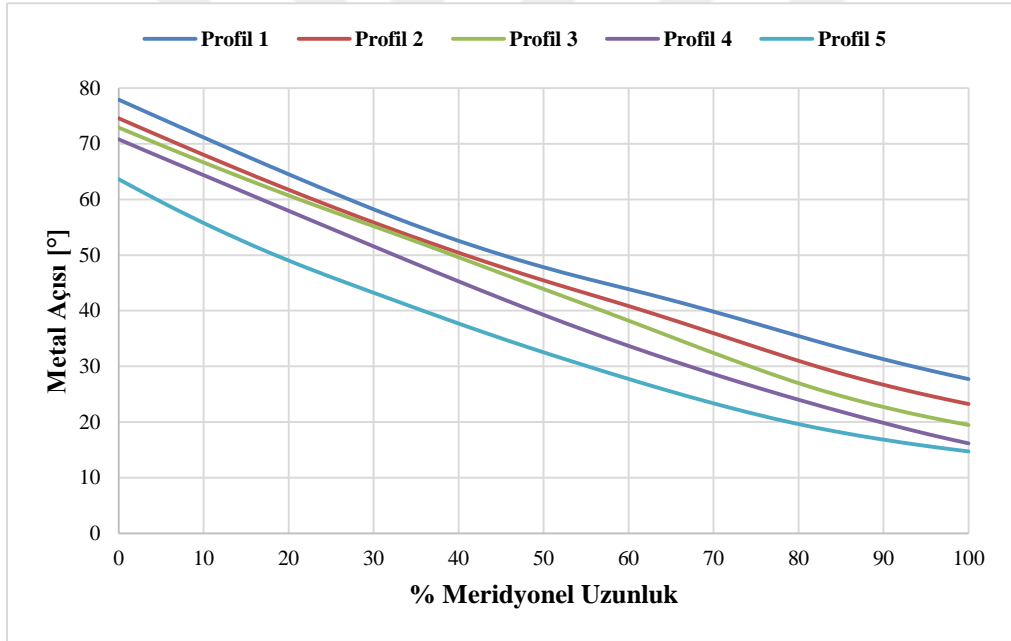
Çizelge Ek 2.5 : Kahta HES kanat profili açı korur meridyonel uzunlukları.

Kesit Profili	Açı Korur Meridyonel Uzunluk [mm]
Profil 1	177,91
Profil 2	190,75
Profil 3	203,70
Profil 4	221,48
Profil 5	242,96

Metal açılarının elde edilmesi için bütün kesitlerde açı korur meridyonel uzunluğa karşılık meridyonel uzunluk eğrileri elde edilmiştir ve Denklem 2.16 ile eğri üzerindeki noktaların açıları belirlenmiştir. Bütün kesitlerde açı korur dönüşüm görüntü planı Şekil Ek 2.4'te ve metal açısı yüzde meridyonel uzunluğa göre dağılımı Şekil Ek 2.5'te gösterilmiştir.

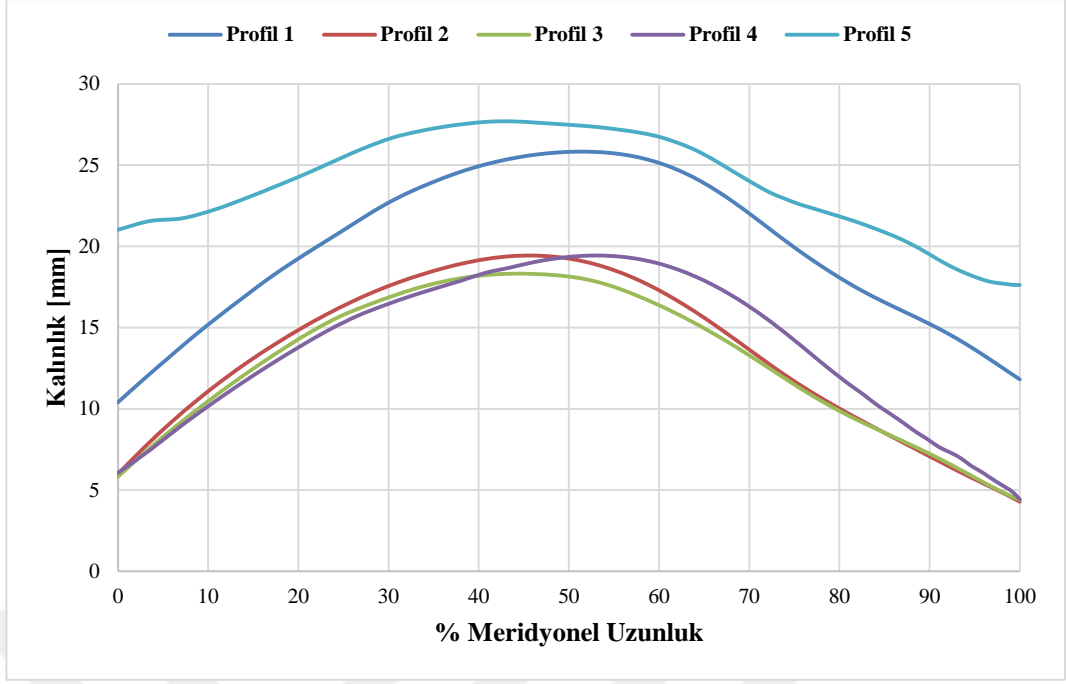


Şekil Ek 2.4 : Kahta HES açı korur dönüşüm görüntü planı.



Şekil Ek 2.5 : Kahta HES kanat metal açısı dağılımı.

Kanat kalınlığının hesaplanması için Denklem 2.17'deki gibi basınç yüzeyi üzerindeki noktalarla eğiklik hattı üzerindeki noktaların farkından faydalanılmıştır. Şekil Ek 2.6'da bütün kesitler için kalınlık dağılımı gösterilmektedir.

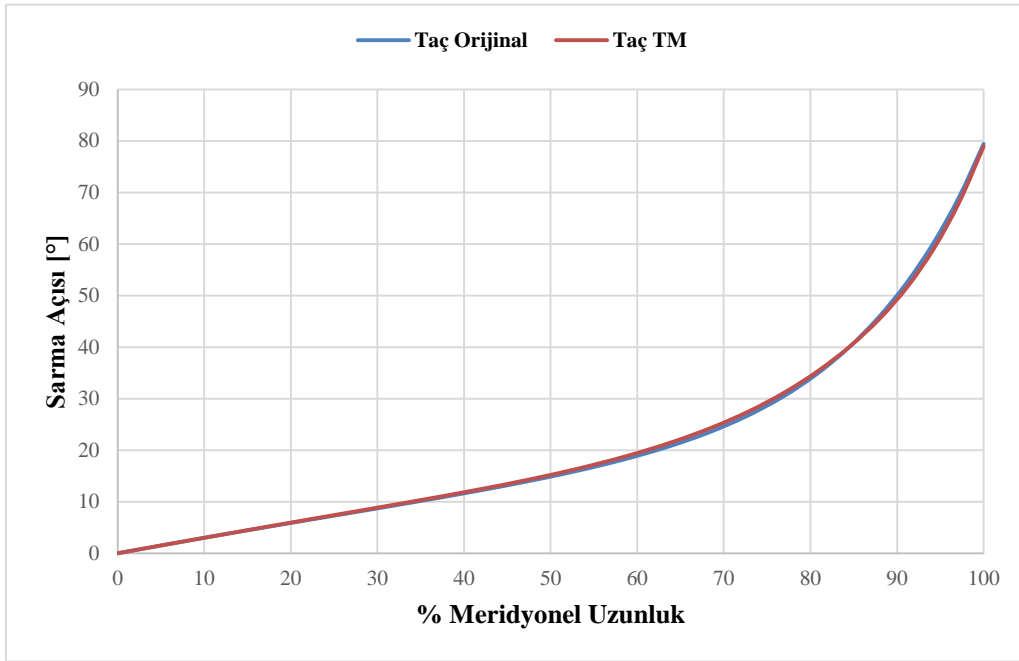


Şekil Ek 2.6 : Kahta HES kalınlık dağılımı.

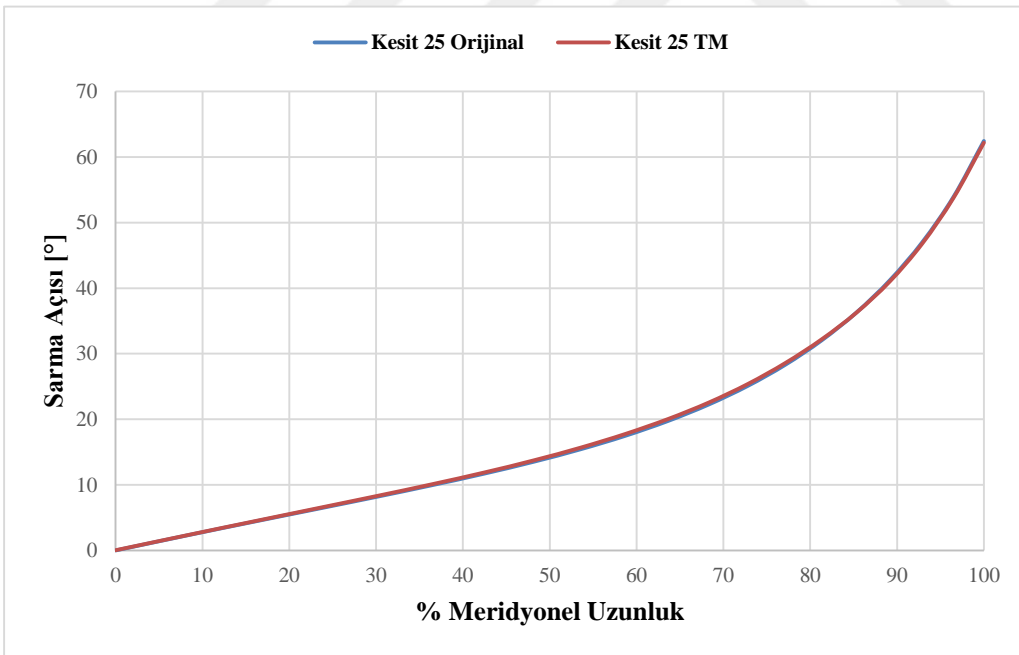
Kahta HES için çalışılan katı model geometrisi tarama verisinden elde edildiğinden kanadın taç ve bilezik bölgesinde kaynak bölgeleri bulunmaktadır. Bu sebeple bu bölgelerde elde edilen kalınlık dağılımı kanat profilinin değil, kaynaklı bölgenin kalınlık dağılımıdır. Tasarım sürecinde taç profili için Profil 2'nin kalınlık dağılımı, bilezik profili için Profil 4 kalınlık dağılımı kullanılmıştır.

Açı ve kalınlık dağılımları için üç kontrol eğrili tasarım için grafikler verilmiştir. Diğer tasarımlardaki profil kesitleri bu kesitlerin arasında yer aldığından, açı ve kalınlık dağılımları da üç kontrol eğrili tasarımdaki dağılımların arasında bu dağılımları takip eden şekilde yer almaktadır.

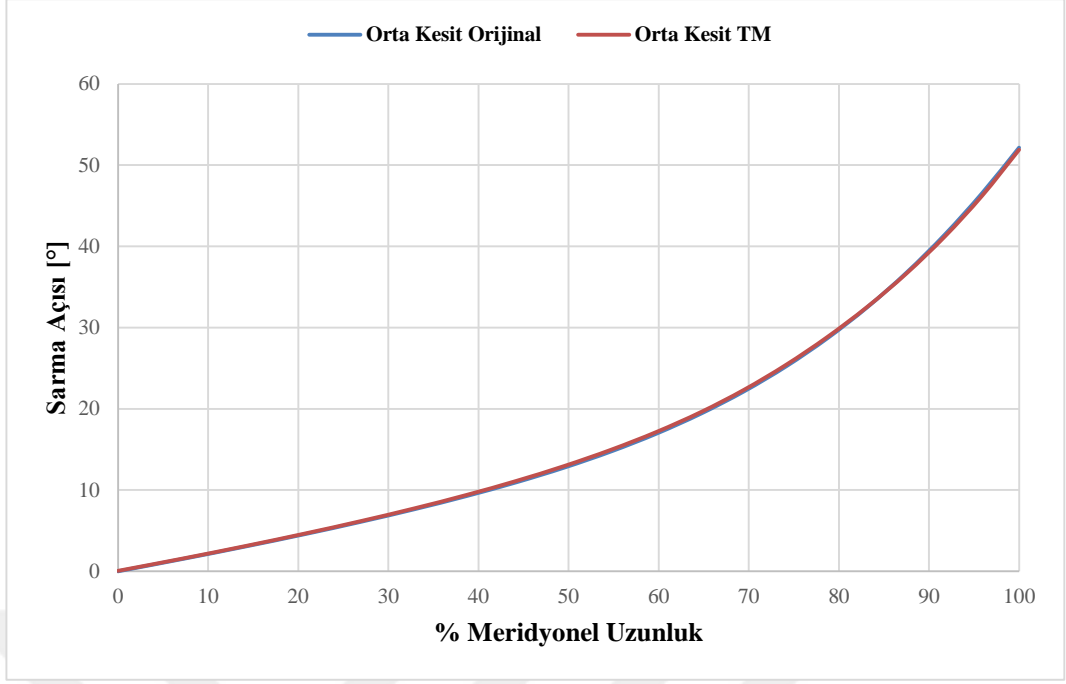
EK 3: BUSKİ HES kanat açılarının karşılaştırılması



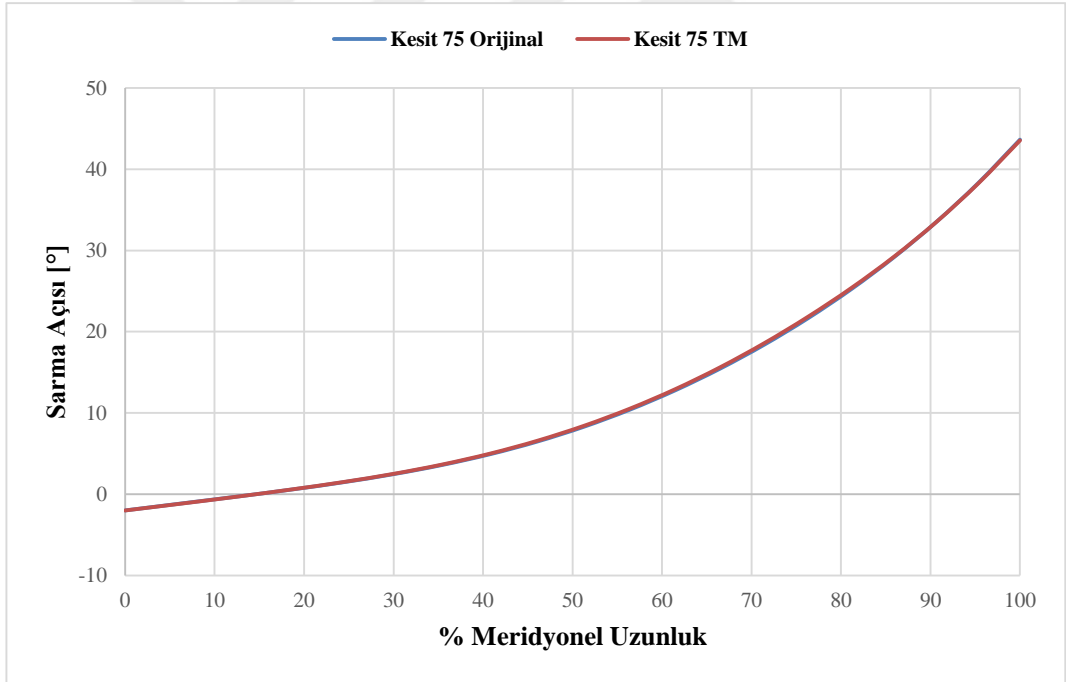
Şekil Ek 3.1 : BUSKİ HES taç profili sarma açısı karşılaştırması.



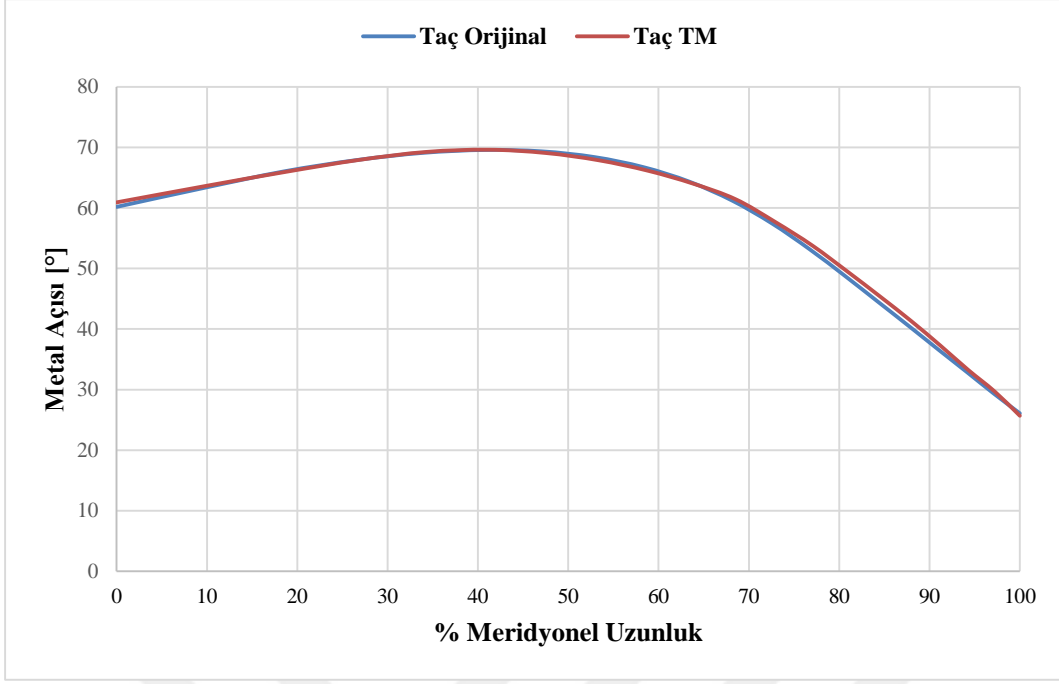
Şekil Ek 3.2 : BUSKİ HES kesit 25 profili sarma açısı karşılaştırması.



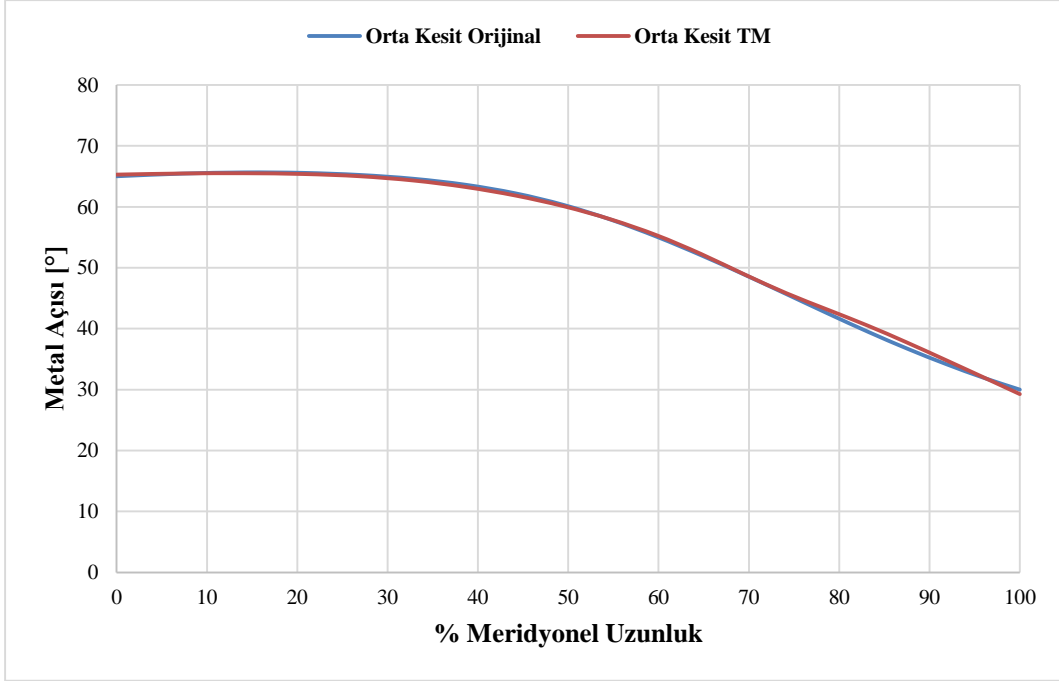
Şekil Ek 3.3 : BUSKİ HES orta kesit profili sarma açısı karşılaştırması.



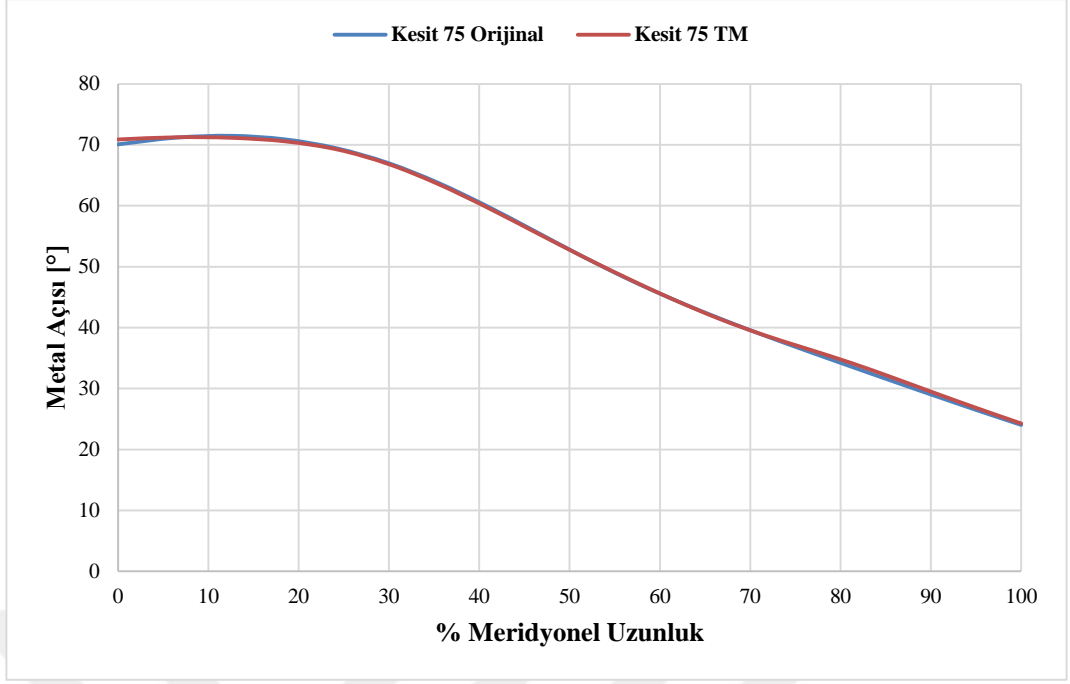
Şekil Ek 3.4 : BUSKİ HES kesit 75 profili sarma açısı karşılaştırması.



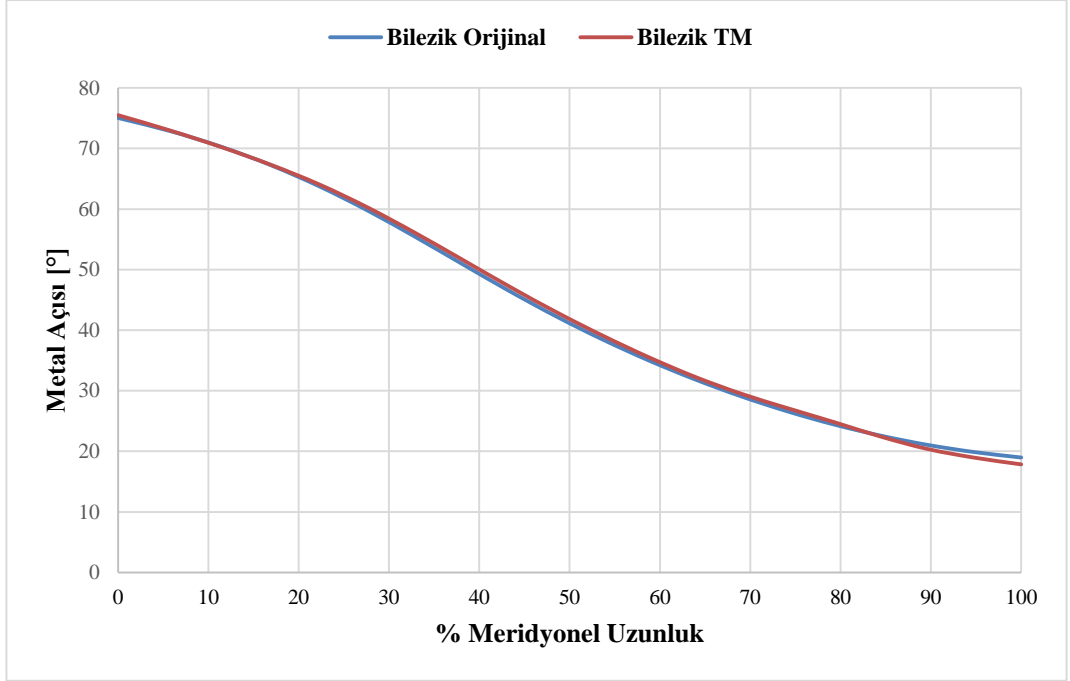
Şekil Ek.3.5 : BUSKİ HES taç profili metal açısı karşılaştırması.



Şekil Ek.3.6 : BUSKİ HES orta kesit profili metal açısı karşılaştırması.



Şekil Ek.3.7 : BUSKİ HES kesit 75 profili metal açısı karşılaştırması.



Şekil Ek.3.8 : BUSKİ HES bilezik profili metal açısı karşılaştırması.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Alper Kaplan
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 22.09.1989 – Ankara
E-posta : alperkaplan4@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2013 – 2016	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Su Türbinleri Tasarım ve Test Merkezi	Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2012	Sasel Elektromekanik A.Ş	Stajyer
2011	Anadolu Metalurji ve Makine Sanayi Ticaret A.Ş	Stajyer
2011	KAMBETON A.Ş.	Stajyer

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

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kaplan A.**, Çetintürk H., Çelebioğlu K., Aradağ S., (2015). Reverse Engineering Design of a Francis Turbine Runner, *IAENG ICME 2015 The 2015 International Conference of Mechanical Engineering*.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kaplan A.**, Çetintürk H., Aylı E., Çelebioğlu K., Aradağ S., (2014). CFD Aided Design and Production of Hydraulic Turbines, *APS DFD 2014, APS 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*.
- Aylı E., Kavurmacı B., Çetintürk H., **Kaplan A.**, Çelebioğlu K., Aradağ S., Taşcıoğlu Y., (2014). Design and Construction of an Experimental Test Rig For Hydraulic Turbines, *APS 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics APS DFD 2014*.
- 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*.
- Aylı E., Demirel G., **Kaplan A.**, Çelebioğlu K., Aradağ S., (2016). Development of Numerical Hill Chart for Francis Turbine, *Türk Isı Bilimi ve Tekniği Derneği*. (Değerlendirme aşamasında)