

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BORU İÇERİSİNDE FRANCIS TİPİ TÜRBİN TASARIMI



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin ÇETİNTÜRK

Makina 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
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 121511144 numaralı Yüksek Öğrencisi **Hüseyin ÇETİNTÜRK**'ün ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“BORU İÇERİSİNDE FRANCIS TİPİ TÜRBİN TASARIMI”** 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 : **Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

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

Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU
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.

Hüseyin Çetintürk

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORU İÇERİSİNDE FRANCIS TİPİ TÜRBİN TASARIMI

Hüseyin ÇETİNTÜRK

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

Danışmanlar: Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU

Tarih: Nisan 2016

Bu tez çalışmasında, boru içerisinde Francis tipi su türbini uygulanabilirliği adına Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yardımıyla çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın amacı, bir türbin için boru içerisinde tasarımın uygulanabilirliğini saptamak ve çalışma aralığı ile performans değerlerini artırmaktır. Boru içerisinde türbin, akışı sabit kanatlara dağıtmak için salyangoz kullanılmadığı için hidroelektrik santrallerde çok daha az yer kaplamaktadır. Bu yüzden üretim ve montaj maliyetleri de azaltılabilmektedir. Bu sebeplerle özellikle küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santrallerde geniş uygulama alanı oluşmaktadır. Türbin parçaları salyangoz kullanılmadan bir boru içerisinde konumlandırılmıştır. Sabit kanatlar ve ayar kanatları yeniden tasarlanmış, çark ve emme borusu için ise aynı geometriler kullanılmıştır. Hali hazırda tasarımı yapılmış olan türbin ile, boru içerisinde türbinin performans verileri karşılaştırılmış ve oluşan farklılıklar tespit edilmiştir. Geleneksel tasarım türbine kıyasla daha geniş debi ve düşü aralığında türbinin maksimum verimde çalışabilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Francis türbini, Salyangoz tasarım, Boru içerisinde tasarım.

ABSTRACT

Master of Science

INLINE PIPE FRANCIS TYPE TURBINE DESIGN

Huseyin CETINTURK

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selin ARADAG

Assist. Prof. Dr. Yigit TASCIOGLU

Date: April 2016

In this thesis, Computational Fluid Dynamics (CFD) based analyses are carried out in order to determine the applicability of inline pipe Francis type turbine as an alternative to classical turbine design based on CFD. The aim of the study is to determine the feasibility of the inline pipe Francis turbine and to increase the operating range of the actual turbine. Inline pipe turbine has several advantages, when compared to classical design. It does not have a spiral case, therefore it takes up less space, in the hydroelectric power plant, design and manufacturing costs are less than of classical turbines with a spiral case. The turbine components are positioned in a pipe and the design of the turbine is performed using the same boundary conditions as the actual turbine design. The stay vanes and guide vanes are redesigned; however, the same runner and draft tube geometries are used. Inline pipe turbine design results and actual turbine performance and operating range results are compared and differences are determined. It is demonstrated that inline pipe turbine has a wider operating range for maximum efficiency than actual turbine.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Francis turbine, Spiral case design, Inline pipe design.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Selin ARADAĞ ve Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU'na, tecrübe ve bilgi birikimini cömert bir şekilde bizimle her daim paylaşan ve beni yönlendiren hocam sayın Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU'na teşekkür ederim.

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

Lisans ve Yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmalarımda bana yardımını hiçbir zaman esirgemeyen Alper KAPLAN'a teşekkür ederim.

Son olarak destek ve sevgilerini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme 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	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Su Türbini Tasarımında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanımı	7
1.4 Tez Planı.....	8
2. TASARIM YÖNTEMİ	9
2.1 Hidrolik Türbin Tasarım Parametreleri.....	11
2.1.1 Hız Üçgenleri ve Türbin Çalışma Prensipleri	11
2.1.2 Türbin Enerji Denklemi	12
2.1.3 Türbin Benzerlik Parametreleri.....	13
2.1.4 Geleneksel Salyangoz Tasarım Yöntemi	13
2.1.5 Boru Tasarım Yöntemi.....	14
2.1.6 Sabit Kanat Tasarım Yöntemi.....	16
2.1.7 Ayar Kanadı Tasarım Yöntemi	17
2.2 HAD Yöntemi	18
2.2.1 HAD Analizi	18
2.2.1.1 Korunum Denklemleri	18
2.2.1.2 Türbülans Modeli	19
2.2.1.3 Ayrıklaştırma Yöntemi ve Adveksiyon Şemaları	19
2.2.1.4 Sınır Koşulları	20
2.2.2 Sayısal Çözüm Ağı.....	21
2.2.2.1 Çözüm Ağı Oluşturulması	21
2.2.2.2 Çözüm Ağı Bağlantısı	26
3. SONUÇLAR	29
3.1 Türbin Tasarım Çalışması	29
3.1.1 Projenin Tanımı.....	29
3.1.2 Türbinin Ön Tasarımı ve Geometrik Ölçüler.....	29
3.2 Türbin Bileşenleri Tasarım Noktası HAD Analizi Sonuçları	31
3.2.1 Boru.....	31
3.2.2 Sabit Kanat	34
3.2.2.1 Sabit Kanat Teta Açısı ve Kanat Uzunluğunun Performansa Etkisi.....	34
3.2.2.2 Sabit Kanat Sayısının Performansa Etkisi	37
3.2.2.3 Hız Ringi Çapının Performansa Etkisi	38
3.2.3 Ayar Kanadı	43

3.2.4 Çark	46
3.2.5 Emme Borusu	50
3.3 Tüm Türbin HAD Analizi Sonuçları	54
3.4 Geleneksel Tasarım Türbin ile Boru İçerisinde Tasarım Türbinin Karşılaştırması	62
3.4.1 Tasarım Düşüsünde Farklı Ayar Kanadı Açıklıkları İçin Verim ve Hidrolik Kayıpların Karşılaştırması	62
3.4.2 Nominal Yük Durumunda Karşılaştırma	72
3.4.3 Kısmi Yük Durumunda Karşılaştırma	78
3.4.4 Tam Yük Durumunda Karşılaştırma	83
3.5 800 mm Boru Çapına Sahip, Benzerlik Parametreleriyle Tasarlanan Türbin ..	85
4. DEĞERLENDİRME.....	89
4.1 Tez Çalışmasının Özeti.....	89
4.2 Gelecek Çalışmalar.....	90
KAYNAKLAR.....	93
EKLER.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Francis tipi türbin bileşenleri.	2
Şekil 1.2 : Helezoik tip salyangoz.....	3
Şekil 1.3 : Direkt akışlı salyangoz.....	3
Şekil 1.4 : Salyangoz kullanılmayan açık akışlı türbin.	4
Şekil 1.5 : Silindirik boru içerisinde türbin.	4
Şekil 1.6 : Boru içerisinde Francis türbin uygulaması genel görünüş [22].	6
Şekil 2.1 : Hız vektörleri ve açılar.	12
Şekil 2.2 : Salyangoz kesitinde hız dağılımı ve alan hesaplaması.	14
Şekil 2.3 : Boru içerisinde türbin genel görünümü.	15
Şekil 2.4 : Hız üçgenleri ve açılar.	15
Şekil 2.5 : Sabit kanat meridyonel kesit.	17
Şekil 2.6 : Boru için oluşturulan ağ yapısı.	21
Şekil 2.7 : (a) Ayar kanadı ağ yapısı ve (b) sabit kanat ağ yapısı.	22
Şekil 2.8 : Çark kanadı için oluşturulan ağ yapısı.....	22
Şekil 2.9 : Emme borusu için oluşturulan ağ yapısı.....	23
Şekil 2.10 : Boru için eleman sayısına bağlı hidrolik kabın değişimi.....	24
Şekil 2.11 : Sabit kanat için eleman sayısına bağlı çıkış açısının değişimi.	24
Şekil 2.12 : Ayar kanadı için eleman sayısına bağlı çıkış akış açısının değişimi.	25
Şekil 2.13 : Çark kanadı için eleman sayısına bağlı verimin değişimi.	25
Şekil 2.14 : Emme borusu için eleman sayısına bağlı geri kazanım katsayısının değişim.	26
Şekil 3.1 : Türbin orta kesiti için statik basınç dağılımı.	32
Şekil 3.2 : Boru içerisindeki 3 boyutlu akım çizgileri.	33
Şekil 3.3 : Boru çıkış yüzeyinde akış açısı dağılımı.	33
Şekil 3.4 : Sabit kanat için teta açısına bağlı olarak akış açısının değişimi.	35
Şekil 3.5 : Sabit kanat için teta açısına bağlı olarak düşü kaybının değişimi.	35
Şekil 3.6 : Sabit kanat teta açısı dağılımı.	36
Şekil 3.7 : Sabit kanat veter hattı uzunluğuna bağlı olarak akış açısının değişimi. ...	36
Şekil 3.8 : Sabit kanat uzunluğuna bağlı olarak düşü kaybı değişimi.....	37
Şekil 3.9 : Sabit kanat sayısına bağlı olarak akış açısının değişimi.	37
Şekil 3.10 : Farklı hız ringi çapları için hız dağılımları.	38
Şekil 3.11 : Farklı hız ringi çaplarına göre düşü kaybının değişimi.	39
Şekil 3.12 : Sabit kanatlar etrafında oluşan üç boyutlu akım çizgileri.....	40
Şekil 3.13 : Sabit kanatlar etrafında meydana gelen basınç yüklemeleri.....	41
Şekil 3.14 : Sabit kanatlar etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.	41
Şekil 3.15 : Sabit kanatlar etrafında oluşan statik basınç dağılımı.	42
Şekil 3.16 : Sabit kanatlar etrafında meydana gelen hız vektörleri.....	42
Şekil 3.17 : Ayar kanatları etrafında meydana gelen 3 boyutlu akım çizgileri.....	44
Şekil 3.18 : Ayar kanatları üzerinde meydana gelen basınç yüklemeleri.	44

Şekil 3.19 : Ayar kanatları etrafında meydana gelen toplam basınç dağılımı.....	45
Şekil 3.20 : Ayar kanatları etrafında meydana gelen statik basınç dağılımı.	46
Şekil 3.21 : Yüzde 20, 50 ve 80'lik kesit için çark kanadı üzerindeki basınç yüklemeleri.....	48
Şekil 3.22 : Çark kanadı orta düzlem için hız dağılımı ve vektörleri.....	48
Şekil 3.23 : Çark kanadı orta düzlem için statik basınç dağılımı.	49
Şekil 3.24 : Çark kanadı meridyonel kesit üzerinde toplam basınç dağılımı.	49
Şekil 3.25 : Çark kanadı üzerinde statik basınç dağılımı.	50
Şekil 3.26 : Emme borusu içerisinde oluşan 3 boyutlu akım çizgileri.	52
Şekil 3.27 : Emme borusu akış yönü boyunca toplam basınç dağılımı.....	52
Şekil 3.28 : Emme borusu akış yönü boyunca statik basınç dağılımı.	53
Şekil 3.29 : Emme borusu orta düzlem üzerinde statik basınç dağılımı.	53
Şekil 3.30 : Emme borusu orta düzlem üzerinde hız dağılımı ve vektörleri.....	54
Şekil 3.31 : Türbin içerisinde oluşan 3 boyutlu akım çizgileri.	55
Şekil 3.32 : Orta düzlem üzerinde tüm türbin için statik basınç dağılımı.	56
Şekil 3.33 : Orta düzlem üzerinde tüm türbin için hız dağılımı ve vektörleri.....	56
Şekil 3.34 : Orta düzlem üzerinde sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan statik basınç dağılımı.....	57
Şekil 3.35 : Orta düzlem üzerinde ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan statik basınç dağılımı.....	58
Şekil 3.36 : Orta düzlem üzerinde ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan hız vektörleri.	58
Şekil 3.37 : Çark ve emme borusunda meydana gelen 3 boyutlu akım çizgileri.	59
Şekil 3.38 : Ayar kanadı açıklığına bağlı olarak tasarım düşüsünde türbinlerden geçen debinin değişimi.....	62
Şekil 3.39 : Ayar kanadı açıklığına göre türbin verimleri.....	63
Şekil 3.40 : Ayar kanadı açıklığına göre boru ve salyangoz verimleri.	63
Şekil 3.41 : Ayar kanadı açıklığına göre sabit kanat verimleri.	64
Şekil 3.42 : Ayar kanadı açıklığına göre ayar kanadı verimleri.....	64
Şekil 3.43 : Ayar kanadı açıklığına göre çark verimleri.	65
Şekil 3.44 : Ayar kanadı açıklığına göre emme borusu verimleri.....	66
Şekil 3.45 : Ayar kanadı açıklığına göre emme borusu geri kazanım katsayıları.	66
Şekil 3.46 : Ayar kanadı açıklığına göre türbin kayıpları.	67
Şekil 3.47 : Ayar kanadı açıklığına göre (a) geleneksel tasarım türbin ve (b) boru içerisinde türbin için parça bazında kayıplar.....	68
Şekil 3.48 : Geleneksel tasarım türbin için tepe diyagramı.....	69
Şekil 3.49 : Boru içerisinde tasarım türbin için tepe diyagramı.....	71
Şekil 3.50 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için birimsiz hız katsayısının çevresel kesitte dağılımı.	73
Şekil 3.51 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.	76
Şekil 3.52 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan basınç dağılımı.	77
Şekil 3.53 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için birimsiz hız katsayısının çevresel kesitte dağılımı.	79
Şekil 3.54 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için ayar kanatları ve çark kanatları etrafında hız vektörlerinin dağılımı.	80
Şekil 3.55 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.	82

Şekil 3.56 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.	84
Şekil 3.57 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan basınç dağılımı.	85
Şekil 3.58 : 800 mm ve 1500 mm boru içerisinde türbinler için tepe diyagramı.	87



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Türbin parçaları için oluşturulan eleman sayılar	26
Çizelge 3.1 : Buski HES proje isterleri.	29
Çizelge 3.2 : Boru kesit alanları için HAD analizi sonuçları	31
Çizelge 3.3 : Boru içerisinde tasarım sabit kanat kesit alanları için HAD analizi sonuçları	40
Çizelge 3.4 : Boru içerisinde tasarım ayar kanadı kesit alanları için HAD analizi sonuçları	43
Çizelge 3.5 : Boru içerisinde tasarım çark için HAD analizi sonuçları	46
Çizelge 3.6 : Boru içerisinde tasarım çark kanadı kesit alanları için HAD analizi sonuçları	47
Çizelge 3.7 : Boru içerisinde tasarım emme borusu kesit alanları için HAD analizi sonuçları	51
Çizelge 3.8 : Farklı düşü ve ayar kanadı açıklıkları için boru içerisinde türbin HAD analizi sonuçları	61
Çizelge 3.9 : Nominal yükte türbinlerin performans verilerinin kıyaslanması	72
Çizelge 3.10 : Nominal yükte türbinlerin sabit kanat kesitlerinden geçen debinin dağılımı	75
Çizelge 3.11 : Kısmi yükte türbinlerin performans verilerinin kıyaslanması	78
Çizelge 3.12 : Tam yükte türbinlerin performans verilerinin kıyaslanması	83
Çizelge Ek 1 : Geleneksel türbin ile boru içerisinde türbin kıyaslama tablosu	97

KISALTMALAR

CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
GGI	: Genel Ağ Arayüzü (General Grid Interface)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HES	: Hidroelektrik Santral
HK	: Hücüm Kenarı
KK	: Kuyruk Kenarı
MFR	: Çoklu Çerçevesel Referans Sistemi (Multiple Frames of Reference)
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier – Stokes (Reynolds Averaged Navier - Stokes)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Kesit alanı
b_0	Kanat yüksekliği
C_p	Emme Borusu Geri Kazanım Katsayısı
D	Çap
$D_{st,out}$	Sabit kanat çıkış çapı
F_i	Sabit kanatlar çıkış kesit alanı
g	Yerçekimi ivmesi
H	Düşü
k	Türbülans kinetik enerji
n	Çark dönüş hızı
P_s	Statik Basınç
Q	Debi
Q_φ	Virole giren debi miktarı
r	Yarıçap
$R_{st,out}$	Sabit kanat çıkış yarıçapı
t	Zaman
u	Akış çevresel hız vektörü
V	Akış bileşke hız vektörü
V_u	Akış teğetsel hız bileşeni
V_m	Akış merkezci hız bileşeni
w	Dönel koordinat hız vektörü
w_u	Dönel koordinat teğetsel hız vektörü
α	Akış açısı
α_0	Ayar kanadı konum açısı
β	Kanat metal açısı
Γ	Akış sirkülasyon değeri
ε	Türbülanslı enerji yitimi
η	Verim
θ	Kanat konum açısı
$\Delta\theta$	Kanat konum açısı değişimi
ρ	Yoğunluk
φ	Virol açısı
ω	Çark açısal hızı

1. GİRİŞ

Hidroelektrik santraller, yüksek verimleri (genelde %90'ın üzerinde), düşük üretim maliyetleri, çevreye uyumlu ve temiz, hava kirliliğine sebep olmayan, hiçbir atığı olmayan, yenilenebilir enerji kaynağı olmaları, yatırım geri ödeme süresi kısa olmaları ve uzun ömürlü olmaları gibi sebeplerden dolayı enerji üretiminde önemli bir kaynaktır [1,2].

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli kaynaklardan biri olan hidroelektrik enerji potansiyeli yıllık 433 milyar kWh, değerlendirilebilir potansiyel 216 milyar kWh/yıl ve ekonomik potansiyel ise 140 milyar kWh/yıl'dır [3]. Bu sebeplerden ötürü, son yıllarda hidroelektrik santrallerin özelleştirmesi ile birlikte hidroelektrik santral bileşenlerinin tasarımı önem kazanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

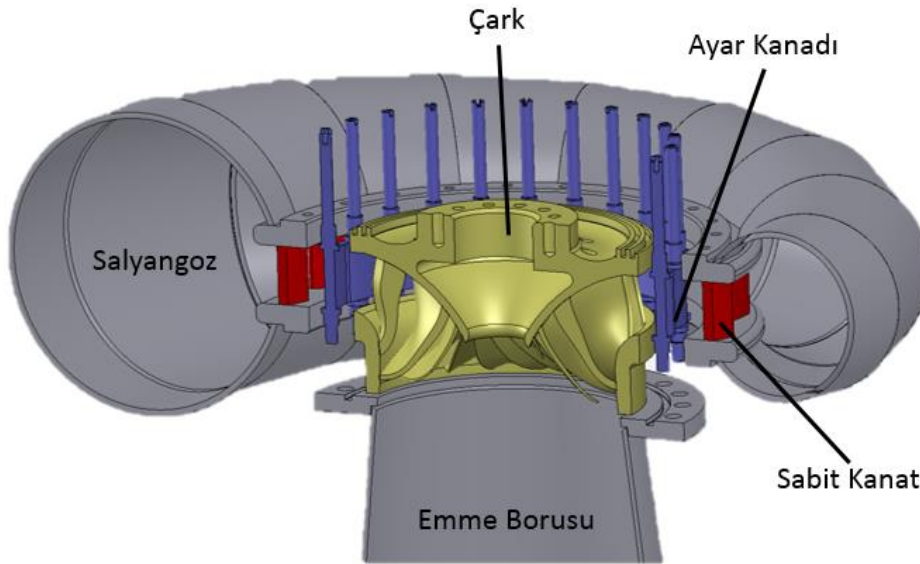
Santrallerin önemli bileşeni olan türbinlerin tasarımı günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ve model türbin testleri ile gerçekleştirilmektedir [4]. Bu tez kapsamında, grubumuz tarafından hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile önceden tasarlanmış olan bir su türbininin, yeni bir tasarımı denenerek yüksek verimde çalışma aralığını genişletmek, boyutlarını küçültülerek maliyetlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu sayede, özellikle ülkemizde işletmeye alınması planlanan küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santrallerin daha geniş bir çalışma aralığında maksimum verimde çalışması ve maliyetlerinin azaltılması için boru içerisinde bir türbin tasarım oluşturulmuştur.

Tezin kapsamında Bursa ilinde kurulacak olan Buski HES projesi için 1.4 MW güce sahip ve tasarımı grubumuzca yapılmış [5] olan santral için "Boru İçerisinde Francis Tipi Türbin Uygulaması" gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayla, literatürde belirtildiği gibi, Francis tipi bir türbinin daha geniş debi ve düşü aralığında maksimum verimde çalışabilmesi amaçlanmıştır. Bu durumu gerçekleştirebilmesi için, tasarımı karmaşık olan ve tüm debi aralığında akışı eşit bir debide dağıtamayan salyangoz parçası

kullanılmamış, türbin çarkı ile diğer parçalar bir boru içerisine yerleştirilmiş ve tüm debi aralığında akışın eş koşullarla çarka girebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu kapsamda, türbin parçalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yardımıyla tasarım iyileştirmeleri de gerçekleştirilmiştir. Boru içerisinde türbin tasarımının hidrolik avantajının yanı sıra geleneksel türbine göre daha küçük boyutlarda olması ayrıca tasarım ve üretim maliyetlerinin de azaltılması amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Hidroelektrik santrallerde kullanılan Francis tipi türbinler yatay veya dikey eksenli olarak kullanılabilir [6]. Küçük ve orta ölçekli ünitelerde ise genellikle yatay eksenli türbinler tercih edilmektedir [7]. Şekil 1.1'de dikey eksenli bir Francis türbin kesitinde başlıca bileşenleri gösterilmiştir [8,9,10].



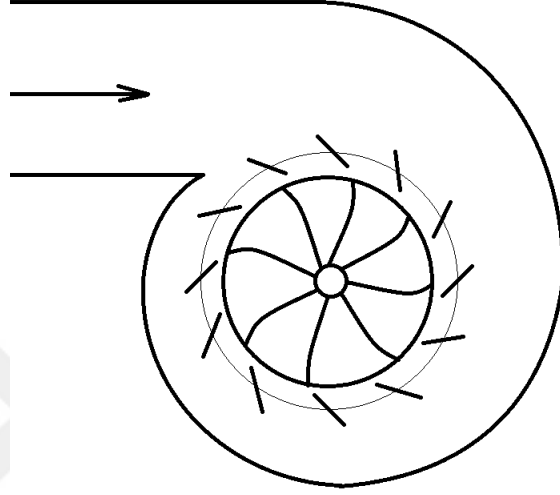
Şekil 1.1 : Francis tipi türbin bileşenleri.

Francis tipi bir türbinde, debinin ayar kanatlarına, ardından da çark kanatlarına eşit bir şekilde dağıtılması gerekmektedir ve bu görevi salyangoz üstlenmektedir. Salyangoz yapısı ve görevi itibarıyla aşağıda bahsedilen kriterleri sağlamalıdır [6].

- Sabit kanat yapısıyla birlikte akışı eşit ve düzgün bir şekilde ayar kanatlarına dağıtmalıdır.
- En az düzeyde hidrolik kayba sebep olmalıdır.
- Şekli ve büyüklüğü hidroelektrik santralin yerleşim planına uygun olmalıdır.

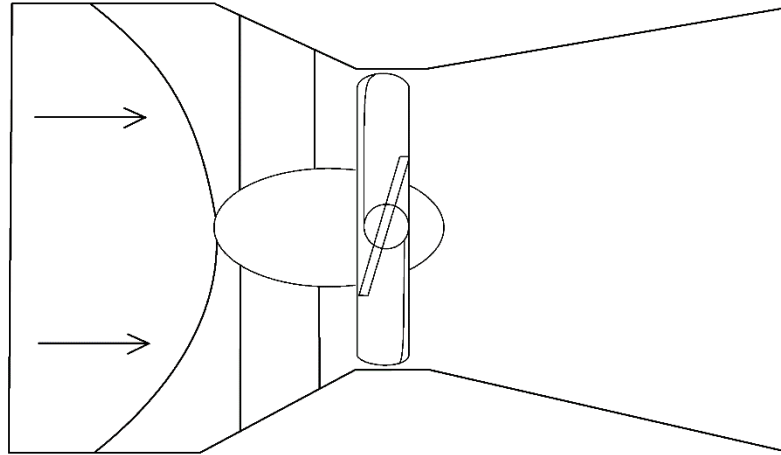
Türbinin farklı debi ve düşü çalışma koşullarına göre farklı tiplerde salyangoz tasarımları mevcuttur ve bunlar şu şekilde gruplandırılabilir [6].

- Helezonik salyangoz: Beton veya çelik levhadan üretilebilir. Francis tipi türbinler için en yaygın kullanılan salyangoz tasarım çeşididir. Genel gösterimi Şekil 1.2'de verilmiştir.



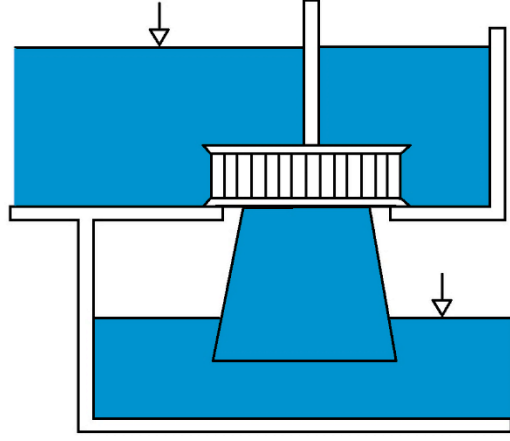
Şekil 1.2 : Helezoik tip salyangoz.

- Eksenel ayar kanatları için direkt akışlı salyangoz: Genel gösterimi Şekil 1.3'te verilmiştir.



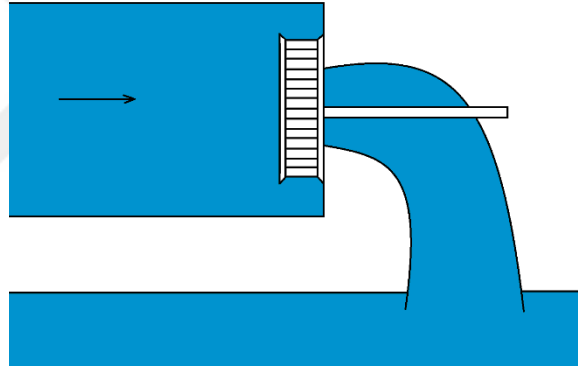
Şekil 1.3 : Direkt akışlı salyangoz.

- Düşük düşümlü türbinler ve basınçsız türbinler için açık akışlı: 6 m'den az düşüye sahip ve 160 cm çark çapına kadar kullanılmaktadır. Genel gösterimi Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4 : Salyangoz kullanılmayan açık akışlı türbin.

- Yatay türbinler için davlumbaz (veya silindirik) boru içerisinde türbin: 25 m'den az düşüye sahip ve 100 cm çark çapına kadar kullanılmaktadır. Genel gösterimi Şekil 1.5'te verilmiştir.



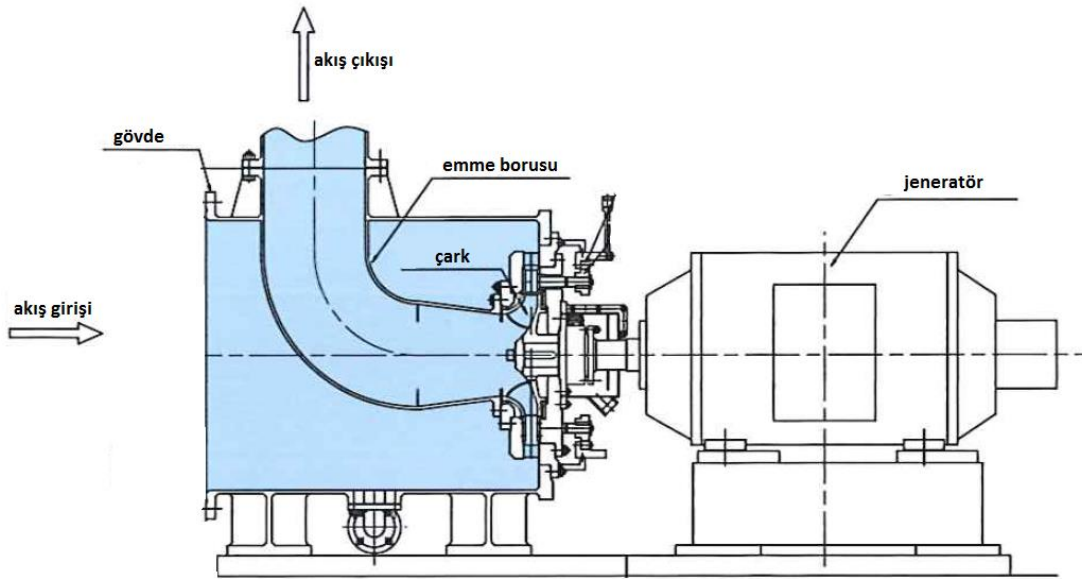
Şekil 1.5 : Silindirik boru içerisinde türbin.

Salyangoz, türbinin en büyük parçasıdır [11]. Salyangoz tasarım süreci, üretime hazır paftaların hazırlanması, üretilmesi ve santrale nakliyesinin planlanması ve gerçekleştirilmesi, santralde montajının yapılması işlemleri, türbin tasarım, üretim ve montaj sürecinin önemli bir kısmına denk gelmektedir [12]. Salyangozun nakliyesini gerçekleştirebilmek için bölünmesi gereken parça sayısının belirlenmesi ve nakliyeden sonra santralde bu parçaların bir araya getirilip salyangoz montajının tamamlanması önemli ölçüde tasarım zamanı ve maliyet gerektirmektedir [13]. Bunların yanında hidrolik olarak iyi tasarlanmamış bir salyangoz türbinin çalışmasında hem hidrolik hem de mekanik bazı problemlere sebep olmaktadır. Debinin düzgün dağıtılamaması sonucu türbin çarkının her noktasından eşit miktarda debi giremeyecektir. Bu sebeple, fazla debi giren kısımlarda özellikle çark çıkışına

doğru akışta aşırı ivmelenme oluşmakta ve bu durum bu bölgelerde suyun basıncının buhar basıncın altına düşmesine ve kavitasyona sebep olmaktadır [14, 15, 16]. Bu durumda türbin veriminde ve üretilen güçte önemli düzeyde kayıp olmaktadır [17, 18]. Ayrıca kavitasyon sebebiyle türbin parçaları özellikle de çark zarar görmekte, bakım ve onarım maliyetleri önemli ölçüde artmaktadır. Debinin eşit bir şekilde dağıtılmamasının diğer bir etkisi de çark üzerinde oluşan radyal kuvvetlerin vektörel olarak büyümesine sebep olmasıdır. Radyal kuvvetlerin hesaplanandan büyük değerlere ulaşması durumunda türbin yataklarına aşırı yük binmesine ve hatta bu yatakların kullanım ömründen çok daha önce aşınmasına sebep olmaktadır. Bu durum da yine bakım ve onarım maliyetleri gerektirmektedir. Debinin eşit dağıtılmadan çarka gelmesinin oluşturduğu bir diğer problem ise çarkta oluşan titreşimlerin artmasıdır [19, 20]. Hesaplanandan daha yüksek titreşimlerin oluşması, yatay eksenli türbinlerde özellikle de dikey eksenli türbinlerde çarkın salınımlarına sebep olmaktadır. Bu durumda çark yüksek hızlarda dönerken, türbin alt ve üst kapaklarına temas etmesi söz konusu olmaktadır. Bunun sonucunda kapaklarda özellikle de çarkta zarar oluşması söz konusudur. Tüm bu problemlerin önlenebilmesi için, salyangoz tasarımının çok iyi yapılması gerekmektedir. Ancak en iyi tasarlanmış salyangozda bile özellikle son sabit kanat bölgesinde debi dağılımında düzensizlikler meydana gelmektedir. Su, özellikle son sabit kanat bölgesinde kesit alanının bir anda daralması sonucu bu bölgede aşırı ivmelenmekte ve basınç kayıpları dolayısıyla da hidrolik kayıplar artmaktadır. Tam tersi durumda ise, ilk kesitlerdeki virollerden daha fazla debi girmesi durumunda, son kesite az miktarda debi gelmektedir ve direkt olarak debinin sabit kanatlar çevresinde eşit dağılmamasına sebep olmaktadır [17].

Francis tipi türbinler en geniş kullanım alanına sahip su türbini çeşitidir [10, 21]. Ancak özellikle salyangoz kaynaklı akış problemleri ve verim kaybı yaşanması, karmaşık geometrisi, tasarımının zahmetli oluşu, üretim ve nakliyesinin maliyetleri artırması ve bakım giderleri gibi problemlere sebep olmaktadır. Hem Francis tipi çarkın avantajlarını kullanabilmek hem de salyangozda oluşan bu problemler sebebiyle suyu sabit kanatlara dolayısıyla da çarka eşit bir biçimde dağıtılabilecek silindirik boru içerisinde türbin tipi üzerine çalışılmaya karar verilmiştir. Silindirik boru içerisinde türbin tasarımı, salyangoz kullanılmadığı için tasarımı basite indirgenmiş bir yapıdadır [22]. Literatürde belirtilen davlumbaz tipi türbine göre

farkı, emme borusunun da boru kesiti içerisinde yer almasıdır. Bu sayede jeneratöre dönme enerjisini aktaran şaft, emme borusu içerisinde geçmeden veya herhangi bir aktarma parçası kullanılmadan direkt olarak jeneratöre bağlanabilmektedir. Ayrıca türbin bileşenleri de boru içerisine monte edildiği için santral binasında normal tasarıma göre çok daha az yer kaplamaktadır [22]. Salyangoz bulunmadığı ve türbin parçaları boru içerisine monte edildiği için gerekli montaj ve demontaj alanı da azalmaktadır. Ayrıca salyangoz tasarımı, üretimi, nakliye ve montajı gibi önemli ölçülerdeki maliyetlerin de azaltılmasını sağlamaktadır. Boru içerisinde Francis türbin tasarımının bir diğer avantajı da şebeke suyu yükleme depoları, su arıtma tesisleri gibi mevcut su sistemlerine küçük ve kompakt tasarımı sayesinde kolayca uygulanabilmesidir [23]. Tanaka Hydropower, boru içerisinde türbin tasarımını küçük ölçekli hidroelektrik santraller için uygulamaktadır [22]. Yapılan uygulamalara ait boru içerisinde Francis türbin tasarımının genel görünümü Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6 : Boru içerisinde Francis türbin uygulaması genel görünüş [22].

Tanaka Hydropower'ın boru içerisinde türbin uygulamalarını 80 m düşü ve $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değerlerine kadar gerçekleştirmektedir [23]. Tasarım noktası olan debi ve düşüde her boru içerisinde türbinle geleneksel türbin aynı verimde çalışabilmektedir. Tanaka Hydropower uygulamalarında geleneksel tasarıma göre tam yük ve kısmi yük durumlarında yaklaşık % 5 ile % 10 daha yüksek verim elde edebilmektedir [23]. Uygulama alanı ve azalan maliyetler de düşünüldüğünde, özellikle küçük ve

orta ölçekte kurulan yatay tip HES’lerde boru içerisinde türbin uygulamasının yüksek bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir.

1.3 Su Türbini Tasarımında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanımı

Geçtiğimiz 30 yıllık zaman dilimine kadar su türbini tasarımları deneye ve tecrübeye dayalı yöntemlerle yürütülmekteydi. Tasarımlar daha çok geliştirilen ampirik denklemlerle ve bu geometrilerin hidrolik laboratuvarlarda gerçekleştirilen model testlerine ve deneylerin performans sonuçlarına bağlıydı [24]. Ancak model testleri için kullanılan model türbinlerin imalatının zahmetli ve uzun zaman gerektirmesi, testlerin yalnızca tasarım debi ve düşüsünde gerçekleştirilmesine sebep olmaktadır [25]. Aksi takdirde ciddi miktarda araştırma – geliştirme bütçeleri gerekmektedir. Ayrıca performans değerleri istenilen ölçüde olmadığı zaman problemin hangi parçadan kaynaklı olduğunun tespiti de oldukça zordu. Zaman içerisinde türbindeki akışı doğru anlayabilmek için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmeye başlanmıştır. Bu çalışmalar da ilk hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanımının başlamasını sağlamıştır. Ancak ilk zamanlarda geliştirilen modeller sadece tasarım noktasında doğru sonuçlar vermekteydi ve sadece iki boyutlu olarak gerçekleştirilebilmekteydi. Özellikle türbin çarkının üç boyutlu kompleks geometrisi yeni bir modellemeye ihtiyaç duyulmasına sebep olmuştur. 1980’li yıllarda 3B – Euler kodu geliştirilmiş ve ilk simülasyon sonuçları yayımlanmıştır [18]. Bu sayede türbin çalışma koşulundan uzaktaki noktalarda da performans verileri de hesaplanabilmektedir. 1990’lı yıllarda özellikle bilgisayar gücündeki gelişim ve artışa bağlı olarak Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerinin kullanılmaya başlanmasına aracı olmuştur [18]. RANS denklemleri Euler denklemlerinin aksine viskoz ve türbülans etkileri de hesaba katmaktadır [21]. Son 10 yıllık süreçte hidromakine verimlerindeki artış HAD’a dayalı tasarım sayesinde kısa süre içerisinde gerçekleştirilebilmiştir. Kompleks geometrilerin basit ve uygun modeller ve denklemler ile birlikte yüksek bilgisayar güçleri kullanılarak yüksek kesinlikte performans verilerinin hesaplanması HAD bazlı tasarımlar sayesinde gerçekleşmiştir [18, 26].

1.4 Tez Planı

Bu tez çalışmasında, Francis tipi su türbininin tasarım sürecinde gerçekleştirilen temel hidrolik teoriler ve HAD bazlı tasarımlar ile yeni tip bir “Boru içerisinde Francis tipi türbin” uygulaması bahsedilen metotlarla gerçekleştirilmiştir ve boru içerisinde türbin tasarımının geleneksel tasarıma göre avantajları açıklanmıştır. Bölüm 1’de hidrolik enerji hakkında genel bilgiler verilmiştir. Francis tipi türbinlerin çalışma prensibi ve türbini oluşturan başlıca parçalar hakkında bilgiler verilmiştir. Özellikle salyangozun sebep olduğu problemler özetlenmiş ve bunların etkilerinden kısaca bahsedilmiştir. Literatürde bu problemlerin etkileri ve çözümleri araştırılmış ayrıca hesaplamalı akışkanlar yöntemi hakkında da kısaca bilgi verilmiştir. Bölüm 2’de HAD bazlı tasarımda izlenen yöntem verilmiştir. Tasarım yönteminde kullanılan temel parametreler açıklanmıştır. Geliştirilen tasarım yönteminin uygulandığı proje hakkında bazı bilgiler verilmiştir. Ayrıca uygulanan HAD yöntemi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. HAD bazlı tasarımda kullanılan denklemler, türbülans modelleri, ayırıklaştırma yöntemi ve adveksiyon şemaları, sınır koşulları ve oluşturulan ağ yapıları açıklanmıştır. Bölüm 3’te boru içerisinde türbinin parça bazında detaylı sonuçları verilmiştir. Ayrıca geleneksel tasarıma göre farklı debi yüklemesi durumlarında boru içerisinde türbinin geleneksel tasarıma göre karşılaştırmalı sonuçları da verilmiştir. Bölüm 4’te ise tez çalışmasının özeti yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmanın sağladığı katkılar kısaca açıklanmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar kısaca belirtilmiştir.

2. TASARIM YÖNTEMİ

Su türbini tasarımında en önemli tasarım parametreleri düşü ve debi değerleridir. Bu iki ana parametre, türbin tipi ve şekli konusunda belirleyici kriterlerdir [6,11]. Bir hidroelektrik santrale ait düşü ve debi değerleri ise, mevsimsel ve coğrafi koşullar çerçevesinde şekillenmektedir. Yapılan fizibilite çalışmaları neticesinde türbinin çalışacağı debi ve düşü aralıkları belirlenmektedir. Türbin tasarımı da belirlenen bu aralıklarda verimi maksimize edecek şekilde tasarlanmaktadır. Türbinlerin debi ve düşü aralıkları birbirinden farklı olduğu için her türbin kendine özgü bir tasarıma sahiptir. Türbin tasarımını belirli bir standarda oturtmak için bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir [28]. Bu tasarım yöntemi hidrolik makineler teorisi, üç boyutlu tasarım programları ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodlarını birleştirerek tasarım sürecini parametrik bir yapıya indirgemektedir ve böylelikle tasarım sürecini hızlandırmaktadır. Bu yöntemle göre ilk olarak debi ve düşü değerleri kullanılarak türbin parçalarının ampirik ve teorik formüller yardımıyla başlangıç geometrileri oluşturulur. Bu başlangıç geometrileri 3 boyutlu katı model yazılımları ve turbomakine yazılımları yardımıyla 3 boyutlu akış alanlarına dönüştürülür. Türbin parçalarının akış alanları HAD analizlerinde kullanılır ve analiz sonuçlarına göre bu geometrilerin gerekli düzenlemeleri gerçekleştirilir. Türbin parçalarının akış geometrileri istenen performans değerlerini sağladığında tüm türbin analizleri gerçekleştirilir. Tüm türbin analizleri ile parça bazında analizlerin birbiriyle tutarlı ve uyumlu olması gerekmektedir. Bu koşul da sağlandığında türbinin farklı debi ve düşü değerlerinde çalıştığı verim aralığını saptamak adına sayısal tepe diyagramları oluşturulur. Böylelikle türbinin kısmi yük ve tam yük gibi durumlarda da performans değerleri tespit edilebilmektedir. HAD analizi yardımıyla tasarım süreci tamamlandığında türbin parçalarının yapısal dayanım analizleri gerçekleştirilir. Problem oluşması durumunda geometrilerde gerekli düzeltmeler yapılarak HAD analizleri tekrar gerçekleştirilir. Yapısal dayanım analizleri yeterli güvenlik katsayısını sağladığında ise türbin parçalarının üretim sürecine başlanır [28].

Fizibilite çalışmaları sonucu elde edilen düşü ve debi değerlerine bağlı olarak ilk aşamada ön tasarım gerçekleştirilir. Ön tasarım, net düşü ve debi değerlerinden yola

çıkarak türbin bileşenlerinin hidrolik makine teorisine göre, teorik ve deneysel formüllere dayanarak başlangıç akış geometri ölçülerinin belirlenmesini sağlar. Ayrıca bir boyutlu akış formülleri kullanılarak türbinin yaklaşık olarak performans verileri de ön tasarım sürecinde belirlenir. Tüm teorik ve ampirik formüller ön tasarımı hızlandırmak adına Matlab [29] ve Mathcad [30] yazılımları yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

Başlangıç geometri ölçüleri belirlenen türbin parçalarının akış geometrilerinin hazırlanması için çeşitli üç boyutlu CAD yazılımları kullanılmaktadır. Salyangoz ve emme borusu akış geometrileri Excel yardımıyla parametrik olarak Autodesk Inventor [31] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ön tasarımda belirlenen geometrik ölçüler Excel'de hazırlanan sayfada girilerek katı model parametrik bir şekilde oluşturulur. Sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark geometrisi ise karmaşık geometrik yapıları sebebiyle turbomakine tasarımında kullanılan ANSYS Bladegen [32] yazılımı yardımıyla gerçekleştirilir.

Akış geometrileri oluşturulan türbin bileşenlerinin ilk aşamada ayrı ayrı HAD analizleri gerçekleştirilir. Parça bazında yapılan bu analizler tasarım sürecini hızlandırmayı sağlar. Ayrıca oluşan problemlerin hangi parçada ve ne sebeple oluşabildiği sonucuna daha kolay ulaşılabilir. Ön tasarımda bir boyutlu denklemlerle gerçekleştirilen performans sonuçları, üç boyutlu HAD kodları yardımıyla kesin bir sonuca ulaştırılır. Akış ayrılması, kavitasyon, girdap yapıları ve hidrolik kayıp hesapları 1 boyutlu denklemlerde ihmal edildiği için ön tasarımda yapılan hesaplamalar sadece performans değerlerinde öngörü sağlamaya olanak tanır. Bu problemleri gidermek için oluşturulmuş akış geometrilerinde gerekli düzenlemeler yapılır ve HAD analizleri iteratif bir şekilde proje isterlerini karşılayana kadar devam ettirilir. Bahsedilen problemler parça bazında giderildikten ve her parçanın performans değerleri proje isterlerini karşıladığında tüm türbin HAD analizleri gerçekleştirilir. Tüm türbin analizleri sonucunda tasarlanan türbinin farklı debi ve düşü değerlerinde de güç ve verimlilik gibi performans verileri gözlemlenir. Bu sayede farklı iklim koşullarında değişen debi ve düşü değerlerinde de türbinin çalışma karakteristiği belirlenmiş, gerektiği durumlarda da geometri değişiklikleriyle performans değerlerinde artış sağlanması gerçekleştirilebilmektedir. Tüm türbin analizi sonuçlarıyla oluşturulan tepe diyagramı sayesinde de türbinin farklı debi ve

düşü değerlerinde hangi ayar kanadı açıklığında ve hangi verimde çalıştığı daha kolay tespit edilebilmektedir.

Akış geometrileri oluşturulan ve HAD analizleri gerçekleştirilen türbin parçalarının üç boyutlu katı modelleri oluşturularak yapısal dayanım analizleri gerçekleştirilir. Belirlenen güvenlik katsayılarında yapısal dayanımı yetersiz görülen parçaların geometrileri iteratif bir sürece tabi tutularak gerekli düzenlemeler yapılır ve tekrar HAD analizleri gerçekleştirilir. Bu süreç akış ve yapısal dayanım analizlerinde istenen değerlere ulaşana kadar devam ettirilir. Tüm bu aşamalardan sorunsuz bir şekilde çıkan üç boyutlu geometriler üretime hazır paftaları oluşturularak imalat sürecine hazır hale getirilir.

2.1 Hidrolik Türbin Tasarım Parametreleri

Bir hidroelektrik santralde yükleme havuzuyla kuyruk suyu arasındaki kot farkı türbinin statik düşüsü olarak adlandırılır. Yükleme havuzundan türbine kadar cebri borularda ve vanalarda oluşan kayıplar statik düşü değerinden çıkarıldığında ise türbinin net düşüsü hesaplanmış olur [27]. Türbinden geçecek olan tasarım debisi mevsimsel ortalamalar da göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Böylelikle türbinin optimum tasarım yapıldığı noktada yıllık orana göre daha fazla çalışması ve enerji üretiminin maksimize edilmesi sağlanmalıdır. Türbin net düşüsünden kaynaklanan hidrolik enerji türbin çarkı yardımıyla kinetik enerjiye dönüştürülür. Türbin çarkından ise bir shaft aracılığıyla jeneratöre aktarılan bu kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Hidrolik verim de göz önünde bulundurularak türbin shaft gücü aşağıdaki gibi hesaplanır [28].

$$P = \rho g Q H \eta \quad (2.1)$$

2.1.1 Hız Üçgenleri ve Türbin Çalışma Prensibi

Türbin çarkında akış hız vektörü V , bağıl hız vektörü w ve çarkın dönmesinden kaynaklanan teğetsel hız bileşeni u 'nun vektörel olarak toplanmasıyla hesaplanır [6].

$$\vec{V} = \vec{u} + \vec{w} \quad (2.2)$$

Teğetsel hız bileşeni u aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$u = \frac{\pi D n}{60} \quad (2.3)$$

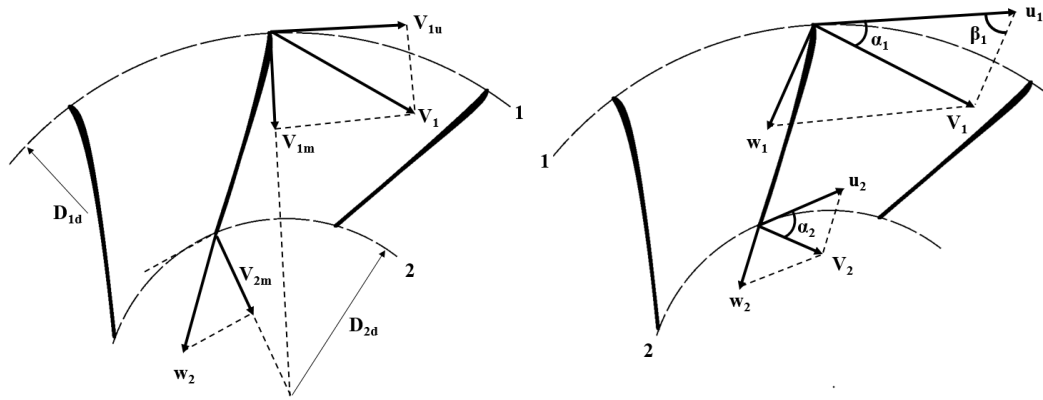
Akış hız vektörünün meridyonel kesit üzerindeki izdüşüm vektörü V_m , debinin çark yüzey alanına oranından hesaplanır.

$$V_m = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

Çark hücum kenarı üzerinde oluşan akış hız vektörü şu şekilde hesaplanır.

$$V = V_m + V_u \quad (2.5)$$

Bağıl hız vektörü w ise Şekil 2.1'deki gibi V ile u arasındaki hız üçgenleri çizilerek hesaplanır.



Şekil 2.1 : Hız vektörleri ve açılar.

2.1.2 Türbin Enerji Denklemi

Çevresel hız bileşeni akışın türbin çark eksenini etrafında döndüğünün göstergesidir. Dönen akıştaki bu girdap yapısı sirkülasyon olarak adlandırılır ve genel ifadesi aşağıdaki şekildedir.

$$\Gamma = \pi D V \cos \alpha \quad (2.6)$$

Momentum denkleminde güç denklemi ve çark giriş çıkışında sirkülasyon denklemleri yerine yazılıp düzenlemeler yapıldığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$H\eta = \frac{\omega}{2g\pi} (\Gamma_1 - \Gamma_2) \quad (2.7)$$

Denklem 2.7 türbin enerji denklemini ya da Euler denklemini ifade eder. Denklem sol tarafı suyun çark kanadından geçerken ilettiği hidrolik enerjiyi ifade etmektedir. Denklem sağ tarafı ise kinematik parametreleri tanımlamaktadır. Elde edilen bu Euler denklemi şu sonuçlara ulaşılmasını sağlar [6].

- Türbin enerji denklemi için öneme sahip olan çark giriş ve çıkışındaki akışın yapısıdır.
- Türbin verimi düşünüldüğünde çark çıkışındaki sirkülasyon değerinin sıfır veya sıfıra yakın olması istenmektedir. Bu durum da çıkış açısının 90° olması durumunda geçerlidir.
- Su türbin çarkında ilerlerken sirkülasyon değerinin azalması gerekir. Çark giriş ve çıkışı arasında oluşan bu moment farkından türbin gücü elde edilir.

2.1.3 Türbin Benzerlik Parametreleri

Türbinlerin birbirleriyle benzer olma koşulları aşağıda belirtilmiştir [6]:

- İki türbin geometrik olarak benzer olmalıdır (Geometrik ölçek).
- İki türbin kinematik olarak benzer olmalıdır (Hız üçgenlerini tanımlayan akış açıları aynı olmalıdır).
- İki türbin dinamik olarak benzer olmalıdır (Akış içerisindeki kuvvetler özdeş olmalıdır).

Benzer iki türbinin verimleri arasında ihmal edilebilir bir fark olmaktadır bu yüzden verimleri oranı 1 kabul edilir. Türbinlerin birbirleriyle benzerlik denklemi aşağıda verilmiştir [6].

$$\frac{Q}{nD^3} = \text{sabit} \quad (2.8)$$

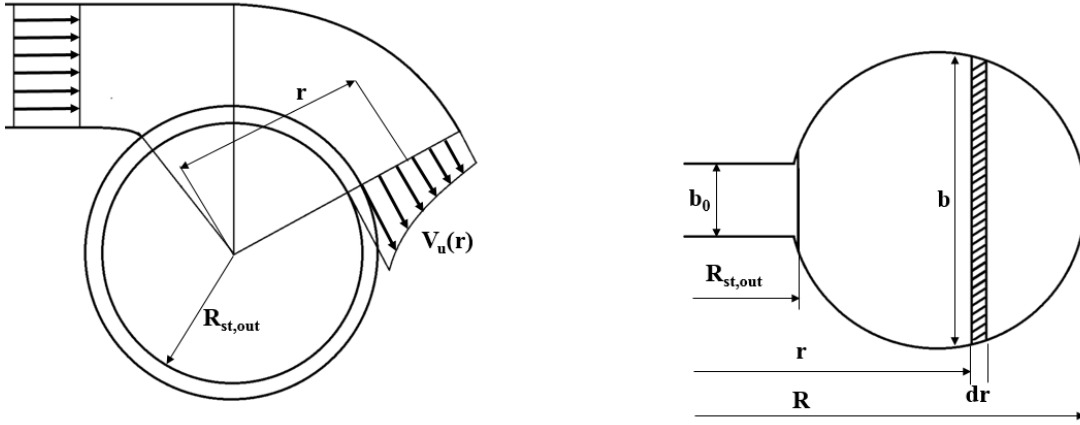
2.1.4 Geleneksel Salyangoz Tasarım Yöntemi

Salyangozun temel görevi sabit kanatlara ve dolayısıyla ayar kanatlarına suyu eşit bir debiyle dağıtmaktır. Salyangoz ölçülerinin belirlenmesinde kullanılan yaklaşım “Ayar kanatları girişinde verilen hız vektörünün yönüne bağlı tasarım”dır [6]. Bu yaklaşım salyangozdaki akışın türbin eksenine olan momentini baz alır. Bu moment değeri salyangoz kesiti boyunca momentumun korunumundan dolayı sabittir. Hız vektörünün momentumla değişimi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$V_u = \frac{K}{r} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'a göre hız dağılımı yarıçapa bağlı ve hiperboliktir. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere her bir viroldeki debi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_\varphi = Q \frac{\varphi}{360} = \int_{R_{st,out}}^R V_u(r) b(r) dr = K \int_{R_{st,out}}^R \frac{b(r)}{r} dr \quad (2.10)$$



Şekil 2.2 : Salyangoz kesitinde hız dağılımı ve alan hesaplaması.

Denklem 2.9'dan K değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K = \frac{Q \frac{\varphi}{360}}{\int_{R_{st,out}}^R \frac{b(r)}{r} dr} \quad (2.11)$$

Sabit kanatlar çıkışındaki radyal hız bileşeni ise aşağıdaki şekilde hesaplanır.

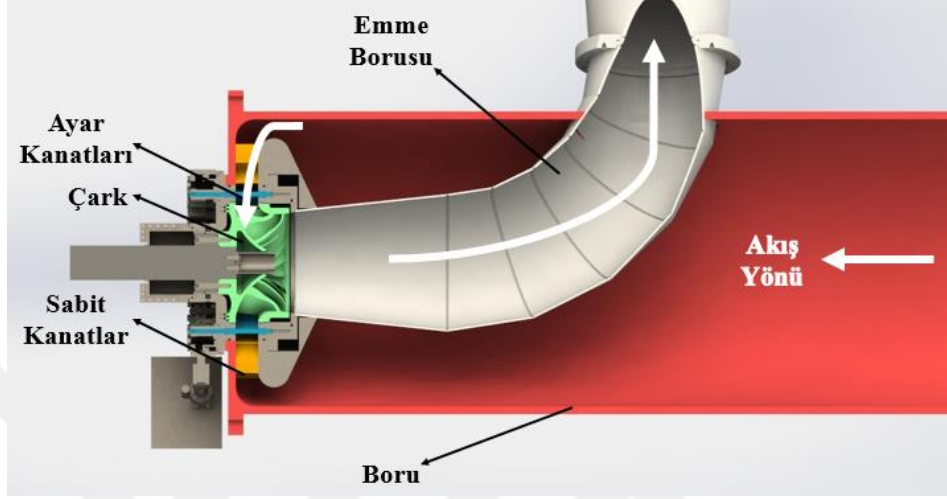
$$V_r = \frac{Q}{\pi D_{st,out} b_0} \quad (2.12)$$

Salyangoz tasarımında genellikle momentumun korunumu yöntemi kullanılmaktadır. Salyangoz tasarımı da ilk ölçüler belirlendikten sonra HAD analizleri sonucuna göre iteratif olarak ilerlemektedir.

2.1.5 Boru Tasarım Yöntemi

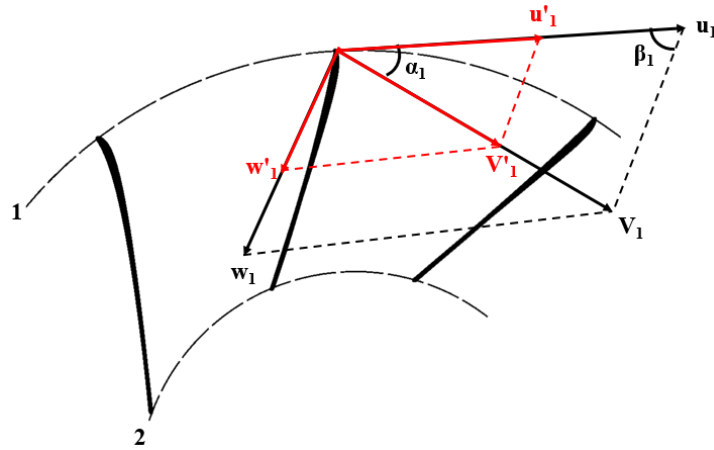
Geleneksel tasarımda salyangoz kesit alanı sabit kanatlar etrafında azalarak debi girişini sağlamaktadır. Ancak en iyi tasarlanan salyangozda bile sabit kanat girişlerinde debiyi eşit bir şekilde dağıtamamaktadır. Salyangoz tasarımı, tasarım

düşü ve debisi için yapılmaktadır, özellikle kısmi yüklerde ve tam yük durumlarında salyangoz çıkışında hız üçgenlerinde tasarım debisine göre farklılıklar oluşmaktadır. Boru içerisinde türbin tasarımında akış borudan direkt olarak sabit kanatlara girmektedir. Boru içerisinde Francis tipi türbin uygulaması kesit görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Boru içerisinde türbin genel görünümü.

Boru içerisinde türbin uygulamasında, tüm sabit kanatlar girişinde boru kesit alanı değişmediği, akışın da cebri borudan üniform bir şekilde geldiği kabulü yapıldığı için tüm sabit kanatlara eşit bir şekilde dağılmaktadır. Bu durum tasarım debisi için olduğu gibi kısmi yük ve tam yük durumlarında da geçerlidir. Şekil 2.4'te gösterildiği üzere, kısmi ve tam yük durumlarında hız üçgenlerinin sadece vektörel büyüklükleri değişmekte, aralarındaki açı ise aynı kalmaktadır. Diğer debi aralıklarında da akışın tasarım debisinde olduğu gibi davranış göstermesi tüm debi aralığında boru içerisinde türbinin verimini geleneksel türbine göre yükseltmektedir.



Şekil 2.4 : Hız üçgenleri ve açıları.

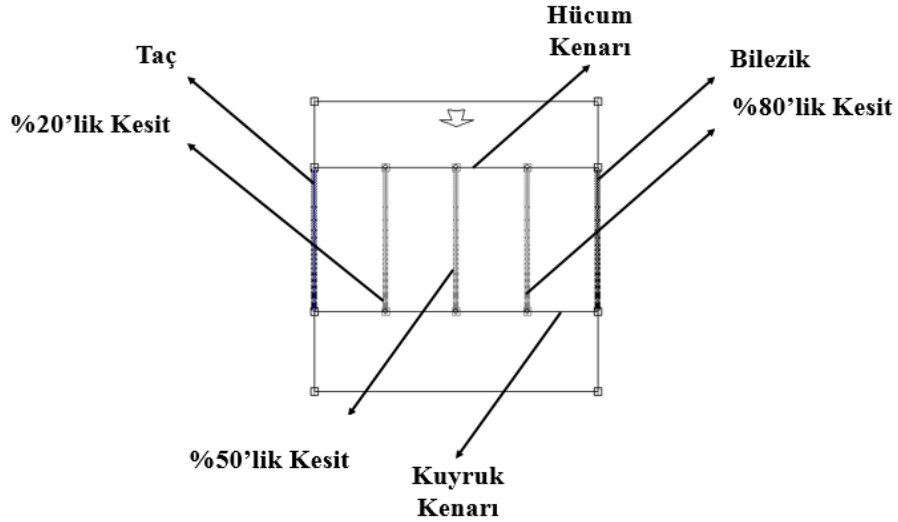
Boru tasarımı salyangoz tasarıma göre çok daha kolay ve zahmetsiz bir şekilde yapılabilmektedir. Belirlenmesi gereken en önemli parametre borunun çapıdır. Boru çapının belirlenmesinde birkaç farklı kısıt bulunmaktadır. Bunlardan ilki sabit kanatların yapısı ve boyudur. Sabit kanatlara geleneksel tasarımda akış yaklaşık 45° – 60° 'lik bir açıyla gelirken boru içerisinde türbinde 90° 'lik bir açıyla gelmektedir. Geleneksel tasarımda salyangoz ve sabit kanatların beraber gerçekleştirdiği sirkülasyon değeri boru içerisinde tasarımda sabit kanatlarla gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden sabit kanatlar geleneksel tasarıma göre daha büyük olmaktadır. Ayrıca sabit kanatlara akış girmeden en az kanat yüksekliği kadar bir alan bırakılarak akışın yön değiştirmesi esnasında hidrolik kayıpların en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu durumlar boru çapının büyümesine sebep olmaktadır. Ancak ikinci kısıt ise santral içerisinde türbinin yerleşimidir. Boru çapı çok büyük seçilirse hem türbin maliyetini artıracak hem de santral binası maliyetlerinde artışa sebep olacaktır. Bu iki durum göz önünde bulundurularak en optimum düzeyde bir boru çapına karar verilmelidir.

2.1.6 Sabit Kanat Tasarım Yöntemi

Sabit kanatlar salyangoz çeperlerine alt ve üst hız çemberlerinden bağlıdır ve yapısal dayanım sağlamaktadır. Ayrıca tek başına salyangoz debiyi eşit bir şekilde dağıtmakta yetersiz kalmaktadır, sabit kanatların diğer görevi de salyangoza akışın eşit dağıtmasına yardımcı olmaktır [33]. Sabit kanat sayısı salyangoz büyüklüğüne göre belirlenmektedir. Genellikle 12, 16, 18, 24 gibi sabit kanat sayıları tercih edilmektedir [28]. Sabit kanat tasarımında simetrik veya asimetrik profiller uygulanabilmektedir.

Sabit kanat geometrisi ANSYS Bladegen [32] yazılımı kullanılarak oluşturulur. Turbomakine kanat tasarımı için özelleştirilmiş bir yazılım olan Bladegen ile sabit kanadın yanı sıra karmaşık geometrili çark kanadı ve ayar kanadı geometrileri de parametrik olarak oluşturulmaktadır. Bladegen silindirik koordinat sistemini kullanmaktadır. Kanat veter hattı boyunca çeşitli sayıda noktalar tanımlayarak bu noktaların orjine göre uzaklık, konum açısı ve yüksekliği tanımlanmaktadır. Bladegen'de 3 boyutlu bir kanat tasarımı gerçekleştirmek için 3 ayrı modüle geometrik ölçüler girilmelidir. Bunlardan ilki meridyonel kesittir. Kanat boyu, yüksekliği ve kanadın oturduğu çapa göre meridyonel kesit tanımlanır. Bu modül de bir noktanın orjine uzaklık ve yüksekliği tanımlanmaktadır. Konum açısı ise ikinci

modülde tanımlanmaktadır. Kanat veter hattı boyunca tanımlanan noktaların orjine uzaklıklarının eksenle yaptıkları açı konum açısı olarak hesaplanır. Son modülde ise kanat kalınlığı tanımlanmalıdır. Tasarım tercihinine göre simetrik veya asimetrik kanat kalınlık dağılımları tanımlanmaktadır. Kanat yapısı taçtan bileziğe doğru 5 eşit kesite ayrılarak, her bir kesit için belirtilen tasarım parametreleri tanımlanabilmektedir. Sabit kanat için meridyonel kesitte tanımlanan bu kesit görünümü Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 : Sabit kanat meridyonel kesit.

Sabit kanat tasarımında en önemli tasarım kriterlerinden ilki kanat kalınlığıdır. Türbinin maruz kaldığı düşü sebebiyle basınç yüklerine sabit kanatlar maruz kalmakta ve türbine yapısal dayanım sağlamaktadır. Ayrıca kanat uzunluğu ve kanat kalınlığı arttıkça hidrolik kayıplar da aynı oranda artış gösterebilmektedir. Bu sebeple tasarım esnasında isterlerin yanı sıra verimi yükseltecek, hidrolik kayıpları ise azaltacak yönde tasarım geliştirilmelidir.

2.1.7 Ayar Kanadı Tasarım Yöntemi

Ayar kanatları kendi eksenleri etrafında dönerek türbine giren debinin ve dolayısıyla gücün kontrol edilmesini sağlar. Ayar kanadı tasarımının ilk aşamasında merkezlerinin oturacağı çap belirlenir. Çarkın büyüklüğüne göre ayar kanadı sayısı belirlenir. Burada önemli olan kriterlerden biri de ayar kanatları tam açık konumdayken türbin çarkına temas etmeyecek şekilde ayar kanadı boyu ve sayısı belirlenmesi gerekliliğidir [34]. Ayar kanadı kalınlığı ise akışta kopma ve bozulmalara izin vermeden en az hidrolik kayıpla çark girişinde istenen sirkülasyonu

ve akış açısını sağlayacak şekilde ve türbine gelecek maksimum basınca belirli bir emniyet katsayısı eklenerek dayanım gösterebileceği şekilde seçilmelidir. Ayar kanadı tasarımı da ANSYS Bladegen [32] yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sabit kanatlar için belirtilen tasarım prosedürü ayar kanatları için de kullanılmaktadır.

2.2 HAD Yöntemi

2.2.1 HAD Analizi

Türbin içerisindeki akış yüksek Reynolds sayısına sahip, türbülanslı, 3 boyutlu, rotor – stator bağlantısı sebebiyle aslında zamana bağlı bir yapı sergilemektedir [21,35,36]. Ancak bu akışı direkt olarak çözümlenmeye çalışmak çok yüksek hesaplama gücü ve yüksek süper bilgisayar gücü gerektirmektedir. Bu sebeple HAD analizleri gerçekleştirilirken bazı yaklaşımlarla zamandan ve bilgisayar gücünden tasarruf edilmesi amaçlanmaktadır. HAD analizleri “Çoklu Çerçeve Referans Sistemi (Multiple Frames of Reference – MFR)” yaklaşımı kullanılarak zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir[35,36].

2.2.1.1 Korunum Denklemleri

Boyutları dx, dy, ve dz olan bir akış parçacığı için kütle korunumu Denklem 2.13’te verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.13)$$

Zamandan bağımsız ve sıkıştırılmaz akış kabulleri yapıldığı için Denklem 2.14 elde edilir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.14)$$

Akış içerisinde alınan bir kontrol hacmi için momentum değişimi; basınç değişimleri ile viskoz kuvvetler ve dış kuvvetlerin toplamına eşittir. Navier – Stokes denklemi genel haliyle aşağıda verildiği gibi ifade edilir.

$$\rho \frac{D(u_i)}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (2.15)$$

Türbin HAD analizlerinde “Reynolds Ortalamalı Navier – Stokes (RANS)” denklemleri kullanılmaktadır. Navier – Stokes denklemindeki değişkenler ortalama ve çalkantılı kısımlar olmak üzere bileşenlerine ayrılır ve değişkenlerin zamana göre ortalamalarının alınmasıyla Denklem 2.16’da verilen RANS denklemleri elde edilir.

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2.16)$$

2.2.1.2 Türbülans Modeli

Türbülans akışta meydana gelen, akışın hızına ve zamana göre değişkenlik gösteren, rastgele varyasyonlardan oluşan akış hareketidir [21]. Türbülanslı akış, üç boyutlu zamana bağlı ve oldukça karmaşık akış hareketleri içermektedir bu sebeple çözümü oldukça zordur. RANS denklemlerinde yapılan yaklaşımlar yeterli olmamaktadır. Bu sebeple türbülansın da matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir [21,34].

En yaygın kullanılan türbülans modelleri k-ε ve k-ω denklemleridir. Türbin tasarımında k-ε türbülans modelinin uygun olduğu düşünülmektedir [28]. k-ε modelinde k türbülans kinetik enerjisidir ve hızda meydana gelen çalkantıların değişimini ifade eder. ε ise türbülanslı kinetik enerjinin yitimi olarak ifade edilir.

2.2.1.3 Ayırıklaştırma Yöntemi ve Adveksiyon Şemaları

HAD analizlerinde akış alanı sonlu hacimler yöntemiyle kontrol hacimlerine bölünmektedir. Oluşturulan bu kontrol hacimlerinde korunum denklemleri uygulanmaktadır. Ağ yapısı sınır koşulu tanımlanan düğümlerden başlanarak tüm düğümler için hesaplamalar gerçekleştirilir ve bilinmeyenler hesaplanır [37].

HAD analizleri gerçekleştirilirken upwind ve yüksek çözünürlük adveksiyon şemaları kullanılmıştır. Özellikle ağ yapısı çalışmaları gerçekleştirilirken zamandan ve bilgisayar gücünden tasarruf etme amaçlı upwind şeması kullanılmıştır. Boyutların belirlenmesi ve parça bazında tasarımda ise yüksek çözünürlük adveksiyon şeması kullanılmıştır. HAD bazlı tasarımda yüksek çözünürlük şeması kullanılmasının en önemli sebebi, upwind şemasına göre daha doğru sonuçlar vermesidir [38].

2.2.1.4 Sınır Koşulları

Türbin bileşenlerinin tasarımı parça düzeyinde yapılmaktadır. Bu sayede hem her bir bileşen için değişken parametreler kolaylıkla belirlenmekte hem de tasarım süresi önemli ölçüde azalmaktadır. Her bir parça için akış alanı girişinde toplam basınç, çıkışta ise toplam debi sınır koşulları verilmektedir. Toplam basınç ise hesaplanan net düşü değerinin basınç cinsinden hesaplanmasıyla belirlenir. Referans basınç 0 Pa olarak kabul edilmektedir bu sebeple açık hava basıncı değeri girişte tanımlanan toplam basınç değerine eklenmektedir. Akış alanları etrafında kalan duvarlar ise kaymaz duvar sınır koşulu olarak tanımlanmaktadır [28].

Boru girişinde net düşünün basınç cinsinden değerine açık hava basıncı eklenmesiyle hesaplanan toplam basınç giriş koşulu verilmektedir. Akışın cebri borudan üniform bir şekilde geldiği kabulü yapılmakta ve salyangoz girişinde yüzeye dik olarak tanımlanmaktadır. Boru çıkışında ise debi tanımlanmaktadır.

Sabit kanatlar girişinde tanımlanan basınç, toplam basınçtan boru hidrolik kaybının çıkarılmasıyla hesaplanır. Boru çıkışındaki akış açısı da hesaplanarak bu açı değeri sabit kanatlar girişinde tanımlanmaktadır. Sabit kanatlar arası periyodiklik tanımlanmaktadır. Tek bir sabit kanada düşen debi hesaplanarak çıkış sınır koşulu olarak verilmektedir.

Ayar kanatları girişinde tanımlanan basınç, toplam basınçtan boru ve sabit kanat hidrolik kayıplarının çıkarılmasıyla hesaplanır. Sabit kanat çıkışındaki akış açısı da ayar kanatları girişinde akış yönü olarak tanımlanmaktadır. Ayar kanatları arası periyodiklik tanımlanmaktadır. Tek bir ayar kanadına düşen debi hesaplanarak çıkış sınır koşulu olarak verilmektedir.

Çark kanadı girişinde tanımlanan basınç değeri boru, sabit kanat ve ayar kanadı hidrolik kayıplarının çıkarılmasıyla hesaplanır. Ayar kanadı çıkış akış açısı da çark kanadı girişinde akış yönü olarak verilmektedir. Çark kanatları arasında periyodiklik tanımlanmaktadır. Tek bir çark kanadı için hesaplanan debi değeri de çıkış sınır koşulu verilmektedir. Ayrıca çark için dönüş hızı ve yönü de tanımlanmaktadır.

Emme borusu çıkışı atmosfere açıldığı için sınır koşulu da diğer parçalardan farklı olarak verilmektedir. Çıkış sınır koşulu atmosferik basınç olarak giriş sınır koşulu ise toplam debi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca çark çıkışındaki akış açısı da emme borusu girişinde akış yönü olarak verilmektedir.

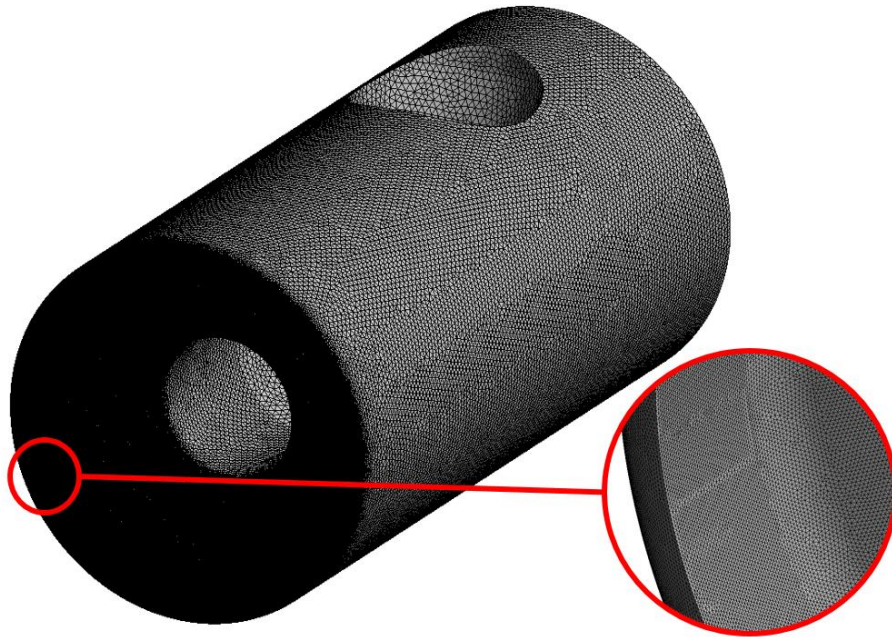
Tüm türbin HAD analizlerinde boru girişinde farklı düşümler için hesaplanan toplam basınç değerleri giriş sınır koşulu olarak verilmektedir. Çıkış sınır koşulu ise emme borusu çıkışında atmosferik basınç olarak tanımlanmaktadır. Bu analizler farklı ayar kanadı açıklıkları için yapılmaktadır böylelikle türbinden geçen debi değerleri hesaplanmakta ve türbin çalışma aralığı oluşturulabilmektedir.

2.2.2 Sayısal Çözüm Ağı

2.2.2.1 Çözüm Ağı Oluşturulması

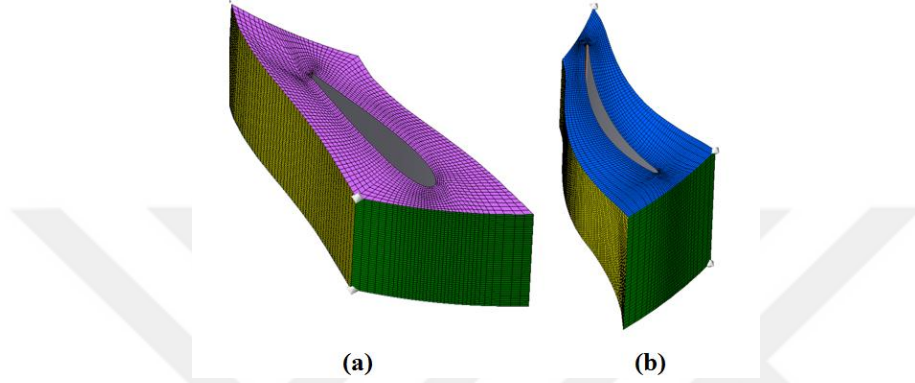
Çözüm ağı yapısı tüm HAD analizlerinde büyük öneme sahiptir. HAD tabanlı tasarım yönteminde türbin parçalarının geometrilerinde yapılan değişikliğin kullanılan çözüm ağından bağımsız sadece geometrik değişiklik sebebiyle etkisi görülmesi gerekmektedir. Bu sebeple tüm türbin bileşenlerinde en uygun ağı yapısı oluşturulmalı ve ağı yapısından bağımsız sonuçların alındığı sıklıkta ağı yapıları belirlenip HAD analizleri devam ettirilmelidir [39]

Salyangoz ağı yapısı silindirik geometrisi sebebiyle yapılandırılmamış dört yüzlü elemanlar kullanılarak ANSYS CFX – Mesh [40] yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Özellikle çıkış kesitine doğru ağı yapısı sıklığı artırılarak daha doğru sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple boru çıkış (sabit kanatlara giriş) kesitinde maksimum ve minimum eleman boyutları tanımlanmıştır. Şekil 2.6'da boru için oluşturulan ağı yapıları gösterilmiştir.



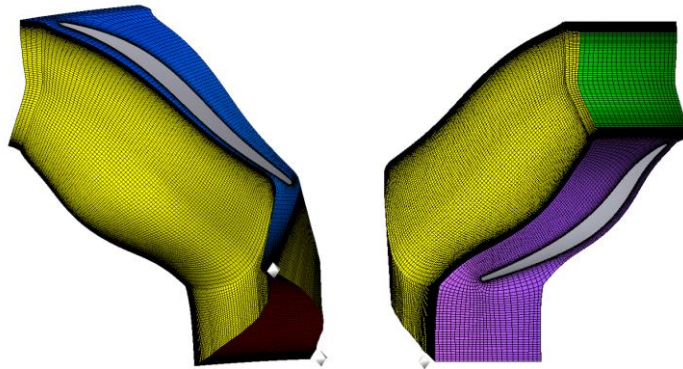
Şekil 2.6 : Boru için oluşturulan ağı yapısı.

Sabit kanatlar ve ayar kanatları çözüm ağı ANSYS Turbogrid [41] yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Daha yüksek kalitede ağ yapısı oluşturmayı sağladığı için H/J/C/L ağ yapısı kullanılmıştır [34]. Ayrıca kanat etrafında O ağ yapısı da uygulanmıştır. O ağ yapısı özellikle sınır tabakayı çözümü konusunda büyük öneme sahiptir [27]. Turbogrid kanat yapısına en uygun olacak şekilde bahsedilen ağ yapılarını otomatik bir şekilde oluşturmaktadır. H/J/C/L ağ yapısı kullanılarak oluşturulan sabit kanat ve ayar kanadı ağ yapısı Şekil 2.7’de verilmiştir.



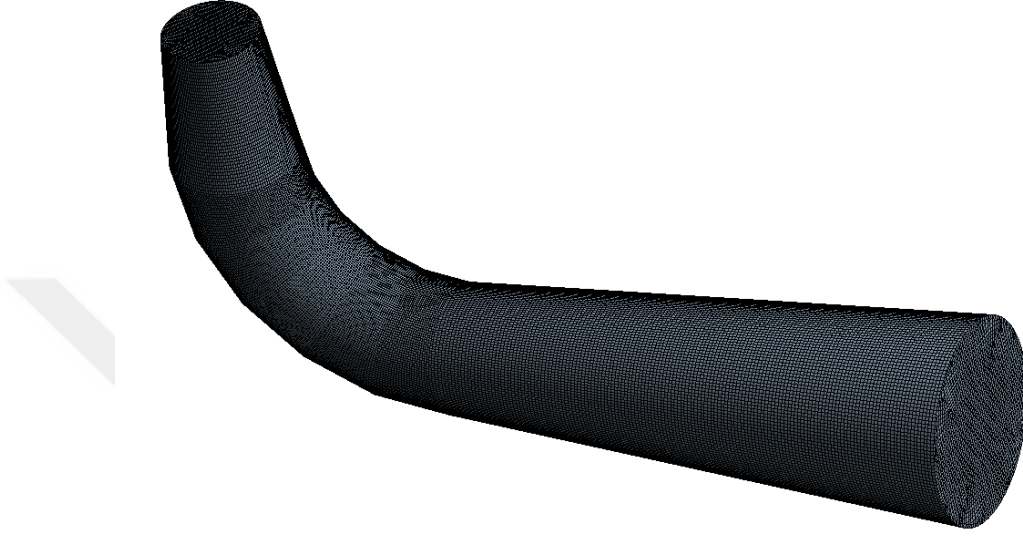
Şekil 2.7 : (a) Ayar kanadı ağ yapısı ve (b) sabit kanat ağ yapısı.

Çark kanadı ağ yapısı sabit kanat ve ayar kanadı gibi ANSYS Turbogrid [41] kullanılarak oluşturulmuştur otomatik yöntemle ağ yapısı oluşturulmuştur. Çark kanadı için oluşturulan H/J/C/L ağ yapısında minimum yüzey açısı, maksimum yüzey açısı, maksimum eleman hacim oranında oluşan hatalar ve özellikle minimum hacim değerinin negatif olması sonucu ağ yapısı oluşturulması imkansız hale gelmektedir. Bu yüzden otomatik oluşturulan ağ yapısında özellikle kanat etrafında sınır tabaka çözümlemesini daha iyi yapabilmesi için ağ yapısının bu bölgelerde sık olmasına önem verilmiştir. Yine akış alanının geri kalanında da olabildiğince sık bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Çark kanadı için oluşturulan ağ yapısı Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : Çark kanadı için oluşturulan ağ yapısı.

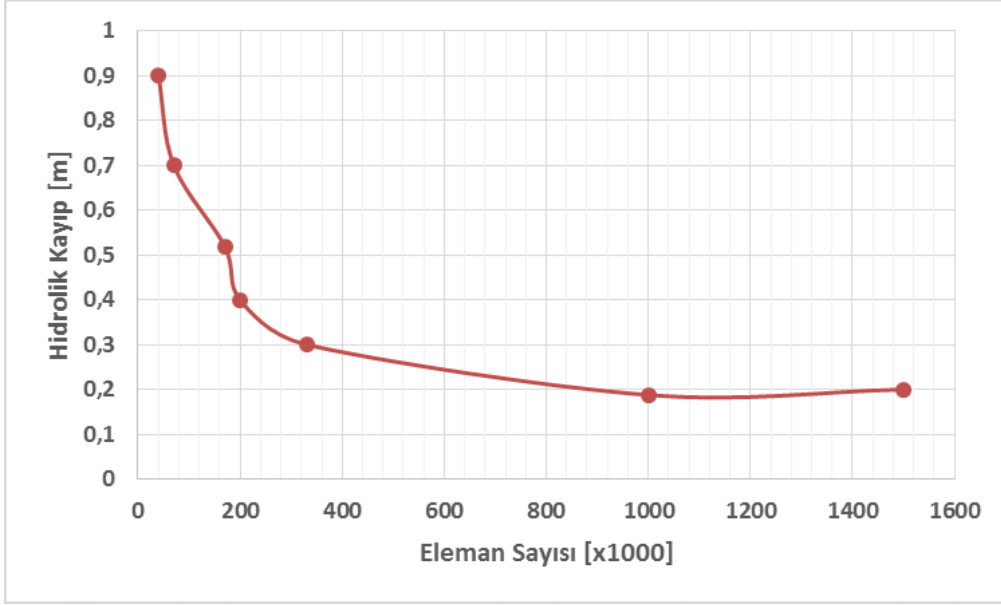
Emme borusu da silindirik yapısı sebebiyle altı yüzlü elemanlar kullanılarak ANSYS CFX – Mesh [40] yazılımı ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Emme borusu girişinde geometrinin geri kalanına oranla çarka bağlantı ara yüzü oluşacağı için daha sık bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Oluşturulan emme borusu ağ yapısı da Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9 : Emme borusu için oluşturulan ağ yapısı.

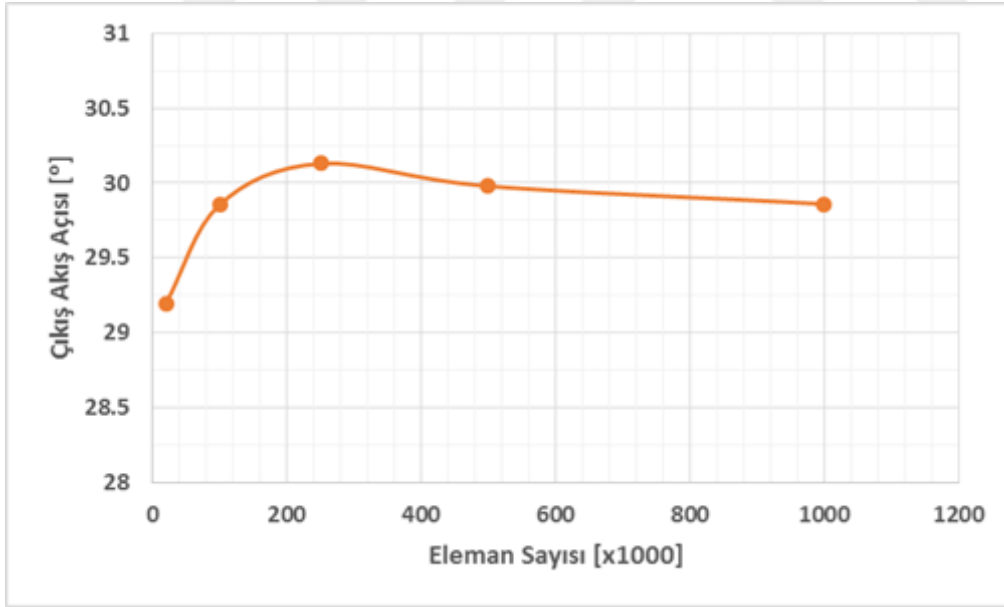
Tüm türbin parçaları için ağ yapısından bağımsız sonuç vermeye başladıkları eleman sayısı grafikleri aşağıda verilmiştir. HAD analizi sonuçlarının ağ yapısından bağımsız oldukları eleman sayısını tespit etmek hem yeterli hassasiyete sahip sonuçların elde edilmesinde hem de tasarım aşamasında zamandan tasarruf açısından son derece önemlidir. Ayrıca iki farklı tasarım türbinin HAD analizlerinin karşılaştırılacak olması sebebiyle de sonuçların ağ yapısından etkilenmeden sadece tasarım farklılıklarından kaynaklı performans verilerinin karşılaştırılması açısından da son derece önemlidir.

Boru için eleman sayısına göre hidrolik kayıpların değişimi Şekil 2.10’da verilmiştir. Sabit kanat için eleman sayısına göre çıkış kesitindeki akış açısı grafiği Şekil 2.11’de verilmiştir. Ayar kanadı için eleman sayısına göre çıkış kesitindeki akış açısı grafiği Şekil 2.12’de verilmiştir. Çark için eleman sayısına göre hesaplanan verim grafiği Şekil 2.13’te verilmiştir. Emme borusu için ise eleman sayısına göre geri kazanım katsayısı grafiği Şekil 2.14’te verilmiştir.



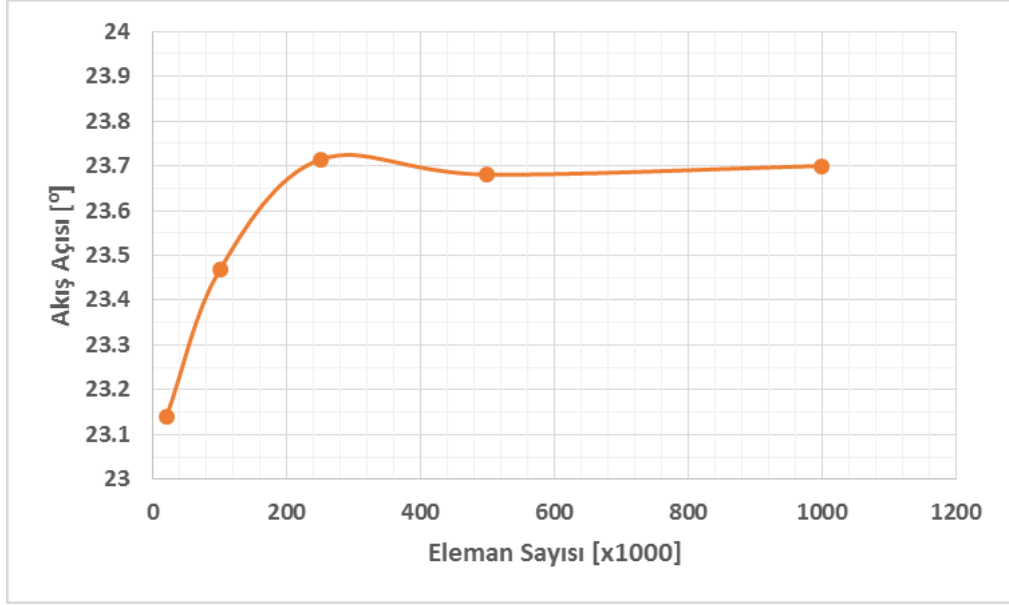
Şekil 2.10 : Boru için eleman sayısına bağlı hidrolik kaybın değişimi.

Boru için 1 milyon eleman sayılı ağ yapısı yakınsamasına rağmen, boru çıkışı yani sabit kanatlarla etkileşimde bulunacağı yüzeylerde eleman boyutlarına maksimum eleman boyutu tanımlaması yapıldığı ve ara yüz tanımlanacak bölgelerde daha sık bir ağ yapısı oluşturulduğu için eleman sayısı yaklaşık 6 milyonu bulmuştur.



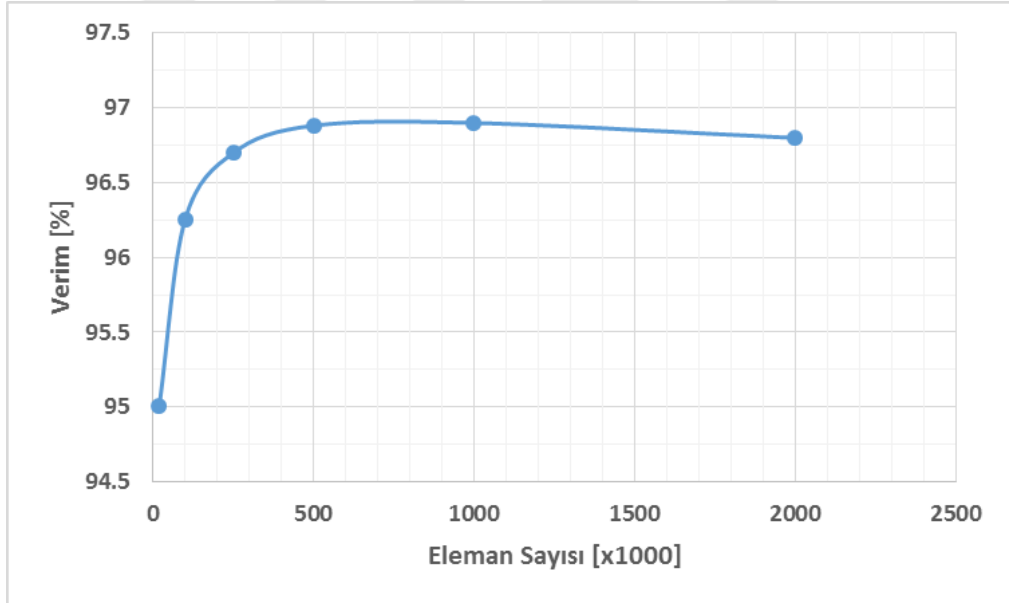
Şekil 2.11 : Sabit kanat için eleman sayısına bağlı çıkış açısının değişimi.

Sabit kanat için yaklaşık 100 bin eleman sayısından sonra görece bir değişiklik olmadığı Şekil 2.11'den anlaşılmaktadır bu sebeple 100 bin eleman sayılı ağ yapısı tercih edilmiştir.



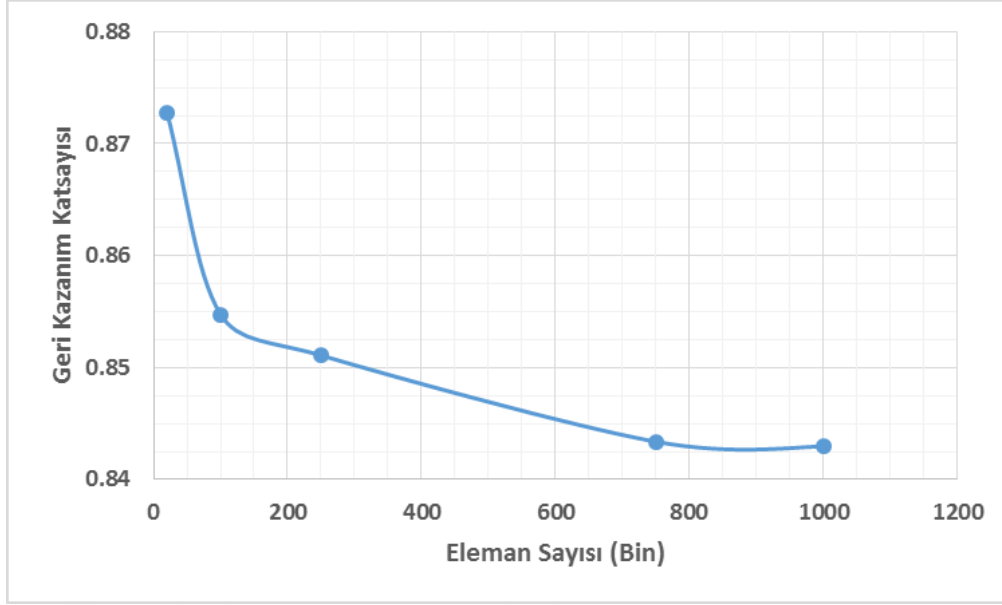
Şekil 2.12 : Ayar kanadı için eleman sayısına bağlı çıkış akış açısının değişimi.

Ayar kanatları 250 bin eleman sayısından sonra sonuçlarda önemli bir değişiklik olmadığı için bu sayıdaki ağ yapıları tercih edilmiştir.



Şekil 2.13 : Çark kanadı için eleman sayısına bağlı verimin değişimi.

Çark kanadı için 250 bin eleman sayısından sonra verim ifadesinde önemli bir değişiklik oluşmadığı gözlemlendiği için bu sayıdaki ağ yapısı tercih edilmiştir.



Şekil 2.14 : Emme borusu için eleman sayısına bağlı geri kazanım katsayısının değişim.

Emme borusu ağ yapısı 750 bin eleman sayısından sonra geri kazanım katsayısında önemli bir değişiklik oluşmadığı için bu eleman sayısına sahip ağ yapısı tercih edilmiştir.

Geleneksel tasarım ve yeni tasarım için oluşturulan ağ yapılarının eleman sayıları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Türbin parçaları için oluşturulan eleman sayıları.

	Geleneksel Türbin	Boru İçerisinde Türbin
Salyangoz/Boru	1053236	6015550
Sabit Kanatlar	1495680 (16 adet)	2117520 (24 adet)
Ayar Kanatları	5852544 (24 adet)	5810568 (24 adet)
Çark Kanatları	3861360 (15 adet)	
Emme Borusu	750308	
Toplam	13013128	18555306

2.2.2.2 Çözüm Ağı Bağlantısı

Türbin parçalarının akış alanlarının bağlantıları ara yüzler tanımlanarak gerçekleştirilmektedir. Tüm türbin HAD analizlerinde genel ağ ara yüzü (GGI)

kullanılmıştır. GGI modelinde karşılıklı iki ağ yapısının düğüm elemanları karşılıklı olarak birbiriyle tam eşleşmek zorunda değildir. Bu ara yüz uyuşmayan eleman tipi ve düğüm elemanları, yüzey boyutu ve şekli ve birbiriyle küçük bir alanda örtüşmeyen hatta iç içe giren ağ yapılarının da bağlantısının yapılmasına olanak vermektedir. Tüm bu avantajları sebebiyle türbin bileşenlerinin ara yüz bağlantılarında tercih edilmektedir [37]. Ayrıca ara yüz tanımlanırken analiz ve bileşenlerin tipine göre donmuş rotor modeli seçilmiştir. Akışın bir bileşenden diğerine geçiş yaparken referans çerçevesini değiştirir ancak bileşenin görece konumunu korur. Zamana bağlı akış çözümlerinin sonuçlarını zamandan bağımsız bir şekilde verebilmektedir. Ayrıca rotor – stator ilişkisi bulunan bileşenlerin de çözümünü basite indirir. Bu sebeple ayar kanadı – çark ve çark – emme borusu bağlantılarında kullanılmaktadır. Rotor tarafının hareketinin anlık olarak durdurulmuş ve o andaki akış alanının gözlenmesini sağlar [37].



3. SONUÇLAR

3.1 Türbin Tasarım Çalışması

3.1.1 Projenin Tanımı

Tasarım yöntemi Türkiye’de kurulumu devam etmekte olan bir hidroelektrik santralin türbini için HAD yöntemiyle boru içerisinde türbin tasarımı denenmiş ve geliştirilmiştir. Buski HES 1.4 MW kurulu güce sahip yatay eksenli tek türbinden oluşmaktadır [4]. Çizelge 3.1’de türbin için temel tasarım parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Buski HES proje isterleri.

Tasarım Düşüsü [m]	78
Tasarım Debisi [m³/s]	2.0
Güç [MW]	1.4
Sistem Frekansı [Hz]	50
Dönüş Hızı [rpm]	1000
Özgül Hız	161.4

3.1.2 Türbinin Ön Tasarımı ve Geometrik Ölçüler

Geleneksel tasarımda türbin tasarımı içten dışa doğru gerçekleştirilmektedir [33]. İlk olarak çark tasarımı yapılırken, çark girişinde istenen akış koşullarına göre sırasıyla ayar kanatları sabit kanatlar ve salyangoz tasarımı yapılmaktadır. Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilmiş bir türbine boru içerisinde tasarım uygulandığı için, çark ve emme borusu tasarımlarında bir değişiklik yapılmamıştır. Türbinin proje isterlerinde belirtilen güce ulaşabilmesi ve çark girişinde istenen sirkülasyon değerine sahip olması için 22° akış açısına sahip olmalı ve akış çarka gelene kadar en az düzeyde hidrolik kayba uğramalıdır. Bu isteri yakalayacak şekilde türbin tasarımı aynı yöntemle uygulanmış ve ayar kanadı, sabit kanat ve boru tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel tasarımda kullanılan ayar kanatlarının oturduğu çember çapı, kanat sayısı, kanat uzunluğu ve konum açıları sabit tutulmuştur. Ayar kanatları oturduğu çember çapı 710 mm, kanat yüksekliği de çark giriş yüksekliği olan 117 mm olarak korunmuştur. Kanat veter hattı uzunluğu 102 mm olup 24 adet ayar kanadı kullanılmıştır. Sadece ayar kanatlarında meydana gelen hidrolik kayıpları azaltmak için Bladegen’de tanımlanan kanat kalınlığında HAD analizleri yardımıyla değişiklik gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yeni kalınlık dağılımı için yapısal dayanım kriteri de göz önünde bulundurulmuştur.

Sabit kanat tasarımında geleneksel tasarıma göre önemli değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Geleneksel tasarımda sabit kanat veter hattı bir düzlem olarak tanımlanırken akışta istenen sirkülasyonu yaratabilmek adına sabit kanat veter hattı 3 noktadan açı dağılımı olacak şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca kanat veter hattı boyu da yeniden tanımlanmıştır. Kanat yüksekliği 117 mm olarak sabit tutulmuştur. Artan kanat boyu dolayısıyla sabit kanatların oturduğu çap 1034 mm olarak hesaplanmıştır. Sabit kanat kalınlığı ve sayısı da hem akıştaki kayıpları azaltacak hem de yapısal dayanım gösterebilmesi için artırılmıştır. Sabit kanat tasarımı verilen boyutlar başlangıç geometrisi olarak kabul edilerek HAD analizleri yardımıyla iteratif bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple son tasarım geometri boyutları sonuçlar bölümünde verilmiştir.

Yeni tasarımda salyangoz tasarımı olmadığı, akış direkt olarak borudan sabit kanatlara girdiği için tasarım süresi ve bilgisayar gücünden önemli ölçüde kazanılmıştır. Boru içerisinde yapılan bazı düzenlemeler HAD analizleri yardımıyla iteratif bir şekilde yürütülmüştür. Aynı türbin çarkı kullanılabilmesi için ve artan sabit kanat boyu da göz önünde bulundurularak akışta düzensizlik yaratmamak adına boru çapının 1500 mm olmasına karar verilmiştir.

Tasarım yöntemi kullanılarak Buski HES için boru içerisinde Francis tipi türbin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Mevcut Buski HES için projede belirtilen güç ve verimlilik değerlerini sağlayan akış koşulları elde edilinceye kadar iteratif bir şekilde HAD analizleri hali hazırda gerçekleştirilmiş olup, bu çalışma kapsamında ise bileşenler bazında iyileştirmeler ve tasarım değişiklikleri de yine HAD analizleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde türbin bileşenlerinin HAD analizleri parça bazında gerçekleştirilmiş, sonuca ulaşıldıktan sonra ise tepe

diyagramı oluşturmak adına farklı ayar kanadı açıklıkları ve düşü değerlerinde HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve iki tasarımın farklılıkları karşılaştırılmıştır.

3.2 Türbin Bileşenleri Tasarım Noktası HAD Analizi Sonuçları

Türbin bileşenlerinin tasarımı, 78 m düşü ve 2 m³/s debi geçirecek ayar kanadı açıklığı olan $\alpha_0 = 31^\circ$ de gerçekleştirilmiştir. Türbin parçalarının tasarımı tek parça bazında gerçekleştirilen HAD analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tek parça bazında elde edilen sonuçlarla tüm türbin analizlerinden elde edilen sonuçların birbiriyle aynı olduğu görülmüştür bu sebeple bu bölümde tüm türbin analizlerinden tasarım düşü ve debisi için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

3.2.1 Boru

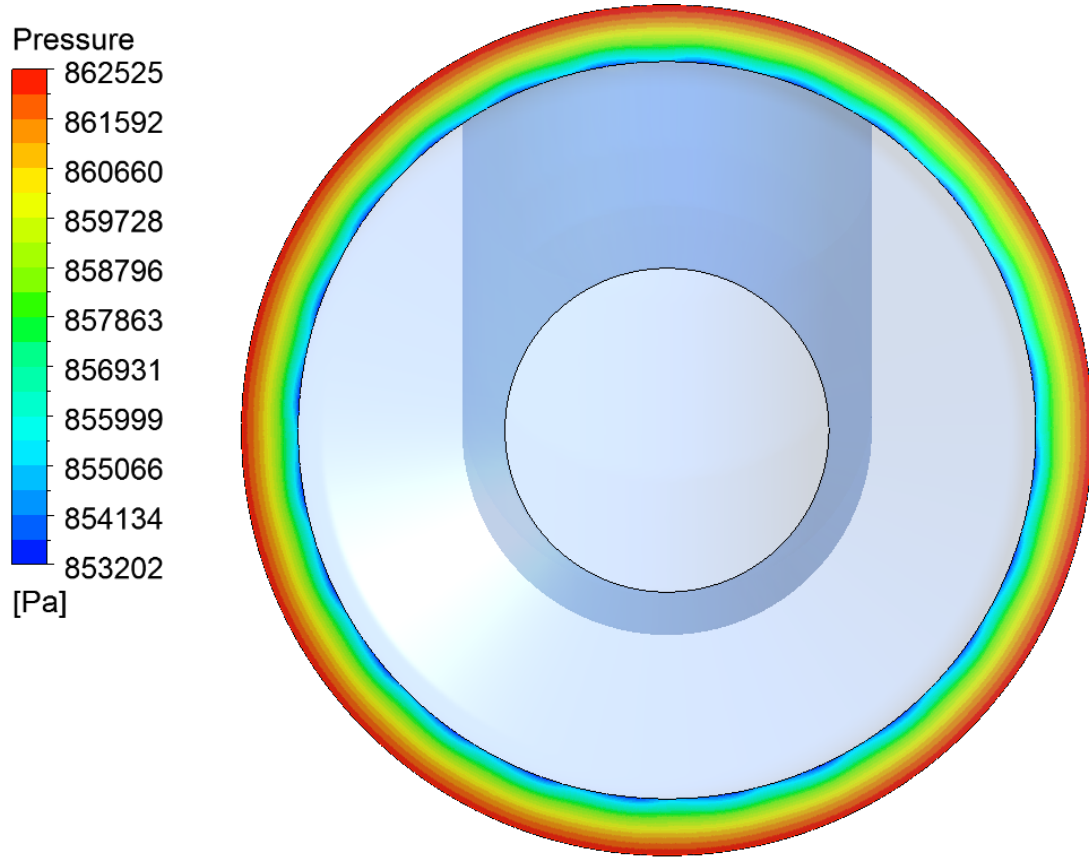
Borudan sabit kanatlara suyun çevresel olarak her noktadan eşit miktarda ve düzgün bir şekilde girmesi gerekmektedir. Çizelge 3.2’de boru giriş ve çıkış kesitlerinde hesaplanan toplam ve statik basınç, alan ortalamasında hesaplanan hızlar, kesit alanları, düşü değeri ve toplam kayıp verilmiştir. Boru içerisinde hidrolik kayıp 0,06 m olarak hesaplanmıştır. Toplam basınçlar baz alınarak hidrolik verim %99,9 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.2 : Boru kesit alanları için HAD analizi sonuçları.

	Giriş	Çıkış
P_t [Pa]	866505	865933
P_s [Pa]	865734	854296
V [m/s]	1,2	4,6
A [m²]	1,767	0,800
Toplam Düşü [m]	78	77.94
Düşü Kaybı [m]	0,06	

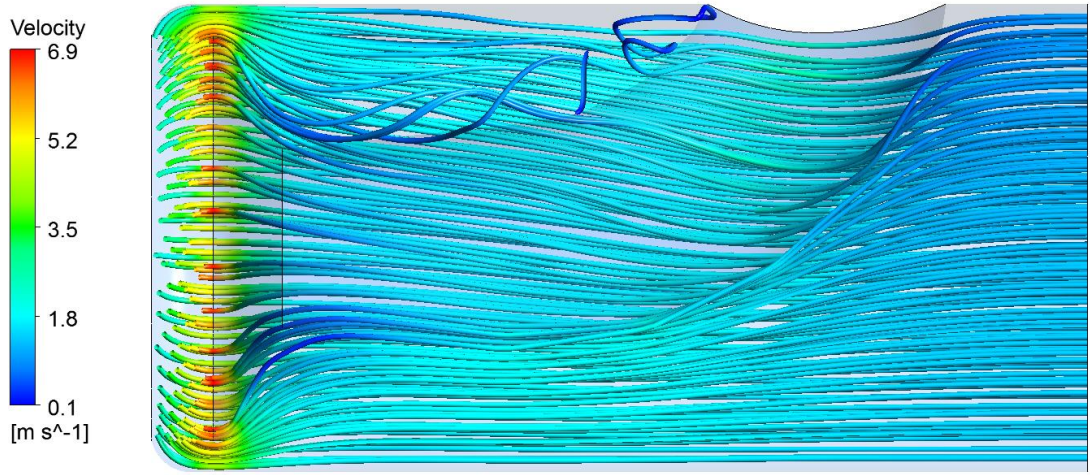
Şekil 3.1’de türbin orta düzlemi için statik basınç dağılımı verilmiştir. Basınç boru duvarlarından sabit kanatlara doğru belirgin bir şekilde azalmakta, dolayısıyla akış hızlanmaktadır. Sabit kanatların bulunduğu çevresel konum etrafında basınç dağılımı periyodik olarak birbirini takip eder şekilde aynı değerdendirler. Salyangoz tasarımında olduğunun aksine tüm sabit kanatlar aynı geometriye sahip olduğundan

ve akış alanları da birbirine eş olduğu için akış her kesitte benzer bir yapıya sahiptir. Normal salyangoz tasarımında görülen virollere suyun farklı debilerde girme problemi bu tasarımda görülmemektedir. Suyun tüm sabit kanatlara ve dolayısıyla çark kanatlarına eşit bir debide girmekte olduğu anlaşılmaktadır.



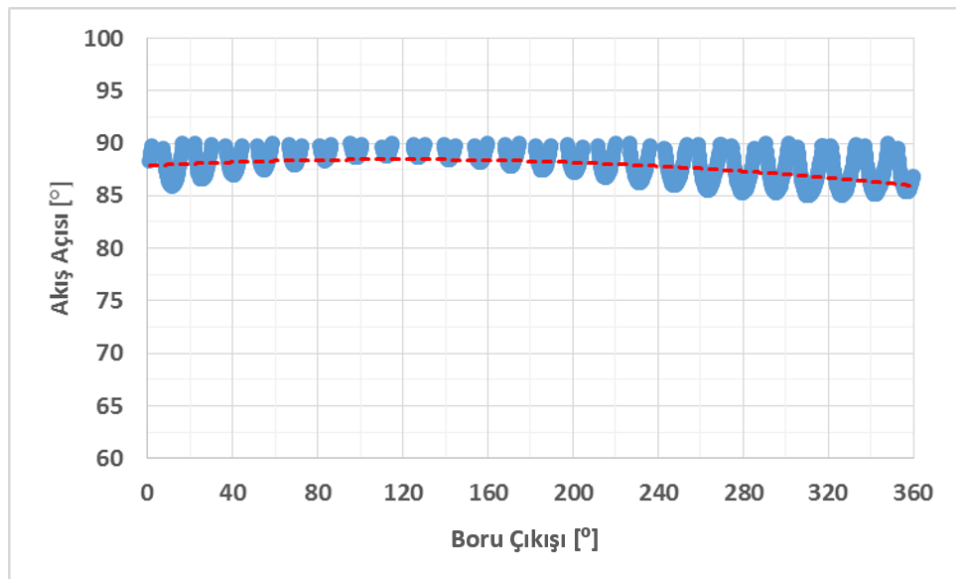
Şekil 3.1 : Türbin orta kesiti için statik basınç dağılımı.

Şekil 3.2'de boru içerisindeki üç boyutlu akış gösterilmiştir. Akım çizgilerinden akışın sabit kanatlar etrafında hızlandığı görülmektedir. Emme borusunun yerleşiminden dolayı akışta düzensizlikler oluşsa da bu düzensiz yapı sabit kanatlara doğru akış alanının daralan kesiti sayesinde tekrar düzenli bir yapıya kavuşmaktadır ve böylelikle debi dağılımındaki düzensizlik önlenmektedir. Kesit göz önünde bulundurulduğunda tüm sabit kanatlar etrafında akışın yaklaşık olarak aynı şekilde hızlandığı görülebilmektedir.



Şekil 3.2 : Boru içerisindeki 3 boyutlu akım çizgileri.

Şekil 3.3'te boru çıkış yüzeyinde akış açısının değerleri verilmiştir. Her bir tepe noktası bir sabit kanada denk gelmektedir. Grafikteki ortalama dağılım çizgisi göz önüne alındığında her bir sabit kanada akışın yaklaşık aynı açıda girdiği anlaşılmaktadır. Bu durum da teğetsel ve radyal hız bileşenlerinde her bir sabit kanat için yaklaşık aynı olduğu sonucunu getirmektedir. Her bir sabit kanattaki hız vektörlerinin aynı olması, her bir sabit kanada giren debinin miktarının da aynı olduğunu göstermektedir. Bunun sonucu olarak çark kanatlarına giren debinin çevresel kesitte eşit olduğunun kanıtıdır. Bu durum türbin çarkının stabil çalışması için yeterlidir.



Şekil 3.3 : Boru çıkış yüzeyinde akış açısı dağılımı.

3.2.2 Sabit Kanat

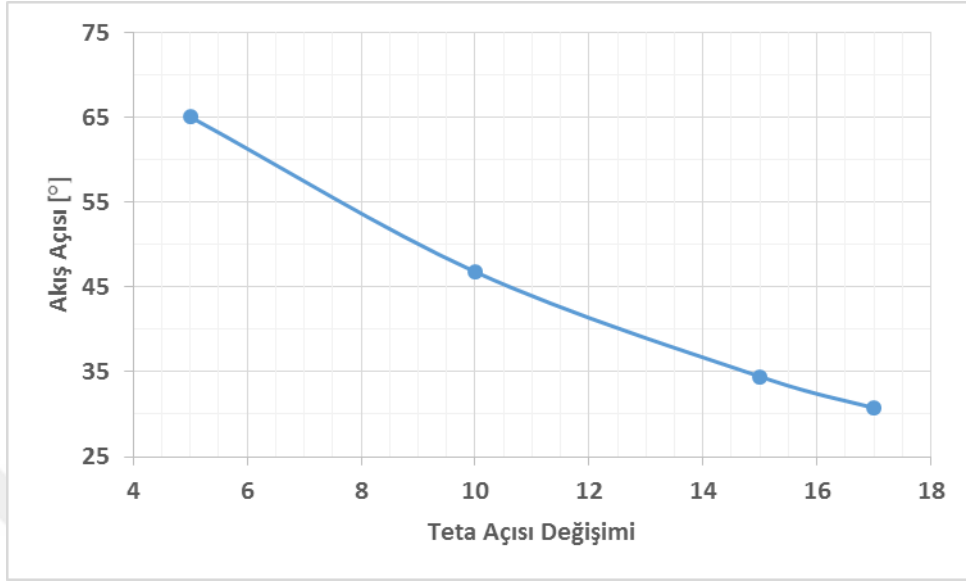
Sabit kanatların asıl görevi salyangoz virollerinin oturduğu hız ringlerine yapısal olarak dayanım sağlamaktır. Bu yüzden kesit alanı belirlenirken maksimum düşüdeki basınca dayanabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Mekanik görevinin yanında geleneksel türbinde salyangozun, boru içerisinde tasarımda ise borunun debiyi eşit bir şekilde dağıtmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca ayar kanatlarına akış açısının istenen değerde girmesini sağlamak da bir diğer görevidir. Sabit kanat tasarımı yapılırken sabit kanat boyu, kesit alanı ve şekli ve konum açısı parametreleri göz önünde bulundurulmuş kriterlerdir. Tüm bunları yaparken minimum düzeyde düşü kaybına sebep olunması gerekmektedir.

Geleneksel tasarımdan farklı olarak boru içerisinde tasarımda akış sabit kanatlara yaklaşık 90°'lik bir açıyla gelmektedir. Geleneksel tasarımda istenen sirkülasyon değerini elde edebilmek için ayar kanatları girişinde akış 30°'lik bir açıya sahiptir. Boru içerisinde tasarımda da bu kriter korunmuştur ve ayar kanatlarına girişte 30°'lik bir akış elde edebilmek için sabit kanat yapısının yeniden tasarlanmıştır. Bunun için sabit kanat boyunca akışı yönlendirmek için teta açısı tanımlanması gerekmektedir. Bununla birlikte kanat boyu artırılmalıdır aksi takdirde kısa bir kanat boyunca akış değişken teta açısı yüzünden kanat yüzeyinden kopacaktır. Geleneksel tasarımda 16 olan sabit kanat sayısını akışın durumuna göre yeniden revize edilmiştir. Son olarak da sabit kanatlara boru içerisinden gelen akış aksel yönlüdür ve bu akış sabit kanatlarda radyal yöne geçiş yapmaktadır. Bu yüzden alt hız ringinin akışla temas eden boyutu da akışın kopmaması için önemli bir etmendir. Bahsedilen tüm bu parametreler boru içerisinde tasarımda göz önünde bulundurulmuştur. HAD analizleri yeni tasarımı son haline gelene kadar tek bir kanat için çözdürülmüştür. Analizlerde giriş sınır koşulu olarak borunun çıkış kesitindeki toplam basınç ve akış açısı, çıkış kesitinde ise debi girdi olarak verilmiştir. Sonuç olarak ise sabit kanat çıkışında ayar kanadı için istenen akış açısı aranmıştır. Tüm bunlarla beraber akışın üniform bir şekilde dağılması ve minimum düzeyde düşü kaybı hedeflenmiştir.

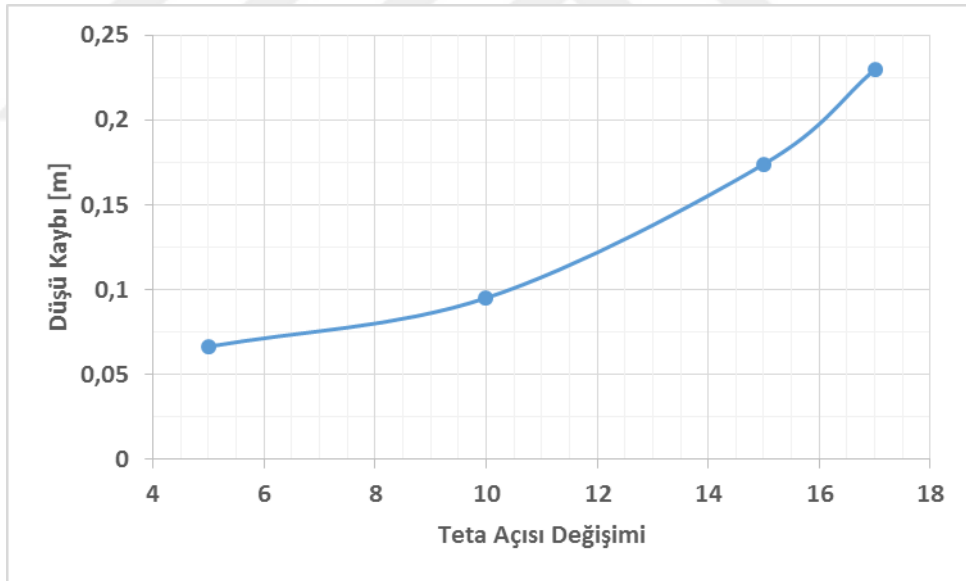
3.2.2.1 Sabit Kanat Teta Açısı ve Kanat Uzunluğunun Performansa Etkisi

Boru içerisinde tasarımda sabit kanatlarda kanat veter hattı üç noktadan teta açısı ile tanımlanmıştır. Kanadın hücum kenarından kuyruk kenarına olan teta açısı değişimi $\Delta teta$ olarak tanımlanmıştır. $\Delta teta$ değeri 5°'den 17°'ye kadar değişimi için

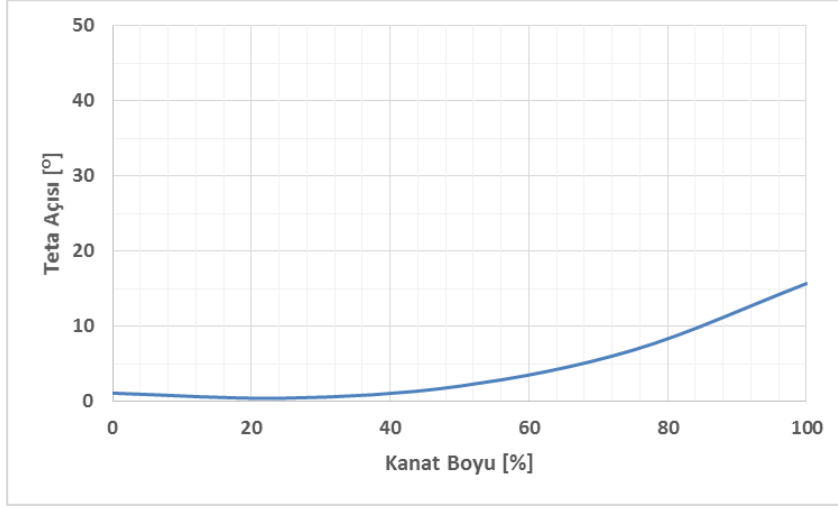
gerçekleştirilen HAD analizi sonuçlarına göre, sabit kanat çıkışında akış açısı ve sabit kanat düşü kaybı grafikleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir. Sonuç olarak elde edilen açı dağılımı ise Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.4 : Sabit kanat için teta açısına bağlı olarak akış açısının değişimi.

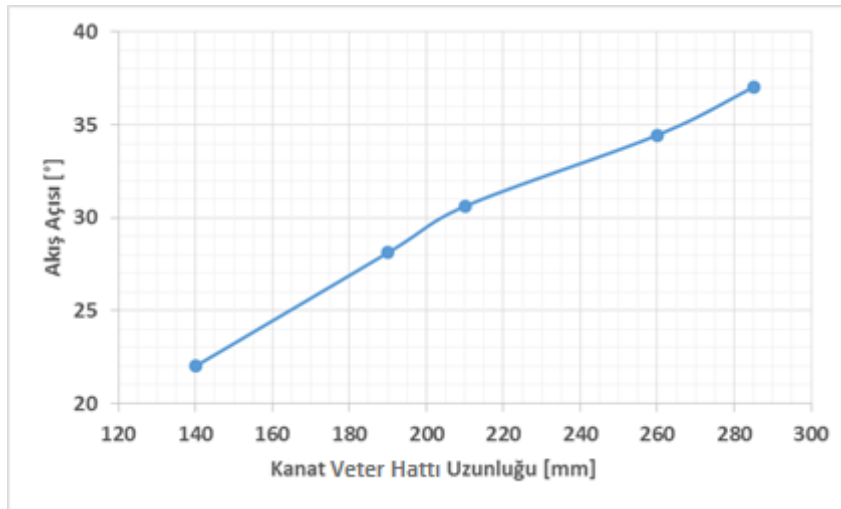


Şekil 3.5 : Sabit kanat için teta açısına bağlı olarak düşü kaybının değişimi.

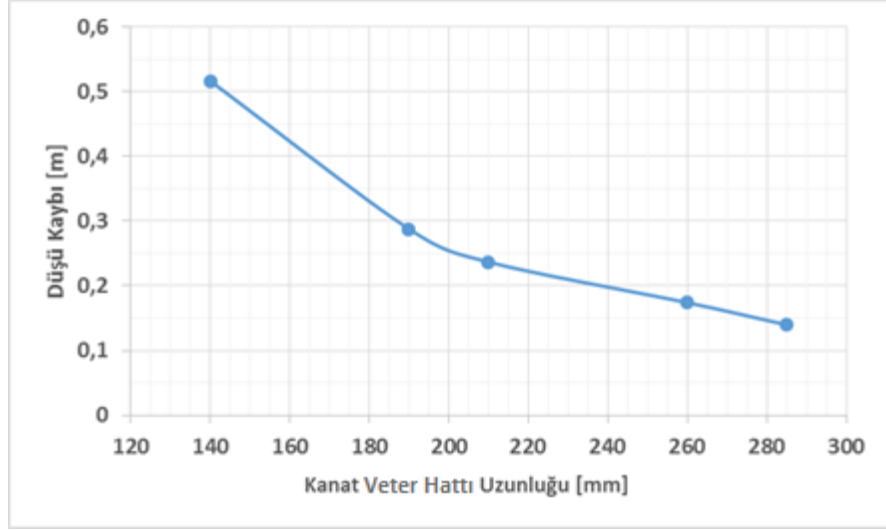


Şekil 3.6 : Sabit kanat teta açısı dağılımı.

Sabit kanat çıkışında akış açısı 30° olması istenmekte ve bu durum gerçekleşirken düşü kaybı da minimum düzeyde olmalıdır. Şekil 3.4'e göre $\Delta teta$ değeri 17° olduğunda çıkış açısı istenen düzeyde olmaktadır ancak Şekil 3.5'ten görüldüğü üzere burada düşü kaybı artmaktadır. Bu yüzden $\Delta teta$ değeri 15° seçilerek tasarımın ilk aşaması tamamlanmıştır. Kanadın hücum kenarından kuyruk kenarına kadar olan kısımdaki kıvrım sebebiyle akış kanat yüzeyini takip edememektedir. Bu sebeple normal tasarımda 120 mm olan kanat uzunluğu, borunun çapı da dikkate alınarak 285 mm'ye kadar çıkarılarak HAD analizleri tekrarlanmıştır. Farklı sabit kanat uzunlukları için yapılan HAD analizi sonuçlarına göre kanat uzunluğunun çıkıştaki akış açısı ve düşü kaybına olan etkisi gözlenmiştir ve bu etkiler Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Sabit kanat veter hattı uzunluğuna bağlı olarak akış açısının değişimi.

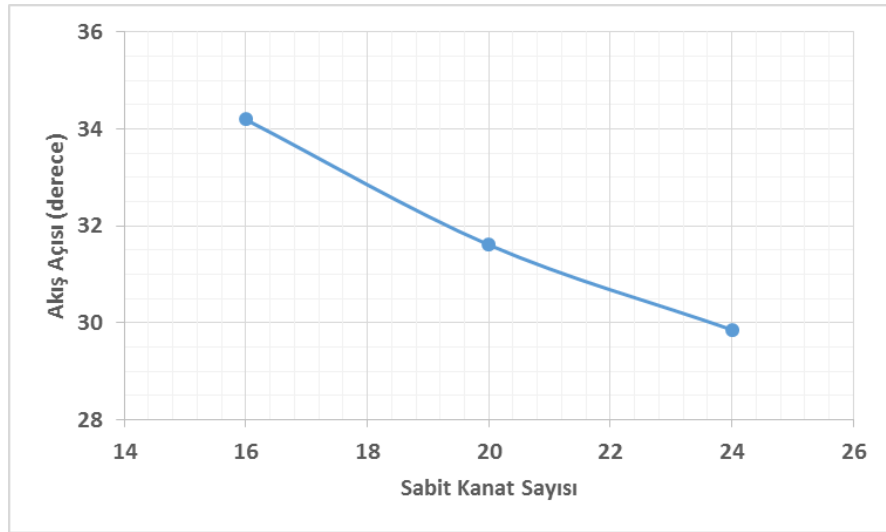


Şekil 3.8 : Sabit kanat uzunluğuna bağlı olarak düşü kaybı değişimi.

Şekil 3.7'ye göre sabit kanat veter hattı uzunluğu 200 mm olduğunda çıkıştaki akış açısı istenen düzeyde olmakta ancak Şekil 3.8'e göre bu durumda düşü kaybı yüksek olmaktadır. Her iki grafiğe göre veter hattı uzunluğu 260 mm olacak şekilde seçilmiş ve çıkıştaki akış açısını yakalamak için tasarımın bir sonraki aşamasına geçilmiştir.

3.2.2.2 Sabit Kanat Sayısının Performansa Etkisi

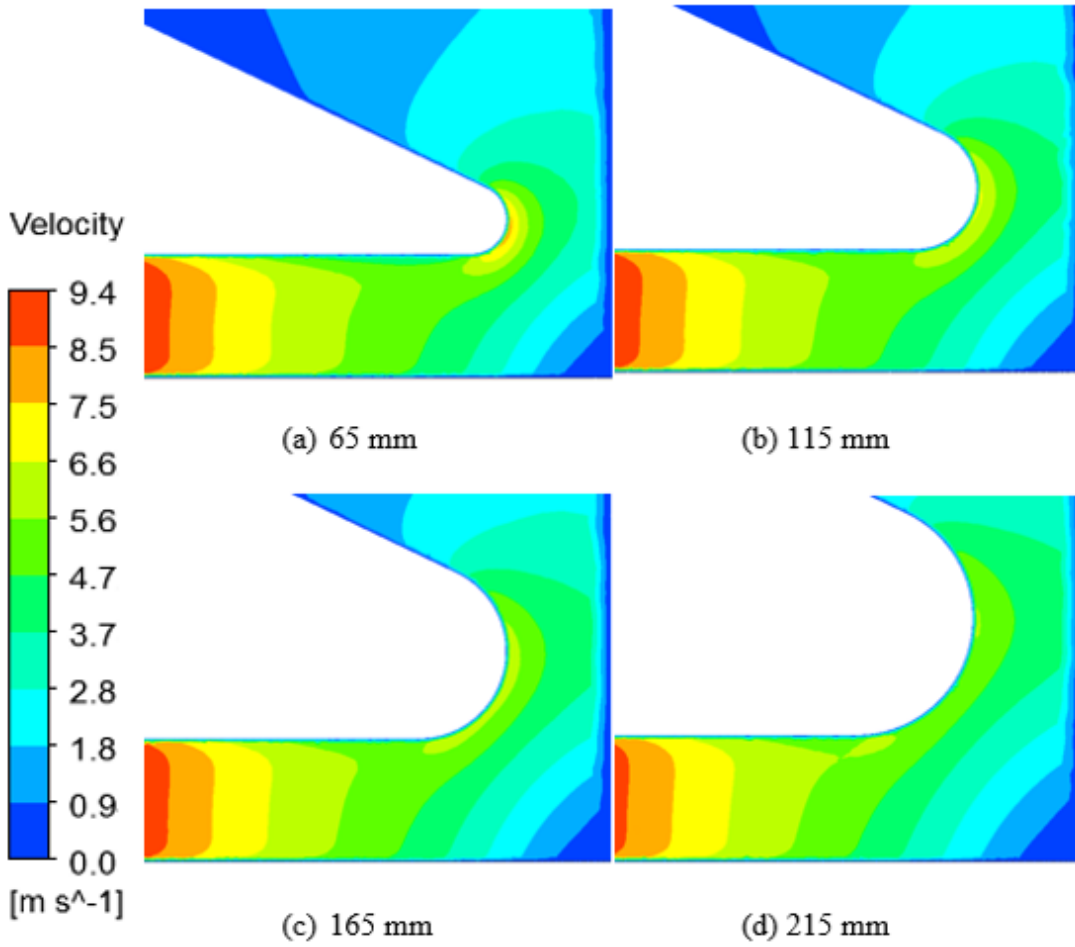
Akışın veriminin maksimum ve düşü kaybının minimum olduğu durumlar için sabit kanat sayısı artırılmış ve sonuçları gözlenmiştir. Buna göre kanat sayısı 16, 20 ve 24 için yapılan HAD analizi sonuçlarına göre sabit kanat çıkış kesiti için akış açısı değişimi Şekil 3.9'da verilmiştir. Buna göre kanat sayısı 24 olduğu durum için istenen kriter olan çıkış kesitinde akış açısı 30° sağlanmıştır.



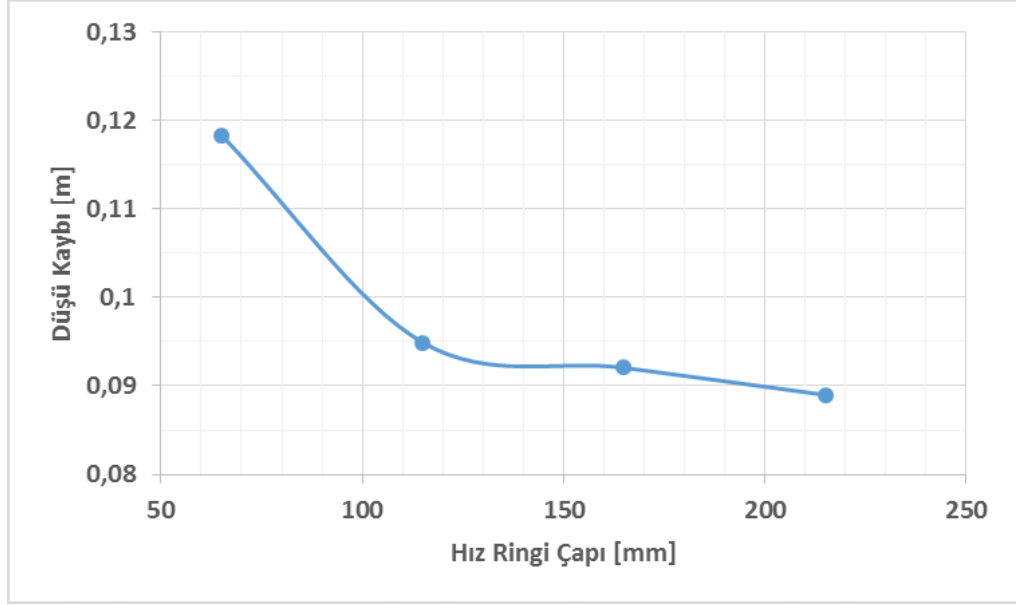
Şekil 3.9 : Sabit kanat sayısına bağlı olarak akış açısının değişimi.

3.2.2.3 Hız Ringi Çapının Performansa Etkisi

Akış borudan sabit kanatlara girerken aksenal yönden radyal yöne doğru yaklaşık 90° dönmektedir. Bu esnada akış alt hız ringinin yüzeyini takip etmektedir. Bu sebeple burada akışta oluşabilecek kopmalar düşü kaybına ve verimde düşmelere sebep olabilmektedir. Bu etkiyi gözlemek için hız ringi çapı 65 mm'den sırasıyla 115 mm, 165 mm ve 215 mm'ye kadar çıkarılmış ve etkileri HAD analizleri yardımıyla gözlenmiştir. Şekil 3.10'da farklı çaplar için hız dağılımı ve Şekil 3.11'de de farklı çaplar için düşü kaybı verilmiştir.



Şekil 3.10 : Farklı hız ringi çapları için hız dağılımları.



Şekil 3.11 : Farklı hız ringi çaplarına göre düşü kaybının değişimi.

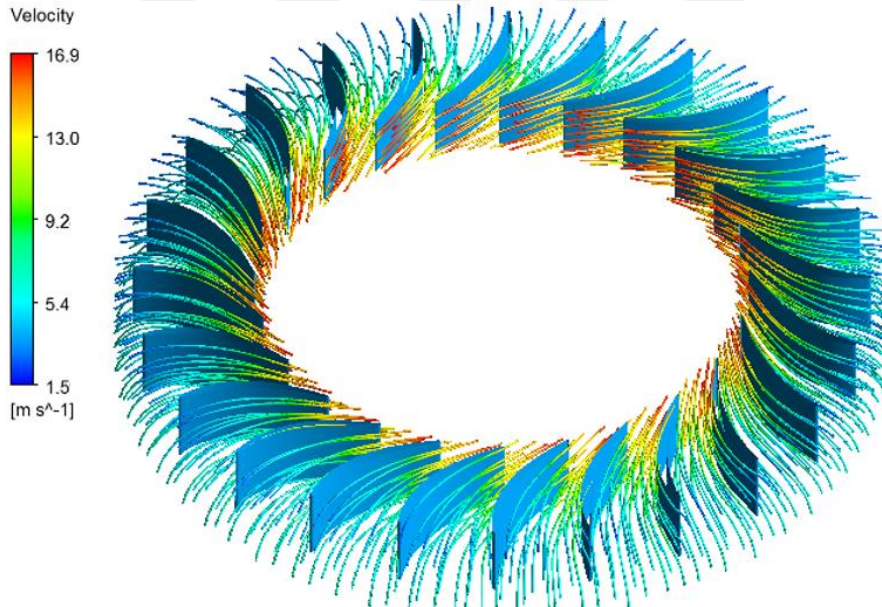
Şekil 3.10'daki hız dağılımları gözlemlendiğinde, 65 mm ve 115 mm çapa sahip durumlarda akış profili takip edemeyip yüzeyden ayrıldığı ve bu bölgelerde lokal olarak hızların yükseldiği görülmektedir. 165 mm ve 215 mm'lik durumlar ise hız profilleri açısından yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Şekil 3.11'de ise 65mm'lik çap için diğer üç çapa göre çok daha yüksek düşü kaybına sebep olduğu görülmektedir. Çap arttıkça düşü kaybının azaldığı gözlenmekte ancak 165 mm'lik çaptan sonra önemli düzeyde bir gelişme görülmemektedir. Bu sebeplerden dolayı hız ringi çapı olarak 165 mm seçilmiştir.

Çizelge 3.3'te sabit kanatlara ait giriş, hücum kenarı, kuyruk kenarı ve çıkış kesitlerinde alan ortalaması alınarak hesaplanan sonuçlar verilmiştir. Sabit kanat tasarımında sabit kanat veter hattı boyunca teta açısı değiştirilerek kanada kıvrım verilmiştir. Sabit kanat uzunluğu 260 mm'ye çıkarılmıştır. Sabit kanat sayısı 24'e yükseltilmiştir. Akışın takip ettiği hız ringinin çapı da 165 mm olarak belirlenmiştir. Akış, sabit kanatlar çıkışında, ayar kanadı girişi için gerekli olan 30°'lik açıya sahip olduğu görülmektedir. Tüm türbin HAD analizleri sonucu sabit kanat çıkış ve giriş kesitleri arasında 0.33 m düşü kaybı hesaplanmıştır. Toplam basınç cinsinden hidrolik verim ise % 99.6 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.3 : Boru içerisinde tasarım sabit kanat kesit alanları için HAD analizi sonuçları.

	Giriş	HK Kesiti	KK Kesiti	Çıkış
P_s [Pa]	854031	854256	751498	746073
P_t [Pa]	866088	866075	863537	862843
V_r [m/s]	4,6	4,7	7,4	7,4
V_u [m/s]	0,0	0,0	12,7	13,3
V [m/s]	4,7	4,7	14,7	15,2
α [derece]	90,0	89,0	30,4	29,4

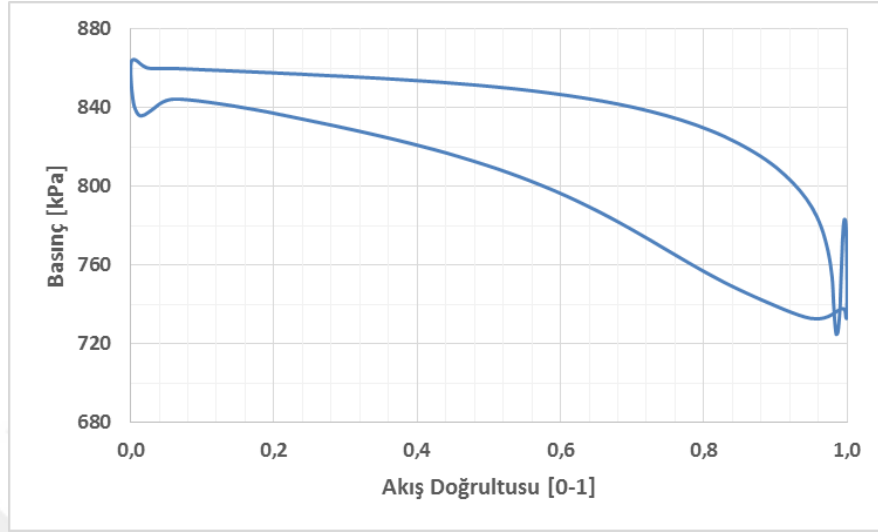
Sabit kanatlar arasında meydana gelen akım çizgileri Şekil 3.12’de verilmiştir. Akış herhangi bir kopma olmadan, sabit kanatların yüzeyini takip ederek ayar kanadı girişine doğru ilerlemektedir. Akım çizgilerinin tüm sabit kanatlar etrafında yaklaşık olarak aynı yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12 : Sabit kanatlar etrafında oluşan üç boyutlu akım çizgileri.

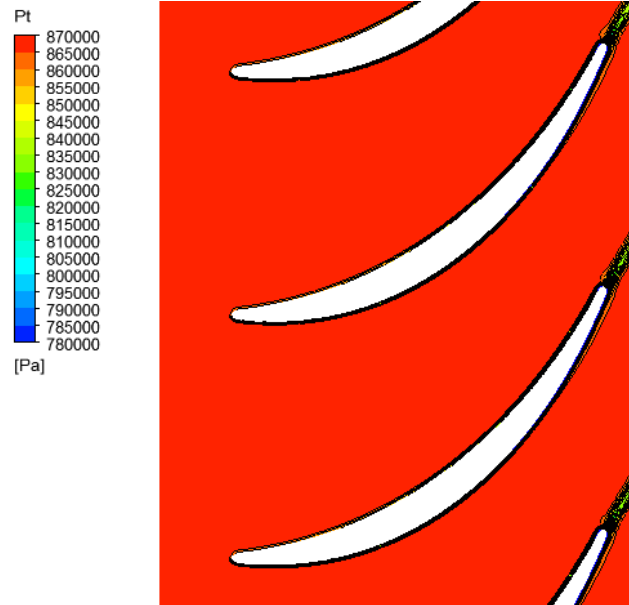
Şekil 3.13’de sabit kanatlar üzerinde oluşan basınç yüklemeleri verilmiştir. Her bir çizgi bir sabit kanada denk gelmektedir. Tüm çizgilerin yaklaşık olarak aynı değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum da borudan gelen akışın sabit kanatlara eşit debi ve eş akış koşullarında girdiğinin kanıtı olarak gösterilebilir. Mevcut tasarımda kanadın hücum kenarı emme tarafında meydana gelen basınç düşmelerinin yeni tasarımda oluşmadığı görülmektedir. Basınç yüklemeleri beklenildiği üzere kanadın hücum kenarından kuyruk kenarına doğru yaklaşık lineer olarak

azalmaktadır. Bu da akışın sabit kanat boyunca düzgün bir şekilde hızlanarak ayar kanatlarına doğru gittiğinin göstergesidir. Kanat üzerinde basınç kayıplarının olmaması, hidrolik kayıpların da azalmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.13 : Sabit kanatlar etrafında meydana gelen basınç yüklemeleri.

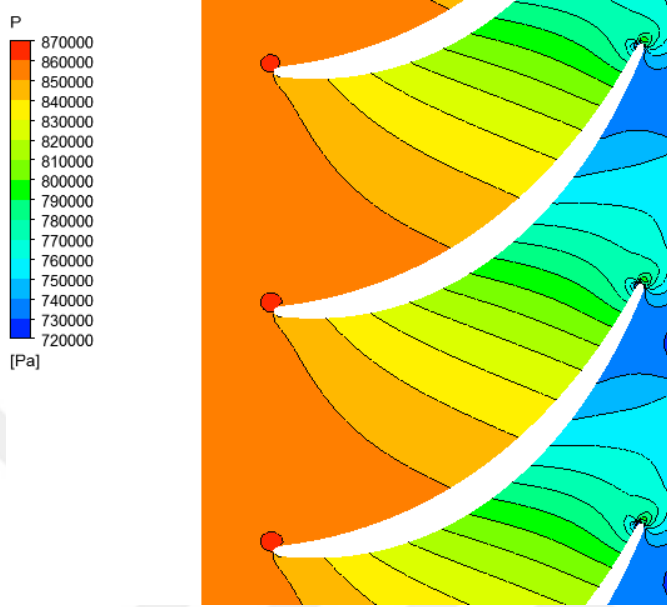
Şekil 3.14'te sabit kanatlar orta düzlemi üzerinde toplam basınç dağılımı verilmiştir. Sabit kanatlar girişinden çıkışına kadar toplam basınç yaklaşık eşit kalmıştır. Sadece kuyruk kenarı sonrasında bir iz bölgesi oluşmaktadır. Sabit kanatlarda düşü kaybı genellikle bu iz bölgesi sebebiyle oluşmaktadır.



Şekil 3.14 : Sabit kanatlar etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.

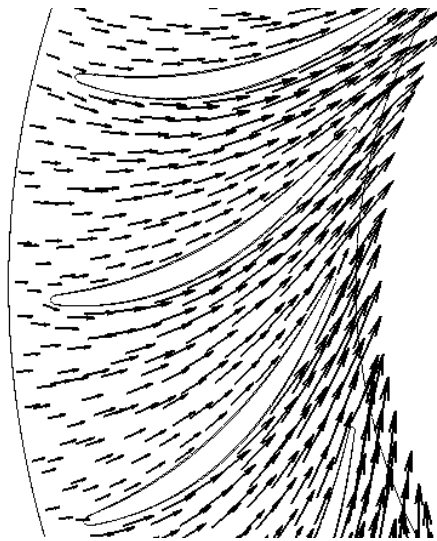
Şekil 3.15'te sabit kanatlar orta düzlemi üzerindeki statik basınç dağılımı verilmiştir. Tüm sabit kanatlarda durma noktası istenildiği üzere kanat hücum kenarı üzerinde

yer almaktadır. Akış da girişten çıkışa doğru hızlanmakta ve bu da kanat hücum kenarından kuyruk kenarına doğru kanat üzerinde basıncın düştüğünü göstermektedir. Tüm sabit kanatlar arasında oluşan basınç dağılımı eş bir şekilde birbirleriyle benzerlik göstermektedir.



Şekil 3.15 : Sabit kanatlar etrafında oluşan statik basınç dağılımı.

Sabit kanatlar orta düzlem üzerindeki hız dağılımı Şekil 3.16'da verilmiştir. Akış, kanat profilini takip etmekte ve hücum kenarından kuyruk kenarına doğru eş bir şekilde hızlanmaktadır. Borudan gelen akış sabit kanatların hücum kenarına dik bir şekilde çarpmakta ve durma noktası beklenildiği üzere kanat ucunda oluşmuştur.



Şekil 3.16 : Sabit kanatlar etrafında meydana gelen hız vektörleri.

3.2.3 Ayar Kanadı

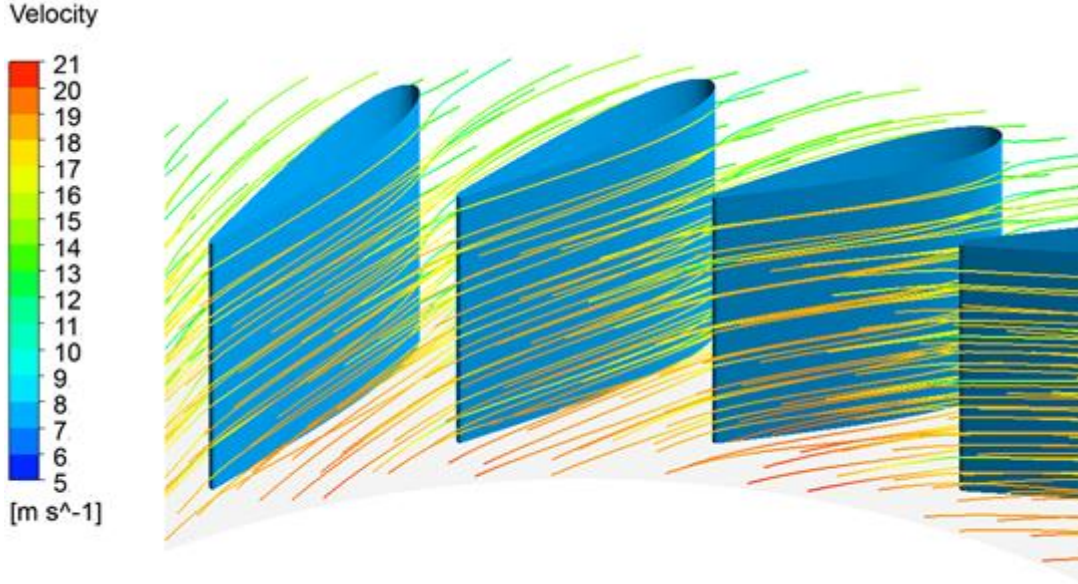
Ayar kanatları türbinin ürettiği gücün kontrol edilmesini sağlayan en önemli parçalardır. Ayar kanatları kendi eksenleri etraflarında dönerek türbinden geçen debiyi kontrol etmeyi sağlamaktadır. Değişen düşü ve debi aralıklarında ayar kanatları açıklığı ayarlanarak türbinin en yüksek verimde çalışması sağlanır. Türbinin tasarlandığı debi ve düşü değerlerindedeki çalışmasını sağlayan ayar kanadı açıklığına optimum açıklık adı verilmektedir. Ayar kanadı tasarımında istenen en önemli kriter türbin çarkına giren suyun akış açısıdır. Ayar kanatları optimum açıklığında çark için gereken akış açısını sağlamaktadır. Diğer bir önemli kriter ise ayar kanadı boyunca minimum düşü kaybına sebep olmaktır.

Geleneksel tasarımda oluşan hidrolik kaybı azaltmak adına boru içerisinde tasarımda kanat kalınlığı dağılımı için NACA0016 tercih edilmiştir. Çizelge 3.4'te ayar kanatlarına ait giriş, hücum kenarı, kuyruk kenarı ve çıkış kesitlerinde alan ortalaması alınarak hesaplanan sonuçlar verilmiştir. Tasarımın ilk aşamasında tek ayar kanadı için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sabit kanat çıkışındaki toplam basınç değeri ve akış açısı giriş koşulu olarak verilmiştir. Çark kanadı için istenen akış açısına ulaşıldığında tasarım tamamlanmıştır. Verilen sonuçlar ise tüm türbin için yapılan HAD analizlerinin ayar kanatları için olan sonuçlar verilmiştir. Tek ayar kanadıyla yapılan HAD analizleriyle aynı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Çıkış ve giriş kesitleri arasında 0.78 m düşü kaybı hesaplanmıştır. Toplam basınç cinsinden hidrolik verim ise % 99.0 olarak hesaplanmıştır. Geleneksel tasarımdaki ayar kanatlarına göre daha az düşü kaybı ve verimin daha yüksek olması sağlanmıştır.

Çizelge 3.4 : Boru içerisinde tasarım ayar kanadı kesit alanları için HAD analizi sonuçları.

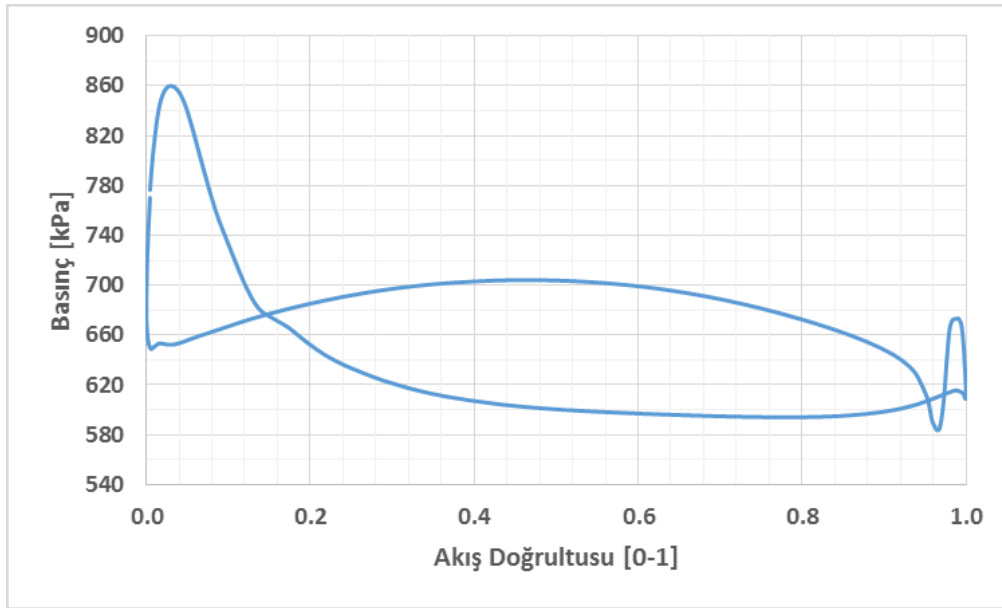
	Giriş	HK Kesiti	KK Kesiti	Çıkış
P_s [Pa]	746182	732198	612947	585766
P_t [Pa]	862835	862262	856580	855145
V_r [m/s]	7,4	8,1	9,2	9,7
V_u [m/s]	13,3	13,5	19,4	21,0
V [m/s]	15,2	15,8	21,5	23,2
α [derece]	29,4	37,8	25,8	24,5

Ayar kanatları etrafında meydana gelen 3 boyutlu akım çizgileri Şekil 3.17’de verilmiştir. Akım çizgilerinin herhangi bir düzensizlik ve kopma olmadan ayar kanat yüzeylerini takip etmekte olduğu görülmektedir.



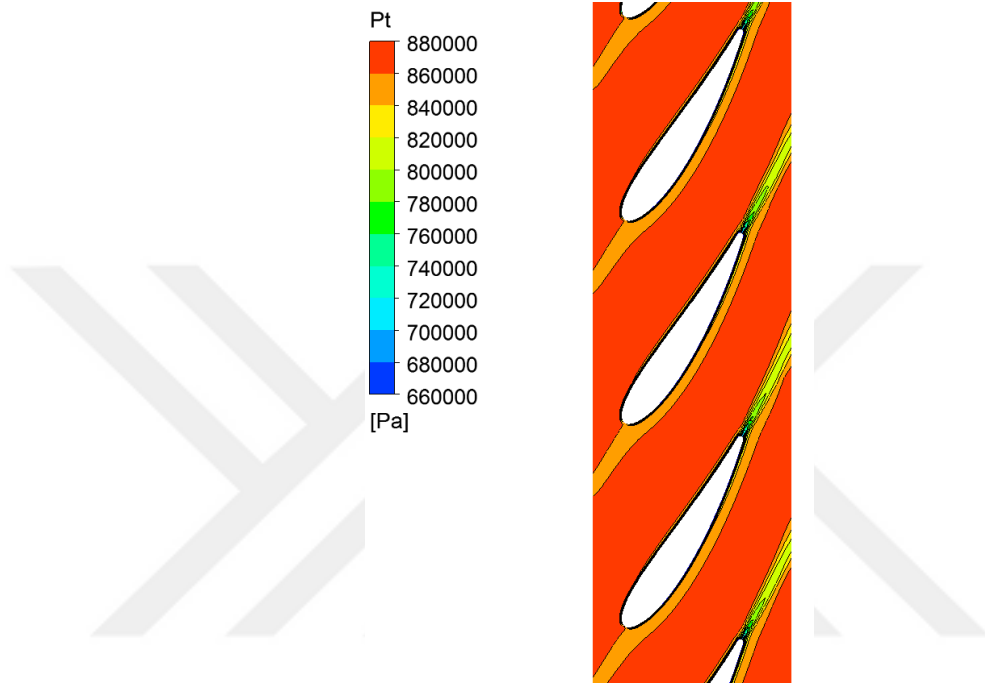
Şekil 3.17 : Ayar kanatları etrafında meydana gelen 3 boyutlu akım çizgileri.

Şekil 3.18’de ayar kanadı üzerinde meydana gelen basınç yüklemeleri verilmiştir. Basınç yüklemesinin beklendiği gibi olduğu belirtilebilir.



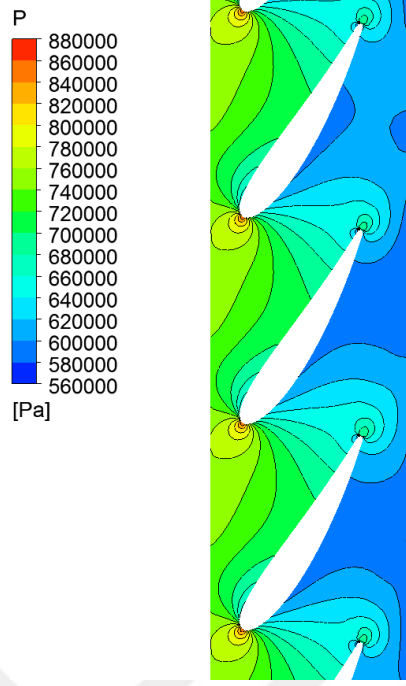
Şekil 3.18 : Ayar kanatları üzerinde meydana gelen basınç yüklemeleri.

Şekil 3.19’da ayar kanadı orta kesiti üzerinde toplam basınç dağılımı verilmiştir. Ayar kanadı akış alanında görülen düşük basınç bölgeleri, sabit kanatların iz bölgesinden dolayı kaynaklanmaktadır. Sabit kanat kaynaklı olan bu iz bölgeleri, normal tasarıma göre daha düşük olduğu görülebilmektedir. Ayrıca ayar kanadı kuyruk kenarı sonrasında oluşan iz bölgesi de görülebilmektedir. Bu iz bölgelerinde oluşan basınç düşümleri hidrolik kayıpların sebebi olarak gösterilebilir.



Şekil 3.19 : Ayar kanatları etrafında meydana gelen toplam basınç dağılımı.

Şekil 3.20’de verilen statik basınç dağılımı incelendiğinde akışın kanadın hücum kenarından kuyruk kenarına doğru hızlandığı görülmektedir. Statik basınç kanatlar arasında hücum kenarından kuyruk kenarına doğru yaklaşık eş bir şekilde azalmaktadır bu da akış alanında akışın düzgün bir şekilde hızlandığının göstergesidir. Durma noktasının kanat hücum kenarında olduğu görülmektedir bu da ayar kanadına akışın tasarlandığı açıda girdiğinin göstergesidir. Özellikle hız vektörleri incelendiğinde akışın kopmaya uğramadan kanat profilini takip ettiği görülmektedir.



Şekil 3.20 : Ayar kanatları etrafında meydana gelen statik basınç dağılımı.

3.2.4 Çark

Boru içerisinde tasarımda da aynı türbin çarkı kullanılmıştır. Ancak salyangoz ve borunun farklı tasarım yapıları sebebiyle türbin çarkına giren suyun basınç değerleri ve akış yapısı farklılık göstermekte, özellikle boru içerisinde tasarımda su daha yüksek statik basınç değerlerinde ve daha fazla debi miktarında çarka girmektedir. Bu sebeple güç ve verimde normal tasarıma göre bir artış görülmektedir.

Çizelge 3.5'te boru içerisinde tasarım için çarkın performans değerleri verilmiştir. Çarkın giriş – çıkış kesiti boyunca 75.03 m düşü farkı elde edilmiştir. Çarka giren debi 2.188 m³/s olarak hesaplanmıştır. Çark verimi %96.09 olarak elde edilmiştir ve şaft gücü 1.5395 MW olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5 : Boru içerisinde tasarım çark için HAD analizi performans sonuçları.

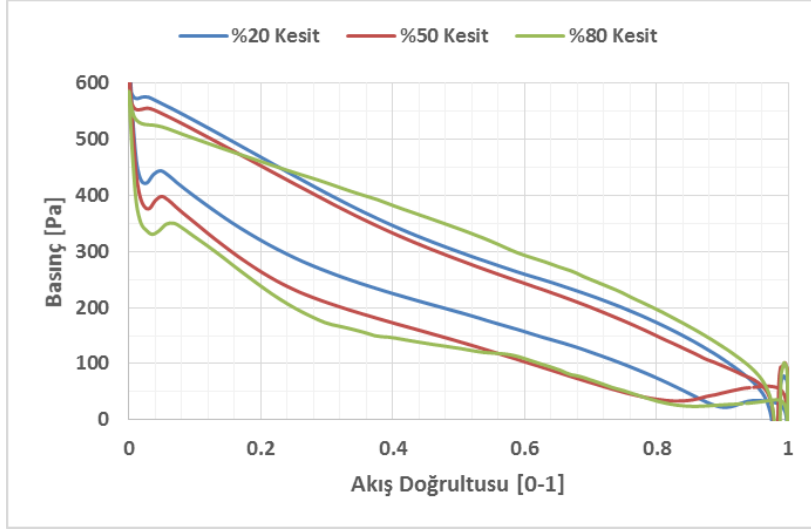
Dönüş Hızı [rad/s]	104.72
Hacimsel Debi [m³/s]	2,188
Düşü (HK – KK) [m]	76,08
Düşü (Giriş – Çıkış) [m]	75,03
Şaft Gücü [kW]	1539.47
Verim [%]	96.09

Çizelge 3.6'da çark kanatlarına ait giriş, hücum kenarı, kuyruk kenarı ve çıkış kesitlerinde alan ortalaması alınarak hesaplanan sonuçlar verilmiştir. Ayar kanatlarından çıkan akış çark kanatlarına 24.4°'lik bir açıyla girmektedir. Akış çarktan 99.6°'lik bir açıyla çıkmaktadır, neredeyse dik olarak çıkan akış çıkış kesitinde sirkülasyon değerinin sıfıra yakın olduğunu göstermektedir. Giriş ve çıkış kesitlerindeki açı ve hız değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanan sirkülasyon değeri, projenin isteri olan güç değerini yaklaşık %10'luk bir artışla sağlamaktadır.

Çizelge 3.6 : Boru içerisinde tasarım çark kanadı kesit alanları için HAD analizi sonuçları.

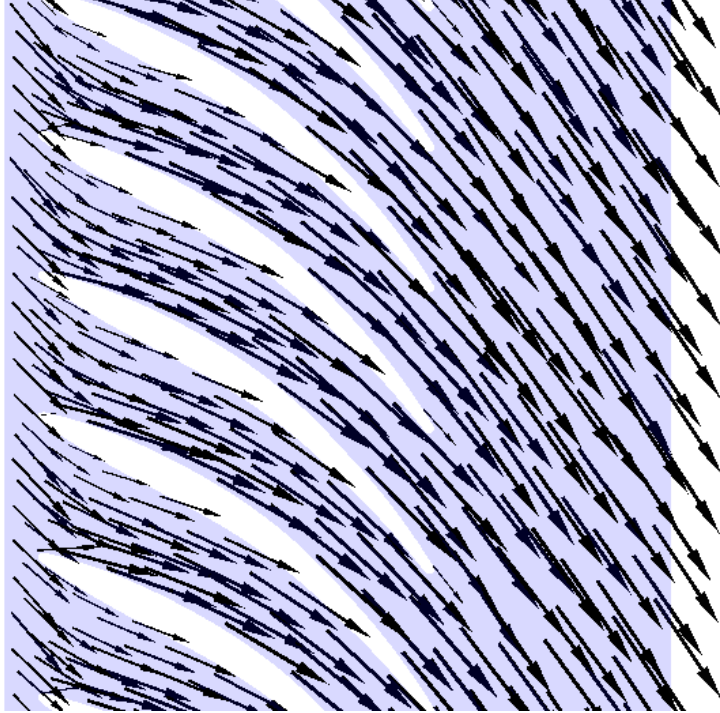
	Giriş	HK Kesiti	KK Kesiti	Çıkış
Ps [Pa]	586172	538230	179320	51082
Pt [Pa]	857114	852811	108987	123566
U [m/s]	32,5	30,0	21,8	18,7
Vr [m/s]	9,8	10,2	11,1	10,4
Vu [m/s]	21,1	22,7	42,8	16,8
V [m/s]	23,3	25,0	15,3	10,7
α [derece]	24,4	24,1	81,2	99,6
Wu [m/s]	11,3	73,1	17,5	20,4
W [m/s]	15,0	13,0	20,9	23,0
β [derece]	40,4	54,5	33,1	24,3

Çark kanatları üzerinde oluşan basınç yüklemeleri yüzde 20'lik yüzde 50'lik ve yüzde 80'lik kesit için Şekil 3.21'de verilmiştir. Tüm kesitler için minimum basınç değerleri 20 kPa'nın üzerindedir. Tüm kesitlerde kanadın basınç ve emme tarafları arasındaki basınç farkı yaklaşık olarak eşittir ve kanat boyunca basınç düşümü yaklaşık lineer olarak gerçekleşmektedir. Bu durum kanat yüklemeleri için beklenen ve istenen bir durumdur. Kanatlardan elde edilen güç, tüm kanat kesitleri boyunca yaklaşık olarak eşit üretildiği anlamı taşımaktadır.



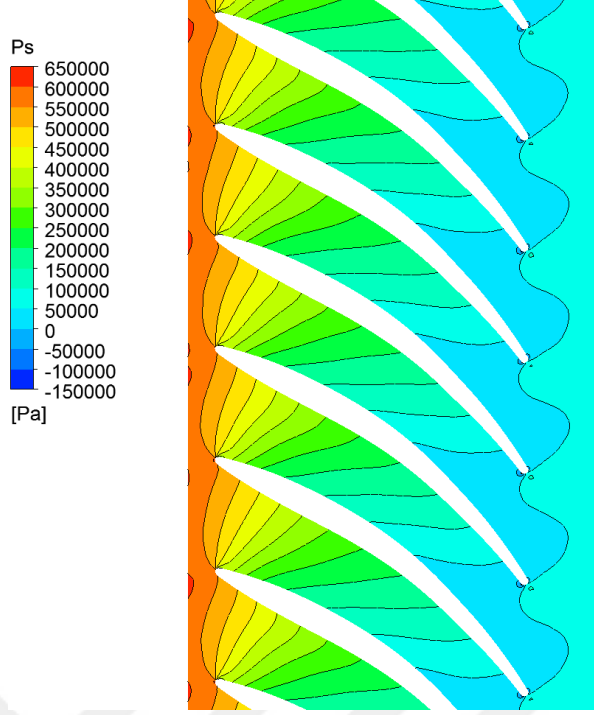
Şekil 3.21 : Yüzde 20, 50 ve 80'lik kesit için çark kanadı üzerindeki basınç yüklemeleri.

Çark kanadı orta düzlem üzerinde oluşan hız dağılımı ve hız vektörleri Şekil 3.22'de verilmiştir. Akışın kanat hücum kenarından kuyruk kenarına doğru kanat yüzeyinden ayrılma ve kopma olmadan ivmelendiği görülmektedir.



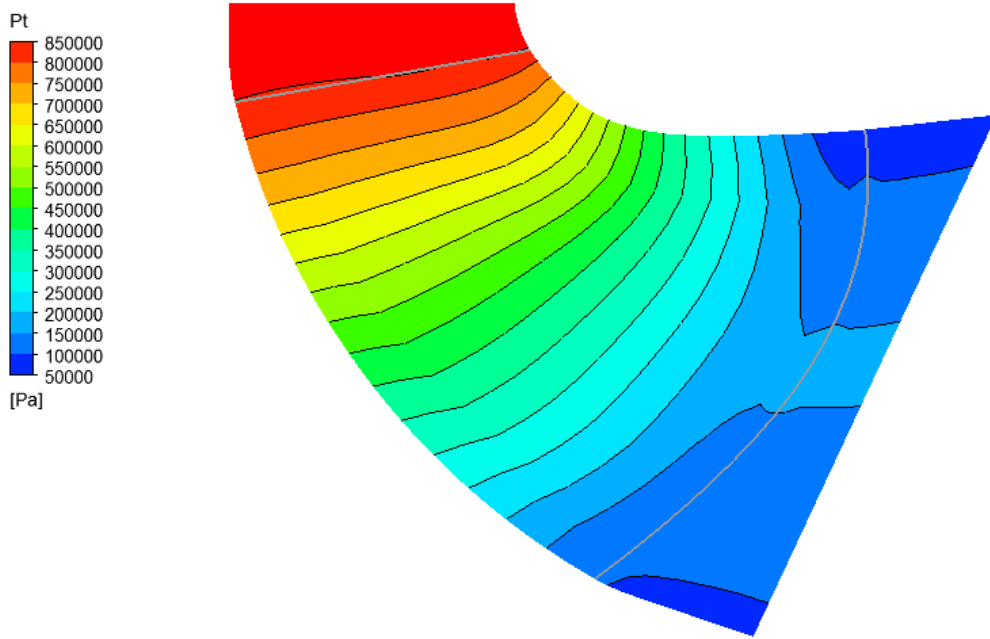
Şekil 3.22 : Çark kanadı orta düzlem için hız dağılımı ve vektörleri.

Çark kanadı orta düzlem için statik basınç dağılımı Şekil 3.23'te verilmiştir. Hız dağılımı ile statik basınç dağılımı beraber düşünüldüğünde, hücum kenarından kuyruk kenarına doğru akış hızlandıkça statik basıncın da bu doğrultuda beklenildiği üzere azaldığı görülmektedir.



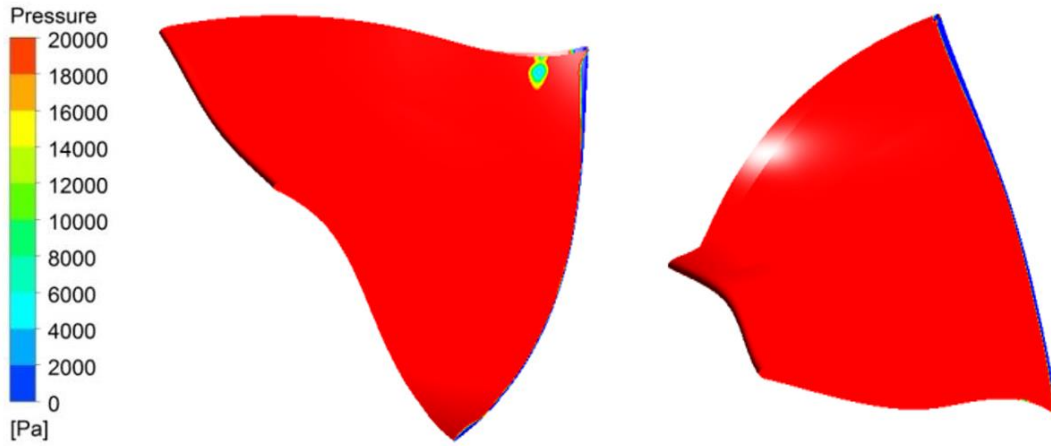
Şekil 3.23 : Çark kanadı orta düzlem için statik basınç dağılımı.

Şekil 3.24'te meridyonel kesit üzerinde toplam basınç dağılımı verilmiştir. Kanat hücum kenarından kuyruk kenarına doğru birbirine eş ve paralel bir şekilde toplam basınç kanat boyunca azalmaktadır. Toplam basınçta oluşan bu düşüş üretilen hidrolik güç ve hidrolik kayıpların temel sebebidir.



Şekil 3.24 : Çark kanadı meridyonel kesit üzerinde toplam basınç dağılımı.

Akışın hızının arttığı bölgelerde statik basınç, suyun buhar basıncının altına düştüğünde kavitasyon durumu gözlenir. Çok sayıda oluşan bu su buharı baloncukları tekrar yüksek basınç bölgesine geldiklerinde patlarlar. Saniyenin çok kısa süresinde defalarca kez meydana gelen bu durum türbinin istenen güçte çalışmamasına ve veriminin düşmesine sebep olur. Ayrıca kanat yüzeyinde meydana gelen baloncukların patlaması olayı türbin parçalarına özellikle de çark kanadına önemli ölçüde zararlar vermekte, kanatların deforme olmasına sebep olmaktadır. Kaviteasyonu gözlemek adına 30° C'daki suyun buhar basıncı değeri olan 4240 Pa baz alınmıştır. Emniyet katsayısı 5 olarak düşünülürse, kanat üzerinde kavitasyon meydana gelmemesi için akışın yaklaşık 20 kPa değerinin üzerinde olması gerekmektedir. Kanat üzerinde statik basınç dağılımı çizdirildiğinde Şekil 3.25'teki dağılım elde edilmektedir. Kuyruk kenarı taç kısmı yakınlarında lokal bir bölge haricinde tüm kanat yüzeyinde basınç değerinin 20 kPa'dan yüksek olduğu görülmektedir. Sadece kuyruk kenarı taç yakınında lokal bir bölgede basınç düşüşü gözlenmektedir. Lokal olarak bu bölgede basınç yaklaşık 15 kPa dolaylarındadır ve bu bölgenin problem teşkil etmeyeceği söylenebilir.



Şekil 3.25 : Çark kanadı üzerinde statik basınç dağılımı.

3.2.5 Emme Borusu

Emme borusu çark çıkışındaki suyun kuyruk suyuna aktarılmasını sağlar. Çark çıkışında atmosferik basıncın altında bir basınca sahip olan akışın hızını düşürerek basıncını atmosferik basınca çıkarılmasını sağlar. Emme borusu tasarımında akışın duvarları ve dirseği takip edebilmesi için çark çıkışından bir açıyla gelmesi istenir.

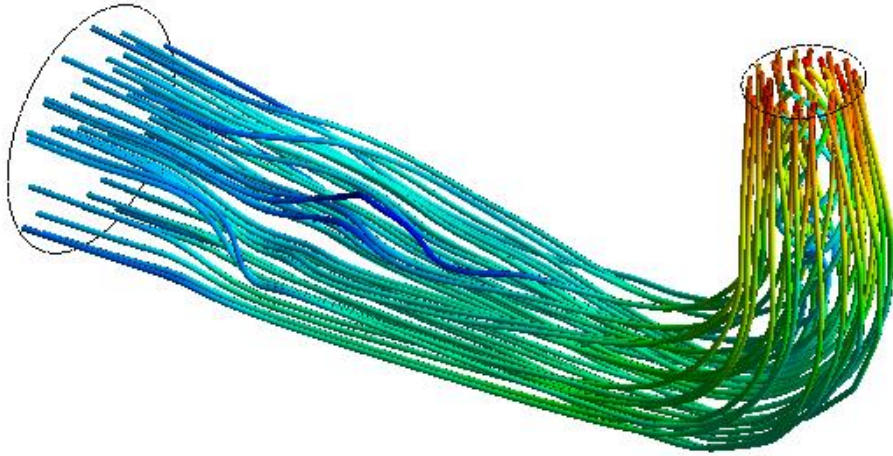
İyi tasarlanmış bir emme borusunda geri kazanım katsayısının 0.8'den yüksek olması beklenmektedir.

Çizelge 3.7'de emme borusu giriş ve çıkış kesitlerinde hesaplanan toplam ve statik basınç, alan ortalamasında hesaplanan hızlar, kesit alanları, düşü değeri, toplam kayıp, geri kazanım katsayısı ve toplam basınç cinsinden hesaplanan hidrolik verim verilmiştir. Girişte atmosferik basıncın altında olan statik basınç, çıkış kesitinde atmosferik basınca yükselmektedir. Emme borusu içerisinde 0.80 m hidrolik kayıp meydana gelmektedir. Giriş ve çıkış kesitindeki ortalama hız değerleri ve toplam basınçlar kullanılarak hesaplanan geri kazanım katsayısı 0.82 olarak hesaplanmıştır. Toplam basınçlar cinsinden hesaplanan hidrolik verim ise %98.98 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.7 : Boru içerisinde tasarım emme borusu kesit alanları için HAD analizi sonuçları.

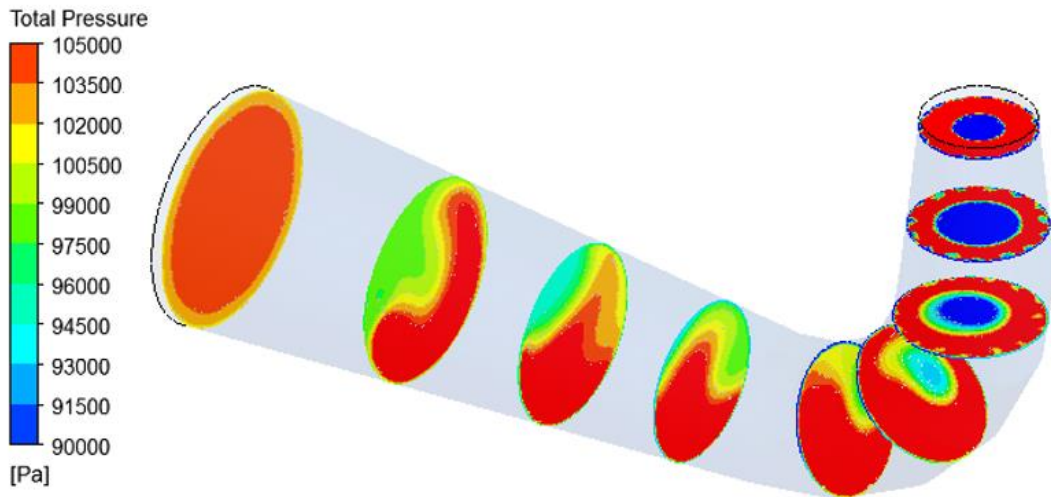
	Giriş	Çıkış
P_t [Pa]	111684	103880
P_s [Pa]	50769	101325
V [m/s]	10,6	2,2
A [m²]	0.2206	0.9810
Toplam Düşü [m]	11,4	10,6
Düşü Kaybı [m]	0.80	
Geri Kazanım Katsayısı	0.82	
Verim [%]	98.98	

Emme borusu içerisinde meydana gelen 3 boyutlu akım çizgileri Şekil 3.26'da verilmiştir. Çark çıkışında 99.3387°'lik açıyla çıkan akış, eksenler düzenlendiğinde emme borusuna 9.3387°'lik bir açıyla girdiği görülmektedir. Bu açı sayesinde akış bir çevrime sahip olur ve özellikle dirsek bölgesinde kopma yaşamadan emme borusu duvarlarını rahatlıkla takip edebilmektedir.

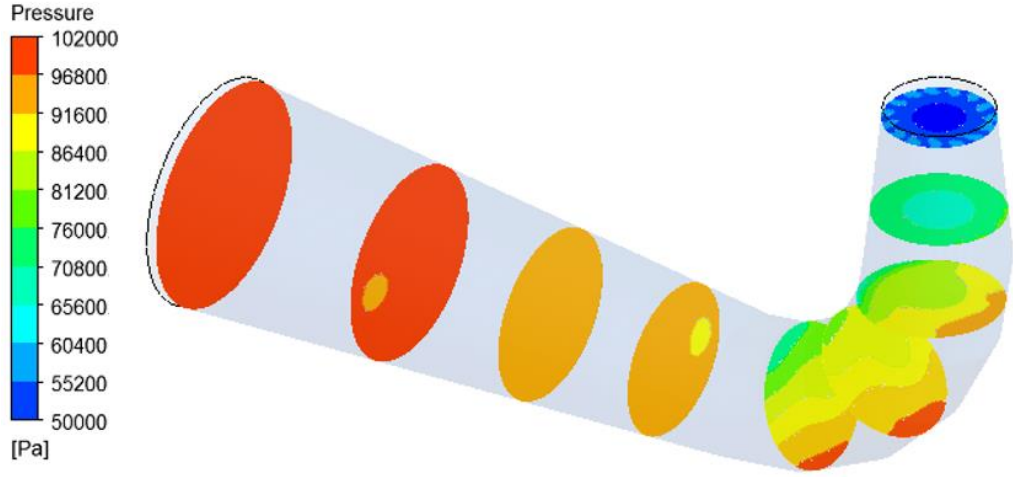


Şekil 3.26 : Emme borusu içerisinde oluşan 3 boyutlu akım çizgileri.

Emme borusu akış doğrultusu boyunca alınan farklı düzlemler için oluşturulan toplam basınç dağılımı Şekil 3.27’de, aynı düzlemler üzerinde oluşturulan statik basınç dağılımı ise Şekil 3.28’de verilmiştir. Şekil 3.27’den hidrolik kayıpların özellikle çark çıkışındaki vorteks sebebiyle ve dirsekten sonra üst duvar kenarında akıştaki düzensizlik sebebiyle oluştuğu görülmektedir. Şekil 3.28’den ise statik basıncın emme borusu girişinden çıkışına doğru atmosferik basınç değerine kadar yükseldiği görülmektedir.

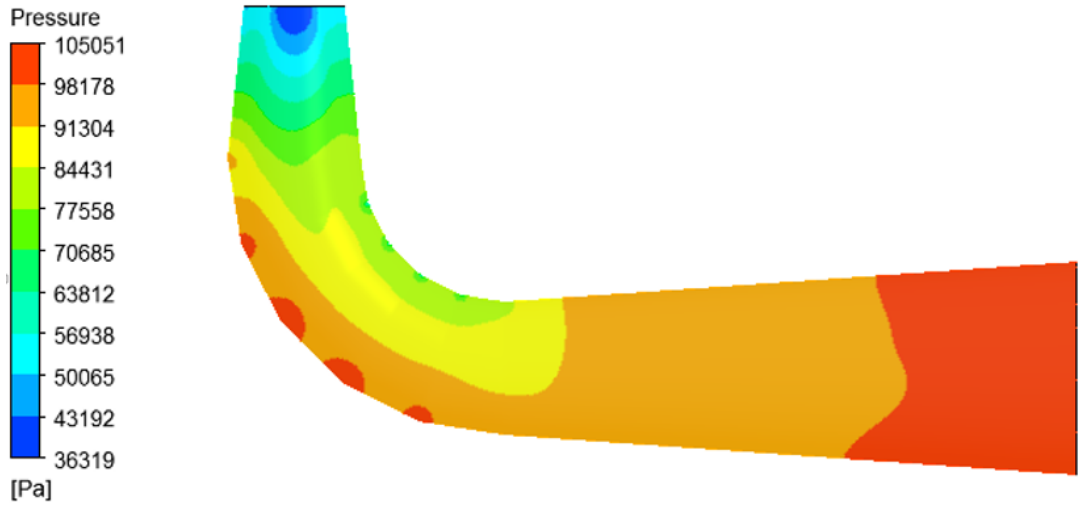


Şekil 3.27 : Emme borusu akış yönü boyunca toplam basınç dağılımı.

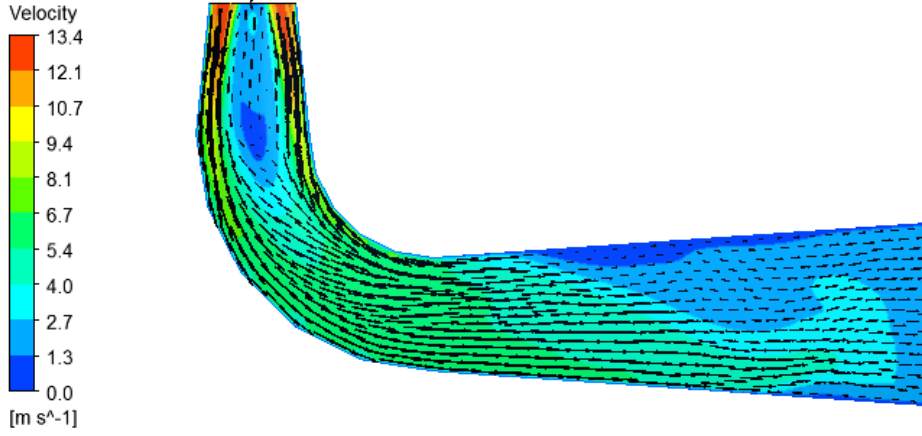


Şekil 3.28 : Emme borusu akış yönü boyunca statik basınç dağılımı.

Emme borusu orta düzlemi üzerinde oluşturulan statik basınç dağılımı Şekil 3.29’da, aynı düzlem üzerinde oluşturulan hız dağılımı ve vektörleri ise Şekil 3.30’da verilmiştir. Çark çıkışında atmosferik basıncın altında olan statik basıncın emme borusu girişinden çıkışına doğru atmosferik basınca doğru arttığı görülmektedir. Şekil 3.30’da verilen hız dağılımı da statik basınç dağılımını doğrular bir şekilde olduğu görülmektedir. Akış çark çıkışında yüksek bir hıza sahiptir ve emme borusu kesitinin genişlemesiyle akış yavaşlamaktadır. Özellikle çark çıkışında akışın daha hızlı olması sebebiyle, emme borusu çıkışında oluşan vorteksin akışta yarattığı düzensizlik ve oluşan hidrolik kayıpları açıklar bir nitelikte olduğu görülmektedir. Akış bu düzensizlik haricinde özellikle dirsek bölgesinde herhangi bir kopma yaşamadan duvarları takip etmektedir.



Şekil 3.29 : Emme borusu orta düzlem üzerinde statik basınç dağılımı.

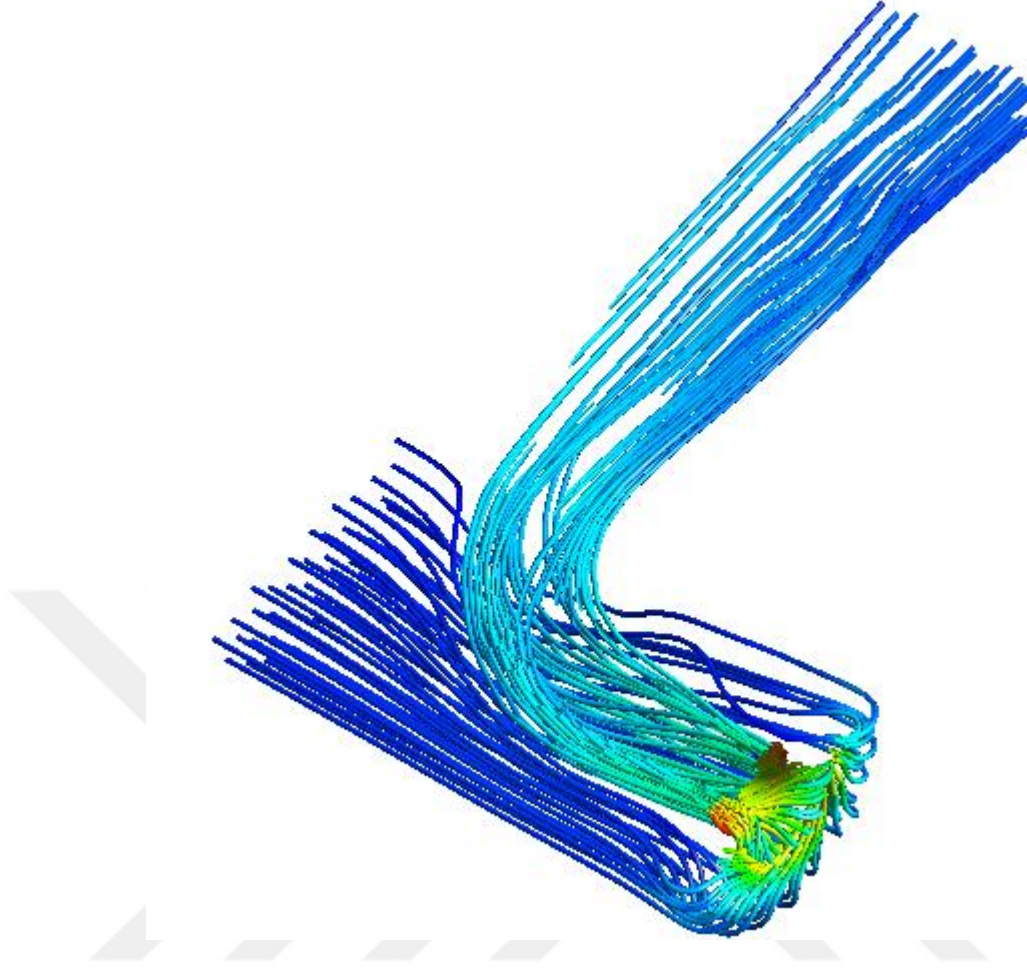


Şekil 3.30 : Emme borusu orta düzlem üzerinde hız dağılımı ve vektörleri.

3.3 Tüm Türbin HAD Analizi Sonuçları

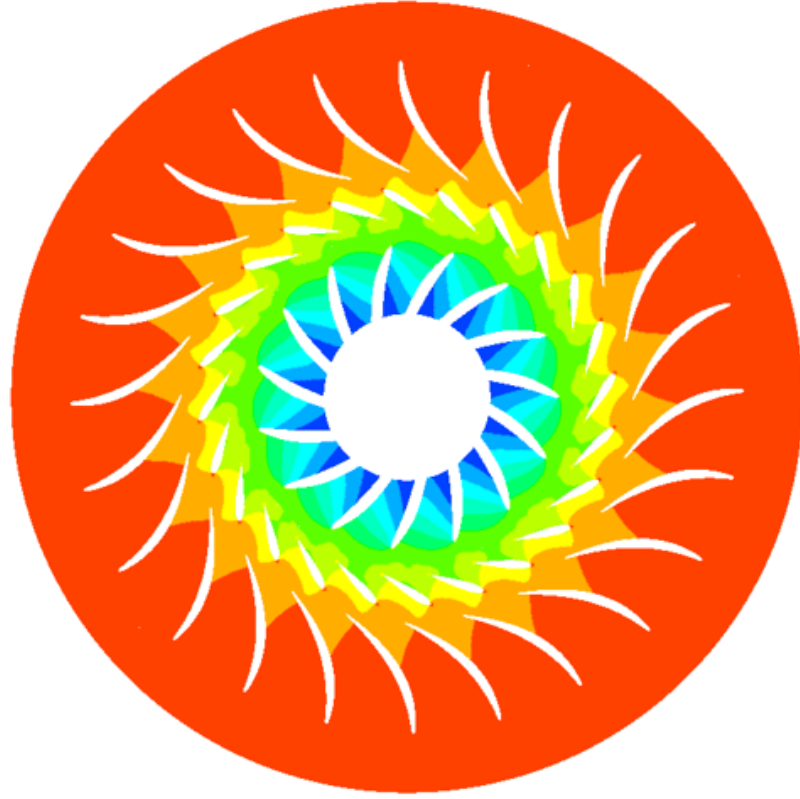
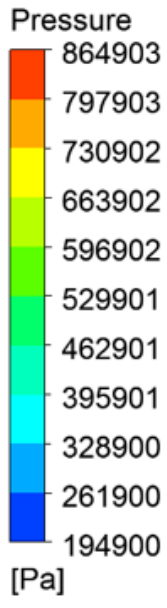
Türbinin farklı ayar kanadı açıklıklarında ve farklı düşülerde çalışma karakteristiğini ve performans değerlerini görmek amacıyla tüm türbinin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım noktası olan 78 m düşü ve optimum ayar kanadı açıklığı $\alpha_0 = 31^\circ$ için tüm türbin HAD analizi sonuçları verilmiştir.

Boru girişinden emme borusu çıkışına kadar suyun türbin parçaları içerisindeki hareketinin 3 boyutlu akım çizgilerinin kesit görünümü Şekil 3.31’de verilmiştir. Akışın boru girişinden sabit kanatlara doğru ilerlerken hızı düşük olduğu için, emme borusu duvarlarında herhangi bir kopma söz konusu olmadan ve hız değerinde bir değişiklik olmadan ilerleyebildiği görülmektedir. Akışın boru sabit kanat girişinden çark çıkışına doğru hızlanarak ilerlediği, çark çıkışından emme borusu çıkışına doğru ise yavaşlayarak ilerlediği görülmektedir. Akışın emme borusu duvarlarını kopma olmadan takip ettiği görülmektedir. Ayrıca emme borusunda oluşan vorteks de akım çizgileri yardımıyla görülmektedir.

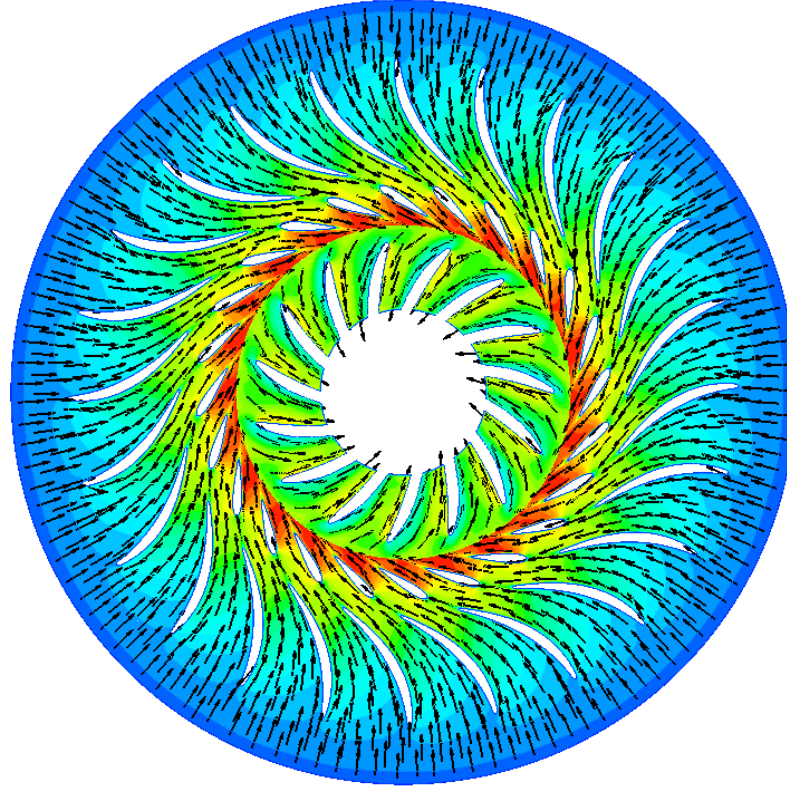
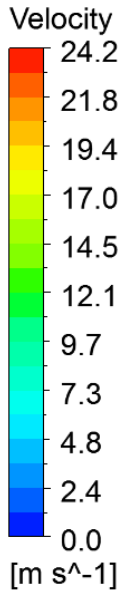


Şekil 3.31 : Türbin içerisinde oluşan 3 boyutlu akım çizgileri.

Türbin orta kesiti üzerinde statik basınç dağılımı Şekil 3.32’de, hız vektörleri ve dağılımı ise Şekil 3.33’te verilmiştir. Şekil 3.32’de verilen statik basınç dağılımı incelendiğinde tüm sabit kanatlar etrafında oluşan basınç dağılımının periyodik bir şekilde aynı olduğu görülmektedir. Akışın basınç değeri sabit kanatlardan çark çıkışına kadar düzgün ve tüm kanatlarda aynı olacak şekilde düşmektedir. Şekil 3.33’te verilen hız dağılımı incelendiğinde de bahsedilen bu durumu destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Ayrıca hız vektörlerinin kanat yüzeylerinden kopma olmaksızın düzgün bir şekilde takip ettiği görülmektedir.

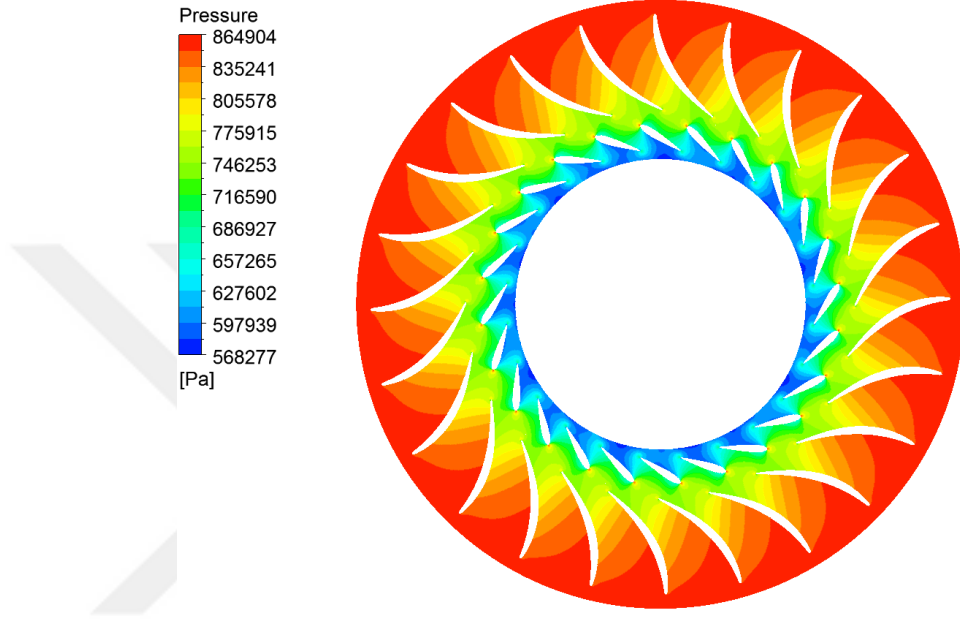


Şekil 3.32 : Orta düzlem üzerinde tüm türbin için statik basınç dağılımı.



Şekil 3.33 : Orta düzlem üzerinde tüm türbin için hız dağılımı ve vektörleri.

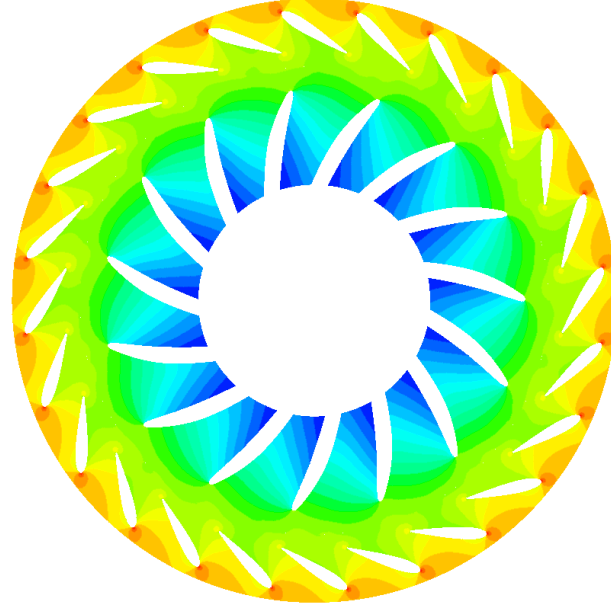
Sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan statik basınç dağılımı Şekil 3.34'te verilmiştir. Sabit kanatlar etrafında oluşan basınç dağılımı daha detaylı olarak görülebilmektedir. Ayrıca ayar kanatları üzerinde oluşan basınç dağılımlarının da tüm kanatlar için aynı olduğu görülmektedir. Bu da hidrolik kayıpların düşmesini sağlamıştır. Ayar kanatları üzerinde durma noktalarının da hücum kenarı üzerinde ve simetri düzleminde olması da akış açısının istenen değerde olduğunun kanıtıdır.



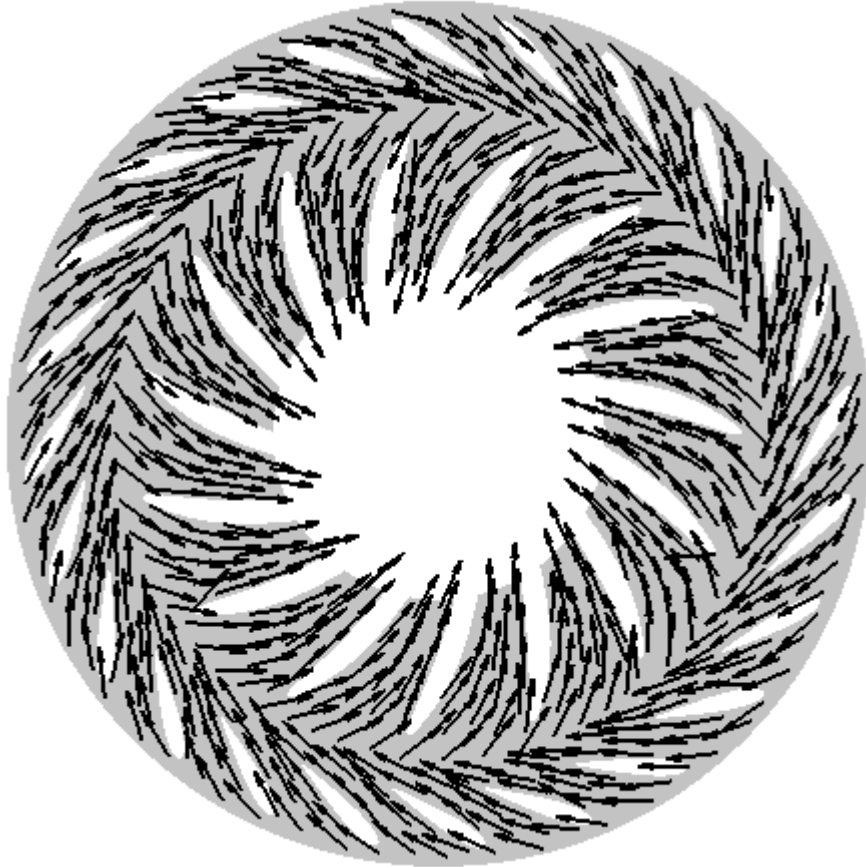
Şekil 3.34 : Orta düzlem üzerinde sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan statik basınç dağılımı.

Ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan statik basınç dağılımı Şekil 3.35'te, hız vektörleri Şekil 3.36'da verilmiştir. Statik basınç dağılımı incelendiğinde akışın beklenildiği üzere çark boyunca hızlanması sebebiyle basıncın düştüğü görülmektedir. Ayar kanatları çark kanatları üzerinde oluşan durma noktalarının hücum kenarı simetri düzlemi üzerinde olduğu görülmektedir. Şekil 3.36'da verilen hız vektörleri incelendiğinde ise ayar kanatları çıkışından çark kanatlarına giren akışın, çarkın dönme hızından dolayı yön ve büyüklüğünün değiştiği görülmektedir. Ayar kanatları hücum kenarı etrafında hız vektörlerinin kanat yüzeyini düzgün bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Bu sayede ayar kanatlarında oluşan verim kaybı ve hidrolik kayıplar azalmıştır. Çark kanadına giren akışın ise kanat yüzeyinde kopma ve düzensizlik olmadan ilerlediği görülmektedir.

Pressure
860347
793802
727258
660713
594168
527624
461079
394534
327990
261445
194900
[Pa]

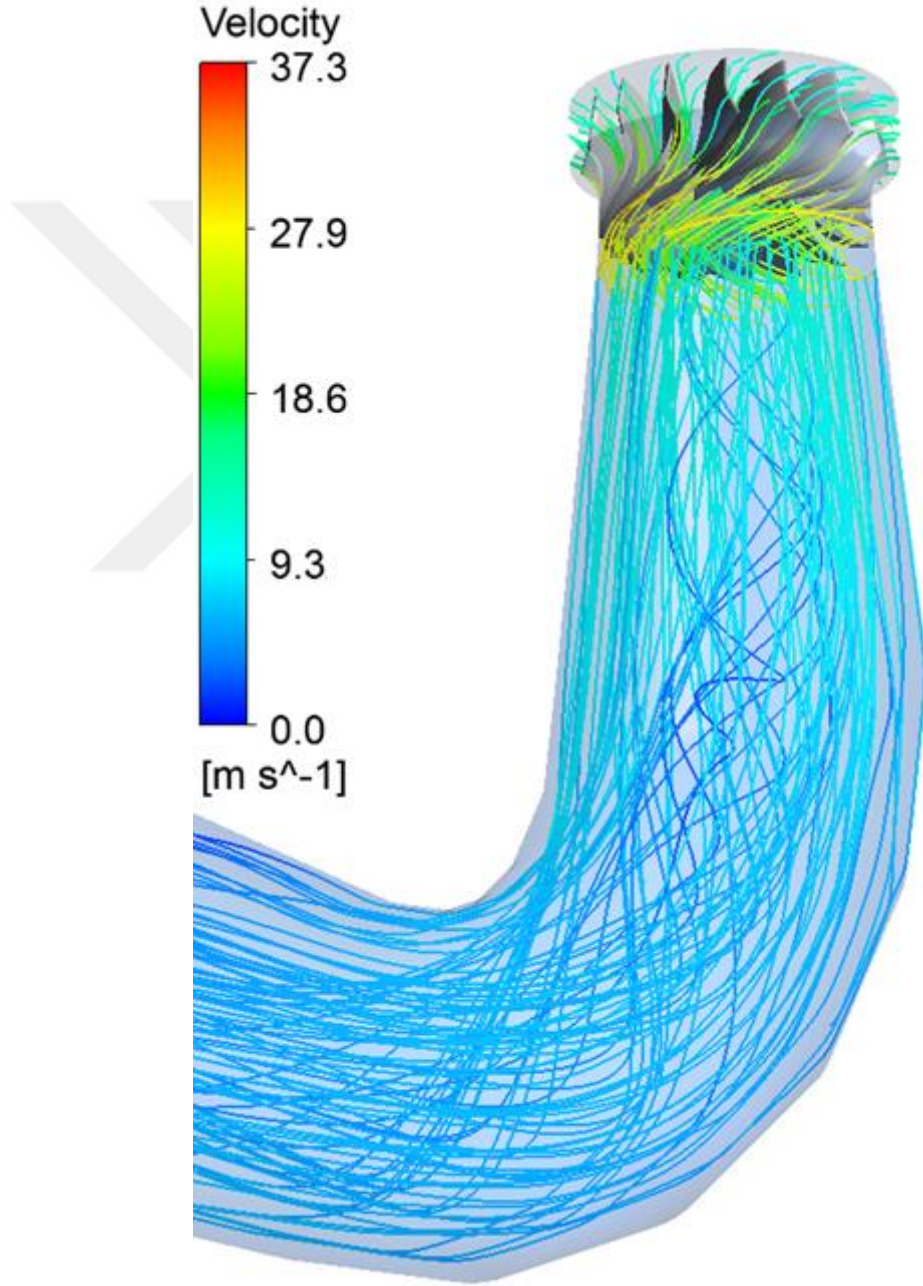


Şekil 3.35 : Orta düzlem üzerinde ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan statik basınç dağılımı.



Şekil 3.36 : Orta düzlem üzerinde ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan hız vektörleri.

Şekil 3.37’de nominal yük altında çark ve emme borusunda oluşan akım çizgileri verilmiştir. Emme borusunda oluşan girdap yapısı da önemli ölçüde gözlemlenmektedir. Çark çıkışında yüksek hıza ve belirli bir açığa sahip olan akış, emme borusu kesiti boyunca kesit alanının artmasıyla orantılı bir biçimde yavaşlamaktadır. Çark çıkışındaki girdap yapısı da emme borusu koni kısmında etkisini göstermektedir. Bu girdap yapısı, emme borusunda meydana gelen hidrolik kayıpların önemli bir sebebidir.



Şekil 3.37 : Çark ve emme borusunda meydana gelen 3 boyutlu akım çizgileri.

Farklı düşü ve ayar kanadı açıklıklarında yapılan, türbinin çalışma aralığının ve performans değerlerinin belirlendiği tüm türbin HAD analiz sonuçları Çizelge 3.8’de verilmiştir. Çalışma aralığı normal tasarımla aynı olacak şekilde 50 m ile 110 m düşü değerleri arasında 10 m aralıklarla belirlenmiştir. 78 m düşü değeri tasarım düşüsüne karşılık gelmektedir. Her düşü değerine karşılık 6 farklı ayar kanadı açıklığı için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayar kanadı açıklıkları $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$, $\alpha_0 = 25^\circ$, $\alpha_0 = 31^\circ$, $\alpha_0 = 35^\circ$ ve $\alpha_0 = 40^\circ$ olarak belirlenmiştir. Burada $\alpha_0 = 31^\circ$ optimum ayar kanadı açıklığına denk gelmektedir. Toplamda 48 farklı düşü ve ayar kanadı açıklığına göre HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinden debi, çark için düşü, türbin gücü, türbin verim ve tüm parçalar bazında verim değerleri elde edilmiştir. Boru, sabit kanatlar ve ayar kanatlarında yapılan tasarım iyileştirmeleriyle beraber tasarım noktası olan 78 m düşü ve 31° ayar kanadı açıklığında türbinden 2.19 m³/s debi geçmekte, 1539 kW güç üretilmekte ve türbin verimi %93.6 olarak elde edilmiştir. Tasarım noktasında verim değeri normal tasarımla yaklaşık aynı olmakla beraber, çalışma aralığında yer alan diğer düşü ve ayar kanadı açıklıklarında üretilen güç ve türbin veriminde belirgin bir şekilde artış gözlenmektedir.

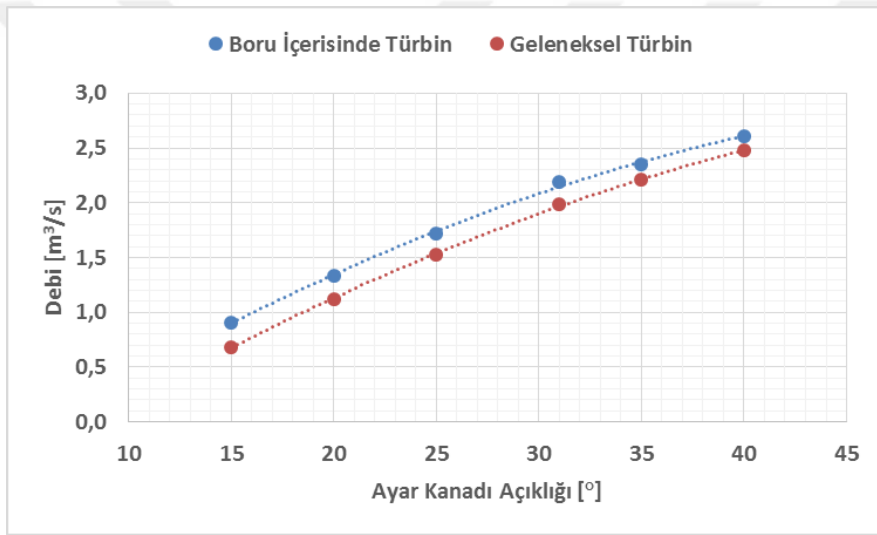
Çizelge 3.8 : Farklı düşü ve ayar kanadı açıklıkları için boru içerisinde tasarım sonuçları.

Net Santral Düşüsü [m]	Ayar Kanadı Açıklığı [°]	Debi [m3/s]	Türbin Çarkı Düşü [m]	Güç [MW]	Verim [%]					
					Salyangoz	Sabit Kanat	Ayar Kanadı	Çark	Emme Borusu	Türbin
50	15	0.65	38.93	0.203	99.98	99.94	97.82	81.69	98.20	78.40
	20	0.96	43.72	0.368	99.97	99.87	98.53	89.75	97.79	86.34
	25	1.26	46.02	0.518	99.95	99.78	98.74	91.64	97.62	88.10
	31	1.63	47.66	0.697	99.93	99.62	99.08	91.49	98.31	88.72
	35	1.77	47.80	0.751	99.92	99.55	99.22	90.65	98.49	88.12
	40	1.97	47.56	0.813	99.93	99.43	99.16	88.71	98.67	86.24
60	15	0.75	50.54	0.332	99.98	99.93	97.61	89.52	98.32	85.84
	20	1.10	54.43	0.559	99.97	99.86	98.44	95.31	98.66	92.41
	25	1.44	56.81	0.767	99.96	99.77	98.64	95.90	98.60	93.02
	31	1.85	57.76	0.994	99.93	99.60	99.07	95.21	98.64	92.61
	35	2.00	57.57	1.063	99.92	99.53	99.19	94.58	98.70	92.10
	40	2.22	56.89	1.149	99.90	99.40	99.11	93.09	98.76	90.47
70	15	0.84	61.23	0.462	99.98	99.93	97.47	91.98	98.51	88.24
	20	1.23	64.98	0.753	99.97	99.86	98.35	96.12	98.74	93.18
	25	1.60	67.20	1.015	99.95	99.76	98.58	96.48	98.74	93.64
	31	2.04	67.50	1.293	99.93	99.59	99.05	95.98	98.89	93.56
	35	2.20	67.12	1.379	99.92	99.52	99.17	95.50	98.92	93.16
	40	2.44	66.18	1.490	99.90	99.39	99.06	94.33	99.02	91.87
78	15	0.91	69.89	0.577	99.98	99.93	97.37	92.93	98.62	89.16
	20	1.33	73.50	0.921	99.97	99.85	98.28	96.09	98.82	93.15
	25	1.72	75.35	1.223	99.95	99.75	98.55	96.43	98.92	93.72
	31	2.19	75.03	1.539	99.93	99.58	99.03	95.93	98.98	93.56
	35	2.35	74.50	1.637	99.91	99.51	99.14	95.49	99.01	93.20
	40	2.61	73.44	1.769	99.90	99.38	99.02	94.47	99.22	92.14
80	15	0.92	72.04	0.605	99.98	99.93	97.35	92.91	98.62	89.11
	20	1.36	75.63	0.964	99.97	99.85	98.26	96.00	98.83	93.06
	25	1.75	77.37	1.277	99.95	99.75	98.54	96.37	98.95	93.69
	31	2.22	76.90	1.603	99.93	99.58	99.02	95.88	99.01	93.53
	35	2.39	76.35	1.705	99.91	99.51	99.13	95.45	99.06	93.20
	40	2.65	75.20	1.840	99.90	99.38	99.01	94.46	99.20	92.10
90	15	1.00	82.46	0.746	99.98	99.93	97.25	92.22	98.67	88.41
	20	1.47	86.15	1.177	99.97	99.85	98.20	94.82	98.85	91.86
	25	1.89	87.31	1.548	99.95	99.74	98.50	95.72	99.07	93.13
	31	2.40	86.16	1.931	99.92	99.57	98.99	95.54	99.13	93.27
	35	2.58	85.52	2.053	99.91	99.50	99.10	95.16	99.31	93.10
	40	2.85	83.80	2.199	99.89	99.36	98.96	94.29	98.86	91.57
100	15	1.08	92.75	0.892	99.98	99.92	97.16	91.08	98.48	87.07
	20	1.58	96.54	1.388	99.96	99.84	98.14	93.15	98.99	90.32
	25	2.02	97.03	1.815	99.95	99.74	98.47	94.51	99.15	92.00
	31	2.57	95.39	2.275	99.92	99.56	98.96	94.99	99.33	92.89
	35	2.76	94.47	2.415	99.91	99.49	99.06	94.71	99.32	92.62
	40	3.03	92.08	2.567	99.89	99.36	98.92	93.99	98.41	90.80
110	15	1.15	102.89	1.039	99.98	99.92	97.09	89.82	98.06	85.44
	20	1.68	106.55	1.598	99.97	99.84	98.11	91.57	99.04	88.81
	25	2.14	106.52	2.077	99.95	99.74	98.45	93.01	99.26	90.61
	31	2.73	104.45	2.626	99.92	99.55	98.93	94.20	99.39	92.14
	35	2.93	103.11	2.780	99.91	99.48	99.03	94.14	99.04	91.77
	40	3.21	100.18	2.944	99.89	99.35	98.87	93.53	98.08	90.01

3.4 Geleneksel Tasarım Türbin ile Boru İçerisinde Tasarım Türbinin Karşılaştırması

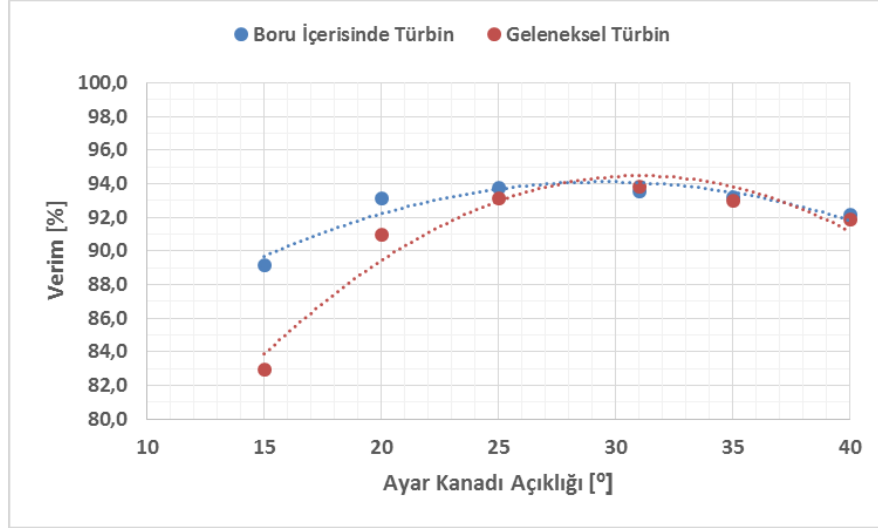
3.4.1 Tasarım Düşüsünde Farklı Ayar Kanadı Açıklıkları İçin Verim ve Hidrolik Kayıpların Karşılaştırması

Şekil 3.38’de geleneksel tasarım ve boru içerisinde tasarım için, 78 m tasarım düşüsünde ayar kanadı açıklığına bağlı olarak debinin değişimi verilmiştir. Ayar kanatlarının kalınlığının azaltılması buna bağlı olarak da ayar kanadı açıklığının artması ve akışın daha düzenli bir yapı izlemesi sebebiyle yeni tasarımda türbinden geçen debi miktarında artış gözlenmiştir. Ayrıca her iki türbinde de ayar kanadı açıklığı arttıkça türbinde geçen debi de artmaktadır.



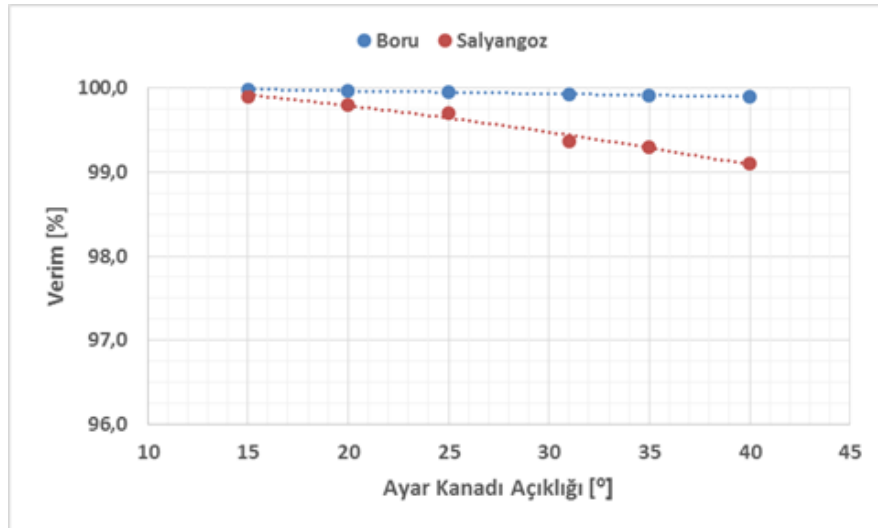
Şekil 3.38 : Ayar kanadı açıklığına bağlı olarak tasarım düşüsünde türbinlerden geçen debinin değişimi.

78 m tasarım düşüsü için ayar kanadı açıklığına bağlı boru içerisinde tasarım ve normal tasarım türbinlerin verim eğrileri Şekil 3.39’da verilmiştir. Optimum ayar kanadı açıklığı olan $\alpha_0 = 31^\circ$ için türbin verimleri aynı olmaktadır. Aynı şekilde $\alpha_0 = 35^\circ$ ve $\alpha_0 = 40^\circ$ için de türbin verimleri yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Ancak daha kapalı ayar kanadı açıklıkları olan $\alpha_0 = 25^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$ ve $\alpha_0 = 15^\circ$ ’lerde ise boru içerisinde türbin, geleneksel türbine göre bariz bir şekilde verim artışı sağlamaktadır. Boru içerisinde türbinin en düşük verimi yaklaşık %89 olduğu görülmektedir. Bu sebeple boru içerisinde türbin neredeyse tüm ayar kanadı açıklıklarında %90’lık bir verim diliminin üzerinde çalışabilmektedir.



Şekil 3.39 : Ayar kanadı açıklığına göre türbin verimleri.

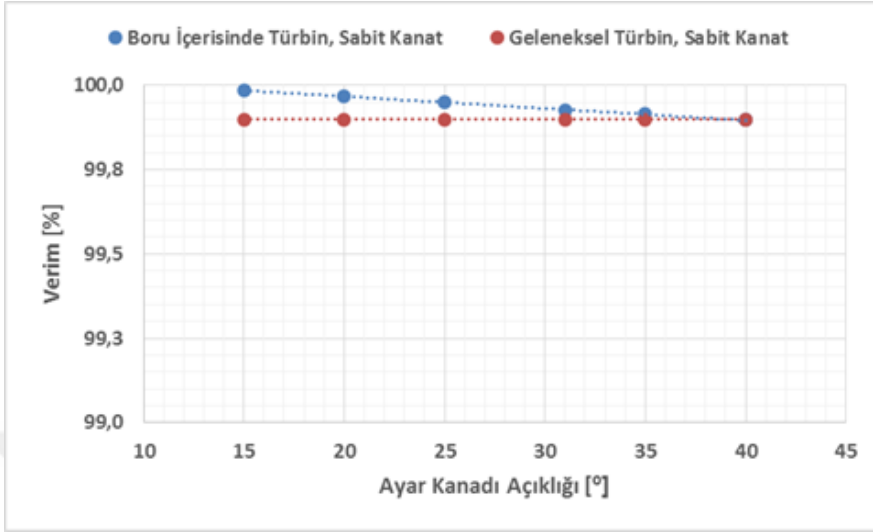
Türbinde oluşan bu verim artışını parçalar bazında da gözlemleyebilmek adına boru içerisinde tasarım ve geleneksel tasarımın her bir türbin parçasının 78 m tasarım düşüsünde ve farklı ayar kanadı açıklıklarında verimleri aşağıda verilmiştir. Yeni tasarımda kullanılan borunun ve normal tasarımda kullanılan salyangozun ayar kanadı açıklığına göre verim eğrileri Şekil 3.40'da verilmiştir. Her iki tasarımda da verimler %99 değerinin üzerinde olmasıyla birlikte, boruda akışın daha eş dağılım izlemesinden kaynaklı kayıpların daha az olması sebebiyle her ayar kanadı açıklığında daha yüksek değerler elde edilmiştir.



Şekil 3.40 : Ayar kanadı açıklığına göre boru ve salyangoz verimleri.

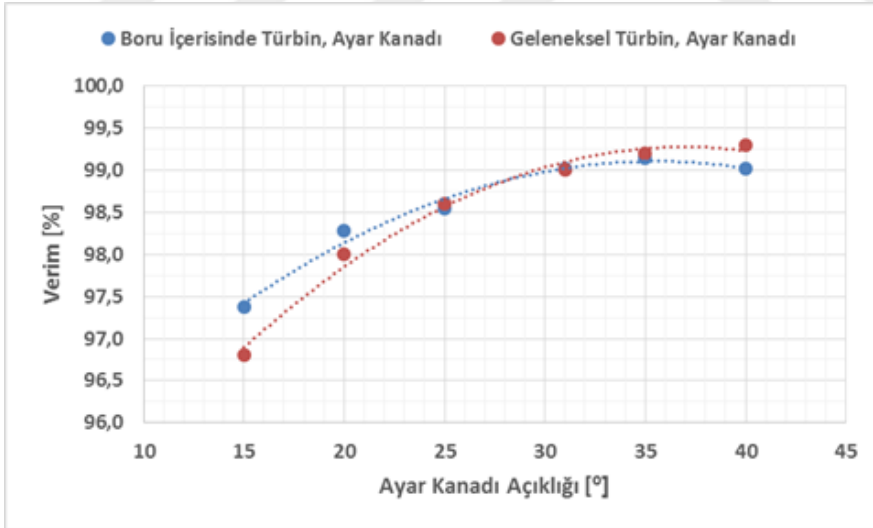
Boru içerisinde türbinde kullanılan sabit kanatlar ile geleneksel tasarımda kullanılan sabit kanatların ayar kanadı açıklığına göre verim eğrileri Şekil 3.41'de verilmiştir.

Her iki tasarımda da verimler birbirine çok yakın olmakla beraber boru içerisinde tasarımda kullanılan sabit kanatlar ondalık dilim farkıyla daha yüksek verime sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.41 : Ayar kanadı açıklığına göre sabit kanat verimleri.

Boru içerisinde türbinde kullanılan ayar kanatları ile geleneksel türbinde kullanılan ayar kanatlarının açıklığa göre verim eğrileri Şekil 3.42’de verilmiştir.

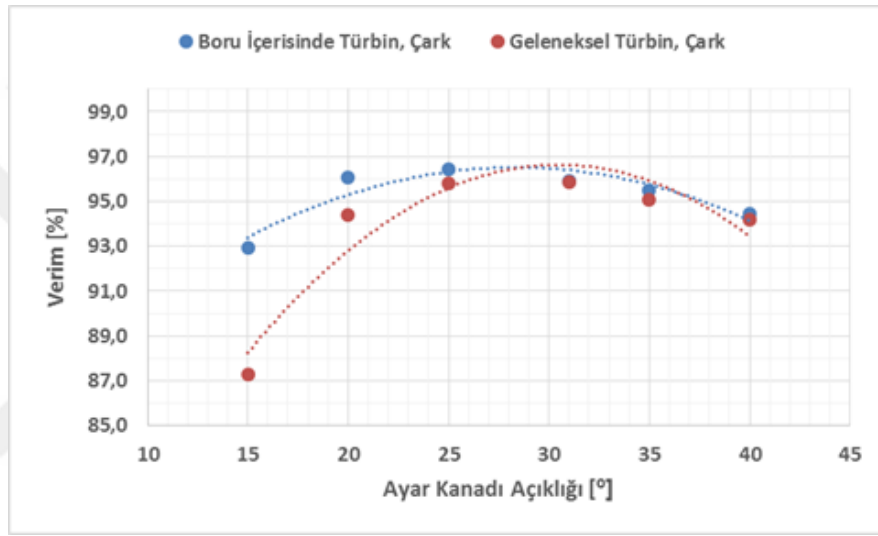


Şekil 3.42 : Ayar kanadı açıklığına göre ayar kanadı verimleri.

Optimum açıklık olan $\alpha_0 = 31^\circ$ için her iki ayar kanadında da aynı verim değeri elde edilmiştir. Ancak borudan gelen akışın normal tasarıma göre farklı karakteristik izlemesi ve ayar kanadı kalınlığının azaltılması sebepleriyle diğer açıklıklarda farklılıklar gözlenmektedir. $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$ ve $\alpha_0 = 25^\circ$ ayar kanadı açıklıklarında

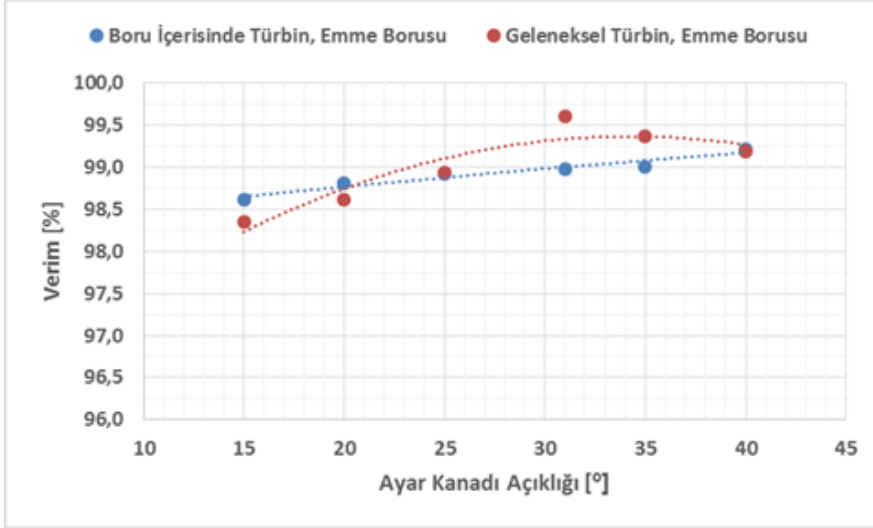
boru içerisinde tasarım daha yüksek verimlere ulaşırken $\alpha_0 = 35^\circ$ ve $\alpha_0 = 40^\circ$ açıklıklarında geleneksel tasarım verimi daha yüksek gelmektedir.

Boru içerisinde türbin ve geleneksel türbinde elde edilen çark verim eğrileri Şekil 3.43'te verilmiştir. $\alpha_0 = 31^\circ$ optimum ayar kanadı açıklığında her iki türbinde de çark verimleri aynı gelmektedir. Ancak daha kısık olan $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$, $\alpha_0 = 25^\circ$ ve daha açık olan $\alpha_0 = 35^\circ$ ve $\alpha_0 = 40^\circ$ ayar kanadı açıların tamamında boru içerisinde tasarımla elde edilen verimler gözle görülür bir ölçüde daha yüksek gelmektedir. Tüm ayar kanadı açıklıklarında boru içerisinde tasarım için çark %93 verim bandının üzerinde çalışabilmektedir.



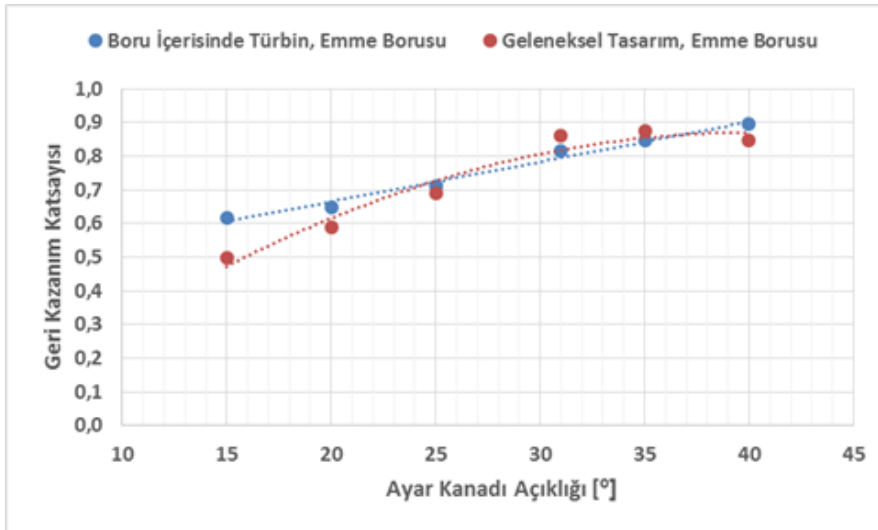
Şekil 3.43 : Ayar kanadı açıklığına göre çark verimleri.

Boru içerisinde türbin ve geleneksel türbinde elde edilen emme borusu verim eğrileri Şekil 3.44'te verilmiştir. Boru içerisinde tasarımda emme borusu verimi lineere yakın bir şekilde, ayar kanadı açıklığı artışına bağlı olarak artan bir eğilim göstermiştir. Geleneksel tasarımda ise verim parabolik bir eğri şeklinde elde edilmiştir. Ayar kanadı açıklığının daha kısık olduğu $\alpha_0 = 15^\circ$ ve $\alpha_0 = 20^\circ$ açıklıklarında boru içerisinde tasarım için verimler daha yüksek elde edilirken, $\alpha_0 = 31$ ve $\alpha_0 = 35$ ayar kanadı açıklıklarında ise geleneksel tasarım için elde edilen verimler daha yüksek gelmiştir. Boru içerisinde tasarımda emme borusu tasarımı gerçekleştirilmediği için bu ayar kanadı açıklıklarında verim düşüşü gözlenmektedir. Farklılıklara rağmen her iki tasarım için de verim değerleri %98 bandının üzerinde yer almaktadır. Daha iyi bir karşılaştırma yapılabilmesi için her iki tasarım için elde edilen ayar kanadı açıklığına bağlı geri kazanım katsayılarının karşılaştırması Şekil 3.45'te verilmiştir.



Şekil 3.44 : Ayar kanadı açıklığına göre emme borusu verimleri.

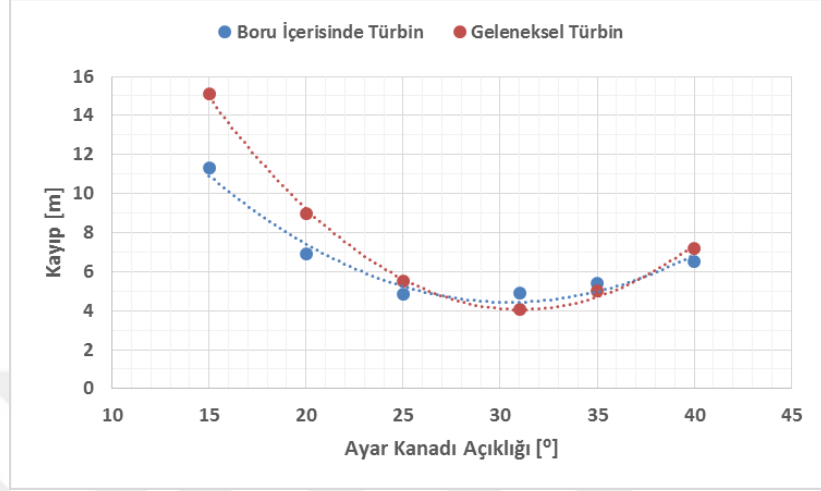
Emme borusu verim grafiğindeki benzer bir durum geri kazanım katsayıları grafiğinde de görülmüştür. Boru içerisinde tasarımda elde edilen geri kazanım katsayısı dağılımı lineere yakın bir şekilde ayar kanadı açıklığıyla beraber bir artış olmaktadır. Geleneksel tasarımda ise emme borusu geri kazanım katsayısı yine parabolik bir dağılım göstermektedir. $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$, $\alpha_0 = 25^\circ$ ve $\alpha_0 = 40^\circ$ ayar kanadı açıklıklarında boru içerisinde tasarım için geri kazanım katsayıları daha yüksek gelmekte ancak $\alpha_0 = 31^\circ$ ve $\alpha_0 = 35^\circ$ ayar kanadı açıklıklarında ise geleneksel tasarım değerleri daha yüksek gelmektedir.



Şekil 3.45 : Ayar kanadı açıklığına göre emme borusu geri kazanım katsayıları.

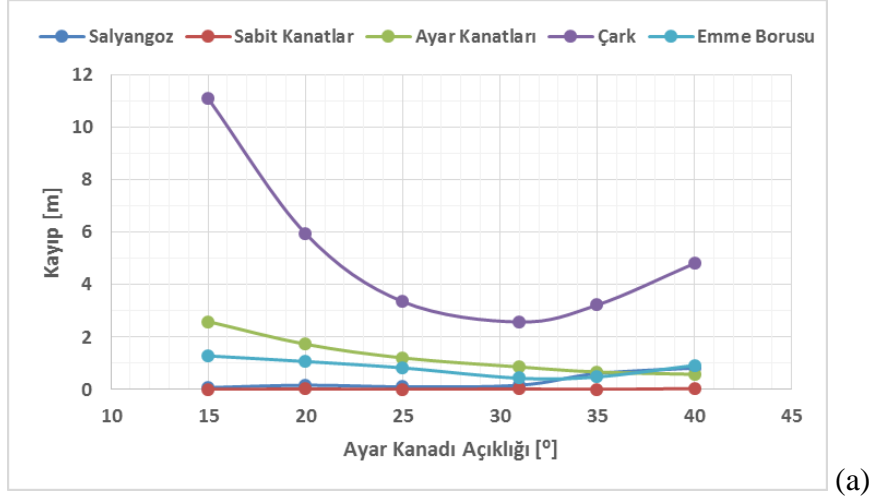
Boru içerisinde tasarım ve geleneksel tasarım için tüm türbin kayıplarının ayar kanadı açıklığına göre dağılımı Şekil 3.46'da verilmiştir. Verim eğrilerinde benzeri

görüldüğü üzere $\alpha_0 = 31^\circ$ ve $\alpha_0 = 35^\circ$ ayar kanadı açıklıklarında geleneksel tasarım türbin için daha düşük kayıplar hesaplanmıştır ancak $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$, $\alpha_0 = 25^\circ$ ve $\alpha_0 = 40^\circ$ ayar kanadı açıklıklarında boru içerisinde tasarım türbin için belirgin bir şekilde daha az kayıp hesaplanmıştır.

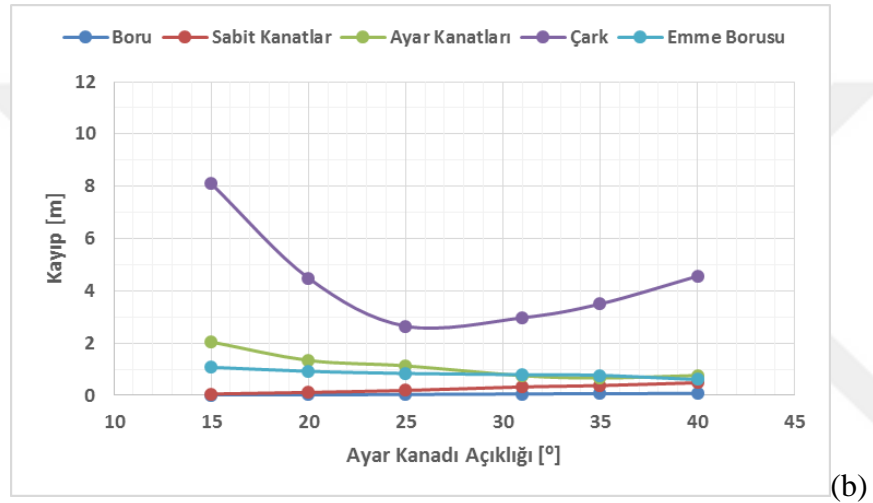


Şekil 3.46 : Ayar kanadı açıklığına göre türbin kayıpları.

Türbin parçaları bazında kayıpları incelemek için Şekil 3.47’de geleneksel tasarım türbin için parçalar bazında kayıp dağılımı verilmiştir. Şekil 3.47 incelendiğinde türbin kaybının büyük bir kısmının çarktan kaynaklı olduğu görülmektedir. Optimum ayar kanadı açıklığında kayıplar en aza inmekte ancak diğer ayar kanadı açıklıklarında kayıplar artmaktadır. Salyangoz ve ayar kanadı kayıpları ayar kanadı açıklığı arttıkça azalmaktadır. Emme borusu kaybı ise artan debiye bağlı olarak artmaktadır. Sabit kanatların ise en az düzeyde kayba sebep olan bileşen olduğu görülmektedir. Geleneksel tasarımla karşılaştırıldığında tüm parçalar bazında kayıpların daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Özellikle çarktaki kayıpların tüm ayar kanadı açıklıklarında azaltılması türbin verimi artışına etki eden önemli kriterlerden biridir. Geleneksel tasarımdakine benzer olarak çark için en düşük kayıplar optimum ayar kanadı açısında gelmektedir. Ayar kanatları ve emme borusu kayıpları ayar kanadı açıklığı yani debi arttıkça düşmektedir. Sadece sabit kanatlarda debi artışına bağlı olarak kayıplarda artış görülmektedir.



(a)

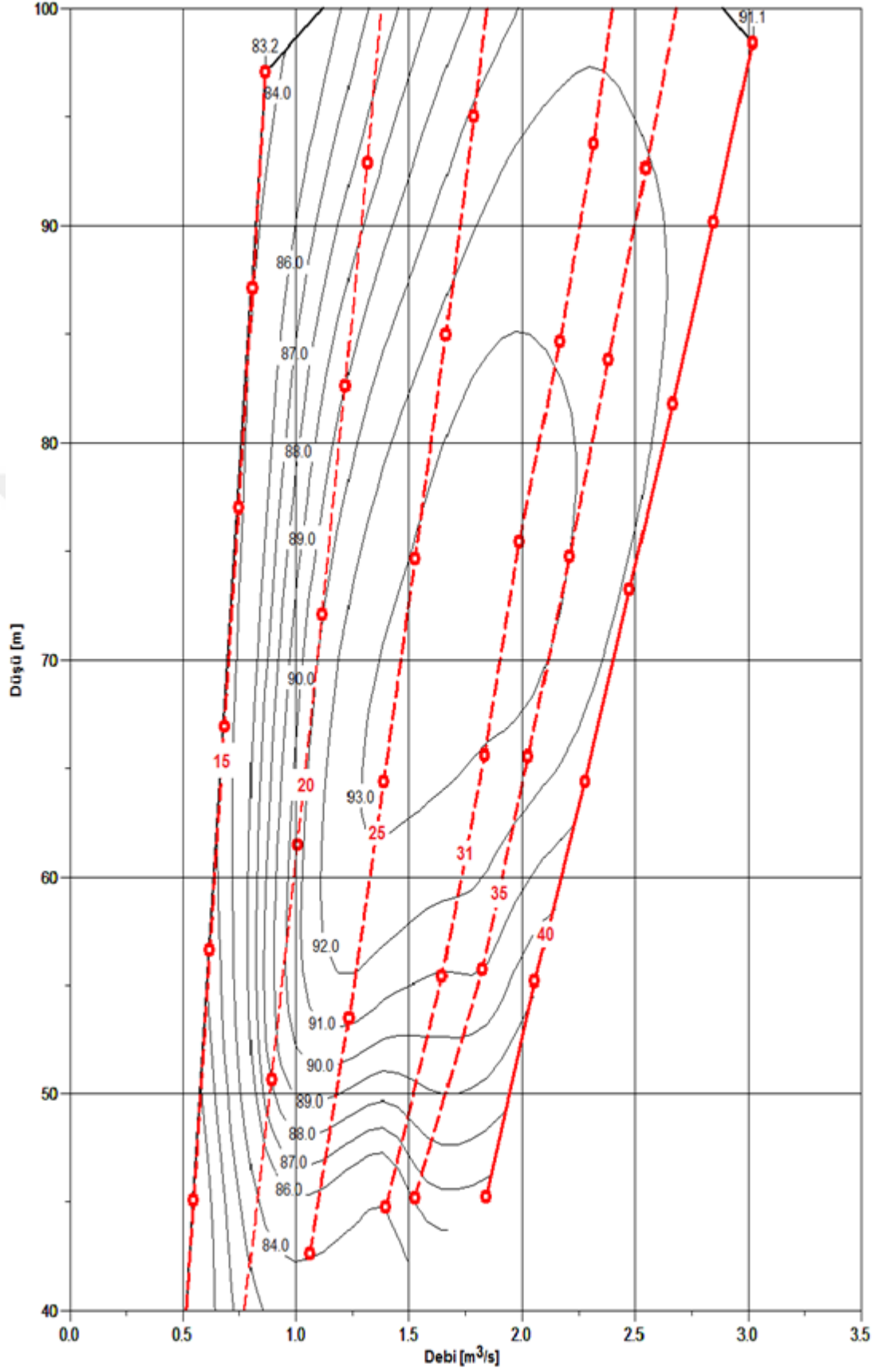


(b)

Şekil 3.47 : Ayar kanadı açıklığına göre (a) geleneksel tasarım türbin ve (b) boru içerisinde türbin için parça bazında kayıplar.

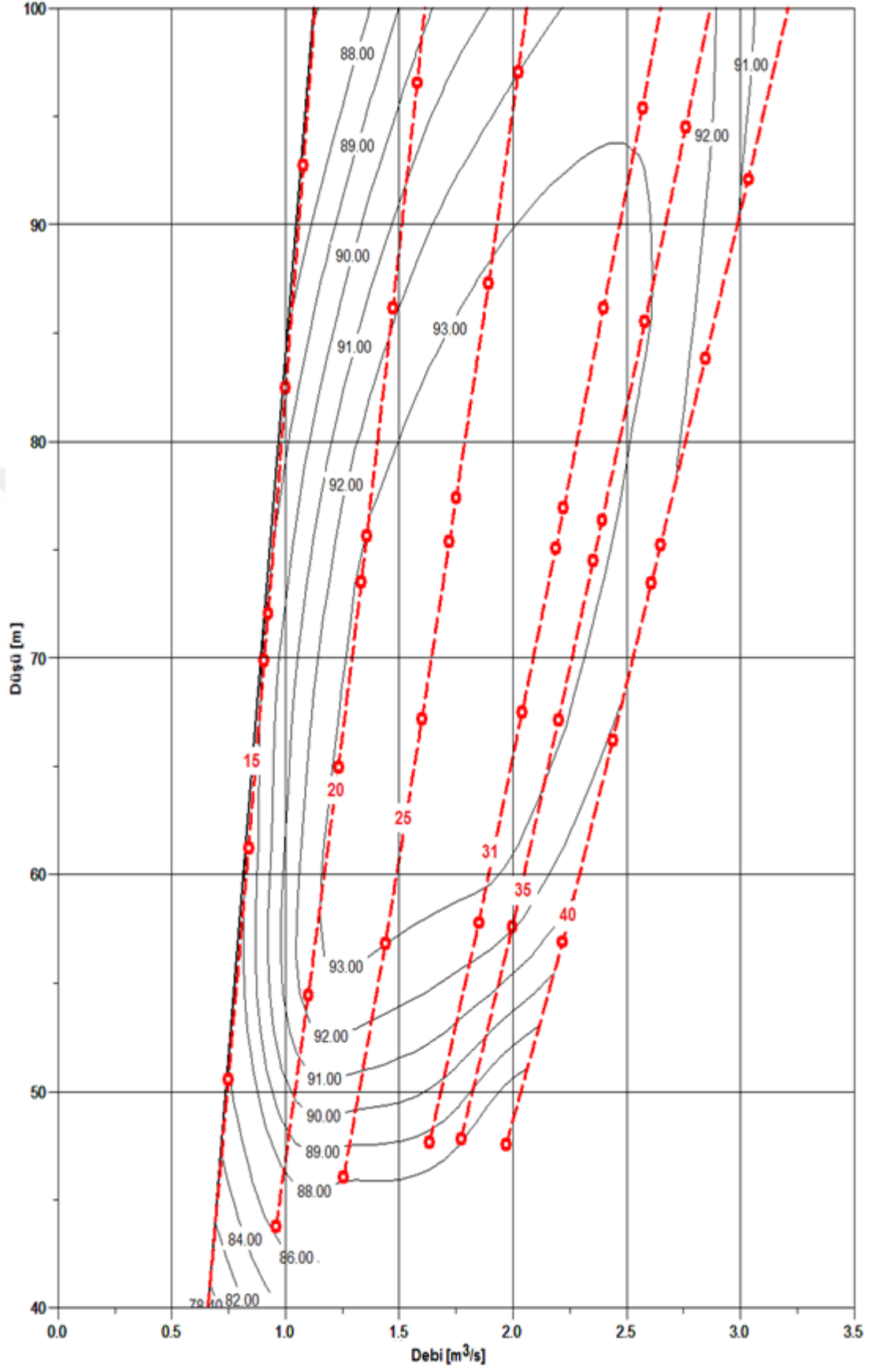
Geleneksel tasarım türbin için oluşturulan tepe diyagramı Şekil 3.48’de, boru içerisinde tasarım türbin için oluşturulan tepe diyagramı ise Şekil 3.49’da verilmiştir. Tepe diyagramları türbinlerin sabit dönüş hızlarında, HAD analizleri sonucunda elde edilen debi düşü ve verim değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Ayar kanadı açıklıkları da kırmızı çizgilerle diyagramların üzerinde oluşturulmuştur.

Şekil 3.48’de verilen geleneksel tasarım için oluşturulan tepe diyagramı incelendiğinde, türbinin maksimum verimi olan %93 değerinde çalışma aralığına 1.5 m³/s ile 2.2 m³/s debi değerleri ve 65 m ile 82 m düşü değerleri arasında ulaştığı görülmektedir. Tasarım düşüsü olan 78 m için farklı ayar kanadı açıklıklarında türbin % 84 ile %93 verim değerleri arasında çalışabildiği görülmektedir.



Şekil 3.48 : Geleneksel tasarım türbin için tepe diyagramı.

Şekil 3.49'da verilen boru içerisinde türbin için oluşturulan tepe diyagramı incelendiğinde, türbinin maksimum verimi olan %93 değerinde çalışma aralığına 1.1 m³/s ile 2.6 m³/s debi değerleri ve 55 m ile 92 m düşü değerleri arasında ulaştığı görülmektedir. Geleneksel tasarıma göre kıyaslandığında türbinin maksimum verimde çalıştığı debi aralığı yaklaşık 2 katına, düşü aralığı da yaklaşık 2 katına çıktığı görülmektedir. Türbin tasarım düşüsü olan 78 m için düşünüldüğünde neredeyse tüm ayar kanadı açıklıklarında maksimum verimde veya çok yakın değerlerde çalışmaktadır. Farklı ayar kanadı açıklıklarında türbin % 89 ile %93 verim değerleri arasında çalışabildiği görülmektedir. Buna ek olarak türbin neredeyse düşüden bağımsız bir şekilde maksimum verimde çalışabilmektedir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda, boru içerisinde türbin tasarımının proje isterlerini fazlasıyla karşıladığı, üretimi de maksimize edebilecek şekilde yıl içerisinde mevsimden ve iklim koşullarından neredeyse bağımsız biçimde maksimum verimde çalışabileceği görülmektedir.



Şekil 3.49 : Boru içerisinde tasarım türbin için tepe diyagramı.

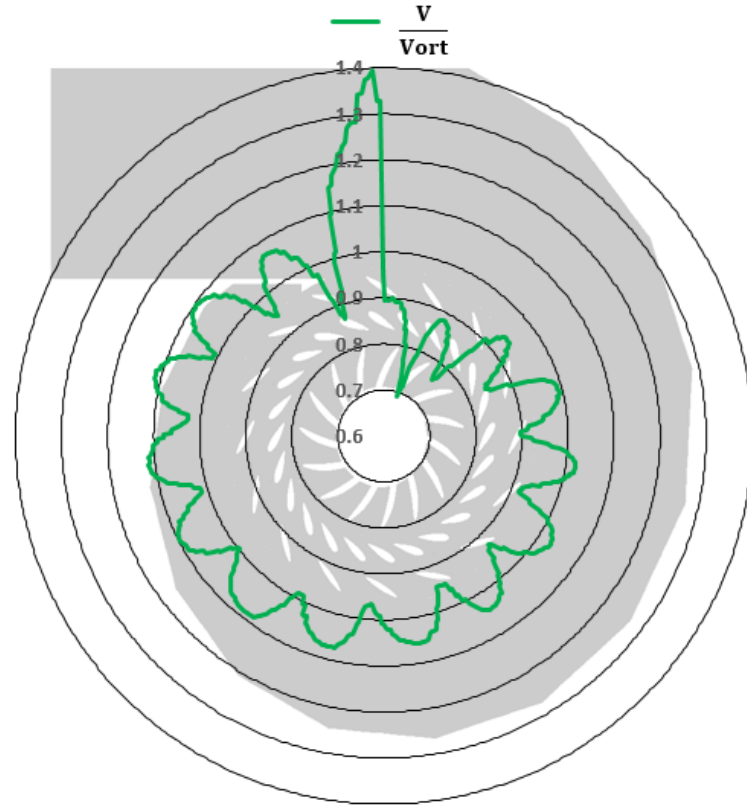
3.4.2 Nominal Yük Durumunda Karşılaştırma

Bu bölümde tasarım düşüsü olan 78 m ve tasarım debisini geçiren nominal ayar kanadı açıklığı olan $\alpha_0 = 31^\circ$ için her iki türbinin akış koşullarındaki farklılıklar verilmiştir. Çizelge 3.9'da her iki tasarım için elde edilen performans değerleri verilmiştir.

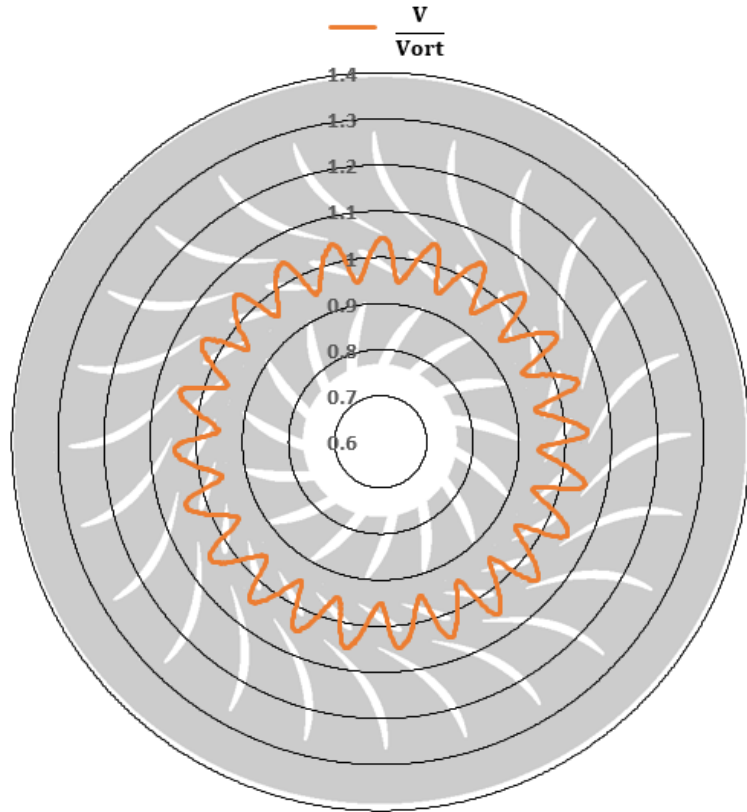
Çizelge 3.9 : Nominal yükte türbinlerin performans verilerinin karşılaştırması.

	Geleneksel tasarım türbin	Boru içerisinde türbin
Düşü (Giriş – Çıkış) [m]	78	
Ayar Kanadı Konum Açısı [°]	31	
Hacimsel Debi [m³/s]	1,99	2,19
Şaft Gücü [kW]	1406	1539
Verim [%]	93.8	93.6

Boru içerisinde türbin uygulamasının geleneksel tasarıma göre en büyük avantajı sabit kanatlara bu sebeple de türbin çarkına akışı eşit debide ve düzgün bir biçimde sağlamasıdır. Bu sebeple her iki türbinin sabit kanatlara giriş çevresel düzleminde debi dağılımını gözlemlemek adına Şekil 3.50'de verilen grafikler oluşturulmuştur. Debinin kesit alanına bölümünden hız vektörü elde edilmektedir. Bu sebeple salyangoz ve boru kesiti çıkışında hesaplanan hız vektörlerinin, bu kesit alanında hesaplanan ortalama hız vektörüne bölünmesinden birimsiz bir hız bileşeni elde edilmiş ve her iki türbin için bu birimsiz hız bileşeninin dağılımı incelenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.50 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için birimsiz hız katsayısının çevresel kesitte dağılımı.

Şekil 3.50’de görüldüğü üzere çevresel kesit etrafında minimum ve maksimum noktalar oluşmaktadır. Bu tepe noktalarının sayısı tasarımda kullanılan sabit kanat sayısı ile örtüşmektedir. Ancak geleneksel türbin için her bir sabit kanat etrafında oluşan akış koşulları birbirleriyle benzerlik göstermemektedir. Özellikle ilk sabit kanat kesitinde akış ortalama hızdan yaklaşık 1.4 kat daha yüksek bir değere sahiptir. Hemen ardından gelen ikinci ve üçüncü sabit kanatlarda ise maksimum hız değeri ortalama hız değerinin yaklaşık 0.85 ve 0.95 katı bir değere sahiptir. Yani salyangozdan gelen akış, ilk sabit kanat kesitinde yüksek bir oranda hücum etmekte ve hemen sonraki sabit kanat kesitlerinden de olması gerekenden çok daha düşük bir değerde girmektedir. Anca altıncı ve yedinci sabit kanatların bulunduğu konumda akış istenen hız değerlerine ulaşmakta fakat sonraki kesitlerde de bu durum tekrar düzensizlik göstermektedir. İlk kesitlerde sabit kanatlara yeterince dağıtılamayan ve olması gerekenden fazla miktarda olan debi, salyangoz kesitinin de daralmasından dolayı onuncu sabit kanat ve sonrasındaki kesitlerde akışın olması gerekenden daha hızlı hareket etmesine sebep olmaktadır. Bu kesitlerde akış ortalama değerinden yaklaşık 1.15 kat daha fazla bir hıza sahiptir. Tüm bu durumlar geleneksel tasarımda salyangozun debiyi her sabit kanada eşit bir şekilde dağıtamadığının kanıtıdır. Sabit kanatlardaki akışta oluşan bu düzensizlik türbin kesiti boyunca devam etmekte ve özellikle çark kanatlarında da etkisini göstermektedir. Tüm bu düzensizlikler hidrolik kayıpların artmasına ve verimin düşmesine sebep olmaktadır. Boru içerisinde tasarım için oluşan bu tepe noktalarının sayısı, sabit kanat sayısı ile örtüşmektedir. 0.95’e denk gelen değer, sabit kanatların girişinde oluşan durma noktaları sebebiyle oluşmaktadır ve bu bölgelerde hız değerinin düşmesi beklenen bir durumdur. Eşit debi dağılımının göstergesi olan durum ise, tüm bu tepe noktalarının ve minimum noktaların periyodik olarak aynı değerlere denk gelmesidir. Tüm bu dağılım 1.0 değeri seviyesinde periyodik olarak artış ve azalış gösterir bir şekildedir. Bu grafikten, borunun debiyi eşit ve düzgün, birbirine benzer akış koşullarında tüm sabit kanatlara sağladığı kolaylıkla söylenebilmektedir.

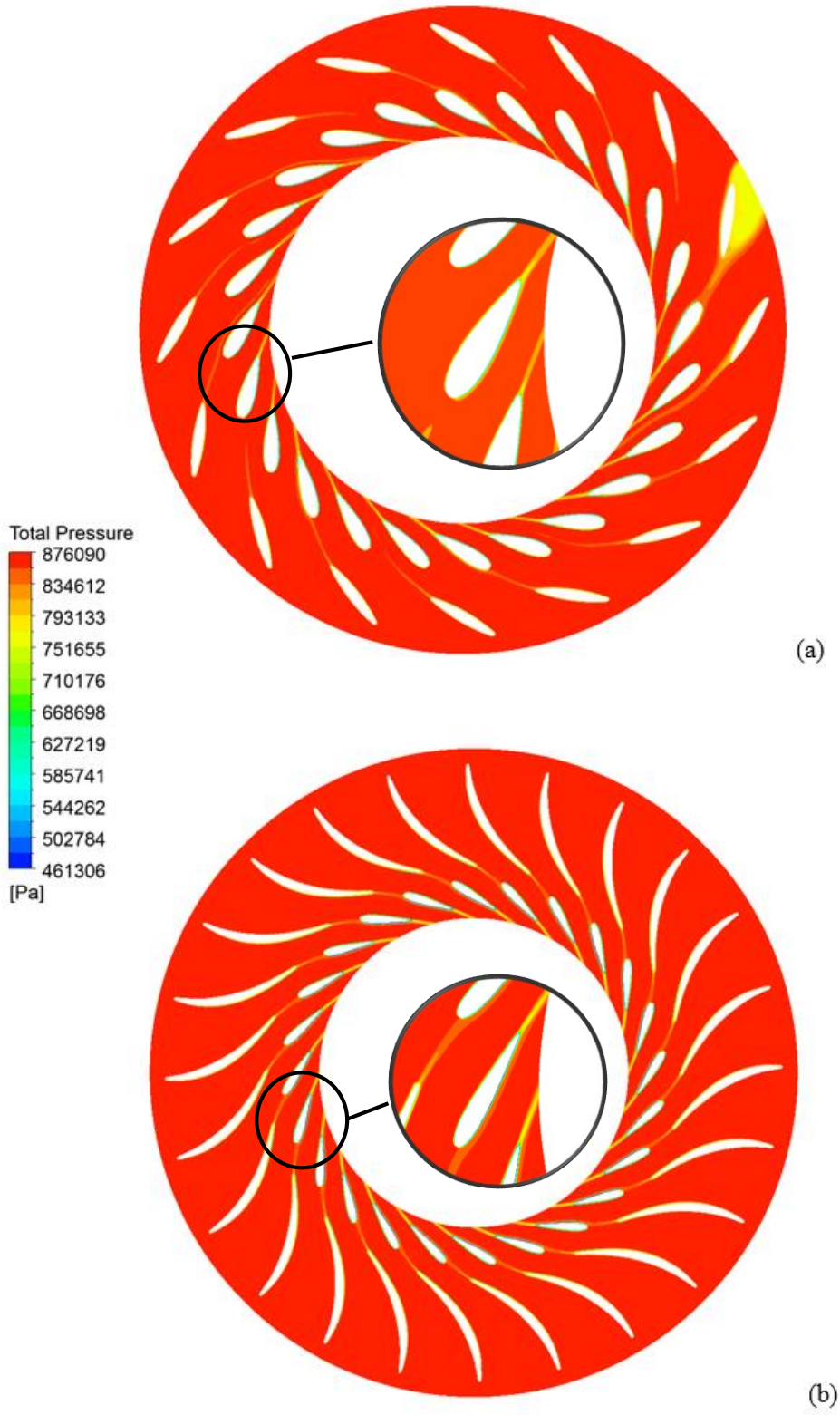
Geleneksel tasarım türbin sabit kanatlar ile boru içerisinde tasarım sabit kanatlar giriş kesitlerinde hesaplanan debi dağılımları Çizelge 3.10’da verilmiştir. Geleneksel tasarımda 16 sabit kanat kullanıldığı için 16 kesitte debiler hesaplanırken, boru içerisinde tasarımda sabit kanat sayısına bağlı olarak 24 kesit için hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 3.10 : Nominal yükte türbinlerin sabit kanat kesitlerinden geçen debinin dağılımı.

Sabit Kanat Kesitinden Geçen Debi [kg/s]		
	Geleneksel Tasarım Türbin	Boru İçerisinde Türbin
Kesit 1	183.345	109.453
Kesit 2	102.147	109.347
Kesit 3	115.389	109.423
Kesit 4	114.060	109.695
Kesit 5	118.377	109.744
Kesit 6	120.982	109.918
Kesit 7	122.119	109.975
Kesit 8	121.912	109.800
Kesit 9	121.994	109.874
Kesit 10	121.307	109.896
Kesit 11	120.550	109.853
Kesit 12	120.800	110.073
Kesit 13	122.948	109.960
Kesit 14	125.445	109.791
Kesit 15	129.992	109.841
Kesit 16	138.633	109.816
Kesit 17	-	109.863
Kesit 18	-	109.808
Kesit 19	-	109.606
Kesit 20	-	109.400
Kesit 21	-	109.193
Kesit 22	-	109.236
Kesit 23	-	109.313
Kesit 24	-	109.412

Çizelge 3.10'dan anlaşılacağı üzere geleneksel tasarımda salyangozun debiyi eşit dağıtamaması sebebiyle her bir kesitten farklı miktarda debi girişi oluşmaktadır. Boru içerisinde türbinde ise her bir kesitten neredeyse eşit miktarda debi dağılımı gerçekleşmektedir.

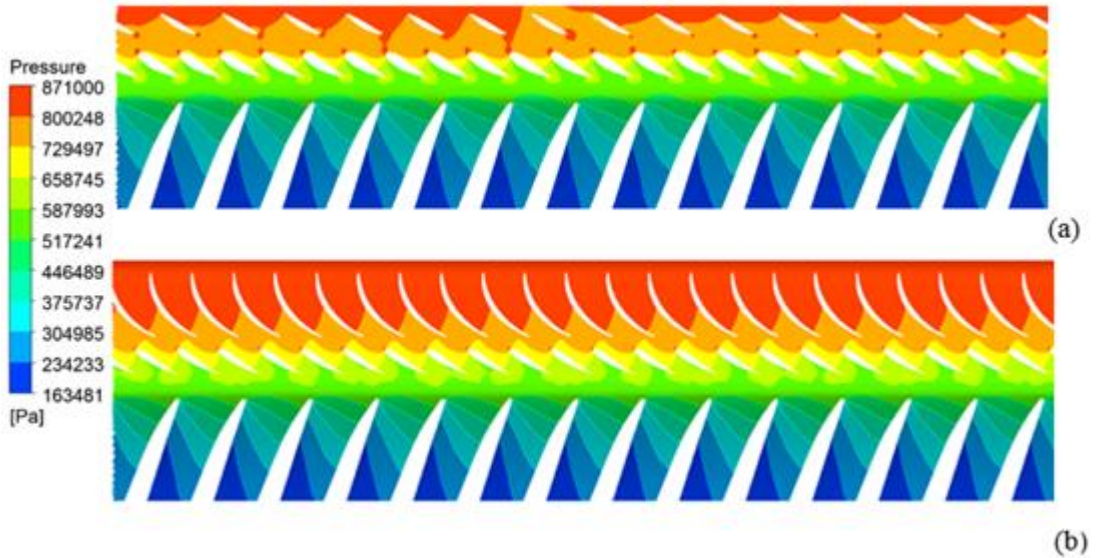
Şekil 3.51’de geleneksel tasarım ve boru içerisinde tasarım için elde edilen, sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.51 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.

Şekil 3.51 incelendiğinde, salyangoz ilk sabit kanat kesitinde akışın aşırı hızlanması sebebiyle oluşan kayıp açıklanabilmektedir. Oluşan hidrolik kayıplar genellikle kanatlardan sonra oluşan iz bölgesi sebebiyle olmakla birlikte, bu iz bölgelerinin kimi sabit kanatlar ve ayar kanatlarında daha büyük bir alanda oluştuğu bu durumun da kayıpları artırdığı bilinmektedir. Boru içerisinde tasarım için elde edilen toplam basınç dağılımı incelendiğinde oluşan hidrolik kayıpların sadece kanatların kuyruk kenarından sonra oluşan iz bölgeleri sebebiyle meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca geleneksel tasarımdan elde edilen sonuca kıyasla nispeten daha ince iz bölgeleri oluşmaktadır. Geleneksel tasarımda lokal alanlarda problemler elde edilen minimum 461 kPa düzeylerinde oluşan toplam basınç değeri, boru içerisinde tasarımda 580 kPa düzeyindedir bu durum da boru içerisinde tasarımla sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan kayıpların azaltıldığının bir diğer kanıtıdır.

Şekil 3.52’te geleneksel tasarım ve boru içerisinde tasarım için elde edilen, sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan basınç dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.52 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan basınç dağılımı.

Geleneksel tasarım için verilen basınç dağılımı incelendiğinde, özellikle sabit kanatlar etrafında oluşan basınç dağılımının periyodiklik göstermediği ve her kanatta farklı akış koşulları oluştuğu görülmektedir. Boru içerisinde tasarım için verilen basınç dağılımı incelendiğinde, tüm sabit kanatlar etrafında periyodik ve birbiriyle uyumlu akış koşullarının oluştuğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar Şekil 3.50’de verilen debi dağılımıyla da uyumluluk göstermektedir.

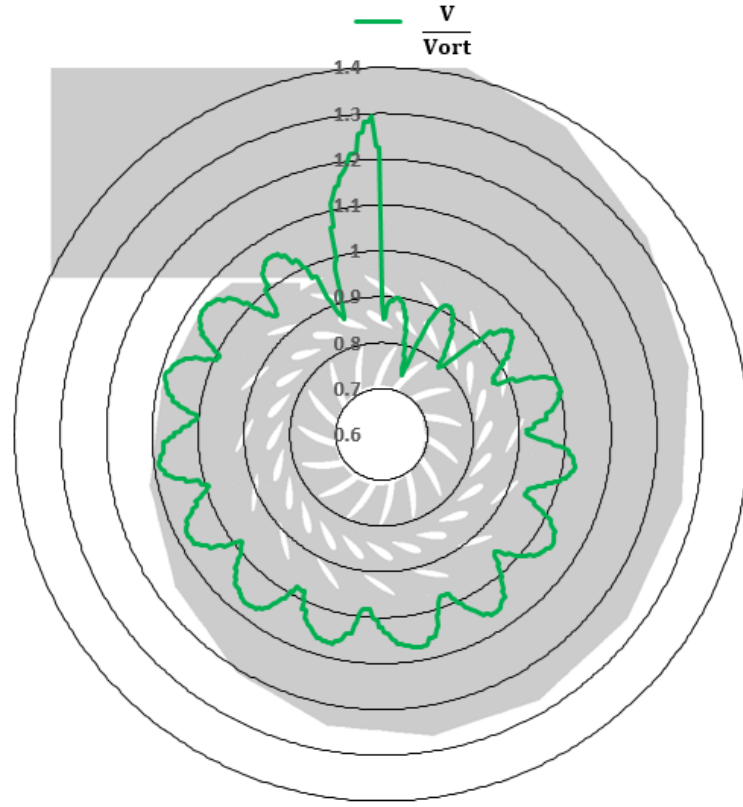
3.4.3 Kısmi Yük Durumunda Karşılaştırma

Boru içerisinde türbinin tasarım düşü ve ayar kanadı açıklığında geleneksel tasarıma göre yaklaşık aynı verim değerinde çalıştığı görülmektedir. Boru içerisinde türbin tasarım debi ve düşü değerinde avantaj sağladığı gibi asıl avantaj sağladığı aralık tasarım debisinden uzak bölgelerde çalışma koşulu olduğu tepe diyagramlarından anlaşılmaktadır. Bu sebeple her iki türbinin kısmi yük (Ayar kanadı açıklığı $\alpha_0 = 15^\circ$) ve tam yük (Ayar kanadı açıklığı $\alpha_0 = 40^\circ$) durumlarında akışın karakteristiğini daha iyi anlayabilmek adına tüm türbin için basınç ve hız vektörleri yardımıyla kıyaslamaları yapılmıştır. Çizelge 3.11’de kısmi yük durumunda (Ayar kanadı açıklığı $\alpha_0 = 15^\circ$) her iki türbin için elde edilen performans sonuçları verilmiştir.

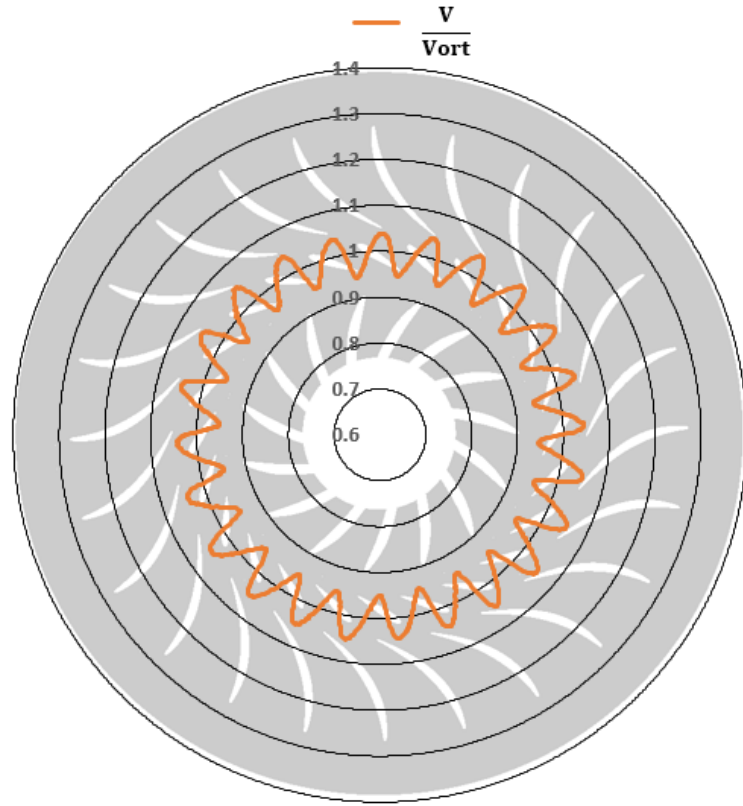
Çizelge 3.11 : Kısmi yükte türbinlerin performans verilerinin karşılaştırması.

	Geleneksel tasarım türbin	Boru içerisinde türbin
Düşü (Giriş – Çıkış) [m]	78	
Ayar Kanadı Konum Açısı [°]	15	
Hacimsel Debi [m ³ /s]	0,69	0,91
Şaft Gücü [kW]	391	577
Verim [%]	82,9	89,2

Her iki türbinin sabit kanatlara giriş çevresel düzleminde debi dağılımını gözlemek adına oluşturulan birimsiz hız bileşeni dağılımları Şekil 3.53’te verilmiştir. Birimsiz hız bileşeninin dağılımı, nominal yükteki dağılımla büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Özellikle ilk sabit kanat kesitinde akış ortalama hızdan yaklaşık 1.3 kat daha yüksek bir değere sahiptir. Hemen ardından gelen ikinci ve üçüncü sabit kanatlardan ise çok daha az debi girişi olmaktadır. Sonraki kesitlerde nispeten düzelen durum, yine onuncu sabit kanat kesitinden sonra tekrar bozulmaktadır. Salyangoz son kesitlerinde normalden daha fazla debi girişi olduğu görülmektedir. Şekil 3.53’te görüldüğü üzere hız katsayısının dağılımında nominal yüktekiyle neredeyse aynı dağılım gözlenmiştir. Oluşan tüm tepe noktaları birbiriyle periyodik bir şekilde uyumludur ve tüm sabit kanat kesitlerine debinin eşit miktarda dağıldığının göstergesidir.



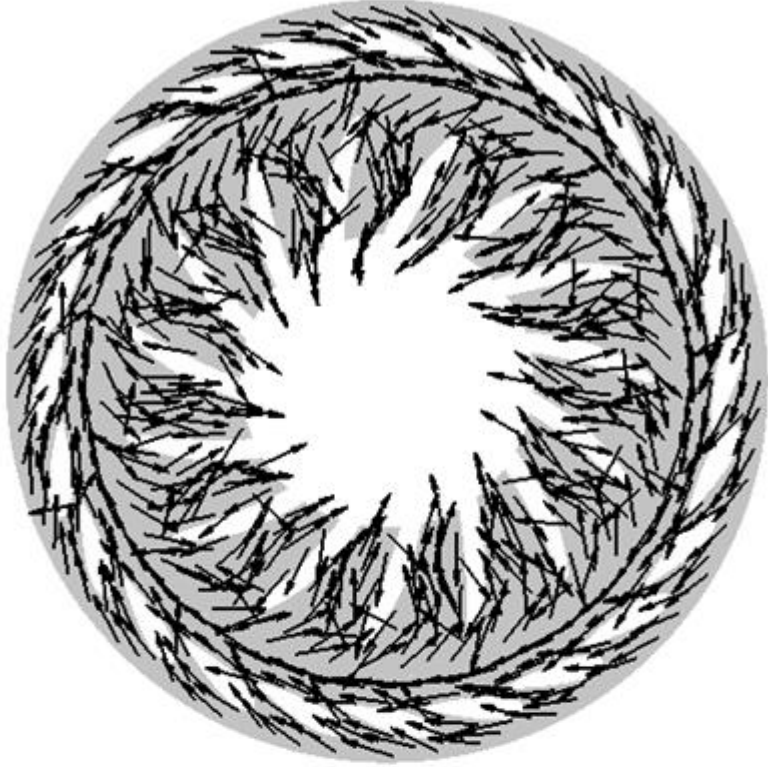
(a)



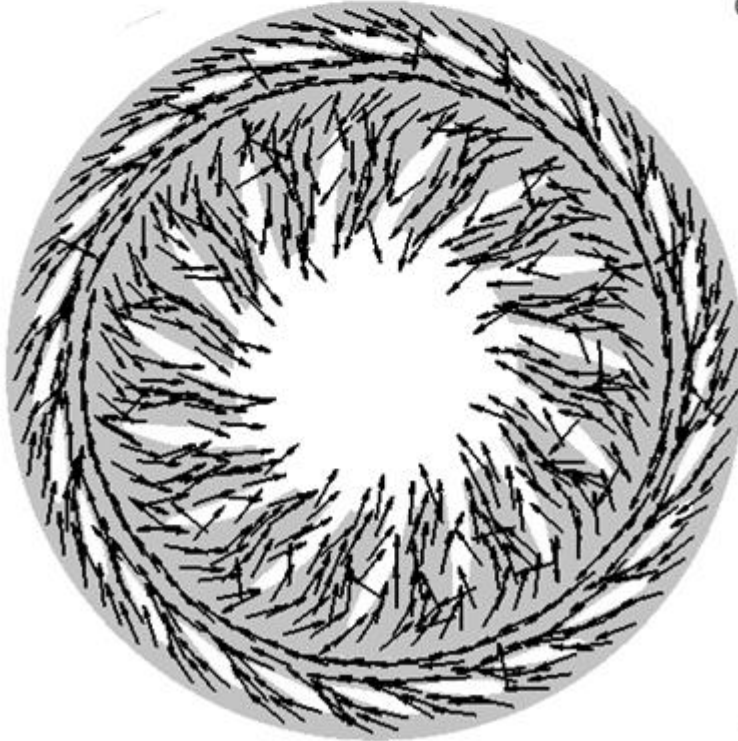
(b)

Şekil 3.53 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için birimsiz hız katsayısının çevresel kesite dağılımı.

Şekil 3.54'te geleneksel tasarım ve boru içerisinde türbin tasarımı için elde edilen, ayar kanatları ve çark etrafında oluşan hız dağılımı ve vektörleri verilmiştir.



(a)

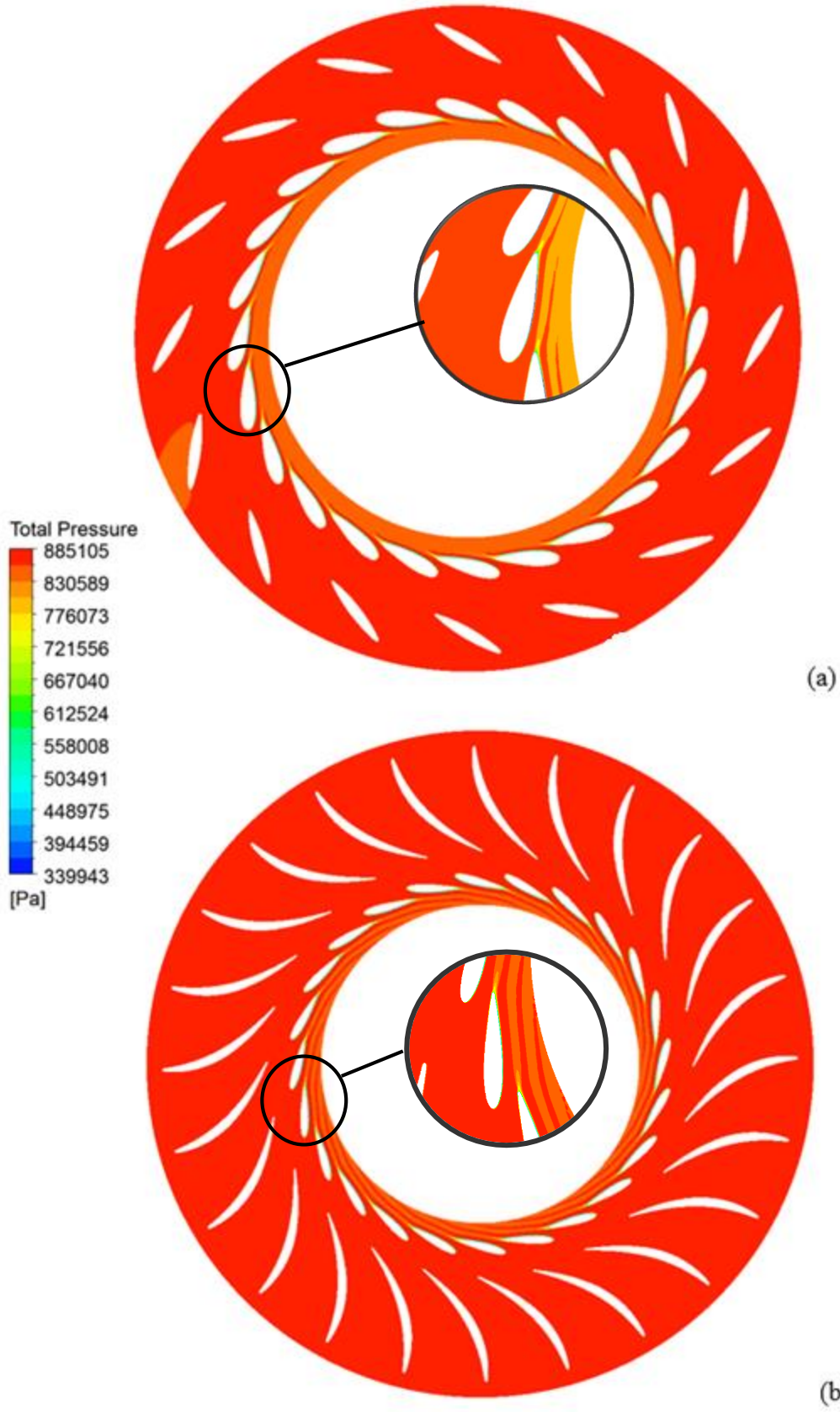


(b)

Şekil 3.54 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için ayar kanatları ve çark kanatları etrafında hız vektörlerinin dağılımı.

Kısmi yük altında olduğu için hız üçgenlerinin değişmesine bağlı olarak özellikle çark kanatları etrafında meydana gelen akış hız vektörlerinde düzensizlik görülmesi normal karşılanabilecek bir durumdur. Ancak geleneksel tasarım için elde edilen dağılım ve boru içerisinde türbin için elde edilen hız dağılımları karşılaştırıldığında, boru içerisinde tasarımda meydana gelen düzensizliklerin çok daha az olduğu görülebilmektedir. Akışta meydana gelen düzensizliklerin daha fazla olması sebebiyle geleneksel tasarımda elde edilen türbin verimi özellikle tasarım noktasından uzakta çalışma koşullarında önemli ölçüde azalmaktadır. Verilen şekiller de özellikle verimdeki bu düşüşün sebebini önemli ölçüde açıklamaktadır.

Şekil 3.55'te geleneksel tasarım ve boru içerisinde tasarım için elde edilen, sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı verilmiştir. Şekil 3.55 incelendiğinde salyangoz ilk sabit kanat kesitinde akışın aşırı hızlanması sebebiyle oluşan kayıp gözlenebilmektedir. Ayrıca ayar kanatlarından sonra oluşan iz bölgelerinin boyutlarının arttığı bu sebeple hidrolik kayıpların da aynı doğrultuda arttığı anlaşılmaktadır. Boru içerisinde tasarım için elde edilen toplam basınç dağılımı incelendiğinde oluşan hidrolik kayıpların sadece kanatların kuyruk kenarından sonra oluşan iz bölgeleri sebebiyle meydana geldiği görülebilmektedir. Ayrıca geleneksel tasarımdan elde edilen sonuca kıyasla çok daha ince iz bölgeleri oluşmaktadır. Geleneksel tasarımda yerel alanlarda proba ölçüm yapıldığında minimum 340 kPa düzeylerinde oluşan toplam basınç değeri, boru içerisinde tasarımda 378 kPa düzeylerindedir bu durum da boru içerisinde tasarımla sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan kayıpların azaltıldığının kanıtıdır.



Şekil 3.55 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.

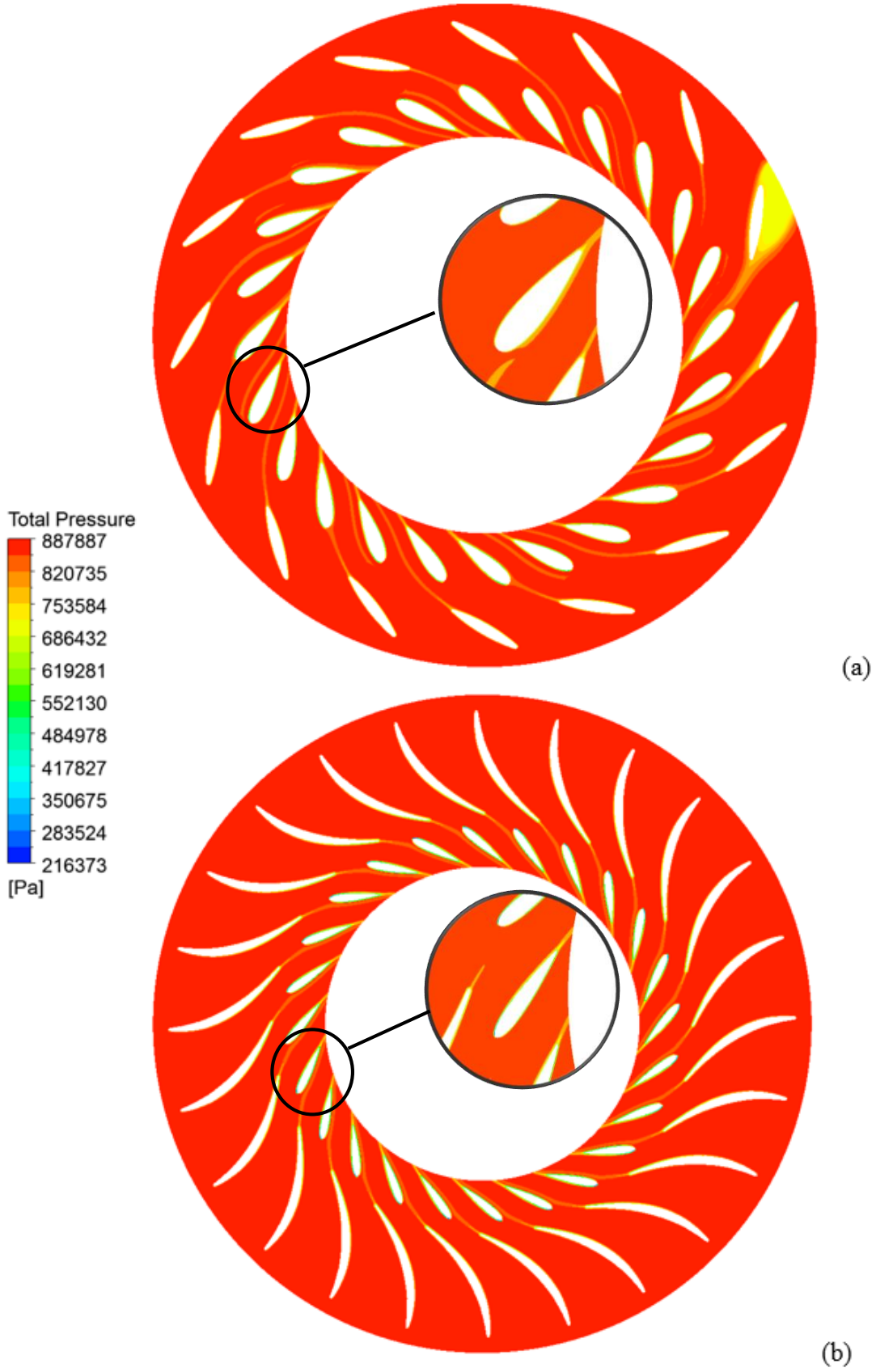
3.4.4 Tam Yük Durumunda Karşılaştırma

Çizelge 3.12’de tam yük durumunda (Ayar kanadı açıklığı $\alpha_0 = 40^\circ$) her iki türbin için elde edilen performans sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.12 : Tam yükte türbinlerin performans verilerinin karşılaştırması.

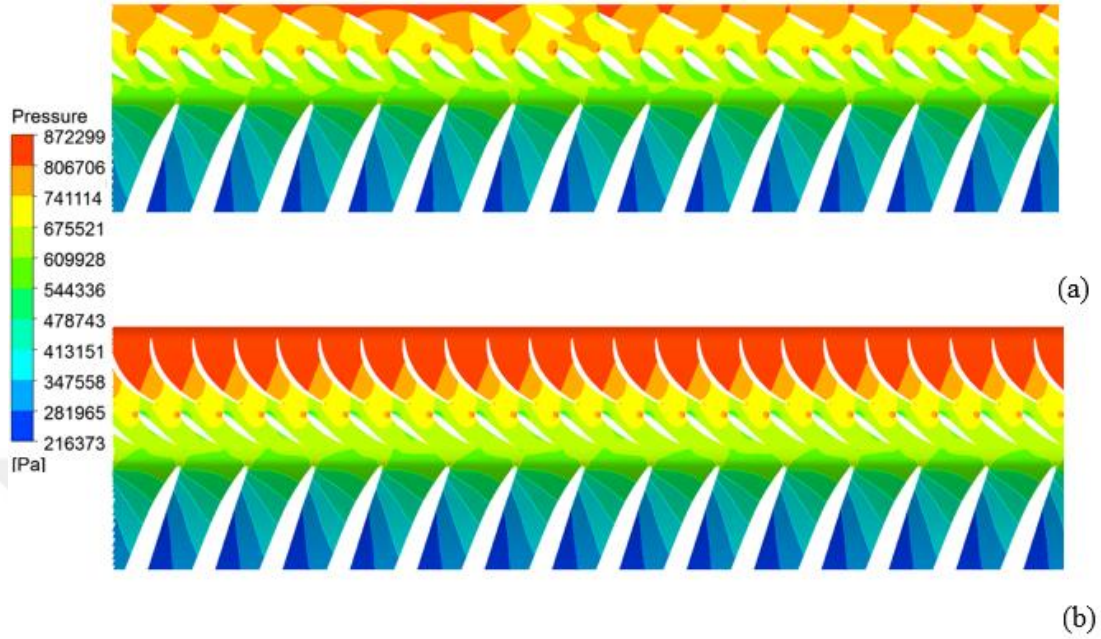
	Geleneksel tasarım türbin	Boru içerisinde türbin
Düşü (Giriş – Çıkış) [m]	78	
Ayar Kanadı Konum Açısı [°]	40	
Hacimsel Debi [m³/s]	2,48	2,61
Şaft Gücü [kW]	1669	1769
Verim [%]	91,8	92,1

Şekil 3.56’da geleneksel tasarım ve boru içerisinde tasarım için elde edilen, sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı verilmiştir. Şekil 3.56 incelendiğinde ilk sabit kanat kesitinde akışın aşırı hızlanması sebebiyle oluşan hidrolik kayıp görülebilmektedir. Ayrıca oluşan hidrolik kayıplar genellikle kanatlardan sonra oluşan iz bölgesi sebebiyle olmakla birlikte, bu iz bölgelerinin kimi sabit kanatlar ve ayar kanatlarında daha büyük bir alanda oluştuğu bu durumun da kayıpları artırdığı bilinmektedir. Ayrıca bazı sabit kanatlardan sonra oluşan iz bölgeleri, ayar kanatları akış alanında da etkisini gösterdiği görülmektedir. Boru içerisinde tasarım için elde edilen toplam basınç dağılımı incelendiğinde oluşan hidrolik kayıpların sadece kanatların kuyruk kenarından sonra oluşan iz bölgeleri sebebiyle meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca geleneksel tasarımdan elde edilen sonuca kıyasla nispeten daha ince iz bölgeleri oluşmaktadır. Geleneksel tasarımda lokal alanlarda proble ölçülen minimum 216 kPa düzeylerinde oluşan toplam basınç değeri, boru içerisinde tasarımda 400 kPa düzeylerindedir bu durum da boru içerisinde tasarımla sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan kayıpların azaltıldığının bir diğer kanıtıdır.



Şekil 3.56 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar ve ayar kanatları etrafında oluşan toplam basınç dağılımı.

Şekil 3.57'de geleneksel tasarım ve boru içerisinde tasarım için elde edilen, sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan basınç dağılımı verilmiştir.



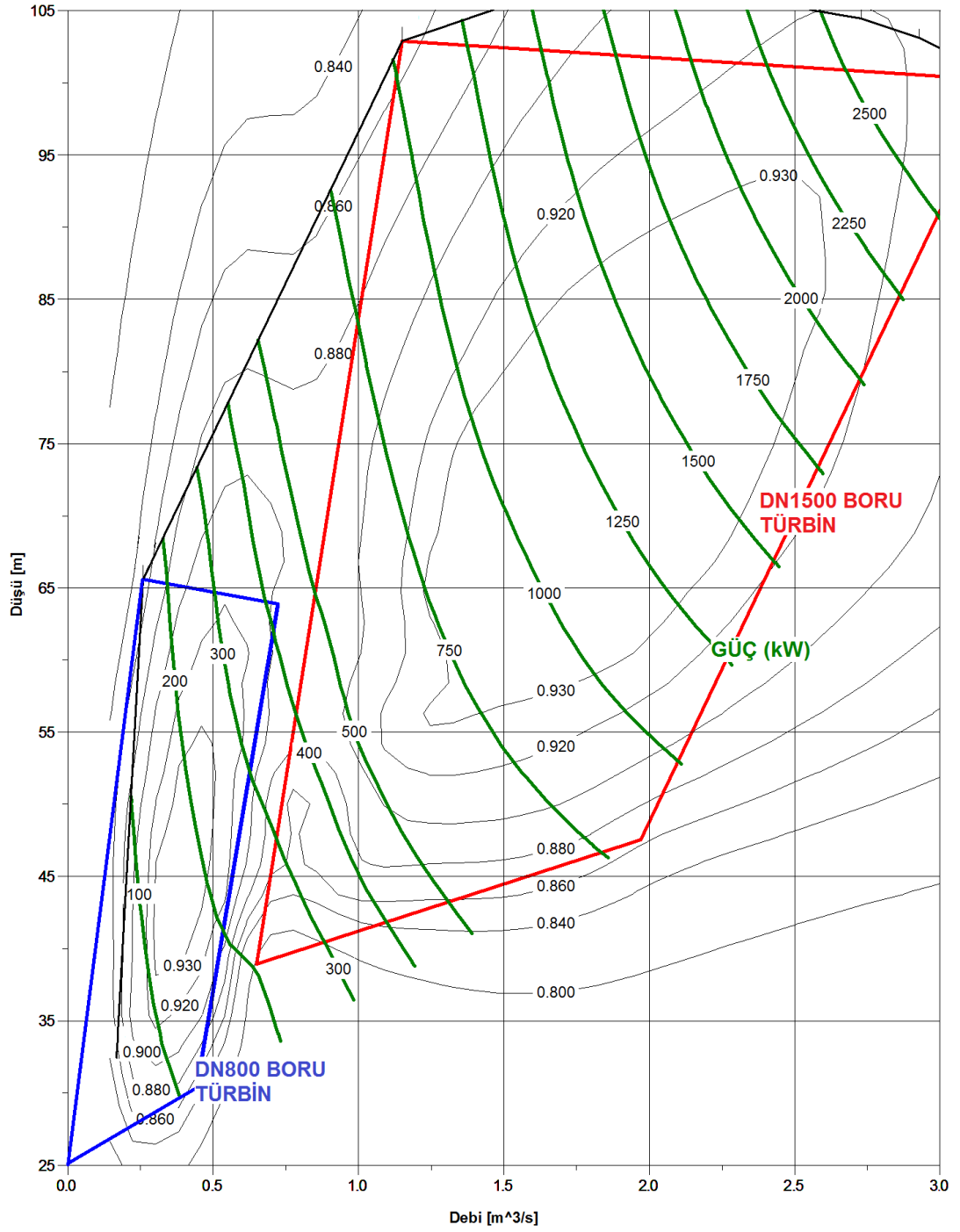
Şekil 3.57 : (a) Geleneksel tasarım ve (b) boru içerisinde tasarım için sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark kanatları etrafında oluşan basınç dağılımı.

Geleneksel tasarım için verilen basınç dağılımı incelendiğinde, özellikle sabit kanatlar etrafında oluşan basınç dağılımının periyodiklik göstermediği ve her kanatta farklı akış koşulları olduğu görülmektedir. Sabit kanatlardan düzensiz bir biçimde ayrılan akış, ayar kanatları etrafında da aynı düzensizliği göstermeye devam etmektedir bu sebeple tüm ayar kanatları etrafında oluşan basınç dağılımları birbirinden farklı olmaktadır. Boru içerisinde tasarım için verilen basınç dağılımı incelendiğinde, tüm sabit kanatlar etrafında periyodik ve birbiriyle uyumlu akış koşullarının olduğu görülmektedir. Aynı periyodik akış koşulları ayar kanatları etrafında da olduğu görülmektedir.

3.5 800 mm Boru Çapına Sahip, Benzerlik Parametreleriyle Tasarlanan Türbin

Aynı tip türbinlerin benzerlik kuralı uygulanarak farklı debi ve düşü aralıklarında aynı verimde çalışabileceği 2. Bölüm'de anlatılmıştır. Boru içerisinde türbin, 620 mm çapında türbin çarkı ve 1500 mm çapında boru için gerçekleştirilmiştir. Daha düşük debi ve düşü aralığında benzerlik kuralı uygulanarak ikinci bir boru içerisinde türbin için daha tüm türbin HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı debi ve düşü

aralığında çalışma aralığını tespit etmek adına tepe diyagramı oluşturulmuştur. 1500 mm boru çapına sahip türbin için çalışma aralığı 110 m ile 50 m düşü ve 0.5 m³/s ile 3.0 m³/s debi olarak oluşturulmuştur. 800 mm çapa sahip boru içerisinde bir türbin için türbin parçaları 1/1.875 oranında ölçeklendirilmiştir. Bu çalışma sayesinde aynı türbin ölçeklendirilerek daha düşük debi ve düşü aralığında da boru içerisinde tasarımın kullanılabileceği gösterilmiştir. Denklem 2.8 kullanılarak 800 mm çapında boru içerisinde türbinin çalışma aralığı 70.4 m, 64 m, 57.6 m 49.92 m 44.8 m, 38.4 m ve 32 m düşü için gerçekleştirilmiştir. Bu düşü değerlerine denk gelen debi aralığı ise 0.1 m³/s ile 0.7 m³/s aralığında gerçekleşmektedir. Ayar kanadı açıklıkları ise aynı şekilde $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$, $\alpha_0 = 25^\circ$, $\alpha_0 = 31^\circ$, $\alpha_0 = 35^\circ$, $\alpha_0 = 40^\circ$ olarak aynı tutulmuştur. Ölçeklendirilerek gerçekleştirilen 800 mm çapında boru içerisinde türbin ile 1500 mm boru içerisinde türbinin tepe diyagramları yaklaşık % 0.5'lik farkla aynı şekilde hesaplanmıştır. Verimdeki %0.5'lik farkın sebebi ise, ölçeklendirildiği için daha dar kesitte ilerleyen akışın viskoz etkilerinin daha baskın olmasıdır ve literatürle uyum göstermektedir [42]. 1500 mm çapında boru içerisinde türbin ile 800 mm çapında boru içerisinde türbin için ortak oluşturulan tepe diyagramı Şekil 3.58'de verilmiştir. Tepe diyagramında verim değerleri siyah izohips eğrileriyle, güç değerleri ise yeşil izohips eğrileriyle gösterilmiştir. Tüm güç değerleri kW biriminden gösterilmiştir. 1500 mm boru içerisinde türbinini çalışma aralığı kırmızı, 800 mm boru içerisinde türbinin çalışma aralığı ise mavi eğrilerle gösterilmiştir.



Şekil 3.58 : 800 mm ve 1500 mm boru içerisinde türbinler için tepe diyagramı.



4. DEĞERLENDİRME

4.1 Tez Çalışmasının Özeti

Bu tez çalışmasında, küçük ve orta ölçekli HES'ler için daha küçük bir tasarıma sahip ve kurulum ve bakım maliyetlerini azaltabilecek yeni bir tasarım olan "Boru içerisinde Francis tipi türbin tasarımı" gerçekleştirilmiştir. Boru içerisinde tasarım ile salyangozda meydana gelen problemleri giderilmektedir. Bu sayede türbinde oluşan hidrolik kayıpları azaltılıp, türbinin yüksek verimde çalıştığı debi ve düşü aralığını genişletilmiştir. Ayrıca akış sebebiyle oluşan titreşim, türbine etkileyen radyal kuvvetlerin artması gibi mekanik problemlerin de önüne geçilmesi öngörülmüştür. Yapılan çalışmalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

Salyangoz kullanılan geleneksel türbin tasarım sürecine benzer şekilde, debi ve düşü değerlerine göre ilk geometrilerin oluşturulduğu ön tasarım ile başlanmıştır. Literatürde yer alan teorik denklemler ve teorik denklemler yardımıyla ayar kanadı, sabit kanat ve boru ilk geometrik ölçüleri belirlenmiştir. Ardından bu ölçüler yardımıyla oluşturulan başlangıç geometrileriyle HAD analizleri yardımıyla üç boyutlu tasarım sürecine başlanmıştır. Tasarımlar parça bazlı olarak gerçekleştirilmiştir böylece oluşan problemlerin daha kısa sürede çözümlenmesi sağlanmıştır. HAD analizleri her bir parça için istenen performans değerleri elde edilene kadar iteratif bir şekilde devam ettirilmiştir.

Parça bazında HAD yardımıyla tasarım tamamlandıktan sonra, öncelikle tasarım debi ve düşüsünde tüm türbin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde sınır koşulu olarak boru girişinde tasarım düşü değeri toplam basınç cinsinden, emme borusu çıkışında ise atmosferik basınç değerleri tanımlanmıştır. Analiz sonucunda parça bazında elde edilen sonuçlar ile tüm türbin analizinden çıkan sonuçların karşılaştırılmış ve fark gözlenmediği görülmüştür. Sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunun tespitinden sonra türbinin farklı debi ve düşü değerleri için çalışma aralığını tespit etmek için farklı ayar kanadı açıklıkları ve düşü değerlerinde tüm türbin analizleri

gerçekleştirilmiştir. Bu sayede türbinin tam yük ve kısmi yüklerde çalıştığı verim değerleri, üretilen güç değerleri, ayar kanadı açıklığı ve düşüye bağlı olarak türbinden geçen debi değerleri belirlenmektedir. Ayrıca türbinin maksimum verimde çalışabildiği debi ve düşü aralığı da tespit edilebilmektedir.

Boru içerisinde tasarımda salyangoz kullanılmamıştır böylece su sabit kanatlara direkt olarak borudan gelmektedir. Sabit kanatlar 90° ile gelen akışı ayar kanadı girişinde istenen 30° 'ye minimum hidrolik kayıpla yönlendirebilmek için yeniden tasarlanmıştır. Sabit kanat sayısı 16'dan 24'e çıkartılmış, kanat uzunluğu artırılmış ve yeni bir kanat kalınlığı tanımlanmıştır. Ayrıca sabit kanatlar eğimli bir kanat yapısı olacak şekilde tanımlanmıştır. Her iki tasarım için de aynı türbin çarkı kullanılmıştır. Aynı şekilde emme borusu geometrisi de her iki tasarımda aynıdır.

Alternatif türbin tasarımı için tepe diyagramı oluşturularak, geleneksel tasarımla elde edilen tepe diyagramı ile karşılaştırılmıştır. Literatürde belirtilenle uyumlu olarak boru içerisindeki türbinin, geleneksel tasarım türbine göre çok daha geniş debi ve düşü aralığında maksimum verimde çalışabildiği gözlenmiştir. Neredeyse tüm ayar kanadı açıklıklarında boru içerisinde türbin maksimum verim değeri olan %93 değerinde çalışabilmektedir. Bu durum da mevsim değişkenlerine göre santrale farklı debi değerlerinde su gelmesi durumunda bile tüm yıl içerisinde türbinin maksimum verimde çalışabileceğinin göstergesidir. Hidrolik avantajının yanında boru içerisinde türbin tasarımı geleneksel tasarıma göre çok daha az yer kaplamaktadır. Bu sayede çok daha küçük santral binalarına ve şebeke suyu yükleme depoları gibi alanlarda boru içerisinde tasarım uygulanabilecektir. HES kurulum maliyetlerinin en önemli ayağı olan santral binası inşaat maliyetinin de azalacağı öngörülmektedir. Ayrıca türbin tasarımı, paftaların oluşturulması ve parçaların üretilmesi, parçaların santral binasına naklieleri ve santralde montajlanması kalemlerinde salyangozun yer almayacak olması da maliyetleri ve tüm bu aşamaların süresini de kısaltacaktır.

4.2 Gelecek Çalışmalar

Bu tez çalışmasında boru içerisinde Francis tipi türbinin geniş bir debi ve düşü aralığında, geleneksel tasarıma kıyasla çok daha yüksek verimde çalışabileceği HAD analizleri yardımıyla gösterilmiştir. Türbin model testleri yardımıyla boru içerisinde türbinin model tasarımı tamamlanıp model testleri gerçekleştirilmelidir. Bu sayede HAD analizlerinin sonuçlarının tutarlılığı tespit edilmeli ve boru içerisinde türbinin

Çalışma aralığının teyidi yapılmalıdır. Boru içerisinde türbin için yapısal dayanım analizleri detaylandırılmalı ve türbinin mekanik sistemlerinin tasarımı da gerçekleştirilmelidir. Ayrıca regülasyon sistemi ve türbin kontrol sistemlerinin de tasarımları gerçekleştirilmelidir. Tüm bu çalışmalar sonucunca küçük ve orta ölçekli yatay eksenli türbin kullanılması düşünülen hidroelektrik santraller için boru içerisinde türbinin üretilip devreye alınması işlemlerinin gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.





KAYNAKLAR

- [1] **Yüksel, İ.**, (2008). Hydropower in Turkey for a clean and sustainable energy future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1622-1640.
- [2] **Kaygusuz, K.**, (2009). Hydropower in Turkey: The sustainable energy future, *Energy Sources, Part B*, 4:34-47.
- [3] **Türkiye Enerji Raporu**, (2012). Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 0021/2012, Ankara.
- [4] **Kavurmaci, B., Akin, H., Ayli, E., Celebioglu, K., Aradag, S.**, (2013). Design of an experimental test stand for Francis type hydraulic turbines, *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkey, 13-17 May.
- [5] **Ayli E., Kaplan A., Cetinturk H., Demirel G., Celebioglu K., Aradag S.**, (2015). CFD Analysis Of 3D Flow For 1.4 MW Francis Turbine And Model Turbine Manufacturing, *35th Computers and Information in Engineering Conference, IDECT/CIE*, Boston, Massachusetts USA, 2-5 August.
- [6] **Krivchenko, G.I.**, *Hydraulic Machines: Turbines and Pumps*, Moscow, Mir Publishers, (1986).
- [7] **Dixon, S.L.**, **Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery**, Elsevier Butterworth–Heinemann, Fifth edition, (1995).
- [8] **Drtna, P., Sallaberger, .**(1999). M., 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, 85-102.
- [9] **Akın, H., Aytaç, Z., Ayancık, F., Ozkaya, E., Arıöz, E., Çelebioğlu, K., Aradağ, S.**, (2013), A CFD aided hydraulic turbine design methodology applied to Francis turbines, *4. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 694-699, Istanbul, Turkey.
- [10] **Celebioglu, K., Okyay, G., Yıldız, M.**, (2012). Design of a Francis turbine for a small hydro power project in Turkey, *Proceedings of the ASME 10. Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA 2010*, İstanbul, Turkey.
- [11] **Raabe, J.**, *Hydropower: The Design, Use, and Function of Hydromechanical, Hydraulic, and Electrical Equipment*, Düsseldorf, VDI-Verlag, (1985).
- [12] **Chembedu G., Sunkara A., Srivastava M.**, (2014). Automizing the design of Francis turbine spiral case, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 2250-3234, Vol. 4, Number 5, pp. 463-472.
- [13] **Chembedu G., Sunkara A.**, (2014). Spiral case shells transportation optimization and automation using UG/KF, *IJRMEE*, April.

- [14] **Bernad S., Susan-Resiga R., Muntean S., Anton I.,** (2006). Numerical analysis of the cavitating flows, *Proceedings of the Romanian Academy, Series A, Vol. 7, Number 1*, pp. 000-000.
- [15] **Song C. C. S., He J., Chen X. Y.,** (1991). Calculation of turbulent flow through a Francis turbine runner and an elbow draft tube, *International Power Generation Conference, San Diego, CA, October*.
- [16] **Susan-Resiga R., Muntean S., Anton I., Bernad S.,** (2003). Numerical investigation of 3D cavitating flow in Francis Turbines, *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03), The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, September*.
- [17] **Augustson T. M.,** Flow conditions in spiral casing and the influence of various bend geometries, *M.Sc. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering, (2013)*.
- [18] **Michel B., Couston M., Sabourin M., Francois M.,** Hydro turbines rehabilitation, erişim adresi: http://encyclopédie-energie.org/sites/default/files/fichiers_joints/articles/art083_Michel-Bernard-Couston-Michel-et-al_Hydro-turbines-rehabilitation.pdf alındığı tarihi 02.10.2015.
- [19] **Brekke H.,** (2010). A review on oscillatory problems in Francis Turbines, *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, Meng Joo Er (Ed.), 978-953-307-212-8.
- [20] Design and Engineering Philosophy for Electro-Mechanical Works of Hydro Power Projects – Best Practices & Bench Marking, erişim adresi: http://www.cea.nic.in/best_practices_hydro.html, alındığı tarih: 05.10.2015.
- [21] **Okyay, G.,** Utilization of CFD Tools in the Design Process of a Francis Turbine, *Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2010)*.
- [22] erişim adresi: <http://www.tanasui.co.jp/productsTurbinesEn.html>, alındığı tarih: 05.02.2015.

- [23] erişim adresi: <http://tanasui.co.jp/image/pdf/Inline%20Linkless%20Hydropower%20brochure.pdf>, alındığı tarih: 05.02.2015.
- [24] **Xiao, H., Yu, B.,** (2010). Hydraulic design of water turbine based on computational fluid dynamics, *International Conference on Electrical and Control Engineering ICECE2010*, 2789-2792, Wuhan, China, Haziran.
- [25] **Kurosawa, S., Lim, S.M., Enomoto, Y.,** (2010). Virtual model test for a Francis turbine, *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Timişoara, Romania, Eylül.
- [26] **Sick, M., Wilson, A.,** (2005). CFD for water turbines: review of the state of the art, *Hydropower and Dams*, Issue Three.
- [27] **Ayancık F.,** Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla su türbini çarkı tasarımı ve eniyilemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2014).
- [28] **Akın H.,** Su türbini tasarımı amaçlı sayısal yöntemler geliştirilmesi ve uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2014).
- [29] MatLab, Sürüm R13, User Manual.
- [30] Mathcad, Sürüm 14.0, User Manual.
- [31] Autodesk Inventor, Sürüm 2014 Help.
- [32] ANSYS Bladegen, Sürüm 15.0, User Manual.
- [33] **Casey, M.V., Keck, H.,** *Hydraulic turbines, Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery*, John Wiley, (1996).
- [34] **Aytaç F., Z.,** Su türbini ayar kanadı tasarım sistemi geliştirilmesi ve çeşitli Francis tipi türbinler için uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2014).
- [35] **Anup K. C., Thapa B., Lee Y.H.,** (2014). Transient numerical analysis of rotor – stator interaction in a Francis turbine, *Renewable Energy* 65, 227-235.

- [36] **Ruprecht A., Heitele M., Helmrich T.**, Numerical simulation of a complete Francis Turbine including unsteady rotor/stator interactions, Institute for Fluid Mechanics and Hydraulic Machinery, University of Stuttgart, Germany.
- [37] ANSYS, Sürüm 15.0, User Manual.
- [38] **Carija, Z., Mrsa, Z.**, (2003). Complete Francis turbine flow simulation for the whole range of discharges, *4. International Congress of Croatian Society of Mechanics*, Bizovac, Croatia, Eylül.
- [39] **Sbardella, L., Sayma, A.I., Imregun, M.**, (2000). Semi-unstructured meshes for axial turbomachine blades, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* Vol. 32, no. 5, 569-584.
- [40] ANSYS CFX Mesh Module, Sürüm 15.0, User Manual.
- [41] ANSYS Turbogrid, Sürüm 15.0, User Manual.
- [42] **International Standard on Hydraulic Turbines**, (1999). Storage Pumps and Pump-turbines, Model Acceptance Tests, IEC 60193.

EKLER

Çizelge Ek 1 : Geleneksel türbin ile boru içerisinde türbin kıyaslama tablosu.

	Geleneksel Francis	Boru İçerisinde Francis
Maliyet	Türbin tipleri arasında en fazla	Geleneksel Francis'e göre salyangoz tasarım, üretim ve nakliye maliyetleri yok
Kurulum Tipi	Yatay ve düşey	Yatay
Çalışma Aralığı	Küçük, orta ve büyük ölçekli HES'ler	Küçük ve orta ölçekli HES'ler
Maksimum Verimde Çalışma Aralığı	Tasarım debi ve düşü aralığında	Çok daha geniş debi ve düşü aralığında
Çevresel Kesitte Debi Dağılımı	- Eşit dağılım sağlamak zor - Düzensiz debi dağılımı kavitasyon riskini artırmakta ve türbine binen radyal kuvvetler artmakta	- Eşit dağılım sağlanmakta - Debi dağılımı sebebiyle oluşabilecek kavitasyon riskinde azalma ve daha düşük radyal kuvvetler
Hidrolik Kayıplar	Daha yüksek	Daha düşük
Verim	Daha düşük (Tüm çalışma aralığında)	Daha yüksek (Tüm çalışma aralığında)
Santral Yerleşimi	Kompleks geometrisi sebebiyle daha kısıtlı yerleşim	Basit tasarım ve jeneratör konumlandırılması istenilen yönde gerçekleştirilebildiği için daha kolay
Uygulama alanları	Nehir tipi HES Barajlı HES	Nehir tipi HES Barajlı HES Su arıtma tesislerine ve şebeke suyu yükleme depolarına daha uygun



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hüseyin Çetintürk
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 27.10.1989 – Nazilli/Aydın
E-posta : husecetinturk@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
2015 -	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Su Türbinleri Tasarım ve Test Merkezi	Mühendis
2013 – 2015	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Su Türbinleri Tasarım ve Test Merkezi	Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2012	TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Stajyer
2011	MAN Türkiye A.Ş.	Stajyer
2011	TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Stajyer

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

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Çetintürk H., Çelebioğlu K., Taşcıoğlu Y., Aradağ S.,** (2016). Inline pipe Francis turbine design, *13th International Scientific Congress Machines, Technologies, Materials*, Borovetz, Bulgaria, 16-19 March.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Çetintürk H.**, Aytaç Z., Taşcıoğlu Y., Çelebioğlu K., Aradağ S., (2014). Design of a Flow Diverter Mechanism and a Nozzle for a Hydro Turbine Experimental Test Rig, *ASME 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Copenhagen, Denmark, 25-27 June.
- Kaplan A., **Çetintürk H.**, Çelebioğlu K., Aradağ S., (2015). Reverse Engineering Design of a Hydraulic Turbine Runner, *IAENG ICME 2015 The 2015 International Conference of Mechanical Engineering*, July 2015.
- Aylı U. 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*, August 2015.
- Aylı U. 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*, November 2014.
- Kaplan A., **Çetintürk H.**, Aylı U. 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*, November 2014.