



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



EĞİMLİ BİR YATAY EKSENLİ RÜZGAR
TÜRBİNİ KANADININ AERODİNAMİK
TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Mehmet Numan KAYA

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Numan Kaya tarafından hazırlanan “Eğimli Bir Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Aerodinamik Tasarımı ve Optimizasyonu” adlı tez çalışması 07/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ünal AKDAĞ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÖSE

Üye

Prof. Dr. Rafet YAPICI

Üye

Prof. Dr. Hüseyin KURT

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup Kara
LEE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 18201027 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Mehmet Numan Kaya

Tarih: 07.01.2019

ÖZET**DOKTORA TEZİ****EĞİMLİ BİR YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANADININ
AERODİNAMİK TASARIMI VE OPTİMİZASYONU****Mehmet Numan Kaya****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÖSE
2. Danışman: Prof. Dr. Oğuz UZOL****2019, 110 Sayfa****Jüri
Prof. Dr. Ünal AKDAĞ
Prof. Dr. Rafet YAPICI
Prof. Dr. Hüseyin KURT
Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÖSE
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA**

Rüzgar enerjisi, dünyada en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olup, enerjide dışa bağılılığı yüksek olan Türkiye için büyük bir öneme sahiptir. Rüzgar türbinlerinin en önemli bileşenlerinden biri rüzgarın sahip olduğu enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren kanatlardır. Kanatların aerodinamik yapıları halen yüksek öneme sahip bir konu olup, üretilen enerji miktarını arttırmak amacı ile çeşitli aerodinamik tasarımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada eğimli bir yatay eksenli rüzgar türbini kanadının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak güç katsayısında artış sağlamak amacı ile tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada 0.94 m rotor çapına sahip bir model rüzgar türbini baz alınarak tasarım uç hız oranında maksimum güç katsayısı eldesi için en uygun eğimli kanat parametreleri, eğiklik başlangıç kesiti ($r_{s/R}$), uç deplasman miktarı (d/R) ve eğiklik mertebesi (M) ve bunlara ek olarak en uygun kanat hatve açısı araştırılmıştır. Öncelikle eğimli kanatlarda eğimin yönü, uç deplasman miktarı ve eğiklik başlama kesitinin güç çıkışına etkisi literatürde deneysel verileri mevcut olan iki adet rüzgar türbini, 10 m rotor çapına sahip Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen NREL Faz II ve 0.9 m rotor çapına sahip Norveç Teknik Üniversitesinde (NTNU) tasarlanan NTNU rüzgar türbini, ile incelenmiştir. Bu aşamada yeni eğimli kanatların tasarımı için her üç parametrenin bağımsız olarak değiştirilebileceği bir denklem geliştirilmiş ve yeni eğimli kanatların tasarımında kullanılmıştır. Parametrik çalışmadan elde edilen ana sonuç, öne eğimli kanatların güç üretimine katkı sağlayabileceği, arkaya eğimli kanatların ise güç üretimine etkisinin negatif olduğu olmuştur. İkinci aşamada optimizasyon işlemine geçilmiş, optimum eğimli kanat parametrelerini bulmak için yanıt yüzey yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanımında, deney tasarımı aşamasında yani ilk popülasyonun oluşturulmasında yüzey merkezli merkezi karma tasarım yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra yanıt yüzeyi oluşturma aşamasına geçilmiş, farklı yöntemler arasından en yüksek başarıyı göstermiş olan Kriging yöntemi ile yanıt yüzeyler oluşturulmuştur. Optimizasyon işleminin son aşamasında ise genetik algoritma yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan optimum eğimli rüzgar türbini kanadı ile tasarım uç hız oranında güç katsayısında %4.28'lik bir artış elde edilmiştir. Bundan sonra tasarlanan optimum kanadın performansı, farklı kanat hatve açılarında test edilmiş ve en uygun kanat hatve açısı bulunmuştur. Tez çalışmasının son aşamasında ise tasarlanan optimum kanadın üretimi yapılmış ve açık jet bir rüzgar tüneli ve model yatay eksenli rüzgar türbini kanadı test düzeneği kullanılarak güç katsayısı – uç

hız oranı ($C_p - \lambda$) eğrisi 0° ve 5° (yukarı) olmak üzere iki adet kanat hatve açısında deneysel olarak çıkarılmış, deneysel çalışma sonuçları ile HAD sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre HAD sonuçları ile deneysel sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada HAD simülasyonları için ANSYS Fluent 17.2 kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Deneysel Akışkanlar Mekaniği, Eğimli kanat, Güç katsayısı, HAD, Rüzgar türbini, YERT.



ABSTRACT**PhD THESIS****AERODYNAMIC DESIGN AND OPTIMIZATION OF A SWEEP
HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE****Mehmet Numan KAYA****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering****Advisor: Assist. Prof. Dr. Faruk KÖSE
Co-Advisor: Prof. Dr. Oğuz UZOL****2019, 110 Pages****Jury
Prof. Dr. Ünal AKDAĞ
Prof. Dr. Rafet YAPICI
Prof. Dr. Hüseyin KURT
Assist. Prof. Dr. Faruk KÖSE
Assist. Prof. Dr. Şükrü Ulaş ATMACA**

Wind energy is one of the most applied renewable energy sources and it has a crucial importance for our country since Turkey has a very high energy import ratio. One of the most important elements of wind turbines are wind turbine blades which convert the wind energy to mechanical energy. Aerodynamic designs of blades are still an important topic and various blade designs are available in order to increase the produced energy. In this study, design and optimization of a swept horizontal axis wind turbine blade performed in order to increase the power production by using Computational Fluid Dynamics (CFD) method. A rotor with 0.94 m is used as a baseline, and optimum design parameters, sweep begin section ($r_{s/R}$), tip displacement (d/R) and sweep strength (M), additionally the pitch angle, were investigated in order to find optimum parameters to maximise the power coefficient at the design tip speed ratio. Firstly, effect of sweep direction, tip displacement and sweep begin section on power was investigated using two horizontal axis wind turbines, NREL Phase II wind turbine that has a rotor diameter of 10 m and NTNU model wind turbine that has a rotor diameter of 0.9 m, which have experimental data available. At this time, an equation that allows to change sweep begin section, tip displacement and sweep strength independently is developed in order to desing new swept blades. According to the results of the parametric study, an important outcome was obtained: increase in power coefficient can be obtained using forward swept blades while backward swept blades have negative effect on power production. After that optimizatón was performed using a meta model based method, response surface method. Face Centered Central Composite Design method was used as the design of experiments method. After that response surfaces are created using the Kriging method which showed best accuracy among various methods. As the final step of the optimization, optimum parameters were found using genetik algorithms. A significant boost in power coefficient, namely 4.28% is obtained at the design tip speed ratio using optimal baldes After that the performance of the designed optimal blade is tested with various pitch angles to find the optimum pitch angle. In the final stage of this study, the optimal swept blade was produced and experimentally tested at two pitch angles, 0° and 5° (up), using an open jet wind tunnel and a model wind turbine test system, and

the results were compared with CFD simulation results. According to the comparison, it is observed that experimental results are in a good agreement with CFD results. In the study, ANSYS Fluent 17.2 was used for CFD simulations.

Keywords: Aerodynamic, CFD, Experimental Fluid Mechanics, HAWT, Power coefficient, Swept blade, Wind turbine.



ÖNSÖZ

Rüzgar enerjisi, enerji ihtiyacının yüksek bir kısmını ithal eden ülkemiz için ve fosil yakıtların kullanımlarının olumsuz etkilerine maruz kalan dünyamız için önemlidir. Rüzgarın enerjisini önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine dönüşmesini sağlayan rüzgar türbinlerinin en önemli bileşenleri kanatlarıdır. Kanatların aerodinamik yapıları, enerji dönüşüm verimliliği hususunda önem arz etmektedir. Kanatların aerodinamik tasarımlarında ve kanat etrafındaki akışın incelenmesinde yüksek doğruluğu nedeniyle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yönteminin kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu tez çalışmasında da HAD yöntemi ile eğimli bir rüzgar türbini kanadının aerodinamik tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır.

Tezimin hazırlanmasında beni yönlendiren ve her zaman destekleyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Faruk Köse hocama ve yardımlarını esirgemeyen ikinci danışmanım Prof. Dr. Oğuz Uzol'a çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarında ve öncesinde bana yardımcı olan Yaşar Ostrovan ve Hooman Amiri'ye çok teşekkür ederim.

Beni yurt içi 2211-c bursu ile ve İngiltere Sheffield Üniversitesindeki çalışmalarım için yurt dışı 2214-a bursu ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) çok teşekkür ederim.

Genel olarak çalışmalarında bana yardımları dokunan ve yanımda olan akademisyen arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Muharrem Hilmi Aksoy, Arş. Gör. Sercan Doğan ve Arş. Gör. Sercan Yağmur'a teşekkür ederim. Ayrıca İngiltere sürecinde aynı grupta beraber çalışma fırsatı bulduğum meslektaşım Yunus Çelik'e teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan anne ve babama, çalışmalarında manevi desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen eşime ve aramıza yeni katılan kızıma teşekkür ederim. Bundan sonraki paragraf teşekkür edeceğim kişiler yabancı oldukları için İngilizce yazılmıştır.

I would like to thank to Prof. Dr. Derek Ingham who was very kind and helpful to me during my studies at the University of Sheffield and Prof. Dr. Lin Ma who always supported me with my studies. In addition I would like to thank to Prof. Dr. Mohamed Pourkashanian who has incorporated me into the Energy 2050 research group. Lastly, I would like to thank to my colleague Mohamed El Sakka from the Energy 2050 research group who helped me a lot.

Mehmet Numan Kaya
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Rüzgar Enerjisi	2
1.2. Rüzgar Türbinleri.....	5
1.2.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)	5
1.2.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT).....	6
1.3. Rüzgar Türbini Aerodinamiği.....	8
1.3.1. Kanat Profili.....	11
1.3.2. YERT Kanatlarında Aerodinamik Kuvvetler ve Hızlar	12
1.3.3. Kanat Elemanı Momentum Teorisi.....	12
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi	23
3.1.1. Süreklilik ve Navier Stokes denklemleri	23
3.1.2. Türbülans Modelleri	24
3.1.3. Sınır Şartları.....	27
3.1.4. Son İşleme.....	28
3.2. Genetik Algortima ile Optimizasyon	28
4. YERT KANATLARINDA EĞİMİN YÖNÜ, BAŞLAMA KESİTİ VE UÇ DEPLASMAN MİKTARININ AERODİNAMİK ETKİSİNİN İNCELENMESİ..	30
4.1. NREL FAZ II Rüzgar Türbini	30
4.1.1. HAD Metodolojisi ve Doğrulama.....	31
4.1.2. Yeni Tasarlanan Eğimli Kanatlar	37
4.1.3. HAD Simülasyon Sonuçları.....	39
4.2. NTNU Model Rüzgar Türbini	40
4.2.1. HAD Metodolojisi ve Doğrulama.....	41
4.2.2. Yeni Tasarlanan Eğimli Kanatlar	44
4.2.3. HAD Simülasyon Sonuçları.....	45

4.3. Parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlar	52
5. OPTİMİZASYON.....	53
5.1. Tasarım Parametreleri.....	54
5.2. İlk Popülasyonun Oluşturması - Deney Tasarımı.....	57
5.3. HAD Analizleri.....	58
5.4. Yanıt Yüzeyi.....	60
5.5. Optimizasyon Sonuçları.....	62
5.6. Referans ve Optimum Eğimli Kanatların Karşılaştırılması.....	65
5.7. Kanat Hatve Açısı Çalışması: En Uygun Hatve Açısının Bulunması	76
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	79
6.1. Rüzgar Türbini Kanatlarının Üretimi	79
6.2. Rüzgar Tüneli Ve Deney Düzeneği	80
6.3. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar	84
6.4. Deneysin Belirsizlik Analizi	87
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
7.1. Sonuçlar	89
7.2. Öneriler	90
KAYNAKLAR	92
EKLER	98
EK-1. Farklı iki adet case dosyasını okuyup 4 farklı türbülans modeli ve iki adet rüzgar hızında FLUENT simülasyonu için kodlanmış journal dosyası.....	98
EK-2. Uç hız oranları $\lambda = 2,3,4,6,9$ ve 11 değerlerinde FLUENT simülasyonu için kodlanmış journal dosyası.	102
EK-3. Örnek bir çözüm ağı resmi ve yaklaşık ağ kaliteleri.....	106
EK-4. Örnek bir kanat üzeri çözüm ağı resmi	107
EK-5. Kanat etrafı hız vektörleri	108
ÖZGEÇMİŞ	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

α	: hücum açısı ($^{\circ}$)
β	: kanat hatve açısı ($^{\circ}$)
c	: veter uzunluğu (m)
A	: süpürme alanı (m^2)
d	: uç deplasman miktarı (m)
k	: türbülans kinetik enerji (m^2/s^2)
ε	: dissipasyon oranı
ω_v	: çevrinti (vortisite) büyüklüğü (1/s)
g	: yerçekimi ivmesi (m/s^2)
C_D	: sürüklenme katsayısı (Denklem 1.9)
C_L	: kaldırma katsayısı (Denklem 1.8)
C_p	: basınç katsayısı (Denklem 1.11)
C_P	: güç katsayısı (Denklem 1.5)
C_T	: itme katsayısı (Denklem 1.7)
F_n	: eksenel kuvvet (N)
F_L	: kaldırma kuvveti (N)
F_D	: sürüklenme kuvveti (N)
F_T	: itme kuvveti (N)
F_R	: bileşke kuvvet (N)
P	: güç (W)
r	: kanat üzeri belli bir kesitin radyal uzaklığı (m)
r_r	: kesitin radyal uzaklığı (m)
r_{ss}	: eğiklik başlangıç kesitinin radyal uzaklığı (m)
ρ	: havanın yoğunluğu (kg/m^3)
R	: kanat yarıçapı (m)
Re	: Reynolds sayısı
U	: hız (m/s)
U_{∞}	: serbest akış hızı (m/s)
λ	: uç hız oranı (Denklem 1.4)
M	: eğiklik mertebesi
Ω	: dönme hızı (rad/s)
Q	: tork (Nm)
p	: statik basınç (Pa)
p_{∞}	: serbest akış basıncı (Pa)
P_r	: radyal uzaklığın kanat yarıçapına oranı
P_R	: rüzgar gücü (W)
$P_{r_{ss}}$: eğiklik başlama kesitinin radyal uzaklığının kanat yarıçapına oranı
P_s	: uç deplasman miktarının kanat yarıçapına oranı
μ	: dinamik viskozite ($kg/m\ s$)
ν	: kinematik viskozite (m^2/s)
u	: x yönündeki akış hızı (m/s)
v	: y yönündeki akış hızı (m/s)
w	: z yönündeki akış hızı (m/s)
V_R	: bağıl rüzgar hızı (m/s)
V_D	: dönme nedeniyle oluşan hız (m/s)
\vec{V}	: hız vektörü

$\bar{\sigma}$: gerilme tensörü
 t : zaman (s)

Kısaltmalar

BEM	Kanat Elemanı Momentum Metodu
BT	Basınç Tarafı
DERT	Dikey Eksenli Rüzgar Türbini
ET	Emme Tarafı
GWEC	Uluslararası Rüzgar Enerjisi Birliği
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
MKT	Merkezi Karma Tasarım
LHÖ	Latin Hiperküp Örnekleme
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NS	Navier-Stokes
RANS	Reynold Ortalamalı Navier-Stokes
RMSE	Ortalama Hataların Ortalama Karelerinin Karekökleri
RT	Rüzgar Türbini
RÜZGEM	Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi
SA	Spallart-Allmaras
SIMPLE	Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı-Kapalı Yöntem (Semi-Implicit Method for Pressure Lined Equations)
YAW	Rüzgar türbinini rüzgar yönüne döndüren mekanizma
YEGM	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Türkiye'nin rüzgar eneri potansiyeli (YEGM, 2018).....	4
Çizelge 4.1. NREL Faz II rüzgar türbinine ait özellikler.....	30
Çizelge 4.2. Deneysel sonuçlar ile HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması	33
Çizelge 4.3. Eğimli kanatlar kullanılarak hesaplanan tork ve itme kuvveti değerlerinin referans rüzgar türbini için hesaplanan değerler ile karşılaştırılması	39
Çizelge 4.4. Çözüm ağı bağımsızlığı çalışması	43
Çizelge 4.5. Yeni tasarlanan eğimli kanatlar	45
Çizelge 4.6. Eğimli kanatlar ile elde edilen güç katsayısı (C_p) değerlerinin referans rüzgar türbinin değerine göre değişimleri.....	47
Çizelge 5.1. Örnek bir eğimli kanada ait (f1801-1.25) sapma değerleri.....	56
Çizelge 5.2. Oluşturulan deney tasarımı	58
Çizelge 5.3. Çözüm ağı bağımsızlığı çalışması	59
Çizelge 5.4. Farklı yanıt yüzeyi yöntemlerinin RMSE değerleri	60
Çizelge 5.5. Optimum eğimli kanat değişkenleri	62
Çizelge 5.6. Düz kanat ve optimum eğimli kanat ile elde edilen güç katsayılarının karşılaştırılması	64
Çizelge 6.1. Model rüzgar türbini bileşenleri ve boyutları.....	81
Çizelge 6.2. Deneysel ölçüm verileri.....	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. İlk rüzgar türbinleri: Brush (sol) ve La Cour (sağ) rüzgar türbini (Spera, 1994; Righter, 1996)	3
Şekil 1.2. 100 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı (YEGM, 2018)	4
Şekil 1.3. Türkiye'deki kurulu rüzgar gücünün yıllara göre değişimi (TREB, 2018)	5
Şekil 1.4. YERT bileşenleri (Cotrell, 2002)	6
Şekil 1.6. Sınır tabaka oluşumu ve gelişimi (Schlichting ve Gersten, 2016)	10
Şekil 1.7. Ters basınç gradyanı ve akış ayrılması (Anonymous, 2005).....	10
Şekil 1.8. Kanatlarda uç girdabı (Abdulrahim, 2014).....	11
Şekil 1.9. Kanat profili (Yükselen, 2017).....	11
Şekil 1.10. YERT kanatlarında aerodinamik kuvvetler ve hızlar (Kulka, 2004).....	12
Şekil 1.11. İdeal bir diskten geçen tek boyutlu akış (Ostovan, 2017)	13
Şekil 1.12. Dairesel akım tüpü (Banga, 2018)	14
Şekil 1.13. Kanat elemanı teorisi (Ingram, 2011).....	15
Şekil 1.14. Kanat elemanına etkiyen kuvvetler (Banga, 2018)	16
Şekil 2.1. Sandia Laboratuvarları tarafından tasarlanan rüzgar türbini kanadı (Ashwill, 2010).....	17
Şekil 2.2. Suzuki ve ark. (2011) tarafından test edilen boyuna eğimli rüzgar türbini kanatları	18
Şekil 2.3. Maggio ve ark. (2011) tarafından test edilen konfigasyonlar	18
Şekil 2.4. Hansen (2011) tarafından yapılan çalışmada kullanılan eğimli rüzgar türbini kanatları ve güç değişimlerinin karşılaştırılması	20
Şekil 3.1. Örnek bir simülasyon için hesaplama bölgesinin giriş ve çıkışındaki debi değerleri	28
Şekil 4.1. NREL Faz II kanadında kullanılan s809 profili ve kanat hatve açısı	30
Şekil 4.2. NREL Faz II kanadı üzeri basınç ölçümü noktaları	31
Şekil 4.3. NREL Faz II kanadı 3 Boyutlu çizimleri.....	31
Şekil 4.4. Sınır şartları	32
Şekil 4.5. 7.2 m/s rüzgar hızında kanat üzeri basınç dağılımı	34
Şekil 4.6. 10.56 m/s rüzgar hızında kanat üzeri basınç dağılımı	34
Şekil 4.7. 7.2 m/s rüzgar hızında farklı kanat kesitlerindeki HAD ile hesaplanmış basınç dağılımının deneysel veriler ile karşılaştırılması	35
Şekil 4.8. 10.56 m/s rüzgar hızında farklı kanat kesitlerindeki HAD ile hesaplanmış basınç dağılımının deneysel veriler ile karşılaştırılması	36
Şekil 4.9. Düz kanatlı (sol) ve f5005 kanatlı (sağ) rotorlar	37
Şekil 4.10. NREL Faz II rüzgar türbini baz alınarak yeni tasarlanan eğimli kanatlar	38
Şekil 4.11. S826 kanat profili (Krogstad ve Lund, 2012).....	40
Şekil 4.12. NTNU rüzgar türbini kanadı veter uzunlukları dağılımı (Krogstad ve Lund, 2012)	40
Şekil 4.13. NTNU rüzgar türbini kanadı burulma açıları dağılımı (Krogstad ve Lund, 2012)	40
Şekil 4.14. NTNU model rüzgar türbini kanatlarının 3-Boyutlu çizimi	41
Şekil 4.15. Kanat üzerindeki çözüm ağından resimler	42
Şekil 4.16. Kanat üzeri sınır tabakası ve ters basınç gradyanı oluşumu (y^+ 'ın önemi)..	42
Şekil 4.17. HAD ile elde edilmiş güç katsayılarının (C_p) deneysel veriler karşılaştırılması	44
Şekil 4.18. Yeni tasarlanmış eğimli kanatların çizimleri	46

Şekil 4.19. Öne eğimli (üst) ve arkaya eğimli (alt) kanatlar ile güç katsayısı (C_P) ve itme katsayısının (C_T) eğiklik başlama kesiti (r_{ss}/R) ve uç deplasman miktarına (d/R) bağlı olarak değişimleri ($\lambda=6$).....	48
Şekil 4.20. Referans ve f1520 kanatlı rüzgar türbinlerinin $C_P - \lambda$ eğrilerinin karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.21. Referans ve f1520 kanatlı rüzgar türbinleri için basınç dağılımları ($\lambda=6$) ...	49
Şekil 4.22. Radyal (a), teğetsel yönde (b) ve akış yönünde (c) boyutsuz kuvvet dağılımları grafikleri ($\lambda=6$)	50
Şekil 4.23. Düz (sol) ve optimum (sağ) kanatlar için uç girdapların çevrinti eş-yüzeylerinin (yukarı $\omega_v=70\text{ s}^{-1}$, aşağı $\omega_v=2500\text{ s}^{-1}$) karşılaştırılması ($\lambda=6$).....	51
Şekil 5.1. Optimizasyon prosedürü.....	53
Şekil 5.2. Optimizasyon parametrelerinin kanat üzerinde gösterimi.....	54
Şekil 5.3. Her bir kesitte merkez ekseninden sapmanın gösterimi	55
Şekil 5.4. Sabit uç deplasman miktarı ve eğiklik başlangıç kesitine sahip örnek bir kanat için farklı eğiklik mertebelerine bağlı deplasman miktarının değişiminin grafiksel gösterimi	55
Şekil 5.5. Farklı eğiklik mertebelerine bağlı deplasman miktarının değişiminin sabit uç deplasman miktarı ve eğiklik başlangıç kestine sahip örnek bir kanat üzerinde gösterimi	56
Şekil 5.6. Deney tasarımına ait parametrik şekil	57
Şekil 5.7. HAD sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	59
Şekil 5.8. Güç katsayısının (C_P), $M- d/R$ (üst), $r/R-d/R$ (orta), $M-r/R$ (alt) ile ilişkisini gösterecek örnek yanıt yüzeyler	61
Şekil 5.9. Düz referans (sol) ve optimum eğimli kanatlı (sağ) rüzgar türbinlerinin çizimleri	62
Şekil 5.10. Girdi parametrelerinin, eğiklik başlangıç kesiti (r_{ss}/R), uç deplasman miktarı (d/R) ve eğiklik mertebesi (M), çıktı parametresine etkileri	63
Şekil 5.11. Düz kanat ile optimum eğimli kanatların güç katsayısı – uç hız oranı eğrilerinin karşılaştırılması	63
Şekil 5.12. Farklı grafikler ile düz (kırmızı) ve optimum eğimli (mavi) kanatların karşılaştırılması.....	64
Şekil 5.13. Radyal (a), teğetsel yönde (b) ve akış yönünde (c) boyutsuz kuvvet dağılımları ($\lambda=6$)	65
Şekil 5.14. Farklı uç hız oranlarında düz ve optimum kanatlar üzeri basınç konturları. 67	
Şekil 5.15. Referans (düz) ve optimum kanatlar için farklı kesitlerde, $r/R=0.25, 0.50, 0.80, 0.95$, basınç dağılımları ($\lambda=6$).....	69
Şekil 5.16. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlı rotor arkası akış hız konturları ($\lambda=6$)	70
Şekil 5.17. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlı rotorlar için farklı mesafelerde hız konturları ($\lambda=6$).....	70
Şekil 5.18. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlı rotorların 0.025 m arkasındaki hız konturlarının detay gösterimi.....	71
Şekil 5.19. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlar için farklı uç hız oranlarında yüzey akım çizgileri	71
Şekil 5.20. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlar için $r/R=0.5$ 'de hız vektörlerinin gösterimi ($\lambda=4$)	72
Şekil 5.21. Düz ve optimum kanatlar için 3 boyutlu aksenal akım çizgileri ile uç girdaplarının karşılaştırılması ($\lambda=6$)	73
Şekil 5.22. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v=70\text{ 1/s}$ değerinde karşılaştırılması ($\lambda=6$).....	73

Şekil 5.23. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 100$ 1/s değerinde karşılaştırılması ($\lambda=6$)	74
Şekil 5.24. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 2500$ 1/s değerinde karşılaştırılması ($\lambda=6$)	75
Şekil 5.25. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 2500$ 1/s değerinde çevrinti konturlarıyla birlikte karşılaştırılması ($\lambda=6$)	75
Şekil 5.26. Yukarı yönde ve aşağı yönde kanat hatve açısı	76
Şekil 5.27. Farklı kanat hatve açılarında uç hız oranına (λ) bağlı olarak güç katsayısı (C_p) değişimi	77
Şekil 5.28. Farklı kanat hatve açılarında $\lambda=5-7$ arası güç katsayısı değişimi	77
Şekil 5.29. Farklı kanat hatve açılarında $\lambda=2-3$ arası güç katsayısı değişimi	78
Şekil 5.30. Farklı kanat hatve açılarında itme katsayısı (C_T) değişimi	78
Şekil 6.1. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen kanat	79
Şekil 6.2. CNC ile işleme yöntemi ile üretilmiş alüminyum kanatlar	80
Şekil 6.3. Model rüzgar türbini bileşenleri ve resimleri (Abdulrahim, 2014; Ostovan, 2017)	81
Şekil 6.4. LabView programından örnek bir ekran görüntüsü	82
Şekil 6.5. Açık jet rüzgar tünelinin kısımları (Abdulrahim, 2014)	82
Şekil 6.6. Açık jet rüzgar tüneli resimleri	83
Şekil 6.7. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	83
Şekil 6.8. Balans ayarı	84
Şekil 6.9. Deneysel ve HAD ile elde edilmiş güç katsayılarının (C_p) uç hız oranına (λ) bağlı değişimlerinin karşılaştırılması	86

1. GİRİŞ

Enerji, sahip olduğu önem nedeniyle üzerinde durulan konulardan biridir. Bu alanda daha çok üzerinde durulan konu enerjinin daha verimli bir şekilde elde edilebilme ihtimalidir. Aslında enerji üretiminin kast edilen enerjinin dönüşümüdür. Bilindiği gibi enerjinin korunumu kanununa göre enerji yoktan var edilmez, var olan enerji de yok edilemez, sadece bir şekilden diğerine dönüşür (Cengel ve Boles, 2002). Rüzgar enerjisinin faydalı enerjiye dönüştürülmesi ise çoğunlukla rüzgar türbinleri tarafından türbin kanatları vasıtasıyla gerçekleştirilir. Kanatlar aerodinamik yapıları sayesinde havadan aldıkları enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürler. Bu nedenle kanatların aerodinamik yapıları önemli olup, rüzgar türbini verimini doğrudan etkilemektedirler (Hansen, 2015). Kanatların aerodinamik yapılarında iyileştirme yapmak için sadece deneysel çalışma yapmak çok maliyetli ve zordur. Günümüzde bu sorunun üstesinden gelinmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımları oldukça sık kullanılmaktadır (Carcangiu, 2008). Bu programlar ile sanal ortamda sayısal çözümleme yapılmakta, hız, basınç ve kuvvet gibi farklı parametreler incelenebilmektedir. HAD yöntemi kullanılarak rüzgar türbini kanatları etrafındaki akış yapıları incelenebilir ve üretilecek güç miktarı yaklaşık olarak hesaplanabilir (Hansen, 2015; Hau, 2017). Bu sayede aerodinamik tasarımda gerekli değişiklikler yapılarak verim artışı sağlanabilmektedir. Bunun avantajı üretim sürecine geçmeden deneysel çalışmaya göre zaman ve maliyet açısından büyük tasarruflar elde edilebilmesidir (Wang ve ark., 2017; Aksoy, 2018). HAD yöntemi ile elde edilen sonuçların doğruluğu kullanılan yöntemlere göre değişebilir. Bu nedenle HAD yöntemi yapılan tasarımların deneysel olarak doğrulanması önerilir (Hau, 2017). Rüzgar türbini kanatları ile ilgili deneysel çalışmalarda genellikle rüzgar tünelleri kullanılır. Rüzgar tünelleri ile gerekli olan rüzgar belli hızlarda temin edilerek istenilen testler gerçekleştirilebilir (Abdulrahim, 2014).

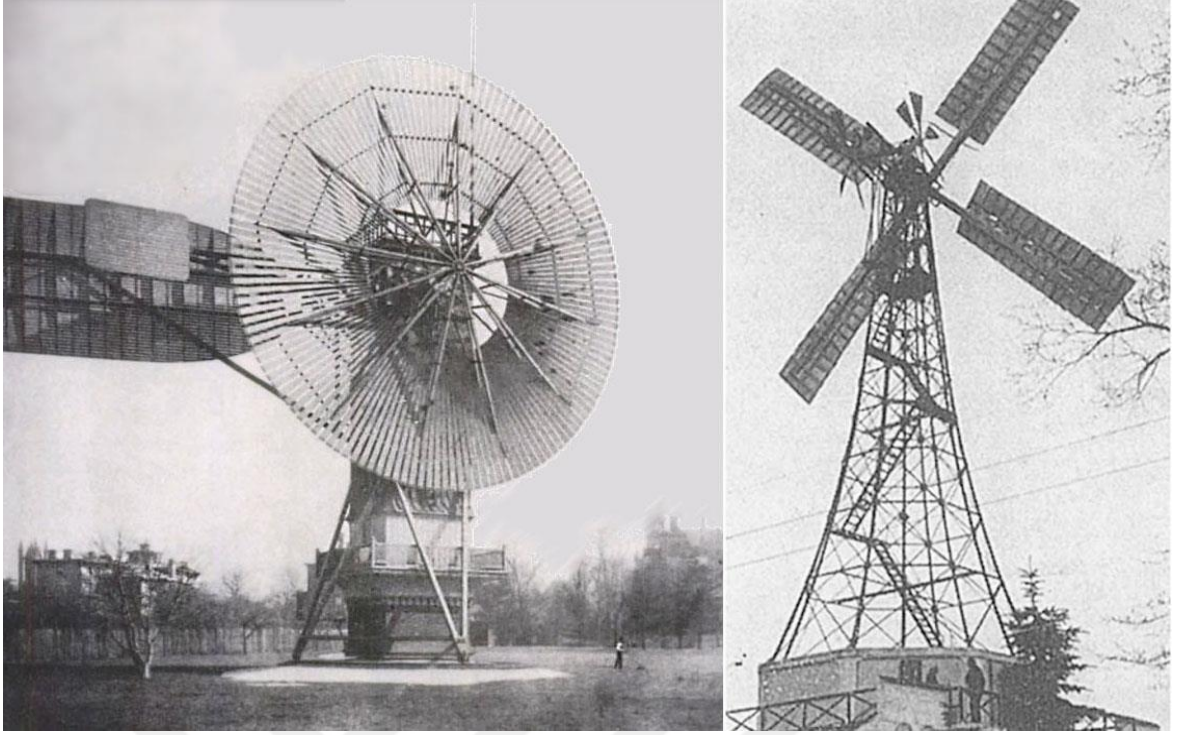
Bu tez çalışmasında HAD yöntemi kullanılarak eğimli bir YERT kanadının aerodinamik tasarımı ve optimizasyonu yapılmış, deneysel olarak test edilmiştir. Tasarlanan kanada ait ana tasarım parametreleri rotor çapı 0.94 m, kanat sayısı 3, uç hız oranı 6, rüzgar hızı 11.5 m/s'dir. İlk bölümde, rüzgar enerjisi konusunda genel bir bilgi verilmiş, rüzgar türbini aerodinamiğine değinilmiştir. İkinci bölümde konu ile ilgili kaynak araştırması verilmiş, konunun özgünlüğüne değinilmiştir. Üçüncü bölümde HAD yöntemi ile ilgili bilgiler verilmiş, dördüncü bölümde ise bir parametrik çalışma yapılarak parametrelerin aerodinamik etkileri incelenmiştir. Beşinci bölümde yanıt yüzey metodu

ile yapılan optimizasyon çalışması anlatılmıştır. Altınca bölümde ise deneysel çalışma ve sonuçları verilmiş, ayrıca deneysel sonuçlar ile HAD sonuçları karşılaştırılmıştır.

1.1. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi uzun yıllardır karada ve denizde önemli bir enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Tam olarak ne zaman olduğu bilinmese de rüzgar enerjisinin 3000 yıldan fazla bir tarihi olduğu belirtilmektedir (König, 1976). Yel değirmenlerinin, tarihin en eski buluşlarından olduğu düşünülmekte olup en eski yel değirmenlerine İran bölgesinde rastlanmıştır. Bu bölgede araştırma yapan arkeologlar beşinci asra kadar geriye giden ve sulama amaçlı kurulmuş yel değirmeni su pompaları bulmuşlardır. Yel değirmenleri daha sonra dünyanın çeşitli ülkelerinde görülmüştür. Avrupa'da on dördüncü yüzyılda, Amerika da ise yirminci yüzyılda bunların örnekleri görülmüştür (Haktanır, 2001).

Bilinen ilk elektrik üretimi amaçlı rüzgar türbini santrali A.B.D. Cleveland Ohio'da bulunan 1888 yılında Charles F. Brush tarafından geliştirilen 12 kW nominal güç, 17 m rotor çapına ve 18 m kule yüksekliğine sahip Brush rüzgar türbinidir. Aynı yıllarda Danimarkalı Profesör Paul La Cour bir çalışma yapmış 1891 yılında rüzgar elektriğini üreten ilk kişilerden olmuş, ancak 1918 yılından sonra dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları bir kenara bırakılmıştır (Spera, 1994; Heymann, 1995; Righter, 1996). İkinci dünya savaşında yaşanan enerji sıkıntısı nedeniyle rüzgar enerjisi kullanımı tekrar dünyada gündeme gelmiştir. Bundan sonra çeşitli rüzgar türbinleri üretilerek denenmiştir. Bunlara örnek olarak 1942 yılında üretilen 17.5 m pervane çaplı ve 50 kW nominal güçlü Smidth rüzgar türbini ve 1957 yılında üretilen 24 m pervane çaplı ve 200 kW nominal güçlü Gedser rüzgar türbini verilebilir (Hau, 2017). 1990 yılından sonra başta Almanya olmak üzere Avrupa'da rüzgar türbini teknolojisi hızla gelişmiş, 1992 yılında Tacke-Windtechnik adlı firma ilk 500 kW güce sahip rüzgar türbinini üretmiştir. Bunu ENERCON adlı firmanın yaptığı üretimler izlemiş, bu firma 1996 yılında 66 m rotor çapına sahip ilk 1,5 MW gücündeki rüzgar türbinini üretmiştir. Günümüzde artık 100 m rotor çapına ve 2 MW üzeri bir güce sahip rüzgar türbinleri kullanılabilir hale gelmiştir (Nurbay ve Çınar, 2005). Rüzgar enerjisinin tarihçesi hakkında detaylı bilgi Golding (1956), Righter (1996), Spera (1994) Hau (2017) kaynaklarda bulunabilir.



Şekil 1.1. İlk rüzgar türbinleri: Brush (sol) ve La Cour (sağ) rüzgar türbini (Spera, 1994; Righter, 1996)

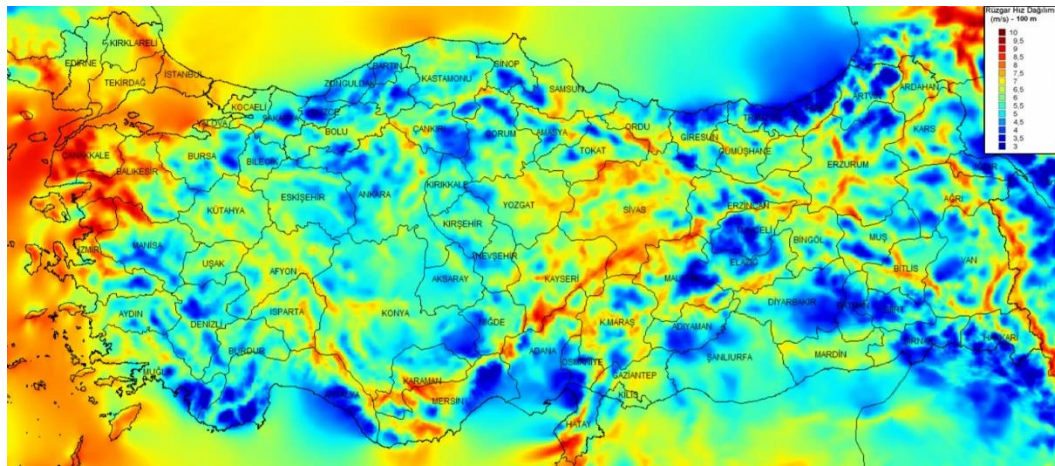
Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı fosil yakıtların dünyamızı kirletmesi nedeniyle günden güne artmaktadır. Bu bağlamda ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimini arttırmak için çeşitli hedefler koymuşlardır. Örneğin Türkiye, enerji bakanlığının 2015-2019 stratejik planında yenilenebilir enerjinin kullanımında 2013 verilerine göre iki kat artış hedeflemiştir (Kose ve Kaya, 2013; Anonim, 2014; Kaya ve Köse, 2016). Verimli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisine 2023 yılında 20 GW kurulu güç hedefi ile öncül bir rol verilmiştir (Kaya ve ark., 2017). Bunun önemli bir nedeni, rüzgar enerjisinin en verimli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olması ve Türkiye'nin de önemli bir rüzgar potansiyeline sahip olmasıdır. Çizelge 1.1'de rüzgar enerjisi seviyelerine göre 50 m yükseklikte Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli ve bu potansiyelin farklı hız seviyelerine göre kapladığı alan verilmiştir (YEGM, 2018). Buna göre rüzgar enerjisi potansiyeli, rüzgar hızının 7 m/s'den yüksek olduğu bölgelerde potansiyeli 48 GW olup, bu değer günümüz teknolojik gelişmeler ile birlikte ekonomik olarak fizibil hale gelen 6.5 -7 m/s rüzgar hızına sahip bölgeler hesaba katıldığında yaklaşık 130 GW'a çıkmaktadır (Kaya ve Köse, 2016; Kaya ve ark., 2017; YEGM, 2018). Dünya yüzeyinde oluşan sınır tabaka nedeniyle yükseklik arttıkça ortalama rüzgar hızı da buna bağlı olarak artmaktadır. Dikkat edilmesi gereken husus Çizelge 1.1'deki rakamların 50 m yükseklikte yapılan rüzgar hızı ölçümlerine

dayanmasıdır. Daha fazla rüzgardan yararlanmak için rüzgar türbini kule yükseklikleri gün geçtikçe artmakta olup günümüzde artık 100 m kule yüksekliğine sahip rüzgar türbinleri standart hale gelmiştir.

Çizelge 1.1. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli (YEGM, 2018)

Rüzgar seviyesi	Rüzgar sınıfı	50 m yükseklikte rüzgar gücü (W/m^2)	50 m yükseklikte rüzgar hızı (m/s)	Toplam alan (km^2)	Alanın oranı	Enerji potansiyeli (MW)
Ortalama	3	300-400	6.5-7	16,781.39	2.27	83,906
İyi	4	400-500	7-7.5	5,851.87	0.79	29,259.36
Çok iyi	5	500-600	7.5-8	2,598.86	0.35	12,994.32
Mükemmel	6	600-800	8-9	1,079.98	0.15	5,399.92
İnanılmaz	7	>800	>9	39.17	0.01	195.84
Toplam				26.351,28	3.57	131,756.40

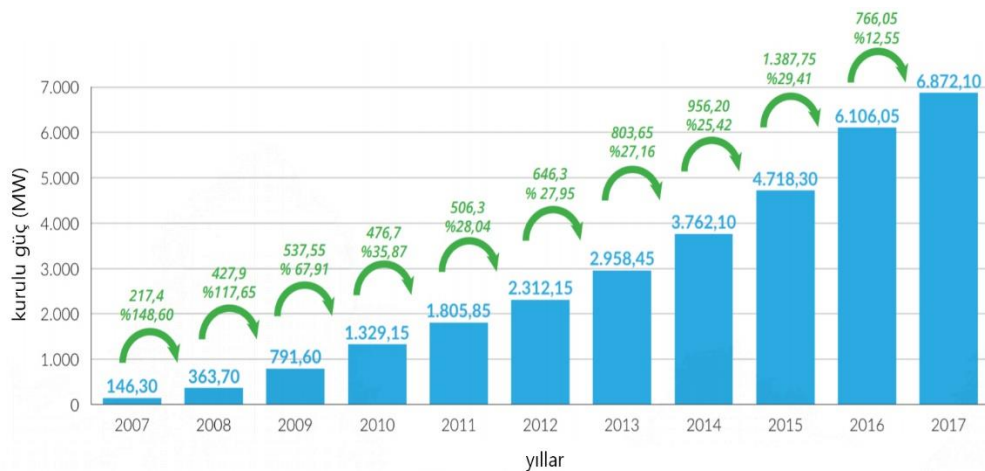
Şekil 1.2'de 100 m yükseklikte ortalama rüzgar hızı dağılımı gösteren Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) verilmiştir (YEGM, 2018). REPA'dan görülebileceği gibi Türkiye, ciddi bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Özellikle Ege bölgesinin kuzey ve batı kısımları, Marmara bölgesinin batı kısmı, İç Anadolu bölgesinin batı, güney ve doğu kısımları ve Doğu Anadolu bölgesinin batı kısımları potansiyelleri bakımından dikkat çekmektedirler. Bunun yanında deniz üstü rüzgar türbini kurulumları için özellikle Karadeniz ve Ege Denizinin sahil kısımlarına yakın bölgelerinde verimli bölgelerin olduğu görülmektedir.



Şekil 1.2. 100 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı (YEGM, 2018)

Türkiye'nin rüzgar enerjisi kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 1.3'te Türkiye'deki kurulu rüzgar gücünün yıllara göre değişimi verilmiştir (TREB, 2018). 2007 yılında sadece 146 MW olan kurulu güç miktarı, 2017 sonunda 6.87 GW'a çıkarak 10 yılda

yaklaşık 50 kat artış göstermiştir. Her yıl %25-30 civarında olan artış miktarı, sadece 2017 yılında yaklaşık %12 olup, bu yılda toplamda 766 MW güce sahip rüzgar türbini kurulumu yapılmıştır.



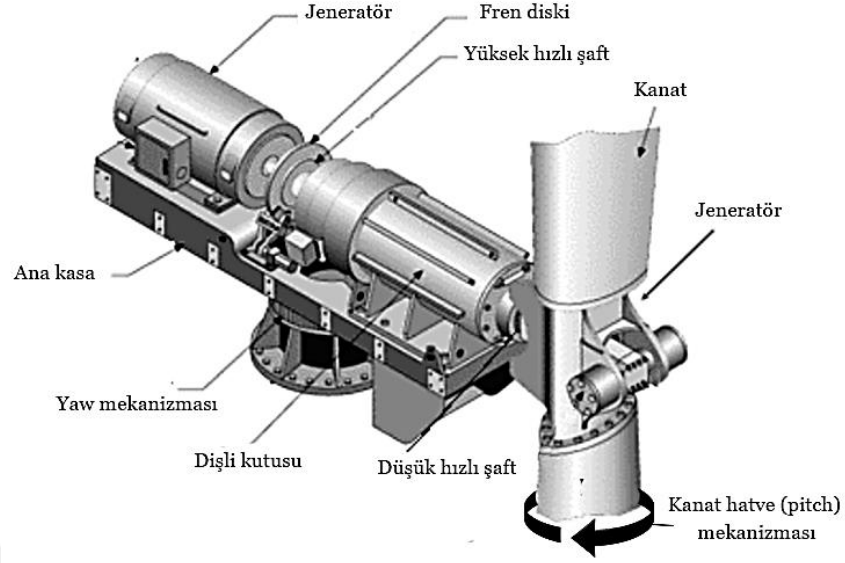
Şekil 1.3. Türkiye’deki kurulu rüzgar gücünün yıllara göre değişimi (TREB, 2018)

1.2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinlerinin görevi rüzgar enerjisini mekanik enerjiye ve mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine çevirmektir. Rüzgar türbinleri genel olarak dönme eksenlerine bağlı olarak sınıflandırılırlar. Bunlar yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinlerdir.

1.2.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)

Bu türbinlerde; dönme eksenli rüzgar yönüne paralel olup rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. YERT’ler çoğunlukla üç kanatlı olup iki kanatlıları da mevcuttur. Çift Kanatlı Rüzgar Türbinlerin maliyeti üç kanatlılara göre düşük olup rotorlarının balansı daha düzgündür. Bu RT’nin gürültü seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgar hızlarında çalıştırılmaması dezavantajdır (Nurbay ve Çınar, 2005). Üç kanatlı rüzgar türbinleri verim ve maliyet açısından iki ve çok kanatlı rüzgar türbinlerine göre daha avantajlıdır. Bu nedenle en çok bu tip YERT’ler uygulanmaktadır (Nurbay ve Çınar, 2005). Yatay Eksenli Rüzgar türbinleri genel olarak kanatlar, kule, jeneratör, dişli kutusu, elektrik-elektronik elemanlardan oluşurlar. Şekil 1.4’te YERT bileşenleri gösterilmiştir (Cotrell, 2002).



Şekil 1.4. YERT bileşenleri (Cotrell, 2002)

Rüzgar türbinlerinde en önemli görevlerden birini kanatlar üstlenmektedir. Kanatlar, rüzgar türbinini aerodinamik çalışmalarında odak noktası olup rüzgar enerjisinin etkisiyle dönerek, mekanik enerji elde edilmesine olanak sağlarlar. Günümüzde rüzgar türbinini kanatların çoğunluğu fiber glass malzemeden yapılıyor olup, karbon fiber gibi malzemeler de kullanılabilir. Kanat uzunlukları günümüzde 50 m'den fazla olabilmektedir. Tek parça olarak taşınmaları gerekli olduğu için kanatların taşınmasında büyük zorluklar çıkmaktadır. Yaw mekanizması, türbinlerde rotorun hakim rüzgar yönüne doğru dönmesini sağlayan mekanizmadır. Kule, rüzgar türbinini taşıyan ana gövde rotor ise kanatlar ve kanatları birleştiren merkezdir. Fren diski, fırtına gibi acil durumlarda rotoru durdurmaya yarar. Kanat hatve (pitch) mekanizması sayesinde, rüzgar hızı değişimine bağlı olarak kanatların rüzgara karşı gelen açıları değiştirilerek rüzgarın oluşturduğu kaldırma kuvveti değişir ve buna bağlı olarak hız kontrolü ve çıkış gücü kontrolü yapılabilir (Ergür, 2006). YERT'lerde kayıplar genel olarak mekanik ve elektriksel kayıplar olarak ikiye ayrılabilir. Bu türbinlerde mekanik verim yaklaşık %96.8 olup kayıpların yaklaşık %0.4'ü yataklama, yaklaşık %2.8'i ise dişli kutusu nedeniyle oluşmaktadır. Jeneratör verimleri ise yaklaşık %96.5'tur (Hau, 2006; Koç ve Şenel, 2015).

1.2.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT)

Bu tip türbinlerde türbin mili dikeydir ve dönme eksenini yere diktir. En önemli çeşitleri savonius ve darrieus tipi DERT'lerdir. Bu tip türbinler üzerine araştırmacılar tarafından birçok geliştirme yapılmasına rağmen ticari kullanımları çok azdır.

DERT'lerin YERT'lere göre avantajları kule masraflarının az olması, rüzgarı her yönden alabilmeleri, bakım ve onarımlarının daha kolay olması ve enerji naklinin toprak seviyesine yakın olmaları nedeniyle daha kolay yapılmasıdır. Dezavantajları ise verimlerinin düşük olması, yere yakın oldukları için rüzgar hızlarının düşük olması ve ilk hareket motoruna ihtiyaç duymalarıdır (Hau, 2006).

Savonius tipi rüzgar türbinleri, Sigurd J. Savonius tarafından geliştirilmiş olup, kanat adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır. Rüzgar etkisiyle çarkı oluşturan silindirin iç kısmında pozitif ve dış kısmında negatif bir moment oluşmaktadır. Pozitif moment negatif momentten daha büyük olacağından dönme hareketi meydana gelir (Ushiyama ve Nagai, 1988). Diğer DERT'lere göre; düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahip olması, yapımının kolay ve ucuz olması, rüzgarın yönünden bağımsız olması ve kendi kendine ilk harekete başlaması gibi birçok üstünlüklere sahip olan Savonius RT'lerinin, aerodinamik performansı düşük olduğu için ilk uygulama alanları; havalandırma, su pompalama gibi kısıtlı alanlar olmuştur.

Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbininde ise düşey şekilde yerleştirilmiş iki veya üç tane kanat vardır. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips şeklinde yerleştirilmiştir. H-rotorlar ise Darrieus rotorların bir çeşidi olarak kabul edilebilir. Bu tip DERT'lerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları tüm kesitler benzer olduğu için basitlik sağlamak amacı ile iki boyutlu olarak yapılabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda HAD analiz yöntemlerinin de gelişmeleriyle beraber araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde araştırılır hale gelmiştir. Ancak diğer DERT'ler de olduğu gibi H-rotor'ların da ticari kullanımı yok denecek kadar azdır. Şekil 1.5'te soldan sağa doğru Darrieus, Savonius ve H-rotor DERT resimleri verilmiştir (Hau, 2006; Nelson, 2013).



Şekil 1.5. Soldan sağa; Darrieus, Savonius, H-tipi DERT (Hau, 2006; Nelson, 2013)

1.3. Rüzgar Türbini Aerodinamiği

Rüzgar türbinlerinde rüzgar enerjisi, kanatlar yardımıyla önce mekanik enerjiye, daha sonra ise jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Dünyada kullanılan rüzgar türbinlerinin çoğunluğu yatay eksenli rüzgar türbinleridir. YERT'ler için hareket eden hava akışındaki güç (rüzgar gücü) aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir

$$P_R = \frac{1}{2} \rho A U_\infty^3 \quad (1.1)$$

Burada U_∞ (m/s) havanın hızı, A süpürme alanını (m^2), ρ ise havanın yoğunluğunu (kg/m^3) vermektedir. Akış ile ilgili çalışma ve analizlerde karşımıza en çok çıkan boyutsuz sayılardan birisi Reynolds sayısıdır. Viter uzunluğu c (m) olan bir kanat profili için Reynolds sayısı, hız (m/s) ve viter uzunluğu çarpımının kinematik viskozitesine, ν (m^2/s), oranına eşittir.

$$Re = \frac{Uc}{\nu} \quad (1.2)$$

Rüzgar türbini performans ölçümlerinde genel olarak uç hız oranına (TSR) bağlı olarak güç ve/veya itme katsayısı eğrileri kullanılır. Uç hız oranı, λ , rüzgar hızı ve kanat uç kısımları arasındaki ilişkiyi gösteren boyutsuz bir katsayı olup, dönme hızının, Ω (rad/s), kanat yarı çapı, R (m), ile çarpımının akış hızına (U_∞) bölünmesiyle elde edilir.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \quad (1.3)$$

Güç katsayısı, C_P , rüzgar türbini rotorundan geçen havanın enerjisi ve elde edilen güç arasındaki ilişkiyi gösteren bir boyutsuz sayıdır.

$$C_P = \frac{P}{0.5 \rho A U_\infty^3} \quad (1.4)$$

Rotordan üretilen güç $P(W)$, tork Q (Nm) değerinin, dönme hızı Ω (rad/s) ile çarpımı ile elde edilir.

$$P = Q\Omega \quad (1.5)$$

Rüzgar türbininden elde edilecek elektriksel güç çıkışı (P_E) ise rotor gücünün mekanik verim (η_m) ve jeneratör verimi (η_e) ile çarpımı ile elde edilir (Koç ve Şenel, 2015).

$$P_E = P \eta_m \eta_e \quad (1.6)$$

İtme katsayısı C_T ise itme kuvvetinin (F_T , N), dinamik kuvvete bölünmesi ile elde edilir (Manwell ve ark., 2010).

$$C_T = \frac{F_T}{0.5 \rho A U_\infty^2} \quad (1.7)$$

Aerodinamik analizlerde kaldırma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısı (C_D) olarak kullanılan iki önemli boyutsuz katsayı vardır. Kaldırma katsayısı ve itme katsayısı denklemleri sırasıyla Denklem 1.8 ve 1.9'da verilmiş olup, bu denklemlerde F_L ve F_D sırasıyla kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini ifade etmektedir.

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho A U_\infty^2} \quad (1.8)$$

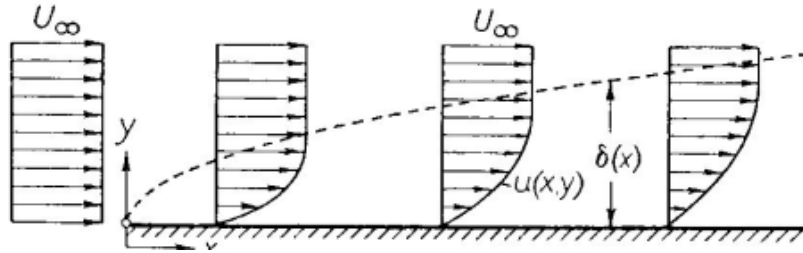
$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho A U_\infty^2} \quad (1.9)$$

Kanatlarda kayma gerilmesi aşağıdaki denklem ile ifade edilir. Burada μ akışın fiziksel bir özelliği olan viskozitedir.

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} \quad (1.10)$$

Katı bir cisim etrafındaki akış düşünüldüğü zaman, kayma gerilmesi duvara yakın kısımlarda akış hızını azaltacaktır, bu etki duvara dik mesafe arttıkça azalacaktır. Bu da

sınır tabaka oluşumuna neden olacaktır. Sınır tabaka kalınlığı; hızın, akış hızının %99'una ulaştığı dik uzaklık olarak tanımlanabilir (Schlichting ve Gersten, 2016).

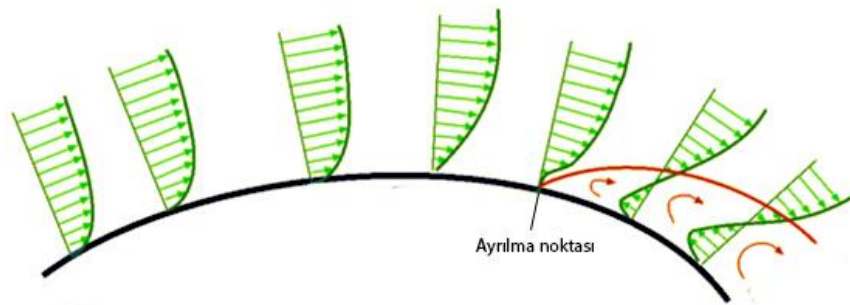


Şekil 1.5. Sınır tabaka oluşumu ve gelişimi (Schlichting ve Gersten, 2016)

Kanatlarda kullanılan diğer önemli bir değişken ise basınç katsayısıdır. Basınç katsayısı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir. Basınç katsayısı genelde kanatların bazı kesitlerindeki basınç dağılımını incelemek için kullanılır.

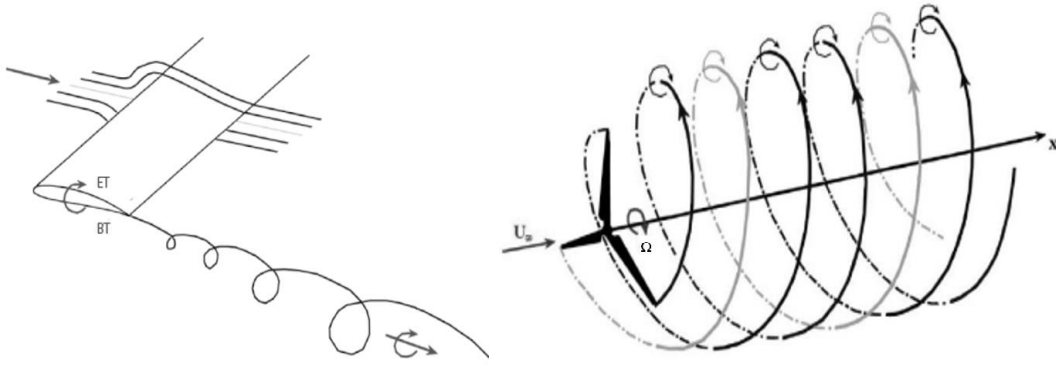
$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho U^2} \quad (1.11)$$

Durma noktasında hız sıfır olur ve buna bağlı olarak basınç katsayısı değeri de $C_p=1$ olur. Durma noktasından itibaren akış, düşük basınca doğru hareket ederek hızlanmaya başlar. Yüzey boyunca azalan bu basınç gradyanına, $\frac{dp}{dx} < 0$, negatif basınç gradyanı denir. Durma noktasından belli bir mesafe sonra minimum basınca ulaşılır ve akış ters basınç gradyanına, $\frac{dp}{dx} > 0$, maruz kalmaya başlar. Viskoz kuvvetler akışın enerjisini azaltarak yüzeye yakın akış hızını sıfıra düşürür, hatta ters yöne dönmesine neden olur (Karlsen, 2009). Bu da aerodinamik açıdan akış yapısına önemli etkisi olan akış ayrılması olayına neden olur.



Şekil 1.6. Ters basınç gradyanı ve akış ayrılması (Anonymous, 2005)

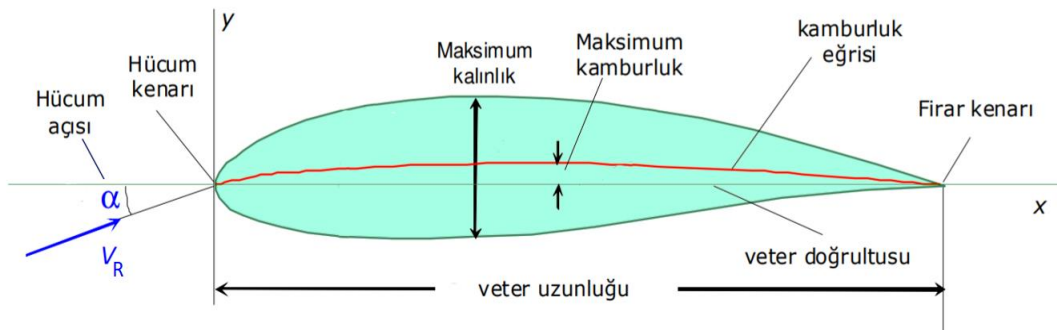
Rüzgar türbini kanadı aerodinamiğini ilgilendiren diğer bir olay ise uç girdabıdır. Akış kanadın üzerinden geçerken emme tarafında (ET) hızlanırken basınç tarafında (BT) yavaşlar, bu da iki yüzey arasında basınç farkına neden olur. Bu basınç farkı kanat ucunda basınç tarafından emme tarafına doğru hava hareketlerine neden olur. Bu hava hareketleri akış ile birleşince Şekil 1.8’de görülen uç girdabı adı verilen yapıyı oluştururlar.



Şekil 1.7. Kanatlarda uç girdabı (Abdulrahim, 2014)

1.3.1. Kanat Profili

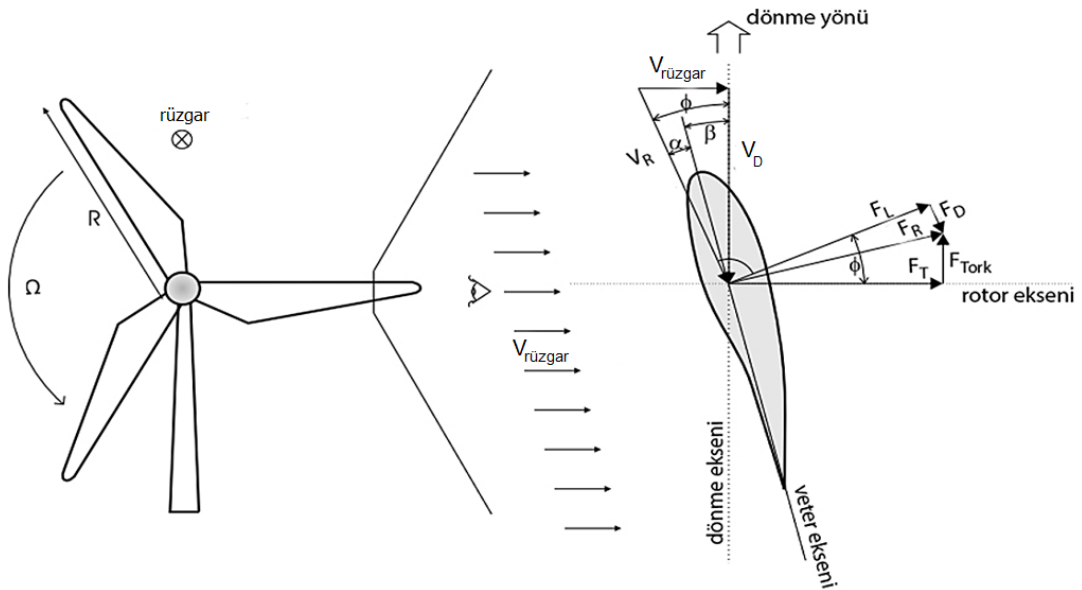
Kanat profili, özel şekli sayesinde rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çeviren yapı veya tasarım olarak tanımlanabilir. Kanat profilleri farklı uygulamalar için farklı şekillerde olabilirler. Rüzgar türbini kanatlarından kesit alınarak kanat profili görülebilir. Kanat profilinin akışın geldiği kalın tarafına hücum kenarı, sivri tarafına ise firar kenarı denir. Hücum kenarı ve firar kenarı arasındaki mesafeye veter uzunluğu, doğrultuya ise veter doğrultusu denir. Veter doğrultusu ile bağlı rüzgar hızı (V_R) doğrultusu arasındaki açı hücum açısı olarak adlandırılır. Kamburluk hattı ise profilin alt ve üst yüzeyinin tam ortasındaki noktaları birleştiren hattır (Yükselen, 2017).



Şekil 1.8. Kanat profili (Yükselen, 2017)

1.3.2. YERT Kanatlarında Aerodinamik Kuvvetler ve Hızlar

Rüzgar türbini kanatlarında, rüzgar hızı ($V_{\text{rüzgar}}$) ve dönme nedeniyle oluşan hız (V_D) nedeniyle bağıl rüzgar hızı (V_R) oluşur. Bu hızın veter eksenine yaptığı açısı (α) hucüm açısı olup, veter eksenine ile dönme eksenindeki açısı (β) kanat hatve açısı ile yerel burulma açısının toplamını ifade eder. Bağıl rüzgar hızına dik olan kuvvet kaldırma kuvveti (F_L) olup, paralel olan kuvvet ise sürüklenme kuvvetidir (F_D). Bunlara ek olarak rüzgarın geliş yönünde olan kuvvet itme kuvvetini (F_T) ifade eder. Şekil 1.10'da tüm bu ifadeler şekil üstünde açıklanmıştır (Kulka, 2004).



Şekil 1.9. YERT kanatlarında aerodinamik kuvvetler ve hızlar (Kulka, 2004)

1.3.3. Kanat Elemanı Momentum Teorisi

Kanat Elemanı Momentum Teorisi, tek boyutlu momentum teorisi ve kanat elemanı teorisi olmak üzere iki teorinin birleşimi ile oluşur.

1.3.3.1. Tek Boyutlu Momentum Teorisi

Bu teori rüzgar türbinlerinin çalışma prensibini açıklamaya yardımcı olan bir teoridir (Ostovan, 2017). Bu teoride akışın sürekli, sıkıştırılmaz ve simetrik olduğu, viskoz olmadığı kabulü yapılır (Bangga, 2018). Teoriye göre rotordan geçen havanın kinetik enerjisinde bir miktar azalma olur. Rotora gelen hava hızı rotordan sonra uzak bir bölgede ortalama U_w değerine düşer. Bu sırada ortam basıncı P_∞ rotordan hemen önce P_d^+ basıncına yükselir, rotordan sonra aniden P_d^- basıncına düşer. Daha sonra basınç tekrar P_∞

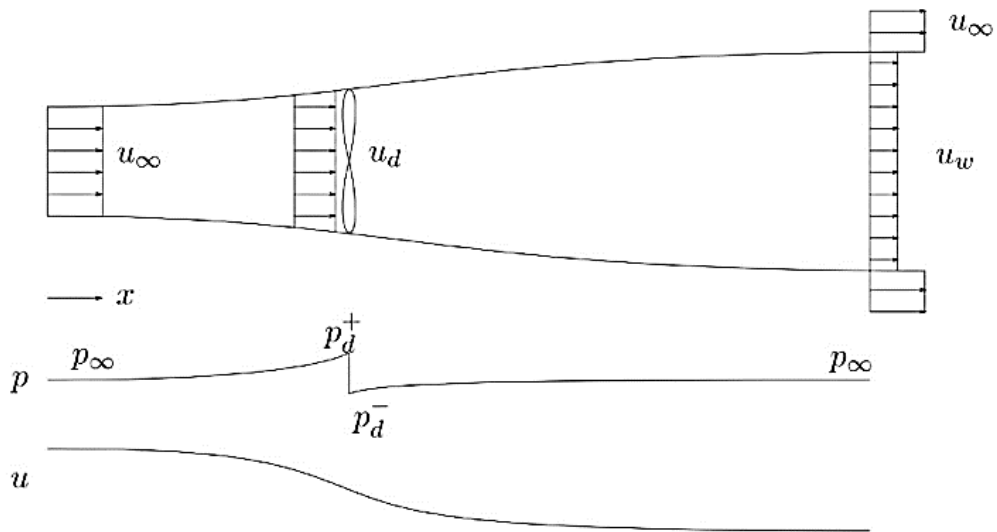
olarak ortam değerine döner (Ostovan, 2017). Momentum korunumdan aksenal kuvvet (F_n) Denklem 1.12 ile verilebilir (Ostovan, 2017; Bangga, 2018). Denklem 1.12’de bulunan ($P_d^+ - P_d^-$)’yi yani rotordan hemen önce ve sonraki basınç farkını bulmak için, biri P_∞ ortam basıncına sahip kontrol hacmi girişi ile P_d^+ basıncına sahip rotorun hemen öncesi (Denklem 1.13), diğeri P_d^- basıncına sahip rotorun hemen arkası ile yine P_∞ ortam basıncına sahip kontrol hacmi çıkışı arası olmak üzere (Denklem 1.14) iki adet Bernoulli denklemi yazılır (Bangga, 2018). Elde edilen basınç farkı Denklem 1.12 ile birleştirilirse Denklem 1.15 elde edilir (A_d diskin süpürme alanı). Ayrıca Denklem 1.12’nin sağ tarafındaki eşitlik ile Denklem 1.15 eşitlenirse, Denklem 1.16’deki aksenal akış faktörü (a) ifadesi elde edilir. Bununla birlikte aksenal kuvvet Denklem 1.17 şeklinde yazılabilir (Sørensen, 2016, Bangga, 2018).

$$F_n = (P_d^+ - P_d^-)A_d = \dot{m}(U_\infty - U_w) \quad (1.12)$$

$$P_\infty + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 = P_d^+ + \frac{1}{2}\rho U_d^2 \quad (1.13)$$

$$P_d^- + \frac{1}{2}\rho U_d^2 = P_\infty + \frac{1}{2}\rho U_w^2 \quad (1.14)$$

$$F_n = \frac{1}{2}\rho A_d (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (1.15)$$



Şekil 1.10. İdeal bir diskten geçen tek boyutlu akış (Ostovan, 2017)

$$a = \frac{U_\infty - U_d}{U_\infty} \quad (1.16)$$

$$F_n = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a) \quad (1.17)$$

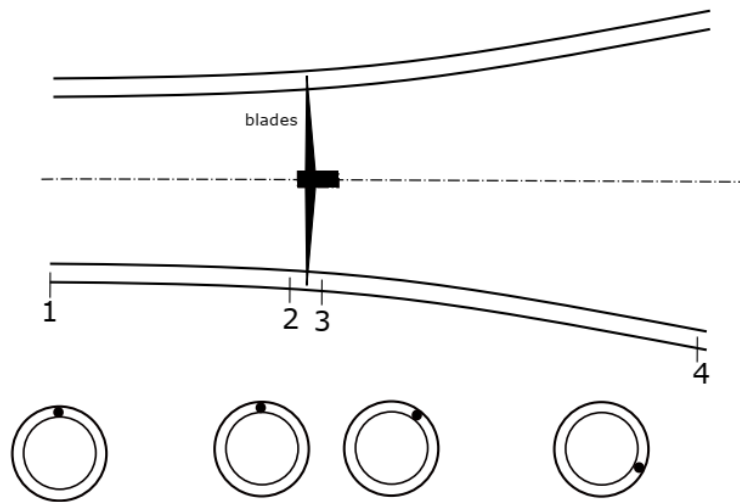
Elde edilen güç (P), Denklem 1.18’de olduğu gibi verilebilir. Ayrıca bu güç Denklem 1.19’da verilen eşitliğe eşit olup, ikisinin birleştirilmesiyle Denklem 1.20 elde edilir. Son olarak güç katsayısı ise aksenal akış faktörü a kullanılarak Denklem 1.21’deki gibi yazılabilir. Denklem 1.21’nin a ’ya göre türevi alınırsa maksimum güç katsayısı değeri $a=1/3$ için %59.3 olarak elde edilir (Sørensen, 2016; Ostovan, 2017)

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(U_\infty^2 - U_w^2) \quad (1.18)$$

$$P = F_n U_d = \dot{m}(U_\infty - U_w)U_d \quad (1.19)$$

$$U_d = \frac{1}{2}(U_\infty + U_w) \quad (1.20)$$

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_d U_\infty^3} = \frac{\frac{1}{4}\rho A_d (U_\infty + U_w)(U_\infty^2 - U_w^2)}{\frac{1}{2}\rho A_d U_\infty^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (1.21)$$



Şekil 1.11. Dairesel akım tüpü (Banga, 2018)

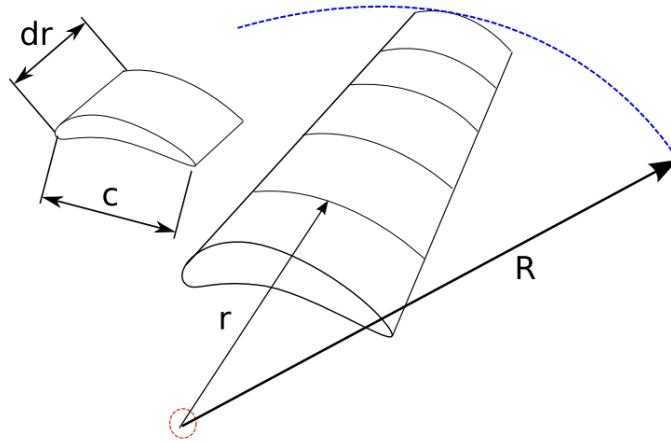
Rüzgar rotordan geçtiği zaman basınç düşüşü yani enerji kaybı olur. Bu kaybın bir kısmı rotor torkunun etkisinden dolayı dönel momentuma dönüşür. Şekil 1.12’de dönen dairesel akım tüpü verilmiştir. Burada dört adet bölge bulunup, bunlar kontrol hacminin giriş kısmı, rotorun hemen öncesi, rotorun hemen sonrası ve kontrol hacminin çıkış kısmıdır. Kanat art izinin ω_a açısal hızıyla ve kanatların Ω açısal hızıyla döndüğü düşünülürse, açısal momentum korunumundan, dönen dairesel bir eleman için r mesafesinde tork Denklem 1.22’deki şekilde yazılabilir. Dairesel akış faktörünün ($b=\frac{\omega_a}{\Omega}$) ve Denklem 1.16’daki aksenal akış faktöründe eklenmesiye Denklem 1.23’teki halini alır (Ingram 2011; Banga, 2018).

$$dQ = dm (\omega_a r) r = \rho U_a 2\pi r dr (\omega_a r) \quad (1.22)$$

$$dQ = 4b(1 - a)\rho U_\infty \Omega r^3 \pi dr \quad (1.23)$$

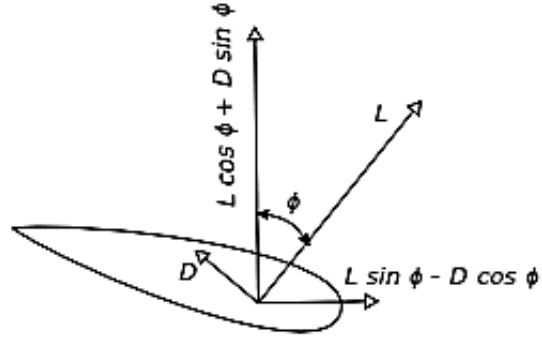
1.3.3.2. Kanat Elemanı Teorisi

Kanat elemanı teorisinde kanadın N adet parçaya ayrıldığı düşünülür (Şekil 1.13). Her bir parça, farklı dönme hızına, veter uzunluğuna ve burkulma açısına sahiptir. Bu teoriye göre kanat çeşitli parçalara ayrılarak, her parçadaki akış hesaplanır. Toplam performans karakteristiği, kanat kirişi boyunca sayısal integral alınarak hesaplanır (Ingram, 2011).



Şekil 1.12. Kanat elemanı teorisi (Ingram, 2011)

Şekil 1.14'te kanada etkiyen kuvvetler verilmiştir. Burada ϕ hücum açısı, yerel burulma açısı ve kanat hatve açısının toplamını, L ve D daha önce F_L ve F_D olarak verilmiş olan kaldırma kuvvetini ve sürüklenme kuvvetini göstermektedir (Banga, 2018).



Şekil 1.13. Kanat elemanına etkiyen kuvvetler (Banga, 2018)

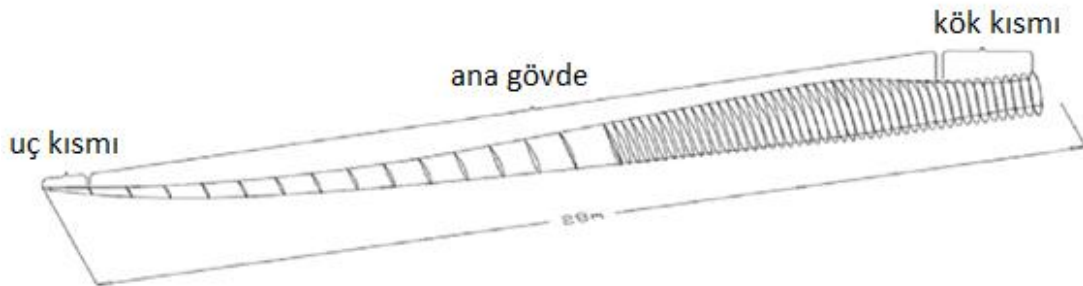
Kanat elemanına etkiyen aksenal kuvvet ve teğetsel kuvvetin yarıçap r ile çarpılmasından elde edilen tork sırasıyla Denklem 1.24 ve 1.25'de verilmiştir. Burada kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri, kaldırma kuvveti katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayıları (C_D) cinsinden verilmiş olup, N kanat sayısını, V_R bağlı hızı, c ise veter uzunluğunu ifade etmektedir (Ingram, 2011; Banga, 2018).

$$dF_n = N \frac{1}{2} \rho V_R^2 c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (1.24)$$

$$dQ = N \frac{1}{2} \rho V_R^2 cr (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) dr \quad (1.25)$$

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

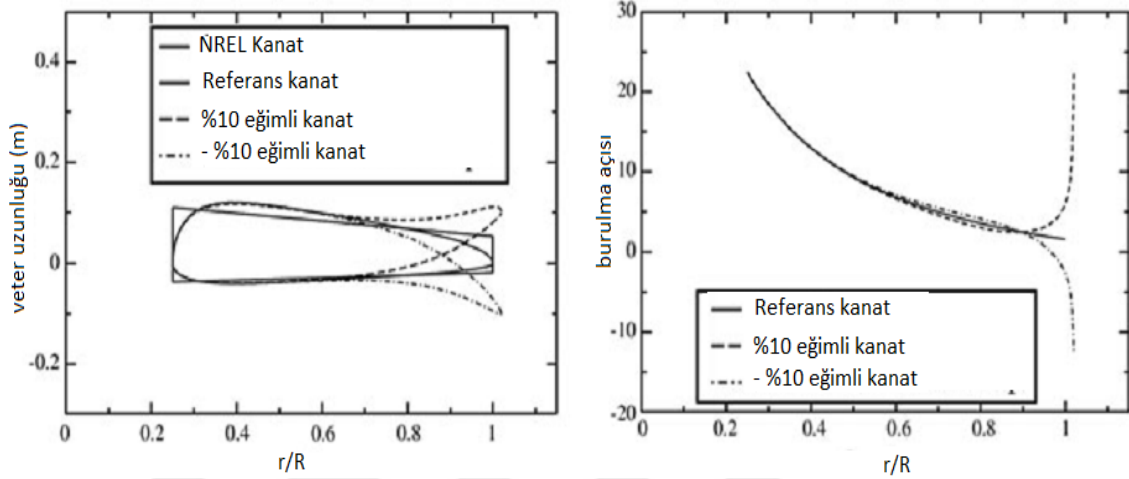
Eğimli rüzgar türbini kanatları ciddi manada ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bölümü Sandia Ulusal Laboratuvarları tarafından (2010) geliştirilmiştir. Yapılan çalışma sonunda STAR (sweep twist adaptive rotor) adında bir kanat geliştirilmiş ve bir rapor sunulmuştur. Çalışmada rüzgar türbini kanadına boyuna eğim verilerek işletme yükü miktarında azaltılma yapılmış ve bu sayede aynı yük miktarına ve daha büyük rotor çapına sahip (56 m) yeni bir eğimli rüzgar türbini kanadı geliştirilmiş, alan testleri yapılmıştır. Raporda 48 metre rotor çapına sahip Z48 türbin kanadı baz alınarak geliştirilen STAR kanadı ile türbin veriminde iyileştirme sağlandığı belirtilmiştir. Bu iyileştirme yapılırken kanatlarda yüksek çalışma yüklerinin olmadığına dikkat çekilmiştir (Ashwill, 2010).



Şekil 2.1. Sandia Laboratuvarları tarafından tasarlanan rüzgar türbini kanadı (Ashwill, 2010)

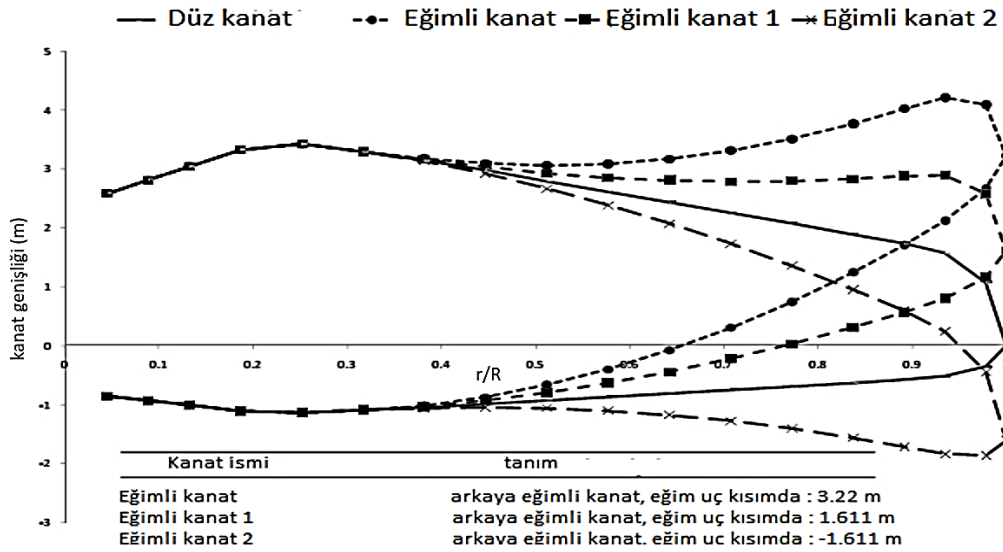
Suzuki ve ark. (2011) eğim verilmiş (swept) rüzgar türbini kanatları üzerine hibrit Navier-Stokes/Vorteks – Panel metodu kullanarak yaptıkları çalışmada NREL rüzgar türbini kanadına %10 arkaya doğru bir eğim eklemişler ve aerodinamik performans

değişimlerini 7 m/s rüzgar hızında incelemişlerdir. Boyuna eğimli rüzgar türbini kanadı ile %1'den daha az ve optimum burulma ve veter dağılımı ile oluşturulmuş rüzgar türbini kanadı ile ise %2.64 verim artışı elde eden yazarlar, eğimli kanatlar ile güç üretiminde bir miktar artış elde edilebileceğini belirtmişleridir.



Şekil 2.2. Suzuki ve ark. (2011) tarafından test edilen boyuna eğimli rüzgar türbini kanatları

Maggio ve ark. (2011) eğimli rüzgar türbini kanatlarının performanslarının yük azaltımına ilişkin sayısal olarak incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada Şekil 2.3'te verilen konfigasyonları deneyen araştırmacılar 8 m/s rüzgar hızında, düz, eğimli, eğimli 1, eğimli 2 olarak adlandırılan konfigasyonlar için sırasıyla 1890, 1700, 1830 ve 1930 kW güç çıkışı elde etmişlerdir.



Şekil 2.3. Maggio ve ark. (2011) tarafından test edilen konfigasyonlar

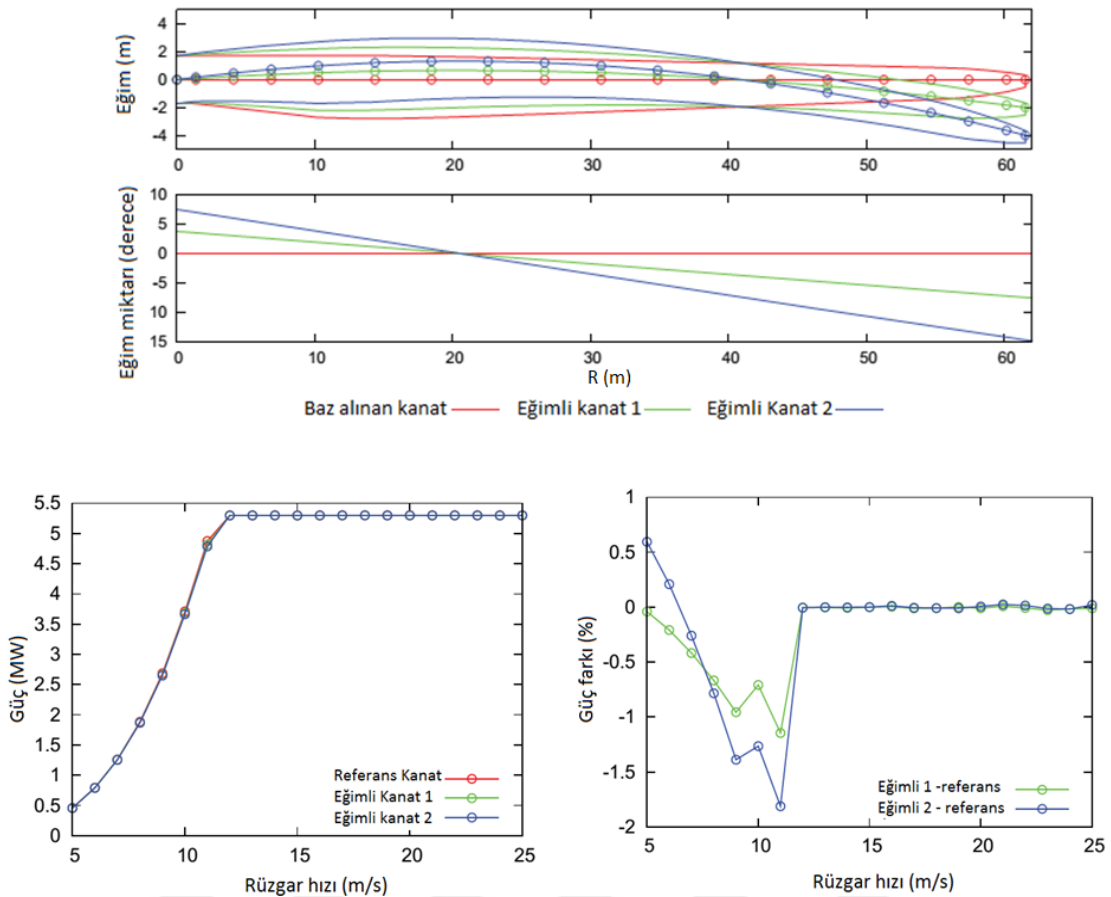
Amano ve ark. (2013) düz ve eğim verilmiş uç kısımlara sahip rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik olarak karşılaştırılması üzerine yaptıkları çalışmada, uygun kanat profili seçimi ile düşük rüzgar hızlarında verimi düşürmeden yüksek rüzgar hızlarında verimi arttırmak için uç kısma doğru boyuna eğim vererek bir tasarım oluşturmaya çalışmışlardır. Yapılan çalışmada baz alınan rüzgar türbini kanadı 20 metre rotor çapına ve NACA4412 kanat profillerine sahip LM 19.1'dir. Araştırmacılar çalışma sonucunda özellikle yüksek rüzgar hızlarında eğimli rüzgar türbini kanadının, baz alınan düz rüzgar türbini kanadına göre daha yüksek verime sahip olduğunu belirtmişlerdir. Aynı araştırmacılar NACA 63-624 kanat profili ile başka bir kanat oluşturup benzer bir çalışma yapmışlar ve düşük rüzgar hızlarında bir miktar güç artışı elde etmişlerdir (Amano ve Malloy, 2008).

Khalafallah ve ark. (2017) yatay eksenli rüzgar türbini kanatlarının boyuna eğimli olmalarının etkisini HAD ile incelemişlerdir. Bu çalışmada, 0.9 m rotor çapında bir rüzgar türbini kanadını baz alan araştırmacılar, literatürde mevcut olan eğimli kanat tasarım denklemlerini kullanarak eğimin güç katsayısındaki değişimini incelemişlerdir. Sonuç olarak yazarlar özellikle eğiklik başlangıç kesiti kanat yarıçapının %25'inde olan eğimli kanatlar ile güç katsayısında artış elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Shen ve ark. (2016) küçük düz olmayan rüzgar türbini kanatlarının şekil optimizasyonu konusunda bir çalışma yapmışlar, yıllık enerji üretimi ve güç üretimine başlama performansını optimize etmeye çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre uygun şekilde tasarlanmış kanatlar ile daha iyi bir başlangıç performansı ve yıllık enerji üretimi elde edilebilir.

Kong ve ark. (2009) boyuna eğimli rüzgar türbini kanatların performanslarının incelenmesine ilişkin bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada araştırmacılar yatay ve dikey olarak çeşitli konfigasyonlarda rüzgar türbini kanatlarına eğim vermişler ve HAD yöntemi ile test etmişlerdir. Araştırmacılar 30 derecelik eğimlerin güç katsayısında küçük bir düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir.

Hansen (2011) arkaya eğimli kanatların aeroelastik özellikleri ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada NREL 5 MW rüzgar türbinini baz alan araştırmacı diğer birçok boyuna eğimli rüzgar türbini kanatları ile ilgili çalışmada olduğu gibi, rüzgar türbini kanadının çalışma yükü ile ilgili özelliklere odaklanmıştır. Ayrıca yazar güç değişimi ile ilgili de bir grafik paylaşmış, bu da Şekil 2.4'te verilmiştir. Buna göre eğimli kanatlar ile güç üretiminde artış elde etmenin mümkün olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.4. Hansen (2011) tarafından yapılan çalışmada kullanılan eğimli rüzgar türbini kanatları ve güç değişimlerinin karşılaştırılması

Küçük yatay eksenli rüzgar türbinlerinde yapılan aerodinamik gelişmeler hakkında detaylı bir derleme Karthikeyan ve ark. (2015) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada özellikle üretime başlama performansının rüzgar türbini kanadının en baş kısmında, gücün maksimuma ulaştırmasının ise kanadın baş kısmından uç kısmına doğru olan bölgelerde değişimlerle olacağı belirtilmiştir. Bu bağlamda yapılacak olan çalışmada eğim ve modifikasyonların önemi ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmalarla birlikte literatürde YERT kanatlarında güç arttımı sağlamak amacı ile yapılmış birçok aerodinamik tasarım çalışması mevcuttur. Singh ve Ahmed (2013) “Küçük rüzgar türbinleri için kanat tasarımı ve performans testi” isimli çalışmalarında, düşük rüzgar hızlarında laminer akış ayrılması ve laminer ayrılma baloncuklarının oluşması nedeniyle oluşan performans düşüklüğüne çare bulmaya çalışmışlardır. Bu nedenle çalışmalarında düşük Reynolds sayısı kanatları tasarımına yoğunlaşmışlardır ve tasarımda Kanat Elemanı Momentum Metodunu kullanılmışlardır. Tasarladıkları kanadı 15-20 derece arasında kanat hatve açılarında ve 3-6 m/s hızları arasında test etmişler ve 6 m/s rüzgar hızında ortalama 0.255 güç katsayısını

yakalamışlardır (yükseklik 8.2 m). Optimum kanat hatve açısını 18 derece bulan yazarlar tasarlanan 2 kanatlı rüzgar türbininin 3 kanatlı rüzgar türbinlerine göre düşük rüzgar hızında daha iyi üretim değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Elferra (2011) yatay eksenli rüzgar türbini rotor kanadının HAD yöntemi ile kanatçık aerodinamik tasarımı ve optimizasyonu konusunda bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada NREL Phase VI rüzgar türbinini baz alan Elferra, ilk önce bu türbin kanadı için NREL tarafından yayınlanan deneysel verileri kullanarak kendi yaptığı HAD analiz yöntemini doğrulamış, daha sonrada optimizasyon işlemini gerçekleştirmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak yapay sinir ağları destekli genetik algoritma metodunu kullanmıştır. Sonuç olarak elde ettiği kanatta Elferra, güç çıkışında önemli oranda bir artış elde etmiştir.

Gerhard ve Carolus (2013) rüzgar türbini kanadı tasarımında bir analitik metodu sundukları çalışmada bir kanat elemanı metodu bazlı model ile tasarım yapmışlardır. Bu tasarımın analizlerini 3 boyutlu RANS simülasyonu ile yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Kanat tasarımında üç adet kanat profili kullanan yazarlar geliştirdikleri kanadı, analitik yöntemi ve HAD sonuçlarını karşılaştırmışlar ve tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir.

Eke ve Onyewudiala (2010) genetik algoritma kullanılarak rüzgar türbini kanatlarının optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, şekil parametreleri olan veter uzunluğu, burulma ve bağıl kalınlık parametrelerini değiştirerek 25 kW'lık ve 2 MW'lık türbinler için optimum kanatları üretmeye çalışmışlardır. Hedef fonksiyonu olarak rotor fiyatı/yıllık enerji üretimini kullanan yazar, rotor ağırlığını olan veter uzunluğu, burulma ve bağıl kalınlık cinsinden yazmıştır ve güç eğrisinin bulunmasında kanat elemanı momentum metodunu (BEM) kullanmıştır. Araştırmacılar çalışma sonucunda optimizasyon yapılmış kanatlar ile enerji üretimi masraflarında yaklaşık %3 azalma sağlamışlardır.

Bai ve ark. (2013) 10 kW'lık bir yatay eksenli rüzgar türbini kanadı tasarımı konusunda bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda geliştirilmiş kanat elemanı momentum metodunun iyi sonuçlar verdiği, ayrıca HAD yönteminin yatay eksenli rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizinde kullanılacak iyi bir metot olduğu belirtilmiştir.

Schubel ve Crossley (2012) rüzgar türbini kanadının tasarımı üzerine bir derleme çalışması yapmışlardır. Yapılan çalışmada yazarlar rüzgar türbini kanadı güç üretimi veriminin, kanat profili tipine ve kalınlığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek

olarak yazarlar, verim, kontrol ve gürültünün azlığı gibi nedenlerle genelde üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinin günümüzde kullanıldığını ve çalışmaların bu alanda yoğunlaştığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada rotor dönme doğrultusunda eğimli bir yatay eksenli rüzgar türbini kanadı tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır. Öncelikle eğimli kanatlarda, eğimin yönü, uç deplasman miktarı ve eğiklik başlama kesitinin güç çıkışına etkisi incelenmiştir. Eğimli kanatlarının tasarımı için değişkenlerin bağımsız bir şekilde değiştirilebileceği yeni bir denklem geliştirilmiştir. Daha sonra optimizasyon adımına geçilmiş, yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı kanat hatve açılarında testler yapılarak en uygun kanat hatve açısı değeri bulunmuştur. Son adımda ise tasarlanan kanat üretilerek deneysel olarak güç katsayısı – uç hız oranı eğrisi çıkarılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi

HAD yöntemi her türlü akışın çeşitli koşullarda analizini yapmaya yarayan bir araçtır. Süreklilik denklemi ve Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılan momentum denklemleri esas alınır. Bu denklemlerin sayısal çözümleri sonucunda akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağlı olarak birçok veriye ulaşılır. HAD kullanmanın birçok avantajı vardır. HAD yazılımlarıyla yapılan sayısal simülasyon sayesinde, sonuçlara ve sanal deney ortamına simülasyondan sonra da ulaşılabilir ve tekrar kullanılabilir. HAD'ın diğer bir avantajı ise gözlemlenmesi tehlikeli veya ulaşılabilir bölgedeki akışkan davranışları incelenebilmesidir .

3.1.1. Süreklilik ve Navier Stokes denklemleri

Kütlenin korunumu diğer adıyla süreklilik denklemi genel haliyle Denklem 3.1'de verilmiştir (ANSYS, 2016). Burada \vec{V} , zaman (t) ve konumun (x,y,z) fonksiyonu olan yerel hız bileşenleri (u,v,w) ile tanımlanan hız vektörünü, S_M ise kütle kaynak terimini ifade etmektedir (ANSYS, 2016; Tu ve ark., 2018). Bu denklem kartezyen koordinat sisteminde Denklem 3.2'deki gibi yazılabilir ($S_M = 0$) (Tu ve ark., 2018). Süreklilik denklemi sıkıştırılamaz bir akış için ise Denklem 3.3'de olduğu gibi yazılabilir (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_M \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

Momentumun korunumu ise Denklem 3.4'de verilmiştir (ANSYS, 2016). Burada p statik basıncı, $\bar{\tau}$ gerilme tensörünü, $\rho \vec{g}$ ve \vec{F} ise sırasıyla yerçekimsel gövde kuvvetini ve dış gövde kuvvetlerini ifade etmektedir. Gerilme tensörü $\bar{\tau}$ ifadesi ise Denklem 3.5'de verilmiştir. Burada μ viskoziteyi, I ise birim tensörü göstermektedir (ANSYS, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.4)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} I \right] \quad (3.5)$$

Sıkıştırılmaz laminer bir akış için Navier Stokes denklemleri kartezyen koordinatlarda Denklem 3.6-3.8 arasında verildiği şekilde de yazılabilir (Çengel ve ark., 2008).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.8)$$

3.1.2. Türbülans Modelleri

Bu bölümde çalışmada kullanılmış olan türbülans modellerine değinilecektir. Çalışmada bir adet tek denklemlilik, iki adet iki denklemlilik ve bir adet dört denklemlilik türbülans modeli kullanılmıştır. Bunlar Spalart-Allmaras, k- ω Shear Stress Transport (SST), k- ϵ Realizable, transition SST türbülans modelleridir.

3.1.2.1. Spalart-Allmaras türbülans modeli

Spalart-Allmaras (SA) modeli diğer modellere göre daha basit olan tek denklemlilik bir türbülans modelidir (Spalart ve Allmaras, 1992). Diğer modellere göre avantajı daha az işlemci ve bellek kullanmasıdır (Elfarra, 2011). Özellikle uzay ve havacılık uygulamaları için tasarlanmış olan bu model turbomakine uygulamalarında da iyi sonuçlar vermektedir. Genel olarak SA modeli türbülans hesaplamalarının çok önemli olmadığı nispeten daha kaba simülasyonlar için en iyi seçim denilebilir (Carcangiu, 2008). Denklem 3.9'da bu modele ait denklem verilmiştir (Spalart ve Allmaras, 1992; ANSYS, 2016). Bu denklemdeki transport değişkeni, $\tilde{\nu}$, türbülans viskozitesini ifade

etmektedir. Ayrıca G_v türbülans viskozitesinin üretimini, Y_v duvara yakın bölgelerde olan çevrinti viskozitesi yıkımını, ν moleküler kinematik viskoziteyi, $S_{\tilde{\nu}}$ kaynak terimini ifade etmekte olup C_{b2} ve $\sigma_{\tilde{\nu}}$ sabit sayılardır. Denklem ve sabit katsayılar kanat profili etrafındaki türbülanslı akışlar için ayarlanmış olup bu nedenle akış ayrılması olmayan aerodinamik simülasyonlarda iyi sonuçlar verebilmektedir. Ancak model ve sabit katsayıların ayarlamasının yapıldığı durumlardan çok farklı durumlarda, örneğin kanat etrafındaki akışın yüksek hücum açısı dolayısıyla ayrılması, kötü sonuçlar verebilmektedir (ANSYS, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] + Y_v + S_{\tilde{\nu}} \quad (3.9)$$

3.1.2.2. k-ε Realizable türbülans modeli

Bu model iki denklemlilik bir model olup mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu model, türbülanslı akışın fiziğine uygun çeşitli matematiksel değişkenler içerir. Yapılan çeşitli çalışmalarda akış ayrılmalı ve karmaşık akış özelliklerine sahip akışlarda k-ε Realizable modelinin diğer tüm k-ε modellerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu modele ait iki denklem aşağıdaki gibidir (ANSYS, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (3.11)$$

Burada G_k ortalama hız gradyanları nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjinin üretimini, G_b kaldırma kuvveti nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjinin üretimini, Y_M sıkıştırılabilir türbülanstaki kararsız genişlemenin dissipasyon oranına katkısını göstermektedir. Ayrıca $C_{1\varepsilon}$ ve C_2 sabitleri, σ_k ve σ_ε k ve ε için türbülanslı prandtl sayılarını, S_k ve S_ε ise kaynak terimlerini ifade etmektedir (Kaya ve Karagöz, 2007; ANSYS, 2016).

3.1.2.3. k- ω SST türbülans modeli

Shear-Stress Transport (SST) k- ω modeli Menter tarafından geliştirilmiş olan iki denklemlilik bir türbülans modelidir (Menter, 1994). Bu ve diğer k- ω modellerinde türbülans kinetik enerjiye ait transport denklemi türbülans kinetik enerjinin dissipasyon oranının denklemi, $\omega = \varepsilon/k$, ile birlikte çözülür. Düz plaka üstü sınır tabaka problemlerinde, karmaşık akış ayrılmalarının ve ters basınç gradyanlarının olduğu problemlerde iyi sonuçlar verebilmektedir. Bu model standart k- ω modeline benzemekle birlikte birçok akış türünde standart modele göre daha güvenilir ve doğru sonuç vermektedir. Bu modele ait denklemler aşağıdaki gibidir (ANSYS, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3.13)$$

Burada G_k türbülans kinetik enerjinin üretimini, G_ω ω 'nin üretimini, Γ_k ve Γ_ω sırasıyla k ve ω 'nin efektif yayılmasını, Y_k ve Y_ω k ve ω 'nin türbülans nedeniyle oluşan dissipasyonunu, D_ω çapraz yayılım terimini, S_k ve S_ω kaynak terimlerini ifade etmektedir.

3.1.2.4. Transition SST türbülans modeli

Bu türbülans modeli k- ω SST modelinin "k" ve " ω " denklemlerine (Denklem 3.12 ve 3.13) ek olarak biri aralıklılık " γ ", diğeri geçiş başlama kriteri " $\hat{R}_{e_{\theta t}}$ " olmak üzere iki adet denklem daha içeren dört denklemlilik bir türbülans modelidir. Model hakkında detaylı bilgiye ANSYS (2016) kaynağından ulaşılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \gamma) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \gamma u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right) + G_\gamma - Y_\gamma \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \hat{R}e_{\theta t}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \hat{R}e_{\theta t} u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_{\theta t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial \hat{R}e_{\theta t}}{\partial x_j} \right) + G_{\hat{R}e_{\theta t}} \quad (3.15)$$

Burada G_Y ve $G_{\hat{R}e_{\theta t}}$ üretim terimlerini, Y_Y yıkım terimini, $\hat{R}e_{\theta t}$ yerel geçiş başlama momentum kalınlığı için Reynolds sayısını göstermektedir.

3.1.3. Sınır Şartları

HAD problemlerinde hesaplamaların yapılabilmesi için sınır şartlarının tanımlanması gerekir. Simülasyonlarda kullanılan bazı sınır şartları ve tanımları aşağıdaki gibi olabilir:

- Hız-girişi: Burada akışın hızı, türbülans özellikleri gibi parametreler tanımlanır. Hız dalgalanmalarının kare ortalamalarının kökünün, hıza oranı olarak tanımlanan türbülans yoğunluğu da burada tanımlanabilir. Hız sabit veya değişken olarak tanımlanabilir.
- Basınç-çıkışı: Bunun anlamı çıkışta sabit bir statik basıncın tanımlanmasıdır. Ayrıca ters akış durumlarının ayarlanmasına ve yakınsamanın kolaylaşmasını sağlamaya yarar. Çıkış şartı olarak simülasyonlarda sabit basınç tanımlanmıştır.
- Periyodik sınır şartı: Rüzgar türbini modellenirken akış döngüsel olarak periyodik kabul edilebilir. Bu şartın sağlanması için akış alanının dairesel olarak çizilmesi ve dönmeyen parçaların çizime dahil edilmemesi gerekir. Bu yöntem genellikle rüzgar türbini analizlerinde hesaplama süresinin azaltmak amacıyla kullanılır.
- Duvar sınır şartı: Tüm viskoz akışlar, duvarın olmasından önemli bir şekilde etkilenir. Fiziksel olarak duvarlar kaymama sınır şartlarını sağlarlar. Kaymama sınır şartı akışın hızını ve türbülans özelliklerini önemli ölçüde etkiler.

HAD simülasyonlarında hesaplama bölgesinin giriş ve çıkışında süreklilik denkleminin sağlandığından emin olunmak için giriş ve çıkıştaki debi değerleri kontrol edilmiştir. Örnek bir simülasyondan alınmış ve Türkçe'ye çevrilmiş ekran görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.

Kütlesel debi - Mass Flow Rate	(kg/s)
giriş- outlet	-42.601807
çıkış- inlet	42.601807
Net	-5.4911583e-07

Şekil 3.1. Örnek bir simülasyon için hesaplama bölgesinin giriş ve çıkışındaki debi değerleri

Fluent programında hareketli bir parçanın etrafındaki akışın incelenmesi için hareketli koordinat sistemi kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin aktifleştirilmesi ile bazı hareket denklemleri de aktif hale getirilerek rüzgar türbini rotoru gibi hareketli objelerin etrafındaki akış incelenebilir (ANSYS, 2016). Yapılan çalışmada bu yöntem kullanılmıştır. HAD simülasyonlarında tork değerinin belirlenmesi kanadın dönme eksenine göre moment değerine bakılarak yapılmıştır.

3.1.4. Son İşleme

Simülasyonların tamamlandıktan sonra sonuçların konturlar, akım çizgileri gibi yöntemlerin kullanılmasıyla incelenmesi süreci olarak tanımlanabilir. Fluent programı elde edilen tüm sonuçların son işleme kısmında incelenmesine izin vermektedir. ANSYS programı kapsamlı bir son işleme modülüne (CFD-Post) sahiptir. Ayrıca sonuç verileri birçok formatta dışa aktarılabilen ve farklı son işleme programları kullanılabilir. Bu çalışmada ANSYS CFD-Post programı kullanılmıştır.

3.2. Genetik Algortima ile Optimizasyon

Bu çalışmada optimizasyon işlemi için ANSYS DesignXplorer, optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritma kullanılmıştır. Genetik algoritmalar doğal seçim ilkesine dayanan bir sayısal optimizasyon yöntemidir. Genetik algoritma, çözüm dizilerinden oluşan bir başlangıç nesliyle, çaprazlama ve mutasyon gibi doğal seçim operatörlerini kullanmaktadır. Öncelikle ele alınan problem için bir rastgele n kromozomlu populasyon oluşturulur. Daha sonra popülasyondaki her bir kromozom için $f(x)$ uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Yeni bir popülasyon oluşuncaya kadar aşağıdaki adımlar tekrar edilir (Bolat ve ark., 2004).

Seleksiyon: Uygunluk durumuna göre popülasyondan iki tane kromozom, çaprazlanmak amacıyla seçilir. Burada uygunluk derecesi yüksek olanın seçilme şansı yüksektir.

Çaprazlama: Seçilmiş olan ebeveyn kromozomlar, çaprazlama oranına göre yeni bireyler oluşturmak üzere çaprazlanırlar. Eğer çaprazlama uygulanmazsa bireyler atalarının tamamen kopyası olacaklardır.

Mutasyon: Kromozom üzerindeki bazı dizilerin (DNA dizilerinin) yerleri ile oynanarak belirli mutasyon oranına göre değişiklikler yapılır. Yeni popülasyon kabul edildikten sonra, oluşturulan yeni popülasyon eskileriyle yer değiştirilir. Hedeflenen uygunluk değerine ulaşıldığında program durdurulur ve popülasyondaki en iyi çözüm alınır (Bolat ve ark., 2004).



4. YERT KANATLARINDA EĞİMİN YÖNÜ, BAŞLAMA KESİTİ VE UÇ DEPLASMAN MİKTARININ AERODİNAMİK ETKİSİNİN İNCELENMESİ

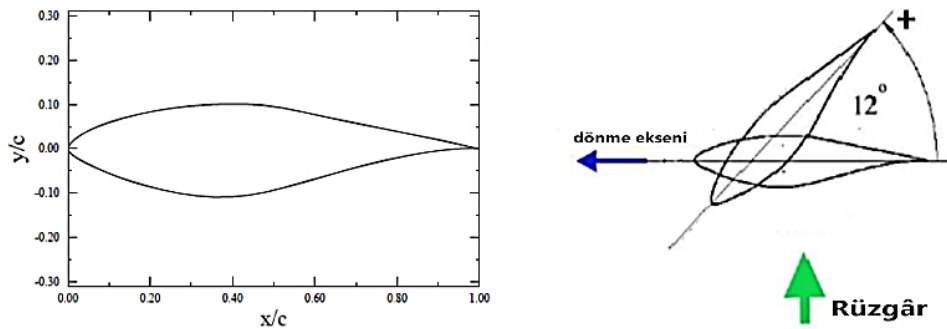
Bu bölümde eğimli rüzgar türbini kanatlarında, eğimin yönü, başlama kesiti ve uç deplasman miktarının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla HAD yönteminin doğrulanması amacıyla kullanılabilir deneysel verileri bulunan iki adet rüzgar türbini seçilmiştir. Bunlar, Amerikan Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen ve test edilen NREL Faz II rüzgar türbini ve Norveç Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen NTNU rüzgar türbinidir.

4.1. NREL FAZ II Rüzgar Türbini

İlk incelenen rüzgar türbini Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen NREL Faz II rüzgar türbinidir. Rotor çapı 10 m ve nominal gücü 20 kW olan bu rüzgar türbini, veter uzunlukları ve burulma açıları değişken olmayan s809 kanat profilinden oluşan 3 adet kanata sahiptir (Schepers ve ark., 1997; Simms ve ark., 1999). Türbinin kanatları 3 derece koniklik açısına ve aşağı yönde 12 derece kanat hatve açısına sahiptir. Rüzgar türbinine ait detaylı bilgiler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

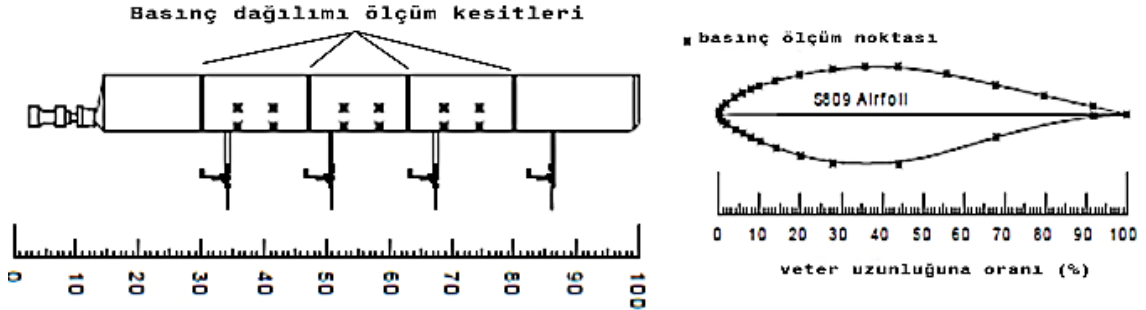
Çizelge 4.1. NREL Faz II rüzgar türbinine ait özellikler

Kanat sayısı	3
Rotor çapı (m)	10.06 m
Koniklik açısı	3 derece
Dönme hızı (d/d)	71.6
Kanat Hatve açısı	12 derece (aşağı)
Kanat profili	S809
Veter uzunluğu (m)	0.4572 (sabit)
Burulma açıları	0 derece (sabit)



Şekil 4.1. NREL Faz II kanadında kullanılan s809 profili ve kanat hatve açısı

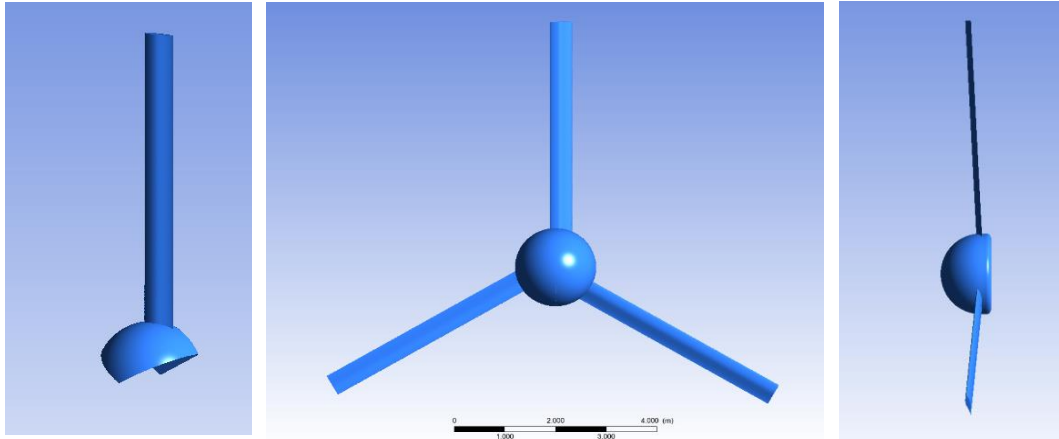
Deneylerde tork ölçümünün yanı sıra basınç ölçümleri de yapılmıştır. Bu ölçümler 4 ana kesitte, %30, %47, %63 ve %80, 28 adet basınç noktası vasıtasıyla yapılmıştır. Buna ait açıklama resmi Şekil 4.2. de verilmiştir (Schepers ve ark., 1997; Simms ve ark., 1999).



Şekil 4.2. NREL Faz II kanadı üzeri basınç ölçümü noktaları

4.1.1. HAD Metodolojisi ve Doğrulama

NREL Faz II türbini kanadı çizimleri ANSYS Designmodeller programı ile simülasyonları ANSYS Fluent 17.2 programı ile yapılmıştır. Akış alanı, 3R yarı çaplı çemberden, rotorun önüne doğru 3R, arkasında doğru 10R boyunda bir hacimden oluşturulmuştur.

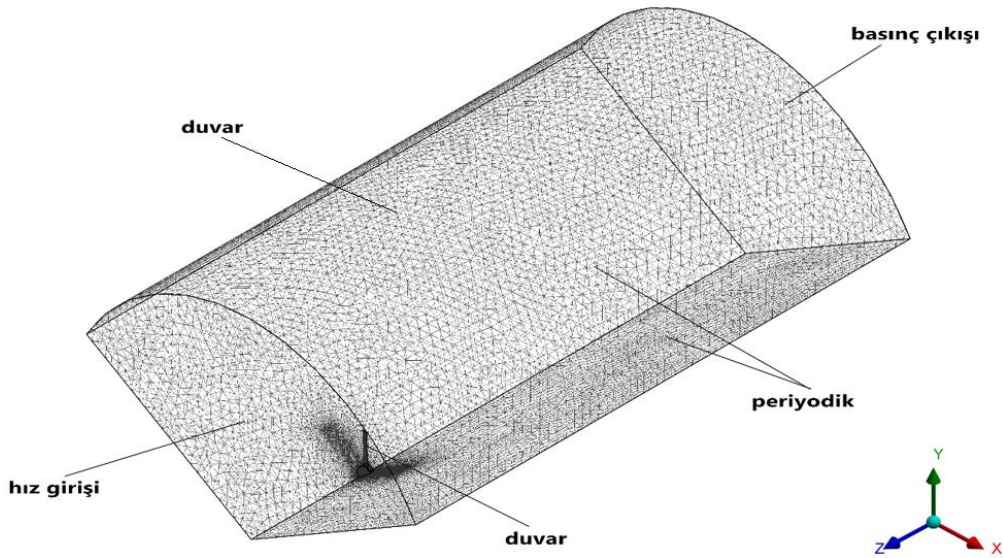


Şekil 4.3. NREL Faz II kanadı 3 Boyutlu çizimleri

ANSYS Meshing programı ile çözüm ağı oluşturulması işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna göre boyut fonksiyonları kullanılarak kanat üstünde çözüm ağı yoğunlaşması sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm çözüm ağlarında benzer hücre boyutlandırma fonksiyonları kullanılmış ve yaklaşık ağ kalite değerleri EK-3'te verilmiştir. Çözüm ağı yaklaşık 6×10^6 hücre ile oluşturulmuştur. İlk katman uzaklığı

2×10^{-5} m alınarak y^+ değerinin 3'den küçük olması sağlanmıştır. Bu değer çalışmada kullanılan tüm türbülans modelleri için uygundur (ANSYS, 2016; Elfarra, 2011). Uygun y^+ değerinin ayarlanması çözüm ağı hücre sayısını oldukça arttırmaktadır. Çözüm ağının bağımsızlığının testi için 7.2 m/s hızında 6 milyon hücreli çözüme ek olarak 7.5 ve 8.5 milyon hücreye sahip çözüm ağları $k-\varepsilon$ Realizable ve $k-\omega$ SST modelleri ile test edilmiş, mekanik güç üretiminde önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Sınır şartı olarak giriş hız girişi, çıkış basınç çıkışı, yan yüzeyler periyodik, kanat ve üst yüzey duvar olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.4).

Simülasyonlar Sheffield Üniversitesi Yüksek Performanslı Hesaplama (HPC) merkezinde yapılmıştır. Linux tabanlı bu merkezde simülasyonlar için arka plan (yığın) yöntemi (batch mode) kullanılmıştır. Bu yöntem ile simülasyon yapılması için ilk önce seyir (journal) dosyası oluşturulur. Bu dosya Fluent programına hangi sırayla ne işlemi yapacağını anlatan dosya olup, simülasyonlarda kolaylık ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. EK-1'de bu bölümde kullanılması için hazırlanmış örnek bir journal dosyasının içeriği verilmiştir. Bu dosya farklı iki adet fluent "case" (durum) dosyasının okunup 4 farklı türbülans modeli ve iki adet rüzgar hızında simülasyon yapılması için kodlanmıştır. Simülasyonlarda genel olarak E5-2630 v3 işlemci kullanılmış ve her bir simülasyon 8 işlemcide yaklaşık 8 saat sürmüştür. Yakınsama kriteri olarak tüm kalanların 10^{-4} seviyesinin altına inmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.4. Sınır şartları

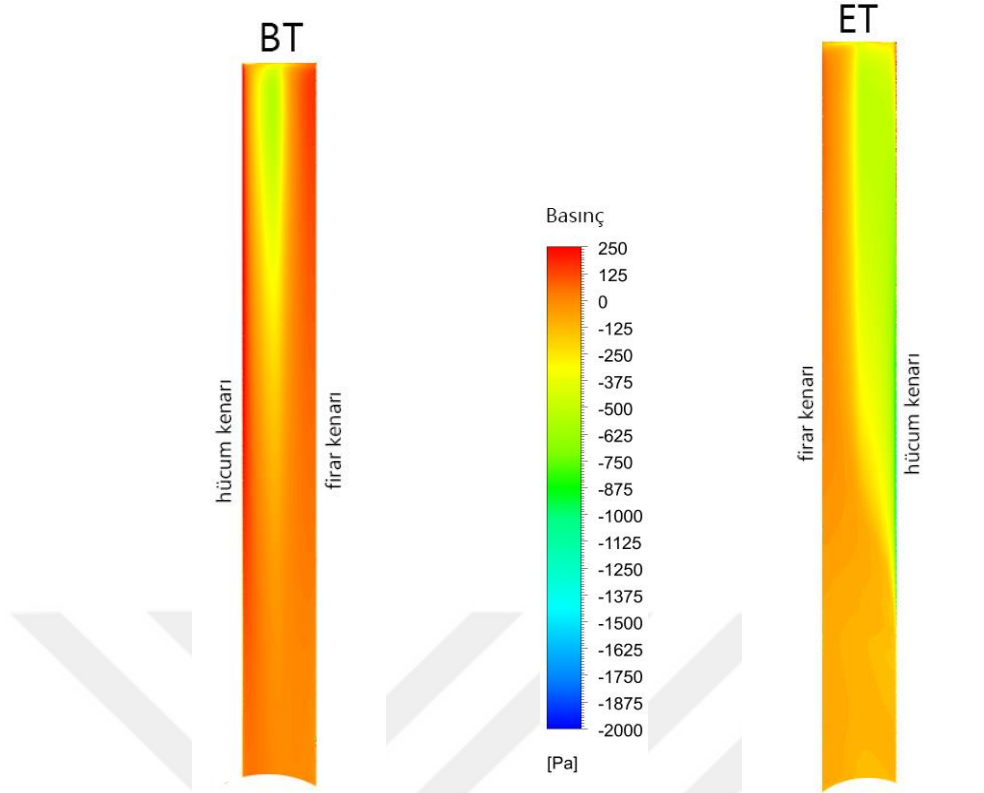
İlk aşamada NREL Faz II rüzgar türbini için doğrulama yapılmıştır. Doğrulama çalışmasında dört adet türbülans modeli denenmiş, deneysel sonuçlara ve literatürdeki

diğer çalışmalara uygun olarak iki adet rüzgar hızında, 7.2 m/s ve 10.56 m/s, sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan türbülans denklemleri tek denklemlili Spallart-Allmaras modeli, iki denklemlili olan $k-\varepsilon$ Realizable ve $k-\omega$ SST modelleri ve dört denklemlili olan transition SST modelleridir. Çizelge 4.2’de deneysel olarak ölçülmüş tork değerleri HAD ile hesaplanmış tork değerleri ile karşılaştırılmıştır (Schepers ve ark., 1997; Duque ve ark., 1999; Simms ve ark., 1999; Thumthae ve Chitsomboon, 2009). Sonuçlardan da görüleceği 7.2 m/s’de %1.4 ve 10.56 m/s hızda %0.6’lık sapma ile $k-\varepsilon$ Realizable türbülans modeli en iyi sonucu vermiştir.

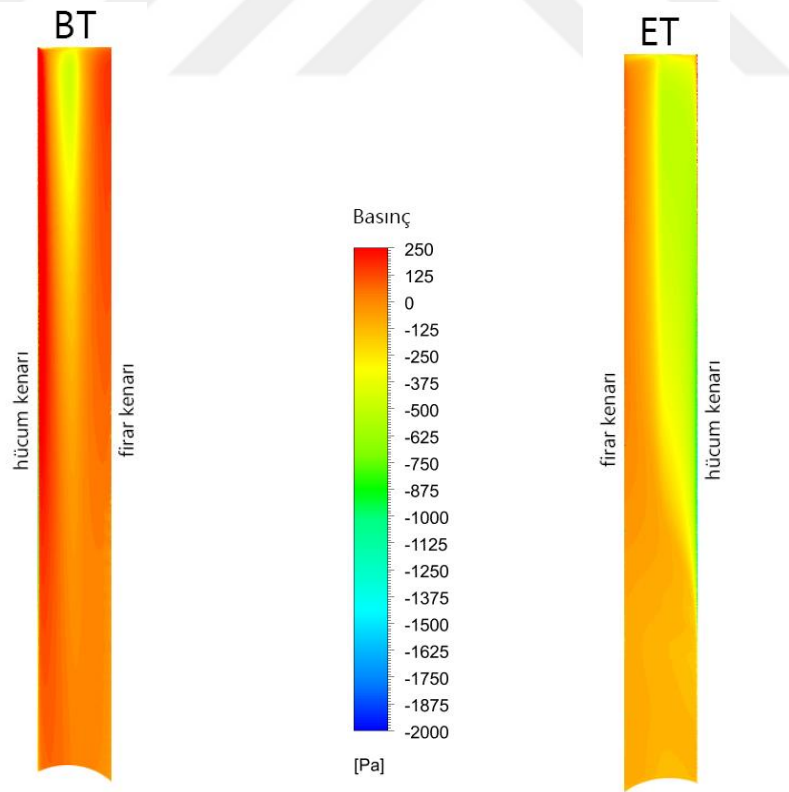
Çizelge 4.2. Deneysel sonuçlar ile HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Rüzgar hızı	Türbülans Modeli	HAD Tork	Deneysel Tork	Sapma (%)
7.20	$k-\omega$ SST	247		-13.6
	$k-\varepsilon$ Realizable	282	286	-1.4
	Spallart-Allmaras	250		-12.5
	transition SST	291		1.7
10.56	$k-\omega$ SST	1073		-11.1
	$k-\varepsilon$ Realizable	1215	1207	0.6
	Spallart-Allmaras	1068		-11.5
	transition SST	1085		-10.1

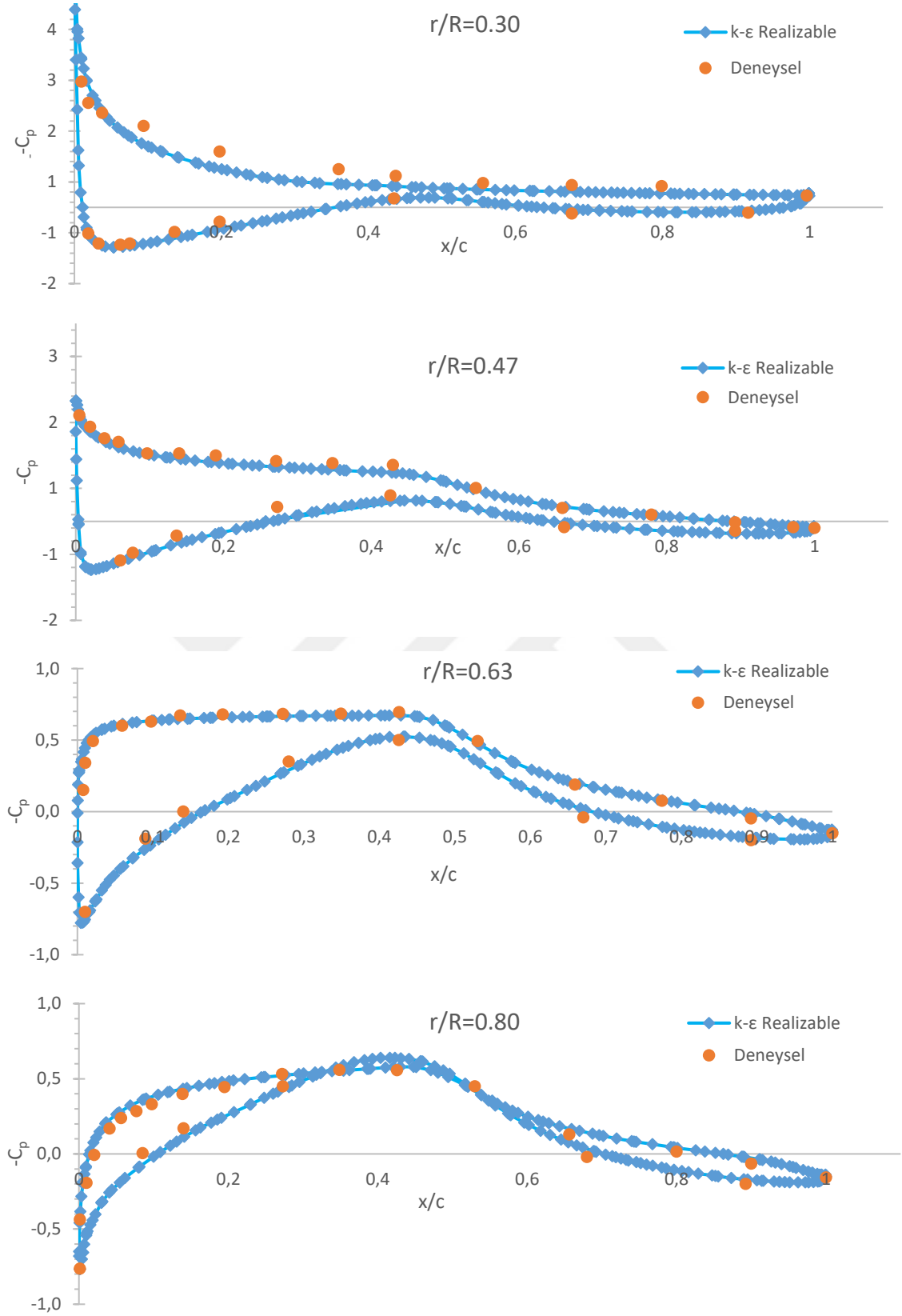
Bu aşamadan sonra en başarılı sonucu $k-\varepsilon$ Realizable türbülans modeli verdiği için bu modelle yapılmış hesaplamalara ait sonuçlar verilecektir. Şekil 4.5 ve 4.6’da sırasıyla 7.2 m/s ve 10.56 m/s rüzgar hızlarında kanat üzeri basınç konturları verilmiştir. Sonuçlara göre beklendiği gibi basınç tarafı (BT) ve emme tarafı (ET) arasında gözle görülür bir basınç farkı vardır. Bu fark kanadın uç kısmına doğru gittikçe artmaktadır. Şekil 4.7 ve 4.8’de sırasıyla 7.2 m/s ve 10.56 m/s rüzgar hızlarında farklı kanat kesitlerinde NREL Faz II üzerindeki HAD ile hesaplanmış basınç dağılımının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır (Schepers ve ark., 1997; Simms ve ark., 1999; Thumthae ve Chitsomboon, 2009; Elfarra, 2011). Grafikte görülen basınç katsayısı değerleri Denklem 1.11 ile hesaplanmıştır. Basınç dağılım sonuçları genel olarak deneysel sonuçlar ile örtüşmektedir. Özellikle kanat ucuna doğru yaklaşıldıkça HAD sonuçlarının deneysel sonuçlar ile benzerliği artmaktadır. Sadece göbek kısmına en yakın kesit olan $r/R=0.25$ kesitinde 10.56 m/s rüzgar hızında kanadın ET kısmında görülen akış ayrılması ve buna bağlı olarak girdaplar nedeniyle akış bu bölgede karmaşık hale gelmiş, HAD yazılımının bunu yakalaması güçleşmiştir ve bu kesitte deneysel ve HAD sonuçları arasında farklar gözlenmiştir.



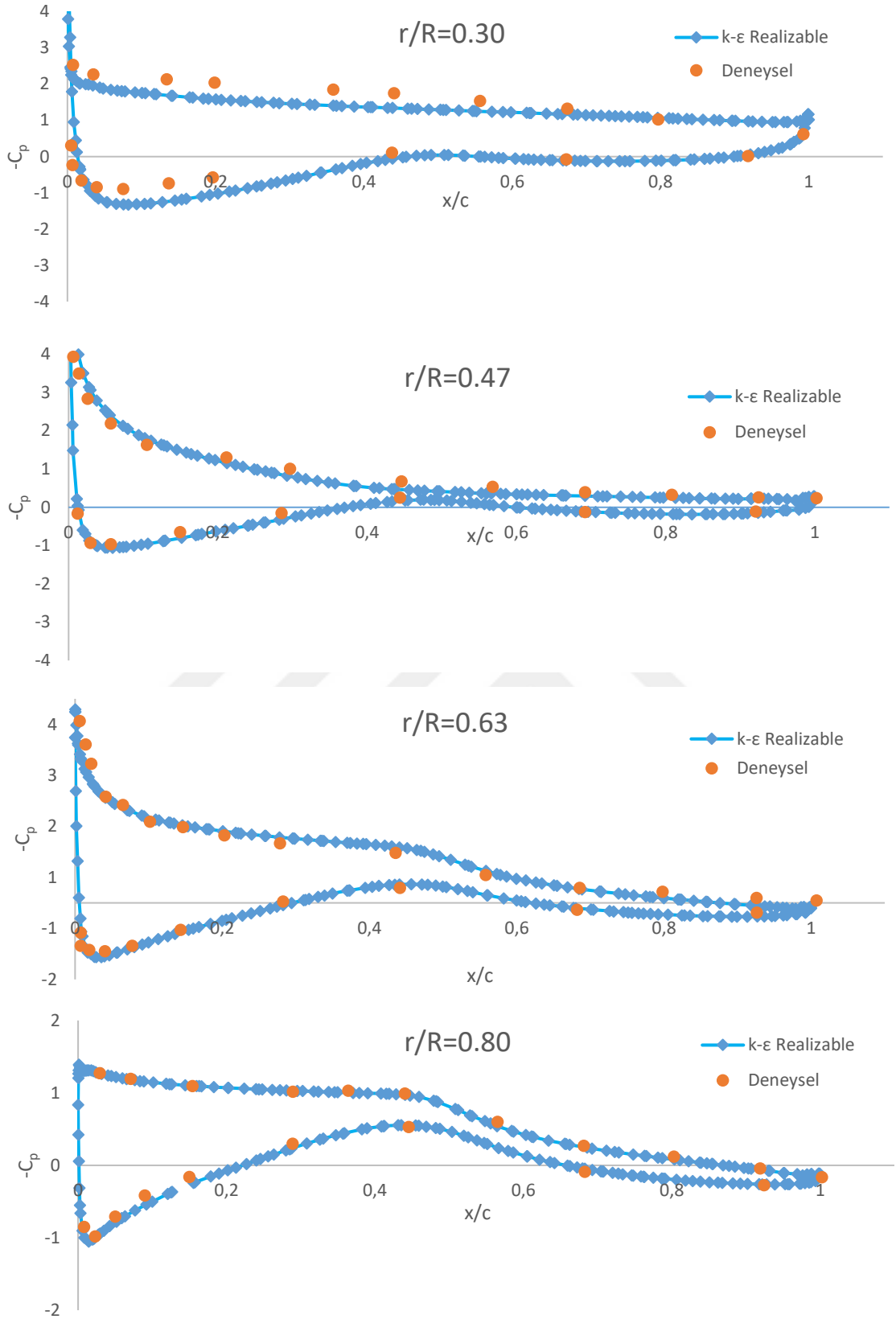
Şekil 4.5. 7.2 m/s rüzgar hızında kanat üzeri basınç dağılımı



Şekil 4.6. 10.56 m/s rüzgar hızında kanat üzeri basınç dağılımı



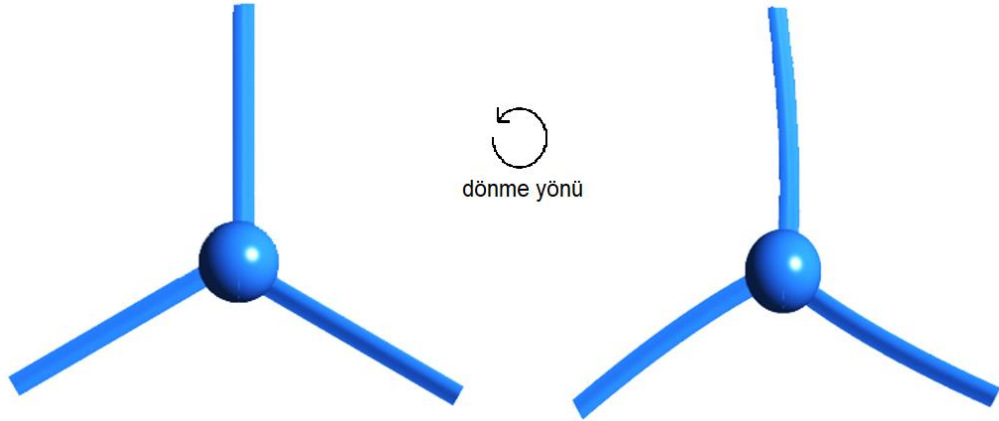
Şekil 4.7. 7.2 m/s rüzgar hızında farklı kanat kesitlerindeki HAD ile hesaplanmış basınç dağılımının deneysel veriler ile karşılaştırılması



Şekil 4.8. 10.56 m/s rüzgar hızında farklı kanat kesitlerindeki HAD ile hesaplanmış basınç dağılımının deneysel veriler ile karşılaştırılması

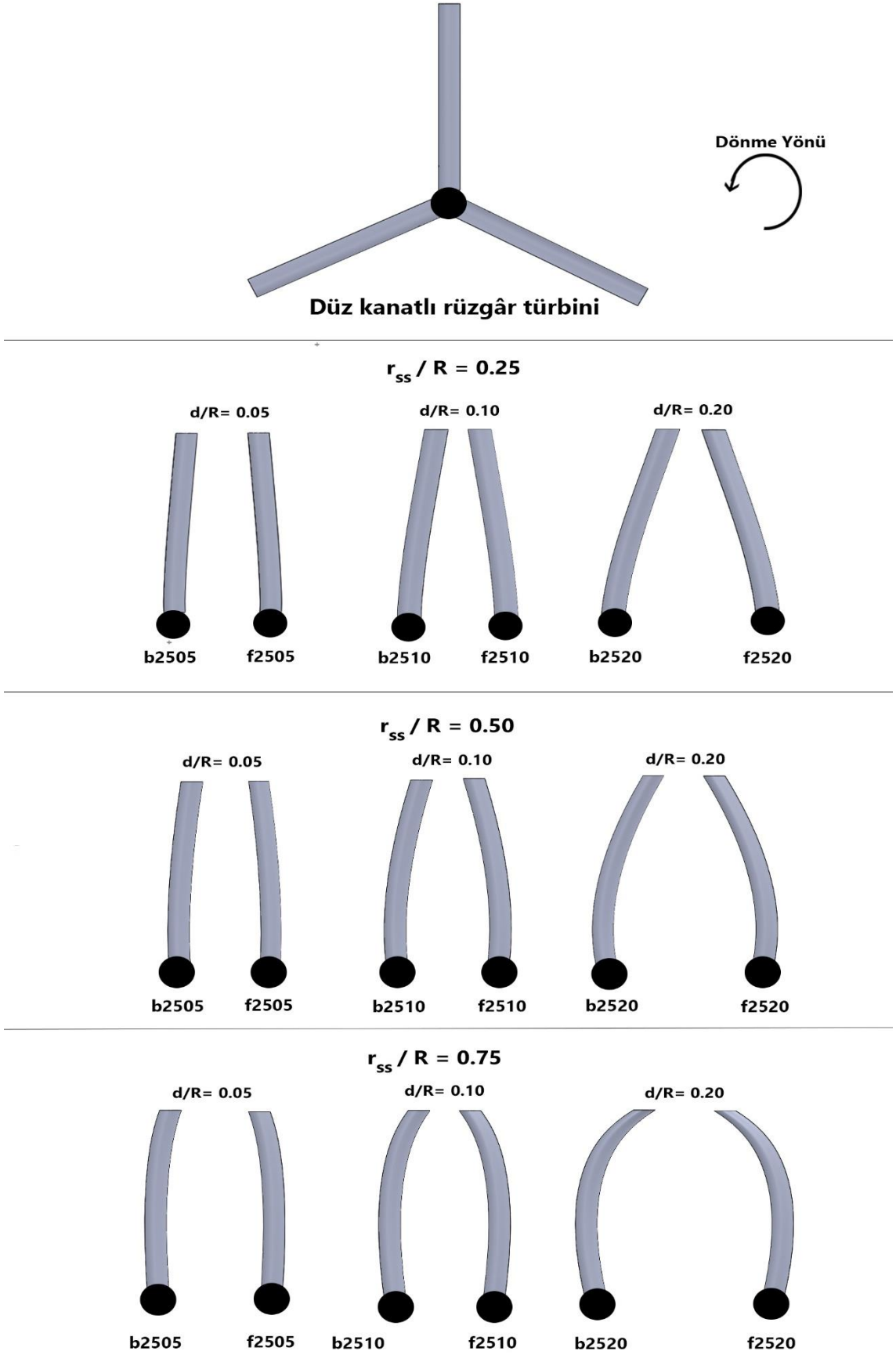
4.1.2. Yeni Tasarlanan Eğimli Kanatlar

Öncelikle kolaylık olması adına kanatların gösterimi için bir yöntem belirlenmiştir. Buna göre ilk harf eğimin yönünü göstermektedir; “f” harfi öne eğim (forward), “b” harfi arkaya eğimi (backward), harften sonraki iki rakam eğiklik başlangıç kesitinin yüzde cinsinden değerini, son iki rakam ise uç deplasman miktarının yüzde cinsinden değerini vermektedir. Örneğin “f5005” kanadı, öne eğimli, eğiklik başlangıç kesiti kanat boyunun %50’sinde olan ve uç deplasman miktarı kanat yarıçapının, R (m), %5’i kadar olan kanadı göstermektedir. Yani NREL Faz II için kanat yarıçapı $R= 5$ m olduğu için, f5005 kanadının eğiklik başlangıç kesiti, $r_{ss} = 5 \times 0.50 = 2.50$ m, uç deplasman miktarı, $d = 5 \times 0.05 = 0.25$ m’dir. Şekil 4.8’de düz kanatlar (sol) ve f5005 kanatları ile oluşturulmuş rotor şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.9. Düz kanatlı (sol) ve f5005 kanatlı (sağ) rotorlar

NREL Faz II kanadı referans alınarak ön ve arka olmak üzere iki adet eğim yönüne, üç adet eğiklik başlama noktası, %25, %50 ve %75, ve üç adet uç deplasman miktarına, %5, 10, 20, sahip olan yeni kanatlar tasarlanmıştır. Bu kanatlara ait çizimler Şekil 4.10’da toplu bir şekilde verilmiştir. Şekil 4.9’da, d/R deplasman miktarının, d (m) kanat yarı çapına, R (m), oranını, r_{ss}/R ise eğiklik başlama kesitinin radyal uzaklığının, r_{ss} , kanat yarıçapına oranını vermektedir. Kanat eğimleri dönme düzleminde verilmiş olup, kanatların dönme yönüne yani hücum kenarına doğru verilen eğim öne eğimi, dönme yönünün tersine yani firar kenarına doğru verilmiş eğim ise arkaya eğimi göstermektedir.



Şekil 4.10. NREL Faz II rüzgâr türbini baz alınarak yeni tasarlanan eğimli kanatlar

4.1.3. HAD Simülasyon Sonuçları

HAD analizleri daha öncede belirtildiği gibi 7.2 m/s ve 10.56 m/s olmak üzere iki adet rüzgar hızında yapılmıştır. Buna göre ön ve arka olmak üzere farklı eğim yönlerinde, eğiklik başlama kesitlerinde ve uç deplasman miktarlarında tork üretiminde ve itme katsayısında, referans rüzgar türbinine göre olan değişimler Çizelge 4.3’de verilmiştir.

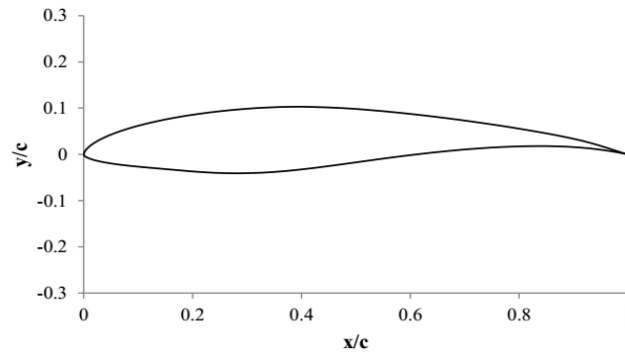
Çizelge 4.3. Eğimli kanatlar kullanılarak hesaplanan tork ve itme kuvveti değerlerinin referans rüzgar türbini için hesaplanan değerler ile karşılaştırılması

Kanatlar	7.2 m/s		10.56 m/s	
	Tork değişim (%)	İtme değişim (%)	Tork değişim (%)	İtme değişim (%)
f2505	-1.8	-1.2	0.2	-5.5
f2510	2.0	3.1	0.4	-5.6
f2520	1.9	3	-0.3	-4.8
f5005	2.1	1.3	1.4	0.4
f5010	0.5	0.1	-1.9	-0.8
f5020	-5.1	-2.9	-2.8	-1.31
f7505	-3.7	-3.2	-4.2	-8.2
f7510	-9.9	-5.5	-8.9	-11.3
f7520	-21.3	-9.1	-12.4	-13.4
b2505	-5.2	-2.5	0.7	-5.0
b2510	-5.2	-2.8	-0.6	-5.7
b2520	-3.8	-8.4	-9.7	-9.4
b5005	-19.3	-4.3	-10.2	-10.1
b5010	-11.2	-1.0	-13.7	-7.5
b5020	-4.0	-4.6	-1.3	-6.0
b7505	-12.1	-1.7	-8.4	-8.7
b7510	-1.4	-4.1	-12.3	-10.3
b7520	-9.6	-3.2	-3.8	-7.7

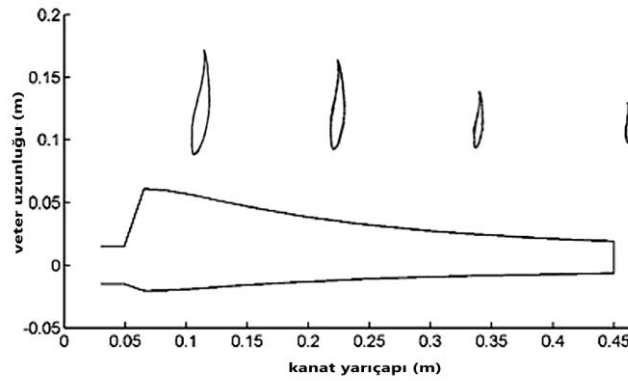
Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi, öne doğru yani dönme yönüne doğru kanatlar ile bir miktar güç üretiminde artış elde etmek mümkündür. Diğer bir sonuç ise arkaya eğimli kanatlarda genelde güç çıkışında azalma görülmesidir. Genel olarak eğimli kanatlar üretilen güç miktarında azalmaya sebep olurken, sadece f2510, f2520, f5005 kanatlı rüzgar türbinlerinde önemli bir artış görülmektedir. En çok artış oranları f5005 kanatlı rüzgar türbininde elde edilmiştir. Elde edilen diğer bir sonuç ise tork üretimindeki artışa paralel olarak itme kuvvetinin de artmasıdır. İtme kuvvetinde olan en büyük artış miktarları güç katsayısında artış miktarı en çok olan kanatlar için gerçekleşmiştir. Ayrıca genel olarak tüm arkaya eğimli kanatlar ile güç katsayısında azalma olduğu görülmüştür.

4.2. NTNU Model Rüzgar Türbini

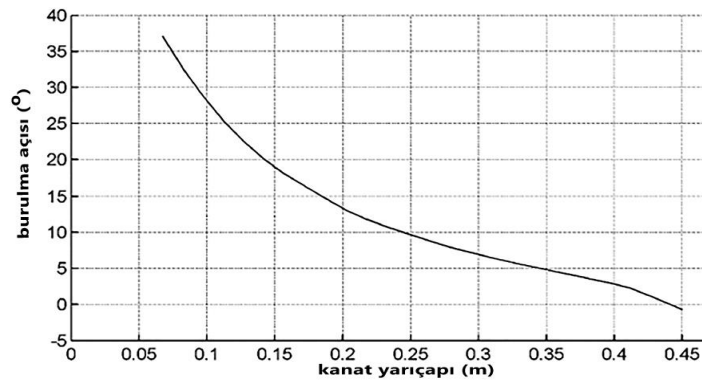
Bu bölümde Norveç Teknik Üniversitesi (NTNU) tarafından geliştirilen ve deneysel verileri mevcut olan Yatay Eksenli Model Rüzgar Türbini kullanılarak eğilme başlangıç kesiti ve uç deplasman miktarına bağlı aerodinamik performanstaki değişim incelenmiştir. NTNU model rüzgar türbini kanatlarında s826 kanat profili kullanılmış olup, bu profilin çizimi Şekil 4.11’de verilmiştir. Kanat, sırasıyla Şekil 4.12 ve 4.13’te verilmiş olan, her kesitte değişen veter uzunluklarına ve burulma açlarına sahiptir. Model rüzgar türbini 3 kanatlıdır ve rotor çapı 0.9 m’dir. Bu model rüzgar türbini ile ilgili detaylara Krogstad ve Lund (2012) tarafından yapılan çalışmadan ulaşılabilir.



Şekil 4.11. S826 kanat profili (Krogstad ve Lund, 2012)



Şekil 4.12. NTNU rüzgar türbini kanadı veter uzunlukları dağılımı (Krogstad ve Lund, 2012)



Şekil 4.13. NTNU rüzgar türbini kanadı burulma açıları dağılımı (Krogstad ve Lund, 2012)

4.2.1. HAD Metodolojisi ve Doğrulama

Kanat etrafındaki akışın simülasyonu için ANSYS Fluent 17.2 programı kullanılmıştır. Rüzgar türbini kanadı çizimi yapılırken bire bir verilen ölçüler kullanılmıştır. Buna göre her bir kesite verilen veter uzunluğunda ve burulma açısında s826 kanat profili yerleştirilmiş, daha sonra süpürme işlemi ile bu kesitler birleştirilerek kanadın katı modeli oluşturulmuştur. Şekil 4.14'te kanadın katı modelinin oluşturulması ve son rotor hali aşamalar halinde gösterilmiştir. Akış alanı, baz alınan model rüzgar türbininin deneylerinin yapıldığı Norveç Teknik Üniversitesinde bulunan rüzgar tünelinin boyutlarına göre oluşturulmuştur (Krogstad ve Lund, 2012). Buna göre öne ve arkaya doğru boyutlar, sırası ile 4.5D ve 7.8D olup, D rotor çapını göstermektedir. Sınır şartları; üst yüzey ve kanat duvar, giriş kısmı hız girişi, çıkış kısmı atmosferik basınçta basınç çıkışı, olarak, diğer kalan iki yüzey ise periyodik olarak tanımlanmıştır. Girişteki türbülans yoğunluğu rüzgar tüneli için belirtildiği şekilde %0.3 olarak alınmıştır (Pierella ve ark., 2014).

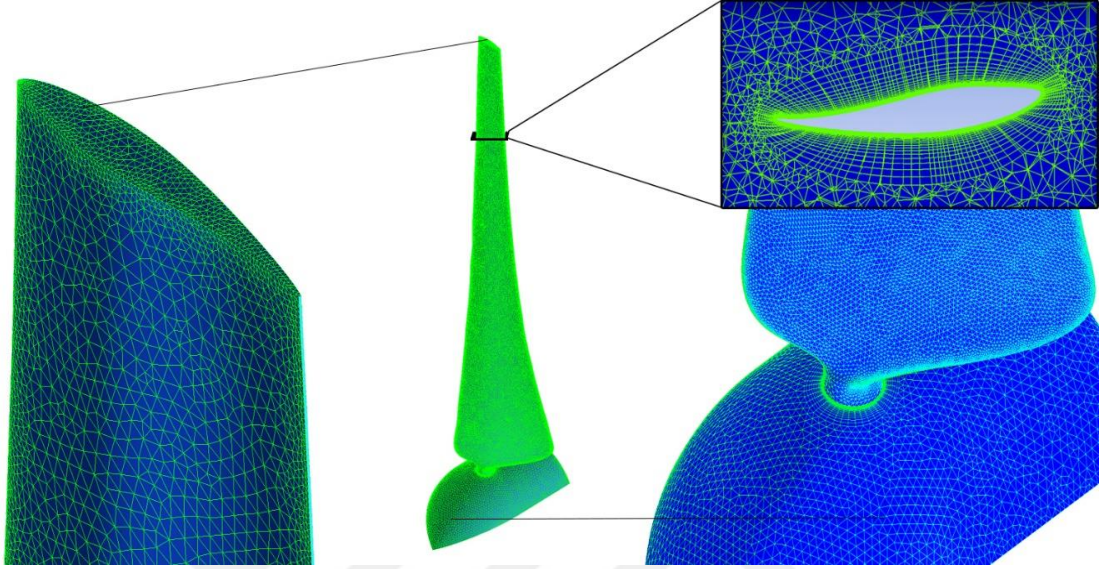


Şekil 4.14. NTNU model rüzgar türbini kanatlarının 3-Boyutlu çizimi

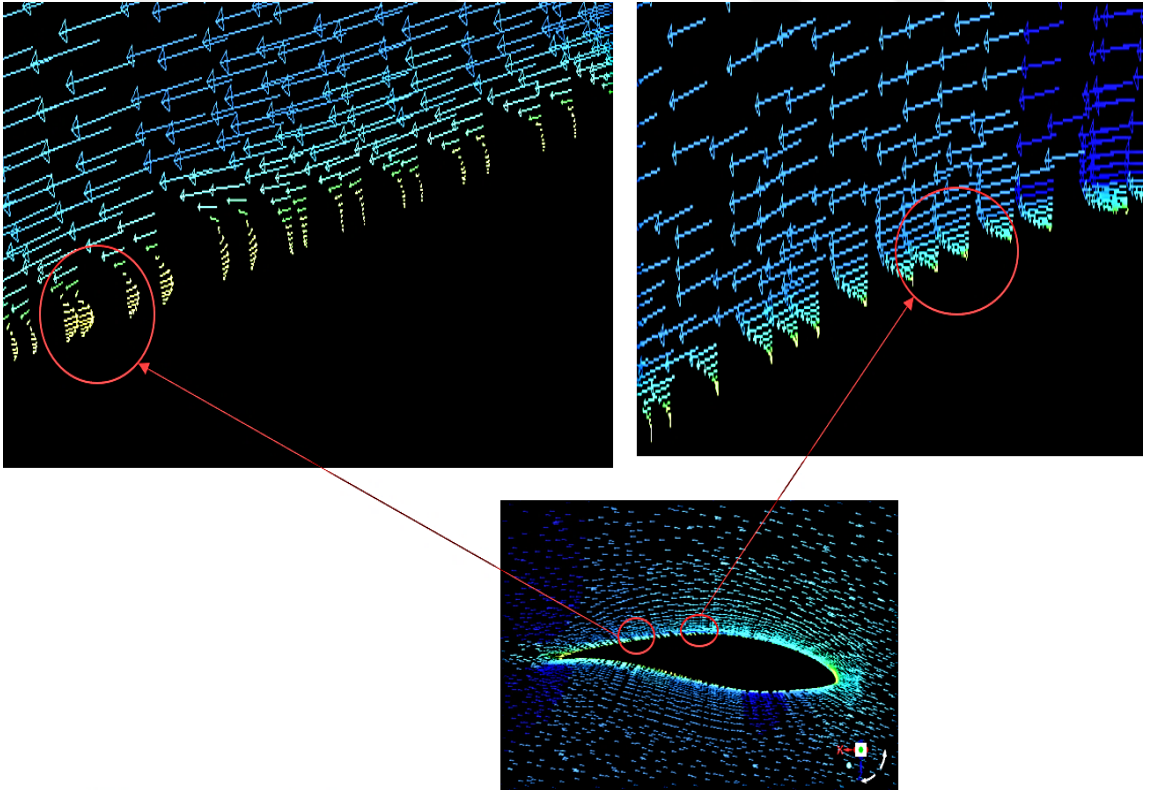
Periyodik sınır şartından yararlanmak için rüzgar tünelinin duvarları, rüzgar tünelinin test bölgesinin kesit alanı ile aynı olacak şekilde dairesel olarak oluşturulmuştur. Bu metot baz alınan kanadın deneysel çalışmalarını yapan araştırmacı dahil olmak üzere çeşitli rüzgar türbini HAD çalışmalarında kullanılmıştır (Sørensen ve ark., 2002; Krogstad ve Lund, 2012). HAD analizleri SIMPLE şeması, basınç için ikinci derece enterpolasyon şeması, momentum ve türbülans denklemleri için ikinci dereceden ayrıklaştırma şemaları kullanılarak yaptırılmıştır.

Çözüm ağı oluşturma işlemi ANSYS Meshing kullanılarak yapılmıştır. Özellikle rüzgar türbini kanatları gibi karmaşık geometriler için çözüm ağı oluşturma işlemi zordur. Bu

nedenle çözüm ağının oluşturması sırasında birçok boyut fonksiyonu kullanılmıştır. Kanat üstündeki ilk katmanın kalınlığı 1×10^{-5} olarak ayarlanmış, bu sayede y^+ değeri 1 civarında tutularak gelişmiş duvar işleme fonksiyonlarının kullanımına uygun hale getirilmiştir (Krogstad ve Lund, 2012).



Şekil 4.15. Kanat üzerindeki çözüm ağından resimler



Şekil 4.16. Kanat üzeri sınır tabakası ve ters basınç gradyanı oluşumu (y^+ 'ın önemi)

Şekil 4.15`te kanat üzerindeki ağdan resimler verilmiş olup daha kolay görülebilmesi adına resmin büyük hali EK-4`de de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, en önemli bileşen olan kanat üstünde ağ yoğunluğu fazla ve detaylıdır. Şekil 4.16`da ise yapılan bir simülasyon sonucunda elde edilen sonuca göre kanat üzerinde sınır tabaka ve ters basınç gradyanı oluşumu gösterilmiştir. Bu şeklin verilmesinin amacı, duvar üzerindeki ilk katmanın kalınlığı ile hesaplanan y^+ ’nın, çözüm ağının oluşturulmasında uygun bir şekilde ayarlanmasının önemini göstermektir. Çözüm ağı bağımsızlığı çalışması farklı hücre sayıları ile $k-\varepsilon$ Realizable ve $k-\omega$ SST türbülans modellerinin her ikisi de kullanılarak uç hız oranı $\lambda=6$ `da güç katsayıları hesaplanarak yapılmıştır. Dört adet hücre sayısı ile yapılan çözüm ağı bağımsızlığı çalışması için çözüm ağı ayrıntıları ve çıkan güç katsayısı sonuçları Çizelge 4.4.`te verilmiştir. Bu verilere göre sonuçlar 4.8 milyon eleman sayısından sonra çok fazla değişiklik göstermemiştir. Bu nedenle 4.8 milyon elemana sahip çözüm ağı tercih edilmiştir. Diğer eğik tüm kanatlar için aynı boyut fonksiyonları kullanılarak benzer sayılarda elemanlara sahip olan ağlar elde edilmiştir.

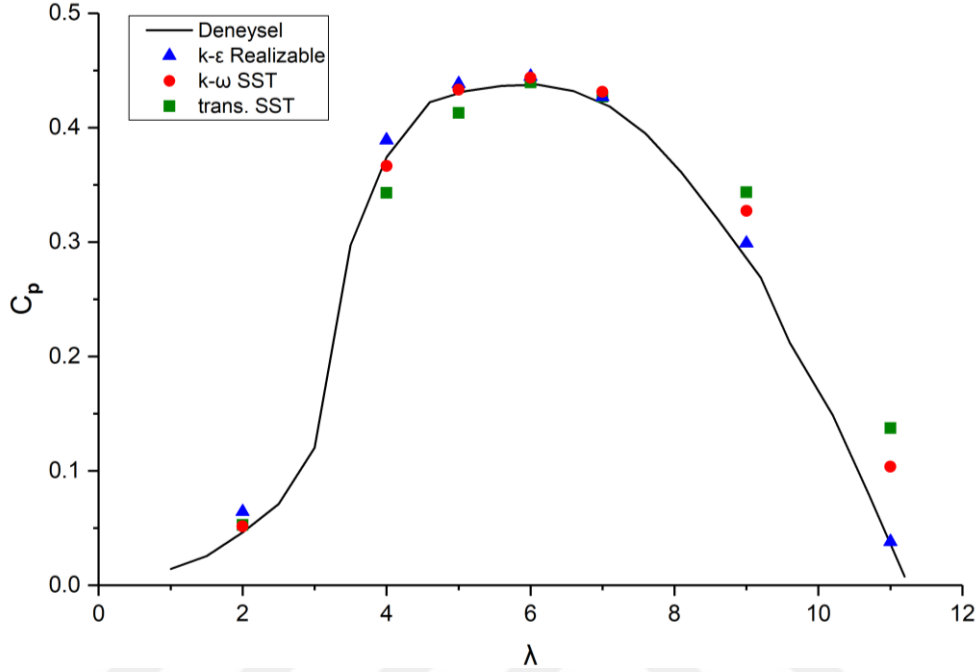
Çizelge 4.4. Çözüm ağı bağımsızlığı çalışması

Hücre sayısı ($\times 10^6$)	Düğüm sayısı ($\times 10^6$)	$\lambda=6$ da C_p $k-\varepsilon$ Realizable	$\lambda=6$ da C_p $k-\omega$ SST
2.2	0.9	0.4344	0.4303
3.5	1.52	0.4391	0.4376
4.8	2.02	0.4448	0.4437
6.5	2.73	0.4456	0.4454

Tüm HAD simülasyonları Sheffield Üniversitesi HPC merkezinde yapılmıştır. Genel olarak analizlerde Intel E5-2630 V3 işlemci ve 16 GB bellek kullanılmış ve simülasyonların her biri 8 işlemcide yaklaşık olarak 8 saat sürmüştür. Analizler HPC`de yapılırken Fluent programının arka plan modu (batch mode) kullanılmış olup, buna uygun olarak “journal” dosyaları yazılmış ve örnek bir tanesi EK-2`de verilmiştir.

HAD modelinin doğrulanması için, HAD sonuçları Krogstad ve Lund (2012) tarafından deneysel olarak elde edilmiş güç katsayısı ile uç hız oranı ($C_p - \lambda$) eğrisi ile karşılaştırılmış ve Şekil 4.17`de verilmiştir. Simülasyonlar yapılırken akış hızı, deneylerle benzer şekilde 10 m/s de sabit tutulmuş ve dönme hızı değiştirilerek $\lambda= 2, 4, 5, 6, 7, 9$ ve 11 için sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.17`de de görüldüğü gibi $k-\varepsilon$ Realizable ve $k-\omega$ SST türbülans modelleri çok iyi bir performans göstermiş ve sonuçları deneysel sonuçlara yakın çıkmıştır. İki model arasında, $k-\varepsilon$ Realizable modeli özellikle yüksek uç hız oranlarında

k- ω SST modeline göre daha iyi performans göstermiştir. Diğer bir model olan transition SST modeli diğer iki modele göre daha kötü bir performans göstermiştir. Bu nedenle NTNU rüzgar türbini HAD simülasyonlarında k- ϵ Realizable modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.17. HAD ile elde edilmiş güç katsayılarının (C_p) deneysel veriler karşılaştırılması

4.2.2. Yeni Tasarlanan Eğimli Kanatlar

Eğimli kanatları oluşturmak için literatürde birkaç denklem bulunmaktadır (Ashwill, 2010; Verelst ve Larsen, 2010; Hansen, 2011; Amano ve ark., 2013). Ancak bu denklemler ile sadece tek bir eğiklik başlama kesiti ve uç deplasman miktarına sahip eğik kanatlar oluşturulabilmektedir. Bu nedenle her bir kanat kesitindeki (r/R , R rotor yarıçapı) hatve ekseninden deplasman miktarlarının hesaplanmasına olanak sağlayan, eğiklik başlama kesiti, uç deplasman miktarı ve eğiklik sertliği değerlerinin bağımsız olarak değiştirilebildiği bir denklem geliştirilmiştir (Denklem 4.1).

$$z_{\text{offset}} = \frac{(r_r - r_{ss}) x (R x P_s) / (R - r_{ss})}{M^{((1-P_r) x (1-P_{rss}) / P_r)}} \quad (4.1)$$

Bu denklemde z_{offset} deplasman (kanat hatve ekseninden kayma) miktarını (m), r_r kesitin radyal uzaklığını (m), r_{ss} eğiklik başlama kesitinin radyal uzaklığını (m), R kanat (rotor)

yarıçapını (m), P_s uç deplasman miktarının kanat yarıçapına oranını, M eğiklik sertliğini, P_r radyal uzaklığın kanat yarıçapına oranını, P_{rss} ise eğiklik başlama kesitinin radyal uzaklığının kanat yarıçapına oranını ifade etmektedir. Bu bölümde amaç eğimin yönü, başlangıç kesiti ve uç deplasman miktarının etkisini incelemek olduğu için, ortalama bir eğiklik mertebesi olan $M=2$ değeri sabit olarak alınmıştır. Denklemdaki $R \times P_s$ değeri d , yani kanat ucundaki deplasman değerini vermektedir (Denklemler 4.2).

$$d = R \times P_s \quad (4.2)$$

Eğik kanatların, aerodinamik performans üzerindeki etkisini incelemek için Çizelge 4.5`de verilen iki adet eğiklik yönü, dört adet eğiklik başlangıç miktarı ve dört adet uç deplasman miktarı seçilmiştir. Toplamda 32 adet eğimli kanat Denklem 4.1 kullanılarak tasarlanmış ve bu kanatların çizimleri Şekil 4.18`de verilmiştir. Öne doğru eğiklik dönme yönüne doğru eğikliği, arkaya doğru eğiklik ise dönme yönünün tersine doğru olan eğikliği ifade etmektedir.

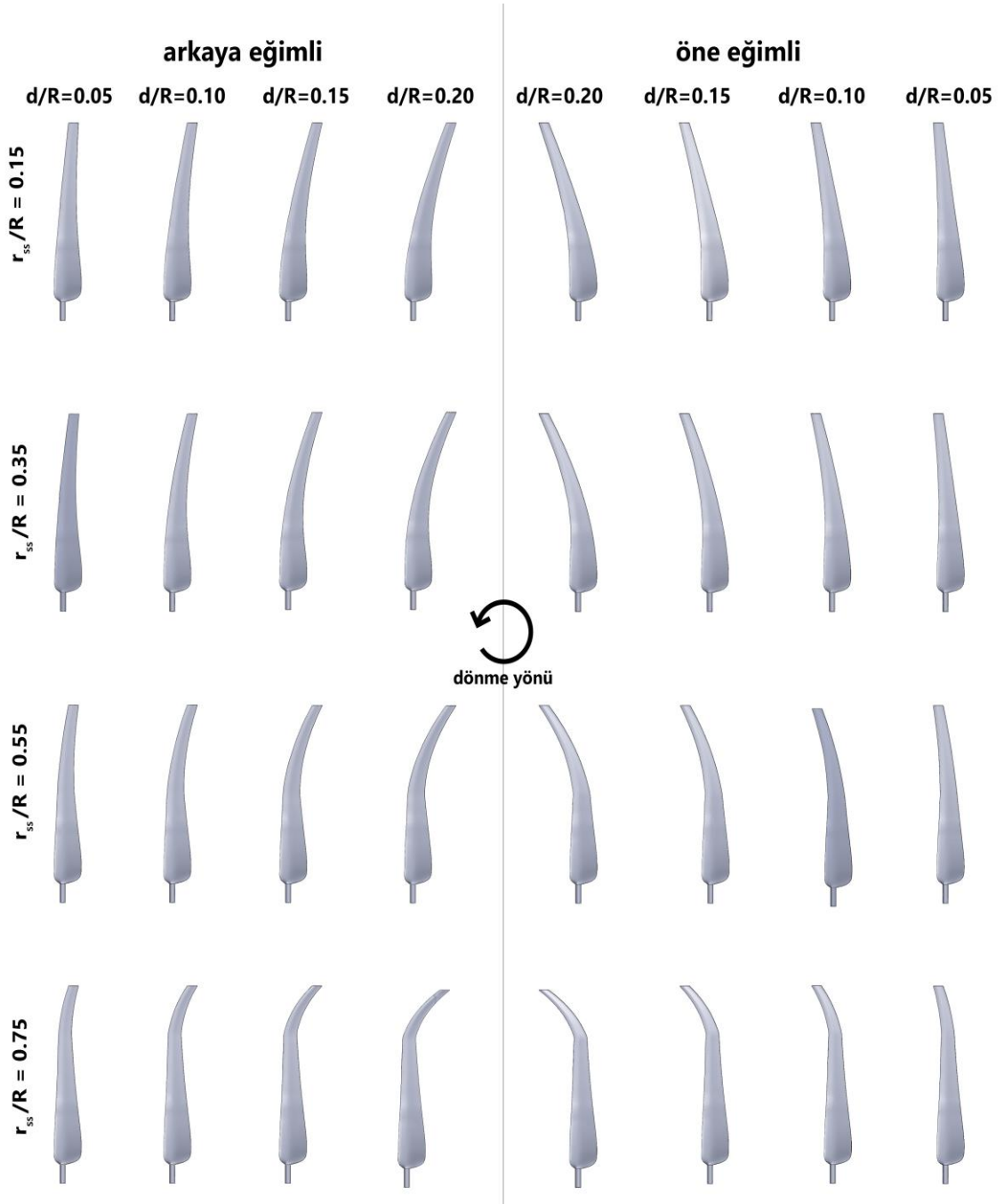
Çizelge 4.5. Yeni tasarlanan eğimli kanatlar

Yön	Eğiklik başlangıç (r/R)	Uç deplasman miktarı (d/R)
Ön	0.15	0.05
	0.35	0.10
Arka	0.55	0.15
	0.75	0.20

4.2.3. HAD Simülasyon Sonuçları

Daha önce de belirtildiği gibi sonuçların gösteriminin daha basit bir şekilde yapılabilmesi için bir adlandırma yöntemi belirlenmiştir. Özetle, f harfi öne doğru (forward), b harfi arkaya doğru (backward) eğimi göstermekte olup, harften sonra gelen iki rakam eğikliğin başlangıç bölgesinin yüzde olarak kanat yarıçapına oranının (r_{ss}/R), sonraki iki rakam ise uç deplasman miktarının kanat yarıçapına oranının (d/R) yüzde cinsinden değerini vermektedir. Örneğin “f1510” öne doğru eğik, eğiklik başlama kesiti kanat yarıçapının %15`inde olan ($r/R=0.15$) ve uç deplasman miktarı ise kanat yarıçapının %10`u kadar olan ($d/R=10$) kanadı göstermektedir. Çizelge 4.6`da eğimli kanatlar ile elde edilen güç katsayısı (C_p) değerlerinin baz alınan rüzgar türbinine göre değişimleri verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi öne eğimli kanatlar için güç katsayısı değerleri genellikle artarken, arkaya eğimli kanatlar ile genellikle azalmıştır. En yüksek güç katsayısı “f1520”

kanadına sahip rüzgar türbini ile elde edilmiş olup, bu kanat için ortalama $k-\varepsilon$ Realizable modeli ile elde edilmiş sonuca göre %2.9 oranında önemli bir artış sağlanmıştır.



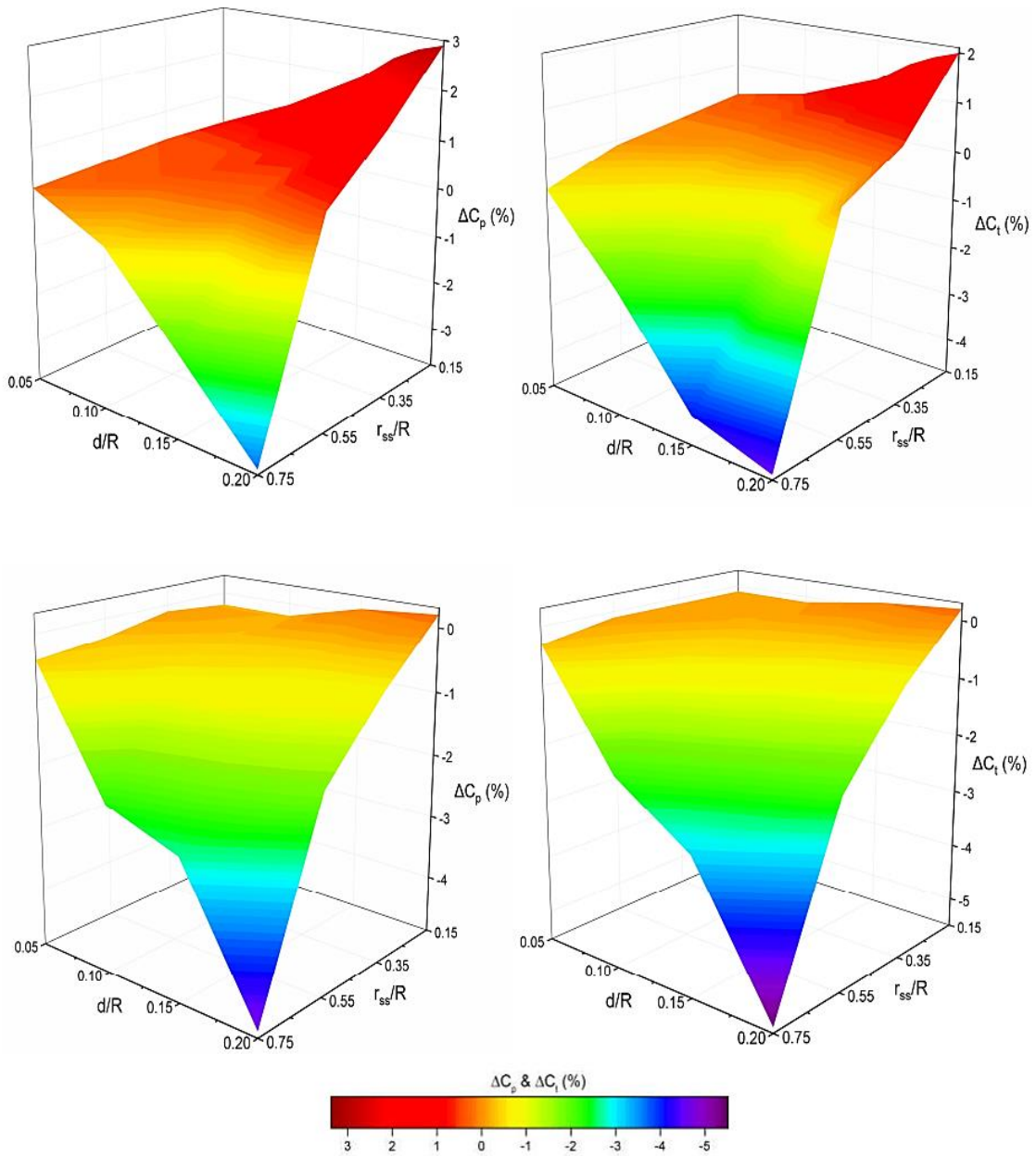
Şekil 4.18. Yeni tasarlanmış eğimli kanatların çizimleri

NTNU rüzgar türbinine ait sonuç bölümündeki diğer grafiklerde, doğrulama bölümünde daha başarılı olduğu için $k-\varepsilon$ Realizable türbülans modeli kullanılmıştır. Şekil 4.19'da öne eğimli (üst) ve arkaya eğimli (alt) kanatlar ile güç katsayısı (C_p) ve itme katsayısının (C_T)

eğiklik başlama kesiti (r_{ss}/R) ve uç deplasman miktarına (d/R) bağlı olarak değişimini gösteren 3 boyutlu yüzey grafikleri verilmiştir.

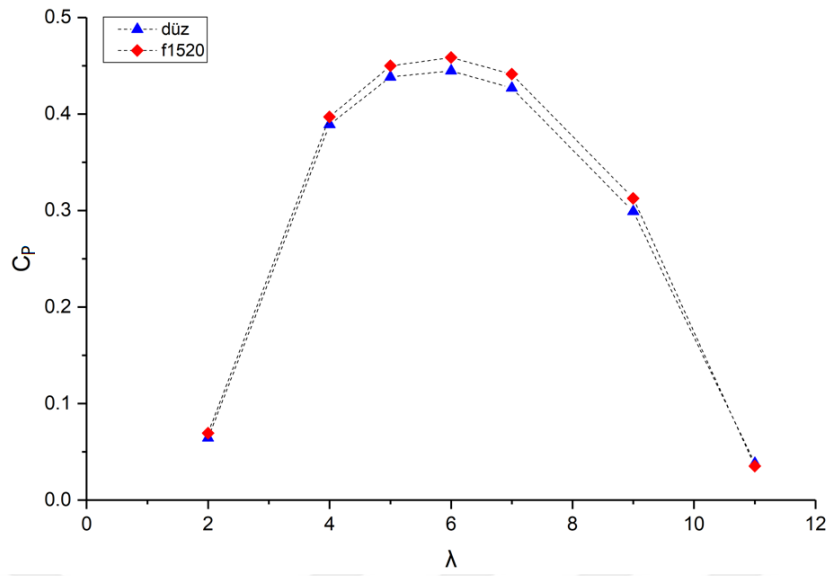
Çizelge 4.6. Eğimli kanatlar ile elde edilen güç katsayısı (C_p) değerlerinin referans rüzgar türbinin değerine göre değişimleri ($\lambda=6$)

Kanat	k- ε Realizable	k- ω SST	Ortalama
	ΔC_p (%)	ΔC_p (%)	ΔC_p (%)
f1505	0.5	0.3	0.4
f1510	1.1	0.7	0.9
f1515	2.0	1.5	1.8
f1520	2.9	2.1	2.5
f3505	0.4	0.2	0.3
f3510	0.5	0.4	0.5
f3515	0.7	0.7	0.7
f3520	1.6	1.3	1.5
f5505	0.3	0.0	0.1
f5510	0.7	0.1	0.4
f5515	1.0	0.0	0.5
f5520	1.2	0.2	0.7
f7505	0.2	-0.1	0.1
f7510	-0.8	-0.7	-0.7
f7515	-0.6	-3.4	-2.0
f7520	-2.3	-5.3	-3.8
b1505	-0.2	-0.2	-0.2
b1510	-0.1	-0.3	-0.2
b1515	0.2	-0.4	-0.1
b1520	0.7	-0.3	0.2
b3505	-0.2	-0.3	-0.3
b3510	-0.2	-0.7	-0.5
b3515	-0.2	-1.1	-0.7
b3520	-0.1	-1.6	-0.9
b5505	-0.4	-0.6	-0.5
b5510	-0.4	-0.9	-0.6
b5515	-0.6	-1.5	-1.0
b5520	-0.6	-2.4	-1.5
b7505	-0.5	-0.8	-0.6
b7510	-1.0	-1.5	-1.3
b7515	-1.6	-3.1	-2.3
b7520	-2.5	-6.6	-4.5

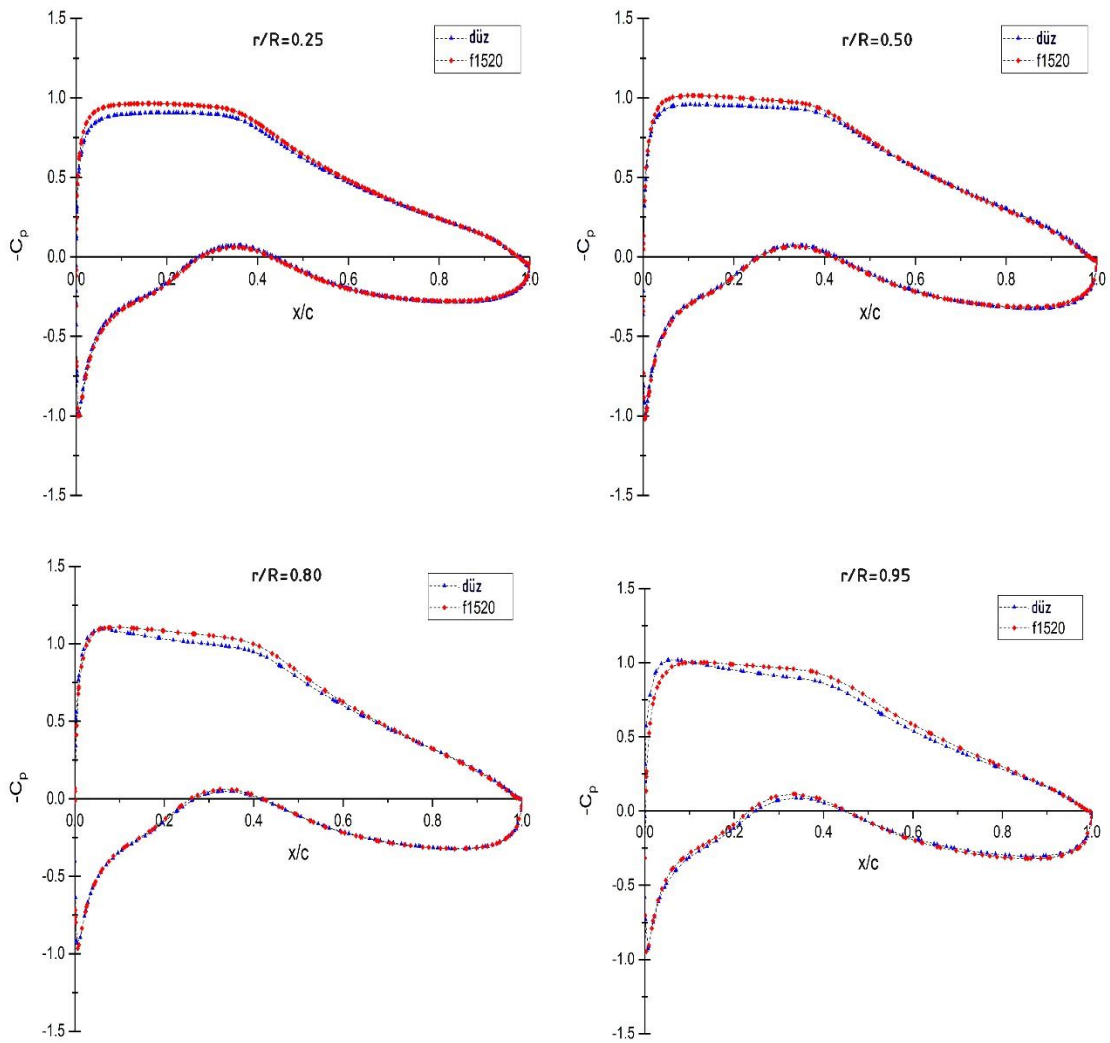


Şekil 4.19. Öne eğimli (üst) ve arkaya eğimli (alt) kanatlar ile güç katsayısı (C_p) ve itme katsayısının (C_T) eğiklik başlama kesiti (r_{ss}/R) ve uç deplasman miktarına (d/R) bağlı olarak değişimleri ($\lambda=6$)

Bu grafiklere göre öne eğimli kanatlar ile güç katsayısında artışlar elde edildiği, arkaya eğimli kanatlarla ise genel olarak güç katsayısında azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca güç katsayısındaki artışın itme katsayısında artışı beraberinde getirdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.20’de baz alınan düz rüzgar türbini kanadı ile en yüksek güç katsayısına sahip rüzgar türbine ait $C_p - \lambda$ eğrileri karşılaştırılmıştır. Güç eğrisi karşılaştırmasında açıkça fl520 kanatlı rüzgar türbininin, baz alınan rüzgar türbinine göre neredeyse tüm uç hız oranlarında daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Bu kanat için $\lambda=6$ ’daki güç katsayısındaki artış miktarı yaklaşık %2.9’tur.

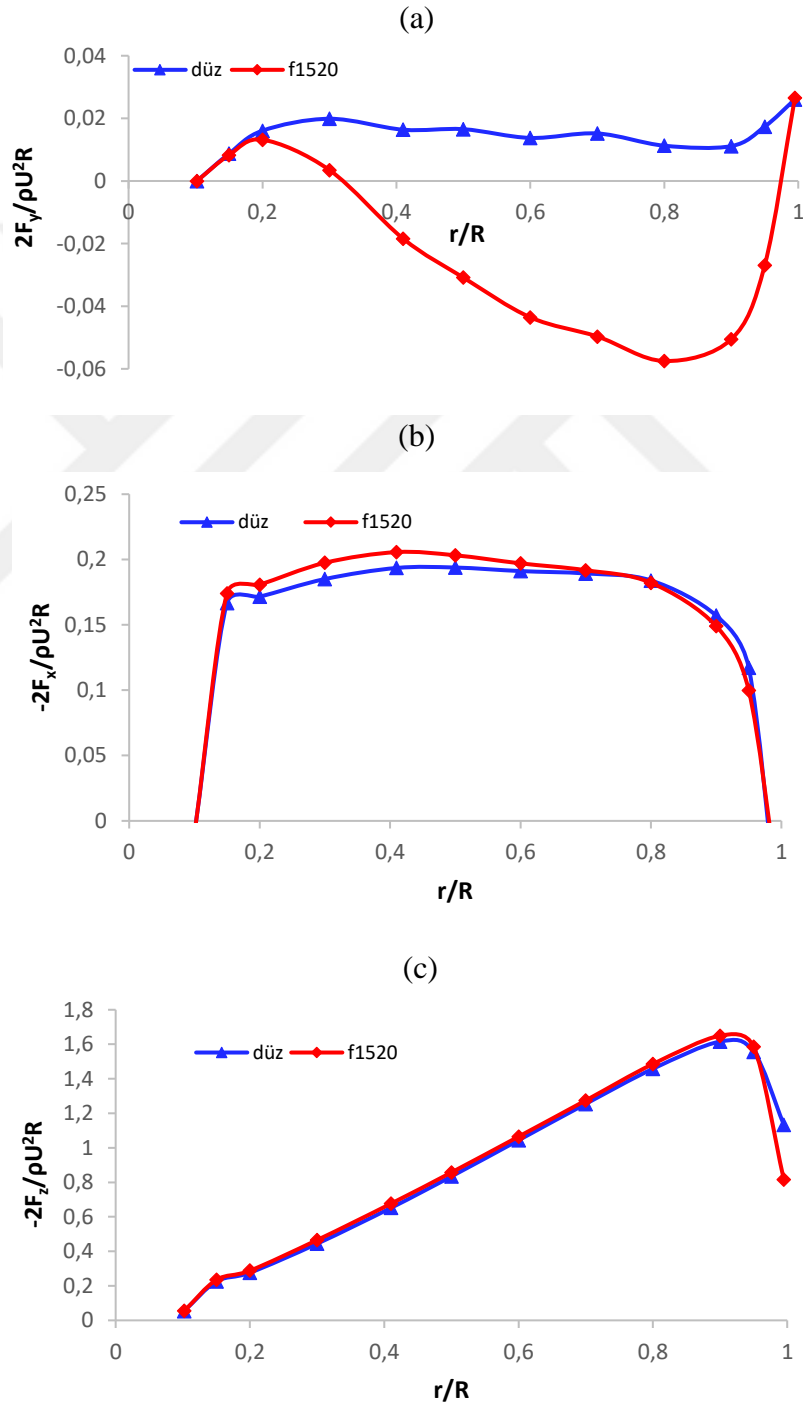


Şekil 4.20. Referans ve f1520 kanatlı rüzgar türbinlerinin $C_p - \lambda$ eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.21. Referans ve f1520 kanatlı rüzgar türbinleri için basınç dağılımları ($\lambda=6$)

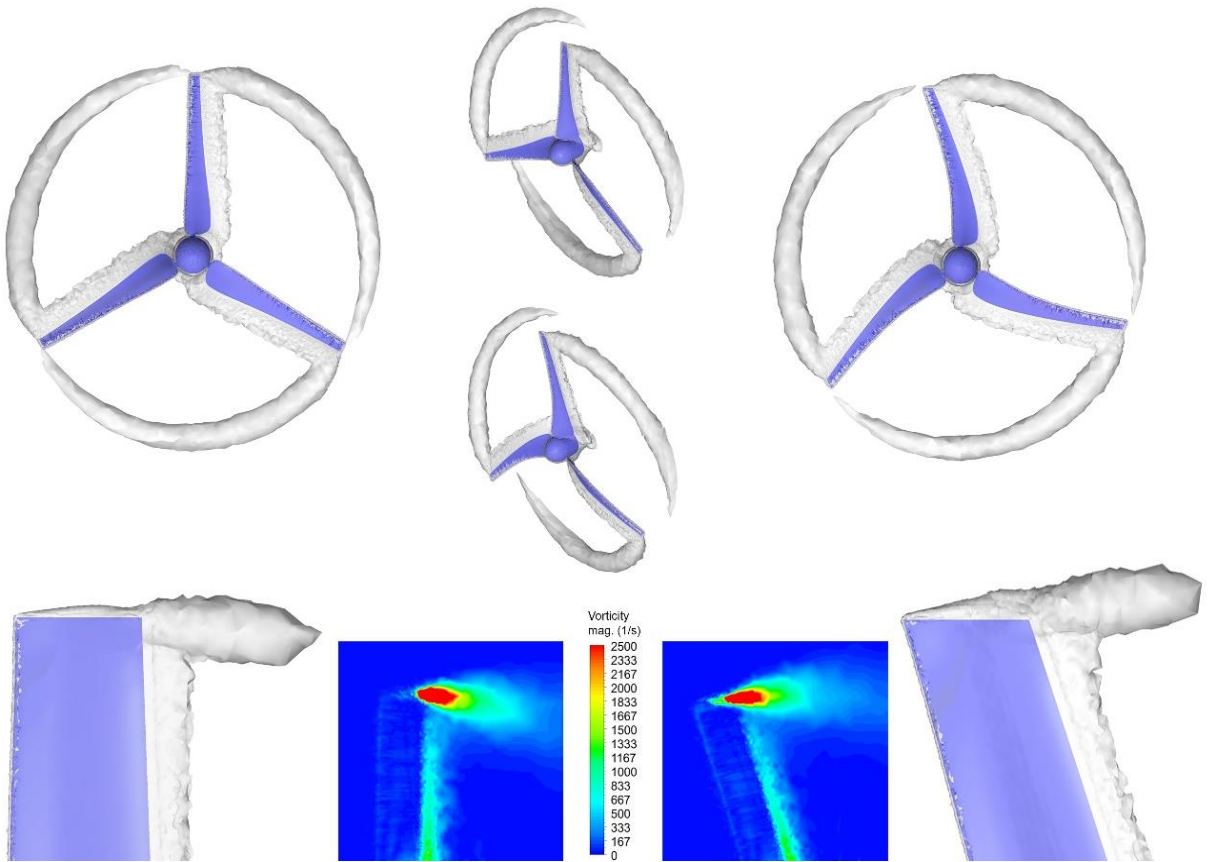
Referans ve f1520 kanatlı rüzgar türbinleri için basınç dağılımları $r/R=0.25, 0.50, 0.80$ ve 0.95 olmak üzere 4 adet kesitte karşılaştırılmış ve Şekil 4.21`de verilmiştir. Basınç dağılımlarında da açıkça görüldüğü gibi f1520 kanadı daha fazla basınç farkına sahiptir. Bilindiği gibi iki eğri arasında kalan alanın integrali, kaldırma kuvveti katsayısını vermektedir. Ayrıca basınç dağılımlarının literatürde aynı kanat için yapılan HAD çalışmalarındaki sonuçlara benzer olduğu görülmüştür (Karlsen, 2009; Khalafallah ve ark., 2015).



Şekil 4.22. Radyal (a), teğetsel yönde (b) ve akış yönünde (c) boyutsuz kuvvet dağılımları grafikleri ($\lambda=6$)

Şekil 4.22’de radyal (a), teğetsel yönde (b) ve akış yönünde (c) boyutsuz kuvvet dağılımları grafikleri verilmiştir. Burada radyal yön, kanadın baş kısmından uç kısmına doğru olan akış yönüne (z) dik yönü göstermektedir (Khalafallah ve ark., 2015; Krogstad ve Lund, 2012). Sairam ve Turner (2014) tarafından yapılan çalışmaya göre radyal kuvvet dağılımı, rüzgar türbini kanatlarında önemli bir rol oynamaktadır. Buna göre negatif radyal kuvvetleri dağılımı, kanat etrafındaki akışı etkileyerek kanat uç kısmından hava geçişini kısmen yavaşlatmaktadır. Şekil 4.21 (a) da f1520 kanadının negatif bir radyal kuvvet dağılımı olduğu açıkça görülmektedir. Teğetsel ve akış yönündeki kuvvet dağılımlarına bakılacak olursa f1520 büyük bir bölümde daha fazla teğetsel kuvvete sahip olup akış yönündeki kuvvet dağılımı arasındaki fark çok fazla değildir. Teğetsel kuvvet dağılımı grafiğinden çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise eğimli kanat için kanadın radyal olarak düşük uzaklığındaki bölgelerindeki kuvvet artışıdır.

Son olarak Şekil 4.23’te uç girdapları, çevrinti (vortisite) eş-yüzeyleri düz (sol) ve f1520 (sağ) kanatları için karşılaştırılmıştır. Grafiklerdeki eş-yüzeyler incelendiği zaman f1520 kanadı ile uç girdap yoğunluğunda bir miktar azalma olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23. Düz (sol) ve optimum (sağ) kanatlar için uç girdapların çevrinti eş-yüzeylerinin (yukarı $\omega_v=70 \text{ s}^{-1}$, aşağı $\omega_v=2500 \text{ s}^{-1}$) karşılaştırılması ($\lambda=6$)

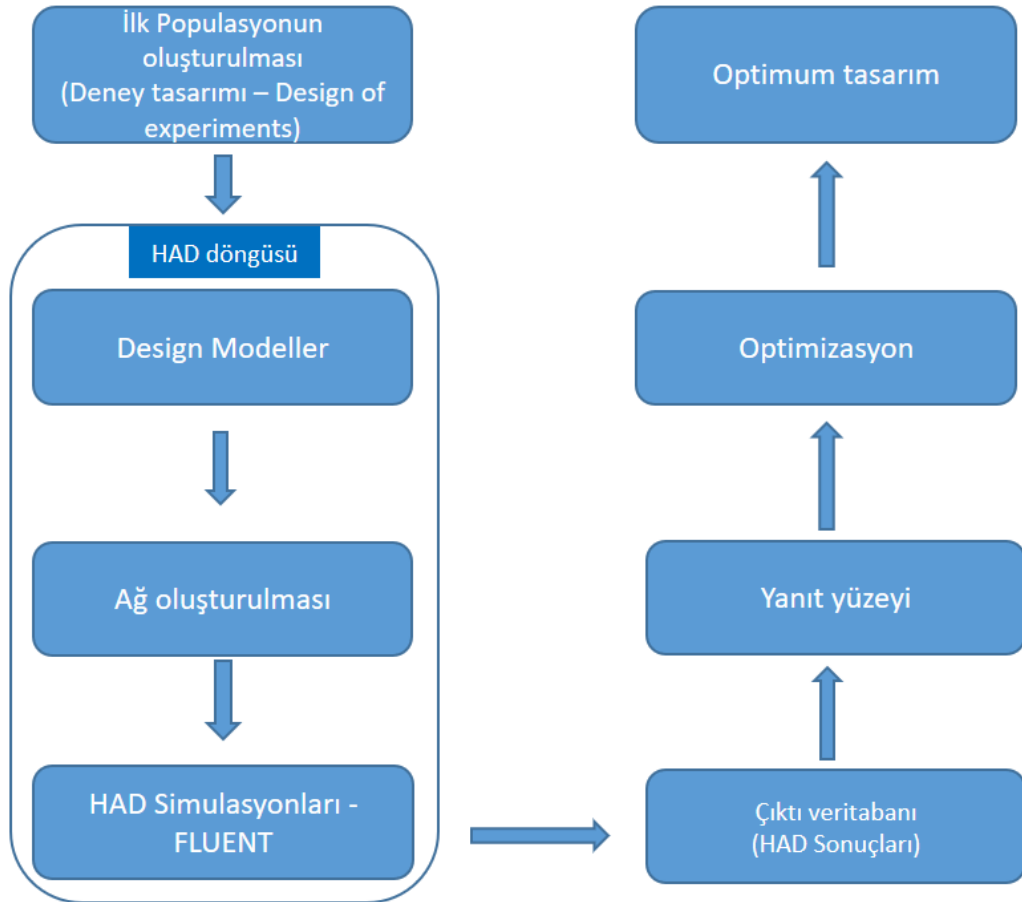
4.3. Parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlar

Aşağıda yatay ekseni rüzgar türbini kanatlarında eğimin yönü, uç deplasman miktarı ve eğimin başlangıç kesitinin aerodinamik etkileri ile ilgili sonuçlar sıralanmıştır.

- Türbülans modeli olarak en başarılı performansı k- ϵ Realizable modeli göstermiştir. Bu türbülans modeli ile literatürdeki deneysel sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- Genel olarak öne doğru eğimli kanatlar ile güç artışı sağlanabilirken, arkaya doğru eğimli kanatlar ile güç çıkışında azalma görülmüştür.
- Güç artışı genel olarak düşük eğim başlama kesitlerinde sağlanmıştır. Özellikle $r_{ss}/R=0.5$ 'den sonra öne eğimli kanatlarda da genel olarak güç çıkışında azalma görülmüştür.
- Uç deplasman miktarındaki artış, eğimin başlama kesitine bağlı olarak güç çıkışını pozitif veya negatif etkilemektedir. Yüksek eğiklik başlama kesitlerinde etki negatif iken, düşük kesitlerde etki pozitifdir.
- Eğiklik sertliği, uç deplasmanı ve eğiklik başlama kesitini içeren bir denklem önerilmiştir. Ayrıca eğimli kanatlar ile önemli miktarda güç çıkışında artış sağlanabileceğini anlaşılmıştır.

5. OPTİMİZASYON

Bu çalışmada, HAD hesaplamalarının maliyetli olmaları ve uzun süre almaları nedeniyle meta model yöntemlerinin kullanımı daha uygun bulunmuştur. Meta model yöntemlerinden yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, uygun bir deney tasarımı yöntemi kullanılarak oluşturulan örnek noktalarda yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla tasarım değişkenleri arasında matematiksel ilişki kurulması (yani meta model oluşturulması) ve oluşturulan matematiksel modelin en iyileşme süreci dâhilinde kullanılmasına dayanmaktadır. Şekil 5.1’de tez çalışmasında uygulanan optimizasyon işleminin aşamaları kısaca verilmiştir. Buna göre öncelikle deney tasarımı (örneklem) oluşturulur. Daha sonra kanatların çizimi, çözüm ağı oluşturulması ve HAD simülasyonlarının içeren HAD döngüsü başlar. HAD döngüsünden elde edilen sonuçlar bir çıktı veri tabanına aktarılır. Bu veri tabanındaki sonuçlar kullanılarak yanıt yüzeyleri oluşturulur. Bunlar kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilir ve optimum tasarım elde edilir.

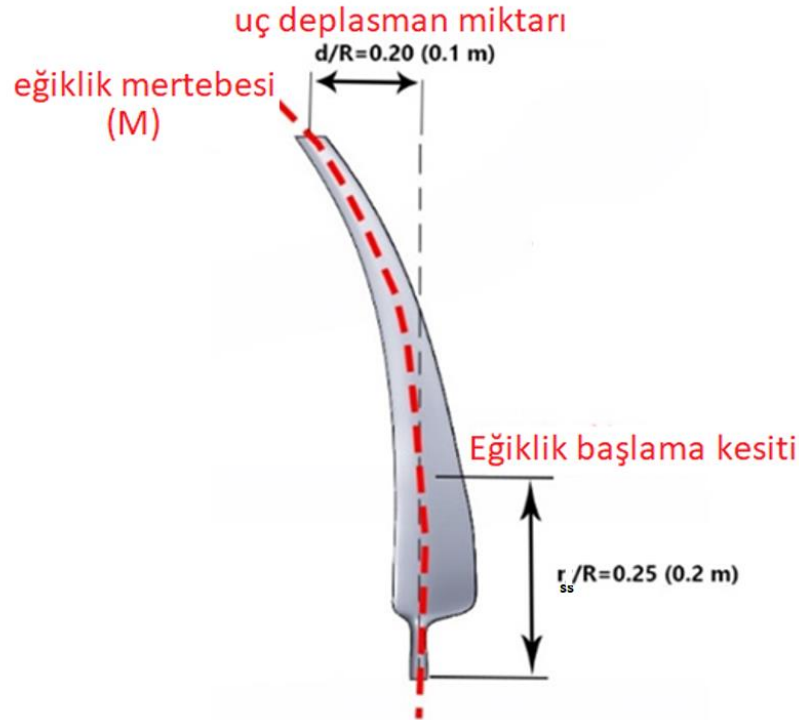


Şekil 5.1. Optimizasyon prosedürü

5.1. Tasarım Parametreleri

Optimizasyonda amaç tasarım uç hız oranında ($\lambda=6$) maksimum güç katsayısını elde etmektir. Optimum eğimli kanat tasarımında kullanılan üç adet parametre olup bunlar aşağıda verilmiştir. Kanat hatve açısının en uygun değerinin bulunması sonraki aşamada yapılmıştır (El Farra, 2011).

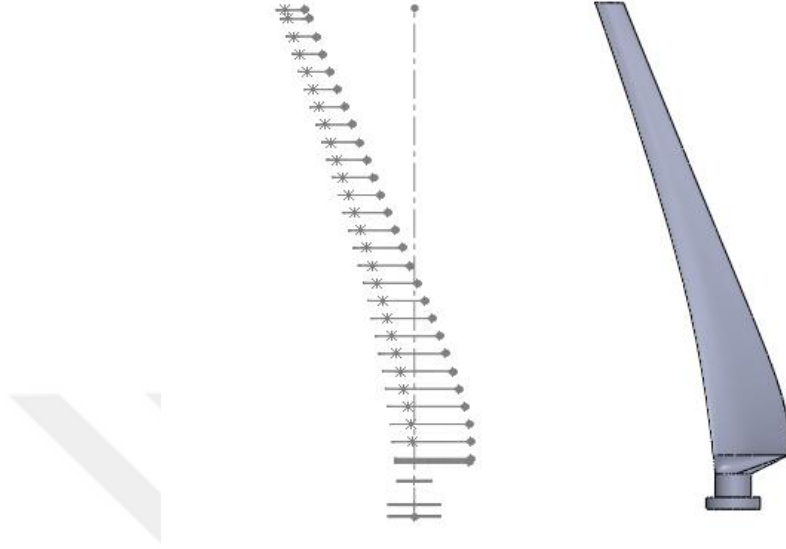
- 1- **Eğiklik Başlama kesiti:** Bu bölge radyal olarak kanadın eğikliğinin başlatıldığı kesittir. Kanat boyunun ilk kesiti olan $r_{ss}/R=0.18$ alt sınır ve $r_{ss}/R=0.58$ üst sınırdır ($0.18 \leq r_{ss}/R \leq 0.58$)
- 2- **Uç Deplasman Miktarı:** Kanadın ucundaki deplasman miktarını belirtmektedir. Alt sınır $d/R=0.01$ ve üst sınır ise $d/R=0.25$ 'dir ($0.01 \leq d/R \leq 0.25$)
- 3- **Eğiklik Mertebesi (Mod):** Kanadın eğiklik sertliğini (derecesini) belirleyen değişkendir. Alt sınır 1.25, üst sınır 5 olarak belirlenmiştir ($1.25 \leq M \leq 5$).



Şekil 5.2. Optimizasyon parametrelerinin kanat üzerinde gösterimi

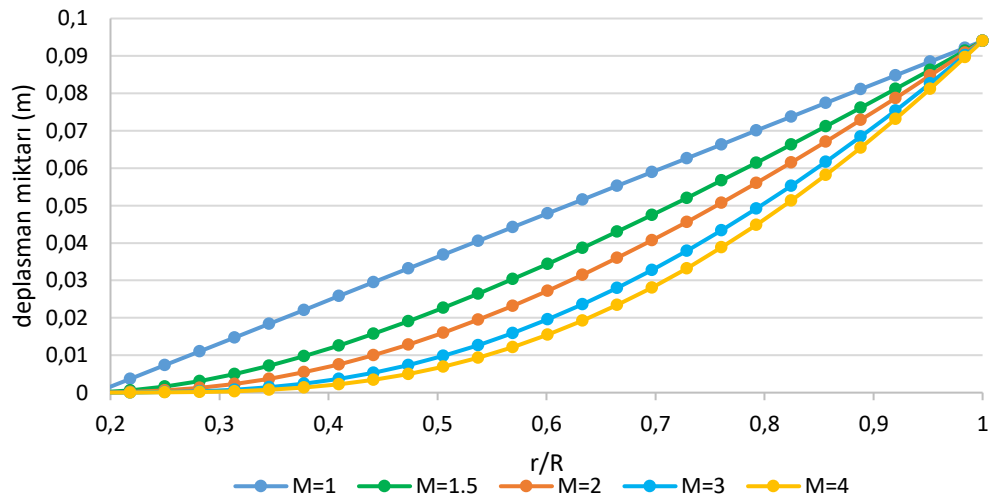
Bölüm 4.2’de bahsedildiği gibi eğimli kanatları oluşturmak için literatürde bulunan denklemler ile tek bir eğiklik başlama kesiti ve uç deplasman miktarına sahip eğimli kanatlar oluşturulabileceği için yeni bir denklem önerilmiştir. Bu denklem ile, Şekil 5.3’te verildiği gibi her bir kanat kesitindeki kanat hatve ekseninden sapma (deplasman)

miktarları hesaplanmakta, eğiklik başlama kesiti, uç deplasman miktarı ve eğiklik sertliği değerleri bağımsız olarak değiştirilebilmektedir. Denklem, 4. bölümde Denklem 4.1 olarak verilmiştir.

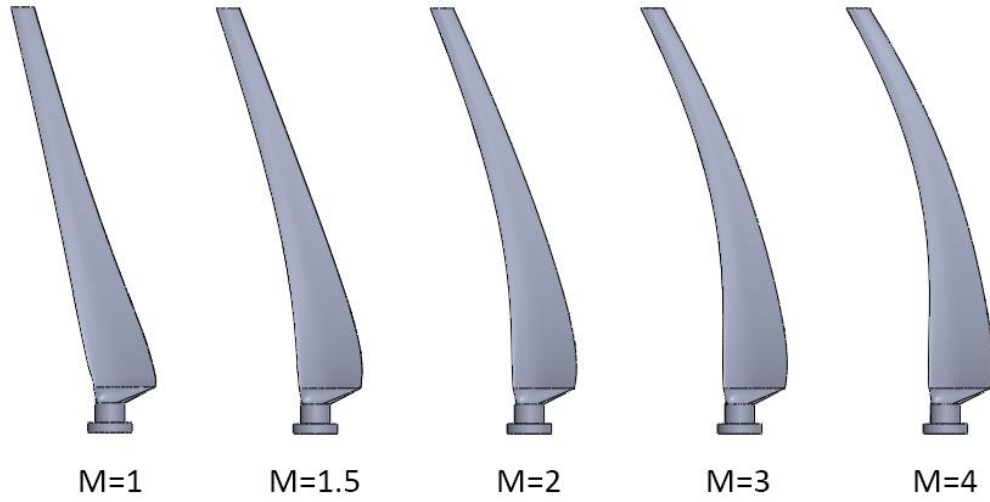


Şekil 5.3. Her bir kesitte merkez ekseninden sapmanın gösterimi

Denklem 4.1'deki eğiklik mertebesi (mod) değeri (M) 1.25-5 arası değişebilmektedir. Eğiklik mertebesi değeri $M=1$ olan kanadın farklı kesitlerindeki deplasman miktarları dağılımı lineerdir. En az değer 1.25 olarak belirlenmesinin nedeni 1'e yakın değerler ile oluşturulabilecek eğimli kanatların eğiklik başlangıç kesitlerinde ani sapmalar ile oluşabilecek keskin köşelerin önüne geçmektir. Şekil 5.4'te çeşitli eğiklik mertebesine göre radyal uzaklığa bağlı olarak deplasman miktarları verilmiş, Şekil 5.4'de ise bu kanatların görselleri verilmiştir.



Şekil 5.4. Sabit uç deplasman miktarı ve eğiklik başlangıç kesitine sahip örnek bir kanat için farklı eğiklik mertebelerine bağlı deplasman miktarının değişiminin grafiksel gösterimi



Şekil 5.5. Farklı eğiklik mertebelerine bağlı deplasman miktarının değişiminin sabit uç deplasman miktarı ve eğiklik başlangıç kestine sahip örnek bir kanat üzerinde gösterimi

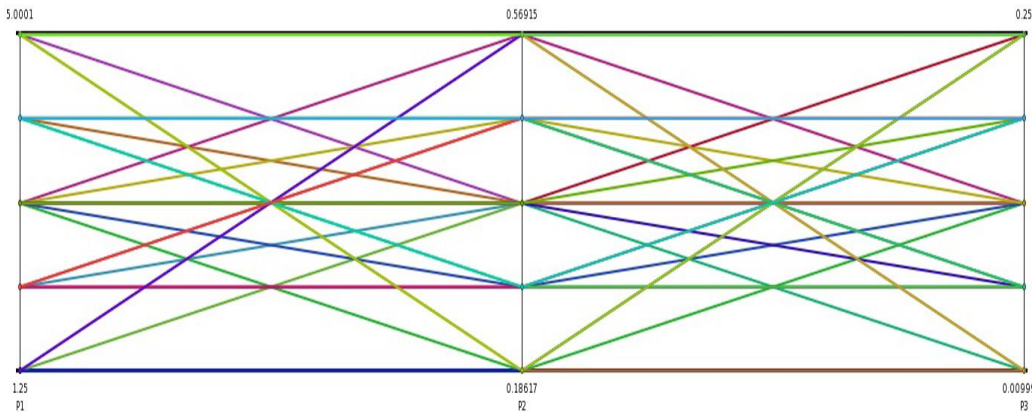
Çizelge 5.1. Örnek bir eğimli kanada ait (f1801-1.25) sapma değerleri

Sıra	r/R	Deplasman miktarı (m)
1	0.058511	0
2	0.14681	0
3	0.159572	0
4	0.18617	0
5	0.218082	0.000069
6	0.250003	0.000162
7	0.281915	0.000275
8	0.313827	0.000405
9	0.345748	0.000549
10	0.37766	0.000704
11	0.409571	0.000869
12	0.441493	0.001042
13	0.473404	0.001223
14	0.505316	0.001409
15	0.537237	0.001601
16	0.569149	0.001797
17	0.601061	0.001997
18	0.632982	0.002201
19	0.664894	0.002408
20	0.696805	0.002617
21	0.728727	0.002829
22	0.760638	0.003043
23	0.79255	0.003259
24	0.824471	0.003477
25	0.856383	0.003697
26	0.888295	0.003917
27	0.920216	0.00414
28	0.952128	0.004363
29	0.984039	0.004587
30	1	0.0047

Optimizasyon bölümünde tasarlanan kanatlar için daha önce 4. bölümde belirtilen adlandırma yöntemine benzer bir yöntem kullanılmıştır. Buradaki tanımlamayla ek olarak “-” işaretinden sonra gelen kısım eğiklik mertebesi (M) değerini göstermektedir. Örneğin “f1801-1.25” öne doğru eğik, eğiklik başlama kesiti kanat yarıçapının %18`inde olan ($r/R=0.18$), uç deplasman miktarı kanat yarıçapının %1`i kadar olan ($d/R=0.01$) ve eğiklik mertebesi değeri $M=1.25$ olan kanadı göstermektedir. Örnek bir kanada ait farklı kesitlerdeki geliştirilen denklem ile hesaplanmış deplasman değerleri Çizelge 5.1`de verilmiştir.

5.2. İlk Popülasyonun Oluşturması - Deney Tasarımı

Deney tasarımı (design of experiments) aşamasında analizlerin gerçekleştirileceği örneklem noktaları oluşturulmakta ve bundan sonra ise en uygun şekilde sokma süreci başlamaktadır. Belirlenecek örneklem noktalarının yerleri, yanıt yüzeyinin doğruluğunu direkt olarak etkilemektedir, bu nedenle etkili bir deney tasarımı oluşturmak büyük önem arz etmektedir. Literatürde Merkezi Karma Tasarım (MKT), Optimal Boşluk Doldurma (Optimal Space Filling), Box-Behnken Tasarımı, Seyrek Ağ Hazırlama (Sparse Grid Initialization), Latin Hiperküp Örnekleme (LHÖ) gibi kullanıcı tanımlı deney tasarım metotları bulunmaktadır. Merkezi Karma tasarım literatürde en fazla kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin avantajları, parametreler arasında ilişki kurulmasında en gelişmiş yöntemlerden biri olması ve optimizasyon işleminin yapıldığı ANSYS DesignXplorer`da gelişmiş deney tasarımı oluşturma seçeneğinin olmasıdır. Bu çalışmada gelişmiş Yüz Merkezli Merkezi Karma Tasarım yöntemi kullanılmıştır. Buna göre oluşturulan deney tasarımı Çizelge 5.2`de verilmiştir. Ayrıca ANSYS tarafından oluşturulan deney tasarımına ait parametrik şekil, Şekil 5.6`da verilmiştir.



Şekil 5.6. Deney tasarımına ait parametrik şekil

Çizelge 5.2. Oluşturulan deney tasarımı

Sayı	r/R	d/R	M
1	0.18617	0.01	1.25
2	0.18617	0.01	5
3	0.18617	0.13	3.125
4	0.18617	0.25	1.25
5	0.18617	0.25	5
6	0.28191	0.07	2.1875
7	0.28191	0.07	4.0625
8	0.28191	0.13	3.125
9	0.28191	0.19	2.1875
10	0.28191	0.19	4.0625
11	0.37766	0.01	3.125
12	0.37766	0.07	3.125
13	0.37766	0.13	3.125
14	0.37766	0.13	1.25
15	0.37766	0.13	2.1875
16	0.37766	0.13	5
17	0.37766	0.13	4.0625
18	0.37766	0.25	3.125
19	0.47340	0.13	3.125
20	0.37766	0.19	3.125
21	0.47340	0.07	2.1875
22	0.47340	0.07	4.0625
23	0.47340	0.19	2.1875
24	0.47340	0.19	4.0625
25	0.56915	0.01	1.25
26	0.56915	0.01	5
27	0.56915	0.13	3.125
28	0.56915	0.25	1.25
29	0.56915	0.25	5

5.3. HAD Analizleri

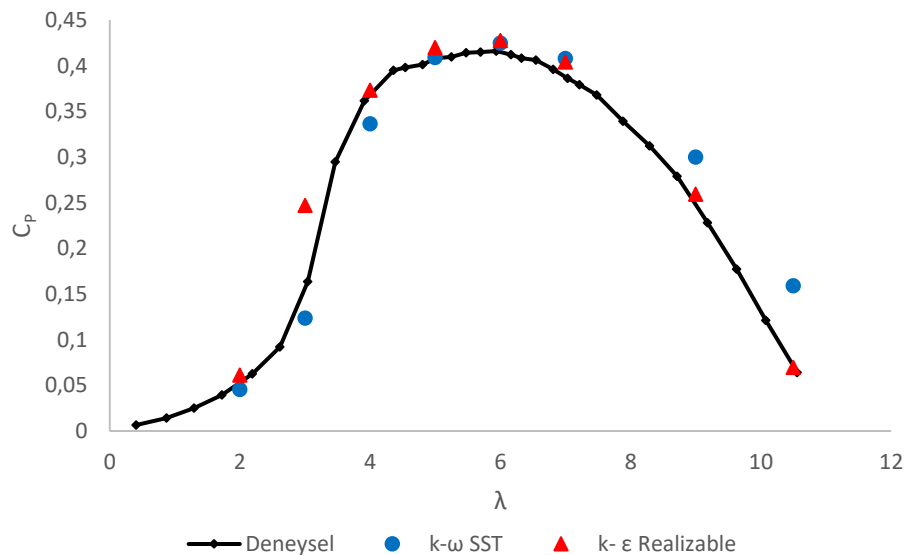
HAD analizleri yapılmadan önce, baz alınan referans rüzgar türbininin tez çalışmasının son aşamasında kullanılmış olan deney düzeneğindeki $C_P - \lambda$ değişiminin deney sonuçları kullanılarak doğrulama yapılmıştır (Ostovan ve Uzol, 2016; Ostovan, 2017). Deney açık jet bir rüzgar tüneline yapılmış, rüzgar türbini jet çıkışından itibaren $0.5D$ mesafeye yerleştirilmiştir. HAD analizlerinde akış alanı oluşturulurken deneysel koşullar dikkate alınmıştır. Buna göre kanat uzunluğunun R olduğu deney düzeneğinde, öne doğru mesafe yaklaşık $2R$, arkaya doğru mesafe $12R$, çember yarıçapı ise yaklaşık $4R$ dir. Periyodik sınır şartı ve diğer kullanılan sınır şartları dördüncü bölümde belirtilen sınır şartları ile aynıdır. Hız girişinde türbülans yoğunluğu, deneylerle benzer olacak şekilde %2

alınmıştır (Ostovan, 2017). Çizelge 5.3`te çözüm ağı bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Buna göre 6.5 milyon elemana sahip çözüm ağı yapısının yeterli olduğu görülmektedir. Ek-3`de örnek bir çözüm ağı resmi verilmiştir.

Çizelge 5.3. Çözüm ağı bağımsızlığı çalışması

Hücre sayısı ($\times 10^6$)	Düğüm sayısı ($\times 10^6$)	$\lambda=6$ da C_p	
		k- ϵ Realizable	k- ω SST
6.5	2.8	0.427	0.425
7.5	3.2	0.429	0.426
9.2	4.2	0.431	0.428

Şekil 5.7`de ise HAD çalışması ile Ostovan (2017) tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır (Ostovan, 2017). Deneysel şartlarla aynı olarak rüzgar hızı 11.5 m/s olarak tutulmuş, dönme hızı değiştirilerek $\lambda= 2, 4, 5, 6, 7, 9$ ve 10.5 için sonuçlar elde edilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi her iki türbülans modeli de başarılı bir sonuç vermiştir ancak özellikle yüksek uç hız oranlarında k- ϵ Realizable k- ω SST modeline göre daha başarılı olmuştur. Bu nedenle optimizasyon aşamasındaki simülasyonlarda da k- ϵ Realizable modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.7. HAD sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Optimizasyon bölümünde HAD simülasyonu yapılan kanatlar ait parametreler bir önceki alt başlıkta Çizelge 5.2`de verilmiştir. Bu kanatlara ait simülasyonlar yapılarak elde edilen sonuçlar ile bir veri tabanı oluşturulmuş, sonraki adımda ise yanıt yüzeyi oluşturma işlemine geçilmiştir.

5.4. Yanıt Yüzeyi

Yanıt yüzeyinin oluşturulması için çeşitli yöntemler mevcut olup bunlardan en çok kullanılanları kriging, parametrik olmayan regresyon, ikinci dereceden standart polinom yüzey ve sinir ağlarıdır. Yanıt yüzeyi kalitesinin testi için kullanılan hata oranı hesaplama formülü bağıl ortalama hataların ortalama karelerinin karekökleri (RMSE) formülüdür. Burada N doğrulama noktası sayısını, y_i doğrulama noktasındaki HAD analizi sonucunu ve y_t ise i noktasındaki doğrulama meta-model tahminini belirtmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y_t}{y_i} \right)^2} \quad (5.1)$$

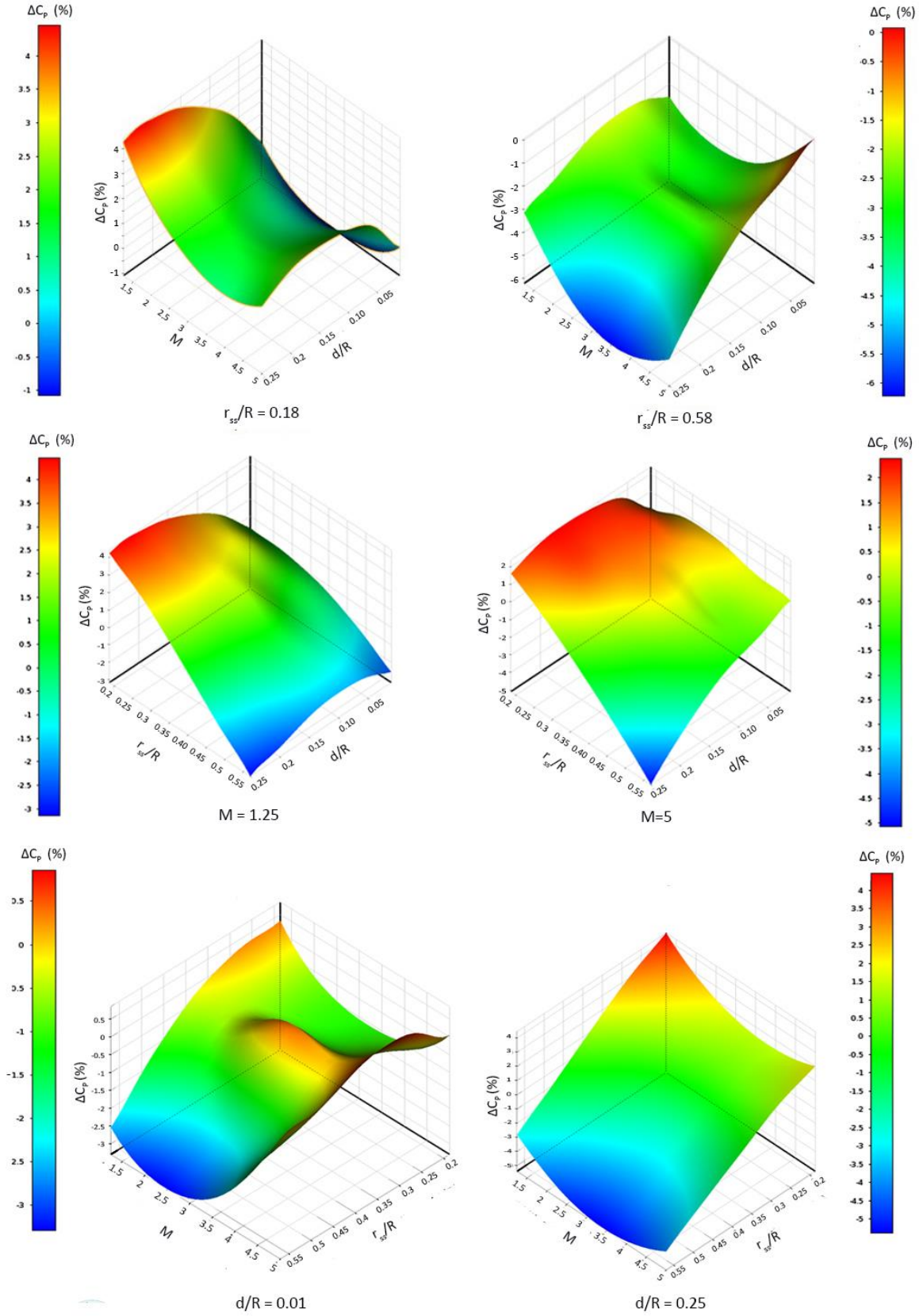
En doğru sonuçları veren yanıt yüzeyi oluşturma yönteminin tespiti için farklı yöntemlere ait RMSE değerleri deney tasarımı kısmında seçilen noktalar hariç rasgele sekiz nokta seçilerek hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.4’de verilmiştir. Buna göre en iyi sonucu 0.59%’lik RMSE değeri Kriging yöntemi vermiş, yanıt yüzeylerin oluşturulmasında bu yöntem kullanılmıştır. RMSE değeri %5’in altında olan yanıt yüzeyler iyi olarak kabul edilebilir (Demirel ve ark., 2017).

Çizelge 5.4. Farklı yanıt yüzeyi yöntemlerinin RMSE değerleri

Meta-Model	RMSE (%)
Genetik kümeleme	1.69
İkinci dereceden standart polinom yanıt yüzey	1.21
Kriging	0.59
Sinir Ağları	1.72

Şekil 5.8’de oluşturulan yanıt yüzeyine göre güç katsayısının (C_p), $M-d/R$ (üst), $r_{ss}/R-d/R$ (orta), $M-r_{ss}/R$ (alt) bağlı değişimleri verilmiştir. Üç adet girdi ve bir adet çıktı parametresi olduğu için her bir yanıt yüzeyi grafiğinde iki değişkenin güç katsayısına etkisi incelenebilirken, bir değişken sabit tutulmuştur. Bu nedenle sol taraftaki grafiklerde sabit tutulan değişkenin minimum değeri, sağ tarafta ise maksimum değeri alınarak yanıt yüzeyleri oluşturulmuştur. İlk yanıt yüzeyi grafiklerinden, $r_{ss}/R=0.18$ olduğu yanıt yüzey grafiğine yapılabilecek en genel yorum, yüksek ve düşük d/R ’lerde M ’in artmasının güç katsayısını negatif etkilemesidir. Ayrıca bu grafikte yüksek d/R ’lerde M ’in azalmasının güç katsayısını pozitif etkilediği görülmektedir. Eğiklik başlama kesitinin $r_{ss}/R=0.58$ olduğu yanıt yüzey grafiğine bakıldığında ise tüm durumlarda negatif

bir etkinin hakim olduğu, sadece M 'in yüksek olduğu durumlarda negatif etkinin sıfıra kadar düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.8. Güç katsayısının (C_p), M - d/R (üst), r/R - d/R (orta), M - r/R (alt) ile ilişkisini gösteren örnek yanıt yüzeyler

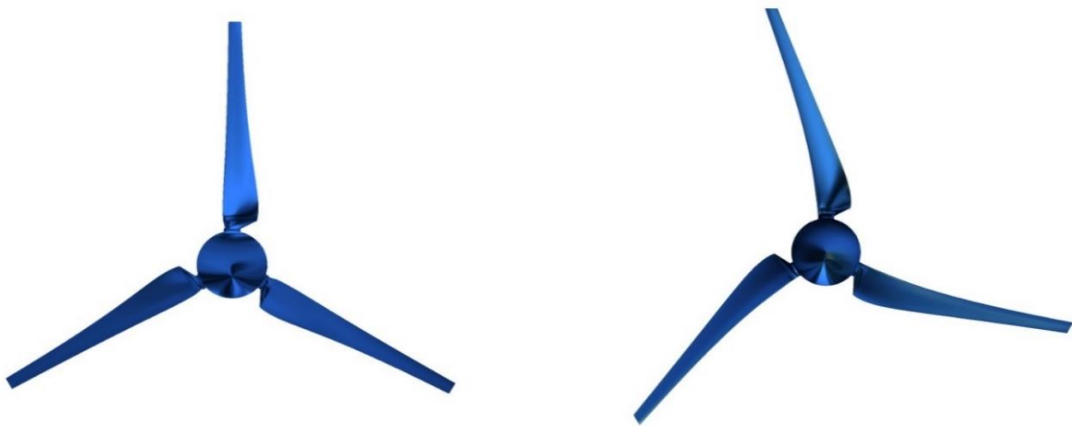
İkinci sıradaki M 'in sabit tutulduğu yanıt yüzeylere bakıldığında ise yapılabilecek ilk genel yorum, r_{ss}/R 'nin artmasının güç katsayısına yüksek bir negatif etkisinin olmasıdır. En yüksek güç katsayıları r_{ss}/R 'nin düşük d/R 'nin ise yüksek olduğu durumlarda elde edilmiştir. Ayrıca $M=5$ olduğu durumdaki yanıt yüzeyi grafiğinde düşük r_{ss}/R ve ortalama d/R değerlerinde en yüksek artış miktarlarının elde edildiği görülmüştür. En alttaki d/R 'nin sabit tutulduğu yanıt yüzeylerinden $d/R=0.01$ olan yanıt yüzey grafiğine bakıldığında r_{ss}/R ve M 'in ortalama değerlerinde bir pozitif etki olduğu görülmektedir. Ayrıca $d/R=0.25$ olan yanıt yüzey grafiğine bakıldığında M ve r_{ss}/R 'nin düşük değerlerinde maksimum artış miktarlarının elde edildiği gözlemlenmiştir.

5.5. Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon işlemi için daha önce belirtildiği gibi ANSYS DesignXplorer ile yapılmış, yöntem olarak standart ayarları ile genetik algoritma kullanılmıştır. Buna göre ilk ve her bir yinelemedeki popülasyon büyüklüğü yüz olup, program çözüme on iki yineleme sonucunda ulaşmıştır. Elde edilen ve doğrulanmış olan optimum kanada ait parametreler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Buna göre tasarım uç hız oranında ($\lambda=6$) $\Delta C_P=4.28\%$ 'lik bir artış miktarı elde edilmiştir. Şekil 5.9'da referans düz (sol) ve optimum eğimli kanatlı (sağ) rüzgar türbinlerinin çizimleri verilmiştir.

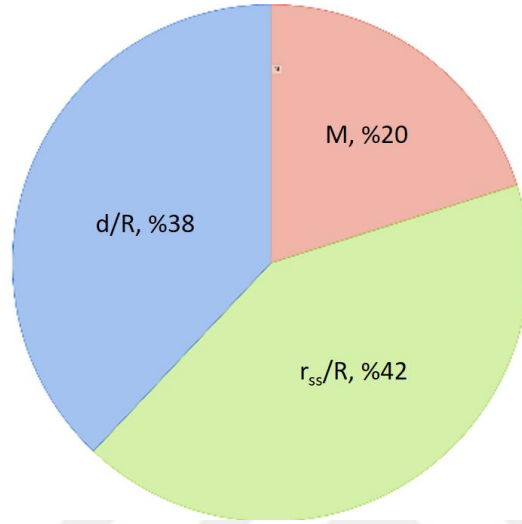
Çizelge 5.5. Optimum eğimli kanat değişkenleri

Değişken	Değer
r_{ss}/R	0.18617
d/R	0.2306
M	1.299
ΔC_P (%)	4.28



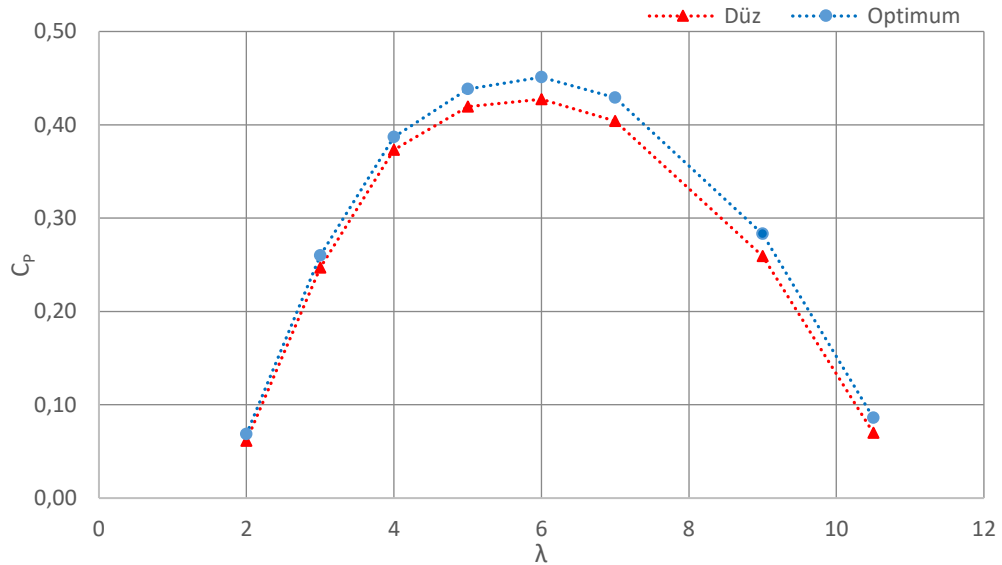
Şekil 5.9. Düz referans (sol) ve optimum eğimli kanatlı (sağ) rüzgar türbinlerinin çizimleri

Şekil 5.10’da ise ANSYS DesignXplorer tarafından istatikselsel bir yöntem ile hesaplanan optimizasyon (girdi) parametrelerinin çıktı parametresine etkileri verilmiştir. Buna göre en önemli etkiyi eğiklik başlangıç kesiti %42 ile yapmıştır. Uç deplasman miktarı %38’lik oran ile eğiklik başlangıç kesiti ile benzer etki yapmıştır. Eğiklik mertebesi ise diğer parametrelere göre nispeten daha düşük bir yüzdeye sahiptir ancak yine de etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 5.10. Girdi parametrelerinin, eğiklik başlangıç kesiti (r_{ss}/R), uç deplasman miktarı (d/R) ve eğiklik mertebesi (M), çıktı parametresine etkileri

Şekil 5.11’de Düz kanat ile optimum kanat güç katsayısı – uç hız oranı eğrilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Buna göre baz alınan düz kanata göre tasarlanan optimum kanat ile tüm uç hız oranlarında gözle görünür bir şekilde daha çok güç elde edilmektedir.

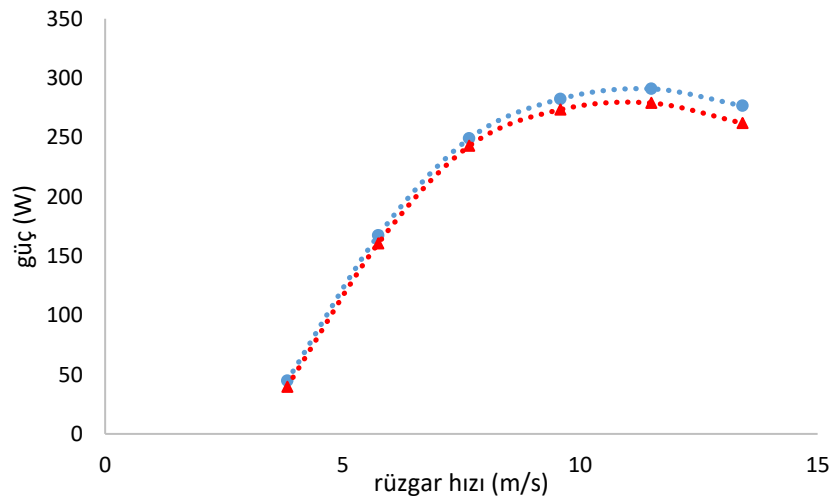
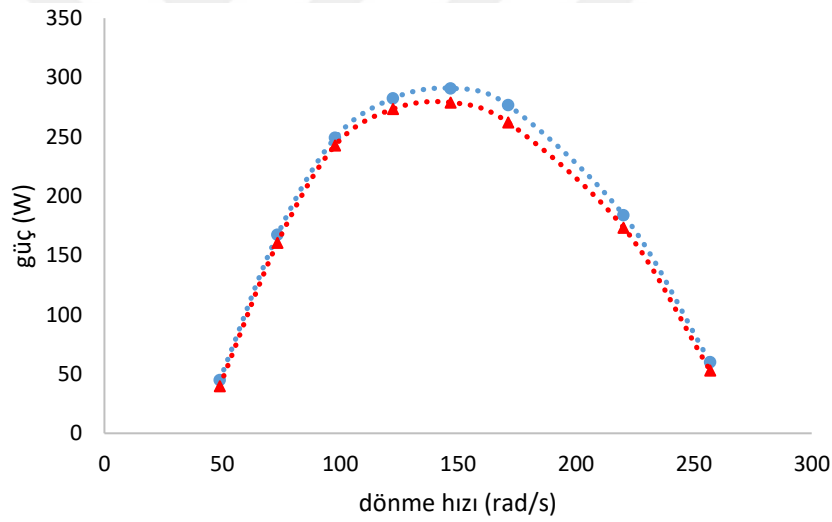


Şekil 5.11. Düz kanat ile optimum eğimli kanatların güç katsayısı – uç hız oranı eğrilerinin karşılaştırılması

Tasarım uç hız oranında, $\lambda=6$, güç katsayısındaki artış oranı daha önce de belirtildiği gibi %4.28 olmuştur. Çizelge 5.6'da Şekil 5.11'de kullanılan değerler sayısal olarak verilmiştir. Şekil 5.12'de ise dönme hızına bağlı mekanik güç üretimi (üst) ve tasarım uç hız oranına göre hesaplanmış dönme hızlarına göre hesaplanan rüzgar hızlarına bağlı mekanik güç üretiminin değişimi (alt) verilmiştir.

Çizelge 5.6. Düz kanat ve optimum eğimli kanat ile elde edilen güç katsayılarının karşılaştırılması

Dönme hızı (rad/s)	Uç hız oranı	C_P – düz kanat	C_P – optimum eğimli kanat
49	2	0.062	0.069
73	3	0.248	0.259
98	4	0.376	0.385
122	5	0.423	0.437
147	6	0.431	0.450
171	7	0.405	0.428
220	9	0.268	0.285
257	10.5	0.082	0.093

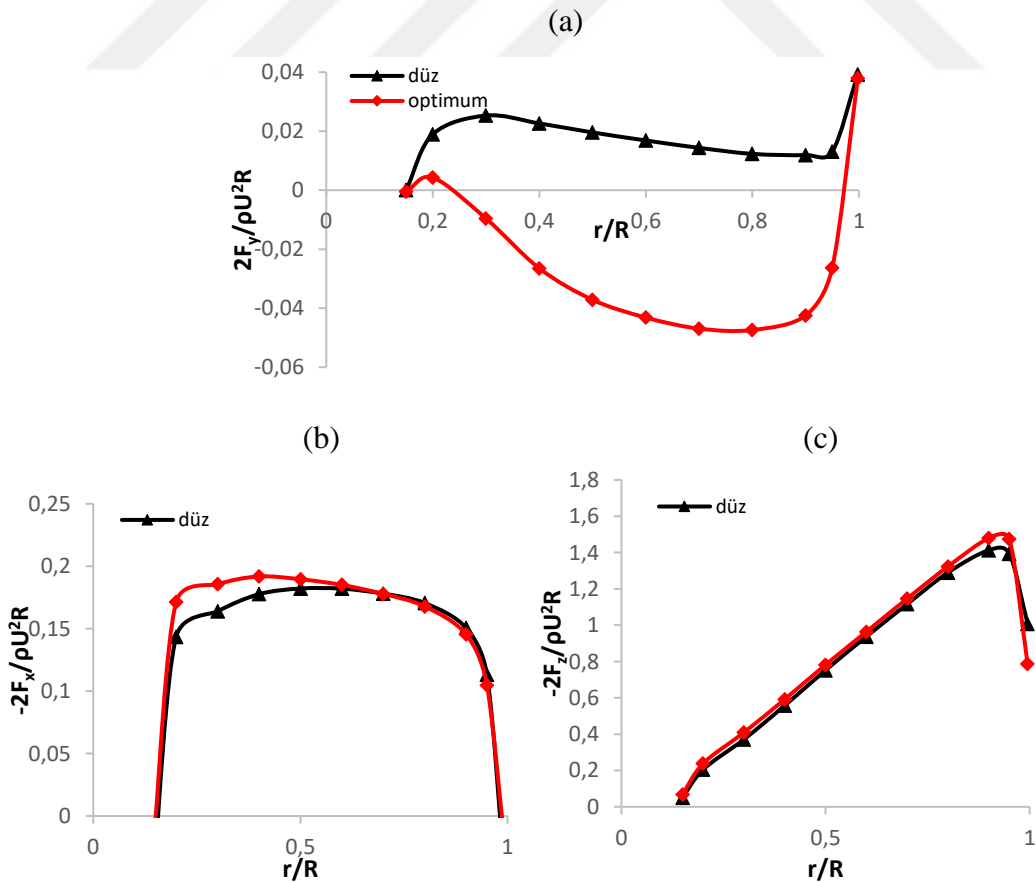


Şekil 5.12. Farklı grafikler ile düz (kırmızı) ve optimum eğimli (mavi) kanatların karşılaştırılması

Optimum eğimli kanat için elde edilen sonuçlar eğimli YERT kanatları ile ilgili literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılacak olursa, güç üretiminde literatürdeki çalışmalardan bir miktar daha fazla artış elde edildiği görülmüştür. Khalafallah ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada Ashwill ve ark. (2010) tarafından geliştirilen eğimli kanat oluşturma denklemini kullanarak tasarladıkları eğiklik başlama kesiti $r_{ss}/R=0.25$ olan öne eğimli kanat ile tasarım uç hız oranında güç katsayısında yaklaşık %0.69'lık bir artış elde etmişlerdir. Bu çalışmada yazarların NTNU kanadını baz alarak tasarladıkları öne eğimli kanatlı rüzgar türbini için HAD yöntemi ile çıkardıkları güç katsayısı – uç hız oranı eğrisi, bu tez çalışmasındaki eğriye benzemektedir. Suzuki ve ark. (2011) ve Maggio ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmalarda tasarlanan eğimli kanatlar ile güç üretimindeki artış oranı sırasıyla %1'den daha az ve yaklaşık %2.1 olmuştur.

5.6. Referans ve Optimum Eğimli Kanatların Karşılaştırılması

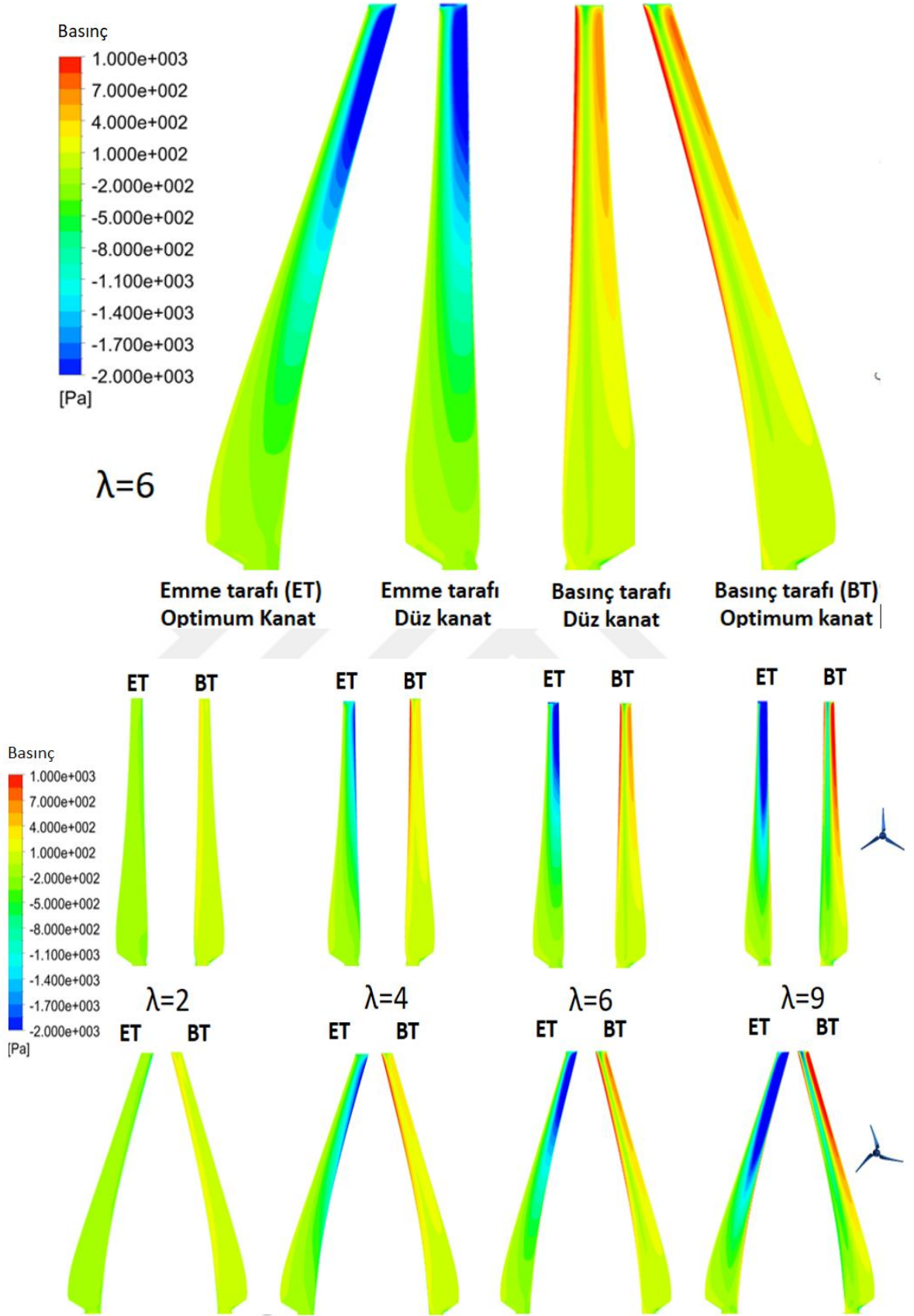
Bu bölümde düz ve optimum eğimli kanatlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma şekilleri ANSYS CFD-Post 17.2 modülü vasıtasıyla oluşturulmuştur. Şekil 5.13'de kanat boyunca (a) radyal, (b) teğetsel yönde ve (c) akış yönünde boyutsuz kuvvet dağılımları verilmiştir.



Şekil 5.13. Radyal (a), teğetsel yönde (b) ve akış yönünde (c) boyutsuz kuvvet dağılımları ($\lambda=6$)

Şekil 5.13 (a)'ya göre düz kanat ağırlıklı olarak pozitif optimum kanat ise negatif radyal kuvvet dağılımına sahiptir. Daha öncede belirtildiği gibi Sairam ve Turner (2014) tarafından yapılan çalışmaya göre radyal kuvvet dağılımı rüzgar türbini kanatlarında önemli bir rol oynamakta, negatif radyal kuvvetleri dağılımı kanat etrafındaki akışı etkileyerek kanat uç kısmından hava geçiş hızını yavaşlatmaktadır. Ayrıca teğetsel yöndeki kuvvet dağılımına bakıldığında özellikle kanadın ilk bölümünde, optimum kanadın daha yüksek bir kuvvete dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Yani negatif radyal kuvvet dağılımı performansta pozitif bir etki yapmaktadır. Eğimli kanat ile güç üretimindeki artışın nedenlerinden birinin negatif radyal kuvveti olabileceği düşünülmektedir (Sairam, 2013). Şekil 5.13 (b)'de teğetsel yönde kuvvet dağılımları verilmiştir. Burada düz ve optimum kanatları arasında özellikle $r/R=0.2-0.6$ arasında önemli bir fark görülmekte olup, bunun da güç artışına katkı sağladığı düşünülmektedir. Şekil 5.13 (c)'de ise akış yönünde kuvvet dağılımları verilmiştir. Burada düz ve optimum kanatlara ait dağılımlarda büyük ölçüde benzerlik olduğu görülmüş, sadece kanadın uç kısmına doğru bir miktar farklılığın olduğu gözlemlenmiştir.

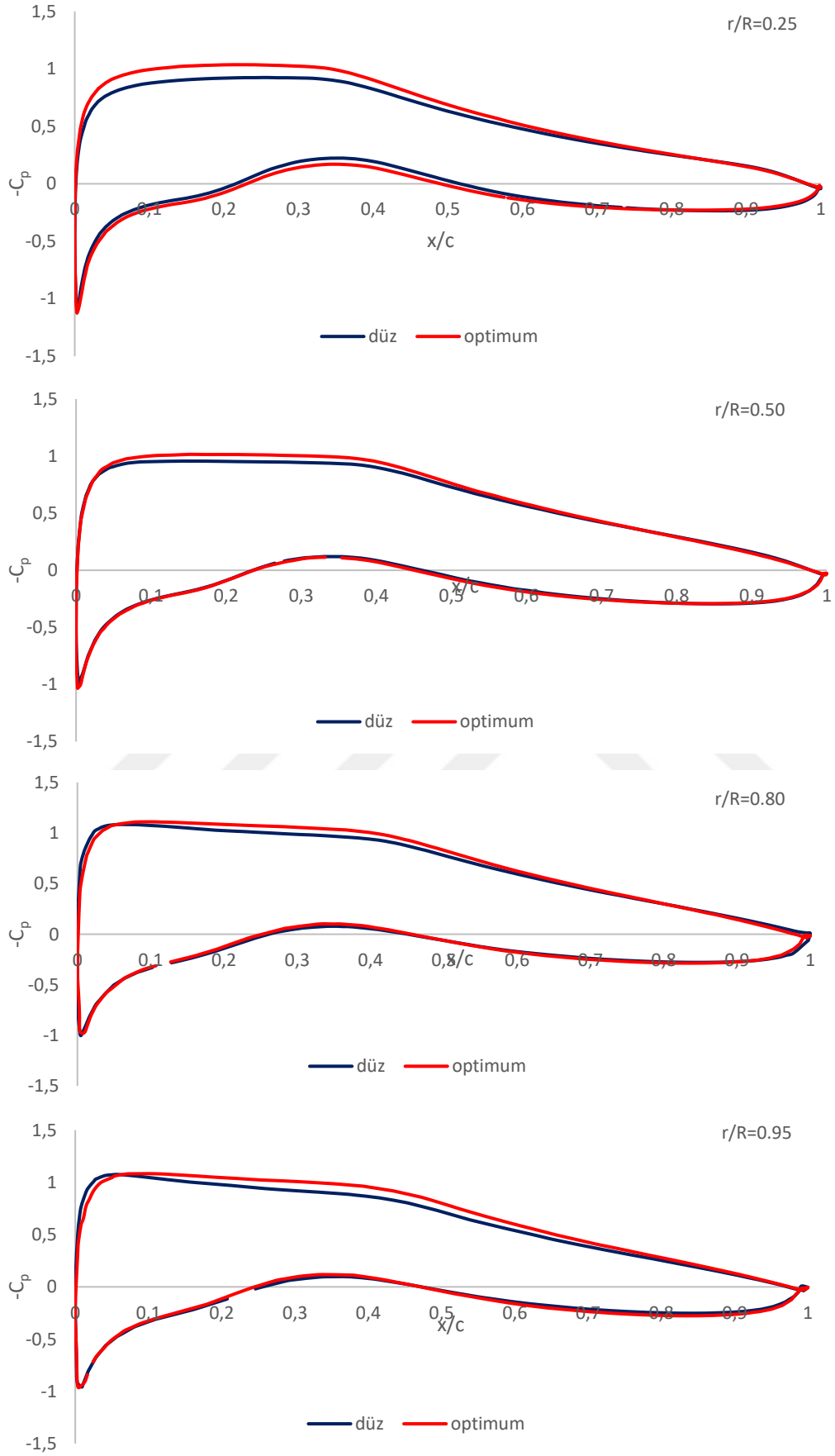
Şekil 5.14'te kanat üzeri basınç konturları verilmiştir. Burada ET emme tarafını, BT ise basınç tarafını göstermektedir. ET basıncın düşük olup hızın fazla olduğu, BT ise basıncın fazla olduğu taraftır. ET ile BT arasındaki basınç farkı ne kadar fazla olursa üretilen kaldırma kuvveti o kadar fazla olur. Şekil 5.14'ün üst kısmında uç hız oranı $\lambda=6$ için basınç konturları verilmiştir. Optimum ve düz kanat arasındaki farkın daha iyi görülebilmesi için her iki kanadın ET ve BT'leri yan yana konulmuştur. Buradan optimum kanadın ET'sinde düz kanada göre düşük basınç bölgelerinin bir miktar daha az olduğu, her iki kanadında BT'lerinin benzer olduğu görülmektedir. Şekil 5.14'ün alt kısmında ise düz ve optimum kanat üzeri basınç konturları farklı uç hız oranları, $\lambda=2, 4, 6$ ve 9 için verilmiştir. Buna göre tüm uç hız oranlarında optimum kanadın ET'lerinde az da olsa düşük basınç bölgeleri büyüktür.



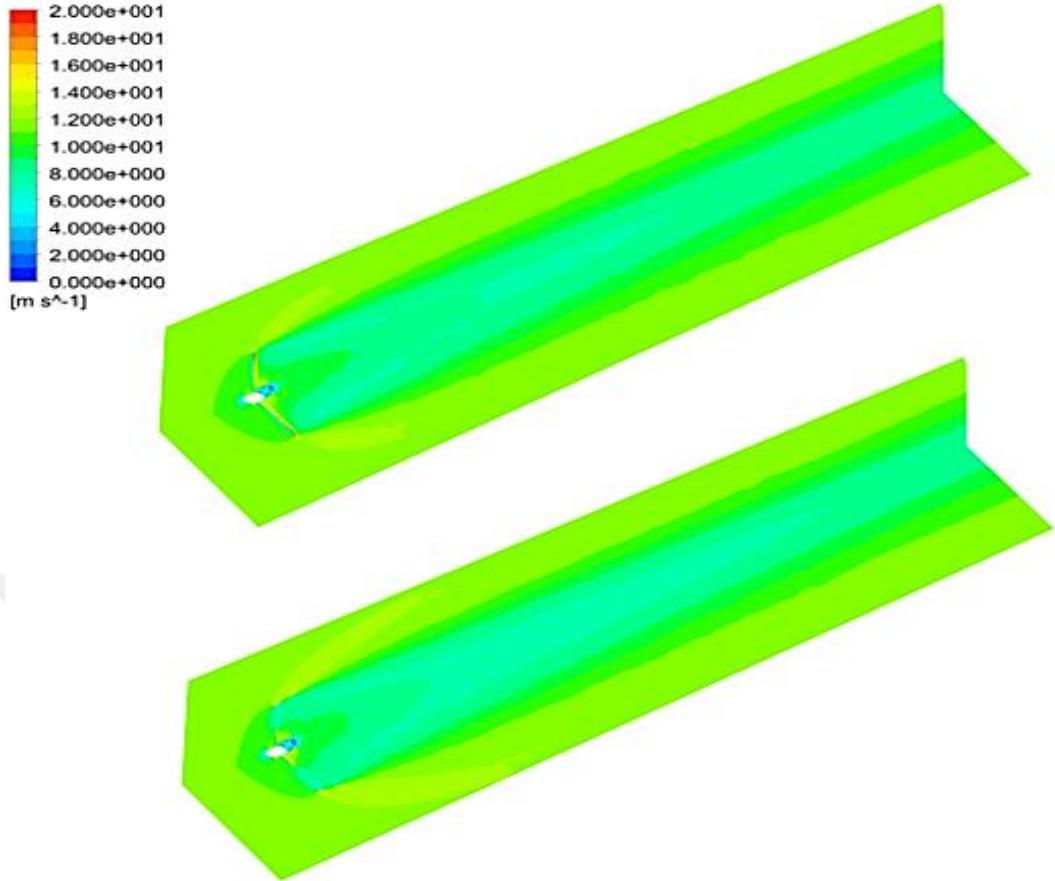
Şekil 5.14. Farklı uç hız oranlarında düz ve optimum kanatlar üzeri basınç konturları

Düz ve optimum kanatlar üzeri basınç dağılımı, $\lambda=6$ için grafiksel olarak farklı kesitlerde, $r/R=0.25, 0.50, 0.80$ ve 0.95 , Şekil 5.15'te verilmiştir. Grafiklerin dikey eksen basınç katsayısını (C_p), yatay eksen ise kanat kesiti üzeri konumun (x) veter uzunluğuna (c) oranını (x/c) göstermektedir. Grafiklerdeki siyah çizgi düz kanada ait basınç dağılımını gösterirken, kırmızı çizgi ise optimum kanada ait belirtilen kesitteki basınç dağılımını göstermektedir. Basınç katsayısının negatif olarak ($-C_p$) verilmesinin nedeni, kanadın ET'sini yukarı almaktır ve genelde literatürde grafiklerin anlaşılmasının daha kolay hale getirilmesi için bu yöntem kullanılmıştır (Karlsen, 2009; Elfarra, 2011; Krogstad ve Lund, 2012). Buna göre optimum kanat için her bir kesitteki ET ve BT arasındaki basınç farkının fazla olduğu görülmektedir. Tüm kesitlerde basınç dağılımları genel olarak BT'ler de benzer, ET'lerde ise bir miktar farklıdır. Kanat kesiti $r/R=0.25$ 'de ET'de diğer kesitlere göre en fazla fark görülmüş olup, fark özellikle $x/c=0.1-0.4$ arasında daha belirgindir. Ayrıca kanatların uç kısmına yakın bölgede, $r/R=0.95$ kestinde de özellikle $x/c=0.2-0.6$ arasında her iki kanadın ET'lerindeki basınç dağılımı arasında gözle görülür bir fark vardır. Elde edilen diğer bir ilginç sonuç ise kanadın uç kısmına doğru kanat kesitlerinin ET'lerindeki basınç dağılımı eğrileri arasında gözle görülebilir farkın, hücum kenarından firar kenarına doğru kaymasıdır.

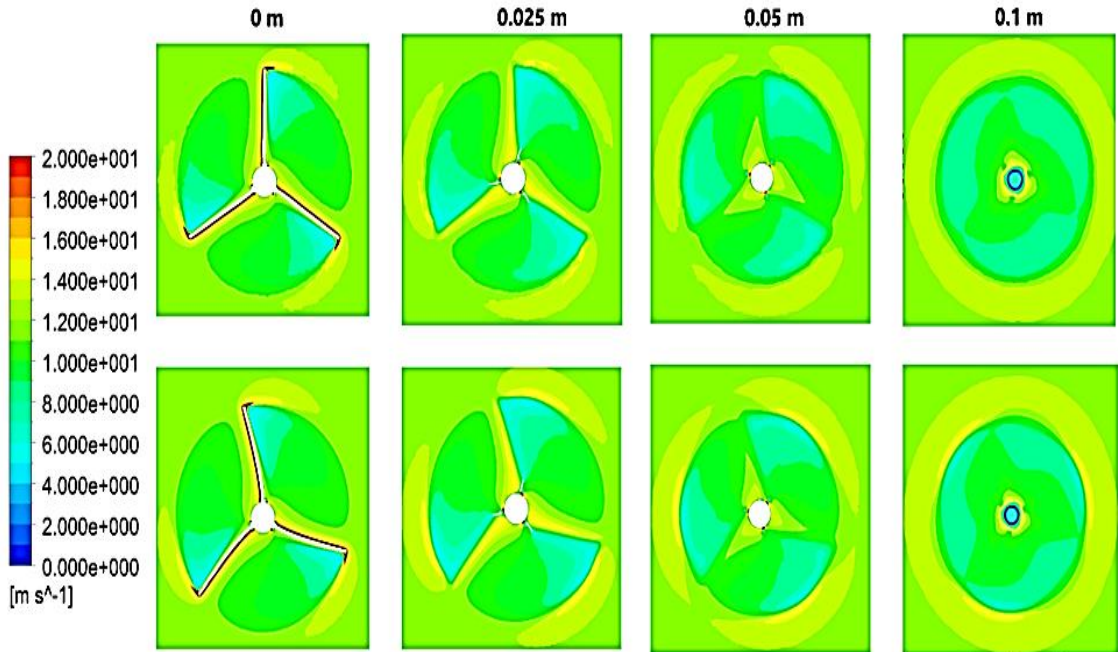
Şekil 5.16'da düz ve optimum kanatların arka kısımlarındaki hız dağılım konturları verilmiştir. Her iki rotor arkasındaki hız dağılım konturlarına bakıldığında optimum kanatlı rotor arkasında düşük hız bölgelerinin biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun anlamı rotora gelen rüzgardan güç üretimi için daha fazla yararlanılmış olması, yani daha fazla rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesidir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta; hız konturu kesit yüzeyleri, düz kanatta tam kanat yüzeyini takip ederken optimum kanatta eğimden dolayı böyle olmamasıdır. Kanat arkası hız dağılımlarını daha detaylı görüntülemek için Şekil 5.17'de rotor düzleminde (0 m), rotor'un 0.025, 0.05 ve 0.1 m arkasındaki hız dağılım konturları verilmiştir. Rotorlar arası basınç dağılımları benzer olup çok küçük farklar vardır. Örnek olarak Şekil 5.18'de rotorların 0.025 m arkasındaki hız konturları detaylı olarak gösterilmiş ve düşük hız bölgesindeki küçük fark belirtilmiştir.



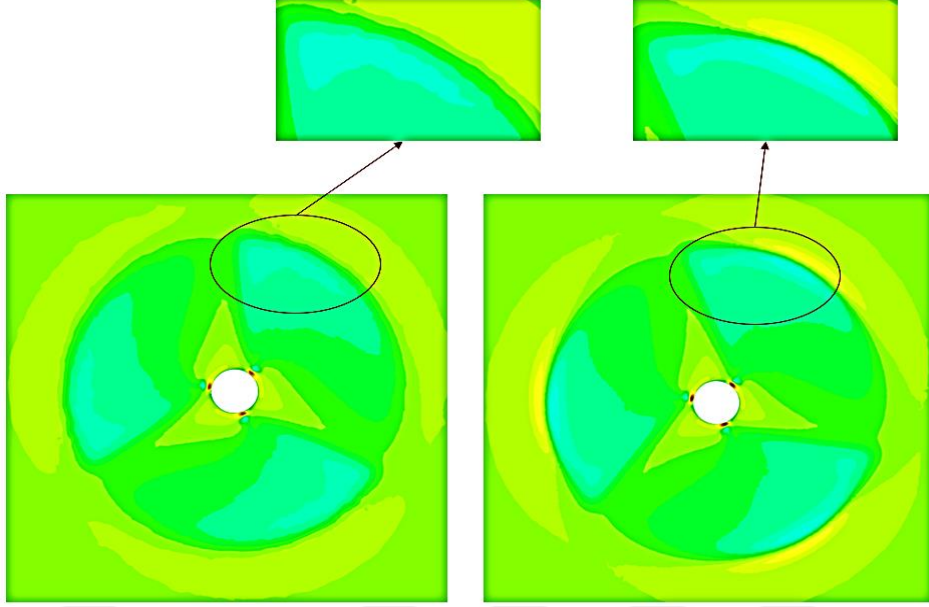
Şekil 5.15. Referans (düz) ve optimum kanatlar için farklı kesitlerde, $r/R=0.25, 0.50, 0.80, 0.95$, basınç dağılımları ($\lambda=6$)



Şekil 5.16. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlı rotor arkası akış hız konturları ($\lambda=6$)

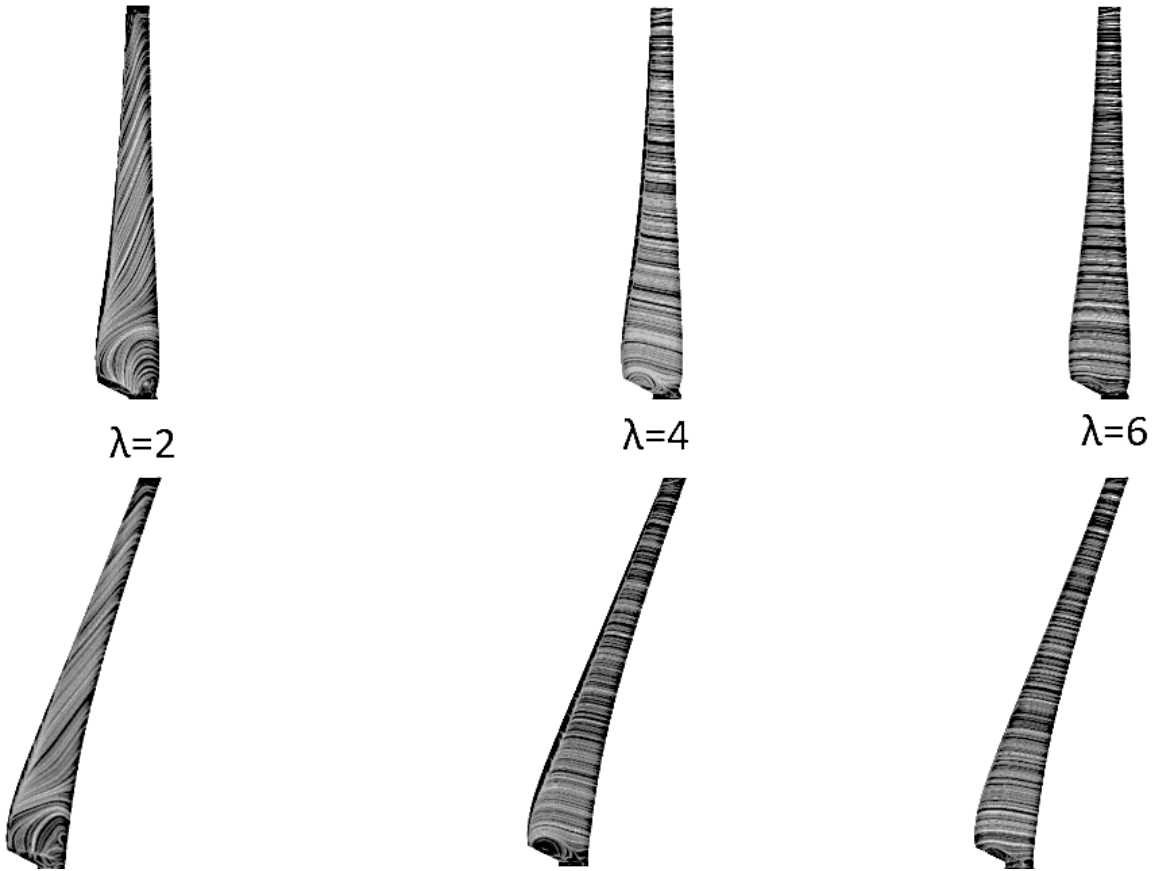


Şekil 5.17. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlı rotorlar için farklı mesafelerde hız konturları ($\lambda=6$)



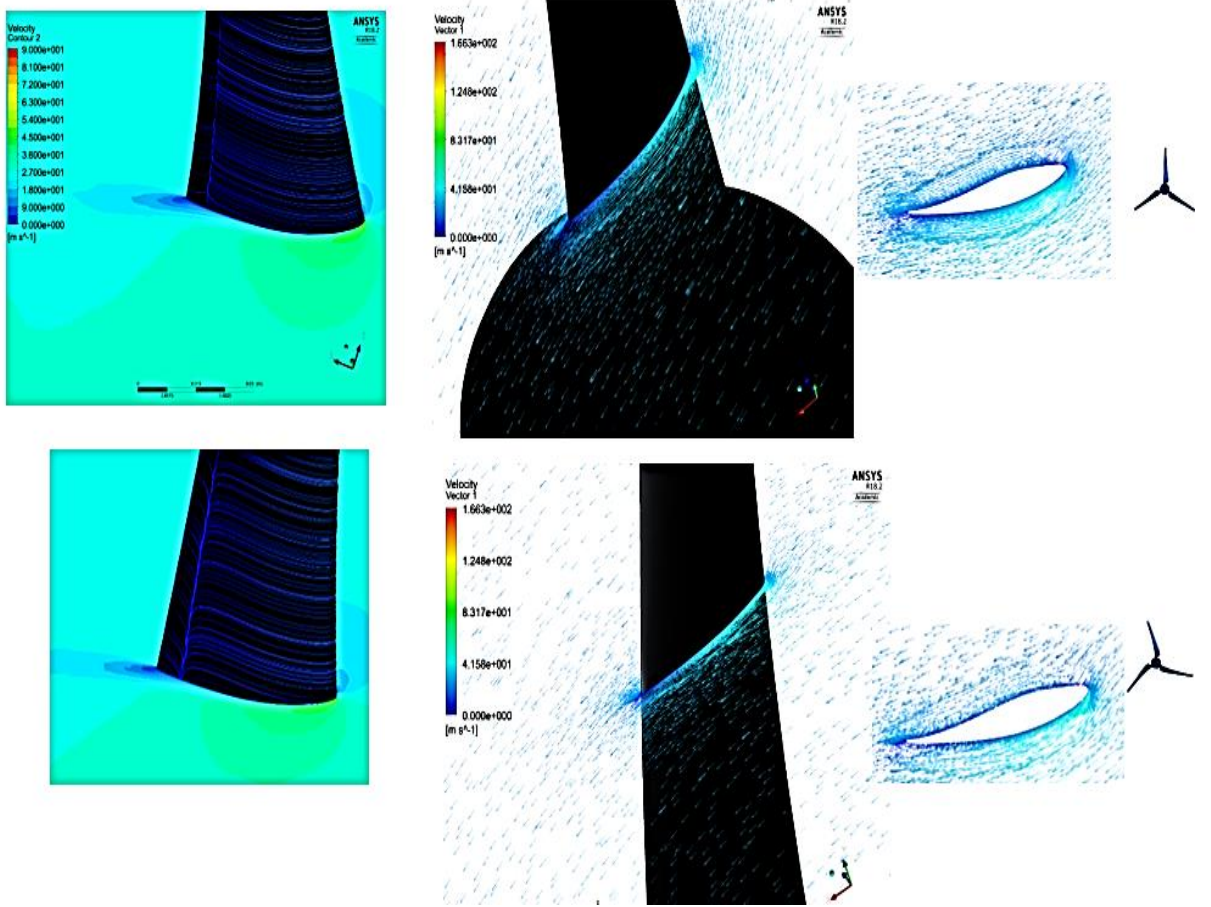
Şekil 5.18. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlı rotorların 0.025 m arkasındaki hız konturlarının detay gösterimi

Şekil 5.19’da farklı uç hız oranlarında düz ve optimum kanatlar için yüzey akım çizgileri verilmiştir.



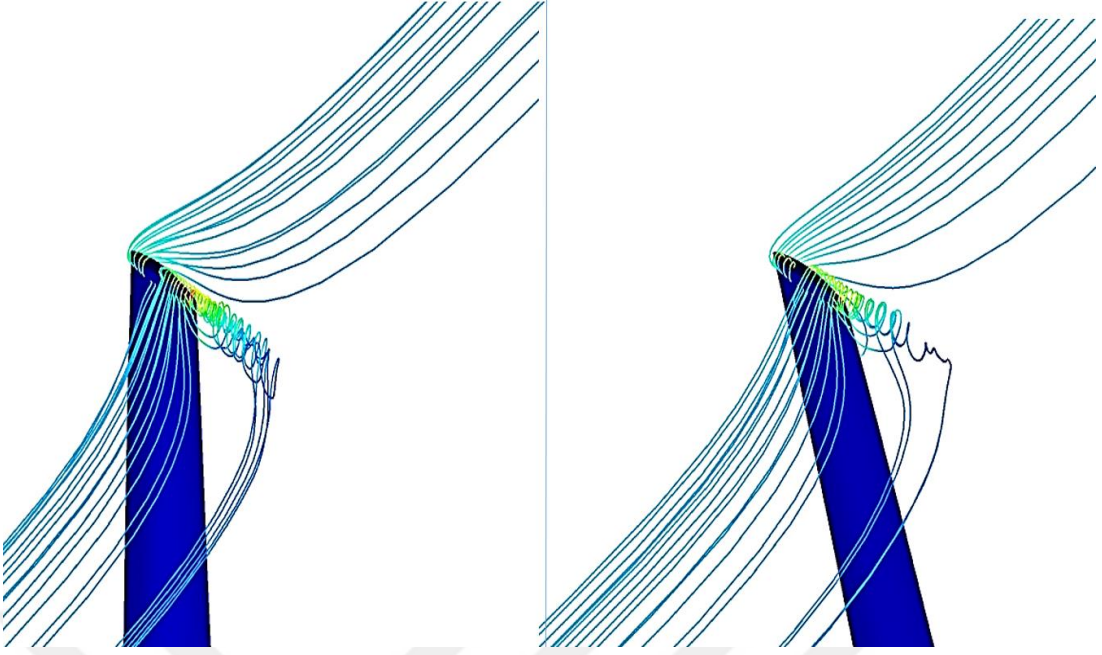
Şekil 5.19. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlar için farklı uç hız oranlarında yüzey akım çizgileri

Uç hız oranı $\lambda=2$ 'de her iki kanadın ET'sinde akış ayrılması hucüm kenarına çok yakın bir bölgede olduğu ve akışın düzensiz bir hal aldığı görülmüştür. Akış düzensizliğinin, uç hız oranının artması ile azaldığı, akış ayrılma yerinin $\lambda=4$ 'de firar kenarına çok yaklaştığı, $\lambda=6$ 'da akışın kanat yüzeylerine tamamen yapışık olduğu görülmüştür. Her iki kanat içinde akış hareketleri çok benzerdir. Şekil 5.20'de verilen hız vektörleri ve konturları ile de aynı sonuca ulaşılabilir. Buradaki kanat etrafı hız vektörleri resimlerinin büyütülmüş halleri EK-5'te verilmiştir.

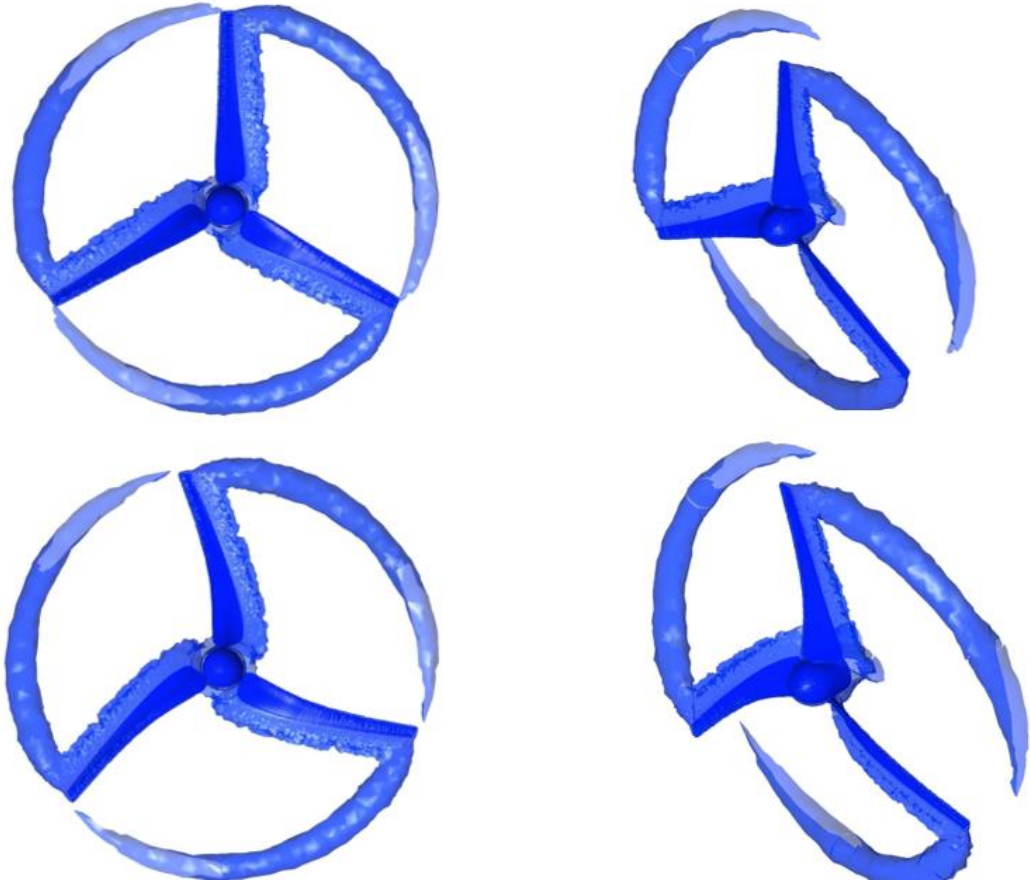


Şekil 5.20. Düz (üst) ve optimum (alt) kanatlar için $r/R=0.5$ 'de hız vektörlerinin gösterimi ($\lambda=4$)

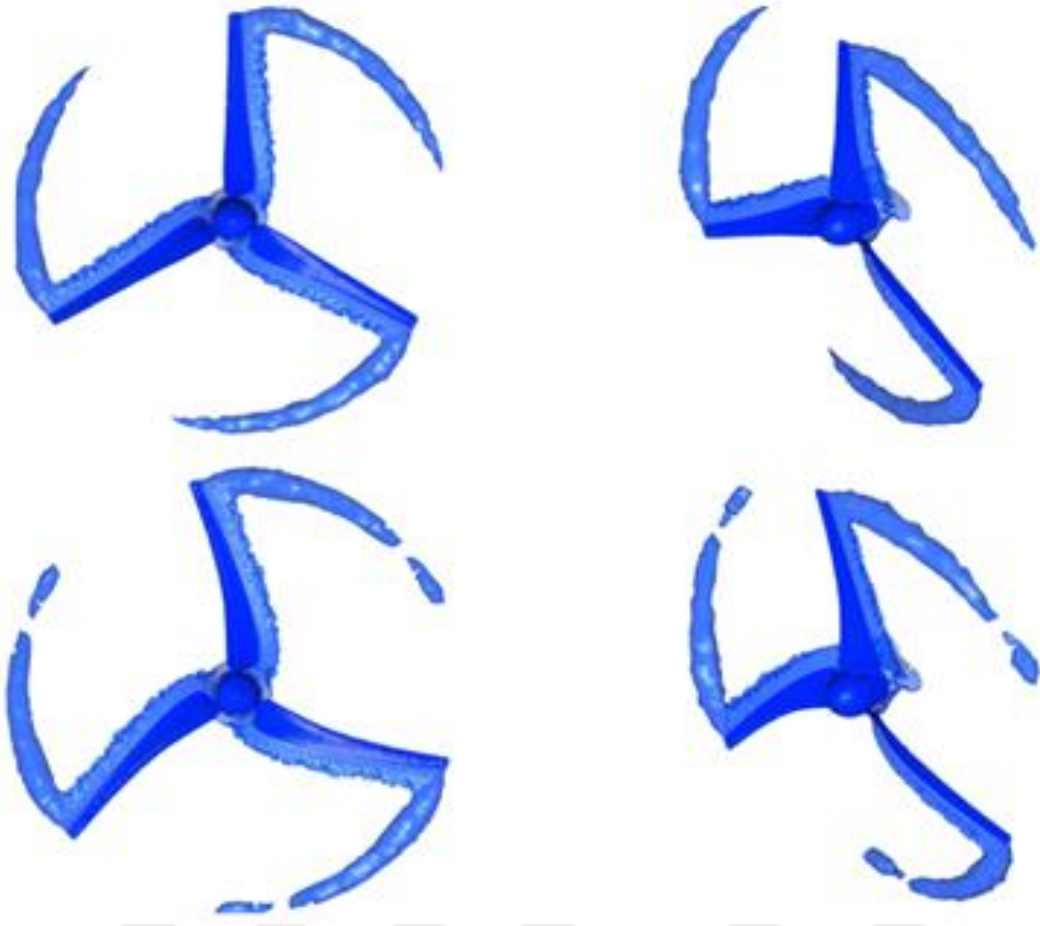
Buradan sonraki kısımda düz ve optimum eğimli kanatlardaki uç girdapları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.21'de kanat uçlarına yakın bölgelerde üç boyutlu aksenal akım çizgileri verilmiştir. Buna göre optimum kanat uç girdabının daha az yoğun olduğu, düz kanadın ucundaki girdap oluşumun daha yoğun olduğu görülmektedir.



Şekil 5.21. Düz ve optimum kanatlar için 3 boyutlu aksenal akım çizgileri ile uç girdaplarının karşılaştırılması ($\lambda=6$)

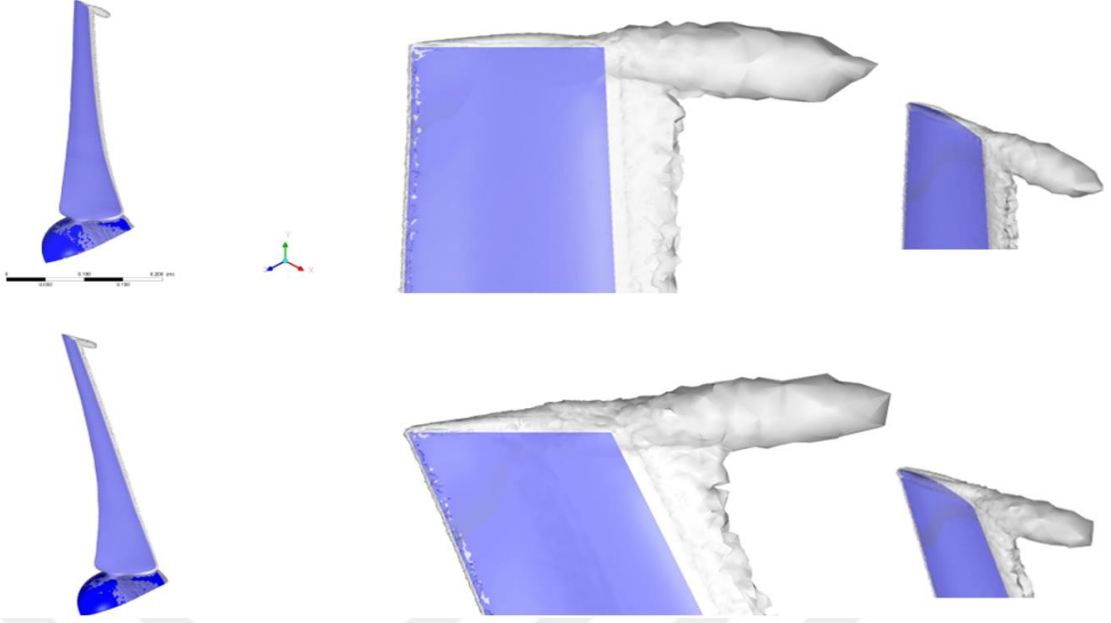


Şekil 5.22. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 70$ 1/s değerinde karşılaştırılması ($\lambda=6$)



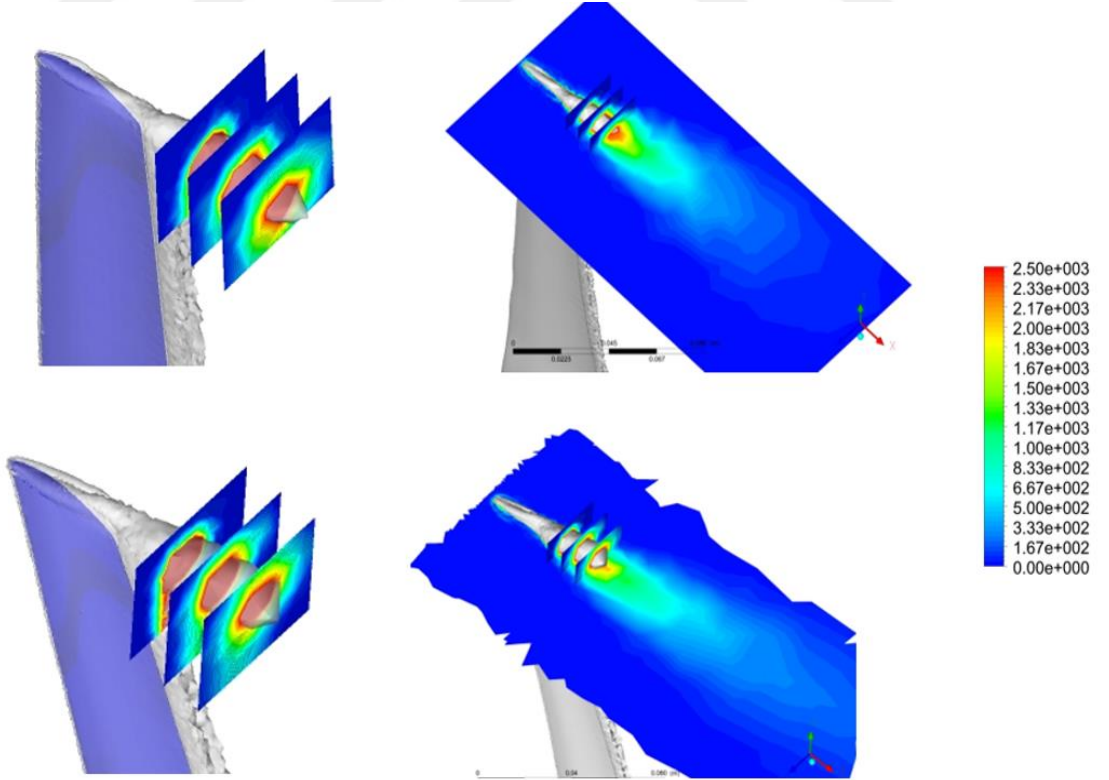
Şekil 5.23. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 100$ 1/s değerinde karşılaştırılması; karşılaştırılması ($\lambda=6$)

Şekil 5.22-5.24 arasında uç girdabının karşılaştırılması için çevrinti (vortisite) eş-yüzeyi yöntemi kullanılmıştır. Eş-yüzey belli bir değişken için aynı değere sahip noktaların oluşturduğu yüzey olarak tanımlanabilir (ANSYS, 2016). Çevrinti büyüklüğü ise $\omega_v = (\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)^{1/2}$ olarak ifade edilebilir (Sørensen ve ark., 2015). Bu yöntem literatürde farklı çalışmalarda uç girdabının gösterimi için kullanılmıştır (Corisini ve ark., 2015; Ebrahimi, 2017; El Farra, 2011). Bu çalışmada genel bir fikir edinmek için $\omega_v = 70, 100, 2500$ 1/s olmak üzere üç adet çevrinti büyüklüğü değeri için uç girdapları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.22’de $\omega_v = 70$ 1/s değeri için uç girdapları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 5.23’te $\omega_v = 100$ 1/s ve Şekil 5.24’te $\omega_v = 2500$ 1/s değerleri için yapılmıştır. Her üç şekilden de açıkça görülebileceği gibi optimum kanat için uç girdap yoğunluğu biraz daha azdır.



Şekil 5.24. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 2500$ 1/s değerinde karşılaştırılması ($\lambda=6$)

Şekil 5.25'te için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 2500$ 1/s değerinde karşılaştırmaları ek olarak konturlar ile birlikte verilmiştir. Konturlardan uç girdabı yoğunluğunun optimum kanat için daha az olduğu görülmektedir.

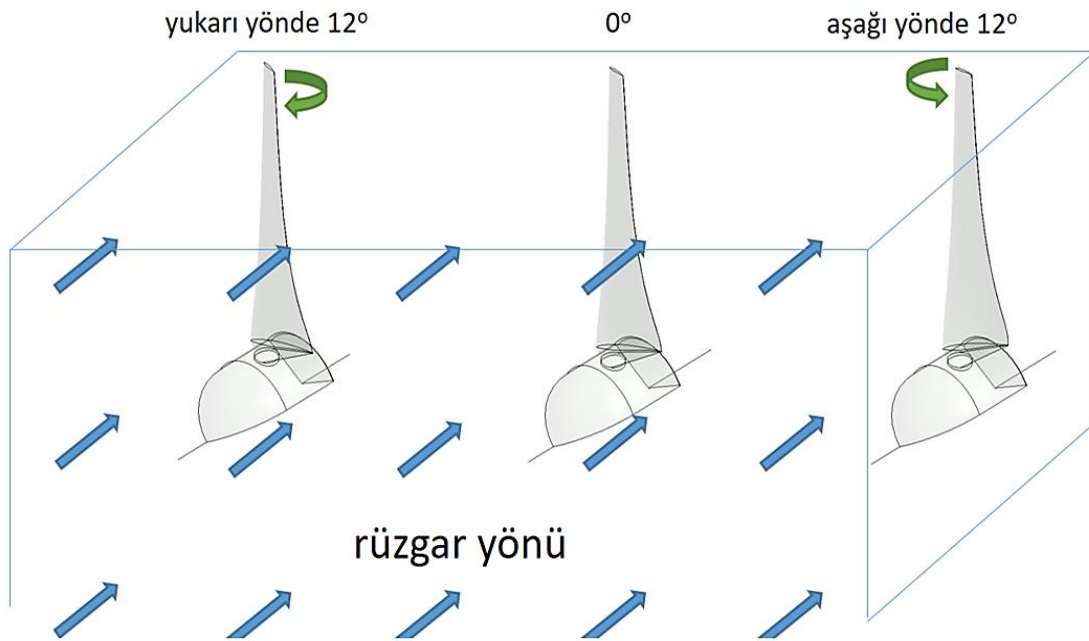


Şekil 5.25. Düz ve optimum kanatlar için çevrinti eş-yüzeylerinin $\omega_v = 2500$ 1/s değerinde çevrinti konturlarıyla birlikte karşılaştırılması ($\lambda=6$)

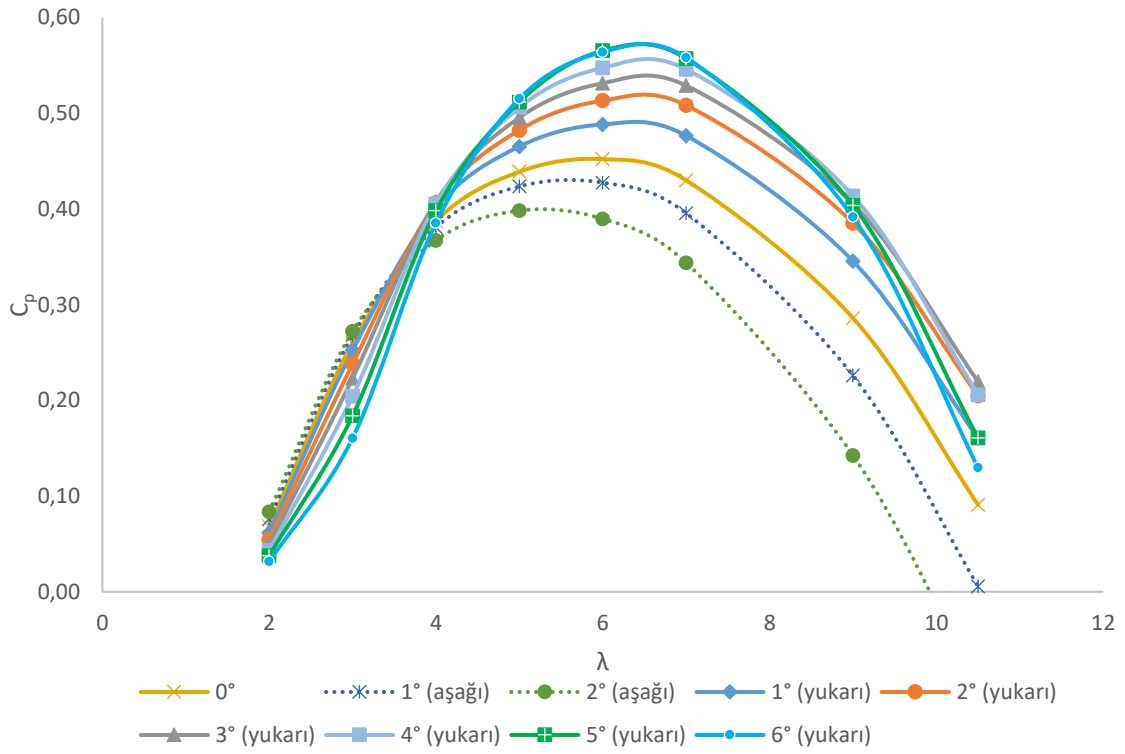
5.7. Kanat Hatve Açısı Çalışması: En Uygun Hatve Açısının Bulunması

Bu bölümde tasarlanan optimum eğimli kanadın farklı kanat hatve açılarında aerodinamik performansı incelenerek en uygun kanat hatve açısı bulunmuştur. Kanat hatve açısı kanadın yukarı yönde veya aşağı yönde döndürülmesiyle ayarlanabilir. Şekil 5.26'dan anlaşılacağı gibi, yukarı yönde kanat hatve açısı, kanatların rüzgar yönünde döndürülmesi ile aşağı yönde kanat hatve açısı ise kanatların rüzgar yönüne karşı dönmesi ile elde edilir. Yukarı yönde dönme negatif kanat hatve açısı, aşağı yönde dönme ise pozitif kanat hatve açısı olarak tanımlanmaktadır (Elfarra, 2011).

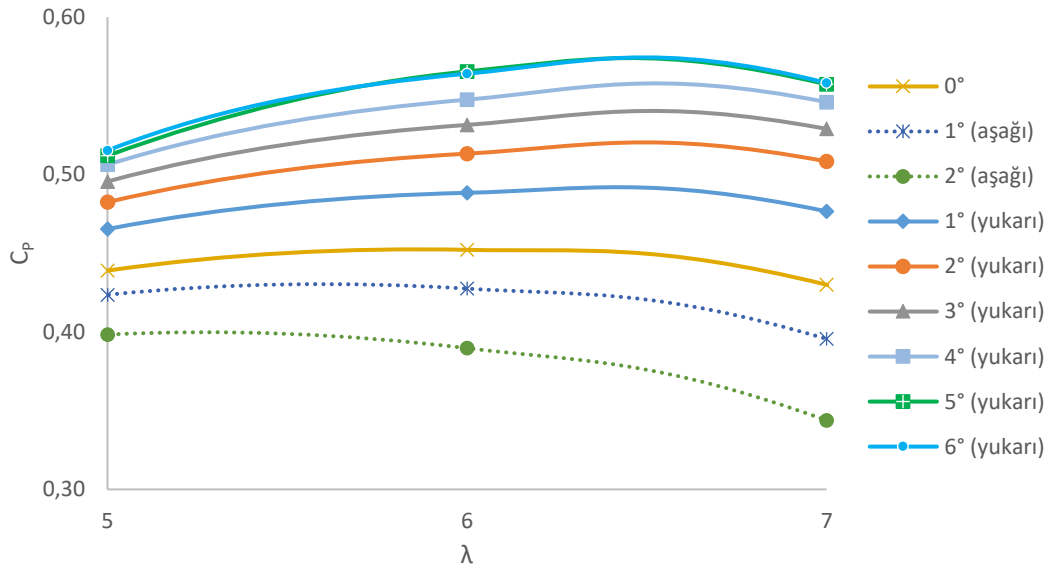
Bu başlık altında gerçekleştirilen çalışmada, uç hız oranı $\lambda = 2, 4, 5, 6, 7, 9$ ve 10.5 için kanat hatve açıları aşağı $+2^\circ$ ve yukarı -6° arasında toplam 8 hatve açısında $C_P - \lambda$ eğrileri çıkarılmış ve Şekil 5.27'de verilmiştir. Burada yukarı doğru olan hatve açıları sürekli çizgiler ile aşağı doğru olanlar ise kesikli çizgiler ile verilmiştir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında özellikle tasarım uç hız oranı ($\lambda=6$) ve buna yakın uç hız oranlarında yukarı yönlü hatve açılarında güç katsayılarında artış gözlenirken aşağı yönlü kanat hatve açılarında azalma görülmektedir. Bunun daha detaylı incelenebilmesi için Şekil 5.28'de $\lambda=5-7$ arası güç katsayısının değişimi verilmiştir. Özellikle $\lambda=6$ 'daki değişim incelendiğinde yukarı 5° kanat hatve açısına kadar güç katsayısı artarken, buradan sonra yukarı yönde 6° kanat hatve açısında tasarım uç hız oranında güç katsayısında artış olmadığı görülmektedir. Buna göre en uygun kanat hatve açısı 5° (yukarı) olarak bulunmuştur.



Şekil 5.26. Yukarı yönde ve aşağı yönde kanat hatve açısı



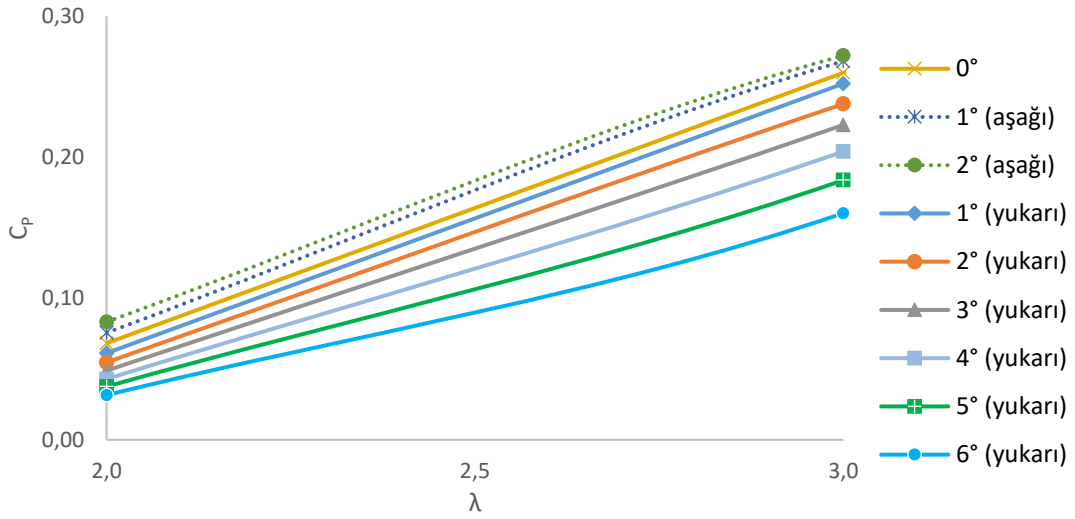
Şekil 5.27. Farklı kanat hatve açılarında uç hız oranına (λ) bağlı olarak güç katsayısı (C_p) değişimi



Şekil 5.28. Farklı kanat hatve açılarında $\lambda=5-7$ arası güç katsayısı değişimi

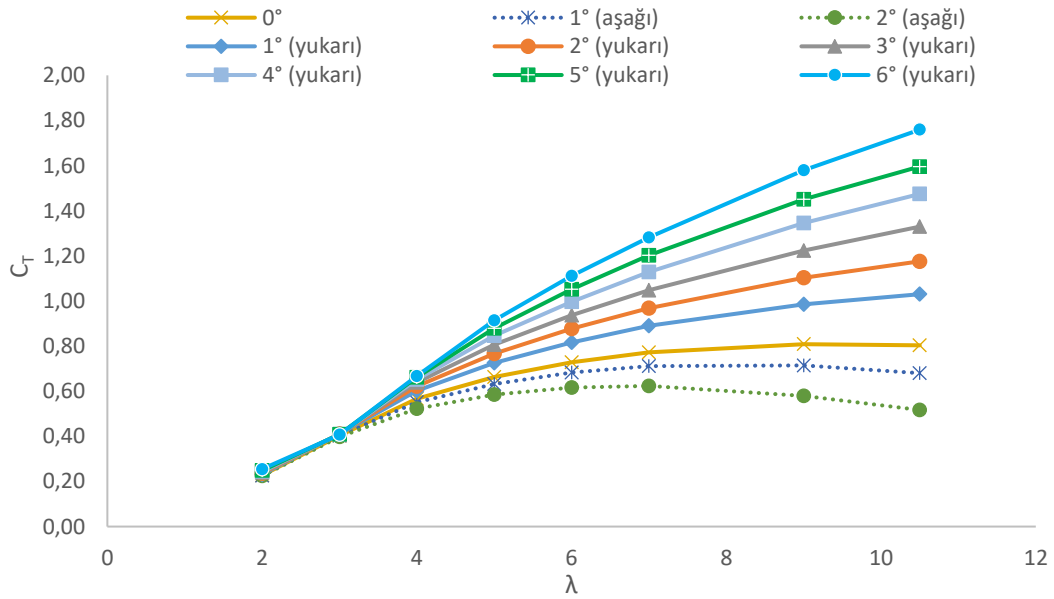
Dikkat çeken diğer bir nokta ise $\lambda=2-4$ arası değişimdir. Kanat hatve açısı yukarı doğru arttıkça güç katsayısı $\lambda=2$ ve 3 'de azalırken, $\lambda=4$ 'te tekrar artma eğilimine girmiştir. Daha detaylı inceleme için Şekil 5.29'da $\lambda=2-3$ arası güç katsayısının değişimi verilmiştir. Bu grafikten $\lambda=2-3$ arası yukarı yönde kanat hatvesinin güç katsayısını negatif, aşağı yönde

kanat hatvesinin ise pozitif etkilediği net bir şekilde görülmektedir. Buradan aşağı yönde kanat hatve açısının türbin ilk kalkışını pozitif etkileyebileceği sonucu çıkarılabilir.



Şekil 5.29. Farklı kanat hatve açılarında $\lambda=2-3$ arası güç katsayısı değişimi

Şekil 5.30'da ise kanat hatve açısına bağlı olarak itme katsayısının – uç hız oranı ($C_T - \lambda$) eğrisinin değişimi verilmiştir. Şekilde de görüleceği gibi, yukarı yönlü kanat hatve açısının artması itme katsayısının artmasına neden olmakta, aşağı yönlü kanat hatve açısı ise itme katsayısında azalmaya neden olmaktadır. İtme katsayısında kanat hatve açısına bağlı değişim $\lambda=2-3$ arasında çok az iken, $\lambda=4$ 'ten itibaren farklı hatve açılarında büyük farklılık görülmektedir.



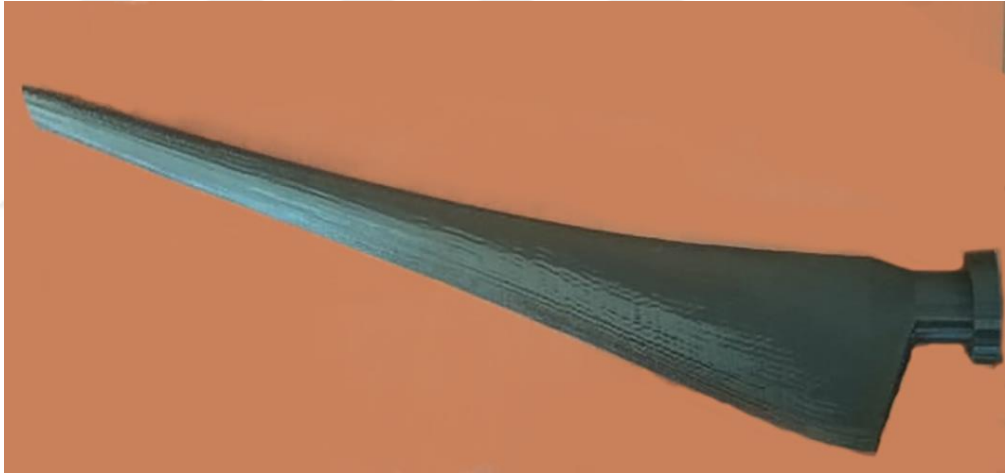
Şekil 5.30. Farklı kanat hatve açılarında itme katsayısı (C_T) değişimi

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma bölümü kanatların üretimi, deney düzeneğinin tanıtımı, deney sonuçları ve deneyin belirsizlik analizi olmak üzere 4 bölüme ayrılmıştır.

6.1. Rüzgar Türbini Kanatlarının Üretimi

Deneysel çalışmanın yapılması için ilk aşama rüzgar türbini kanadının üretimidir. Karmaşık bir geometrisi olması nedeniyle kanat imalatı zordur. Çünkü rüzgar türbini kanadı göbek kısmından uç kısmına doğru daralmakta, incelmekte, eğilmekte ve hatta her kesitin burulma açısı değişmektedir. İlk önce 3 boyutlu yazıcı ile plastik malzemeden kanadın üretilmesi işlemi denenmiştir. Ancak plastik malzemeden üretilen kanadın yüzey kalitesi çok düşük olup, 2000 d/d üstünde yüksek devirlerde döneceği de düşünülürse yeterli dayanıma sahip olamayabileceği öngörülmüştür. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen kanadın resmi Şekil 6.1’de verilmiş olup bu kanat deneylerde kullanılmamıştır.



Şekil 6.1. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen kanat

Sonraki aşamada kanatların bir bilgisayar kontrollü dik işlem merkezi (CNC) ile üretilmesine karar verilmiştir. Üç boyutlu yazıcı ile kanat üretimi CNC ile üretime göre daha kolaydır, çünkü uç kısma doğru incelen kanatta CNC cihazının yaptığı titreşim üretimi zorlaştırmıştır. Bu nedenle kanat için ilk önce dişi yatak üretimi yapılmıştır. Bir yüzeyi işlenen kanat buraya yerleştirilerek diğer yüzeyin işlenmesine geçilmiştir. Yine titreşimden dolayı parçaya zarar gelmesinin engellenmesi için, bazı kanat kesitleri üzerine tutacak aparat işlenmiş ve bunlar tutma amacıyla kullanılmıştır. Bu şekilde iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiştir. Son aşamada ise yüzey pürüzlülüğün biraz daha azaltılması için

kanatlar kuru film kaplama metodu ile kaplanmıştır. Üretilen kanatların son hali ve rotora montajı yapılmış resimleri Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. CNC ile işleme yöntemi ile üretilmiş alüminyum kanatlar ve montaj resimleri

6.2. Rüzgar Tüneli Ve Deney Düzeneği

Deneysel analizler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (RÜZGEM) yapılmıştır. Bu merkez birçok rüzgar tüneline sahip olup deneysel aerodinamik konusunda donanımlıdır. Bu çalışmada açık jet rüzgar tüneli ile birlikte model rüzgar türbini deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneği gerekli rüzgar hızını sağlamak için kullanılan rüzgar tüneli ve model rüzgar türbini olmak üzere iki adet ana elemandan oluşmaktadır. Model rüzgar türbini deney düzeneği 3 kanatlı rüzgar türbini kanatlarının testlerinin yapılabildiği ve tork değerlerinin ölçümlerinin yapılabildiği bir düzeneştir. Kanatların takılacağı göbek kısmı, torkmetre ve elektrik motoru olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır. Model rüzgar türbini kablolar vasıtasıyla veri toplayıcı ve bilgisayara bağlıdır ve kontrolü bilgisayar vasıtasıyla LabView programı ile yapılmaktadır. Elektrik motoru vasıtasıyla türbin devri kontrol

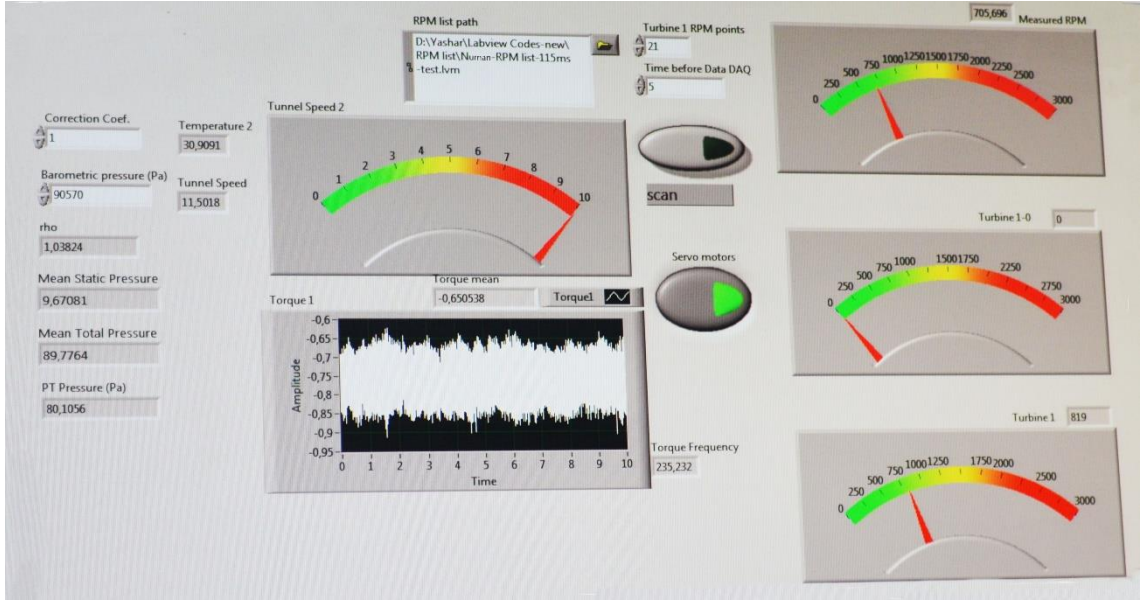
edilebilmektedir. Farklı hızlarda döndürülebilen kanatlar ile farklı uç hız oranlarında tork ölçümü yapılabilmektedir. Model rüzgar türbini bileşenleri ve boyutları Çizelge 6.1’de, iç bileşenleri ve çizim resimleri de Şekil 6.3’te verilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında cihazların kontrolü için kullanılan LabView programının ekran görüntüsü Şekil 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.1. Model rüzgar türbini bileşenleri ve boyutları

Bileşen	Boyut (m)
Rotor çapı	0.94
Göbek Çapı	0.13
Göbek Boyu	0.147
Nacelle Çapı	0.13
Nacelle Uzunluğu	0.487
Kule Yüksekliği	1.524
Kule Çapı	0.114

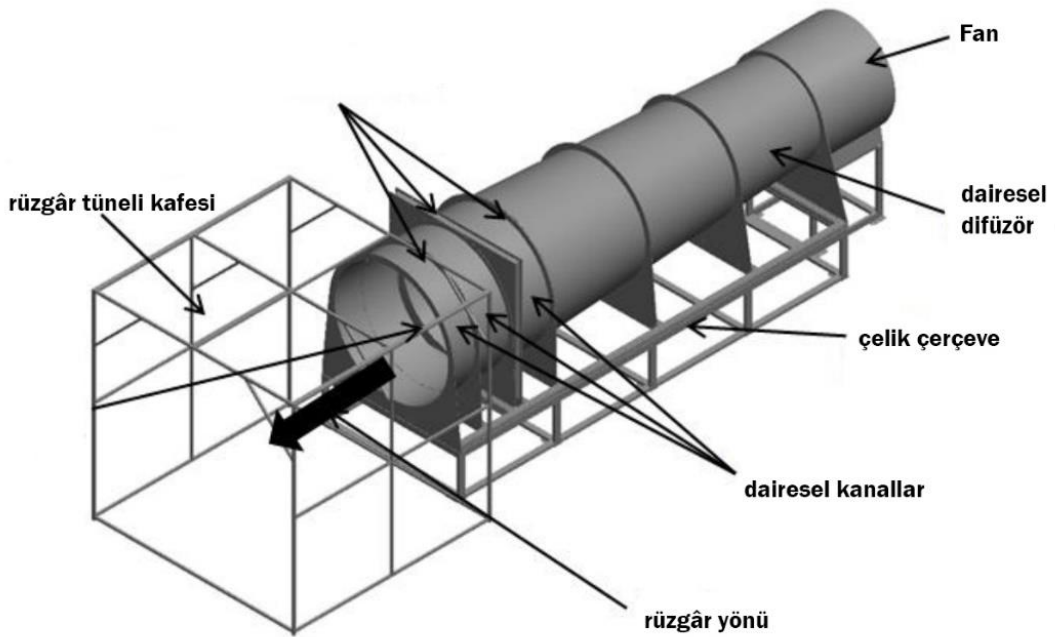


Şekil 6.3. Model rüzgar türbini bileşenleri ve resimleri (Abdulrahim, 2014; Ostovan, 2017)



Şekil 6.4. LabView programından örnek bir ekran görüntüsü

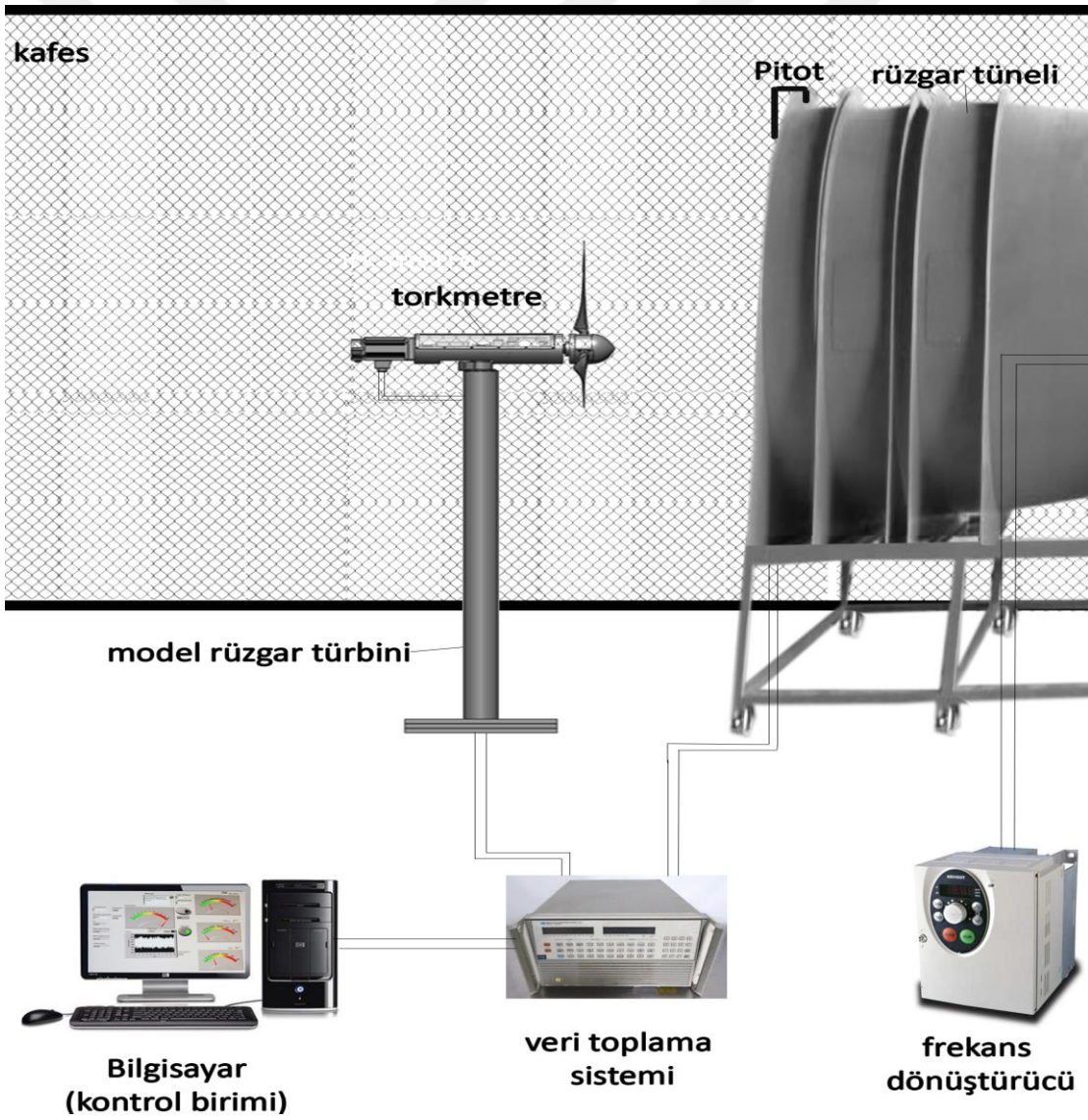
Deney düzeneğindeki diğer temel bileşen yaklaşık 7 metre uzunluğa sahip açık jet rüzgar tünelidir. Bu rüzgar tünelinde rüzgar hızı bir frekans dönüştürücü vasıtası ile ayarlanabilmekte ve sabit hızda rüzgar sağlanabilmektedir. Rüzgar tünelinin kısımlarını gösteren çizim Şekil 6.5'te, resimleri ise Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.5. Açık jet rüzgar tünelinin kısımları (Abdulrahim, 2014)



Şekil 6.6. Açık jet rüzgar tüneli resimleri



Şekil 6.7. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Şekil 6.7’de deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi deneyin ana elemanları model rüzgar türbini, rüzgar tüneli, bilgisayar, veri toplama sistemi ve frekans dönüştürücüdür. Deney için önce kanatlar model rüzgar türbinine bağlanır. Daha sonra model rüzgar türbini farklı dönme hızlarında döndürülerek çalışıp çalışmadığı test edilir, veri toplama sistemi ile bağlantısı kontrol edilir. Daha sonra rüzgar tüneli çalıştırılır, frekans dönüştürücü vasıtasıyla rüzgar hızı ayarlanır. Son aşamada ise bilgisayar vasıtasıyla deney başlatılır, istenilen devirlerde sonuçlar veri toplama sistemi tarafından toplanır, bilgisiyar vasıtasıyla sonuçlar veri toplama sisteminden alınarak deney tamamlanır.

6.3. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

Deneysel çalışma yapılmadan önce rüzgar türbini düzeneğinin balans ayarı yapılmıştır. Bunun nedeni yüksek dönme hızlarında test edilen rüzgar türbininden kaynaklanabilecek büyük tehlikelerin olmasıdır. Balans ayarının yapım anına ait örnek bir resim Şekil 6.8’de verilmiştir. Balans ayarında amaç rotordaki yük dengesini sağlayarak titreşimi ve salınımı mümkün olduğunca azaltmaktır.



Şekil 6.8. Balans ayarı

Deneysel çalışma daha önce de belirtildiği gibi güç katsayısının (C_P) uç hız oranına (λ) bağlı değişimi 0° ve yukarı yönde 5° olmak üzere iki adet kanat hatve açısında

yapılmıştır. Deney setinde rüzgar türbini deneyi yapılırken deney türbininin test devir sayısına çıkarılması ve aynı devirde sabit tutulması servo motor vasıtasıyla yapılmaktadır.

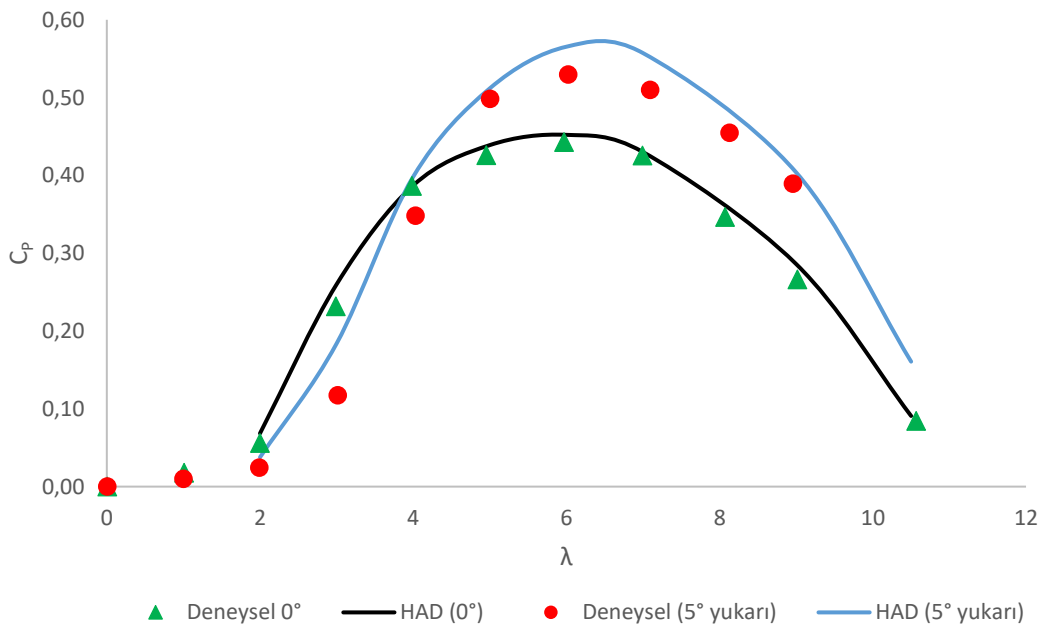
Sıfır derece kanat hatve açısında dönme hızı 0-2500 d/d arasında değiştirilerek $\lambda=1-10.5$ arasında deneysel tork değerleri ölçülmüştür. Diğer kanat hatve açısında ise oluşabilecek tehlikeye karşı 2000 d/d'nin çok üstüne çıkılmamış, deneysel sonuçlar bu noktaya kadar elde edilmiştir. Çizelge 6.2'de deneysel olarak ölçülmüş olan rüzgar hızı (m/s), dönme hızı (rpm ve rad/s) ve tork (Nm) değerleri verilmiştir. Deneyler sırasında deney ortamında sıcaklık yaklaşık 30°C , hava yoğunluk değeri ise yaklaşık 1.04 kg/m^3 olmuştur. Deneylerde rotor dönme hızı 0-257 rad/s arasında değiştirilmiştir. Sonuçlara bakıldığı zaman 5° kanat hatve açısında tasarım uç hız oranında 0° 'ye göre daha yüksek güç katsayısı elde edildiği görülmektedir. Ancak 0° kanat hatve açısında düşük uç hız oranlarında daha yüksek güç katsayısı değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bölüm 5.7'de benzer bir sonuca HAD simülasyonları sonucunda ulaşılmıştır.

Çizelge 6.2. Deneysel ölçüm verileri

Kanat hatve açısı	Uç hız oranı	Rüzgar hızı (m/s)	Dönme hızı (rpm)	Dönme hızı (rad/s)	Tork (Nm)
0°	1.01	11.5	236.6	24.8	0.394
	2.00	11.6	471.3	49.4	0.633
	2.99	11.6	705.9	73.9	1.753
	3.98	11.6	937.4	98.2	2.181
	4.97	11.6	1172.0	122.7	1.951
	6.02	11.5	1407.1	147.4	1.632
	7.03	11.5	1641.6	171.9	1.360
	8.03	11.5	1876.4	196.5	0.941
	9.04	11.5	2111.1	221.1	0.656
	10.54	11.5	2463.2	257.9	0.176
5°	1.00	11.6	236.6	24.8	0.229
	2.00	11.6	471.3	49.4	0.282
	3.02	11.5	705.7	73.9	0.872
	4.03	11.5	940.4	98.5	1.920
	5.01	11.5	1171.9	122.7	2.230
	5.97	11.5	1394.8	146.1	1.970
	7.09	11.4	1641.4	171.9	1.568
	8.10	11.4	1876.1	196.5	1.214
	8.93	11.4	2069.7	216.7	0.946

Daha önce Bölüm 1.2.1.'de belirtildiği gibi rüzgar türbinlerinde mekanik kayıplar, temel olarak dişli kutusu ve yatak kayıpları nedeniyle ortaya çıkan kayıplardır. YERT'lerde mekanik verim yaklaşık %96.8 seviyesinde olup, dişli kutusu nedeniyle meydana gelen kayıplar yaklaşık %2.8, yataklama nedeniyle oluşan sürtünme kayıpları yaklaşık %0.4 olarak belirtilmiştir (Hau, 2006; Koç ve Şenel, 2015). Krogstad ve Lund (2012) bu çalışmada kullanılan model rüzgar türbinine benzer dişli kutusuz bir rüzgar türbini kullanmışlar ve mekanik kayıpları ihmal etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan model rüzgar türbininde dişli kutusu bulunmamakta olup, sadece yataklama nedeniyle oluşan kayıplar bulunmaktadır. Bu nedenle tork ölçümüne kadar olan mekanik verim %98 olarak alınmıştır.

Şekil 6.9'da 0° ve 5° derece kanat hatve açılarındaki deneysel ve HAD sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil'den de görüleceği gibi deneysel sonuçlar ile HAD sonuçları uyum içerisindedir. Her iki kanat hatve açısındaki deneysel sonuçların HAD sonuçları ile uyumlu olmalarına karşın, 0° 'de deneysel sonuçların ve HAD sonuçları ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Bunun nedenlerinden biri olarak nispeten daha yüksek kanat hatve açılarında kanat etrafı akışın daha karmaşık hale gelmesiyle birlikte HAD hesaplamalarındaki yanılma miktarının artması olarak gösterilebilir.



Şekil 6.9. Deneysel ve HAD ile elde edilmiş güç katsayılarının (C_p) uç hız oranına (λ) bağlı değişimlerinin karşılaştırılması

Konuyla ilgili literatür incelendiği zaman eğimli kanatlı YERT'ler ile yapılmış bir deneysel çalışmaya rastlanmamıştır.

6.4. Deneyin Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada deneysel sonuçlardan elde edilen verilerin doğru yorumlanması açısından belirsizlik analizinden yararlanılmıştır (Holman ve Gajda, 2001). Eğer bir sonuç parametresi, R , n adet ölçülmüş parametreye, $x_1, x_2 \dots x_n$ bağlı olarak değişiyor ise bu denklem 6.1 ile tanımlanabilir. Deneyin belirsizliği, w_R , ise Denklem 6.2 ile hesaplanabilir (Ostovan, 2017; Wheeler ve ark., 2004).

$$R = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \quad (6.1)$$

$$w_R = \left[\sum \left(w_{xi} \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.2)$$

Deneyler sırasında her bir uç hız oranında kayıt alınarak tork ölçümleri alınmıştır. Ayrıca dönme hızı, tork, ortam sıcaklığı, yoğunluk gibi birçok veri anlık olarak National Instrument veri toplama cihazı ve LabVIEW programı ile izlenmiş ve kayıt edilmiştir.

Açık jet rüzgar tüneli rüzgar hızı Pitot Tüpü ile ölçülmüştür. Scanivalve DSA 3217 basınç tarayıcı pitot, %0.1 belirlisizliğe sahiptir. Tüm ölçümlerde ortam sıcaklığı National Instrument K tipi termokapıl ile ölçülmüştür. Tork (Q) ve dönme hızı (Ω) ölçümlerinin belirsizliği üretici firma tarafından %0.2 olarak verilmiştir.

$$C_P = \frac{Q\Omega}{0.5 \rho A U_\infty^3} \quad (6.3)$$

$$w_{C_P} = \pm \left[\left(\frac{\partial C_P}{\partial Q} w_Q \right)^2 + \left(\frac{\partial C_P}{\partial \Omega} w_\Omega \right)^2 + \left(\frac{\partial C_P}{\partial \rho} w_\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial C_P}{\partial U_\infty} w_{U_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.4)$$

$$\frac{w_{C_P}}{C_P} \times 100 \quad (6.5)$$

Güç katsayısının belirsizlik oranı Denklem 6.3-6.5 kullanılarak 11.5 m/s rüzgar hızında ve tasarım uç hız oranında ($\lambda=6$) %1.47 olarak hesaplanmıştır. Örnek olması açısından yapılan hesaplama Denklem 6.6-6.8 arasında sayısal değerler yerleştirilerek verilmiştir. Serbest akış hızı ve yoğunluğun belirsizlik değerleride yine aynı yöntemle hesaplanmıştır.

$$C_P = \frac{1.632 \times 147.4}{0.5 \times 1.04 \times 0.694 \times 11.5^3} = 0.438 \quad (6.6)$$

$$w_{C_P} = \pm[(0.26856 \times 0.00326)^2 + (0.00297 \times 0.2948)^2 + (0.4214 \times 0.00827)^2 + (0.1143 \times 0.0463)^2]^{1/2} = 0.00646 \quad (6.7)$$

$$\frac{w_{C_P}}{C_P} \times 100 = \%1.47 \quad (6.8)$$



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuçlar ve öneriler aşağıdaki başlıklar altında özetlenmiştir.

7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada eğimli bir YERT kanadının aerodinamik olarak optimizasyonu yapılmıştır. Buna göre çalışmadan çıkan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Bu çalışmada eğimli kanatların oluşturulması için eğiklik mertebesi, uç deplasman miktarı ve eğiklik başlangıç kesitinin bağımsız olarak değiştirilebileceği yeni bir denklem önerilmiştir.
- Eğimli YERT kanatları ile yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre öne doğru eğimli kanatlar güç arttırımı sağlamada; arkaya doğru eğimli kanatlar ise sürüklenme kuvvetinin azaltılmasında kullanılabilir.
- HAD simülasyonları için ANSYS Fluent 17.2 programı kullanılmıştır. Bu program ile rüzgar türbini kanadı analizlerinde deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- Farklı türbülans modelleri denenmiş, k-ε Realizable modeli deneylere en yakın sonuçları vermiştir. Optimizasyon işleminde de bu türbülans modeli kullanılmıştır.
- Optimizasyon ANSYS DesignXplorer’da yapılmış olup kullanılan yöntem yanıt yüzeyi yöntemidir.
- Deney tasarımının oluşturulmasında literatürde çok kullanılan yöntemlerden biri olan Yüzey Merkezli Merkezi Karma Tasarım metodu kullanılmıştır. Bu metodun avantajı, girdiler arasındaki ilişkiyi en doğru tahmin eden metodlardan biri olmasıdır.
- Yanıt yüzeylerinin oluşturulmasında farklı yöntemler denenmiş, Kriging yönteminin %0.59’luk RMSE değeri ile çalışma için en uygun yöntem olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon işleminde ise genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır.
- Optimizasyon sonucuna göre tasarlanan optimum eğimli kanat ile tasarım uç hız oranında güç katsayısında %4.28 oranında artış elde edilmiş olup, güç katsayısı değeri yaklaşık 0.431’den 0.45’e yükselmiştir.
- Girdi parametrelerinin çıktı parametresine etkileri incelendiğinde, uç deplasman miktarının (d/R) ve eğiklik mertebesinin (M) güç çıkışına

etkileri sırasıyla %38 ve %20 bulunmuş olup, en fazla etkiye ise %42'lik oranla eğiklik başlama kesitinin (r_{ss}/R) sahip olduğu belirlenmiştir.

- Optimum eğimli kanatlı rotor kullanılarak yapılan kanat hatve açısının güç katsayısına (C_p) etkisinin incelenmesi çalışmasında, yukarı yönlü kanat hatve açılarındaki belirli bir açıya kadar tasarım güç katsayısında artış elde edilebileceği ancak bunun düşük uç hız oranlarında güç katsayısında azalmaya neden olduğu görülmüştür.
- Deneysel aşamada kanat üretimi CNC işleme merkezi ile alüminyum malzemeden yapılmıştır.
- Deneysel testler 0-2500 d/d arasında model rüzgar türbini test sistemi ve açık jet rüzgar tüneli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre tasarım uç hız oranında elde edilen güç katsayısı değeri tork ölçümüne kadar olan yatak kayıpları dahil sıfır derece kanat hatve açısında 0.438 olup beş derece açıda bu değer 0.524'tür.
- Deneysel testler sonucunda HAD sonuçları ile deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.
- Belirsizlik analizi sonuçlarına göre 11.5 m/s rüzgar hızında $\lambda=6$ 'da belirsizlik oranı % 1.47 olarak hesaplanmıştır.

7.2. Öneriler

Bu çalışma ile ilgili verilebilecek öneriler aşağıdaki gibidir.

- Bu çalışmada 0.94 m rotor çapına sahip bir rüzgar türbini referans alınmış olup, daha büyük rotor çapına sahip rüzgar türbinleri için eğimli kanat tasarımı ve optimizasyonu yapılabilir.
- Öne eğimli kanatlı YERT'ler ile saha testleri yapılabilir ve açık havada performans ölçümleri gerçekleştirilebilir.
- Eğimli kanatlar ile PIV yöntemi gibi farklı akış inceleme yöntemleri kullanılarak deneysel incelemeler yapılabilir.
- Eğimli kanatların uç kısımları için kanatçık tasarımı HAD ve deneysel yöntemler kullanılarak yapılabilir.
- Bu çalışma için geliştirilen eğimli kanat oluşturma denklemi farklı tip eğimli kanatların tasarımında kullanılabileceği gibi havacılık gibi farklı alanlarda eğimli geometrilerin tasarımında kullanılabilir.

- HAD analizlerinde Fluent programının arka plan modunun kullanımı çok miktarda simülasyon yapılacak uygulamalarda kolaylık sağlaması açısından önerilir.
- HAD ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için farklı yazılımlar mevcut olup, birçok sonuç inceleme yöntemi sunması nedeniyle ANSYS CFD-Post programının kullanımı da önerilir.



KAYNAKLAR

- Abdulrahim, A., 2014, Experimental investigation of the effects of tip-injection on the aerodynamic loads and wake characteristics of a model horizontal axis wind turbine rotor, *Middle East Technical University*.
- Aksoy, M. H., 2011, Güneş ve rüzgâr enerjisi ile çalışan su pompalama sisteminin deneysel incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Aksoy, M. H., 2018, Santrifüj pompa çarkındaki akış karakteristiklerinin HAD ve PIV Yöntemi ile incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi*, 160.
- Amano, R. ve Malloy, R. J., 2008, Aerodynamic comparison of straight edge and swept edge wind turbine blade, *ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 193-197.
- Amano, R., Avdeev, I., Malloy, R. ve Shams, M. Z., 2013, Power, structural and noise performance tests on different wind turbine rotor blade designs, *International Journal of Sustainable Energy*, 32 (2), 78-95.
- Anonim, 2014, Enerji ve Çevre Bakanlığı - Stratejik Plan 2015-2019, <http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2f1%2fDocuments%2fStratejik+Plan%2fETKB+2015-2019+Stratejik+Plani.pdf>.
- Anonymous, 2005, Separation of Flow, Aerospace, Mechanical & Mechatronic Eng., University of Sydney.
- ANSYS, 2016, ANSYS Fluent Theory Guide 17.2, ANSYS inc.
- Ashwill, T. D., 2010, Sweep-twist adaptive rotor blade: final project report, *Sandia National Laboratories*.
- Bai, C., Hsiao, F., Li, M., Huang, G. ve Chen, Y., 2013, Design of 10 kW horizontal-axis wind turbine (HAWT) blade and aerodynamic investigation using numerical simulation, *Procedia Engineering*, 67, 279-287.
- Bangga, G., 2018, Comparison of Blade Element Method and CFD Simulations of a 10 MW Wind Turbine. *Fluids*, 3(4), 73.
- Bolat B., Erol K. O., C.E.İ., 2004. Mühendislik Uygulamalarında Genetik Algoritmalar Ve Operatörlerin İşlevleri. *Engineering*, (0212), Pp.264–271.
- Carcangiu, C. E., 2008, CFD-RANS study of horizontal axis wind turbines, *Universita'degli Studi di Cagliari*.
- Cengel, Y. A. ve Boles, M. A., 2002, Thermodynamics: an engineering approach, *Sea*, 1000, 8862.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. ve Engin, T., 2008, Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları, Güven Kitabevi.

- Chattot, J. J., 2009, Effects of blade tip modifications on wind turbine performance using vortex model, *Computers & Fluids*, 38(7), 1405-1410.
- Corsini, A., Castorrini, A., Morei, E., Rispoli, F., Sciulli, F., & Venturini, P., 2015, Modeling of rain drop erosion in a multi-MW wind turbine. In ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, American Society of Mechanical Engineers.
- Cotrell, J., 2002, The mechanical design, analysis, and testing of a two-bladed wind turbine hub, National Renewable Energy Laboratory.
- Demirel, G., Acar, E., Celebioglu, K. ve Aradag, S., 2017, CFD-driven surrogate-based multi-objective shape optimization of an elbow type draft tube, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (28), 17601-17610.
- Duque, E., Van Dam, C. ve Hughes, S., 1999, Navier-Stokes simulations of the NREL combined experiment phase II rotor, *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 37.
- Ebrahimi, A., & Mardani, R., 2017, Tip-Vortex Noise Reduction of a Wind Turbine Using a Winglet. *Journal of Energy Engineering*, 144(1), 04017076.
- Eke, G. ve Onyewudiala, J., 2010, Optimization of wind turbine blades using genetic algorithm, *Global Journal of Research In Engineering*, 10 (7).
- Elfarra, M. A., 2011, Horizontal axis wind turbine rotor blade: winglet and twist aerodynamic design and optimization using CFD, *Middle East Technical University*.
- Ergür, Ö., 2006, Rüzgar Türbinleri ile elektrik üretimi, *Sakarya Üniversitesi*.
- Gerhard, T. ve Carolus, T. H., 2013, Small horizontal axis wind turbine: Analytical blade design and comparison with rans-predicted flow field and performance data. 10th European conference on Turbomachinery.
- Golding, E. W., 1956, The generation of electricity by wind power, LWW.
- Haktanır, D., 2001, Rüzgâr Enerjisi Geleceğin Enerji Kaynağı Olabilir mi?.
- Hansen, M., 2011, Aeroelastic properties of backward swept blades, *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 260.
- Hansen, M. O., 2015, Aerodynamics of wind turbines, Routledge.
- Hau, E., 2006, Wind Turbines: Fundamentals, technologies, application, economics, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.

- Hau, E., 2017, Windkraftanlagen: Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit, Springer-Verlag.
- Heymann, M., 1995, Die Geschichte der Windenergienutzung, 1890-1990, Campus, p.
- Holman, J. P. ve Gajda, W. J., 2001, Experimental methods for engineers, McGraw-Hill New York, p.
- Ingram, G., 2005, Wind Turbine Blade Analysis Using the Blade Element Momentum Method Version 1.0; School of Engineering, Durham University: Durham, UK.
- Karlsen, J. A., 2009, Performance calculations for a model turbine, *Institutt for energi-og prosesssteknikk*.
- Karhikeyan, N., Murugavel, K. K., Kumar, S. A. ve Rajakumar, S., 2015, Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 801-822.
- Kaya, F. ve Karagöz, İ., 2007, Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 12 (1).
- Kaya, M. N. ve Köse, F., 2016, Wind Power Plants for Low Rated Wind Speed Regions: Feasibility Analysis and Simulation of a System, *E3S Web of Conferences*, 00034.
- Kaya, M. N., Aksoy, M. H. ve Kose, F., 2017, Renewable energy in Turkey: potential, current status and future aspects, *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 15 (1), 65.
- Khalafallah, M., Ahmed, A. ve Emam, M., 2017, CFD study of some factors affecting performance of HAWT with swept blades, *International Journal of Sustainable Energy*, 36 (5), 489-501.
- Koç, E., Şenel M. C., 2015, Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerindeki Aerodinamik, Mekanik ve Elektriksel Kayıpların Değerlendirilmesi, *Rüzgar Enerjisi Dergisi, Mart-Nisan 2015*.
- Kong, F., Wu, T. ve Hu, J., 2009, Study of swept and curved blade influences on HAWT performance, *World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 2009. WNWEC 2009*, 1-5.
- Kose, F. ve Kaya, M. N., 2013, Analysis on meeting the electric energy demand of an active plant with a wind-hydro hybrid power station in Konya, Turkey: Konya water treatment plant, *Renewable energy*, 55, 196-201.
- König, V., 1976, Wind energy in practical use: Wheels, rotors, mills, wind power plants(German book), *Munich, Udo Pfriemer Verlag GmbH, 1976. 182*.
- Krogstad, P. Å. ve Lund, J., 2012, An experimental and numerical study of the performance of a model turbine, *Wind Energy*, 15 (3), 443-457.

- Kulka, A., 2004, Pitch and torque control of variable speed wind turbines, Master Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Maggio, T., Grasso, F. ve Coiro, D. P., 2011, Numerical study on performance of curved wind turbine blade for loads reduction, *Presented at: 13th International Conference on wind Engineering*, 15.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L., 2010, Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons.
- Menter, F. R., 1994, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32 (8), 1598-1605.
- Nelson, V. C., 2013, Wind energy: renewable energy and the environment, CRC press.
- Nurbay, N. ve Çınar, A., 2005, Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin*, 164-168.
- Ostovan, Y. ve Uzol, O., 2016, Experimental Study on the Effects of Winglets on the Performance of Two Interacting Horizontal Axis Model Wind Turbines, *Journal of Physics: Conference Series*, 022015.
- Ostovan, Y., 2017, Winglets For Wind Turbines: An Experimental Study On Aerodynamic Performance And Tip Vortex Behavior, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*.
- Patel, M., 1999, Wind and Solar Energy, CRC Press LLC New York.
- Pierella, F., Krogstad, P.-Å. ve Sætran, L., 2014, Blind Test 2 calculations for two in-line model wind turbines where the downstream turbine operates at various rotational speeds, *Renewable energy*, 70, 62-77.
- Righter, R. W., 1996, Wind energy in America: A history, University of Oklahoma Press.
- Sairam, K. ve Turner, M. G., 2014, The Influence of Radial Area Variation on Wind Turbines to the Axial Induction Factor, *Energy and Power Engineering*, Vol.06, No.11, 18.
- Schepers, J., Brand, A., Bruining, A., Graham, J., Hand, M., Infield, D., Madsen, H., Paynter, R. ve Simms, D., 1997, Final report of IEA Annex XIV: field rotor aerodynamics, Energieonderzoek Centrum Nederland.
- Schlichting, H. ve Gersten, K., 2016, Boundary-layer theory, Springer.
- Schubel, P. J. ve Crossley, R. J., 2012, Wind turbine blade design, *Energies*, 5 (9), 3425-3449.
- Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X. ve Du, Z., 2016, Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades, *Energy Conversion and Management*, 119, 266-278.

- Simms, D. A., Hand, M., Fingersh, L. ve Jager, D., 1999, Unsteady aerodynamics experiment phases II-IV test configurations and available data campaigns, *National Renewable Energy Laboratory, Colorado*, 3.
- Singh, R. K. ve Ahmed, M. R., 2013, Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications, *Renewable energy*, 50, 812-819.
- Sørensen, J. N., 2016, General momentum theory for horizontal axis wind turbines. Switzerland: Springer.
- Sørensen, J. N., Mikkelsen, R. F., Henningson, D. S., Ivanell, S., Sarmast, S., & Andersen, S. J., 2015, Simulation of wind turbine wakes using the actuator line technique. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373(2035).
- Sørensen, N. N., Michelsen, J. ve Schreck, S., 2002, Navier–Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80 ft× 120 ft wind tunnel, *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 5 (2-3), 151-169.
- Spalart, P. ve Allmaras, S., 1992, A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *30th aerospace sciences meeting and exhibit*, 439.
- Spera, D. A., 1994, Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering, *New York*, ASME Press.
- Suzuki, K., Schmitz, S. ve Chattot, J.-J., 2011, Analysis of a Swept Wind Turbine Blade Using a Hybrid Navier–Stokes/Vortex-Panel Model, In: *Computational Fluid Dynamics 2010*, Eds: Springer, p. 213-218.
- Thumthae, C. ve Chitsomboon, T., 2009, Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine, *Renewable energy*, 34 (5), 1279-1284.
- TREB, 2018, Türkiye Rüzgar Enerjisi Raporu Ankara, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği.
- Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., 2018, Computational fluid dynamics: a practical approach, Butterworth-Heinemann.
- Ushiyama, I. ve Nagai, H., 1988, Optimum design configurations and performance of Savonius rotors, *Wind Engineering*, 59-75.
- Verelst, D. R. ve Larsen, T. J., 2010, Load Consequences when sweeping blades-a case study of a 5 MW pitch controlled wind turbine.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 2007, An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson Education.

Wang, C., Shi, W., Wang, X., Jiang, X., Yang, Y., Li, W. ve Zhou, L., 2017, Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics, *Applied Energy*, 187, 10-26.

Wheeler, A., Ganji, A. ve Krishnan, V., 2004, Introduction to engineering experimentation, Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall. XI.

YEGM, 2018, Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Ankara.

Yükselen, 2017, Aerodinamik Ders Notları, Erişim Tarihi: 05.03.2017.




```

ok
solve/iterate 2100
/define/models/viscous/transition-sst
yes
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
7.217
no
0
no
no
yes
no
1
1
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
10.56
no
0
no
no
yes
no
1
1
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/models/viscous/spalart-allmaras
yes
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
7.217
no
0
no
no
yes
no
no
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
10.56
no
0
no
no
yes
no
no
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/file/read-case b5010.cas
yes
/mesh/reorder/reorder-domain
/mesh/reorder/reorder-domain

```

```

/parallel/partition/reorder-partitions
/parallel/partition/reorder-partitions-to-architecture
/define/boundary-conditions/fluid
sf
no
no
no
yes
-1
no
7.54
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
1
none
no
no
no
no
no
q q q q
/define/models/viscous/kwsst
yes
/define/models/viscous/kw-low-re-correction
yes
q q q q
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
7.217
no
0
no
no
yes
1
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
10.56
no
0
no
no
yes
1
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/models/viscous/transition-sst
yes
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
7.217

```

```
no
0
no
no
yes
no
1
1
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
10.56
no
0
no
no
yes
no
1
1
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/models/viscous/spalart-allmaras
yes
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
7.217
no
0
no
no
yes
no
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/define/boundary-conditions/velocity-inlet
inlet
no
no
yes
yes
no
10.56
no
0
no
no
yes
no
10
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2100
/exit
yes
```



```
no
no
yes
-1
no
73.40425532
no
0
no
0
no
0
0
no
0
0
no
0
0
no
0
1
none
no
no
no
no
no
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2200
/define/boundary-conditions/fluid
sframe
no
no
no
yes
-1
no
97.87234043
no
0
no
0
no
0
0
no
0
0
no
0
0
no
0
1
none
no
no
no
no
no
no
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2200
/define/boundary-conditions/fluid
sframe
no
no
no
yes
-1
no
122.3404255
no
0
no
0
no
0
0
no
0
no
```

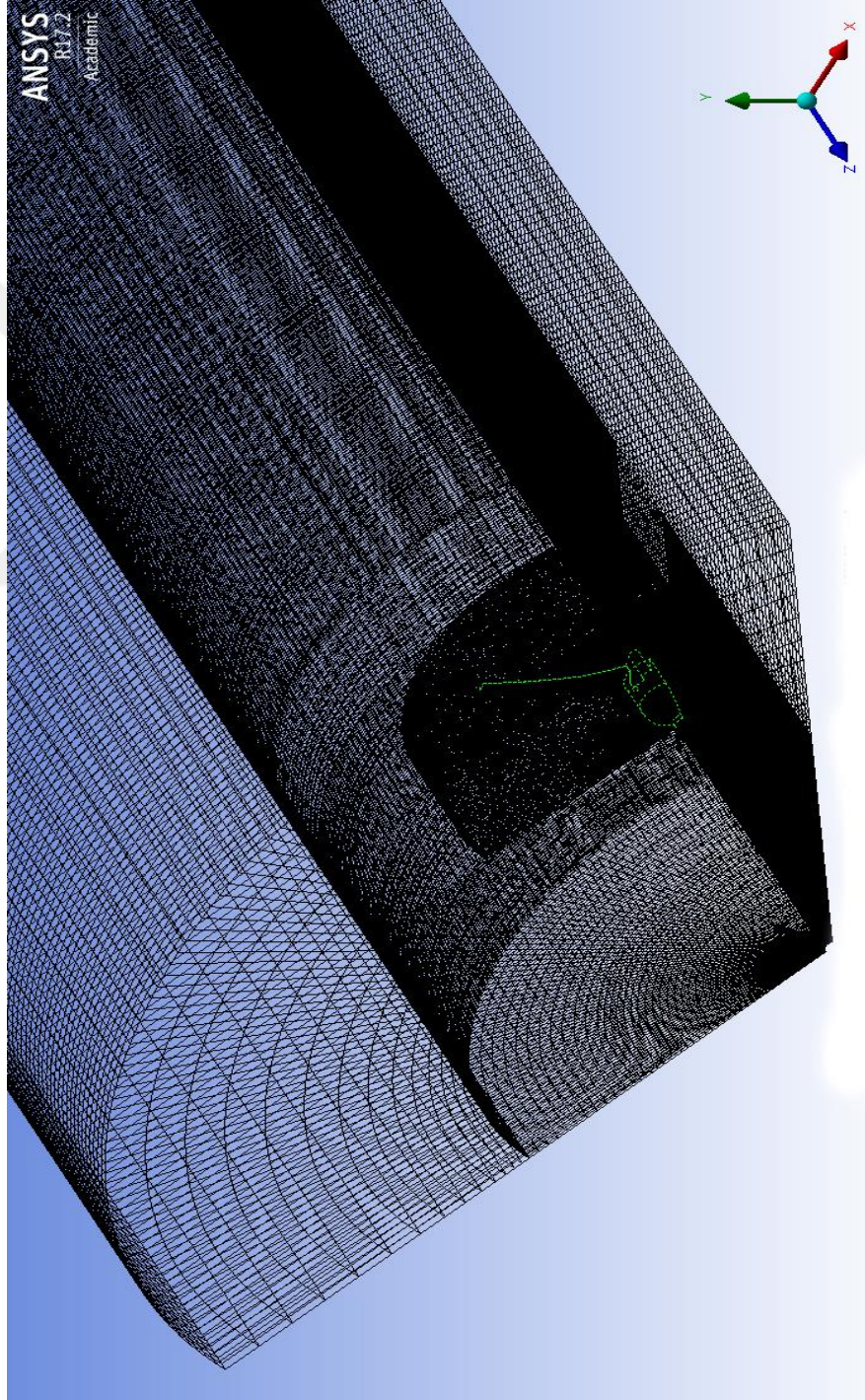
```
0
no
0
no
0
no
0
no
1
none
no
no
no
no
no
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2200
/define/boundary-conditions/fluid
sframe
no
no
no
yes
-1
no
171.2765957
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
1
none
no
no
no
no
no
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2200
/define/boundary-conditions/fluid
sframe
no
no
no
yes
-1
no
220.212766
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
1
none
no
no
no
no
no
```



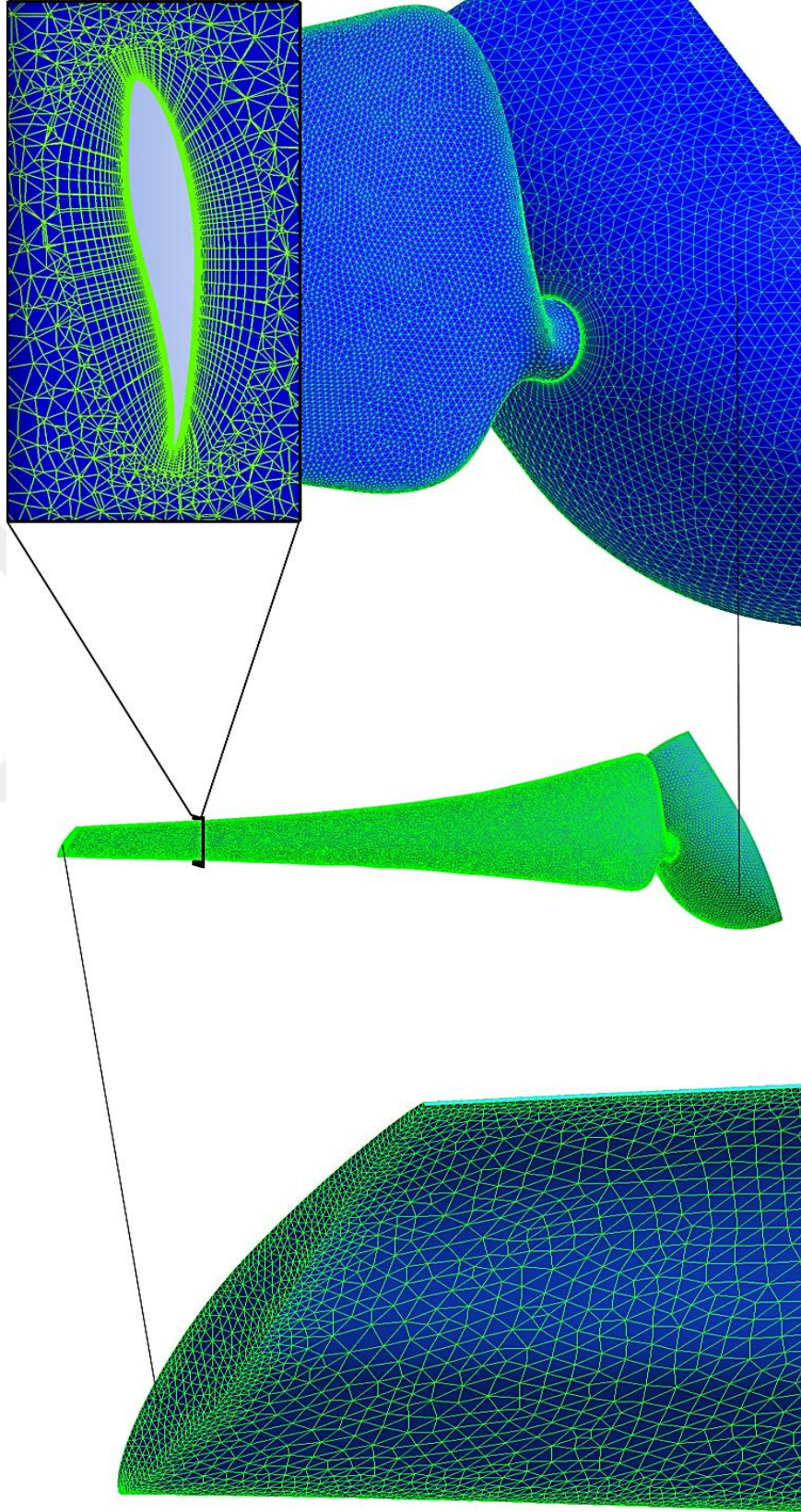
```
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2200
/define/boundary-conditions/fluid
sframe
no
no
no
yes
-1
no
269.1489362
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
0
no
1
none
no
no
no
no
no
/solve/initialize/hyb-initialization
ok
solve/iterate 2500
/exit
yes
```

EK-3. Örnek bir çözüm ağı resmi ve yaklaşık ağ kaliteleri

Çözüm ağlarının yeterli kalitede olduğundan emin olunmuş, tüm çözüm ağlarında maksimum “skewness” değerinin yaklaşık 0.8-0.85, ortalama değerinin ise yaklaşık 0.3 olması sağlanmıştır. Maksimum “aspect ratio” değerlerinin yaklaşık 500, ortalama değerlerinin ise 20 civarında olduğu görülmüştür. Ayrıca “orthogonal quality” değerlerindeki Fluent simülasyonları için yeterli aralıkta olması sağlanmıştır.

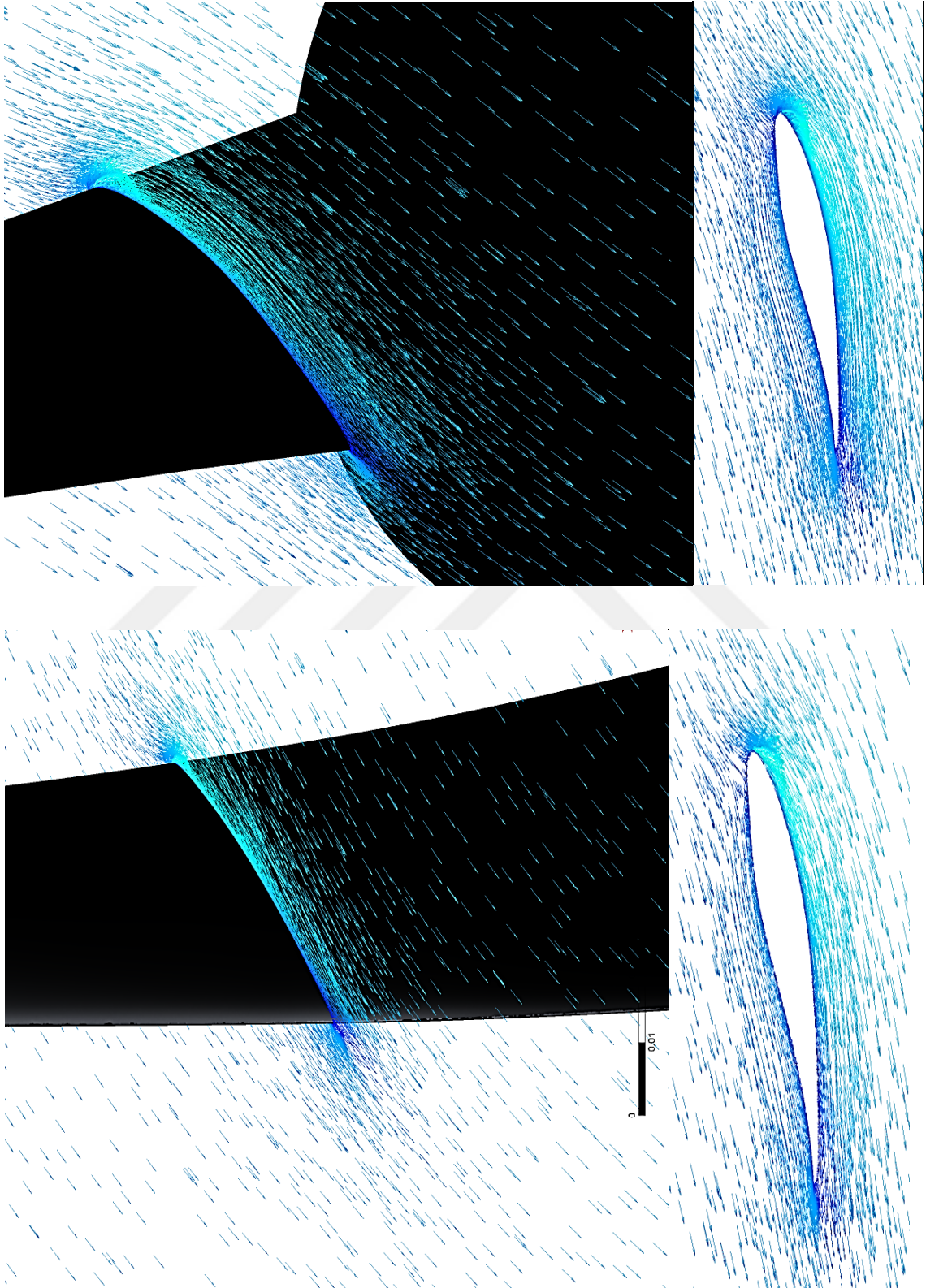


EK-4. Örnek bir kanat üzeri çözüm ağı resmi



EK-5. Kanat etrafı hız vektörleri

Düz (üst) ve optimum eğimli (alt) kanatlar etrafındaki hız vektörleri ($\lambda=4$).



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Numan Kaya
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya / 1987
Telefon :
Faks :
e-mail : mnkaya@erbakan.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Dolapoğlu Anadolu Lisesi	2006
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	2010
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi	2012
Doktora çalışması yurt dışı araştırması	: Sheffield Üniversitesi (İngiltere)	2017-2018
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2011-2017	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi	Arş. Gör.
2017-...	Necmettin Erbakan Üniversitesi	Arş. Gör.

UZMANLIK ALANI

Rüzgar Enerjisi, Aerodinamik, HAD, Enerji Ekonomisi, Yığın Enerji Depolama

YABANCI DİLLER

İngilizce (YÖKDİL: 95, YDS: 86.25), Almanca (YDS: 71.25)

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

Kaya, M. N., Köse, F., Ingham, D., Ma, L., Pourkashanian, M., 2018, Aerodynamic Performance of A Horizontal Axis Wind Turbine With Forward And Backward Swept Blades. Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, 176, 166-173.

Kaya, M. N., Köse, F., 2016, CFD Study of a Sweep-Twist Horizontal Axis Wind Turbine Blade. Inmateh - Agricultural Engineering, 50(3), 111-118.

Köse, F., Kaya, M. N., 2013, Analysis on meeting the electric energy demand of an active plant with a wind hydro hybrid power station in Konya Turkey Konya water treatment plant. *Renewable Energy*, 1(55), 196-201.

Kaya, M. N., Aksoy Muharrem Hilmi, Köse, F., 2017, Renewable Energy in Turkey: Potential, Current Status And Future Aspects. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara– International Journal Of Engineering*, 15(1), 65-69.

Kaya, M. N., Köse, F., 2016, Wind Power Plants for Low Rated Wind Speed Regions: Feasibility Analysis and Simulation of a System. *E3S Web of Conferences*, 10, 34.

Seçilmiş Uluslararası Bildiriler

Kaya, M.N, Kose, F., 2018, CFD Study Of A Horizontal Axis Wind Turbine: Validation And Parametric Analysis Using Various Swept Blade Designs, VIII International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection 2018 (IIZS 2018), October 11-12th, 2018, Zrenjanin, Serbia.

Kaya, M. N., Köse, F., Köklü, U., 2017, Numerical Investigation of a Horizontal Axis Wind Turbine With Forward And Backward Swept Blades. 7th International Conference Workshop Remoo-2017 - Energy For Tomorrow.

Kaya, M. N., Köse, F., 2016, Aerodynamic Performance Evolution Of Forward Swept Horizontal Axis Wind Turbine Blades. ISB-INMA TEH' 2016 International Symposium, 239-244.

Köse, F., Kaya, M. N., 2012, Complementarity of Wind Power And Pumped Hydro Energy Storage Systems: A Case Study Meeting Electrical Energy Demand of Rural Irrigation Pumps Of Cumra Alibeyhuyugu. 6th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 1(1), 992-1000.

Köse, F., Kaya, M. N., Berber A., 2012, The Importance of Renewable Energy Sources For Sustainable Development in Turkey. 1th International Conference Sustainable Business And Transitions For Sustainable Development. Konya

Kaya, M. N., Köse, F., 2015, Renewable Energy Powered Rural Irrigation Feasibility Comparison Of Solar And Wind Based Water Pumping Systems In Turkey. 25th Annual International Conference On Soil, Water, Energy, And Air, 1(1), 199-199.

Köse, F., Kaya, M. N., 2016, Investigation Of Wind Turbine Selection Criteria For Wind Power Stations. 8th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 843-847.