

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**1 kW GÜCÜNDE, DİFÜZÖRLÜ YATAY
EKSENİ BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN
OPTİMİZASYONU VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan ÇEVİKER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tahsin ENGİN

EKİM 2022

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**1 kW GÜCÜNDE, DİFÜZÖRLÜ YATAY
EKSENLİ BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN
OPTİMİZASYONU VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan ÇEVİKER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 27 / 10 /2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Gökhan ÇEVİKER

27.10.2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Tahsin ENGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda yardımlarını esirgemeyen ve aynı zamanda her türlü bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Dr. Öğretim Üyesi Ahmet AYDIN'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı (KOSGEB)'e ve ayrıca maddi ve teknik desteklerinden dolayı Reynolds Mühendislik firmasına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı.....	5
1.2. Motivasyon.....	6
BÖLÜM 2.	
RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	8
2.1. Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensibi.....	8
2.2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	10
2.2.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri	10
2.2.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri	11
2.2.2.1. Difüzör ilaveli rüzgar türbinleri	12
2.2.3. Eğik eksenli rüzgar türbinleri	13
2.3. Rüzgar Türbini Ana Elemanları	14
2.3.1. Kule... ..	14
2.3.2. Rotor.....	15
2.3.3. Kanatlar	16
2.3.4. Fren sistemi	16
2.3.5. Jeneratör	16

2.3.6. Dişli kutusu	17
2.3.7. Anemometre	17
2.3.8. Düşük hız mili	17
2.3.9. Sapma sürücüsü.....	17
2.3.10. Pitch kontrol sistemi.....	17
2.4. Literatür Taraması	17
2.4.1. Rüzgar enerjisi ve tarihçesi	18
2.4.2. Dünyada'da rüzgar enerjisi kullanımı.....	19
2.4.3. Türkiye'de rüzgar enerjisi durumu	19
2.4.4. Rüzgar türbini ve tarihçesi	20
2.4.5. Rüzgar türbinin tasarım gelişimi	21
2.4.6. Türbin kanat profilleri ve kanat profili oluşturma yöntemleri	25
2.4.7. Hesaplmalı akışkanlar dinamiği ile hesaplama ve optimizasyon	27

BÖLÜM 3.

RÜZGAR TÜRBİNİNDE KANAT AERODİNAMİĞİ VE YAPISAL

ANALİZİ.....	30
3.1. Kanat Profili Üretimi ve Teorisi.....	30
3.2. Kanat Elemanı Momentum Teorisi.....	31
3.2.1. Sürüklenme kuvveti.....	33
3.2.2. Kaldırma kuvveti.....	34
3.2.3. Güç katsayısı tanımı ve betz limiti	35

BÖLÜM 4.

OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	37
4.1. Ek Çözücü (Adjoint Solver) Optimizasyon Tekniği	38
4.1.1. Geometri modelinin oluşturulması.....	38
4.1.2. Çözüm ağının oluşturulması.....	38
4.1.3. Sınır şartlarının belirlenmesi	39
4.1.4. Sonuçların incelenmesi.....	40
4.2. Tepki Yüzeyi (Response Surface) Optimizasyonu Tekniği	41

4.2.1. Qblade ile ön tasarımın oluşturulması.....	42
4.2.2. Ansys design modeller ile tasarım parametrelerinin belirlenmesi	43
4.2.3. Çözüm ağının oluşturulması.....	46
4.2.4. Sınır şartlarının belirlenmesi	47
4.2.5. Optimizasyon çalışmaları	48
4.2.6. Optimizasyon sonuçları.....	49
4.3. Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	50
 BÖLÜM 5.	
TASARIM VE PROTOTİP TASARIMIN CFD ÇALIŞMALARI.....	51
5.1. Türbin ve Kalıp Tasarımı	51
5.1.1. Türbin tasarımı	51
5.1.2. Kalıp tasarımı	52
5.2. Prototip Tasarımın CFD Çalışmaları.....	53
5.2.1. Akış hacminin oluşturulması.....	53
5.2.2. Çözüm ağının oluşturulması	54
5.2.3. Sınır şartlarının belirlenmesi	58
5.2.4. Difüzlü türbinin CFD akım çizgileri ve sonuçları	59
5.2.5. Difüzlü ve difüzlü türbinin CFD sonuçlarının karşılaştırılması.....	61
 BÖLÜM 6.	
PROTOTİP İMALATI	65
6.1. Türbin Kanadı İmalatı	65
6.2. Difüzlü İmalatı	69
6.3. Balans ve Titreşim Testleri.....	72
6.4. Montaj Çalışmaları.....	72
6.5. Test Çalışmaları.....	76
6.6. Difüzlü Türbinin CFD ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ...	78

BÖLÜM 7.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ	86



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Rotor kanatlarının süpürme alanı
ASO	: Adjoint Solver Optimization
c	: Kanat kord uzunluğu (Veter uzunluğu)
C_D	: Sürüklenme katsayısı
C_L	: Kaldırma katsayısı
C_N	: Normal kuvvet katsayısı
C_P	: Güç katsayısı (Betz Limiti)
C_T	: Teğetsel kuvvet katsayısı
F_D	: Sürüklenme kuvveti
F_L	: Kaldırma kuvveti
GDO	: Goal Driven Optimizasyon
L/D	: Kaldırma / sürüklenme Oranı
N	: Rüzgâr gücü
N_R	: Rüzgârdan elde edilen güç
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
CFD	: Computational Fluid Dynamics
Re	: Reynold Sayısı
R	: Kanat süpürme alanı yarıçapı
U	: Havanın hızı
α	: Hücüm açısı
β	: Büküm açısı
ϑ	: Eğim açısı
Ω	: Rotorun açısal hızı
ρ	: Havanın yoğunluğu
V	: Serbest rüzgâr akış hızı
ω	: Kanadın açısal hızı

λ : Kanat uç hız oranı
 w : Kanat genişliği



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması	3
Şekil 2.1. Yatay eksenli rüzgar türbininin enerji dönüşüm aşamaları.....	9
Şekil 2.2. Yatay eksenli rüzgar türbininin enerji dönüşüm şeması	9
Şekil 2.3. Farklı şekillerde dikey eksenli rüzgar türbinleri	10
Şekil 2.4. Farklı şekillerde yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	12
Şekil 2.5. Difüzör ilaveli yatay eksenli rüzgar türbini	13
Şekil 2.6. Yatay eksenli rüzgar türbininin iç yapısı ve önemli parçaları.....	14
Şekil 2.7. Zamanla kule yüksekliği artan konvensiyonel rüzgar türbinleri.....	15
Şekil 2.8. Yıllara göre dünya rüzgar enerjisi santralleri kurulu güçleri.	19
Şekil 2.9. Yıllara göre türkiyedeki rüzgar enerjisi santralleri kurulu güçleri.	19
Şekil 2.10. Modern yatay eksenli rüzgar türbinleri	21
Şekil 2.11. Difüzör ve lüle tasarımı (Temsili).....	24
Şekil 2.12. Farklı tiplerde kanat profilleri	27
Şekil 3.1. Kanat profili karakteristikleri	32
Şekil 3.2. Kanattaki aerodinamik kuvvetler	33
Şekil 3.3. Yatay eksenli rüzgar türbini ve kanat aerofil yapısı.....	35
Şekil 4.1. Akış modeli	39
Şekil 4.2. Çözüm ağında isimlendirme.....	40
Şekil 4.3. Çözüm ağı	40
Şekil 4.4. Hız vektörleri.....	41
Şekil 4.5. Profil karşılaştırması	42
Şekil 4.6. Kanat yüzeyi basınç dağılımı	43
Şekil 4.7. Meridyenel düzlem.....	46
Şekil 4.8. Hücüm kenarı uzunluğu	47
Şekil 4.9. Kuyruk kenarı uzunluğu.....	47
Şekil 4.10. Turbo grid ile çözüm ağı oluşturulması	48

Şekil 4.11. Akış hacmi.....	49
Şekil 4.12. Kanat geometrisindeki değişim.....	51
Şekil 5.1. Difüzörlü rüzgar türbininin üç boyutlu tasarım resmi.....	53
Şekil 5.2. Türbin kalıp tasarımı	54
Şekil 5.3. Difüzör kalıp tasarımı.....	54
Şekil 5.4. Akış hacminde isimlendirme.....	65
Şekil 5.5. Difüzörlü rüzgar türbininin akış hacmi içerisindeki çözüm ağı.....	66
Şekil 5.6. Çözüm ağındaki Sınır Tabakalar.....	67
Şekil 5.7. Fluent meshing ile çözüm ağı oluşturulması.....	68
Şekil 5.8. Destek parçası ilaveli çözüm ağı oluşturulması	68
Şekil 5.9. Kanat üzerinde kenar bölgelere hassas çözüm ağı oluşturulması	69
Şekil 5.10. Çözüm ağı uygulandığında hücresel eleman dağılımı	70
Şekil 5.11. Akış hacminde kanadın dönüş yönü.....	71
Şekil 5.12. Geometri üzerinde akım çizgileri	71
Şekil 5.13. Akım çizgilerinin dağılımı	72
Şekil 5.14. Hız dağılımı.....	673
Şekil 5.15. Hız vektörü dağılımı.....	75
Şekil 5.16. Difüzörlü ve difüzörsüz türbinin CFD sonuçlarının karşılaştırılması	64
Şekil 6.1. Türbin alt kalıbı.....	65
Şekil 6.2. Türbin alt ve üst kalıbı	66
Şekil 6.3. Türbin üretimi	67
Şekil 6.4. Türbin alt ve üst kısmı.....	68
Şekil 6.5. Türbin kanatlarının birleştirilmiş hali	68
Şekil 6.6. Difüzör alt kalıp üretimi.....	69
Şekil 6.7. Difüzör kalıp üretimi	70
Şekil 6.8. Difüzör üretimi ilk aşama.....	71
Şekil 6.9. Difüzör üretimi bekletme ve aon aşaması	71
Şekil 6.10. Kanat balansının alınması	72
Şekil 6.11. Difüzör montaj aşaması.....	73
Şekil 6.12. Difüzör dış destekler ve ayak montaj aşaması	73
Şekil 6.13. Difüzörün dikey pozisyona getirilmesi	74

Şekil 6.14. Kanat montajı	75
Şekil 6.15. Fan ile yapılmaya çalışılan ölçüm	77
Şekil 6.16. Difüzörlü türbinin CFD ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	78



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Kanat geometrik özellikleri.....	44
Tablo 4.2. Optimizasyon parametrelerinin referans değerleri.....	47
Tablo 4.3. Çözüm ağı kalitesi.....	49
Tablo 4.4. Parametrelerin alt ve üst sınır değerleri	50
Tablo 4.5. Üretilen varyasyonlar için minimum ve maksimum değerler.....	50
Tablo 4.6. Elde edilen optimizasyon sonuçları	51
Tablo 6.1. Ölçüm sonuçları	76

ÖZET

Anahtar kelimeler: Rüzgar Türbini, Difüzör ilaveli Rüzgar türbini, NACA Profil, ANSYS Adjoint Solver, ANSYS Goal Driven

Geçmişten günümüze kadarki zamanlarda insanoğlu her zaman bir enerji arayışı içerisinde olmuştur. Enerji üretmek için insanlar genelde geleneksel yöntemlerle elektrik üretmiştir. Bu geleneksel yöntemlerin başında kömür madeni gibi yenilenemez enerji kaynakları kullanılmıştır. Fakat zamanla görünen odur ki bu yenilenemez enerji kaynakları tükenbildiği gibi, aynı zamanda çok önemli miktarda doğaya zarar vermeye başlamıştır. Bu yüzden gelişen teknoloji, altyapı ve önemli gelişmelerin de yardımıyla yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda önemli bir ivme kazanmıştır.

Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının başında rüzgâr enerjisi yani rüzgâr türbinleri gelmektedir. Bugünlerde dünya genelinde çok farklı tip ve özelliklerde rüzgâr türbinleri üretilmiştir. Fakat yapılan bu çalışma Türkiye’de bir ilk örneği taşıdığı gibi dünyada çok nadiren göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın asıl amacı rüzgâr türbinleri arasında en çok yaygın ve kullanılmakta olan yatay eksenli rüzgar türbininin kanat kesitini optimize etmek ve aynı zamanda rüzgar türbini etrafına bir difüzör ilave ederek elde edilen verimi arttırmaktır.

İlaveli difüzör ve kanat kesit geometrisinin parametreleri dahil olmak üzere tüm tasarım parametreleri ANSYS Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon aracı ile optimize edildikten sonra, 3 boyutlu parametreleri optimize etmek için ANSYS Hedef Odaklı Optimizasyon Tekniği (Goal Driven Optimization) kullanılmış ve bu sayede rüzgar türbinine etki eden tüm parametrelerin aynı anda eşlenik olarak çözülmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada yapılan, optimize işleminde türbin verimine çok önemli etkisi olan kriterler dikkate alınmıştır. Bu yüzden kanatın hücum açısı, firar açısı, difüzörün açısı ve aynı zamanda boyu optimize edilmiş ve difüzör ilavesiyle verim arttırılmış ve kendine özgü yeni bir kanat profili üretilmiştir. Daha sonra difüzörlü ve difüzörsüz türbinin analizleri CFD programında yapılmıştır ve değerler karşılaştırılmıştır. Difüzörün verime olan etkisi gösterilmiştir. Son olarak difüzörlü türbinin CFD ve deney sonuçları karşılaştırılmış ve verimi etkileyen kayıplar söz edilmiştir. Deneyler sonucunda hedeflenen 1kW’lık güç 9 m/s rüzgar hızında yakalanmıştır.

Sonuç olarak piyasada bulunmayan ve kendine özgün tasarımıyla yepyeni bir kanat tasarlanmıştır ve bu kanada ilave olarak difüzör ilave edilmiş böylelikle rüzgar türbini verimi %8 ila % 11 arası verim artışı göstermiştir. Aynı zamanda kanat üretiminde kullanılan karbon fiber ve cam elyaf gibi malzemeler sayesinde kanatlar hafif ve mukavemetli bir yapıda elde edilmiştir. Bu hafiflik sayesinde en düşük rüzgar hızlarında bile örneğin 1,75 m/s türbin enerji üretmiştir.

OPTIMIZATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF A HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE WITH DIFFUSER WITH 1 kW POWER

SUMMARY

Keywords: Wind Turbine, Wind turbine with diffuser addition, NACA Profile, ANSYS Adjoint Solver, ANSYS Goal Driven

Humankind has always been in search of energy from the very beginning to the present day. However, over time, it seems that these non-renewable energy sources can be depleted and at the same time have started to cause significant damage to nature. Therefore, with the help of developing technology, infrastructure and important developments, renewable energy sources have gained significant momentum in recent years.

One of these renewable energy sources is wind energy, namely wind turbines. Nowadays, wind turbines of many different types and features have been produced worldwide. However, this study is the first of its kind in Turkey and is rarely seen in the world. The main purpose of this study is to optimize the blade cross section of the horizontal axis wind turbine, which is the most common and widely used wind turbine among wind turbines, and at the same time to increase the efficiency obtained by adding a diffuser around the wind turbine.

After optimizing all design parameters, including the parameters of the added diffuser and blade cross-section geometry, with the ANSYS Adjoint Solver optimization tool, ANSYS Goal Driven Optimization Technique was used to optimize the 3D parameters, so that all parameters affecting the wind turbine could be solved conjugately at the same time. In the optimization process performed in this study, the criteria that have a very important effect on the turbine efficiency are taken into account. Therefore, the blade's angle of attack, trailing angle, diffuser angle and length were optimized and the efficiency was increased with the addition of a diffuser and a new unique airfoil was produced. Then the turbine with and without diffuser is analyzed in CFD program and the values are compared. The effect of the diffuser on the efficiency is shown. Finally, the CFD and experimental results of the turbine with diffuser are compared and the losses affecting the efficiency are mentioned. As a result of the experiments, the targeted 1kW power was achieved at 9 m/s wind speed.

As a result, a brand new blade was designed with a unique design that is not available in the market and a diffuser was added to this blade, so that the efficiency of the wind turbine increased between 8% and 11%. At the same time, materials such as carbon fiber and glass fiber used in the production of the blades have made the blades light and strong. Thanks to this lightness, even at the lowest wind speeds, for example 1.75 m/s, the turbine produced energy.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Globalleşen dünyada, enerji ihtiyacındaki arz ve talebi karşılamak için elektrik ve enerji üretimi sürekli artmaktadır. Azalan fosil yakıtlardan dolayı ve alternatif bir enerji kaynağı arayan insanlık bugünlerde yenilenebilir enerji kaynaklarına çok daha önem vermektedir. Bunların yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını tetikleyen başka sebepler vardır.

Günümüzdeki geleneksel elektrik üretim yöntemleri iklim değişimlerini eşi benzeri görülmemiş bir şekilde negatif etkilemiş ve zamanla küresel ısınmada artış meydana gelmiştir. Bu negatif durumları minimize etmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarına güçlü bir geçiş yapabilmek için 2015 Aralık ayında Paris'te bir kongre yapılmıştır. Bu kongrede alınan kararlar çerçevesinde 100 milyon dolarlık bir yatırım hedeflenmiş, bu yatırım sayesinde karbon emisyon oranı düşürülecek ve küresel ısınma yavaşlatılacaktır.

Tam bu süreçte rüzgâr enerjisiyle elektrik üretimi çok umut vadeden bir alan olarak gözükmektedir. Her ne kadar kısa vadede rüzgâr türbinleri geleneksel elektrik üretme yöntemlerinin yerine bir anda geçemeyecek olsa da uzun vadede inanılmaz bir potansiyel ve uygulamada çok yönlülük sunmaktadır. 2015 yılında elde edilen verilere göre bir önceki yıl ile kıyaslandığında %17.2 rüzgâr enerjisiyle elektrik üretimi hızlı bir oranda artış göstermiştir. Dünya çapında şu anda kurulu olarak en yüksek rüzgâr enerji üretme kapasitesi 261.2 GW ile Çin'e aittir [1].

Sürekli gelişen küresel dünyada yenilenebilir enerji kaynakları yeni yatırım teknolojilerine ve var olan mevcut teknolojiyi iyileştirmelere bağlı kalmaktadır. Son zamanlardaki dünya genelinde yapılan araştırmalarda rüzgâr türbinlerinin genel performansındaki verimliliği ve ömür hesaplamaları ele alınmıştır. İlk yel

değirmenlerinden günümüzdeki kanatsız Saphofian türbinlerine kadar olan bu süreçte rüzgâr enerjileri teknolojileri çok büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Bir gerçek vardır ki, türbinlerden çok daha büyük güç çıktıları alabilmek için rotor kısmının etrafı bir malzemeye çevrelenerek tasarımlar yapılmaktadır.

Difüzör ile verimi artırma çalışmaları yeni bir kavram değildir. 1970 'ler deki dünya petrol krizinin gerçekleştiği sıralarda Difüzörlü Rüzgâr Türbinleri ilk kez piyasaya tanıtılmıştır. Shroud olarak da bilinen difüzörler günümüzde genel olarak aerodinamik yapılarda mesela uçak motorları içerisindeki turbo makinelerinde kullanılmaktadır. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere difüzörlerin rüzgâr enerjisi çalışmalarındaki önemi vurgulanmaktadır. Difüzörler rüzgâr türbinlerindeki enerji çıktılarını arttırmak için ve kütleli hava akışını hızlandırarak optimize bir performans elde etmek için tasarlanmışlardır. Difüzör bu nedenle rotorun devrini artırarak ve başlangıç torkunu azaltarak tipik bir türbinin veriminin artırılmasına katkıda bulunur.

Difüzörler, ayrıca rüzgâr türbinini ve kanatlarını olumsuz bazı iklim koşullarından ve aynı zamanda düşük rüzgâr hızlarından optimum şartlara ulaşmaya kadar ki süreçte oluşabilecek türbülans koşullarından da korur. Ayrıca difüzörler kanatlarda meydana gelecek olan kayıpları azaltır ve kuşların diğer rüzgâr türbinlerine göre difüzörlü rüzgâr türbinlerini fark etmeleri daha kolaydır böylece kuşların ölüm oranı azalmıştır

Genellikle rüzgâr türbinlerinde rotor kısmı büyütülerek güç çıkışı ve kapasitenin artacağı ön görülmektedir. Difüzörlü rüzgâr türbinleri kullanımı, ekonomik şartlar göze alınmaksızın rüzgâr türbinin performansını optimize etmeye yönelik bir yaklaşımdır. Bir difüzör, geleneksel rüzgâr türbinlerine kolay bir şekilde uygulanabilir. Gerçekler göz önüne alındığında bir difüzörün şekline göre üretim, kurulum ve hatta yan bakım giderleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Rüzgâr türbinine bir difüzör eklenmesi halinde kule ve temel kısımları güçlendirilmelidir [1].

1979' ta Amerika'da yapılan Yenilikçi Rüzgâr Sistemleri Konferansında Difüzörlü Rüzgâr Türbinleri tanıtılmış ve geleneksel rüzgâr sistemleri içerisinde performansı arttırıcı bir sistem olarak tanınarak bundan sonraki süreçte de yerini almıştır. Fakat

yetersiz sermaye ve işletme-bakım maliyetlerinden dolayı Difüzörlü rüzgâr türbinlerine olan ilgi yerini yatay eksenli rüzgâr Türbinlerine bırakmıştır.

Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği gibi analiz programlarındaki gelişmeler sayesinde difüzörlü rüzgâr türbinlerine olan ilgi tekrardan ortaya çıkmakta ve difüzör aerodinamiğine yönelik tasarım-analiz çalışmalarının daha hassas araştırılmasına sebep olmaktadır [1].

Piyasada olan birçok rüzgâr türbini farklı şekillerde adlandırılmalarına rağmen, rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre Şekil 1.1.'de olduğu gibi sınıflandırılırlar.



Şekil 1.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması [1]

Günümüzde gelişmekte olan dünyada elektrik üretimi için kurulan rüzgâr türbini uygulamalarında çoğunlukla yatay eksenli rüzgâr türbinleri kullanılır. Çünkü bu tip türbinler, dikey eksenli türbinlerle kıyaslandığında yüksek konumlarda oldukça çok daha yüksek verimler elde edilir. Yukarıda Şekil 1.1.'de rüzgâr türbinlerinin birçok sınıflandırılması gösterilse de çoğunlukla rotor kısmındaki eksen yönüne göre piyasada yerini almaktadır. Bunun sebebi, rüzgâr yönünün Rüzgâr türbinlerinde önemli bir rol oynamasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden piyasada yatay ve düşey eksenli rüzgâr türbinleri kabul görmektedir.

Yatay eksenli türbinlerde dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel, kanatlar rüzgâr yönüne diktir. Piyasadaki ticari türbinlerin birçoğu yatay eksenlidir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri rüzgârı önden en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilir. Bu türbinlerde rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık % 45'dir [1].

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde, türbin mili düşeydir ve rüzgârın geliş yönüne diktir. Ticari kullanım yerine genelde deneysel çalışmalar için kullanılır. Yere yerleştirilebildikleri için kule ihtiyacı ve maliyeti ortadan kalkmaktadır. Bu tip türbinlerde sistem mekanizması istenilen rüzgâr yönüne çevrilebildiği için dümen sistemine gerek kalmaz.

Rüzgâr türbini, en genel ifadeyle mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Rüzgâr türbinleri, enerji kaynağı olarak çevreci olmasının yanında kurulum alanı olarak da hidroelektrik santrallerine göre oldukça küçüktür. Bu yönleriyle kurulum tahribat bölgesi oldukça kısıtlıdır.

Enerji üretiminde kendine yetebilen bir ülke olmak stratejik öneme sahiptir. Bu yüzden enerji kaynaklarının yönetimi ve üretilen enerjinin ülke içerisinde doğru bir şekilde değerlendirilmesi ülkelerin stratejilerini belirlemelerinde önemli rol oynamaktadır. Ülkemiz, enerji üretiminde büyük oranda dışa bağımlıdır. Bu durum cari açığı artırmakta ve enerji güvenliği riski oluşturmaktadır.

Ülkemiz enerji kaynaklarının verimli kullanılması amacıyla bir yönetmelik yayınlamıştır. Yeni yayınlanan Yenilenebilir Enerji Kaynakları Yönetmeliğine göre 1 MW'a kadar elektrik üretimi lisanssız olarak yapılabilmektedir. Böylece elektrik aboneliği olan herkes lisanssız elektrik üretim tesisi kurabilmekte, fazla ürettiği elektriği perakende satış lisansı sahibi dağıtım şirketi aracılığıyla satabilmektedir. Bu yönleriyle yapılan mevzuat değişikliği ile birlikte "kendi elektriğini kendin üret" anlayışı ile tüketicinin doğrudan kendi elektriğini üretebileceği kompakt rüzgâr türbinlerine olan talep her yıl artmaktadır. Sürekli olarak artan bu rüzgâr türbini piyasasındaki talepleri, yüksek fiyatlı olan ithal ürünler karşılamaktadır. Bu çalışma sayesinde, öncelikle

muadillerinden toplam %8-10 daha verimli; %20-30 maliyet avantajı ve kompozit kanat teknolojisi ile rekabetçi rüzgâr türbini geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Elektrik enerjisi, üretimden son kullanıcıya ulaşana kadar birçok farklı katmandan geçmektedir. Özellikle enerji iletimi ve dağıtımı safhasında toplam üretilen elektriğin %12'si enerji kaybı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada ise enerjinin üretildiği yerde tüketilmesi ana hedef noktasıdır. Böylece elektrik enerjisinin nakli sırasında yaşanan kayıplar minimize edilecektir. Doğrudan tüketiciye dönük olarak üretilecek kompakt türbinler ile tüketiciler, kendi enerji ihtiyaçlarını karşılama kabiliyeti kazanacaktır.

Özetle bu tez kapsamında; difüzör ilaveli verimi artırılmış, 1 kW gücünde yatay rüzgar türbininin yerli ve milli imkanlarla tüm bileşenleri (rotor, alternatör, şarj kontrol) ile geliştirilmesi, prototip imalatı ve testi amaçlanmaktadır.

1.1. Tezin Kapsamı

Günümüzde artan enerji verimliliğini özetleyecek olursak, enerji kaynağının daha az kayıpla ve doğru hesaplamalarla elde edilen optimum noktaya ulaşması olarak tanımlanabilir. Bundan dolayı ürün geliştirme çalışmalarının başlıca başarı ölçütü verimlilik olarak görülmektedir.

Literatürde rüzgâr türbinlerini geliştirme çalışmaları incelendiğinde temel çalışma alanı rüzgâr türbininin verimini artırmak, kayıpları azaltmak ve işletme maliyetlerini düşürmektir.

Bu çalışmada, konvansiyonel rüzgâr türbinlerinin aksine, verimi artırmak amacıyla özgün bir difüzör geliştirilecektir. Bu araştırma ve inceleme kapsamında kullanılacak difüzör diğer adıyla yayıcı, kanadın etrafındaki akışın hızını arttırmak için hava yönünde küçük çaptan büyük çapa doğru genişleyen hareketsiz parçayı ifade etmektedir. Difüzör kanatların etrafından geçen akım çizgileri boyunca kesit alanını büyütmektedir. Bu durum türbinin arkasında düşük basınç bölgesi oluşturmakta ve türbin etrafındaki rüzgâr hızını artırmaktadır. Rüzgâr hızının üretilen güce doğrudan

bağlı olduğu düşünüldüğünde çıkış gücü artmaktadır. Böylece rüzgâr türbinin veriminin % 6-8 yükselmesi hedeflenmektedir.

Kanatların tasarımı aerodinamik teorisine dayandırılarak gerçekleştirilmektedir. Rüzgar türbininin kanadının kök kısmından uç kısmına gidildikçe kesitte değişim olmaktadır. Profil değişimi; yüzey kuvvetleri, uca doğru gidildikçe oluşan yüksek çevresel hızlara, kanat boyuna, yüzey genişliğine ve kalınlık dağılımı gibi birçok tasarım parametresine bağlıdır. Tasarım geliştirme sürecinde bu parametrelerin optimizasyonu için iki farklı optimizasyon tekniği kullanılmıştır.

Bilindiği üzere; konvansiyonel rüzgâr türbinlerinin kanat profilleri, belirlenen standart NACA profillerine bağlı oluşturulan kesit profillerinin “Kanat Element Teorisi (Blade Element Theory)” ile sabit hücum açısında döndürülmesi ile oluşturulmaktadır. Bu proje ile birlikte ise standart NACA profillerinin aksine; kanat kesit geometrilerinin optimizasyonu, ANSYS tabanlı optimizasyon aracı olan Ek Çözücü (Adjoint Solver) ile gerçekleştirilmiştir. Böylece giriş parametresine bağlı kalmaksızın herhangi bir matematiksel NACA profiline bağlı olmayan özgün kanat profili ortaya konulmuştur. Bu yönüyle oluşturulacak profil ulusal/uluslararası bazda özgün ve ilk olma niteliği taşımaktadır. Oluşturulan özgün kanat profili için ise patent başvurusu yapılması planlanmıştır.

Kanat kesiti, ANSYS tabanlı Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon aracı ile optimize edildikten sonra optimizasyonda 3 boyutlu parametrelerin optimize edileceği ikinci aşamaya geçilmiştir. Optimize edilen kanat profili kullanılarak, difüzörün ve türbin kanatının eş zamanlı optimizasyonu ANSYS Hedef Odaklı Optimizasyon (Goal Driven Optimization) aracı ile yapılmıştır. Böylece türbine etki eden tüm parametrelerin eşlenik olarak çözülmesi sağlanmıştır. Burada kanatın hücum açısı, firar açısı, difüzörün boyu, difüzörün eğim açısı gibi parametreler optimize edilmiştir.

1.2. Motivasyon

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, fosil yakıtların sonlu rezervlere sahip olması ve çevreye zararları, daha da önemlisi ülkemiz açısından büyük bir ithalat kalemi oluşturması açısından son yıllarda giderek daha fazla artmıştır. Yeni nesil yüksek verimli rüzgâr türbinleri yenilenebilir (sonsuz kaynaklı) enerji kaynakları içerisinde önemli bir paya sahiptir. Ancak yeni nesil yüksek verimli türbinler konusunda ulusal teknik ve teknolojik bilgi birikimimiz kısıtlı seviyededir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin teorik üst verimi %59 civarındadır. Ancak uygulamada bunun yarısına bile ulaşmak oldukça güçtür. Önerilen tez kapsamında türbin verimini en üst düzeye taşıyabilecek hesaplamalı akışkan dinamiği tabanlı optimizasyon teknikleri kullanılmış ve ilaveten türbin çıkışına bir yayıcı (difüzör) yerleştirilerek rüzgarın kinetik enerjisinin önemli bir bölümünün kullanılması planlanmıştır. Yaptığımız ön araştırmalar difüzör uygulamasının verimde %6-8 civarında iyileşme sağlanabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada 6 m/s seviyesinde hızlarda 1 kW güç çekilecek yatay eksenli bir türbinin tasarımı, optimizasyonu ve testleri yapılmıştır. Hedef verim ise en az % 45 olarak öngörülmüştür.

Bu tezde, ANSYS Hedef Odaklı Optimizasyon (Goal Driven Optimization) tekniği kullanılarak optimizasyon yöntemi ile birlikte, kanat parametreleri optimize edilmiştir ve türbine difüzör eklenerek optimum tasarımı için piyasada ilk defa uygulamak suretiyle bir tasarım/optimizasyon prosedürü geliştirilmiştir. Bu zamana kadar ki yapılan literatürdeki türbin verimini arttırmaya yönelik çalışmalarda sadece rotor kısmında optimizasyona gidilmiş ya da türbine ek bir difüzör eklenmiştir. Bu durumlar göz önüne alındığında bu tezdeki araştırma konusuna yönelik herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu bakış açısıyla araştırma sonucu ortaya çıkan yeni spesifik kanat tasarımı ve özel difüzör eğimi, literatürdeki bilgi birikimine de önemli katkı sağlama potansiyeli bulundurmaktadır.

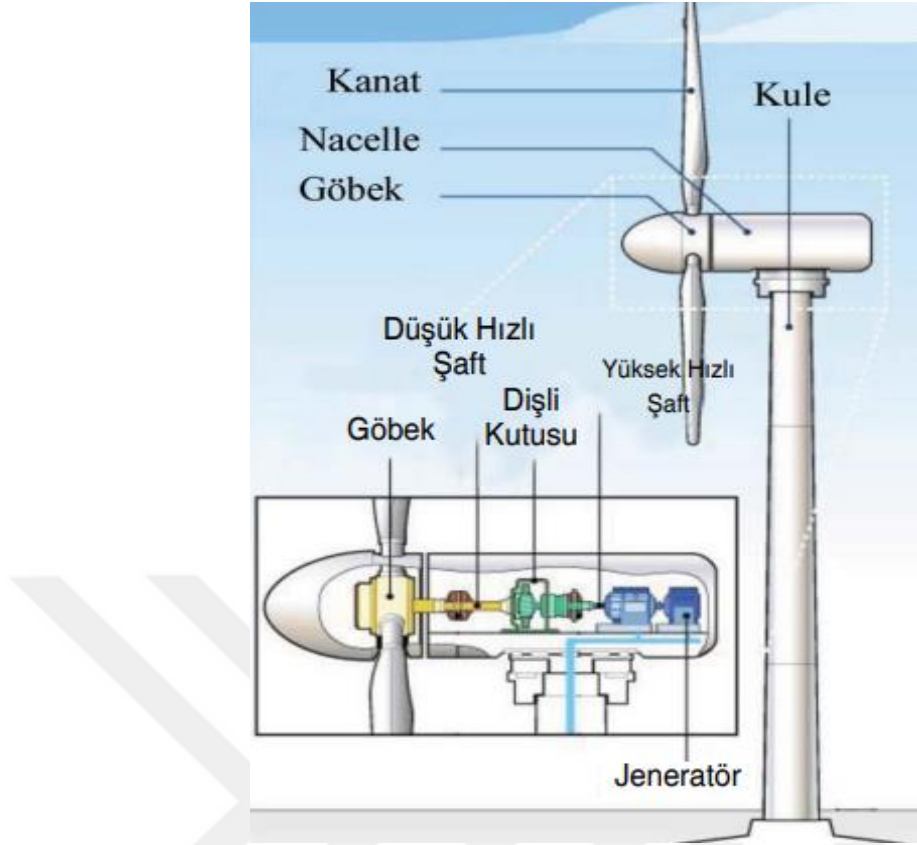
BÖLÜM 2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Çalışma Prensipleri

Basit bir dil ile ifade etmek gerekirse, bir rüzgâr türbini hava akımlarındaki sıcaklık farklarından dolayı ortaya çıkan rüzgârın türbindeki rotor kısmını döndürmesiyle kanatlar dönmeye başlar böylelikle hareket enerjisi meydana çıkar. Rotorun dönmesi ile kazanılan “Dönen Enerji” daha sonra bir jeneratör yardımıyla elektriğe dönüştürülür. Buradan elektrik enerjisi elektrik şebekesine iletilmektedir.

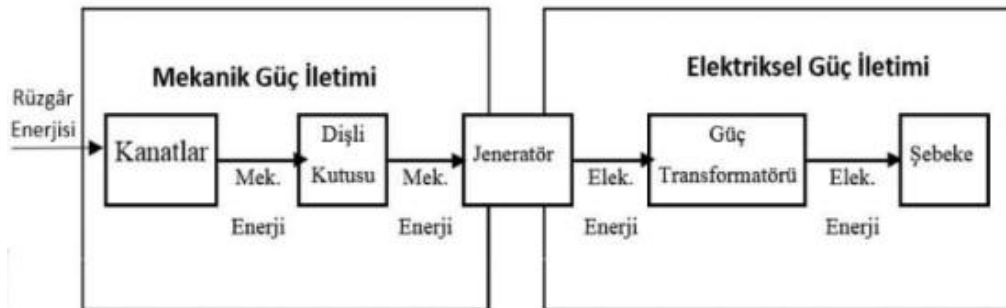
Rüzgâr türbinlerinde kurulum aşamasında sistemin yüksekliği çok önemlidir. Sistemin yerden yüksekliği ne kadar fazla olursa, rüzgâr o kadar dengeli eser ve daha fazla elektrik üretilebilir.

Rüzgâr türbinin çalışması Şekil 2.1.’de gösterildiği gibi kazanılan enerji türleriyle anlatılır. İlk olarak hareket halindeki rüzgâr yani kinetik enerji rüzgâr türbinin rotor kısmına gelerek kanatları döndürmesiyle, rotor kısmının arkasındaki güç aktarma miline belli oranda tork uygulayarak dönmesine sebep olur ve böylelikle kinetik enerji, mekanik enerjiye dönüşmüş olur. Elde edilen bu mekanik enerji şaft yardımıyla jeneratöre akatılır ve elektrik enerjisine dönüştürülür ve son olarak kule içerisindeki güç kabloları sayesinde kazanılan elektrik enerjisi şebeke kısmına aktarılır. Böylelikle elde edilen bu elektrik enerjisi, şehirde istenen yerlere şebeke dağıtımıyla yapılmaktadır [2].



Şekil 2.1. Yatay eksenli rüzgar türbin bileşenleri

Şekil 2.2.'de yatay eksenli rüzgar türbininin enerji dönüşüm şeması gösterilmiştir. Gövde içerisine yerleştirilmiş birçok makine elemanı bulunmaktadır. Tüm makine elemanları belirli bir standarda uygun üretilmiş ve sistem içerisine yerleştirilmiştir. Bu makine elemanlarından en önemlileri düşük hız şarftı, dişli kutusu, jeneratör ve kontrol kısmıdır. Bu parçaların yanı sıra motor iç kısmından hariç türbinin rotor ve kanat kısımları elde edilecek verimi önemli miktarda etkileyen diğer faktörlerdir [2].



Şekil 2.2. Yatay eksenli rüzgar türbininin enerji dönüşüm şeması [2]

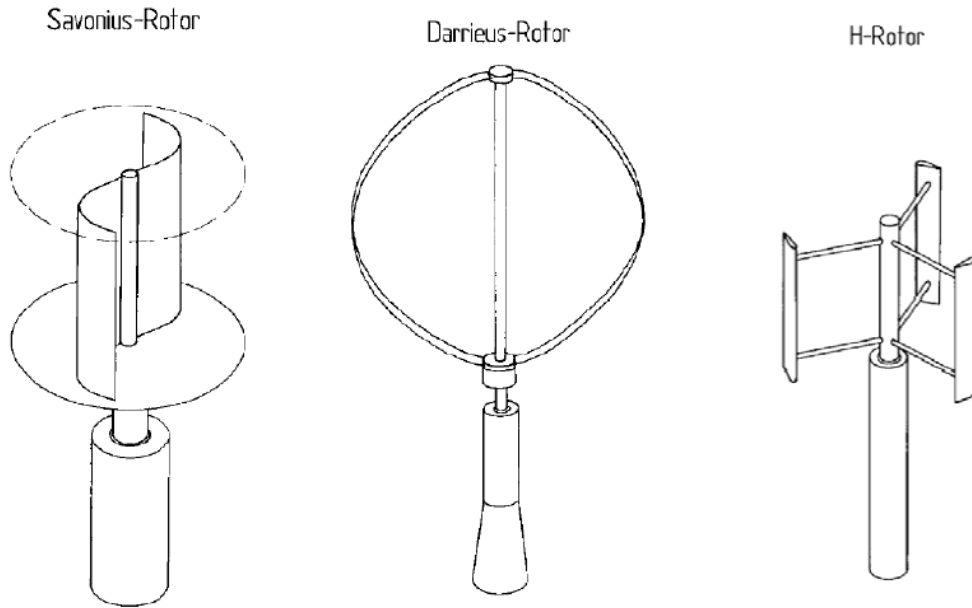
2.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Tarih boyunca çeşitli gelişimler geçiren rüzgâr makinelerinde kullanılan türbinler farklı tiplerdedir. Şimdiye kadar değişik nitelikte ve tipte geliştiren bu rüzgâr türbinlerinden bazıları günümüzde ticari hale gelmiştir. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre üç gruba ayrılır:

- Dikey eksenli rüzgâr türbinleri
- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri
- Eğik eksenli rüzgar türbinleri

2.2.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Bu tip rüzgar türbinleri dikey eksen etrafında dönen rotora sahiptir ve rüzgar yönüne dik şekilde konumlandırılırlar. En temel avantajlardan birisi olarak bu tip türbinlerde jeneratör ve dişli kutusu yere yakın bir konuma yerleştirilir. Böylelikle uzun bir kule kısmına gerek kalmayacağı gibi, aynı zamanda bakım süreci kısa olur. Ayrıca dikey eksenli rüzgar türbinleri rüzgar yönüne bağlı kalınsız enerji üretmektedir.



Şekil 2.3. Farklı şekillerde dikey eksenli rüzgâr türbinleri [3]

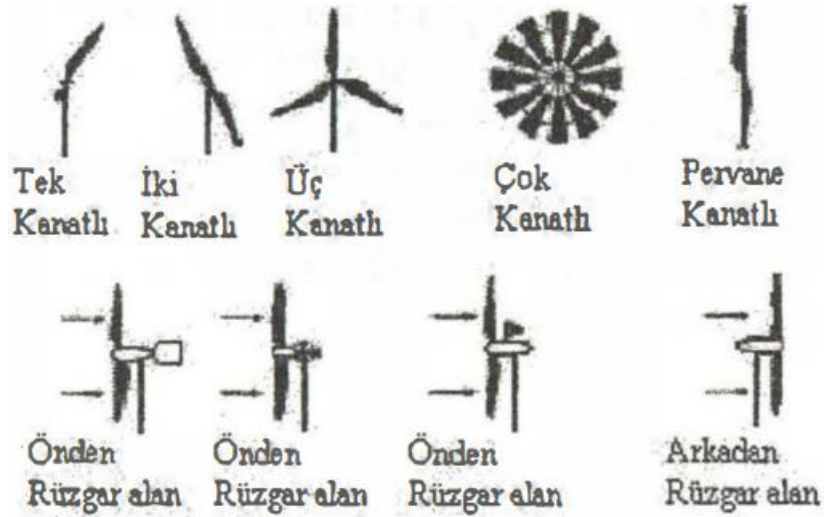
Bu avantajlarının yanında tabii ki de dezavantajları vardır; Rüzgârın türbin kanadını döndürmesiyle titreşimli tork oluşabilmektedir ve bunun yanı sıra bu sistemlerin montajı oldukça zordur. Bu tip rüzgar türbinleri genellikle yere yakın monte edildiği için çoğunlukla yavaş dönerler ve yere yakın kısımlarda türbülans oluşma olasılığı yüksek olduğu için verimde büyük kayıplar meydana gelir. Piyasada görünen başlıca dikey eksenli türbinler Şekil 2.3.'de gösterilmektedir [4].

2.2.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Bu türbinlerde; dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel, kanatlar rüzgâr yönüne diktir. Bu türbinlerde rotor etrafındaki kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık % 45'dir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri genel olarak yerden 20-30m yüksekte ve çevredeki engellerden 10m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir. Rüzgâr hızının, rotor kanadı uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı (λ) denir ve bu oran aşağıdaki 2.1 numaralı eşitlikte gösterilmiştir. Eğer bu kanat uç oranı (λ) 1-5 arasında olursa çok kanatlı, 6-8 arasında olursa üç kanatlı, 9-15 arasında olursa iki kanatlı ve $\lambda > 15$ olursa tek kanatlı rotor kullanılır. Kanat uç hız oranı, kanat yarıçapı (R), rüzgar hızı (V) ve kanat açılma hızı (ω) gibi parametrelere bağlıdır [5].

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2.1)$$

Piyasada ve uygulamalarda en çok kullanılan türbin tipi yatay eksenli rüzgâr türbinleridir. Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin kanat hızları ses hızını aşması ve rotorda oluşan titreşimlerden dolayı büyük ölçekli projeler için uygun değildir. Üç kanatlı tasarımlar genellikle iki kanatlı tasarımlara göre yaklaşık %5-6 civarında daha verimlidir. Bu sebepler göz önüne alındığında 3 kanatlı rotorlar piyasada daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat ilerleyen teknoloji, azalan fosil yakıtlar ve sürekli artan enerji taleplerinden dolayı 3 kanatlı rotorların verimleri de yetersiz kalmaktadır. Bu sebeplerden dolayı difüzörlü yatay eksenli rüzgâr türbinlerine ilgi artmış ve günden güne dünya genelinde bu alanda araştırmalar çok daha dikkat çekmiştir.



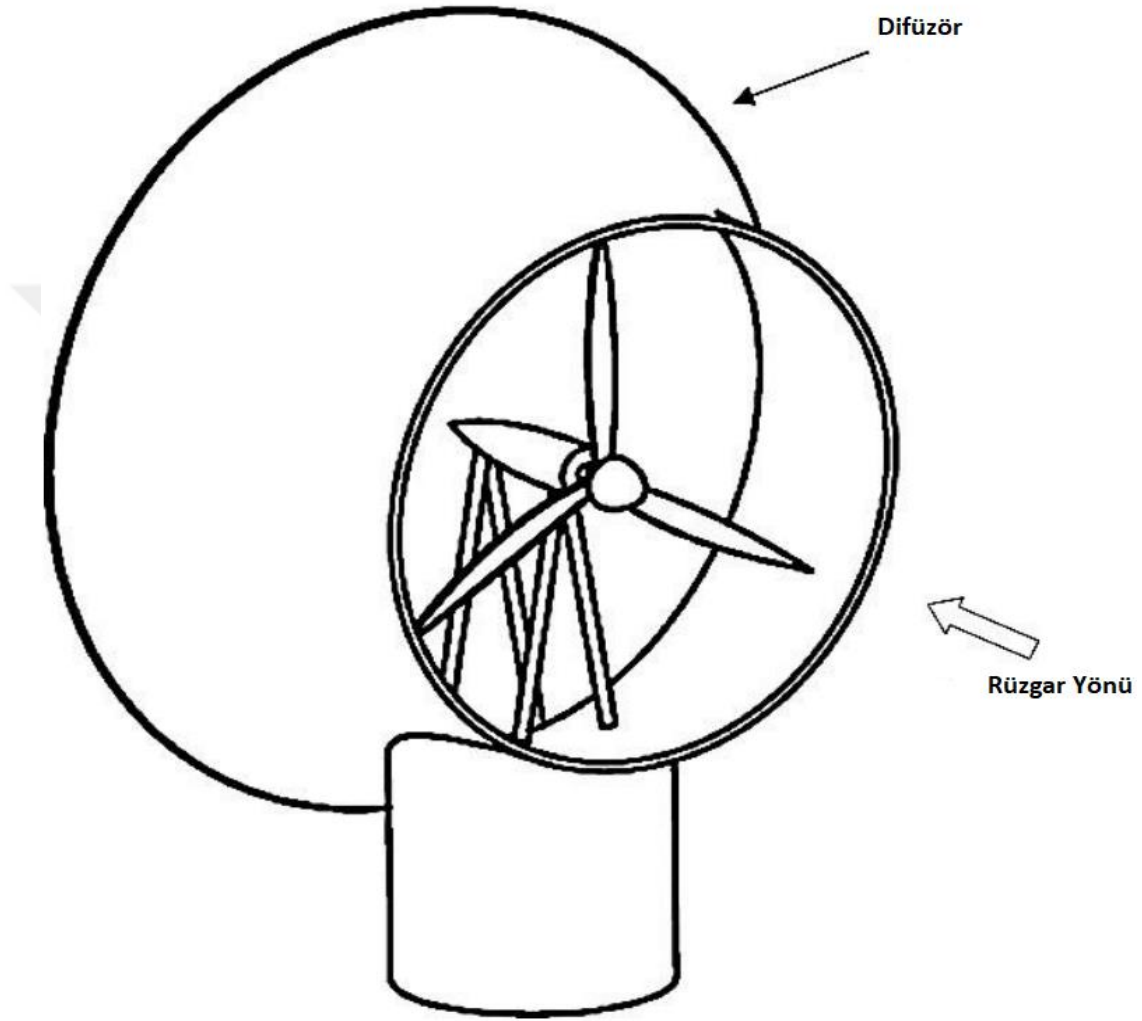
Şekil 2.4. Farklı şekillerde yatay eksenli rüzgâr türbinleri

2.2.2.1. Difüzör ilaveli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerindeki ilerleme ve yeni optimizasyon çalışmaları sayesinde difüzörlü yatay eksenli rüzgar türbinleri ortaya çıkmıştır. Genelde difüzörlü rüzgar türbinlerinde, türbin kanatlarının etrafı yayıcı olarak adlandırılan huni şeklindeki karbon fiber yapı bir malzemeyle yada döküm yoluyla üretilen plastik ek parçayla çevrilidir. Bu difüzör ilavesi yeniliğinin, yapılmasının arkasında yatan fikir ise, rotor kanatlarına karşıdan gelerek temas eden rüzgarın miktarını arttırmak ve hızlandırmaktır. Eklenen difüzör rüzgarı toplamakla kalmayıp aynı zamanda rüzgar hızını arttırarak vorteks etkisi yaratmaktadır. Bu vortekslerin etrafında düşük basınç bölgeleri oluşmakta ve böylelikle difüzör çok daha fazla hava dışarıdan çekmektedir. Difüzör, türbinin içinden geçen rüzgarın hızını arttırır ve daha yüksek güç çıktılarının oluşmasına ve böylelikle nihai rüzgar türbini veriminde önemli miktarda artışa neden olur [6].

Bu çalışmada konu olan difüzör ilaveli yatay eksenli rüzgâr türbini Şekil 2.5.'de gösterilmiştir. Difüzör sayesinde rotor kanatlarına çarpan rüzgâr miktarı artar ve kanat uçlarındaki kayıp azalır doğal olarak rotor kısmındaki dönme hızı artar. Daha sonra difüzör içerisinde akmakta olan hacimsel akış miktarı artar ve difüzör duvarı boyunca akmakta olan girdaplar oluşturur. Bu girdap etkileri yani vorteksler, hava çıkışının

merkez ekseninden uzakta meydana gelmekte ve rüzgâr türbinin arka kısmında düşük hava basınç bölgesi oluşturmaktadır. Oluşan bu basınç farkından dolayı difüzör içerisinde akmakta olan hava kütlesi süpürme etkisi yani vakum görevi yaparak kanatların daha hızlı dönmesine ve dolayısıyla verim artışına sebep olur.



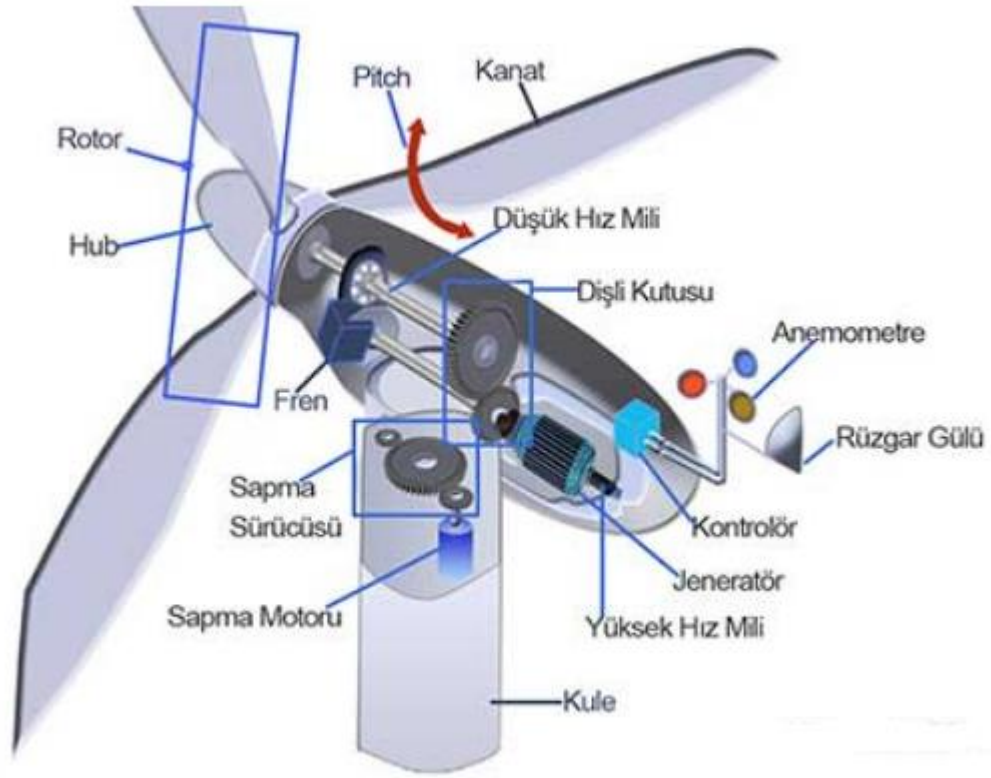
Şekil 2.5. Difüzör ilaveli yatay eksenli rüzgâr türbini [7]

2.2.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenleri düşeyle, rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır [8].

2.3. Rüzgâr Türbini Ana Elemanları

Bir rüzgâr türbini birçok parçadan oluşur. Yatay eksenli bir rüzgar türbini dişli kutusu, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, frenleme düzeni, yaw mekanizması ve kuleden meydana gelmektedir. Şekil 2.6.'da standart bir yatay eksenli rüzgar türbininin iç yapısı ve önemli parçaları gösterilmiştir. Rüzgar türbini içerisindeki kritik rol oynayan türbin parçaları aşağıda kısaca açıklanmıştır [8].



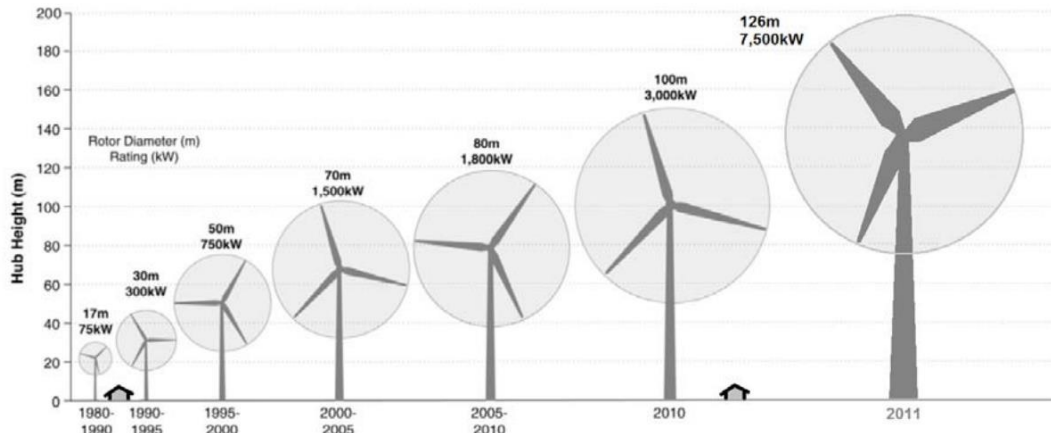
Şekil 2.6. Yatay eksenli rüzgâr türbininin iç yapısı ve önemli parçaları

2.3.1. Kule

Tipik bir yatay eksenli rüzgâr türbini kulesinin yüksekliği türbin performansını önemli şekilde etkiler. Yükseklik arttıkça rüzgâr hızı artar ve hava akış tabakası daha düzenli devam eder ve bunun sonucunda türbin performansında artış görülür. Rüzgâr hızı ve

montaj yüksekliği arasındaki etkileşim karmaşıktır. Rüzgâr dağlar, tepeler, ağaçlar, binalar vb. çevresindeki türbülans kaynaklanan sürtünmeden etkilenir. Bu etkiler yükseklik arttıkça azalır. Kısacası yükseklikle rüzgar hızı artar ve doğal olarak türbülans azalır ve böylece türbülans kaynaklanan sürtünme de azalır. Düşük rüzgâr hızlarında ya da ani rüzgâr hızı değişimleri rüzgâr türbin kanatlarına zararlı etki bırakabilir. Bu etkiye “Rüzgâr kesmesi” denir.

Normal hava koşullarında eğer ani bir sıcaklık değişimi meydana gelirse, kule ile zemin arasındaki rüzgâr hızı artar ve daha sonra yavaşça azalır. Burdanda anlaşılacağı gibi rüzgâr hızı yüksekliğe göre sabit bir fonksiyona bağlı değildir. Bu tip türbinler hareket halindeyken kanatların yere değmemesi için yerle belirli mesafe olması gerekir. Genellikle kule yüksekliği, rotor çapının 1-1.5 katı olarak alınır. Bir türbin, işletim sistemi, hızlı bakım olanağı ve yükseklik olarak pratik olmalı ve artan maliyetlere rağmen ekonomik bir hizmet sunmalıdır. Aşağıda Şekil 2.7.’de artan kanat büyüklüğüne göre kule yüksekliği de artmıştır [9].



Şekil 2.7. Zamanla kule yüksekliği artan konvansiyonel rüzgâr türbinleri

2.3.2. Rotor

Bir rüzgar türbininin en kritik unsuru rotor kısmıdır. Rotorun güç üretimi rüzgar ile olan ilişkisine bağlıdır. Rüzgar türbininin boyutunu, süpürme alanı ya da kanatların süpürme alanı olarak adlandırılan, yani dönmekte olan kanatların taradığı alan belirler.

Aşağıda 2.2. numaralı eşitlik, rotor ve rotor çapı arasındaki ilişkiyi gösterir ve bu ifade süpürme alanı olarak adlandırılır [9].

$$S = 0,785.D^2 \quad (2.2)$$

2.3.3. Kanatlar

Piyasadaki çoğu rüzgar türbini iki ya da üç adet kanada sahiptir. Rüzgar türbinine karşı yönden esmekte olan hareket halindeki hava, türbin kanatlarına çarparak dönmesine sebep olur. Genellikle 600 kW'lık bir rüzgar türbinin kanat uzunluğu 20 metre kadar olur ve uçak kanatlarına benzer şekilde tasarlanırlar [9].

2.3.4. Fren sistemi

Fren sistemi, rüzgar türbinlerinin güvenli ve stabil çalışabilmesi için vazgeçilmez bir ekipmandır. Türbin sistemlerinde genelde birbirinden bağımsız iki fren sistemi vardır; Mekanik fren sistemi ve Pitch-Stall kontrol sistemi. Her iki sistem de türbini acil durumlarda güvenli bir seviyeye getirme ve hız sınırının aşılmasıyla şebeke bağlantısını kesme özelliğine sahiptir [9].

2.3.5. Jeneratör

Rüzgar türbininde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren kısma jeneratör adı verilir. İndüksiyon prensibiyle çalışan bu tip jeneratörler diğer tip jeneratörlerden biraz daha farklı sisteme sahiptir. Bu farklılığın en önemli sebebi ise, jeneratörün salınımlı güç üreten rüzgar türbini rotoruyla eş zamanlı çalışmasıdır. Rüzgar santrallerinde genellikle jeneratörler alternatif veya doğru akım olabilirler. Büyük güç gerektiren tesislerde alternatif akım gözlenirken, pil ya da akü doldurma gibi küçük sistemlerde doğru akım jeneratörleri kullanılır.

2.3.6. Dişli kutusu (vites kutusu)

Dişli kutuları, kısa sürede düşük hız milini yüksek hız miline aktararak elektrik üretmek için gerekli olan dönüş hızına ulaştırır. Türbinin bu ekipman kısmı oldukça maliyetli ve ağır bir parça olduğundan dolayı günümüzde dişli kutusu olmaksızın tasarımlar geliştirilmekte ve bu alanda yeni çalışmalar yapılmaktadır [9].

2.3.7. Anemometre

Rüzgar hızını her yönden ölçerek, elde edilen verileri kontrol mekanizmasına aktarır. İklim ve konuma göre uygun tiplerde anemometre çeşitleri kullanımda bulunmaktadır.

2.3.8. Düşük hız mili

Rotor kısmının arka kısmına bağlı olan mildir. Kanatların bağlantı merkezine uygun yerleştirilir. Rotor kanatlarından aldığı hareket enerjisini dişli kutusuna aktarır.

2.3.9. Sapma sürücüsü (yaw mekanizması)

Rüzgarı önden alan rüzgar türbinlerinde maksimum verimi alabilmek için rotor kısmını rüzgar yönüne döndüren mekanizmadır.

2.3.10. Pitch kontrol sistemi

Rotor kanatlarını, rüzgara karşı uygun ve optimum bir açıyla çalışmasını ayarlayan sistemlerdir [9].

2.4. Literatür Taraması

2.4.1. Rüzgar enerjisi ve tarihçesi

Rüzgâr, güneş kaynaklı radyasyonun yer yüzeyini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeyinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına,

bu farklı basınç da havanın hareketine neden olur. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %2'si kadarı rüzgâr enerjisine dönüşür.

Rüzgâr enerjisi kullanımı, yeni bir teknoloji olmayıp insanlık tarihinde önemli bir rol oynamıştır. İnsanoğlunun, rüzgârın gücünü keşfedip onun gücünden yararlanmaya başlaması çok eski dönemlere dayanır. İlk kez M.Ö. 2800 yıllarında Mısırlıların kürek mahkûmlarının gücüne ek olarak rüzgâr enerjisini kullandıkları bilinmektedir. Mısırlılar metrelerce uzunluktaki yelkenleri şişirip tonlarca ağırlıktaki gemileri yüzdürmek için rüzgâr gücünden yararlanmışlardır. Hollanda'dan Amerika'ya birçok farklı coğrafyada rüzgâr enerjisi yel değirmenleri vasıtasıyla üretilmekte ve su kuyularından su çekmekte kullanılmıştır. İran ve Afganistan'da ise insanlar tahıl öğütme amaçlı rüzgâr enerjisini kullanmışlardır [10].

Günümüzde ise rüzgar türbinleri çoğunlukla elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin dolaylı bir şeklidir. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde aynı ısıtamaması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları rüzgarı ortaya çıkarmaktadır. Rüzgârdaki kinetik enerji önce mekanik daha sonra rüzgâr türbini aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür [10].

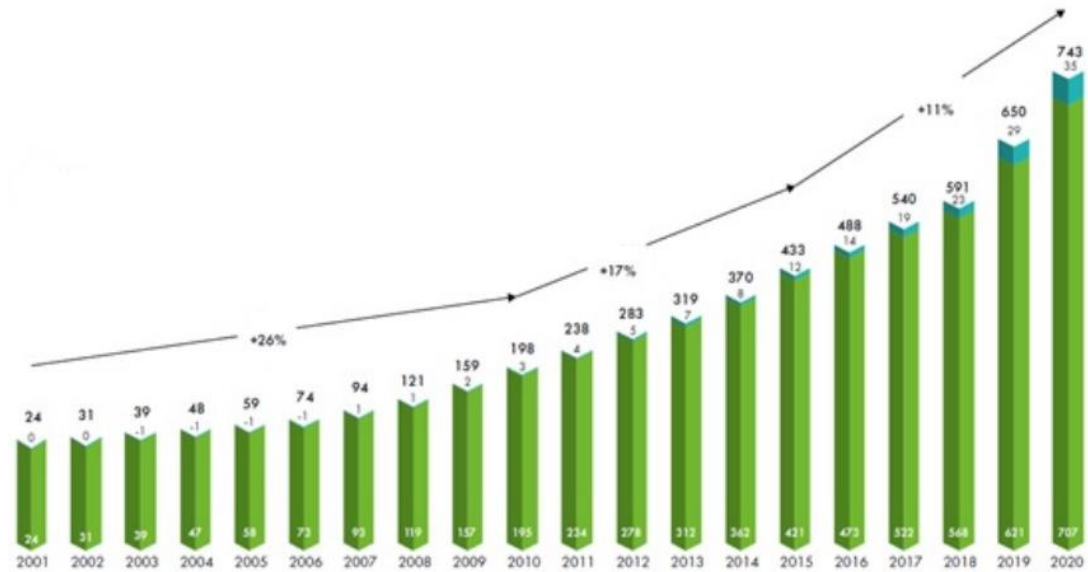
Rüzgâr türbinleri dikey ve yatay eksenli olmak üzere iki şekilde tasarlanabilmektedir. Yatay eksenli türbinler, dikey eksenli türbinlere oranla daha yüksek verim ile elektrik üretimi sağlamaktadır. Bu nedenle yatay eksenli türbinler elektrik üretimi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Rüzgâr enerjisi, kirlilik oluşturmayan ve çevreye çok az zarar veren yenilebilir bir enerji kaynağıdır. Yeryüzünde %95 gibi bir alanda rüzgâr enerjisi elde edilebilmekte ve bu alanlarda aynı zamanda ziraat, ormancılık gibi faaliyetler de sürdürülebilmektedir. 1970'li yıllarda artan petrol fiyatları ile rüzgâr türbinlerinin kullanımı ve teknolojilerinin geliştirilmesi hız kazanmıştır [10].

2.4.2. Dünyada rüzgâr enerjisi kullanımı

Çevresel avantajları ve enerji ekonomisi açısından pek çok ülke, resmi teşviklerle rüzgâr enerjisini desteklemektedirler. Bu teşviklerdeki amaç, resmi teşviklerle günümüzdeki fosil yakıtların sahip olduğu üstünlüğü ve çevre sorunlarının elektrik üretimi ile ilgili sebeplerini ortadan kaldırmaktır. Dünyada rüzgâr santrallerinin kurulu gücü hızlı bir artış göstermektedir. Dünya Rüzgâr Enerjisi Birliği raporuna göre (World Wind Energy Report 2009), 1997 yılında 7600 Megavat (MW) olan kurulu güç, sonraki yıllarda hızla artış göstererek 2009 yılı haziran ayı itibariyle dünyadaki toplam rüzgâr santralleri kurulu gücü 159 000 MW olmuştur [11].

2020 yılında dünyada ki toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesi 743 GW'a çıkarılmıştır. Şekil 2.8.'de yıllara göre rüzgar santralleri kurulu güçleri gösterilmiştir [11].

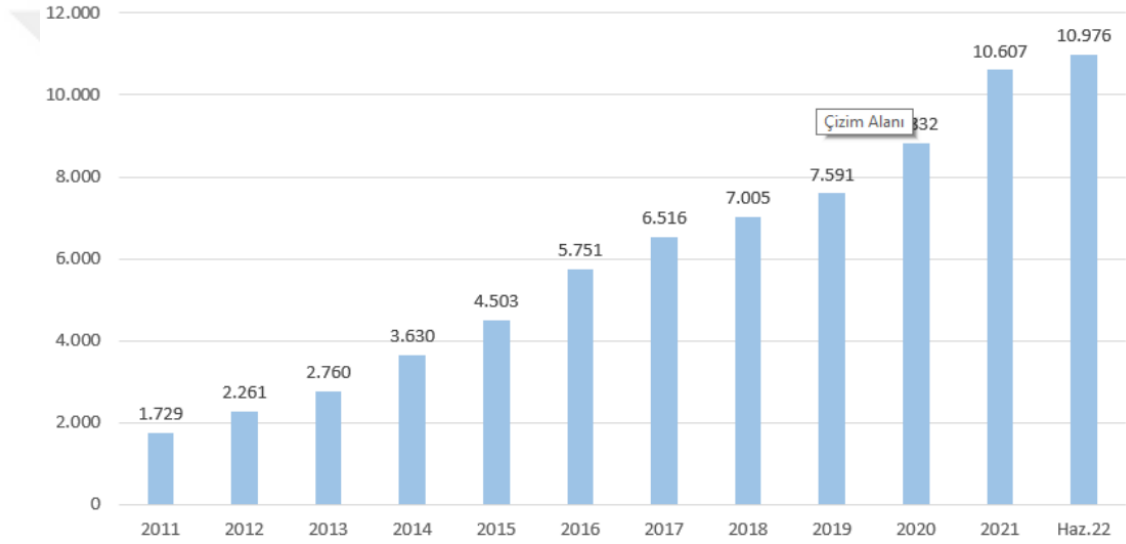


Şekil 2.8. Yıllara göre dünya rüzgâr enerjisi santralleri kurulu güçleri [11]

2.4.3. Türkiye’de rüzgâr enerjisi durumu

Türkiye’nin hızlı nüfus artışı ve sanayileşmesine paralel olarak enerjiye olan ihtiyacı artmaktadır. Ülkemizde en büyük pay dışa bağımlı olduğumuz fosil yakıtlara aittir.

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça iyi durumdadır. Türkiye'nin toplam rüzgâr enerjisi potansiyeli 40.000 ile 80.000 MW düzeyindedir. Devlet Meteoroloji İşleri istasyonlarının verilerine göre, Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr hızının on metre yükseklikte 2.54 m/s ve rüzgâr gücü yoğunluğunun 24 W/m² olduğu belirlenmiştir. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli bölgelere göre değerlendirildiğinde, Marmara ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinin rüzgâr gücü yoğunluğu bakımından diğer bölgelere göre daha zengin olduğu görülmektedir. Şekil 2.9. 'da yıllara göre türkiyedeki rüzgar enerjisi santralleri kurulu güçleri gösterilmiştir [12].



Şekil 2.9. Yıllara göre türkiyedeki rüzgâr enerjisi santralleri kurulu güçleri [12]

2.4.4. Rüzgar türbini ve tarihçesi

Elektrik üretiminde kullanılan ilk rüzgâr türbini 1890 yılında Danimarka'da yapıldı. O zamanlar endüstride kullanılan elektriğin %25'i rüzgâr türbinlerinden elde edilmekteydi. Dünyada rüzgâr gücünden geniş bir şekilde yararlanma, 1947 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde başlayarak 1960'lara doğru, ABD ve Avrupa'da 100 kW güce kadar olan rüzgâr türbinlerinin yaygınlaştığı görülmektedir. Daha sonraki yıllarda Rüzgâr Elektrik Santrali (RES) olarak adlandırılan büyük güçlü sistemler, bütün dünyada yaygınlaşarak devam etmiştir.

2021 yılı sonu itibariyle ülkeler bazında kurulu rüzgâr gücünde; Çin 261.2 GW, Amerika Birleşik Devletleri 127.3 GW ve Almanya 39.6 GW değerleriyle ilk üç sırada gelmektedir. Türkiye’de genel kullanıma yönelik ilk rüzgar enerjisi kaynaklı elektrik üretimi 1986 yılında Çeşme’de 55 kW nominal güçlü rüzgar türbini ile elde edilmiş ve 1998 yılında bu güç 8.7 MW’a ve son olarak 2022 yılında bu güç 11.101 MW’ a çıkarılmıştır . Rüzgâr enerjisi ile ilgili yapılan çalışmaların sonucundan, Çanakkale Boğazı civarı, Bozcaada, Gökçeada, Sinop, İnebolu, Bozkurt, Samsun, Bandırma, Balıkesir, Çorlu, Edremit, Ayvalık, Dikili, Çeşme, Bodrum, Bergama, Antakya, Anamur, Silifke, Mardin, Malatya, Erzurum, Seydişehir, Karaman, Manisa ve Afyon yörelerinin rüzgâr enerjisinden yararlanılabilir alanlar olduğu tespit edilmiştir [12].



Şekil 2.10. Modern yatay eksenli rüzgar türbinleri

2.4.5. Rüzgâr türbinin tasarım gelişimi

Rüzgâr türbinleri yapımı oldukça karmaşık, maliyet gerektiğinden dolayı ve II. Dünya Savaşının getirdiği olumsuzluklar ile 19. Yüzyılın başlarına kadar gereken ivmeyi yaşayamamıştır. Fakat 1920 yılında Alman bir fizikçi olan Albert Betz türbin araştırmalarına başlamış ve ilk olarak türbin aerodinamiğiyle ilgili hesaplamalar yapmıştır. Daha sonra kendi ismini verdiği denklemlerle rüzgârdan elde edilecek maksimum kinetik enerjinin %59.3 olduğunu formüle etmiştir. Günümüzde halen kanat teorilerinde bu yasa uygulanmaktadır [13].

Daha sonra 1925 yılında Sirgud Savonius kendi adını verdiği Savonius Rotor tipi ilk dikey eksenli rüzgâr türbinini tasarlamıştır. Bu tip türbinin akış dinamiği biraz komplike olduğu için bugüne kadar matematiksel bir formül elde edilememiştir.

Fransız kökenli Georges Darrieus kendi ismini verdiği dikey eksenli rüzgâr türbini olan Darrieus-Rotor'un patentini ilk olarak Amerika'da almıştır. Daha sonra Darrieus bu tip bir türbin tasarlamak yerine verimliliği daha yüksek olan dikey eksenli rüzgâr türbini tasarlamıştır. Daha sonra başka Alman bilim adamları bu alanda çalışmalara devam etmiştir. Bunlardan bir kaçısı olarak; Wilhelm Teubert, Ferdinan Porsche, Hermann Honnef, Franz Kleinhanz (MAN) ve Ventimotor Firması çalışmalar yürütmüştür [14].

II. Dünya Savaşı esnasında Danimarkalı mühendislik firması F. L. Smidth birkaç adet 2 ve 3 kanatlı rüzgâr türbini üretmiştir. Bu türbinlerin tamamı DC elektrik üretmekte ve bazıları, Danimarka'daki yerleşim bulunan bazı adalarda dizel-rüzgâr türbini kombinasyonu ile enerji ihtiyacının karşılanması için kullanılıyordu. Danimarka'da o tarihe kadar üretilen tüm türbinlerde DC jeneratör kullanılmaktaydı. 1951'de F.L. Smidth ilk kez 35 kW gücünde bir AC asenkron jeneratör kullanımını gerçekleştirdi.

II. Dünya Savaşı sonrasında Avrupa'da gelişmeler devam etti. Almanya'da Profesör Ulrich Hutter, düşük ağırlık ve yüksek verim sağlamak üzere aerodinamik profiller kullanan fiberglas ve plastikten imal edilmiş pitch kontrollü modern kanatlara sahip, orta büyüklükte bir dizi yatay milli rüzgâr türbini geliştirdi. Tasarımda “aerodinamik yüklere dayanabilecek cihaz geliştirmek” şeklindeki Danimarka yaklaşımının yerine, “aerodinamik yükleri azaltmak veya bunlardan sakınmak” prensibi araştırılmıştır. Bu araştırmalarda geliştirilen konseptin büyük bir kısmı bugün hala kullanılmaktadır. Yük sınırlama için geliştirilen ilginç bir sistem de, aşırı rüzgâr durumunda geriye doğru yatabilen rotor konsepti geliştirilmiştir [15].

II. Dünya Savaşı sonrasında Poul La Cour'un ilk öğrencilerinden Johannes Juul, sonraki dönemlerde büyük ölçüde örnek oluşturacak kavramlarla, 200 kW'lık bir türbin tasarladı ve 1956-57 yıllarında Danimarka'nın Gedser kentine kurdu. 3 kanatlı,

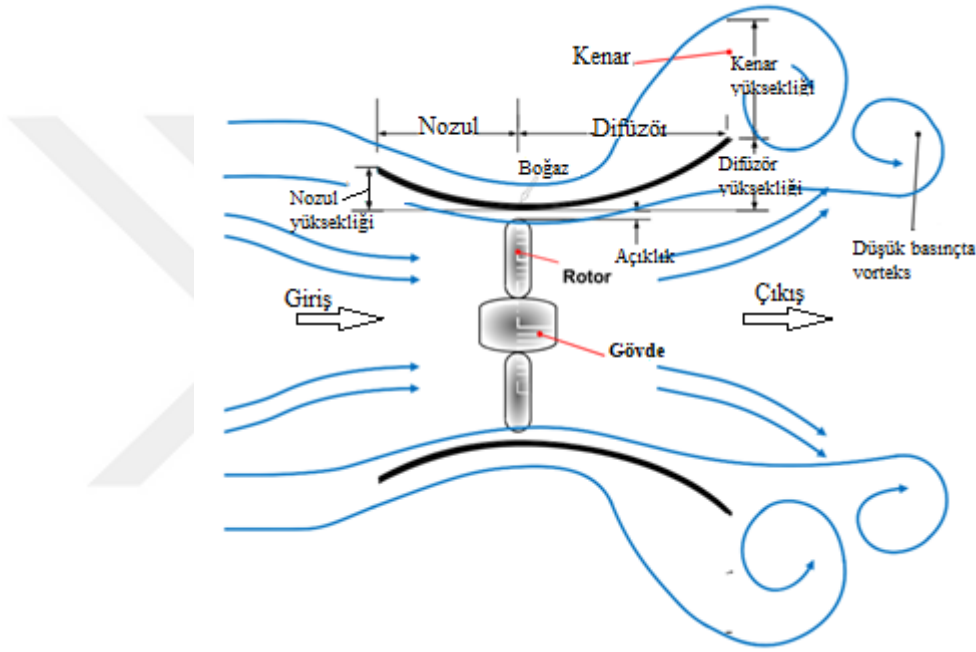
türbin kısmı elektromekanik olarak rüzgâra yönlendirilen, “aerodinamik stall” olarak bilinen güç kontrolü ile çalışan ve asenkron endüksiyon jeneratörü kullanılan bu tasarım, sonraki yıllarda “Danimarka konsepti” olarak anıldı ve 1980’lerde rüzgâr türbini endüstrisinde Danimarka’nın öncü rol almasında en önemli çekirdeği oluşturdu. Gedser türbini, modern stall kontrollü türbinlerde hiçbir değişiklik yapılmadan aynen kullanılan, aşırı hız durumunda santrifüj kuvvetle açılarak türbini durduran “aerodinamik kanat ucu fren sistemine”de sahipti [15].

Enerji taleplerinin artmasıyla birlikte, rüzgâr türbinlerinin uygulama alanları gün geçtikçe farklılık göstermektedir ve böylece farklı alanlarda araştırmalar görülmektedir. Patel [16] , difüzörlü rüzgâr türbinleri üzerine çalışmış ve ANSYS-hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayesinde çeşitli analizler yapmıştır. Yapmış olduğu analizler sonucunda difüzör açısının 25^0 olması halinde verimin maksimum olduğunu açıklamıştır. Hjort and Larsen [17], yaptıkları çalışmada bir difüzör katsayısı önermişler ve aynı zamanda farklı kanat tasarımı aşamasında bu katsayı etkili bir method olarak kanat profillerine farklı bir bakış açısı getirmişlerdir.

J.Vaz ve D.Wood, kanat element teorisini kullanarak difüzörlü yatay eksenli bir rüzgâr türbininde verimini arttırmak için kanatlardaki uç kayıpları optimize ederek ortalama difüzör içindeki hava akış miktarının artmasını sağlayarak verimde önemli bir kazanç elde etmişlerdir [18].

Literatürdeki çalışmalar, genellikle difüzörlü yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin genel kullanımı ve imal metodları ile alakalı araştırmalar üzerinedir. Fakat bunun yanı sıra çalışmalar, rotor geometrisinin ya da difüzör açısının geliştirilmesi, rotorların optimizasyonu, kanat profillerinin NACA standartlarına uygun optimizasyonu, tek boyutlu termodinamik modellemenin oluşturulması, difüzörlü türbinlerin ampirik ve HAD tabanlı optimizasyonu üzerine yoğunlaşmıştır. S.N. Akour ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise düşük hızlarda mikro rüzgar türbinlerin kanat profillerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir [19]. I. Djodikusumo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada türbin kanat geometrisinin modellemesinde turbogrid kullanmıştır. Böylece yapılandırılmış çözüm ağı oluşturulabilmiştir [20]. Literatürde difüzör

modellemesi ve etkisinin incelenmesi ilk kez B. Kosasih tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada difüzörün güç üzerindeki etkisi ortaya konmuştur [21]. R. Bontempo yaptığı çalışmada farklı parametrelerin difüzör tasarımı üzerindeki etkisini incelemiştir ve aynı zamanda kanat ve difüzör optimizasyonu ile ilgili farklı çalışmalar yapmıştır [22]. F. Silva ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada difüzör ve kanat geometrisini Kanat Element Teorisine göre modellemişlerdir [23]. Bu model Şekil 2.11.'de olduğu gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Difüzör ve lüle tasarımı (Temsili)

S.Ramesh Kumar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada difüzörün spesifik güç maliyetini düşürdüğü saptanmıştır ve difüzör kullanarak güç katsayısını %80 artırmayı başarmışlardır [24]. J. A. Al-Nouman ve S. J. Ranade 'nın yaptıkları çalışmada ise difüzör kullanarak güç katsayısının Beltz limiti aştığını vurgulamıştır [25]. H. A. Heikal ise difüzör ve türbin tasarımlarını teorik olarak incelemiş, CFD sonuçlarıyla karşılaştırmıştır [26].

Özet olarak güncel akademik literatürdeki araştırmalar genellikle türbin performansının ve veriminin artırılması ve türbin performansının hesaplanması üzerinedir. Literatürdeki bu çalışmalardan farklı olarak iki aşamalı optimizasyon

gerçekleştirilmiştir. İlk optimizasyonda Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon tekniği ikinci optimizasyonda ise Tepki Yüzeyi Optimizasyon (Response Surface Optimization) tekniği kullanılmıştır.

2.4.6. Türbin kanat profilleri ve kanat profili oluşturma yöntemleri

Rüzgar türbinlerinin performansının ve veriminin belirlenmesinde en önemli parametreler, kanat profilini oluşturan parametrelerin yanı sıra rotor parametreleridir. Yapılan bu çalışmada ek olarak difüzör kullanıldığı için difüzör parametreleri de çok önemli etkindir. Endüstriyel rüzgar türbinleri standart NACA profillerine bağlı oluşturulan kesit profillerinin “Kanat Element Teorisi (Blade Element Theory)” ile sabit hücum açısının döndürülmesi ile oluşturulmaktadır. Fakat bu çalışmada; türbinin kanadı, ilk olarak kanat kesiti, daha sonra kanat uç açısı ve son olarak NACA profillerine bağlı kalınlıksız özgün kanat profili oluşturulmaktadır.

Kanat kesiti, ANSYS tabanlı Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon aracı ile optimize edildikten sonra 3 boyutlu parametrelerin optimize edileceği ikinci aşamaya geçilmektedir. Optimize edilen kesit profili kullanılarak difüzörün ve türbin kanatının eş zamanlı optimizasyonu ANSYS Hedef Odaklı Optimizasyon (Goal Driven Optimizasyon) tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Böylece türbine etki eden tüm parametrelerin eşlenik olarak çözülmesi sağlanmaktadır. Burada kanadın hücum açısı, firar açısı, difüzörün boyu, difüzörün eğim açısı gibi parametreler optimize edilmektedir.

İlk olarak 1888’de ilk rüzgâr türbinin icat eden Charles F.Brush kendine özgü tasarımıyla ilk kez rotor kanadı icat etmiş oldu. Bu kanat yaklaşık 17m çapında, 144 rotor kanadından oluşmakta ve yaklaşık olarak 12 kW’lık güç üretmiştir. Daha sonra 1899 yılında Danimarkalı bir mucit olan Poul la Cour kavisli kanatlar dizayn ederek Brush’un tasarımı gölgede bırakmıştır. 1922 yılında Betz tarafından ortaya konulan Betz yasasıyla birlikte belirli parametreler göz önüne alınarak kanat tasarımında ve hesaplamalarında optimizasyonlar ilerlemiştir.

Geçmişte çoğunlukla kanat sayısı rüzgâr türbininin performansı artacağı düşünülmüş fakat ilerleyen teknoloji, yeni buluşlar ve yardımcı yazılım programları ile çoğunlukla günümüze yaklaşırken kanat sayısı genellikle azaltılmıştır [27]. Literatürdeki kanat araştırmaları incelendiğinde, Mauciere, 2009, B-Spline algoritma yöntemini kullanarak yeni bir kanat profili tasarlamış ve optimizasyon yapmıştır [28].

Andrea Dal Monte ve arkadaşları bir çok optimizasyon yöntemini bir araya getirerek maksimum verimi almaya çalışmışlardır. Kanat elemanı momentum teorisiyle elde ettikleri aerodinamik parametreleri ve kanata gelen yükleri Ansys yazılım programına aktarmışlardır. Daha sonra ANSYS'den elde edilen veriler MATLAB yazılımına aktarılmış. Bu döngünün yapılmasının ana nedenleri kanat hücum açısını değiştirmek, en uygun kanat genişliğini belirlemek ve bunlara bağlı olarak en uygun malzeme seçimi yaparak hafif bir kanat üretmektir [29]. C.C. Liao ve arkadaşları, Zhao, Xu kanadın iç kısmında bulunan scarp kısmındaki bölgeye FAST ve Parçacık sürü optimizasyon teknikleri uygulamış ve kanatın ağırlığı hafifleyerek MW'lık enerji üreten yüksek enerji kapasiteli rüzgar türbini tiplerinde oldukça önemli bir maliyet oluşturan bu kısımda malzeme israfından kurtarmışlar ve kanat ağırlığından kaynaklı rotor miline gelen tork kuvveti azaltılmış ve verimde %4.44 artış gözlenmiştir [30].

Duran S. yaptığı çalışmada kanat element teorisi yönteminden faydalanmıştır. Blade editor isimli yazılım programıyla kanat geometrisinde optimizasyon yapmıştır. Elde ettiği yeni kanat geometrisine uygun optimum rotor tasarlamıştır ve kanada gelen kuvvetlerin azaltılmasını sağlamıştır [31]. Usta K. düşük maliyetli küçük güçlü rüzgar türbini üretmek için bir bilgisayar programı yazmıştır ve bu programda nihai bir kanat modeli oluşturmuştur. Oluşturmuş olduğu kanadın kök kısmındaki mukavemeti incelemiştir ve son olarak CATIA modelleme programı ile modelleme yapmıştır. Aynı zamanda tasarlamış olduğu kanadın üretim aşamalarının maliyetini de çıkarmıştır [32].

Rüzgâr türbinlerinin, kullanım alanları genişledikçe ve çalışma şartları değiştikçe farklı tipte, değişen kanat profili tasarımları Şekil 2.12.'de farklı kanat profil tipleri gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Farklı tiplerde kanat profilleri [32]

2.4.7. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile hesaplama ve optimizasyon

Günümüzde gelişen teknolojiyle yazılım programlarında ilerleme kaydedilmiş, ANSYS'te bu programlardan biri olarak optimizasyon, doğruluğunu tasdik etmek ve analiz gibi alanlarda tasarımlarda büyük kolaylık sağlamıştır. ANSYS aynı zamanda rüzgâr türbinlerinin aerodinamiğinin anlaşılması ve modellenmesinde her yıl daha da fazla kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Ayrıca kanatların ANSYS kullanılarak modifikasyonu çok hızlı gelişmekte ve bu optimize edilen kanatların daha iyi bir kanat profili oluşturması, rüzgâra karşı hücum açısı gibi parametrelerde yapılan hassas yaklaşımlardan dolayı yıllık enerji üretimi de önemli artışlara katkı sağlamaktadır.

B.Raeisi ve H. Alighanbari yaptıkları çalışmada, küçük boyutlu bir rüzgâr türbininde stall etkisinden dolayı oluşan titreşimi ANSYS'te incelemiş ve kanat ucundaki vorteks kayıplarında iyileştirme, homojen olmayan akış bölgesinde kanata gelen sürüklenme kuvvetlerini azaltmaya çalışmışlardır [33]. B. Al-Quraishi ve arkadaşları, ANSYS programında flanşlı bir difüzör ilaveli rüzgâr türbinini incelemiş ve difüzöre sonradan eklenen flanşın, farklı flanş açılarına göre verimdeki etkisi gözlenmiştir. Uluslararası Çevre ve Enerji dergisinde yayınlanmış, B. Monir Chandrala ve arkadaşları difüzörlü bir rüzgar türbininde NACA 0018 profilini kullanarak farklı rüzgar hızları altında optimum kanat açısını araştırmışlar ve ANSYS hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla optimum kanat açısını elde etmişlerdir [34]. Bu çalışmadan da

anlaşılabileceği gibi genelde HAD yöntemleriyle yapılan türbin çalışmalarında genellikle optimize edilecek kısım rotor kanadı olarak seçilmiştir. Bu alışılmış araştırmalara karşı L.Parabhu ve arkadaşları 7 farklı difüzör tipini HAD tabanlı ANSYS yazılımında analiz etmiş ve kanat optimize etmek yerine optimum parametrelerde en uygun difüzör tipini, analiz yardımıyla elde etmişlerdir.

T.Kannan ve çalışma arkadaşları, dört farklı tipte Solidworks'te tasarladıkları difüzörleri, HAD tabanlı ANSYS programında difüzörlerin doğruluğunu tasdik etmişler ve normalden farklı olarak flanş ilaveli iç içe difüzör sisteminin en iyi performans gösterdiğini kanıtlamışlardır [35]. Sandip A. Kale, Farklı açılarda tasarlamış olduğu difüzör tiplerini incelemiş ve aynı zamanda türbin rotor kısmında optimizasyon yaparak optimize edilmiş rotora uygun en iyi verimin alınacağı difüzör açısı ANSYS ile edilmiş fakat, analizler gerçeğe dönüştürülmediği için teoride elde edilen verilerin uygulamadan uzak olduğu gözlenmiştir [36]. Elfarra, Monier Ali, Numeca Fine Turbo yazılımını kullanarak kanat tasarımında, kanadın hücum açısında ve burkulma açısında iyileştirmeler yapmıştır ve güç çıkışında %38'lik artış elde etmiştir [37]. Us S. çalışmasında 5 kW'lık güç üreten bir yatay eksenli rüzgar türbininin rotor kısmını tasarlamıştır. Performans ve Geometri Hesaplarında MATLAB programında faydalanmıştır. Ayrıca kanadın ve türbinin genel CAD modelini CATIA ile tasarlamıştır. Son olarak ANSYS programında kanada gelen gerilmeleri ve kuvvetleri analiz etmiştir. Burada kanat farklı malzeme kompozitleriyle tasarlanmış ve kanat hafifletilmiştir [38].

Literatürdeki yaklaşımlara bakıldığında, ya yatay eksenli rüzgar türbinine difüzör eklenerek performans arttırma yoluna gidilmiş ya da rotor kanat açısı değiştirilerek rüzgar türbini için optimum hücum ve firar açıları elde edilmeye çalışılmaktadır.

Fakat bu çalışmada, alışlagelmişin aksine HAD tabanlı ANSYS kullanılarak yatay eksenli rüzgâr türbinine özel tasarımı bir difüzör eklenmiş ve dünya genelinde kullanılan NACA kanat profillerinin aksine kendine özgün kanat profili dizayn edilmiştir. Bu sayede bu zamana kadar yapılan çalışmalarda elde edilemeyen ve ön görülemeyen performansı etkileyen parametreler bu çalışmada göz önüne alınmıştır.

Son olarak analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi çok yüksek bir verim artışı görülmüştür.



BÖLÜM 3. RÜZGÂR TÜRBİNİNİNDE KANAT AERODİNAMİĞİ VE YAPISAL ANALİZİ

Bu kısımda kanat tasarımında çoğunlukla hesaba katılan ve aynı zamanda akışkanlar dinamiğinde de sıklıkla uygulanan teorilerden söz edilmiş ve bunun yanı sıra optimum kanat tasarımı için kullanılan yardımcı programlardan bahsedilmiştir.

3.1. Kanat Profili Üretimi ve Teorisi

Rüzgâr türbini kanatları için kanat profili tasarımı, rüzgâr türbini gelişiminin merkezinde yer alan bir konudur. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda uygun özelliklere sahip kanatların tasarımı, üretimi ve seçimi enerji üretim maliyetini önemli oranda düşürdüğü gözlenmiştir. Modern ve piyasaya uygun kanat tasarımlarında kanat profillerinin dizaynı, kanadın yapısal sertliği ve farklı tiplerdeki malzeme kullanımlarından dolayı kanat aerodinamiğindeki performans değişimi düşünülerek yapılmalıdır. Örneğin, ince kanat profilleri piyasada yüksek kaldırma-sürükleme oranı ve sertlik hassasiyeti özelliğinden dolayı tercih edilir. Fakat büyük çaplı rotorlar için bu yaklaşım yapılamaz. Çünkü kanat boyu ve genişliği arttıkça, buna bağlı olarak kanatta istenen mukavemet değişmektedir.

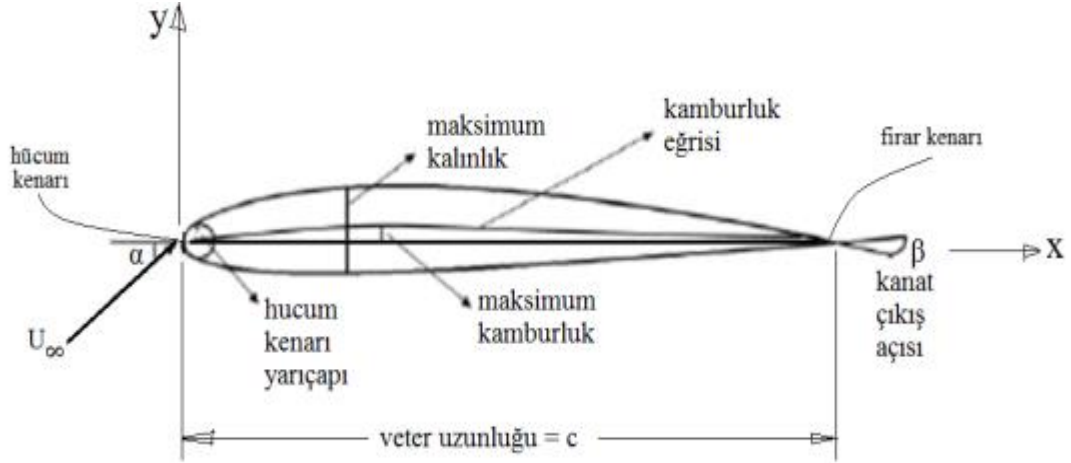
Günümüzde kullanılan kanat profillerinin temeli, 2.Dünya savaşında kullanılan uçakların kanatlarında tasarlanan ve NACA ismiyle günümüzde piyasadaki yerini koruyan kanat profillerine dayanmaktadır. Fakat uçak kanatlarının aerodinamik performansı ve geometrik özellikleri, rüzgâr türbinlerine yeteri kadar uygun değildir. NACA kanat profilleri yüksek Reynold sayılarına uygun geliştirilmiş ve düşük Reynold sayılarında laminer akış ayrım bölgesinde meydana gelen kabarcıkların kanata zarar verdiği deneysel olarak birçok kez ispatlanmıştır.

Bu kabarcıklar kanat yüzey performansını ve pürüzlülüğünü çeşitli şekillerde etkilemektedir. Bu yüzden kanat profilleri ailesi, rüzgâr türbinin çeşidine göre rotor performansını arttırmak için tasarlanır.

3.2. Kanat Elemanı Momentum Teorisi

Kanat elemanı momentum teoremi, kanat element teorisi ve momentum teorisinin bir araya gelerek kanat üzerinde anlık meydana gelen değişimleri tanımlayan teoridir. Bu teoride ilk olarak bir kanat sonlu sayıda parçaya ayrılır. Daha sonra ikinci aşama olarak dairesel bir şekil izleyen rotor kısmının sınır şartları belirlenir. Enine kanat kesiti genel olarak, kanadın radyal pozisyonuna, profiline, bükümüne, kirişlerine ve uzunluğuna göre tanımlanır. Kanatın her bölüm için Momentum teorisi ile bağlı rüzgâr hızı hesaplanabilir. Bu hesaplama ile kanadın hücum açısı belirlenebildiği gibi aynı zamanda ilgili kanat profiline uygun sürüklenme ve kaldırma katsayılarının elde edilmesinde olanak sağlar. Bu katsayılar ve bunun yanısıra bir kanatın üzerine gelen normal ve teğetsel kuvvet bileşenleri ile küçük bir bölgedeki gerekli olan itme ve tork hesaplanır. Son olarak elde edilen bu tork tüm rotora etki edecek şekilde hesaplanır. Aynı zamanda farklı rüzgâr hızı ve açısal hız oranları için, rotorun karakteristik eğrileri ve miktarları hesaplanabilir.

NACA uçak kanatlarını incelemekte ve yeni model kanat profillerini ilk ortaya atan firma olmakla birlikte aynı zamanda kanat geliştirme çalışmalarını sürdürmektedir. Her türlü kanat tipini araştırıp analizlerini sürdüren ve çoğunlukla uçak kanatlarına sahip olan araçların havadaki davranışını inceleyen bir havacılık firmasıdır. Uçak kanatlarında edindikleri bilgiler ışığında birçok rüzgâr tüneli inşaa etmişlerdir ve burada her türlü kanat davranış analizlerinde bulunmuşlardır. NACA'nın tasarlamış olduğu örnek bir kanat profil yapısı Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kanat profili karakteristikleri

Şekil 3.1.'de de görüldüğü üzere kanat profiline ait olan bir çok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin yani bu ölçülerin değiştirilmesi yada optimize edilmesiyle bir çok kanat profil çeşidi piyasaya kullanılmak üzere çıkarılmıştır. Her kanat profili kendine özgü farklılığı olduğu için her biri farklı performans ortaya koymaktadır. Uçuşların bir kısmında kaldırma kuvveti çok önemli bir faktör olabilir iken bazı uçuşlarda ise sürükleme kuvveti azaltılmak istenir. Bu iki kritik kuvvet göz önüne alınarak uygulamada kullanılması için birçok çeşitli kanatlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 3.1.'de gösterilen uzunluk veter diye adlandırılırken aynı zamanda kanat boyu uzunluğu olarakta bilinmektedir ve bu uzunluk hücüm kenarı ile fırar kenarını birleştirmektedir. Kamburluk eğrisi ise kanat profilinin alt ve üst yüzey sınırlarına eşit uzaklıkta çizilen eğri olarak tanımlanmaktadır. En önemli açılardan Hücüm açısı α ve kanat çıkış β açısı olarak gösterilmiştir. Son olarak kamburluk eğrisi ile veter uzunluğu arasındaki kalınlık maksimum kamburluk ve kanadın kalınlığı maksimum kalınlık olarak kabul edilmektedir. NACA kanat profillerini dört dijit serilerinin gösterimi; Örnek: NACA0012 kanadının, sağında ilk iki basamak, kanatta maksimum kalınlığını göstermektedir. Bunun yanı sıra maksimum kanat kalınlığı veter uzunluğunun yüzde katı olarak gösterilmiştir. Bu örnek kanat profilinde kanatta veter uzunluğu 0.12 katıdır. Kanadın maksimum kamburluğunu soldan ilk basamak belirtilmekte olup, kanadın maksimum kamburluğunun olduğu yeri ise, soldan ikinci basamak göstermektedir ve bu gösterim veter uzunluğunun katı olarak hücüm kenarından uzaklığını göstermektedir.

3.2.2. Kaldırma kuvveti

Kanatlarda hücum açısının arttırılmasıyla kanat altından geçen havanın aşağı doğru akışıyla, yukarı yönde kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Hücum açısı arttırılırsa kaldırma kuvvetide doğru orantılı olarak artmaktadır. Kaldırma kuvveti aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A \quad (3.3)$$

Burada C_L sürüklenme kuvvetinin katsayısı ve F_L ise kanada etki eden düşey yöndeki kuvvetleri temsil etmektedir. Düşey yönlü aerodinamik kuvvetler sayesinde uçaklar yükselişe geçer ve yer çekimine karşı direnç gösterir. Kanat yüzeyine etki eden tüm sürtünme ve basınç kuvvetlerinin x yatay yöndeki bileşke kuvvetinin boyutsuzlaştırılması sonucu Sürüklenme katsayısı hesaplanır. Aynı zamanda kanat yüzeyine etkisi olan tüm sürtünme ve basınç kuvvetlerinin y düşey yöndeki bileşke kuvvetinin boyutsuzlaştırılması sonucu kaldırma katsayısı hesaplanmaktadır.

$$C_L = C_N \cos \alpha - C_A \sin \alpha \quad (3.4)$$

$$C_D = C_N \sin \alpha + C_A \cos \alpha \quad (3.5)$$

Bu denklemlerdeki (3.4. ve 3.5.) C_N kanat profili üzerindeki normal kuvvetin katsayısını, α hücum açısını, C_A eksenel yöndeki kuvvetin katsayısı ve C_P ise kanat yüzeyinde oluşan basınç katsayısını temsil etmektedir. Kanat yüzeyi boyunca ortaya çıkan basınç ve sürtünme kuvveti katsayılarının ilave edilmesiyle aşağıdaki denklemlerde gösterildiği üzere C_N ve C_A katsayıları hesaplanır.

$$C_N = \frac{1}{c} \left[\int_0^c (C_{P,alt} - C_{P,üst}) dx + \int_0^c (C_{f,üst} \frac{dy_{üst}}{dx} - C_{f,alt} \frac{dy_{alt}}{dx}) dx \right] \quad (3.6)$$

$$C_A = \frac{1}{c} \left[\int_0^c (C_{P,üst} \frac{dy_{üst}}{dx} - C_{f,alt} \frac{dy_{alt}}{dx}) dx + \int_0^c (C_{f,üst} - C_{f,alt}) dx \right] \quad (3.7)$$

Denklemler içerisindeki C_f kanat yüzeyinde oluşan sürtünme kuvvetinin katsayısını temsil etmektedir.

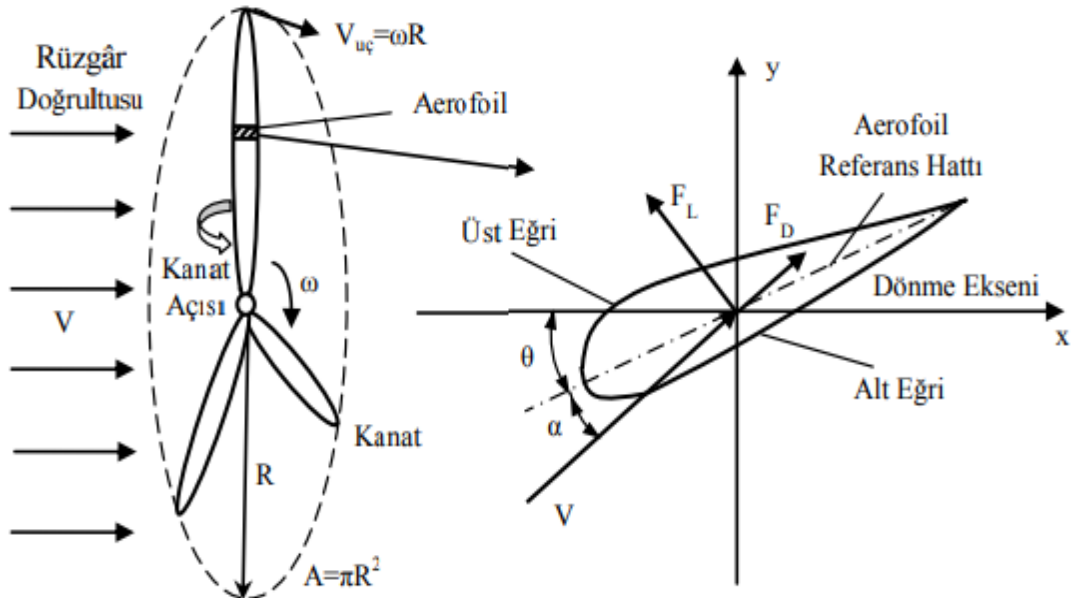
3.2.3. Güç katsayısı tanımı ve Betz limiti

Güç katsayısı parametresi kanatlar vasıtasıyla rüzgârdan elde edilen gücün (N_R), rüzgâr gücüne (N) oranısıyla hesaplanmaktadır. Güç katsayısı genelde C_p olarak adlandırılmakta ve aşağıdaki denklemdeki gibi (Denklem 3.8) gösterilmektedir.

$$C_p = \frac{N_R}{N} = \frac{N_R}{(0.5\rho\pi R^2 V^3)} \quad (3.8)$$

$$V_{uç} = \omega \cdot R \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da $V_{uç}$ kanat ucundaki hızı, R kanat yarıçapını, V rüzgâr hızını, ω ise kanatların açısal hızlarını ve ρ havanın yoğunluğunu temsil etmektedir. Şekil 3.3.'de görüldüğü üzere kanat üzerine etki eden önemli parametreler ve kanadın aerofil yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yatay eksenli rüzgâr türbini ve kanat aerofil yapısı

Rüzgâr türbinlerinde verimin maksimum ulaşabileceği değer Betz limiti olarak adlandırılmıştır. Bu limit Alman bir bilim adamı tarafından 59.3 olarak hesaplanmıştır. Bu maksimum değeri etkileyen başlıca faktörler şunlardır: Rotor arka kısmındaki girdaplar, sonlu sayıdaki kanat yapısı, kanat uç kayıpları ve sıfırlanamayan aerodinamik sürüklenme. Maksimum güç katsayısı (C_{pmaks}), lineer momentum teorisinden de bilindiği üzere Betz limitini ($C_{pmaks}=0.593$) aşamamaktadır. Söz edilen bazı faktörlerden kaynaklı Betz limiti verimi, rüzgar türbini uygulamalarında % 35 - 42 aralığında verimle çalışır.



BÖLÜM 4. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Bilindiği üzere; konvansiyonel rüzgâr türbinleri, belirlenen standart NACA profillerine bağlı oluşturulan kesit profillerinin “Kanat Element Teorisi (Blade Element Theory)” ile sabit hücum açısında döndürülmesi ile oluşturulmaktadır. Bu proje ile birlikte ise standart NACA profillerinin aksine kanat kesit geometrilerinin optimizasyonu her bir tabakada sabit hücum açısı için ANSYS tabanlı optimizasyon aracı olan Ek Çözücü (Adjoint Solver) ile gerçekleştirilmektedir. Böylece giriş parametresine bağlı kalmaksızın herhangi bir matematiksel NACA profiline uymayan özgün profil ortaya konacaktır. Bu yönüyle bu profil ulusal/uluslararası bazda özgün ve ilk olma niteliği taşımaktadır. Oluşturulan özgün kanat profili için ise patent başvurusu yapılması öngörülmüştür.

Kanat kesiti ANSYS tabanlı Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon aracı ile optimize edildikten sonra optimizasyonda 3 boyutlu parametrelerin optimize edileceği ikinci aşamaya geçilecektir. Optimize edilen kesit profili kullanılarak difüzörün ve türbin kanatının eş zamanlı optimizasyonu ANSYS Hedef Odaklı Optimizasyon (Goal Driven Optimization) tekniği kullanılarak yapılmıştır. Böylece türbine etki eden tüm parametrelerin eşlenik olarak çözülmesi sağlanmıştır. Burada kanatın hücum açısı, fırar açısı, difüzörün boyu, difüzörün eğim açısı, hücum ve fırar açısı gibi parametreler optimize edilmiştir.

Bu çok boyutlu optimizasyon çalışmaları sayesinde konvansiyonel rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında güç katsayısının difüzör güç katsayısındaki artışa %6-8 artış olması hedeflenmiştir ve ölçüm sonuçlarına bakıldığında bu hedeflere ulaşılmıştır.

4.1. Ek Çözücü Optimizasyon (Adjoint Solver Optimization) Tekniği

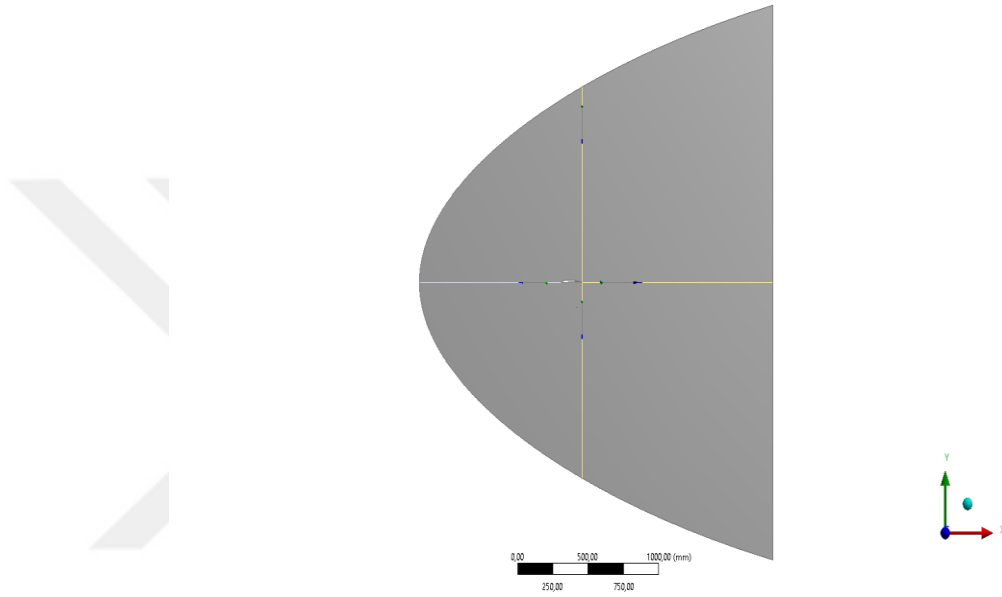
Optimizasyon çalışmaları için NACA SG6043 numaralı kanat profili referans alınmıştır. Literatürde ve araştırma sitelerinde bu kanat profilinin nokta şeklinde dosyaları bulunmaktadır. Noktalar halindeki profil yapısı ANSYS tabanlı Ek çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon tekniğiyle nokta bulutları haline getirilmiştir. Daha sonra bu nokta bulutları birleştirilerek istenilen profil ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra oluşturulan kanat profilinin Ek Çözücü (Adjoint Solver) içerisinde optimize edilmesi planlanan kaldırma/sürüklenme oranına bakılmıştır. Bu oran 19.2 olarak elde edilmiştir. Bu oranı optimize edebilmek için aşağıda adı geçen Ek Çözücü (Adjoint Solver) içerisindeki optimize aracı kullanılmıştır ve yapılan bu optimize işlemleri sonraki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

Ek çözücü (Adjoint Solver) aracı ANSYS içerisinde ek olarak kullanılan bir optimizasyon aracıdır. Bu teknik bir çok alanda kolaylık sağlamaktadır. Örneğin, yapılan çalışmada çözüm sırasında parametre değiştirme ihtiyacı duyulmamıştır ve çözüm otomatik olarak sonlandırılmıştır. Bu teknik aynı zamanda ağ çözümünün daha iyi kontrolünü sağlarken buna uygun tasarım kısıtlamalarında meydana gelecek kısıtlamaları ortadan kaldırır. Böylelikle direkt olarak istenilen tasarımın performansının nasıl artacağını belirlemektedir. Son olarak bu teknik sayesinde uygun bir ağ yapısı (mesh) ön hazırlığı yani bir biçimlendirici görevi yaparak hesaplamalarda ağ yapısının (mesh) kalitesini artırır ve zaman kayıplarını azaltır.

Yukarıda Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon aracının kullanım amacı anlatılmıştır. Bu teknikte geometri modelinin oluşturulması, çözüm ağının oluşturulması, sınır şartlarının belirlenmesi ve sonuçların incelenmesi uygulamalı olarak aşağıdaki bölümde anlatılmıştır.

4.1.1. Geometri modelinin oluşturulması

Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon tekniği için SG6043 numaralı NACA profili referans alınmıştır. Bu profil 6° hücum açısı için modellenmiştir. 6 m/s rüzgar hızı için yapılan analizin 2 boyutlu modeli Şekil 4.1.'de sunulmuştur. Model 4 parçaya bölünmüş ve yapılandırılmış çözüm ağı yapısına uygun hale getirilmiştir.



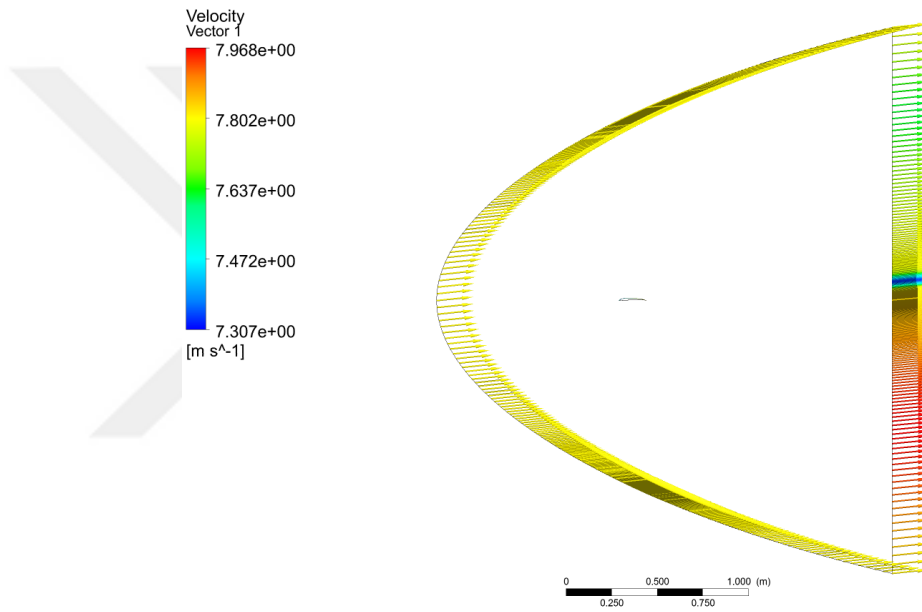
Şekil 4.1. Akış modeli

4.1.2. Çözüm ağının oluşturulması

Çözüm ağı yapılandırılmış olarak Şekil 4.2. gibi oluşturulmuştur. Kanat yüzeyi üst ve alt olarak isimlendirilmiş, giriş kısmı “inlet” çıkış kısmı “outlet” olarak isimlendirilmiştir.

4.1.3. Sınır şartlarının belirlenmesi

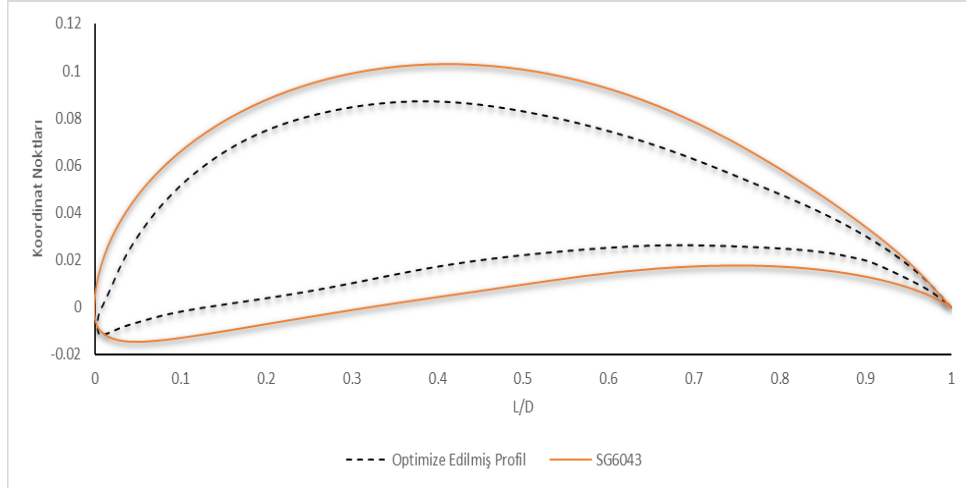
CFD analizleri ANSYS Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak “k- ϵ türbülans modeli” alınmıştır. Akışkanın bağıl hızı 7.90 m/s ve hücum açısı 6° olarak belirlenmiştir. Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon aracı aktif hale getirilerek kaldırma/sürüklenme kuvveti oranının artırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda kanat yüzeyi optimize edilerek yeni kanat profili oluşturulmuştur. Hız vektörleri Şekil 4.4.’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Hız vektörleri

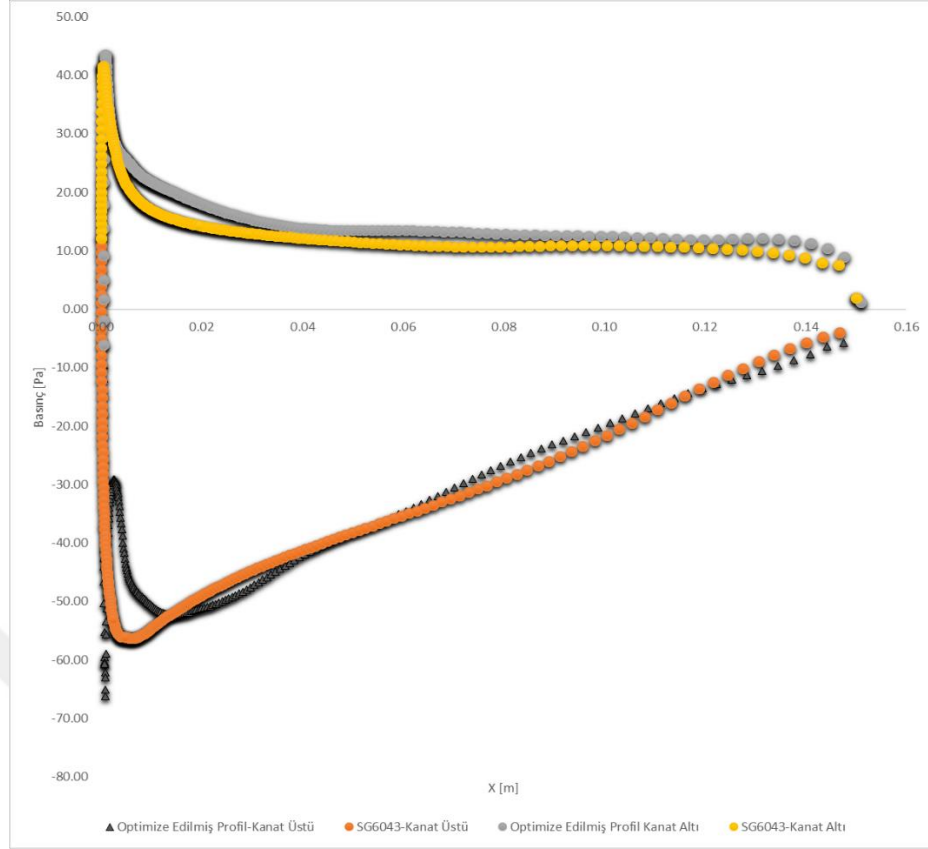
4.1.4. Sonuçların incelenmesi

Ek Çözücü (Adjoint Solver) optimizasyon tekniği ile 65 adımda optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekildeki turuncu renkli profil orjinal profil olan NACA SG6043 'ü temsil etmektedir. Diğer kesikli profil ise optimize edilmiş profili temsil etmektedir. Aralarındaki farka bakıldığında kanat kalınlığı incelmıştır ve kanat profili daha hafif bir yapıya dönüştürülerek optimize edilmiştir. Nihai profil ve referans profil Şekil 4.5.`de verilmiştir.



Şekil 4.5. Profil karşılaştırması

Şekil 4.6.`da kanat yüzeyindeki basınç dağılımı gösterilmektedir. Kanadın üst yüzeyindeki ortalama basınç dağılımı hemen hemen aynı seviyede tutulurken, bunun içerisindeki düşük basınç, yani asıl taşımaya etkisi olan düşük basınç ortalamasında ise ortalama %5 iyileşme sağlanmıştır. Özetlenecek olursa ortalama basınç dağılımı aynı kalmıştır fakat düşük basınç bölgesi %5 genişletilmiştir. Sonuç olarak yapılan optimizasyon sonucunda kaldırma/sürükleme oranı 19.2`den 23.6`ya çıkarılmıştır.



Şekil 4.6. Kanat yüzeyi basınç dağılımı

4.2. Tepki Yüzeyi Optimizasyon Tekniği (Response Surface Optimization)

Bu optimizasyon tekniğinde öncelikle kanadın 3 boyutlu tasarımı Kanat Element Teorisi (Blade Element Theory) kullanılarak “Qblade” ile oluşturulmuştur. Daha sonra ANSYS optimizasyon aracı ile optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

Bu optimizasyon tekniği iki adımda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle hücum kenarı profili ve kuyruk profili optimizasyonu yapılmıştır. Buna bağlı olarak kanat et kalınlıkları bağımlı değişken haline getirilmiştir. Öncelikle tasarım “blade editor” aracılığıyla oluşturulmuştur.

4.2.1. Qblade ile ön tasarımın oluşturulması

“Qblade” yazılımı rüzgâr türbini kanat tasarımında yoğun olarak kullanılmaktadır. Öncelikle NACA profili yazılıma yüklenmiş ve tüm profil Kanat Element teorisine göre öncelikle burada optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucu kanat geometrik özellikleri aşağıda Tablo 4.1.’de verilmiştir.

“Qblade” yazılımı ile oluşturulan 3 boyutlu geometri STL formatına dönüştürülmüş ve bu parametrelere bağlı olarak katı hacme dönüştürülmüştür.

Tablo 4.1. Kanat geometrik özellikleri

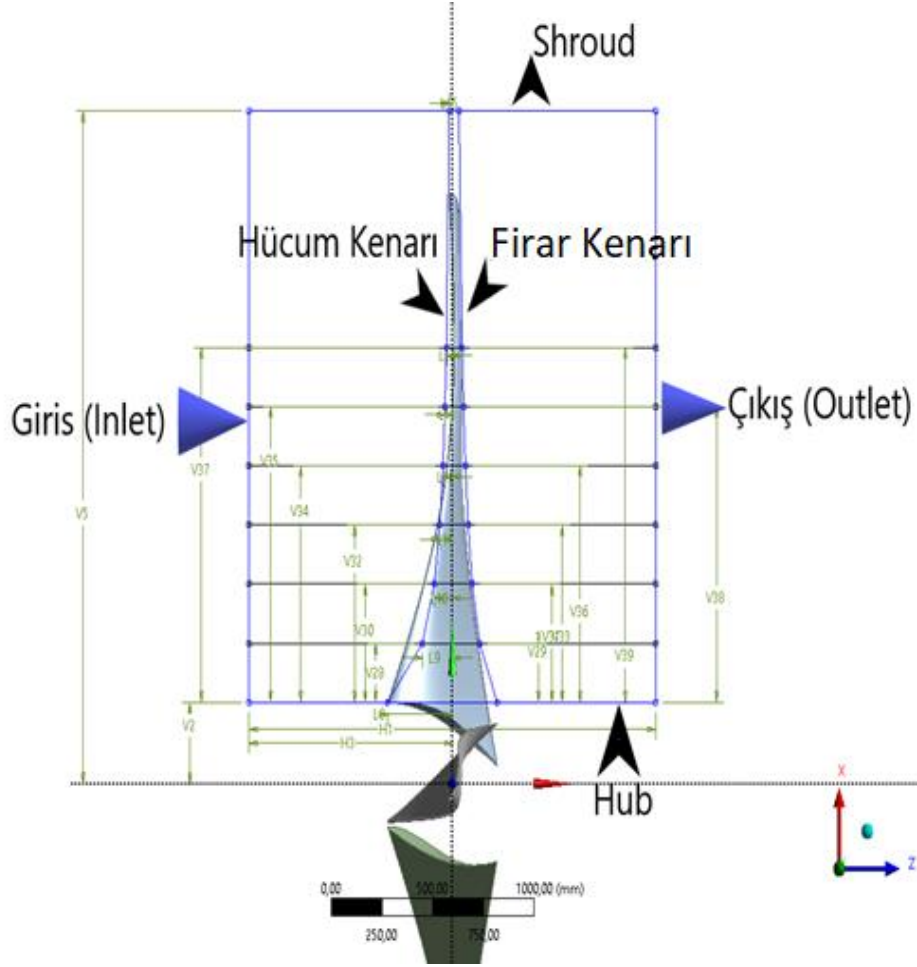
Radyal Pozisyon [m]	Veter Uzunluğu [m]	Bükülme Açısı [der]	Eğim Ekseni Ofseti[m]	Veterdeki Eğim Ekseni [% Veter]	Kanat Profili	İsim
5.00E-02	5.00E-02	7.24E+01	0.00E+00	2.50E-01	Circular	Foil
1.00E-01	5.00E-02	6.16E+01	0.00E+00	2.50E-01	Circular	Foil
1.50E-01	5.00E-02	5.23E+01	0.00E+00	2.50E-01	Circular	Foil
2.50E-01	4.89E-01	3.62E+01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
3.50E-01	4.00E-01	2.68E+01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
4.50E-01	3.33E-01	2.04E+01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
5.50E-01	2.83E-01	1.58E+01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
6.50E-01	2.45E-01	1.25E+01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
7.50E-01	2.16E-01	9.94E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
8.50E-01	1.93E-01	7.95E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
9.50E-01	1.74E-01	6.34E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.05E+00	1.58E-01	5.02E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.15E+00	1.45E-01	3.92E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.35E+00	1.24E-01	2.20E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil

Tablo 4.1. (Devamı)

1.45E+00	1.16E-01	1.51E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.55E+00	1.09E-01	9.05E-01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.65E+00	1.02E-01	3.73E-01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.75E+00	9.64E-02	-9.92E-02	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.85E+00	9.13E-02	-5.21E-01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
1.95E+00	8.67E-02	-9.01E-01	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
2.05E+00	8.25E-02	-1.24E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
2.15E+00	7.87E-02	-1.56E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
2.25E+00	7.53E-02	-1.84E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
2.35E+00	7.21E-02	-2.10E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
2.45E+00	6.92E-02	-2.34E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil
2.55E+00	6.65E-02	-2.56E+00	0.00E+00	2.50E-01	New	Foil

4.2.2. ANSYS design modeller ile tasarım parametrelerinin belirlenmesi

“Blade editor” aracı ile Şekil 4.7.’de gösterilen hücum ve kuyruk kenarı bir eğri denklemine bağlanmıştır. Böylece çizgilerde süreklilik sağlanırken, parametre sayısı düşürülmüştür.

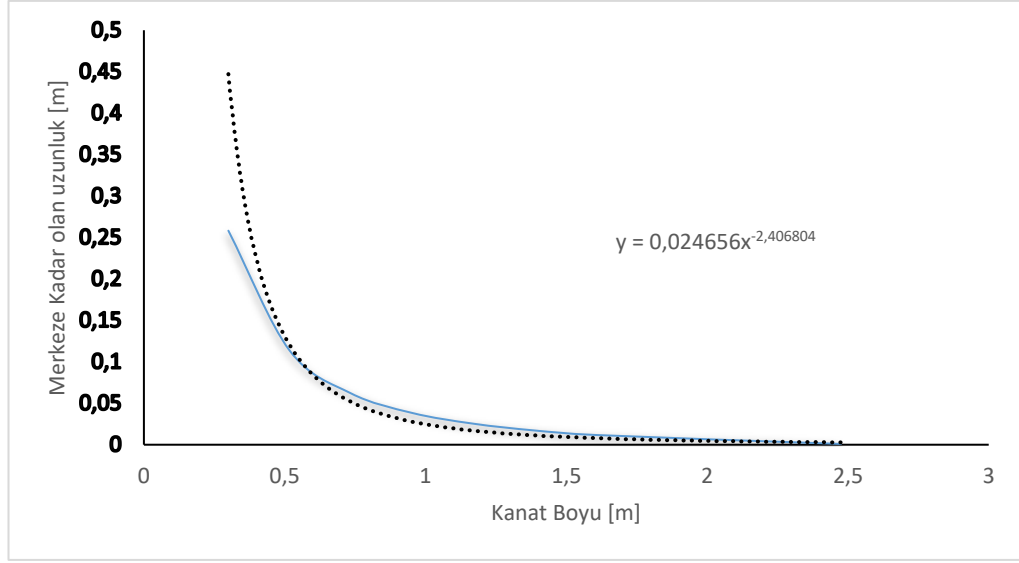


Şekil 4.7. Meridyenel düzlem

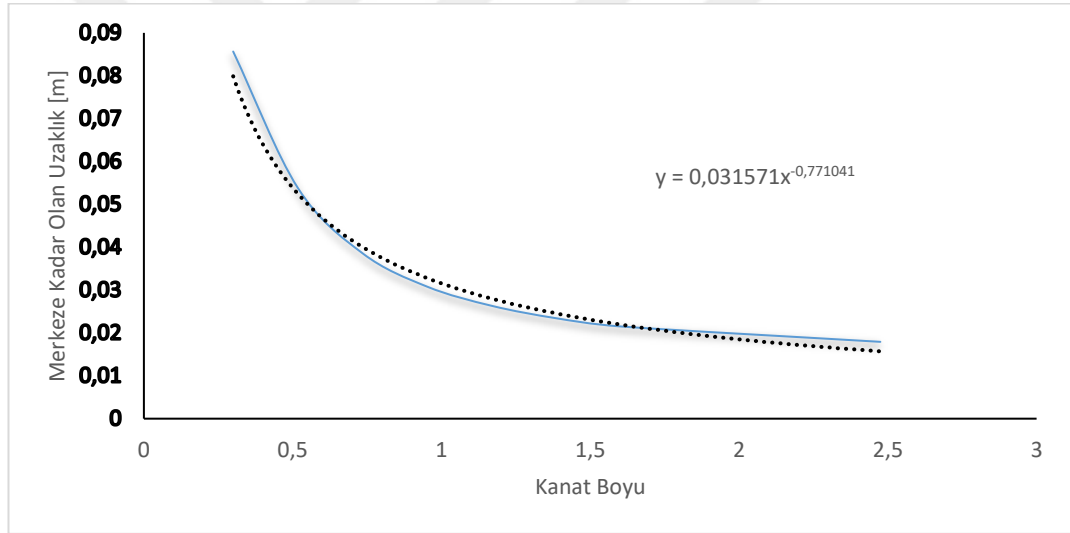
Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.`da hücum ve firar kenarının tanımlanan eşitlikleri gösterilmiştir. Bu eşitlik şu şekilde tanımlanmıştır.

$$y = A \cdot x^B \quad (\text{Hücum kenarı için})$$

$$y = C \cdot x^D \quad (\text{Firar kenarı için})$$



Şekil 4.8. Hücüm kenarı uzunluğu



Şekil 4.9. Fırar kenarı uzunluğu

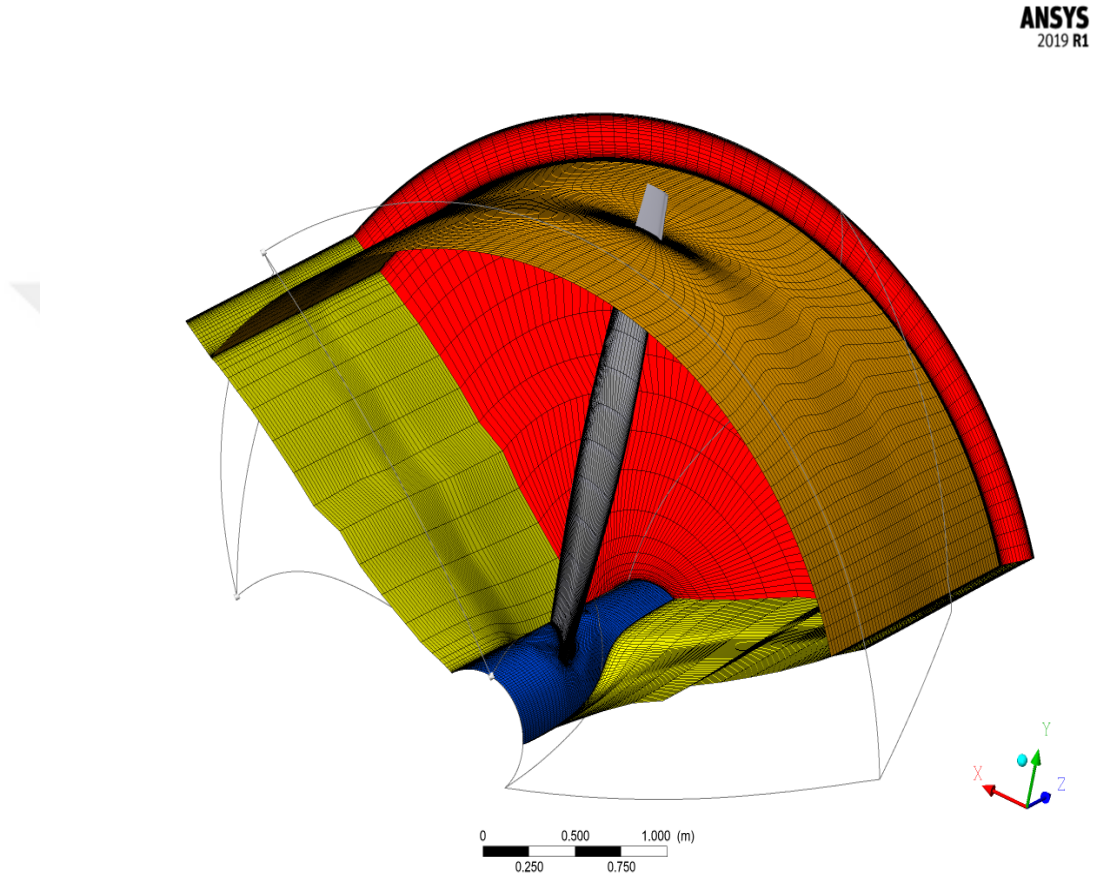
Belirtilen A, B, C, D referans değerleri Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Optimizasyon Parametrelerinin Referans Değerleri

A	0.024656 [m]
C	-2.406804
B	0.031571 [m]
D	-0.771041

4.2.3. Çözüm ağıının oluşturulması

Çözüm ağıının oluşturulması için Turbogrid kullanılmıştır. Böylece periyodik bir dilim için oluşturulan akış hacmi için çözüm ağı oluşturulmuştur. Şekil 4.10.'da bu çözüm ağı gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Turbo grid ile çözüm ağı oluşturulması

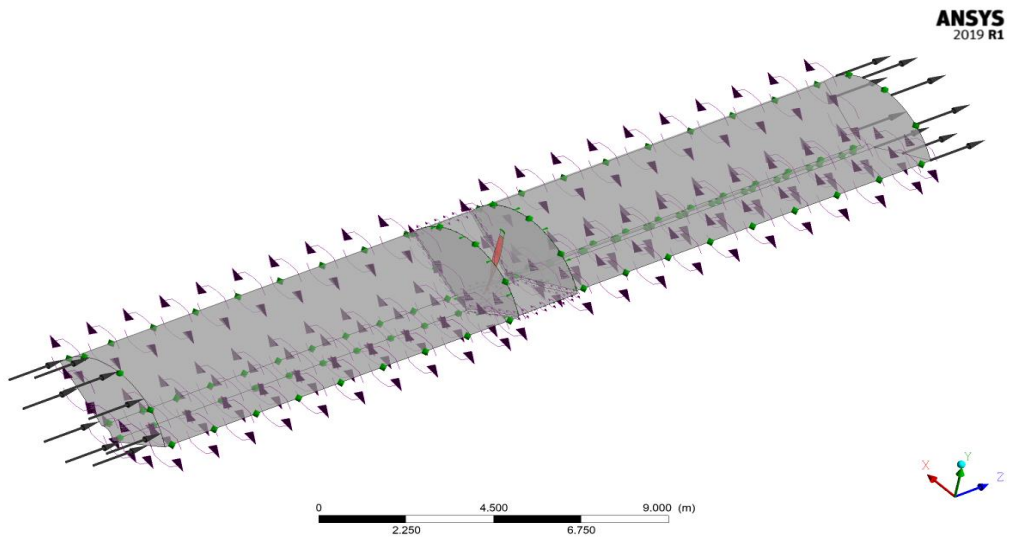
Güvenilir ve doğru sonuçlar alabilmek ve çözüm stabilizasyonunu sağlayabilmek için, ters basınç gradyenlerinin ve ciddi hız değişimlerinin olduğu kanatlara yakın bölgelerde daha küçük ağ elemanları kullanılmıştır. Bununla birlikte, kanat ve duvar yüzeylerinde 5 katmanlı sınır tabaka oluşturulmuştur. Ağ yapısı hexahedral elemanlardan oluşturulmuştur. Çözüm ağı kalitesi Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Çözüm ağı kalitesi

	Değer	Çözüm Ağı Sınırları
Minimum Yüzey Açısı [derece]	29.46	>15
Maksimum Yüzey Açısı [derece]	150.86	<165
Maksimum Eleman Hacim Oranı	15.30	<16
Minimum Hacim [m ³]	$3.70033 \cdot 10^{-13}$	<0
Maksimum Kenar Uzunluğu Oranı	1238.48	<1400
Maksimum Bağlantılılık Sayısı	10	<12

4.2.4. Sınır şartlarının belirlenmesi

Analizler 6 m/s rüzgar hızı ve 80 devir/dakika dönüş hızı için yapılmıştır. Kanat 6 m/s için 1.5 m boyunda modellenmiştir. Optimizasyon için analizler kararlı hal olarak yapılmıştır. Kanat hız oranı 3.48 olarak belirlenmiştir. Türbülans modeli olarak “k-ε türbülans modeli” seçilmiştir. Şekil 4.11.’de akış hacmi gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Akış hacmi

Akış hacmi elde edildikten sonra detaylı bir optimizasyon çalışması yapılmıştır.

4.2.5. Optimizasyon çalışmaları

Optimizasyon çalışması dört parametre için Tablo 4.4.'de verilen aralık için yapılmıştır.

Tablo 4.4. Parametrelerin alt ve üst sınır değerleri

	Alt Değer	Üst Değer
A	0.05195	0.063494
B	0.066599	0.08135
C	-1.5624	-1.2783
D	-0.99625	-0.81511

Amaç parametresi olarak tork (Nm), güç (W) ve verim incelenmiştir. Verimin artırılması hedeflenmiştir. Optimizasyonlar sonucunda kullanılan paket programlar önceden belirlenen parametrelerin alt ve üst sınır değerlerine bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon noktasında bir kaç tasarım adayı elde edilmiştir. Üretilecek tasarımın malzemesine ve eldeki şartlara göre en uygun olan konfigürasyon seçilmiştir. Bu değerler maksimum ve minimum aralık olarak ele alınmıştır. Üretilen varyasyonlar için minimum ve maksimum değerleri Tablo 4.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Üretilen varyasyonlar için minimum ve maksimum değerler

İsim	Minimum Hesaplanmış	Maksimum Hesaplanmış	Maksimum Hata
Tork (Nm)	43.416	47.161	1.202
Güç (W)	363.732	395.096	10.055
Verim	0.388	0.522	0.0038

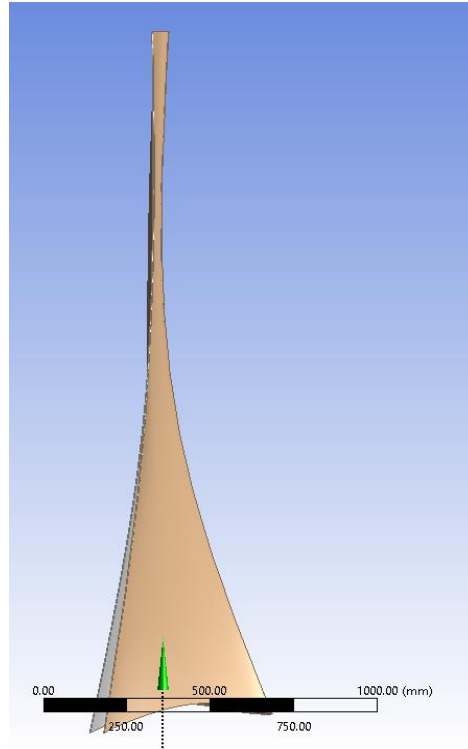
4.2.6. Optimizasyon sonuçları

Optimizasyon sonuçları aşağıdaki Tablo 4.6.'da verilmiştir. Güç 1068 W'dan 1097.3 W'a çıkarılmıştır.

Tablo 4.6. Elde edilen optimizasyon sonuçları

	Optimizasyon Noktası	Referans Değerler
A (m)	0.063345	0.024656
C	-1.3665	-2.406804
B (m)	0.066583	0.031571
D	-0.81627	-0.771041
Güç (W)	1097.3	1068

Sonuç olarak nihai geometri Şekil 4.12.'de gösterilmiştir. Son nihai olarak elde edilen bu kanat geometrisinde kanadın alt ve üst yüzey profili birbirinden farklıdır.



Şekil 4.12. Kanat geometrisindeki değişim

4.3. Optimizasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Referans olarak ilk NACA SG6043 numaralı standart kanat profili ANSYS tabanlı profil Ek Çözücü (Adjoint Solver) aracı ile optimize edilmiş ve Kaldırma/Sürüklenme kuvveti oranı 19.2'den 23.6'ya çıkarılmıştır. Yapılan bu optimize işlemi sayesinde kendine özgün bir kanat profili oluşturulmuştur. Sonucu elde edilen bu optimize çalışmasından sonra bir diğer optimize aracı olan Tepki Yüzeyi Optimizasyon (Response Surface Optimization) tekniği ile hücum ve kuyruk kenar profilleri optimize edilmiştir. Bu optimizasyonlar sonucunda güç 1068 W 'dan 1097.3 W'a çıkarılmıştır. Aynı zamanda güç katsayısı 0.52 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak elde edilen verilerden de anlaşılacağı üzere yapılan optimizasyon çalışmaları türbin verimini arttırmıştır ve hedeflenen değerlere ulaşılmıştır. Bu optimizasyon çalışmaları aynı zaman gelecekte ki çalışmalara yol gösterecektir ve fikir olarak yeni araştırma geliştirme imkanları sunacaktır.

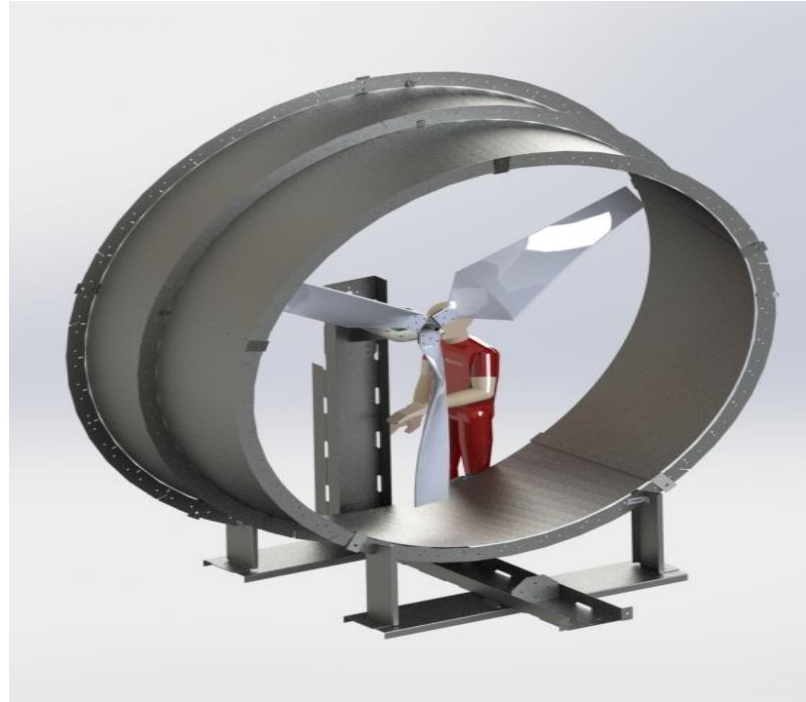
BÖLÜM 5. TASARIM VE PROTOTİP TASARIMIN CFD ÇALIŞMALARI

Bu bölümde öncelikle türbin kanadının ve difüzör kısmının kalıp tasarımları yapılmıştır. Daha sonra prototip tasarım için CFD çalışmaları yapılmıştır.

5.1. Türbin ve Kalıp Tasarımı

5.1.1. Türbin tasarımı

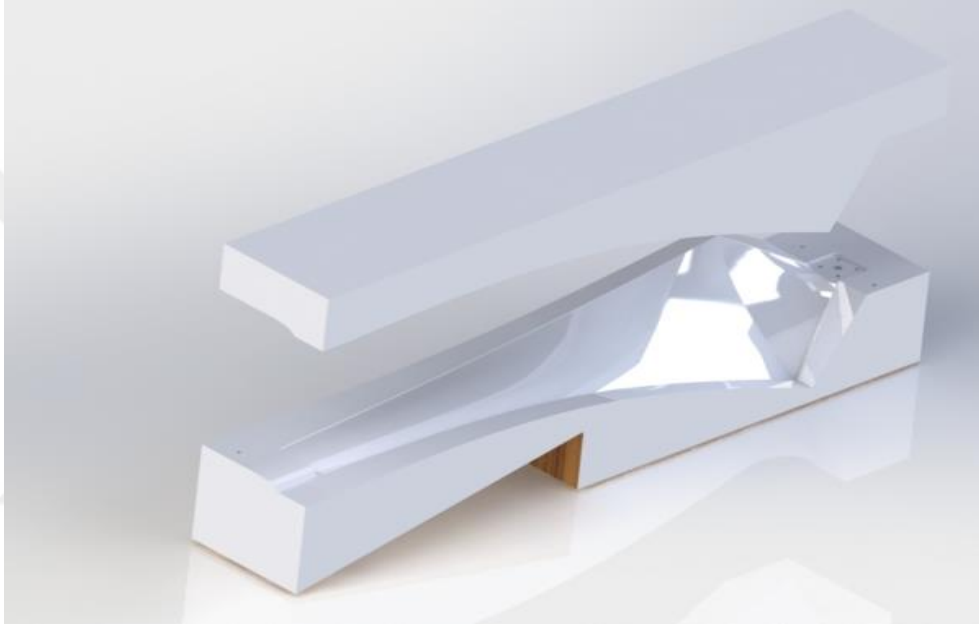
CAD tasarımı nihai optimize edilen geometri üzerinden oluşturulmuştur. Tüm tasarım imalat resimleri Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi çıkarılarak imalata hazır hale getirilmiştir. Tüm konstrüksiyon maliyet avantajı nedeniyle lazer kesim ile üretilmiştir.



Şekil 5.1. Difüzörlü rüzgar türbininin üç boyutlu tasarım resmi

5.1.2. Kalıp tasarımı

Türbin kanadı ve difüzör için iki farklı kalıp tasarımı yapılmıştır. Türbin prototip kalıbı MDF malzemeden üretilmiştir. Difüzör kalıbı ise çelik konstrüksiyon üzerine oturtulmuş kontraplak ile yapılmıştır. Böylece kalıp maliyetleri minimize edilmiştir. Şekil 5.2.'de türbin kalıp tasarımı, Şekil 5.3.'de ise difüzör kalıp tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Türbin kalıp tasarımı



Şekil 5.3. Difüzör kalıp tasarımı

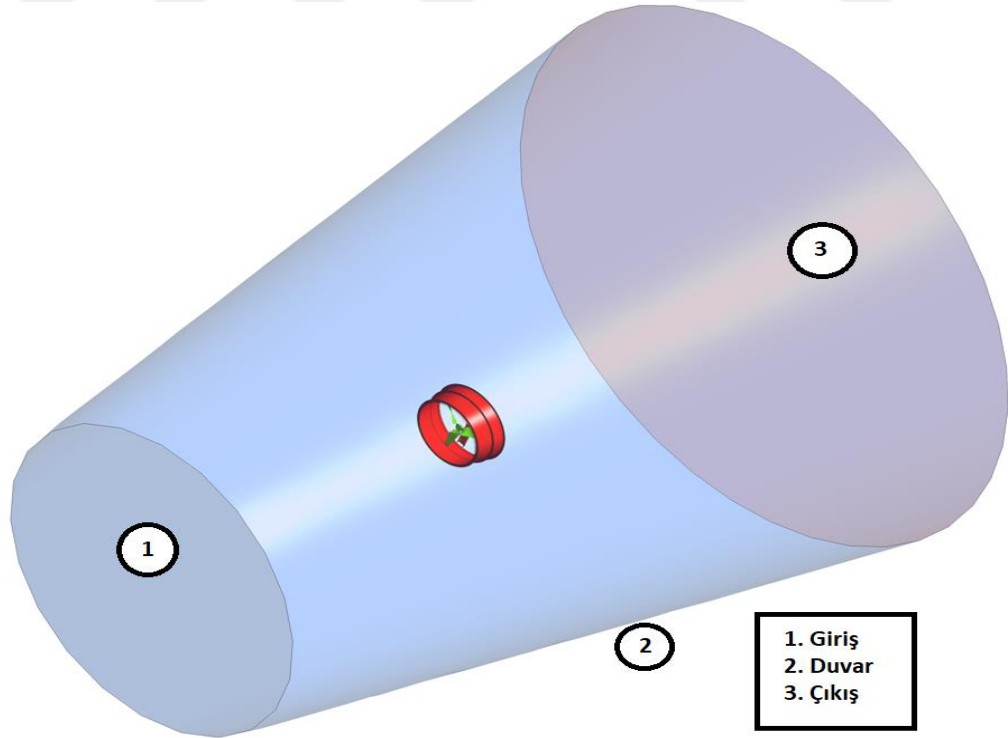
Türbin ve kalıp tasarımları tamamlandıktan sonra prototip tasarım için CFD çalışmalarına geçilmiştir.

5.2. Prototip Tasarımın CFD Çalışmaları

Bu bölümde nihai prototipin tüm konstrüksiyon dahil edilmek üzere CFD analiz çalışmaları yürütülmüştür. Böylece gerçek modele en uygun CAD tasarımının CFD analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Akış hacmi oluşturulması

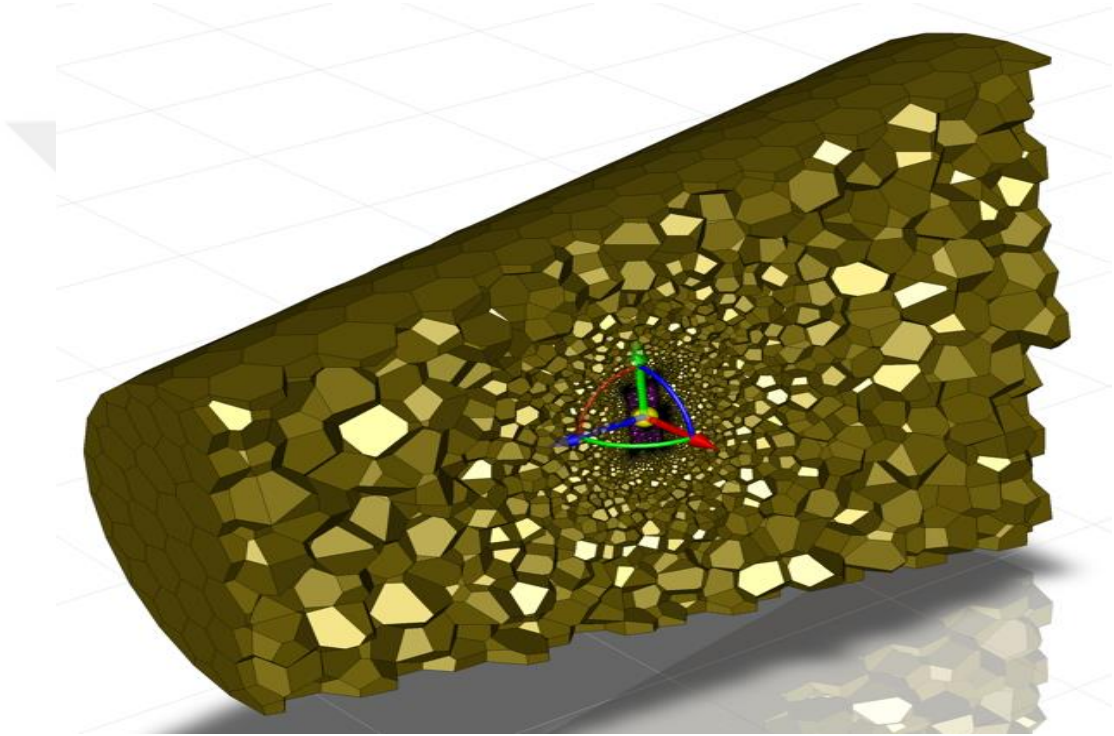
Oluşturulan CAD dosyasına göre dış akışı temsil eden bir hacim ve türbinin dönel hacmini temsil eden hacimden oluşan bir akış hacmi oluşturulmuştur. Dış akış hacmi türbine dik yönde akışı sağlıklı modelleyebilmek amacıyla konik olarak oluşturulmuştur. Tasarlanan difüzörlü rüzgar türbin modelinin akış hacmi içerisindeki isimlendirilmesi Şekil 5.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Akış hacminde isimlendirme

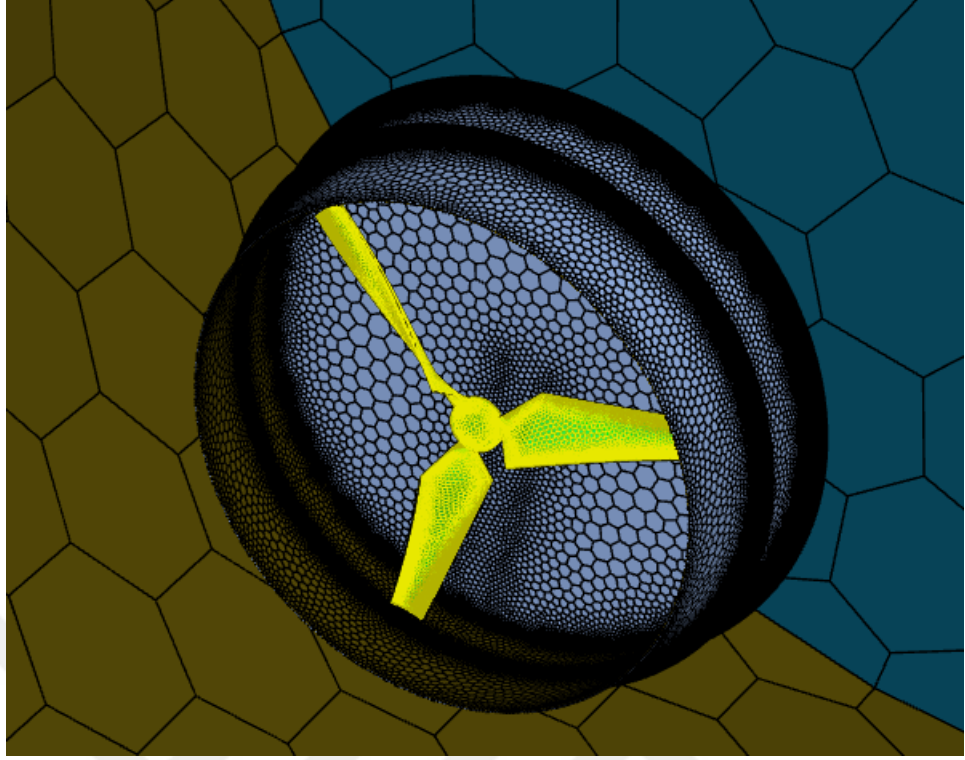
5.2.2. Çözüm ağının oluşturulması

Genel olarak difüzörlü yatay eksenli rüzgar türbini modeli akış hacmi içindeki çözüm ağı Şekil 5.5.'de gösterilmektedir. Bu çözüm ağı ANSYS içerisindeki Fluent Mesh aracıyla oluşturulmuştur. Çözüm ağına bakıldığında oluşturulan ağ hücrelerinin difüzörlü yatak eksenli rüzgar türbini modelinin olduğu yerlerde hassaslaştığı görülmektedir. Yapılan çözüm ağında hücresel eleman sayısı 5708939 olarak hesaplanmıştır.

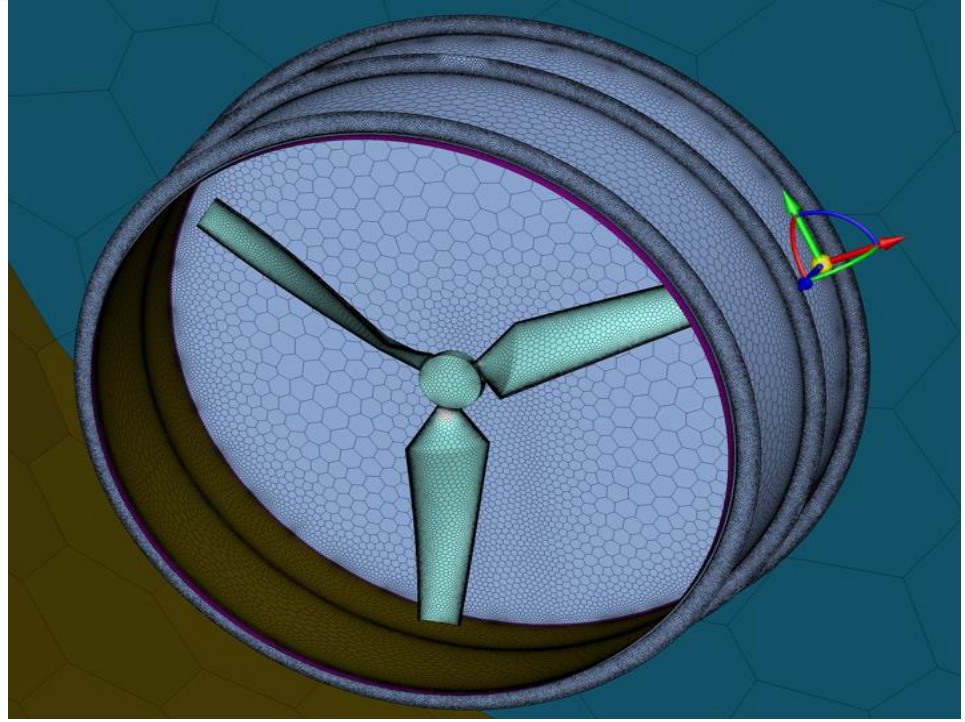


Şekil 5.5. Difüzörlü rüzgar türbininin akış hacmi içerisindeki çözüm ağı

Difüzör ve rüzgar türbini kanatları aynı anda ANSYS içerisindeki Fluent Mesh aracıyla çözüm ağı oluşturulmuştur. Bu çözüm ağında 3 katmanlı sınır tabaka oluşturulmuştur. Kanadın tüm yüzey alanı, hücum kenarı, firar kenarı ve difüzörün tüm yüzeyine daha hassas çözüm ağı oluşturulmuştur. Ağ yapısı polyhedra elemanlardan oluşturulmuştur. Bu çözüm ağı Şekil 5.6. ve 5.7.'de gösterilmektedir.

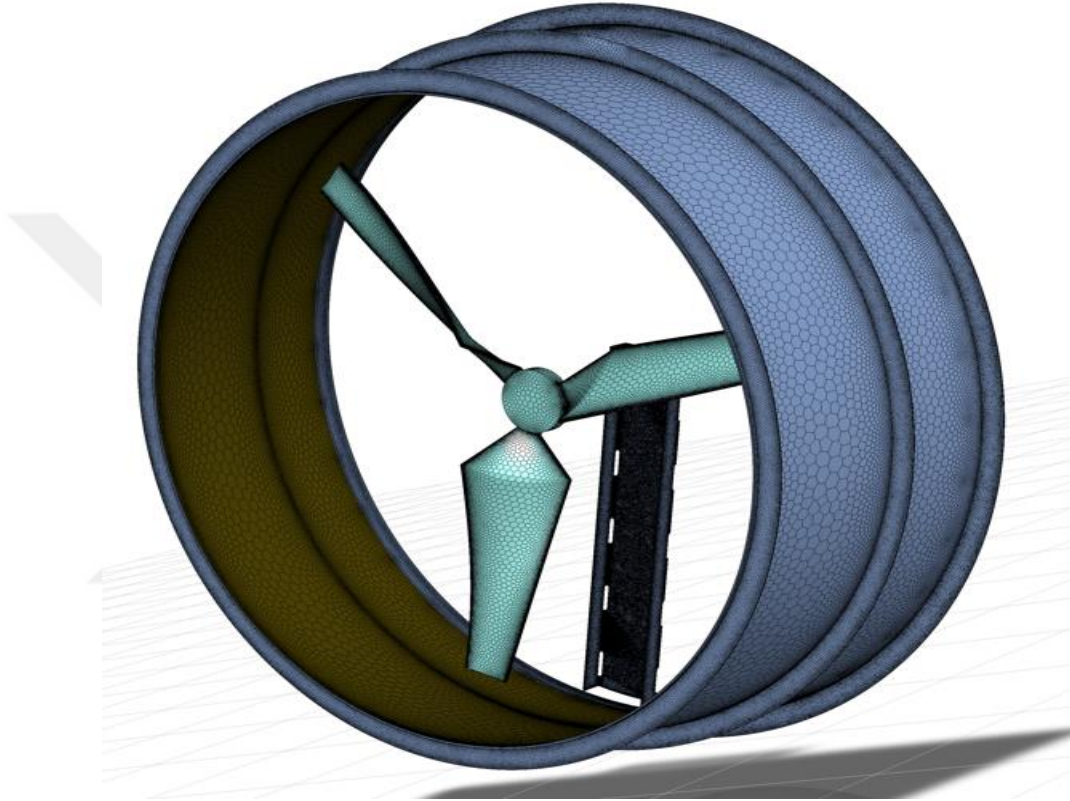


Şekil 5.6. Çözüm ağındaki sınır tabakalar



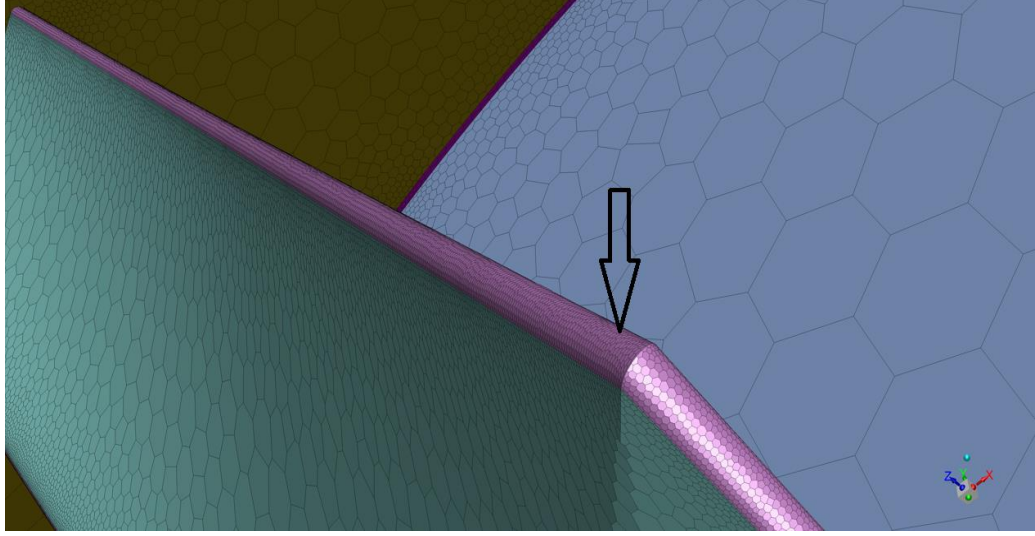
Şekil 5.7. Fluent meshing ile çözüm ağı oluşturulması

Çözüm ağı oluşturulduktan sonra türbin kanatlarını ve rotor kısmını arka kısımdan destek veren destek parçası da çözüm ağına eklenmiştir. Bunun yapılmasının sebebi ise, analizin gerçekteki gibi ortam şartlarını sağlamak ve daha gerçeğe uyumlu değerler elde etmektir. Türbinin destek parçalı çözüm ağı Şekil 5.8.'de gösterilmektedir.



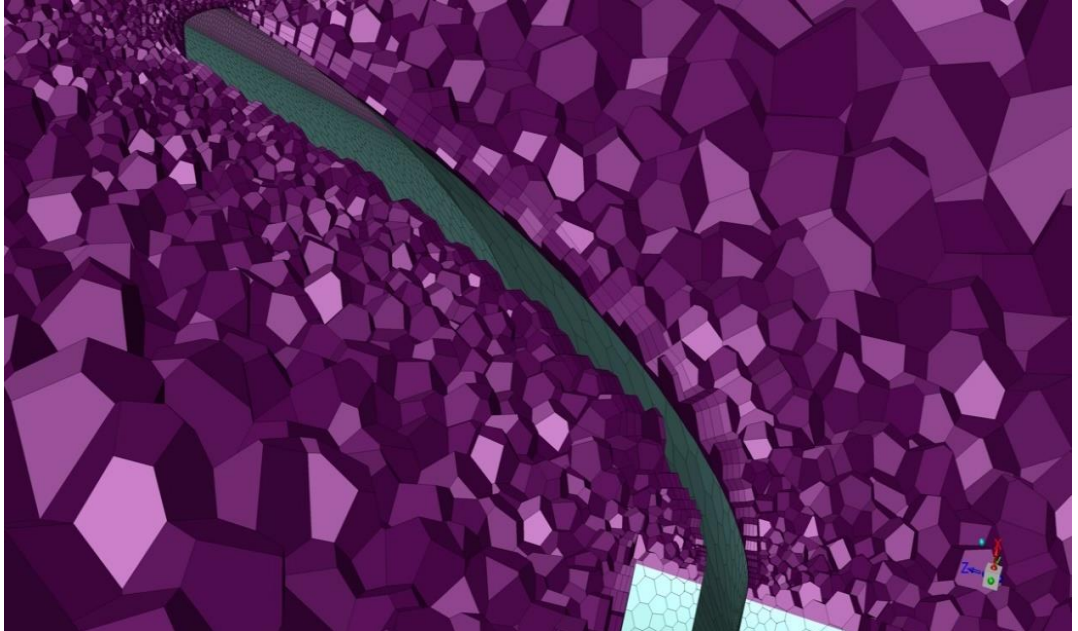
Şekil 5.8. Destek parçası ilaveli çözüm ağı oluşturulması

Elde edilecek verilerin doğruluğunu ve hassasiyetini arttırmak için kanadın hücum ve kuyruk kenarındaki bölgelere daha küçük ağ elemanları uygulanmıştır. Bu küçük çözüm ağ yapıları Şekil 5.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Kanat üzerinde kenar bölgelere hassas çözüm ağı oluşturulması

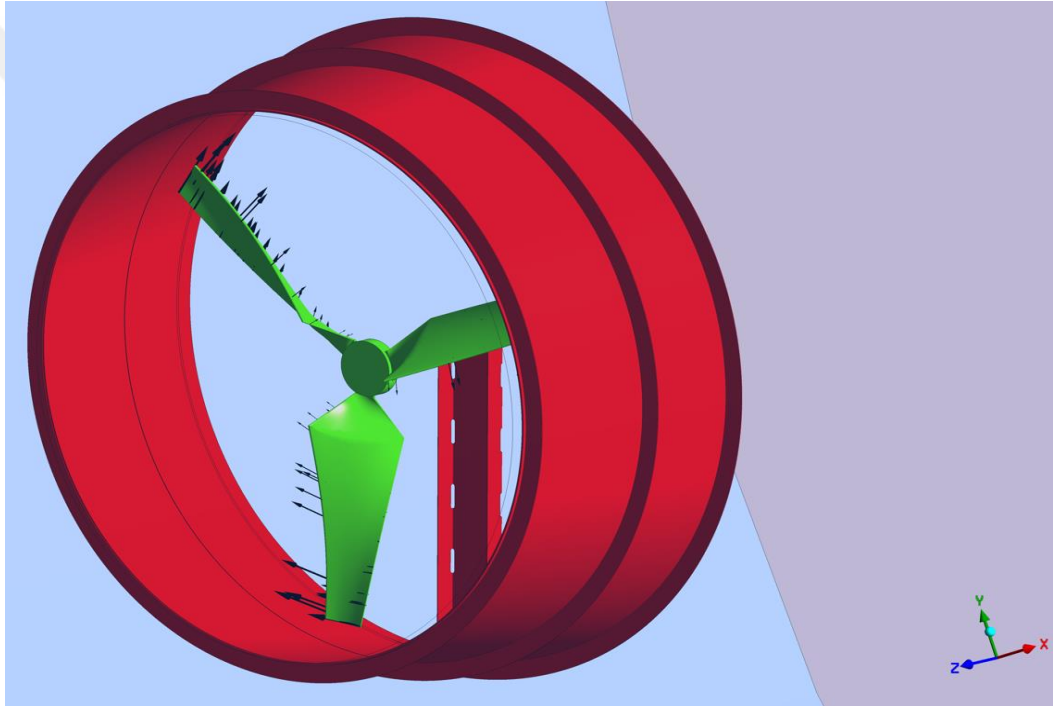
Türbin kanadının kenar bölgelerine daha hassas çözüm ağı uygulandığına ait hücresel eleman dağılımı Şekil 5.10.'da gösterilmektedir. Kanadın kenar bölgeleri incelendiğinde kanada yakın bölgelerdeki elemanların küçüldüğü ve prizma tabakalarının daha da incelendiği görülmektedir. Kanada yakın bölgelerden uzaklaştıkça çözüm ağındaki elemanların büyüdüğü, yani o bölgelerin analiz için çok hassas bir hesaplama gerekmediği görülmektedir.



Şekil 5.10. Çözüm ağı uygulandığında hücresel eleman dağılımı

5.2.3. Sınır şartlarının belirlenmesi

Türbin ve difüzörün akış hacmi içerisinde ki CFD analizleri ANSYS Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Analizde sınır şartı olarak 6 m/s rüzgar hızı ve 80 devir/dakika dönüş hızı için yapılmıştır. Kanat 6 m/s için 1.5 m boyunda modellenmiştir. Optimizasyon için analizler kararlı hal olarak yapılmıştır. Türbülans modeli olarak “k- ϵ türbülans modeli” seçilmiştir. Çözüm ağı oluşturulduktan sonra kanadın dönüş yönü saat yönü olarak seçilmiştir. Seçilen bu saat yönü, yani sınır şartı vektörler ile Şekil 5.11.’de gösterilmiştir.

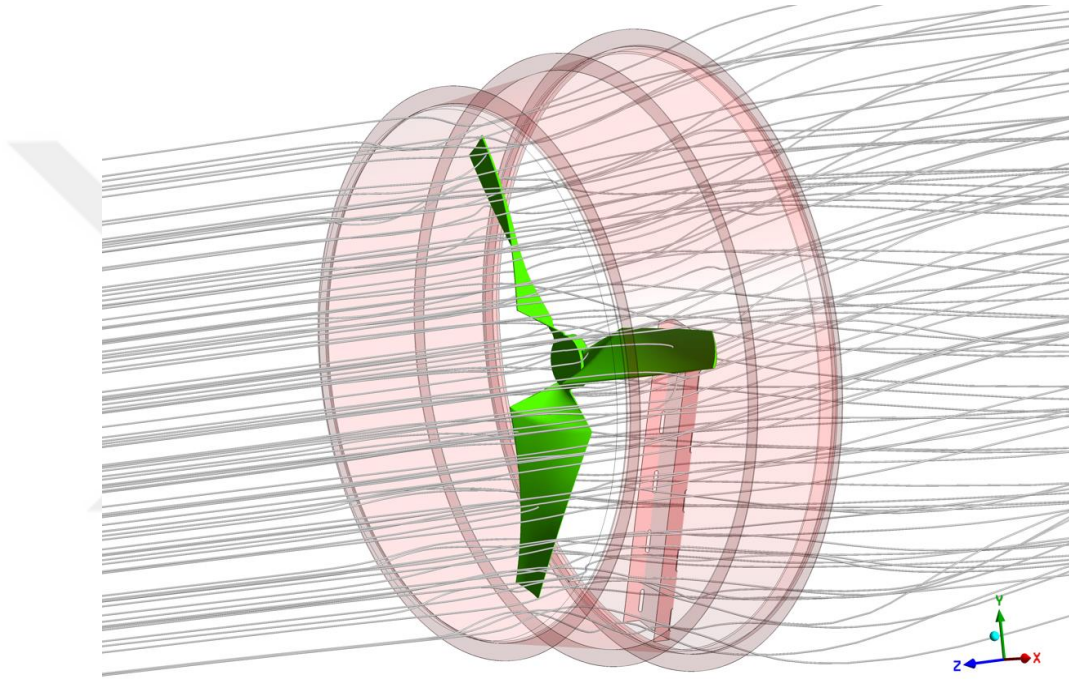


Şekil 5.11. Akış hacminde kanadın dönüş yönü

Elde edilen sonuçlar hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde akım çizgi verileri olarak alınmıştır. Akım çizgileri incelendiğinde akışın bazı bölgelerde türbülansa uğradığı görülmektedir. Rotor kısmını ayakta tutan arka kısımdaki destek parçasının akışı bozduğu görülmektedir. Fakat bu akış bozukluğu CFD analizlerinde dikkate alınmaktadır ve gerçekte türbin imal edilirken bu etken eldeki imkanlardan dolayı bu şekilde üretilmiştir. Fakat ileriki çalışmalarda bu tasarımdaki destek parçası için aerodinamik çalışmalar ve optimize işlemleri yapılabilir.

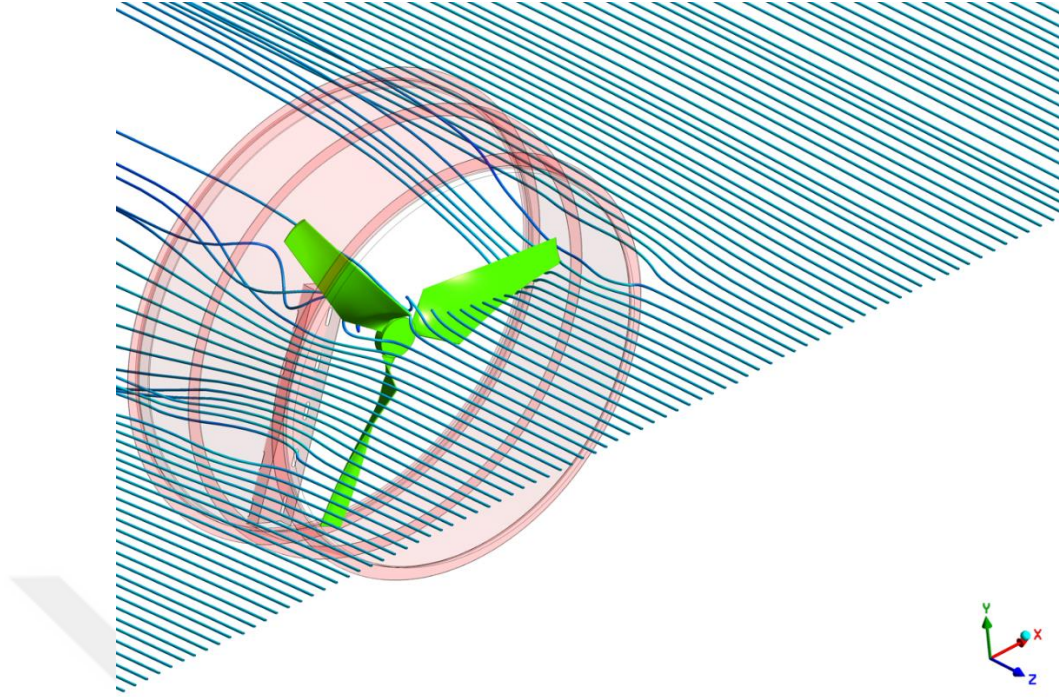
5.2.4. Difüzörlü türbinin CFD akım çizgileri ve sonuçları

Difüzörün dış kısmındaki flanşlar üzerindeki hız akım çizgileri ise akışı pozitif yönde etkilemiştir. Çünkü bu flanşların akışın yönünü bozmayacağı önceden tahmin edilmiştir ve geometri öyle tasarlanmıştır. Bu flanşlar sabit bir şekilde akışın devam etmesini sağlamıştır. Bunu gösteren akım çizgileri Şekil 5.12. ve 5.13.`de gösterilmiştir.



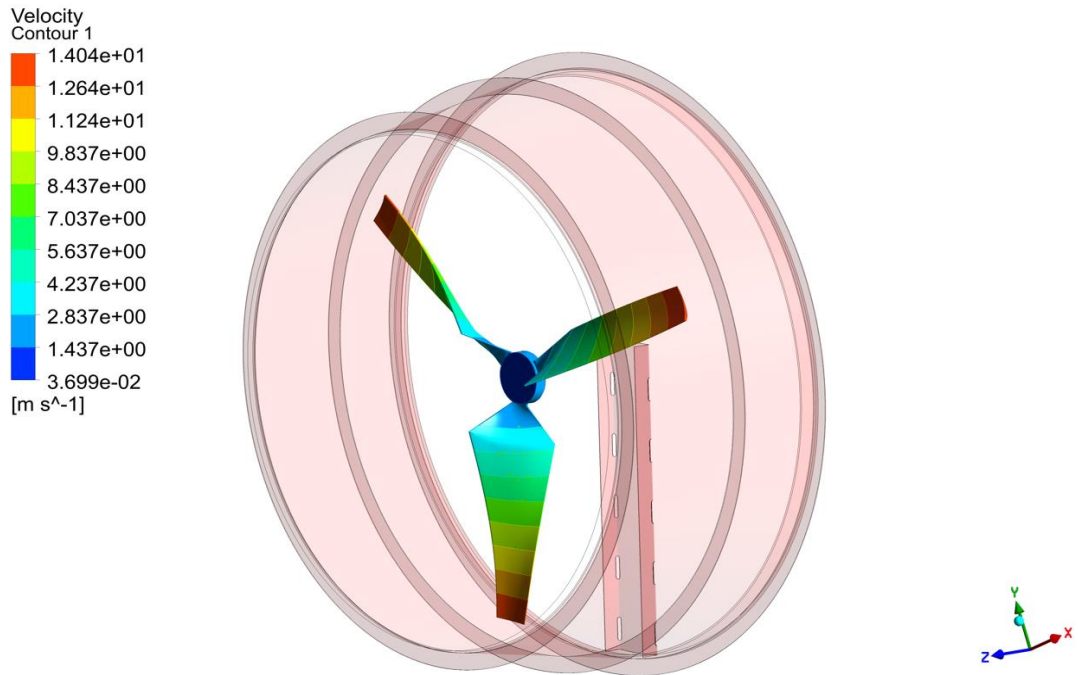
Şekil 5.12. Geometri üzerinde akım çizgileri

Difüzörlü türbinin küçük çaplı ön bölgesinden geçmekte olan hava akışı, arka kısımdaki büyük çaplı bölgeden çıkarken difüzörün arka kısmında vorteks etkisi yaratmaktadır. Çünkü vorteks diğer adıyla girdap tabakaları türbinin hızının sıfıra yakın olacağı yerlerde yani rotor kısmında ve kanadın uç kısmında sonlanır. Kanadın arka kısmında vorteksler oluşmaktadır. Kanatta akış arka bölgelerde dönen hacime dönmektedir ve bu da zaten türbinlerde beklenen bir durumdur. Anlatılan bu vorteks etkisi Şekil 5.13.`da gösterilmiştir.



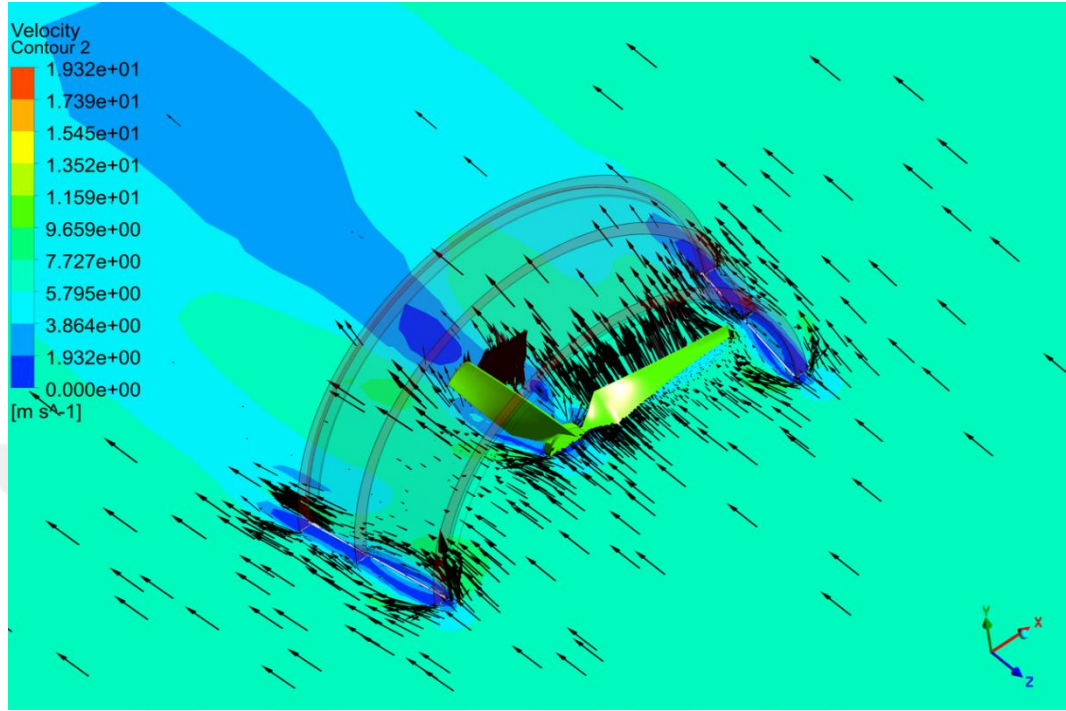
Şekil 5.13. Akım çizgilerinin dağılımı

Son olarak elde edilen sonuçlardan hız dağılımı incelenmiştir. Şekil 5.14.'de gösterildiği gibi kanadın uç kısımlarında hız fazladır. Bu yüzden gerçek hesaplamalarda ve üretimde de kanadın uç kısmı hassas nokta olarak göz önüne alınmıştır ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır.



Şekil 5.14. Hız dağılımı

Ayrıca model olarak tasarlanan difüzörlü rüzgar türbinine gelen rüzgar akışı, hız vektörü olarak da tanımlanmıştır. Bu hız vektörleri Şekil 5.15.`de gösterilmiştir.

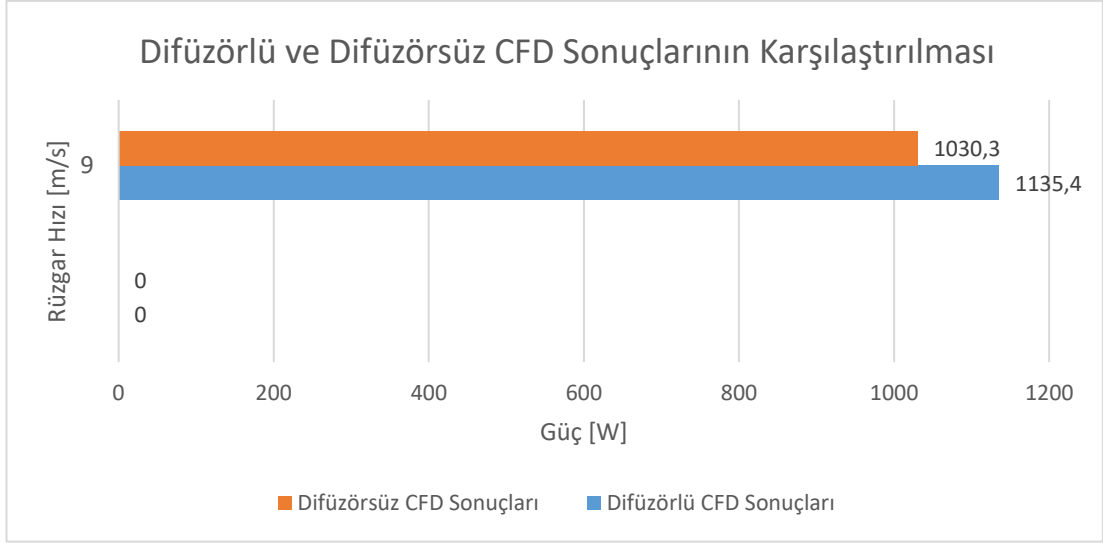


Şekil 5.15. Hız vektörü dağılımı

Sonuç olarak CFD analizinde 6 m/s rüzgar hızında 337 W güç ve 9 m/s rüzgar hızında ise 1135 W güç hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlarda şuana kadar kayıplar dikkate alınmamıştır. Ayrıca hedeflenen 1000 W'lık güç 9 m/s rüzgar hızında yakalanmıştır ve hatta hedef aşılmıştır. Yani CFD analizlerinde 8.5 ila 9 m/s rüzgar hızında hedeflenen 1000 W'lık güç yakalanmıştır. Diğer bir parametre olan tork ise 32 Nm olarak elde edilmiştir. Akım çizgileri, hız dağılımları ve analiz sonuçları CFD çalışmalarında gösterildikten sonra, bundan sonraki kısımda difüzörlü ve difüzörsüz türbinin CFD sonuçları karşılaştırılmıştır.

5.2.5. Difüzörlü ve difüzörsüz türbinin CFD sonuçlarının karşılaştırılması

Türbinin difüzörlü ve difüzörsüz hali CFD paket programına aktarılmıştır ve analizleri yapılmıştır. Analizler sonucu elde edilen CFD sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.16.`de gösterilmiştir



Şekil 5.16. Difüzörlü ve difüzörsüz türbinin CFD sonuçlarının karşılaştırılması

Yatay eksenli rüzgar türbininin difüzörlü ve difüzörsüz analiz sonuçları karşılaştırıldığında, difüzörlü türbinde yaklaşık olarak 105 W daha fazla güç üretildiği gözükmemektedir. Bu farkın sebebinin eklenen difüzörün etkisinden kaynaklı olduğu böylelikle ispat edilmiştir. Analizlerde rüzgar hızı 9 m/s olarak alınmıştır. Elde edilen analiz sonuçları değerlendirildiğinde difüzörün etkisiyle verimde yaklaşık olarak % 8 ila % 11 arasında bir artış gözlemlenmiştir. Yapılan bu difüzörlü ve difüzörsüz CFD analizleri prototipe başlamadan önce bir ön fikir elde etmek ve verim artışını görmek için yapılmıştır. Analiz sonuçlarının gerçek ortam şartlarına yakın olup olmadığı ya da CFD analiz sonuçlarının deney sonuçlarıyla yakın değerler elde edilip edilmediği test çalışmaları kısmında detaylı olarak gösterilmiştir. Bundan sonraki bölümde ise prototip imalatına geçilmiştir.

BÖLÜM 6. PROTOTİP İMALATI

6.1. Türbin Kanadı İmalatı

Türbin kanadı her bir türbin yüzeyi için iki kat karbon fiber ve iki kat cam elyaftan oluşturulmuştur. Türbin kanadının eğilme mukavemetinin düşük olduğu bölgelere 4 kat karbon fiber desteği yapılmıştır. Öncelikle kalıp imalatı Şekil 6.1.-6.4.`da gösterildiği gibi tamamlanmıştır. Öncelikle reçine optimizasyonu yapılmıştır. Ortalama türbinin kanadının bir yüzeyinin 45 dakikada üretildiği ve bir günde reçinenin kürleştirildiği düşünülerek hesaplar yapılmıştır. Reçine ve sertleştirici karışım oranı hesaplamalara göre %30 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1. Türbin alt kalıbı

Aşağıdaki Şekil 6.2.'de üretimi bitmiş olan alt ve üst kalıplar gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Türbin alt ve üst kalıbı

İmalatı tamamlanmış olan alt ve üst kalıpların üzerine uygun şekilde cam elyaf ve karbon fiber kumaş yerleştirilmiş ve her cam elyaf karbon fiber katmanı arasına önceden belirlenen miktarda epoksi reçine sürülmüştür. Sürülen bu reçine epoksi karışımı cam elyaf ve karbon fiberin sağlam yanı sıra mukavemetli bir yapı oluşturmasına yardımcı olacaktır. Aynı zamanda bu epoksi reçine karışımı, karbon fiber kumaşın kalıbın şeklini alması için kullanılmıştır. Belirli bir süre kürlenmesi için kalıp içerisinde bekletilen türbin aşağıda Şekil 6.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Türbin üretimi

Önceden tasarlanan ve hesapları yapılarak optimize edilen kanat tasarımı alt ve üst kısımdan oluşmaktadır. Kanat alt ve üst profili birbirinden farklı olduğu için alt ve üst kalıplar sayesinde imal edilmiş ve Şekil 6.4.'de gösterildiği üzere kalıp alt ve üst

kısmına yerleştirilen cam elyaf, karbon fiber ve epoksi karışımı belirli süre bekletilmiştir.



Şekil 6.4. Türbin alt ve üst kısmı

Şekil 6.5.'de türbin kanadının iki yüzeyinin birleştirilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Türbin kanatlarının birleştirilmiş hali

6.2. Difüzör İmalatı

Diğer yatay eksenli türbinlerden farklı olarak bu çalışmada türbin kanatları etrafına uygun çapta önceden hesaplanmış difüzör sistemi yerleştirilecektir. Şekil 6.6.'da görüldüğü üzere lazer kesimde kesilen parçalar birbirine monte edilmiş ve bu kalıbın alt sistemi oluşturulmuştur. Daha sonra bu sistem üzerine kontra plak yapıştırılmış ve kalıp üretim için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.6. Difüzör alt kalıp üretimi

Tasarımı önceden yapılan difüzör 5 eş parçadan imal edileceği için sadece iki kalıp yeterli bulunmuştur. Belirlenen tasarıma uygun difüzör Şekil 6.7.'de gösterildiği gibi üretilmiştir.



Şekil 6.7. Difüzör kalıp üretimi

Şekil 6.8.'de cam elyaf malzemeden difüzör üretim aşaması gösterilmiştir. Difüzör üretimi Zenginler firmasının desteği ile gerçekleştirilmiştir. Firma bünyesi içerisinde yer alan otomatik cam elyaf püskürtme makinesiyle, cam elyaf epoksi karışımı kalıp üzerine homojen bir şekilde püskürtülmüş ve şekilde gösterildiği üzere püskürtülen malzeme el fırçalarıyla istenilen forma getirilmiş böylelikle daha homojen, rijit bir yapı elde edilmiştir. Bu fırçalama işlemi sayesinde difüzör daha homojen bir yapı haline gelmiş ve istenilen yüzey kalitesi yakalanmıştır.



Şekil 6.8. Difüzör üretimi ilk aşama

Kalıp üzerine püskürtülmüş ve fırçalama işlemi tamamlanmış olan cam elyaf epoksi karışımı bir süre beklemeye alınmıştır. Bu aşama Şekil 6.9.'de gösterilmiştir. Yaklaşık 15 dakika kalıp üzerinde bekletilen cam elyaf epoksi karışımı daha sonra uygun şekilde kenarlardan fazlalıkları kesilerek kalıptan ayrılmış ve bu işlem 3 kez arka arkaya devam etmiştir. Sonuç olarak 5 adet eş boyuttaki difüzör parçaları imal edilmiştir.

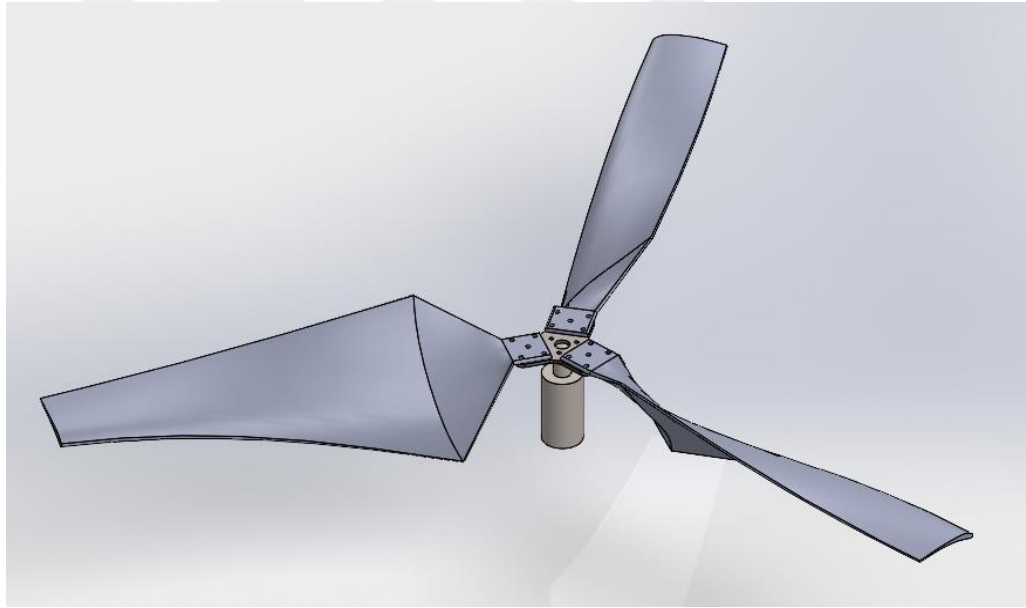


Şekil 6.9. Difüzör üretimi bekletme ve son aşaması

Difüzör imalatı sırasında her bir parçanın homojen ve aynı ağırlıkta olmasına dikkat edilmiştir. Çünkü bu difüzör parçaları montajı yapıldığında dengede ve uygun formda kalabileceği ön görülmüştür. Difüzör üretimi sonrasında bir diğer hassas konu aynı zamanda verimi direkt olarak etkileyen Kanat balans ve titreşim testlerine geçilmiştir.

6.3. Balans ve Titreşim Testleri

Balans testleri özgün tasarımıyla merkeze yerleştirilmiş bir bilya marifeti ile yapılmıştır. Ağırlık dengesi oluşturulana kadar ağırlıklar kanat uçlarına yerleştirilmiştir. Bu uçlara yerleştirilen ağırlıklar aynı moment dengesi için merkeze taşınmıştır. Sonuç olarak oldukça stabil kanat dengesi sağlanmıştır. Bu aşama Şekil 6.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Kanat balansının alınması

6.4. Montaj Çalışmaları

Kalıptan ayrılan 5 adet difüzör parçası uygun biçimde aralarında ek destek parçaları yerleştirilerek zemin üzerinde montajı yapılmıştır. Lazer kesimde üretilen ek destek parçaları uygun civatalar ile birleştirilerek difüzörü istenilen pozisyonda tutması sağlanmıştır. Difüzörün giriş ve çıkış bölümü farklı çaplarda olduğu için montaj kısmında bazı engeller ile karşılaşılmasına rağmen, difüzör montajı istenilen

pozisyonda ve uygun açıda tamamlanmıştır. Türbin montajında Şekil 6.11.`de gösterildiği gibi öncelikle difüzör montajı yapılmıştır.



Şekil 6.11. Difüzör montaj aşaması

Genel olarak istenilen şekile getirilmiş difüzörün genel yapısını daha mukavemetli ve rijit bir yapının elde edilmesi için dış destek parçaları montajlanmıştır. Difüzörün uygun pozisyona gelmesi ve istenilen yere konumlandırılması için tasarımın ayak kısmı Şekil 6.12.`de gösterildiği gibi montajı yapılmıştır.



Şekil 6.12. Difüzör dış destekler ve ayak montaj aşaması

Difüzör oturduğu şase ile birlikte Şekil 6.13.'de gösterildiği gibi dikey pozisyona getirilmiştir.



Şekil 6.13. Difüzörün dikey pozisyona getirilmesi

İstenilen pozisyona getirilmiş difüzör daha sonra diğer önemli parçalar ile birleştirilmiştir. Nihai halde türbini taşıyacak direk, alternatör ve kanat montajları Şekil 6.14.'de gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 6.14. Kanat montajı

6.5. Test Çalışmaları

Test çalışmaları öncelikle 1 metre çapında 3 adet 1 kW gücünde eksenel fanlar ile yapılmaya çalışılmıştır. Fakat fanların önünde düzleştirici olmadığından türbin testinde istenen sonuçlar alınamamıştır. Daha sonra saha testi için farklı rüzgâr hızlarında ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerde rüzgâr hızında gerekli stabilizasyon sağlanamadığından gerilim üzerinden alınmıştır. İlgili ölçüm değerleri aşağıdaki Tablo 6.1.'de gösterilmiştir. Alternatörün boşa limit gerilim değeri 150 V olarak hesaplanmıştır. Türbin 9 m/s rüzgâr hızında yaklaşık olarak 1000 W elektrik üreterek hedeflenen 1 kW'ı yakalamıştır. Önceden yapılan tahminlerde ise 6 m/s rüzgâr hızında 1 kW'ı yakalamaktı. Eldeki fiziki imkânlardan dolayı türbin çapı 4.30 m.`den 2.68 m`ye düşürülmüştür. Fakat türbin güç katsayısı değerlerinde bu boyutlarda oldukça iddialı bir konuma sahiptir.

Tablo 6.1. Ölçüm sonuçları

Rüzgâr Hızı	Güç [W]	Boşa Voltaj [V]	Güç Katsayısı
4.2	81.8	6.1	0.32
5.5	229.6	17.2	0.40
6	298.1	22.4	0.40
6.5	397.9	29.8	0.42
7	489.0	36.7	0.41

Ölçüm sonuçlarının daha stabil yapılması için rüzgâr hızlarının stabil olduğu bir zaman diliminde test ve doğrulama çalışmaları yeniden yapılacaktır. Aşağıda fan ile yapılan ölçüm Şekil 6.15.'deki gibi gösterilmiştir.

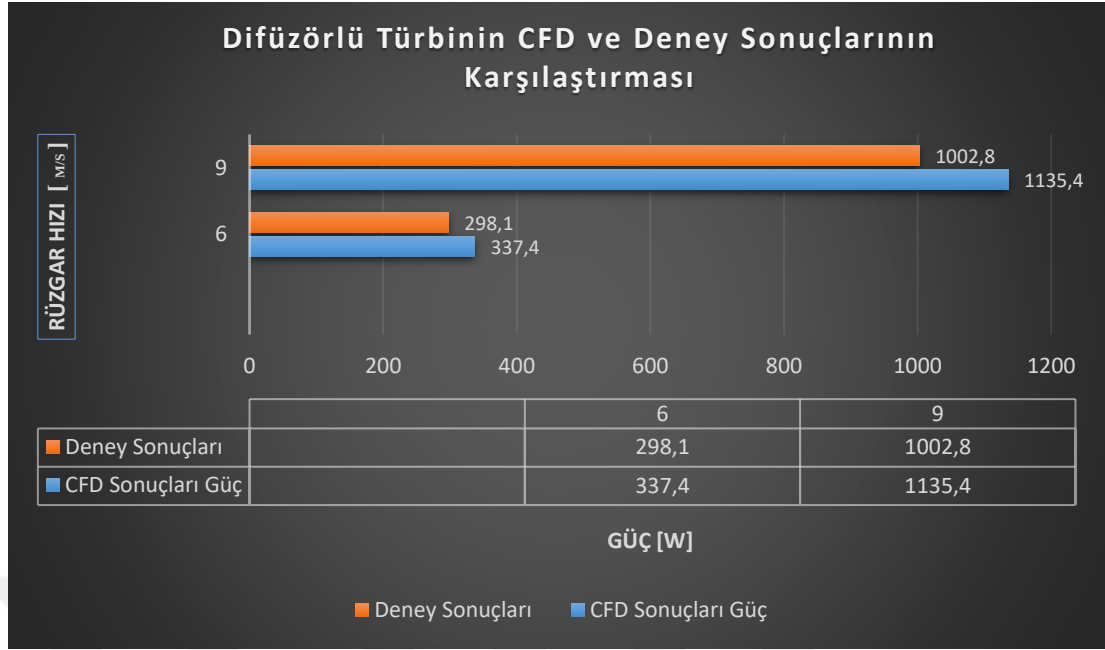


Şekil 6.15. Fan ile yapılmaya çalışılan ölçüm

Fanlar ile test çalışmaları tamamlanan türbinin, bundan sonraki aşamada CFD sonuçları ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.6. Difüzörlü Türbinin CFD ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan CFD analizlerinin sonuçları gerçekteki deney sonuçlarına yakın değerler olduğu daha önceden tahmin edilmiştir. Bu değerlerin karşılaştırılması Şekil 6.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.16. CFD ve Deney sonuçları karşılaştırılması

Zaten elde edilen sonuçlar incelendiğinde ve karşılaştırıldığında rüzgar hızlarına göre elde edilen güç değerleri hem CFD’de hem de deneyde birbirine yakın değerler çıkmıştır. CFD ve deney sonuçlarında tabii ki fark olacaktır. Bu farkın sebebi ise çevre koşulları, kanadın mecburiyetten kesilmesi, kanadın arka kısmındaki rotor destek parçası, ve alternatörün düşük verimi gibi olumsuz nedenlerdir. Ayrıca deney sırasında yapılan ölçümlerde kullanılan üç fan istenilen hava akımını türbine aktaramamıştır. Bu kayıplardan dolayı CFD ve deney sonuçlarında fark ortaya çıkmıştır. Yukarıdaki elde edilen verilerden anlaşılacağı üzere 9 m/s rüzgar hızlarında türbin için hedeflenen 1000 W’lık hedef gücü yakalanmıştır ve hatta hedefi aşılmıştır. Aslında sonuçlardan anlaşılacağı üzere hedeflenen 1000 W’lık güç 8.5 ila 9 m/s rüzgar hızı aralığında elde edilmiştir. Sonuç olarak yeni tasarlanan kanat profilinin ve ilave edilen difüzöründe etkisiyle 9 m/s rüzgar hızında analiz ve deney çalışmalarında verimin yaklaşık %8 ila % 11 aralığında artış gösterdiği elde edilmiştir. Fan ile yapılan test çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve CFD analizlerinden elde edilen sonuçlar bundan sonraki bölümde detaylı olarak değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türbin tasarımındaki performansı etkileyen en önemli parça kanat geometrisidir. Bu nedenle kanat optimizasyonu bu çalışmanın merkezini oluşturmaktadır. Kanat optimizasyonunun yanı sıra en önemli farkındalık olarak, tasarım içerisine difüzör ilave edilmiştir. Difüzör ilaveli yatay eksenli rüzgâr türbinleri yeni nesil elektrik üretim teknolojisidir. Bu tip difüzör ilavesiyle verim arttırılmış ve önceden tahmin edilen sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada öncelikle referans olarak SG6043 numaralı standart olan NACA profili alınmıştır. Bu kanat kesit geometrisi her bir tabakada sabit hücum açısı için ANSYS tabanlı optimizasyon aracı olan Ek Çözücü (Adjoint Solver) ile optimize edilmiştir. Böylelikle hiç bir şekilde giriş parametresine bağlı kalmadan ve aynı zamanda herhangi bir matematik NACA profiline benzemeyen kendine özgün bir profil elde edilmiştir. Elde edilen bu kanat profil yapısı rakipleriyle karşılaştırılmış ve tasarıma eklenen difüzörün verime etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak SG6043 numaralı standart olan NACA profili alınmış ve bu kanat profil yapısı her bir tabakasında sabit hücum açısı için Ansys tabanlı optimizasyon aracı olan Ek Çözücü (Adjoint Solver) ile optimize edilmiştir.

İkinci aşamada ise ANSYS Tabanlı Ek Çözücü (Adjoint Solver) yardımıyla optimize edilen kanat kesitinin 3 boyutlu parametrelerinin optimize edilmesidir. Bu aşamada optimize edilen kanat kesit profili kullanılarak difüzörün ve türbin kanatına eş zamanlı optimizasyon ANSYS Hedef Odaklı Optimizasyon (Goal Driven Optimization) tekniği ile uygulanmıştır. Bu optimizasyon tekniğinde iki boyutlu optimize edilmiş olan profil Qblade yazılı yardımıyla üç boyutlu hale getirilmiştir. Daha sonra üç boyutlu hale gelen kanat tasarımı ANSYS paket programına aktarılmıştır ve burada kanatın hücum açısı, firar açısı, difüzörün boyu, difüzörün eğim açısı, hücum ve firar

açısı gibi parametreler optimize edilmiştir. Burada denklemler Blade Editor aracılığıyla parametrik hale getirilmiştir. Daha sonra türbin kanadı ve difüzör Turbogrid yazılımına aktarılmış ve çözüm ağı oluşturulmuştur. Çözüm ağından sonra daha önceden belirlenen alt ve üst sınır aralığında optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Son olarak konstrüksiyon tasarımı ANSYS'te yapılmış ve gerçek hayata uyarlanması için farklı CFD analizleri yapılmıştır.

Difüzörlü ve difüzörsüz rüzgar türbinin farkını anlayabilmek ve aynı zamanda yapılan difüzör tasarımının türbin verimine katkısını ispatlayabilmek için iki farklı CFD analizi yapılmıştır. Rüzgar hızı 9 m/s olarak alınan analizlerde öncelikle difüzörlü türbin analizi yapılmış ve 1135 W`lık güç elde edilmiştir. Daha sonra difüzörsüz türbin analizi yapılmış ve 1030 W`lık güç elde edilmiştir. Analizlerde elde edilen güç kat sayısı değerleri karşılaştırıldığında, difüzörden kaynaklı verimdeki artış % 8 ila % 11 olarak gözlemlenmiştir. Analiz değerlerinde az bir farkın olmasının sebebini daha iyi anlamak ve kavramak için difüzörlü türbinin CFD ve deney sonuçları daha sonra karşılaştırılmıştır.

Difüzörlü türbinin CFD ve deney sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen verilerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir ve değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarının CFD sonuçlarından düşük çıkmasının sebebi olarak kanadın mecburi olarak kesilmesi, türbin arka kısmındaki rotor destek parçasının negatif etkisi, ortam şartları ve alternatörün istenilen verimde çalışamamış olması gibi kayıplar göz önüne alınabilir. Fakat elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler olması, yapılan çalışmanın doğruluğunu ve gerçek hayata uygulanabilirliğini göstermiştir. Deney sonuçlarında daha yüksek değerler elde edilebilirdi fakat fanlardan istenilen hava akımının alınamaması ve yukarıda bahsi geçen kayıplardan dolayı elde edilen güç, CFD analiz sonuçlarına göre daha düşük elde edilmiştir.

Sonuç olarak CFD analiz çalışmalarında elde edilen 0.52 güç katsayısı 0.42 olarak yakalanmıştır. Aradaki kayıplar yatak ve alternatör kayıpları olarak öngörülmektedir. Aynı zamanda testler sırasında Türbin 9 m/s rüzgâr hızında yaklaşık olarak 1000 W elektrik üreterek hedef limit olan 1 kW'ı yakalamıştır. Difüzörlü türbinin CFD ve

deney sonuçları karşılaştırıldığında verimde % 8 ila 11 artış gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda dikkat çeken bir diğer önemli nokta ise Türbinin devreye girme hızı 2 m/s olarak tahmin edilmekteydi. Fakat türbin 1.75 m/s rüzgâr hızında devreye girebilmektedir.

Ülkemizde türbin ithalatının TÜİK verilerine göre en son ki harcaması 1 Milyar € olduğu düşünüldüğünde, bu çalışma kapsamında oluşan bilgi birikimi ile rüzgâr türbininin ithal ikamesi kazandırılabilir. Bu tip bir difüzör ilaveli ve kanat profili kendine özgün rüzgâr türbini ile uluslararası seviyede ilk olma özelliği taşıyacaktır. Bu geliştirilmiş yeni model difüzör ilaveli rüzgâr türbini ile her bir vatandaş 1 kW'ya kadar kendi elektriğini üretecek ve dışa bağımlı olarak elektrik üretimi yapan elektrik santrallerine bağlı kalınmayacaktır. Aynı zamanda fazladan üretilen elektrik devlete satılacak ve böylelikle insanlar elektriği daha ucuz bir şekilde kullanacaklardır. Bununla birlikte üniversite bünyesinde kurulacak bir firma ile geliştirme çalışmalarının sürdürülebilirliğinin sağlanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Agha, H. N. Chaudhry, and F. Wang, "Diffuser augmented wind turbine (DAWT) technologies : A Review," vol. 8, no. 3, 2018.
- [2] H. Meng, T. Yang, J. Z. Liu, and Z. Lin, "A flexible maximum power point tracking control strategy considering both conversion efficiency and power fluctuation for large-inertiawind turbines," *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017, doi: 10.3390/en10070939.
- [3] S. Heier, "Windkraftanlagen," Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.
- [4] M. B. Ageze, "Design and manufacturing of direct driven standalone wind Energy Conversion System," no. June, 2015.
- [5] Projesi, B., Avcı, B., Yılmaz, T. B., Yöneten, P., & Ataş, D. D. C. (2020). Rüzgar türbini kanat tasarımı ve analizi.
- [6] S. Tripathi, "Performance analysis of diffuser augmented horizontal axis wind turbine.," *Int. J. Adv. Res.*, vol. 5, no. 5, pp. 1251–1259, 2017, doi: 10.21474/ijar01/4240.
- [7] M. Schwarz, "Modellierung einer pitchgeregelten windkraftanlage mit läufergespeister drehstrommaschine," 2002.
- [8] R. M. E. Projesi and R. E. N. Kiral, "Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin yapısal analizi," 2015.
- [9] M. M. Moh Saad, N. Asmuin, and M. Ó. Óskarsdóttir, "A General description and comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines," *IOSR J. Eng.* www.iosrjen.org ISSN, vol. 04, no. 08, pp. 2250–3021, 2014, [Online]. Available: [https://skemman.is/bitstream/1946/19859/1/Margrét Ósk Óskarsdóttir.pdf](https://skemman.is/bitstream/1946/19859/1/Margrét%20Óskarsdóttir.pdf) [http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue8_\(part-2\)/E04822730.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue8_(part-2)/E04822730.pdf).
- [10] M. (2008). Y. E. T. Ayhan, "Yenilenebilir enerji teknolojileri."
- [11] T.C. Enerji ve tabii kaynaklar bakanlığı (2022, 17 Ağustos). Rüzgar. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> adresinden 28 Eylül tarihinde alınmıştır.

- [12] K. Üzümlü, “Yeni nesil teknoloji kullanarak küçük güçlü rüzgar türbini tasarımı ve bilgisayar destekli analizi,” , vol. 151, pp. 10–17, 2015.
- [13] F. König, *Windenergie in praktischer nutzung. räder, rotoren, mühlen, windkraftwerke* Udo Pfriemer Verlag, München 1981.
- [14] W. B. & U. J. Werner:, *Windenergie*. VEB Verlag Technik, Berlin 1989.
- [15] F. (2014). Behçet, R., Gül, H., Oral, H., & Oral, “Rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından malatya ilinin doğu anadolu bölgesindeki yeri.”
- [16] H. Patel, “Performance investigation of diffuser augmented wind turbine,” pp. 313–321.
- [17] E. Vehid, “CFD based design of diffuser augmented wind turbines,” *Wind Energy Sci. Discuss.*, no. October, pp. 1–17, 2019, doi: 10.5194/wes-2019-75.
- [18] J. R. P. Vaz and D. H. Wood, “Aerodynamic optimization of the blades of diffuser-augmented wind turbines,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 123, pp. 35–45, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.06.015.
- [19] S. N. Akour, M. Al-Heymari, T. Ahmed, and K. A. Khalil, “Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions,” *Renew. Energy*, vol. 116, pp. 215–223, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.09.076.
- [20] I. Djodikusumo, I. N. Diasta, and I. Sanjaya Awaluddin, “Geometric modeling of a propeller turbine runner using ANSYS BladeGen, meshing using ANSYS turbo grid and fluid dynamic simulation using ANSYS fluent,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 842, no. Table 1, pp. 164–177, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.842.164.
- [21] B. Kosasih and H. Saleh Hudin, “Influence of inflow turbulence intensity on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model,” *Renew. Energy*, vol. 87, pp. 154–167, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.013.
- [22] R. Bontempo, R. Carandente, and M. Manna, “A design of experiment approach as applied to the analysis of diffuser-augmented wind turbines,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 235, no. February, p. 113924, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113924.
- [23] P. A. S. F. Silva, D. A. T. D. Rio Vaz, V. Britto, T. F. de Oliveira, J. R. P. Vaz, and A. C. P. Brasil Junior, “A new approach for the design of diffuser-augmented hydro turbines using the blade element momentum,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 165, no. December 2017, pp. 801–814, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.093.

- [24] Kumar, A., & Chilukoti, G. T. (2019). CFD Analysis of diffuser augmented wind turbine using dynamic meshing. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(3), 81-84.
- [25] J. A. Al-Nouman and S. J. Ranade, "A novel technique to enhance wind power generation in moderate wind speed," *IEEE 2011 EnergyTech, Energytech 2011*, pp. 1–6, 2011, doi: 10.1109/EnergyTech.2011.5948547.
- [26] H. A. Heikal, O. S. M. Abu-Elyazeed, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, and M. M. S. Mohamed, "On the actual power coefficient by theoretical developing of the diffuser flange of wind-lens turbine," *Renew. Energy*, vol. 125, pp. 295–305, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.100.
- [27] P. Medina et al., "Aerodynamic and performance measurements on a SWT-2.3-101 Wind turbine," *Wind*. 2011, no. October, 2011.
- [28] X. Maucière, "Automatic 2D airfoil generation, evaluation and optimisation using MATLAB and XFOIL," vol. 64, no. 5, pp. 576–581, 2009, doi: 10.1097/00000542-198605000-00006.
- [29] A. Dal Monte, S. De Betta, M. Raciti Castelli, and E. Benini, "Proposal for a coupled aerodynamic–structural wind turbine blade optimization," *Compos. Struct.*, vol. 159, pp. 144–156, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.042.
- [30] C. C. Liao, X. L. Zhao, and J. Z. Xu, "Blade layers optimization of wind turbines using FAST and improved PSO Algorithm," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 227–233, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.08.011.
- [31] Duran, S. (2005). Computer-aided design of horizontal-axis wind turbine blades [Yüksek Lisans Tezi], Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [32] Usta, K. (2005). Düşük maliyetli, küçük güçlü yatay eksenli rüzgar türbin tasarımı [Doktora Tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [33] B. Raeisi and H. Alighanbari, "CFD analysis of oscillating blades for small horizontal axis wind turbines in dynamic stall condition," *Wind Eng.*, vol. 38, no. 5, pp. 499–522, 2014, doi: 10.1260/0309-524X.38.5.499.
- [34] B. G. Monir Chandrala, Abhishek Choubey and Department, "CFD analysis of horizontal axis wind turbine blade for optimum value of power," *J. Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 427–446, 2010, [Online]. Available: http://ijee.ieefoundation.org/vol2/public_html/ijeeindex/vol2/issue4/IJEE_03_v2n4.pdf.

- [35] T. S. Kannan, S. A. Mutasher, and Y. H. K. Lau, “Design and flow velocity simulation of diffuser augmented wind turbine using CFD,” *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 372–384, 2013.
- [36] Kale, S. A., Gunjal, Y. R., Jadhav, S. P., & Tanksale, A. N. (2013, April). CFD analysis for optimization of diffuser for a micro wind turbine. In 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (pp. 257-260). IEEE.
- [37] Elfarra, M. A. (2011). Horizontal axis wind turbine rotor blade: winglet and twist aerodynamic design and optimization using CFD.
- [38] Us, S. (2003). Yatay eksenli rüzgar türbini rotoru tasarımı, [Doktora Tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gökhan ÇEVİKER

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Wildau Teknik Üniversitesi / Berlin Teknik Üniversitesi (Tez) / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Akdeniz Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği	2016
Lise	Manisa Anadolu Teknik ve Teknik Lisesi	2012

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2020-2021	Skylink A.Ş.	Mühendis
2018-2019	Cleopa A.Ş.	Stajyer
2017-2018	Muratex Ltd. Şti	Mühendis
2016-2017	Tanrıver Ltd. Şti	Mühendis
2015-2016	Maxion Wheels Jant A.Ş.	Stajyer

YABANCI DİL

İngilizce, Almanca, Fransızca